工学研究所所報第32号目次

CONTENTS

巻頭言

今年度の活動計画

許　瑞邦*

2009 Annual Activity

Zuihou KYO*

工学研究所は工学部・工学研究科と協力をし、「社会に開かれた工学研究所」実現を目指して努力しておりますので、その現状を報告いたします。

１．白川筑波大名誉教授による「若者と語る」講演会

大学主催で 2000 年ノーベル化学賞受賞の白川英樹筑波大学名誉教授をお迎えし、７月２５日にセレンディピリティの意味・導電性プラステック発見の経緯等についてご講演いただきました。当日は２００人前後の若者（生徒・学生）が集まり、蘊蓄を傾けての講演は彼等に大きな感銘を与えました。特に、若者からの質疑には時間を超えてお付き合いくださり、ご自身の経験を踏まえて丁寧にお答えになる真摯な対応が印象に残りました。

２．テクノサイエンス連続講演会の開催予定

社会への還元の一環として以下の連続講演会を開催いたします。

１）「暮らしの中のサイエンス」: **暮らしの中の音**
　　コーディネーター：原村教授、講師４名
２）「科学と工学の最前線」: **生命の化学ともの作り**
　　コーディネーター：内藤教授、講師４名

３．　神大テクノフェスタ２００９の開催計画

神大テクノフェスタの１０月１６日開催を原村実行委員長の下で計画中です。テクノフェスタは、外部との交流を図るために、研究成果の公開（講演・展示）、企業展示の開催を企画し、産学共同、求人・求職に有意義なイベントであると考えています。院生・研究室・プロジェクト研究の展示のほか、「暮らしとまち」（ｺｰﾃﾞｨﾈｰﾀｰ：山家教授）「暮らしと環境」（ｺｰﾃﾞｨﾈｰﾀｰ：山村教授）を主題とした６教授による講演会と「風と建築物」の特別講演が予定されています。

４．工学研究所共同研究

工学研究所では毎年１３００万円の予算で次年度の共同研究題目を募集しております。今年度は昨年度に決定した４件の研究題目が進行しており、内２件は昨年度よりの継続です。今年度も従来同様題目を募集中です。

５．工学研究所プロジェクト研究（A, B, C）

プロジェクト研究（A,B,C）の制度は、平成１８年度の発足以来順調に進展し、現在プロジェクト研究Ａ５件、Ｂ１件、Ｃ４件が工学研究所で承認され研究が進行しています。新たに１０月よりプロジェクト研究Ａ３件の開始が予定されています。また、今年度は従来の沼田先生に加えて大熊先生、坂田先生、塚田先生、西先生の４名が本研究所の客員教授に着任し、９月現在５名の客員教授、１５名の客員研究員、２名の特別研究員が在籍となります。現在、４件のプロジェクト研究Ｃに関連して４つの課題研究所が開設されています。研究所名（責任者）は以下の通りです。町づくり研究所（山家教授）、大気環境化学研究所（井川教授）、高安心・超安全交通研究所（堀野准教授）、防災まちづくり支援研究センター（荏本教授）。特に今年度発足の高安心・超安全交通研究所設立記念シンポジウムは日本全国よりドライブレコーダに関心のある方に多数ご参加いただきました。今後の交通安全に貢献できること期待しています。本記念シンポジウム開催にあたり、国土交通省及びふくおか IST よりご後援を、学長事務室よりご支援を賜りました事御礼申し上げます。

６．工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子の更新

本学工学関係の研究活動をご理解頂くため、今年度も成田編集委員長の下で標記冊子の内容を更新・発行しました。神大テクノフェスタ等内外のイベント開催時に配布予定です。尚、ご入用の方は工学研究所または産官学連携推進室ご連絡下さい。（本原稿は９月時点での実施済みおよび計画中の話題を纏めました）

---

*所長，工学研究所
Director, Research Institute for Engineering

総説 賞味期限切れ食品再販を防ぎ売り上げ向上を図るための仕入れ・在庫管理

上野　俊夫*

Purchase Planning and Inventory Control for Preventing Resale on Out of Freshness Date Foods and Improving Sales

Toshio UENO*

1. はじめに

近年、食品を販売する店舗において、賞味期限切れの食品を販売し続けて問題となっている事件が頻発している。なぜこのような事件が起きるのか。それは食品を顧客の需要以上に仕入れて賞味期限切れの在庫を多量に出してしまうからである。そしてこの賞味期限は食品の味を保証する期限であって、必ずしも腐って食べられなくなる期限ではないので、店舗によっては廃棄損失を防止するために、賞味期限を変えてそのまま売り続けてしまうからである。また販売店では顧客に少しでも多く購入してもらって売り上げを上げたいとの願望から、食品の品切れによる顧客購買の機会損失を防ぐためにも、余計に仕入れる傾向があると考えられるからである。しかしこのような賞味期限改ざんによって廃棄損失を一時的に防止したとしても、結局そのことがわかってしまうことにより、却って大きな損失を蒙ることになるのである。したがって食品販売店では顧客を偽るような賞味期限改ざんをせず、売り上げ利益向上のための方法を考えることが重要である。本稿ではそのひとつの方法について論ずるものである。

2. 賞味期限改ざんの得失

たとえば、1 個 100 円する賞味期限 3 日の食品を 1 日に 500 個仕入れ、そのうちの 2 割に当たる 100 個が賞味期限切れまでに売れ残った場合、これらのすべてを廃棄処分したときその損失は、

100 円×100 個＝10000 円

となる。このようなことが 1 年間平均的に続くとするならば、1 年を 300 日（休日を除く）とする場合、その損失が 3 日に 1 回発生するので、年間にすると、

10000 円×300 日÷3 日＝100 万円の損失

ということになる。もし賞味期限を改ざんして（賞味期限を延ばしてしまう）売れ残りがなくなれば、これらの損失は防げるわけであるが、このことが発覚して営業停止させられれば、その食品だけでなく、他のすべて販売できなくなるので、たとえば平均 100 円の食品を 50 種類 50 個ずつ仕入れている店であるならば、20 日間の営業停止させられるとすると、

100 円×50 種類×50 個×20 日＝500 万円

となり、大きな損失を被るだけでなく、店の信用失墜という、より大きな損害を被るのである。このように賞味期限を改ざんして表向き廃棄損失を防いだとしても、結局割に合わないということである。

しかしこの例のように年間 100 万円の廃棄損失は、店の売り上げ利益にとってかなり大きな損失であり、もしこのような食品が 10 種類あるとするならば、年間 1000 万円という大きな損失となるわけである。

そこで賞味期限を守りながら損失をできる限り防止し、売り上げを向上させるには、店舗としてどんな考え方をすればよいのか。それに応える方策として「必要な食品を、必要なときに、必要なだけ仕入れる」ということが考えられる。いわゆる食品販売に対する「JIT(Just In Time)」的な考え方である。このような JIT の考え方を

*教授　情報システム創成学科
Professor, Dept. of Information Systems Creation

具体的実現させるには、食品販売店ではどのようなやり方を行う必要があるのか。

3. 顧客の購買動向の把握

JIT を実現させるためには、まず顧客の各食品に対する購買動向がどのようになっているかを知ることが必要である。このためにはある期間にわたる各食品の売上数量を把握することが重要である。各店舗は各食品に対する売上数量の状況を POS データなどから把握することができる。ある期間にわたって把握された売上数量の状態を時系列的に分布させ、さらにそのような分布をさせている要因を把握しておけば、それぞれの食品に対する売上数量がどのようになるかを知ることができ、このことから各食品に対する顧客の購買動向を前もって予測することができると考えられる。売上数量を増減（分布）させるのは、顧客が店舗にやってくる人数と関係しているので、たとえばその要因として、

- 天候（晴れ、曇り、雨）
- 曜日（平日、土、日、祭日）
- 宣伝（宣伝あり、宣伝なし）
- コスト（安い、普通、高い）

などが考えられる。これらの要因をある期間の売上数量と関係させた統計式に導入することによって、対象日の売上数量を予測することができるのである。いわゆる各食品に対する需要予測を行うことができるわけである。もちろんこの需要予測はできる限り精度の高いものでなければならない。それには前述した各期間に対する状況の把握が重要である。すなわち天候や曜日や宣伝などの売上高と関係している要因（これを説明変数と呼んでいる）を適切に把握し、次式に示す需要予測を算出する式に導入することが必要である。

$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\cdot\cdot\cdot+anxn \qquad (1)$$

Y：需要予測値

a_0：誤差項

a_1~an：重み付け係数

x_1~xn：説明変数

4. ダイナミックな仕入計画

予測精度を確率高くするためには、(1) 式に用いるデータを、その時々の状況に最も適合するように選定するダイナミックな仕入計画をすることである。すなわち販売仕入数量の予測精度をできる限り高めるために、時系列的に変化する説明変数のデータを常にそのときの状況に適合するように、それらのデータを更新しながら日々の販売仕入数量を決定することである。このような考え方で仕入計画を行うには、

(1) 仕入計画に用いるデータの期間の決定

(2) データの更新期間の決定

をすることが必要である。すなわち更新期間ごとにその期間分の新旧のデータを入れ替えたものを (1) 式に入れて販売数量を算出することである。

4.1 仕入計画に用いるデータの期間の決定法

仕入計画に用いるデータの期間は、以下の手順によって決定することができる。

手順 1：仕入計画に用いる種々の期間（Li）に対するデータを (1) 式に代入し、各予測対象日の予測値を求める。

$$Yi(Li)=a_0(i)+a_{11}x_{11}(i)+a_{12}x_{12}(i)+\cdot\cdot\cdot+a_{21}x_{21}(i)$$
$$+a_{22}x_{22}(i)+\cdot\cdot\cdot+an_1xn_1(i)+\cdot\cdot\cdot \qquad (2)$$

Yi(Li)：第 i 日目のデータ期間 Li の仕入れ予測値

$a_0(i),a_{11}x_{11}(i),a_{12}x_{12}(i),\cdot\cdot\cdot,an_1xn(i),\cdot\cdot\cdot$：データ期間Ｌi から求めた値

手順 2：Yi(Li)に対する実績値 Si(Li)を求める。

手順 3：Yi(Li)と Si(Li)の差から求めた相対誤差 Ei(Li)を求める。

$$Ei(Li)=Yi(Li)-Si(Li) \qquad (3)$$

手順 4：得られた各期間に対する予測値と実績値から求められた各相対誤差の分散 Vi(Li)を求める。

$$Vi(Li)=\{(\Sigma Ei(Li)-Hi(Li))/(i-1)\}^2 \qquad (4)$$

Hi(Li)：期間 Li に対する予測値と実績値の誤差の平均値

手順 5：Vi(Li)の中で最小値となるデータに対する期間（L）を求める。

4.2 データの更新期間の決定法

仕入計画に用いるデータ期間が決定されたならば、その期間中のデータをどのような期間によって更新すればよいかについては、以下の手順によって決定することができる。

手順 1：仕入計画で決定した期間（L）のデータを用いて、種々の更新期間（d）によって更新されたデータから予測値 Yid(L)を求める。

$$Yid(L)=a_0(d)+a_{11}x_{11}(d)+a_{12}x_{12}(d)+\cdot\cdot\cdot+a_{21}x_{21}(d)$$
$$+a_{22}x_{22}(d)+\cdot\cdot\cdot+an_1xn_1(d)+\cdot\cdot\cdot \qquad (5)$$

$a_0(d),a_{11}x_{11}(d),a_{12}x_{12}(d),\cdot\cdot\cdot, an_1xn_1(d),\ \cdot\cdot\cdot$：更新期間（d）によって更新されたデータ

手順 2：各予測対象日の実績値 Sid(L)を求める。

手順 3：予測値と実績値の差から相対誤差（Eid）を求める。

$$Eid=Yid(L)-Sid(L) \tag{6}$$

手順4 : 各 d の Eid に対する相対誤差の分散（Vd）を求める。

$$Vd=\{(\Sigma Eid-Hid)/(i-1)\}^2 \tag{7}$$

Hid：予測値と実績値の誤差の平均値

手順5 : Vd 中の最小値のデータに対する期間（di）を選ぶ。

5. 店舗における在庫管理

賞味期限が2日以上の食品に対しては在庫が可能なので、次のような事柄を考慮することによって、仕入れ・在庫管理を行うことが必要である。

（1）できる限り賞味期限内に完売すること。

（2）需要変動に適合したダイナミックな発注方式にすること。

（3）発注・在庫保管・在庫廃棄・品切れの総費用は、最小であること。

需要状況に対応させ、賞味期限までに在庫・品切れの発生を少なくする発注方式として、一定の発注期間＋リードタイムとした定期発注方式が考えられる。通常、定期発注方式においては、発注期間（M）、在庫補充のためのリードタイム（R）、計画期間中の単位あたりの（通常1日あたりの）平均需要量（Qh）によって、各期の発注量は以下のように求められる。

$$Qi=Qm-Qoi \cdot\cdot\cdot（食品の場合M＞R） \tag{8}$$

$$Qm=(M+R)Qh+Qs \tag{9}$$

Qi：第 i 期の発注量

Qm：最大在庫量

Qoi：第 i 期の現在在庫量

Qs：安全在庫量

定期発注方式の在庫管理の状況を示すと、図1のようになる。

通常の定期発注方式の場合、図 1 に示すように最大発注量（Qm）が常に一定であるため、各期間における需要状況に応じた発注が必ずしもなされない。このため図1にあるような賞味期限切れが、かなり生じると考えられる。賞味期限切れをできる限り少なくするには、各期間の在庫量を前節で述べた需要予測量（Yi）から直接求めるような在庫管理を行うことが有効と考えられる。また安全在庫（Qs）は、それだけ全体の在庫量を増加させることになるので、在庫をできる限り最小化しようとする JIT 的な思想に反する。したがってそれを入れて品切れを少なくした方が有利か、入れないで在庫を少なくした方が有利かについて、総費用の観点から考えることが必要である。そこでいま、（1）安全在庫を入れない場合と（2）入れた場合のコスト比較をしてみると、まず（1）と（2）の場合の総費用を構成する発注費用（C1）は、計画期間中に発生する回数に 1 回あたりの発注費（Cs）を乗じることによって与えられる。

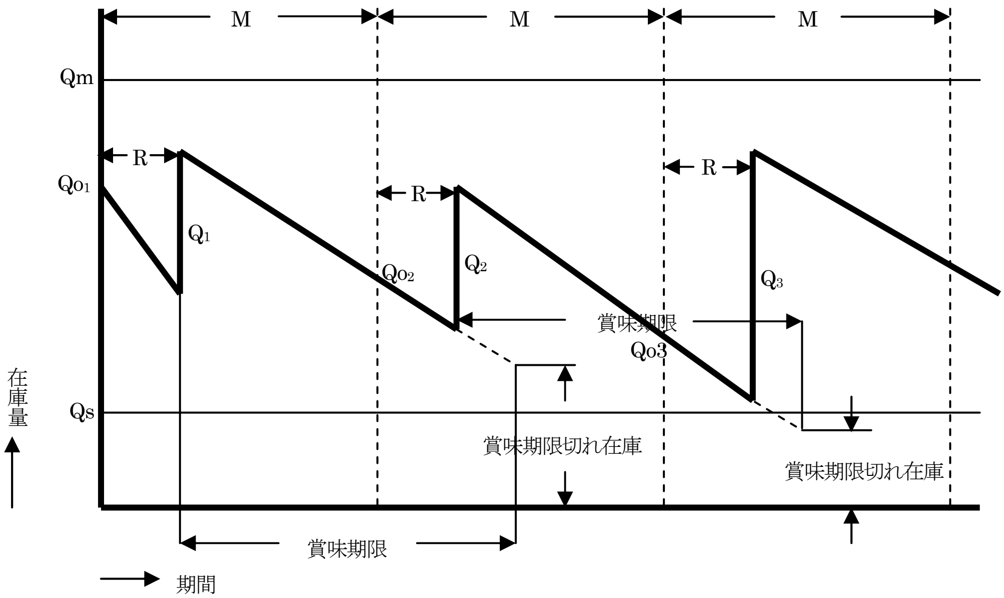


図１　定期発注方式の在庫管理

$C1 = Cs \cdot (D / M)$　(10)

次に在庫保管費用は、(1) の場合のそれを C2 とするならば、計画期間中の平均在庫１個あたりの在庫保管費用(Cv)を乗じることによって与えられる。

$C_2 = Cv[(1/2)\Sigma\{(N+R)Q_h - Qoi\}]$　(11)

(2)の場合(C_2')は在庫保管量に安全在庫(Qs)を合計した量に、１個あたりの在庫費用を乗じることによって与えられる。

$C_2' = Cv[(1/2)\Sigma\{(N+R)Q_h - Qoi + Qs\}]$　(12)

廃棄損失費用（C3 または C3′）は、計画期間中の各期において 在庫補充される直前の最小在庫量（Qbi または Qbi′）の状態にある食品の賞味期限を超える量に１個あたりの廃棄損失費用（Co）を乗じた次式によって与えられる。

$C3 = Co \cdot \Sigma Qbi$　(13)

$Qbi = Max[\{Qoi - R \cdot Qh - (Tsi - M) \cdot D\}, 0]$　(14)

D : 賞味期限（Tsi）と発注間隔(M)間の平均需要量

$C3' = Co \cdot \Sigma Qbi'$　(15)

$Qbi' = Max[\{(Qoi+Qs) - R \cdot Qh - (Tsi - M) \cdot D\}, 0]$　(16)

品切れ損失費用（C4 または C4′）は、計画期間中において、品切れの発生した期間の品切れ量の合計に１個あたりの品切れ損失費用（廃棄損失費用と同様 Co）を乗じることによって与えられる。

$C4 = Co \cdot \Sigma Max\{(R \cdot Qh - Qoi), 0\}$　(17)

$C4' = Co \cdot \Sigma Max[\{R \cdot Qh - (Qoi+Qs)\}, 0]$　(18)

以上より総費用(Tc または Tc′)は、C1～C4 または C1’～C4′ を合計した次式によって与えられる。

$$Tc = Cs \cdot (D/M) + Cv[(1/2)\Sigma[\{(M+R)Qh - Qoi\}] + Co \cdot \Sigma Max[\{(Qoi - R) \cdot Qh - (Tsi - M) \cdot D\}, 0] + Co \cdot \Sigma Max\{(R \cdot Qh - Qoi), 0\} \quad (19)$$

$$Tc' = Cs \cdot (D/M) + Cv[(1/2)\Sigma\{(M+R)Qh - Qoi + Qs\}] + Co\Sigma Max[\{(Qoi+Qs) - R \cdot Qh - (Tsi - M) \cdot D\}, 0] + Co \cdot Max[\{R \cdot Qh - (Qoi+Qs)\}, 0] \quad (20)$$

（19）式と（20）式を比較すると、両式右辺第１項は同一であり、第 3、第 4 項は、双方で相殺されるので、結局第２項の比較において小さい値の方がコスト的に有利であるから、それは Tc、すなわち安全在庫を導入しない方が有利であることがわかる。

以上によって本研究では、安全在庫を持たないで各期間の発注量（Qi）が、仕入れで求められた予測量（Yi）から決定されるような在庫管理方式が提案される。

なお各期間の発注量（Qi）は、予測量（Yi）と現在在庫量（Qoi）から、次式であたえられる。

$Qi = Yi - Qoi$　(21)

図２は本提案方式の在庫管理の状況についての管理図を示している。

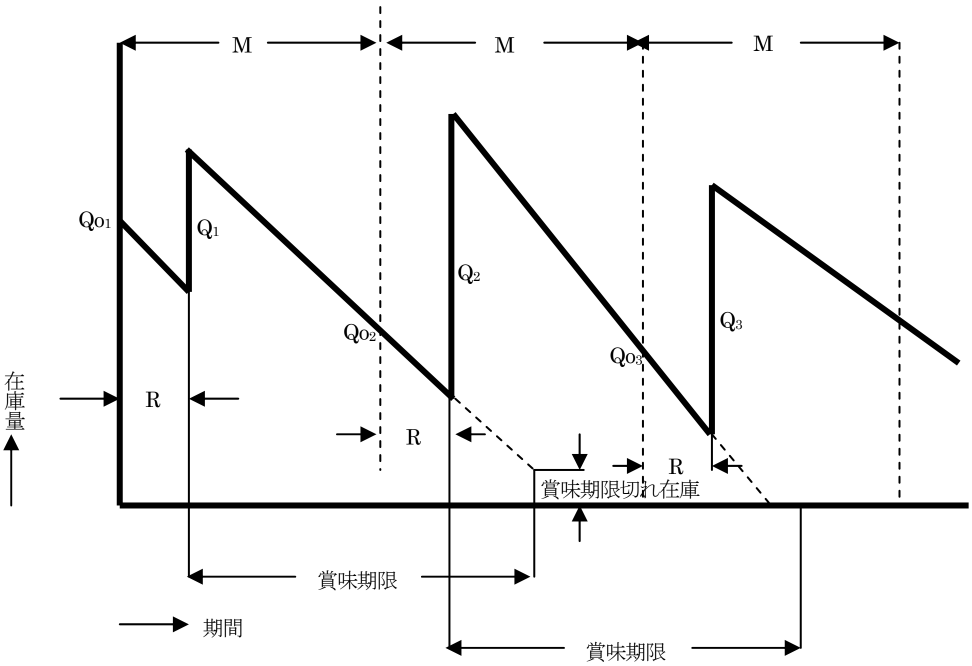


図２　本提案方式の在庫管理図

6. 品切れが生じないような店頭補充在庫

前述した在庫管理については、その店舗の全体の在庫、即ちバックヤードの在庫（店頭にある数量も含む）のことであるが、さらに店舗では顧客に購入してもらえるように、バックヤードから店舗に各食品を補充在庫しなければならない。しかしバックヤードに在庫があるのに店頭品切れが生じてしまうというような状態をよく見かけることである。図3はこの例として、ある店舗のある食品の売り上げ状況を時系列的に示したものである。図3は、この食品が10時には40個店舗にあったものが徐々に売れて行き、13時30分で品切れ状態となり、その状態は14時まで続き、この時点で補充（32個）がなされ、さらに15時、16時と売れて行くという状況を示している。

ここで問題なのは、バックヤードに在庫があるにもかかわらず、13時30分から14時に渡って品切れが生じているということである。13時３０分以前に店舗補充されるべきであったのに、されなかったため30分も品切れが生じ､その間の売り上げ損失を招いているのである。このような状態が度々起こるならば、この店舗での補充についてのルールが十分でなく、店員がこれまでの経験と勘でやっているということになると思われる。そこでこのような品切れ状態を可能な限り防ぐには、次のような店頭補充ルールを考えることが必要である。

まず各食品補充が店員によって時間的に確実にできるようにするためには、店員が一定時間間隔（L）で補充できるようなルールを確立することが必要である。そのためには次式によって最大補充量（Qsm）を求める。

$$Qsm = L \cdot d \tag{22}$$

d：時間間隔（L）あたりの平均需要量

これより各時間間隔時点での店頭補充量（Qsi）を、次式によって求める。

$$Qsi = Qsm - Qri \tag{23}$$

Qri：現在時点での商品店頭残量

以上によって、L という等時間間隔で各時点において Qsi という店頭補充のやり方を提案することができる。この補充方式を示すと図４のようになる。

この補充方式を具体的な数値例で示すと、次のとおりである。

・数値例

あるスーパーのある食品の１日あたりの平均需要量は100個であり、また１日における２時間毎の需要量は、次のとおりであった。

10時～12時：60個
12時～14時：80個
14時～16時：125個
16時～18時：135個
18時～20時：100個

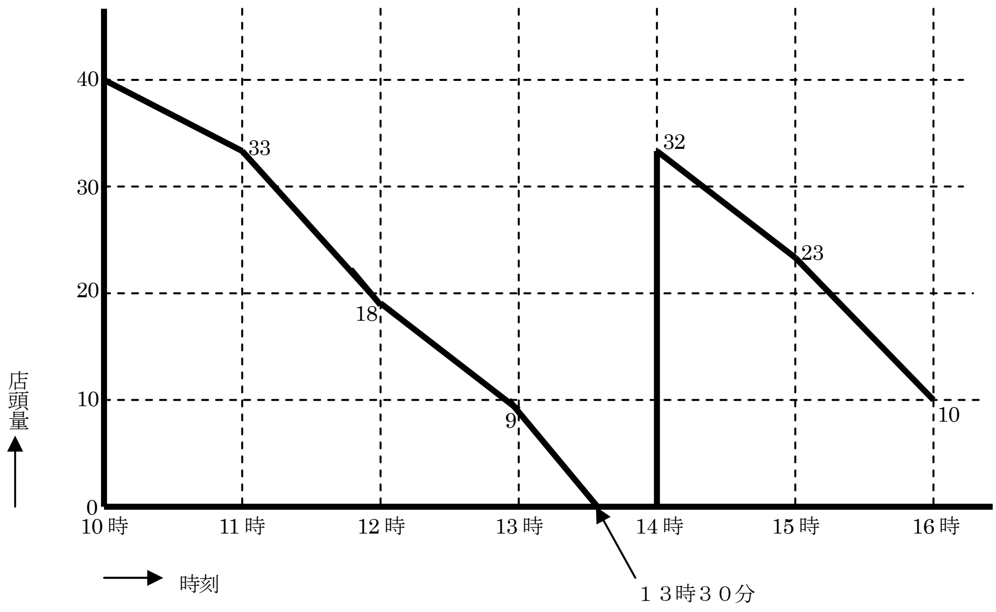


図３　ある食品の売り上げ時系列状況図

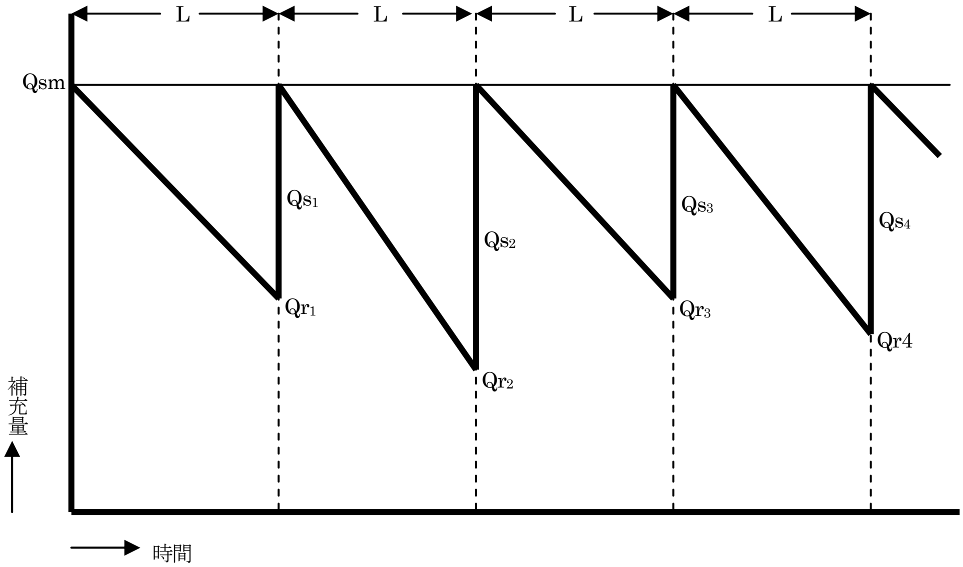


図４　本提案補充方式による補充管理図

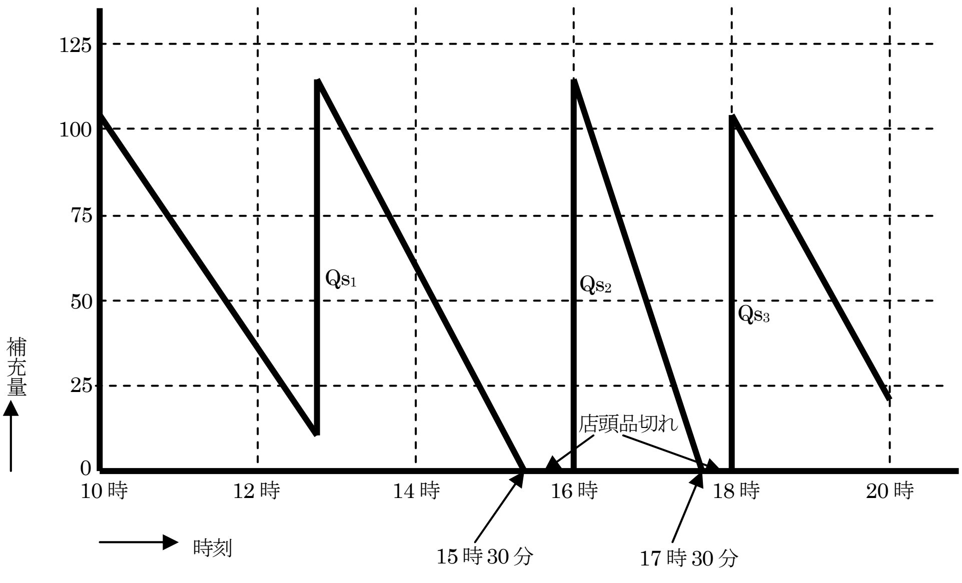


図５　ある店舗での食品の補充状況

この食品の担当店員によるバックヤードから補充状況は図 5 のとおりであり、2 度にわたって店頭での品切れが生じていた。すなわち、15 時 20 分から 16 時までの 40 分間と 17 時 30 分から 18 時までの 30 分間、店頭にない状況（店頭品切れ）を呈していた。この原因は、店頭での店員が補充時刻や補充数量を明確に決めないで、従来の経験と勘で適当に補充していたことによると考えられる。

そこでこのような店頭品切れを防止するために、前述した提案方式を適用し、以下のような補充量の算定を行

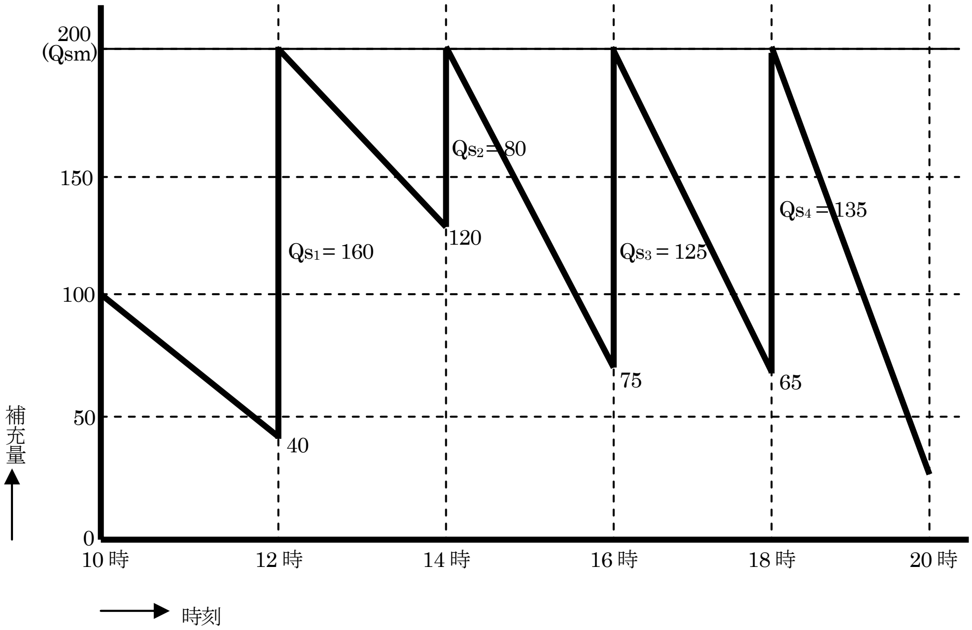


図 6　本提案方式による補充状況

い、2 時間に 1 回の定期補充を行うことにより、図 6 に示されるような品切れの生じない補充管理が可能になるのである。

まずこの場合の最大補充量（Qsm）を次のように算出する（L= 2 時間, d = 100 個）。

Qsm = 2×100＝200 個

したがってこの最大補充量を用いて、前述した 2 時間毎の各時点における店頭残から補充量を求めると、次のように算出される。

・12 時での店頭残量(Qr1) = 100－60 = 40 個
・12 時での補充量(Qs1) = 200－40 = 160 個
・14 時での店頭残量(Qr2) = 200－80 = 120 個
・14 時での店頭補充量(Qs2) = 200－120 = 80 個
・16 時での店頭残量(Qr3) = 200－125 = 75 個
・16 時での店頭補充量(Qr3）= 200－75 = 125 個
・18 時での店頭残量(Qr4) = 200－135 = 65 個
・18 時での店頭補充量(Qs4) = 200－65 = 135 個

図 6 より、現状（図 5）では 2 回の品切れが生じていたが、本提案方式によれば、品切れが発生しないように改善されている。しかも補充間隔が一定であり、各時点での補充量もその時点での店頭残量を 200 個から引けばよいので、補充担当店員にとってもやりやすくなるという利点もある。

7. 結言

本稿では賞味期限改ざんを防止し、売り上げを向上させるためには、「必要な食品を必要なとき必要なだけ仕入れる」という、Just In Time の考え方をとり入れた次のような食品の仕入れ・在庫管理および店頭補充管理のやり方を提案した。

・仕入計画については、対象食品の日々の販売量を顧客の購買に関する要素によって予測し、その予測量によって毎日の仕入れ量を計画する。

・最適な予測期間とデータの更新期間によって予測し、期間中の各要素の重み付け係数を常に最新の値にし、ダイナミックに毎日の仕入れ量を算出する。

・在庫管理については、各期間に対する顧客の需要量に反応するように、在庫量を仕入計画で決定した最適な予測期間とデータ更新期間に応じて決定するようなダイナミックな定期発注方式をとることが、賞味期限切れの在庫廃棄や品切れを少なくする。

・店頭における品切れ状態を防止するための店頭補充管理は、補充を行う店員が一定間隔で補充できるようにし、一定の最大補充量を決定して、それによってバックヤードからの補充を行うようにして行くことが適切である。

参考文献

[1] Haksever, C., Render, Russel, R.S. and Murdick, R.G.: Service Management and Operations, Prentice Hall International,Inc. pp.552-561(2000)

[2] J. Nevan Wright and Perter Race : The Management of Service Operatuions, Second Edition, Tomson Learning pp.149-175(2004)

[3] 菅　民郎：「多変量解析の実際　上」，現代数学社, pp.36-42(2000)

[4] 清水功次:「マーケテイングのための多変量解析」, 産能大学出版部, pp.90-110(1998)

[5] 橋本文雄, 黒澤敏郎, 他：「新版・生産管理システム」, 共立出版株式会社, pp.137-147(1993)

[6] 上野俊夫, 三林洋介：“食品販売店における仕入計画と在庫管理に関する研究”，日本経営工学会秋季研究大会予稿集, pp.52-53(2006)

[7] 三林洋介, 上野俊夫：“店舗商品の適正数量と補充管理に関する研究”，日本経営工学会秋季研究大会, pp.262-263(2007)

総説

サプライチェーンにおける鞭効果(ブルフィップ効果)の測定と制御法

北岡　正敏

Measuring and Controlling the Bullwhip Effect in Supply Chain

Masatoshi　KITAOKA*

１．はじめに

世界経済を混乱に陥れているサブプライムローム問題の現象はサプライチェーンにおける鞭効果(The Bullwhip Effect:ブルフィップ効果)と同じ現象である.これまでのサプライチェーンにおける最大の問題は鞭効果である。鞭効果とは生産流通システムにおいて,消費者のような末端で起きた小さな変動による小波は最終の生産工場においては大波の変動を起こすことである.経済面では景気変動とかビジネスサイクルとも言われている.これまで鞭効果による需要の周期変動,需要の増幅,時間差(time-lag)は企業の経営を大きく混乱させ,悪化させてきた(1).同じ業界の中で他企業を巻き込んで産業界全体の経営を悪化させる原因となり,中には企業衰退の原因になっている.今回のアメリカで発生したサブプライムローン問題もその現象から判断して鞭効果の一種と見なせる。特に基幹産業における技術の衰退はその国のGDP を下げるだけでなく国力の低下をまねき.国家の衰退へと導く.その良い例がアメリカの工作機械業界である(1).アメリカの工作機械業界は 1970 年代に衰退し多くの企業が倒産した.その原因を日本の工作機械産業に技術的,品質的,コストの面で敗北したためだといわれている.しかし.直接の原因は鞭効果により需要の変動に対応できなくなったためである.その波及効果が経営問題から技術問題にまで影響し,日本の工作機械メーカに対抗できなかった.鞭効果は食品産業,繊維,産業自動車産業,半導体業界などあらゆる産業で発生している.鞭効果による影響は不必要な設備投資をし,過剰在庫を保管して一国の経済に悪影響を与えてきた.この報告では鞭効果に関するこれまでの研究成果を整理してみた.そして,鞭効果の発生メカニズムをシステムダイナミクス(System Dynamics)により実際の生産企業をモデル化して解析した.さらに,現在の生産メーカが採用しているサプライチェーンの構造と鞭効果発生のメカニズムをシステムダイナミクスにより解明する.あわせてサプライチェーンにおいて企業で使用している管理手法である情報システム,生産システム,在庫管理,需要予測,輸配送などの各手法から鞭効果発生のメカニズムを明らかにする.最後に,サプライチェーンにおける鞭効果低減の方法について整理してみる.

教授　情報システム創成学科
Professwor.Dep.of Information Systems Creation

２．鞭効果(The Bullwhip Effect)

２．１鞭効果の内容

鞭効果は.たとえば衣料分野に関して,顧客から小売店への需要変動が±5%になると.小売店から衣類メーカ(Garment maker)への需要変動は±10%になる.さら衣類メーカから織物メーカへの需要変動を±20%に増大させる.次に織物メーカから毛糸メーカへの需要変動は±40%に増大することが Stalk and Hout によって報告されている(2).このように下位のエシェロン階層から上位のエシェロン階層にいくほど変動は拡大される.この現象はあらゆる産業や企業経営に見られる.たとえば,図１の上段はアメリカにおける工作機械の受注量と自動車産業の販売高と GDP の関係を示したものである(3).GDP の変動は自動車産業の販売に大きな影響を与えて変動を起こす.さらに,自動車生産において先行投資として工作機械は欠かせないものである.このため,自動車の生産量が変動すると工作機械の受注量の変動は自動車販売高を大きく上回ってくる.このように GDP の変化に対して自動車産業の受注変動から最終的に工作機械の受注量に影響を与えて需要量の変動を大きくしている.過去のデータによればアメリカでは 1961 年から 1991 年までの国内総生産（GDP）は±2%から 3%の範囲で変動してきた.これにともなって自動車産業は±20%の範囲で変動してきた.これにたいして,工作機械産業の受注量の変動は±60%から 80%の範囲で変動してきた.周期変動の大きさに比例して,アメリカの工作機械産業は生産計画に対応できず経営が悪化し多くの企業が倒産をした.図 1 の下段は

アメリカにおける半導体産業の生産高と工業製品の生産高を示している(4).半導体業界の鞭効果による変動は周辺の産業や半導体装置製造業にも影響が及び企業経営に混乱をきたした(4).

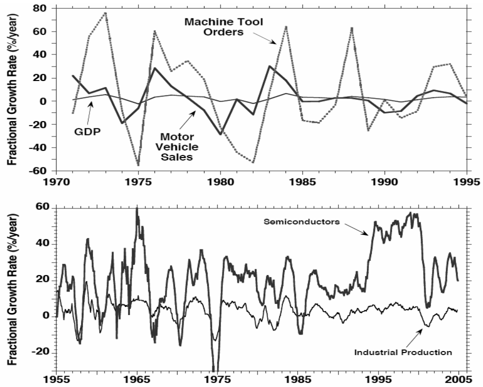


図１ サプライチェーンにおける需要変動と増幅効果（出典：US Federal Reserve.series G211 and N213111)

３.鞭効果の研究

鞭効果の原因を科学的に分析したのはインダストリアル・ダイナミクス(Industrial Dynamics)を開発したフォレスターである(5).フォレスタの後に同じ手法を用いて研究したのが Streman(6),Senge(7)である.この問題を別の手法で検討したのは Magee(8)である.Magee は在庫管理を中心に生産と在庫管理から在庫変動を解析している.マクロ経済面では Holt etal(9),Blinder(10),Blanchard (11)の研究がある.経営工学の面からはLPW(Lee.Padmanabhan and Whang,Cachon,Chen と Samtorengraja(12)がある.特に LPW は数学的に鞭効果を証明した.初期の研究では Streman はビールゲーム(Beer Games)からシステムダイナミクスの変動と遅れの現象から鞭効果を解明した.サプライチェーンの管理者の意思決定の特性を Simon (13),Forrester,Sterman は４段階のエシェロン構造からでモデル化している.Sterman の研究は小売店から工場まで品物の流れを対象にして在庫変動を解析している.特殊なサプライチェーンの構造に関する最近の研究としては Dejonckheere や Towill(14)の論文がある. Towill は最適制御を求めるという目的で研究し,多くの要因がなぜサプライチェーンの構造に影響を与えているかを分析している.サプライチェーンの構造は Bullwhip 効果として特色づけられ Lee,Chen 等は統計モデルを用いた研究をしている.しかし,ここで重要な点は Bullwhip を発生させている原因は構造であって要因ではないという立場である.多くの企業はそれぞれの会社の歴史,文化,経験,業種,技術のような要素に依存しながら独自の構造を展開させている.

4.システムダイナミクスによるサプライチェーンシステムの要因解析

4.1 システムダイナミクスの応用

1960 年代に日本では食品産業において鞭効果により受注量は大きく変動し生産工場の稼動状況は不規則な周期変動をきたし,稼働率の低下,原料の確保,従業員の一時解雇などいろいろな問題点が発生した.このような現象がなぜ起きるのかこの時代にはまだ原因は不明であった.このような中で 1960 年代の食品業界を対象にして生産工程から流通工程にいたる詳細な工程をモデル化して鞭効果の分析をした報告がある(15).

4.2 生産過程の詳細記述モデル

ここでは食品業界の詳細なモデルを用いて鞭効果を分析する.生産工程はバッチ処理方式にしたがって原材料を撹拌し,混合する.次の工程でそれぞれの製品に必要な加工を実施して製品を生産し.最終工程で完成した製品を個々に包装する.そして,包装された製品を必要な単位にまとめて輸送･配送に適した形に包装する.使用する機械は加工機械と包装機械から構成されている.生産統制の流れは平滑化された注文,本社からの注文,適正在庫,受注情報にもとずいた生産計画が立てられる.包装材料在庫は生産計画指示により,望ましい包装材料在庫から計算する.加工機台数は生産指示量と加工機能力から求める.原材料に対する加工能力は加工工程の作業者数と加工機械台数それに加工能力から求める.製品が加工されて完成した品物の包装能力も包装機械の能力と作業者数から求める.図２はこの関係をブロック図で示し,図３はフローダイアグラムで示したものである.レベルに相当するのが原材料在庫.生産計画生産量,加工工程遅れによるものと注文中の外装材料と注文中の内装材料,外材料在庫と内装材料在庫,包装工程作業者人数,加工工程作業者人数,加工機台数.製作中の加工機,包装機台数.製作中の包装機台数があげられる.

4.3 流通過程の詳細記述モデル

流通過程の中でメーカ側としては配送センター（デポ,倉庫など）までであるが,分析の対象として卸店までとした.小売店から卸店への受注にしたがってシステムに変動が生じる,卸店での受注残は小売店からの受注と卸店からの出荷量に応じて変化する.メーカの地域別の販売部に対して卸店から発注がなされる.地区販売部での受注残は卸店からの発注レイトと配送センターからの出荷

量により変化する.地区販売部は受注残と卸店からの発注レイトにより本社に対して発注する.本社では地区

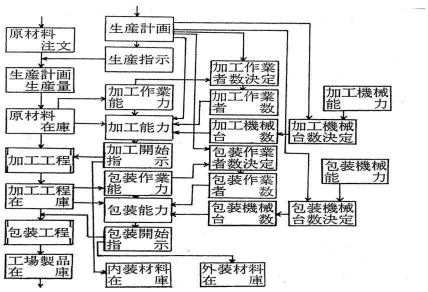


図2　生産システムのブロックダイアグラム

販売部の発注レートにしたがって工場に発注する.

本社の受注残は販社からの発注レートと工場からの生産計画にしたがって変化する.工場では生産計画が立案されるが,工場での受注残は工場倉庫からの出荷レートと本社からの発注レートにより変化する.工場で生産された製品は工場倉庫に入庫され出荷要求と出荷能力にしたがって配送センターに輸送される.出荷要求量は発注レートと工場在庫により求める.　図 4 はこれらの関係をブロック図で示し.図5は流通過程のフローダイアグラムで示す.

4.4 シミュレーション結果

ここではステップ需要のみを取り上げる.ステップ型需要に対して生産システムは図 6 のようなり,流通システムは図7のようになった.加工工程は55週目にピークになった後で変動を繰り返しながら定常状態になる.包装工程も 60 週目にピークになった.包装材料の在庫は 70 週目にピークに達した.加工機や包装機の台数は40週目から定常状態になった.流通システムも卸点の受注残と地区販売部の受注残は 40 週目にピークになった後は変動しながら定常状態になった.以上のようなシミュレーション結果の特性結果は情報の遅れ,生産の遅れ,輸送の遅れ,事務処理の遅れなどから発生する現象である.システムダイナミクスを工程分野にまで詳細に分析しても解析の結果は企業内の,生産在庫変動,流通変動などの単純化したモデルの結果と同じ現象になった.このため,鞭効果を発生させている要因を追求するには図3,図5のような詳細なモデルを利用する必要はなく,単純化したモデルでも解析は可能である.鞭効果をサプライヤを含めたサプライチェーン面から解析するにはより単純化されたモデルでおこなっても同じ現象が得られる.

5.サプライチェーンの構造解析

5.1 詳細モデルから簡易モデルによる分析

サプライチェーンを対象にして解析するためできるだけサプライチェーンのモデルを簡略化して分析する.

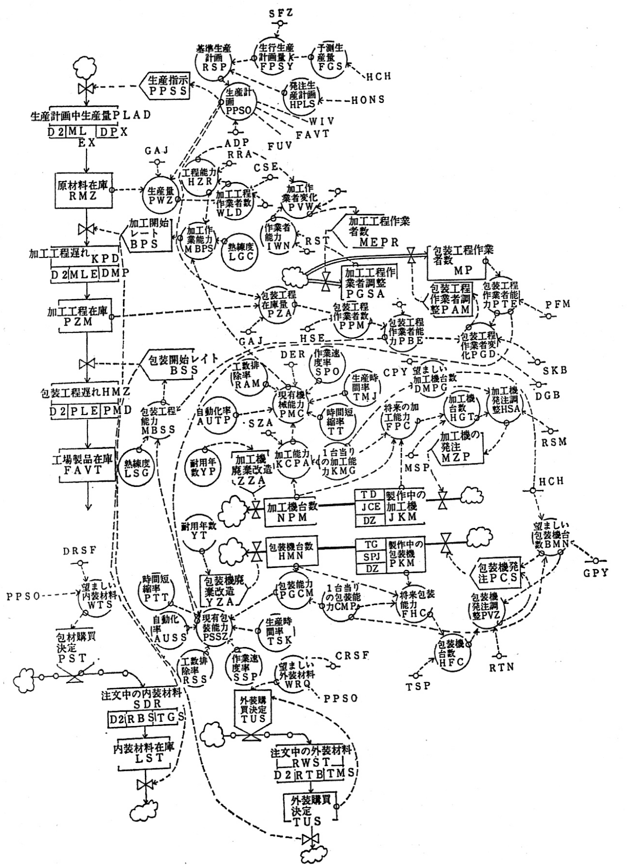


図3 生産システムフローダイアグラム

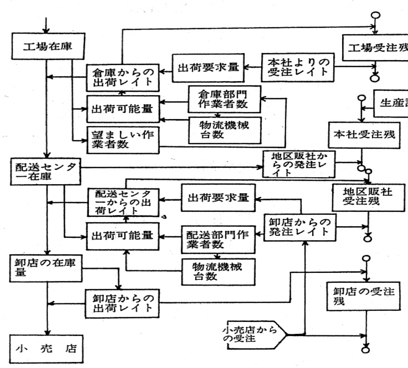


図4流通システムのブロックダイヤグラム

鞭効果を測定するために対象として工作機械,自動車などのサプライヤから部品を購入して工場で組み立てて製品にする商品をとりあげる.すなわち,サプライヤから部品や半製品を購入し,中心となる工場で組立て加工する

ものとする.図 8 のような３つのエシェロン階層をもつサプライチェーンモデルを対象にして解析をおこなう.

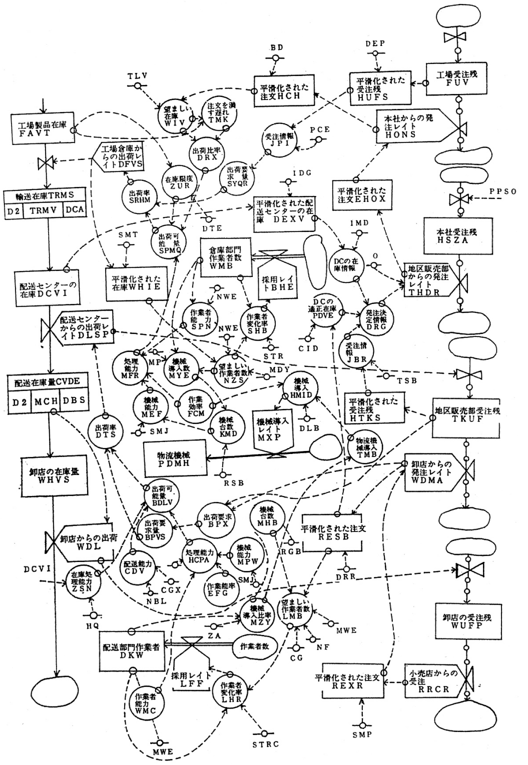


図５　流通システムのフロー・ダイアグラム

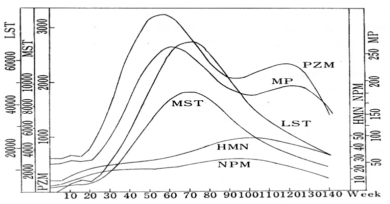


図６　生産工程のシミュレーション結果

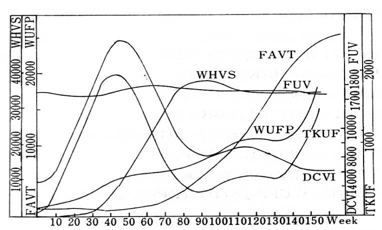


図７　流通システムのシミュレーション結果

1）　工場セクターモデル：

工場セクターにおけるフローダイアグラムは図９のようになる.1)レベル方程式はつぎのようなレベルから構成される.工場での受注残(UO1),工場での在庫量（IA1）,工場での平均需要量（RS1）工場への生産注文量(MO1),工場での事務処理量(CP1),工場への輸送量(MT1),工場で受け取る在庫量(SR1),工場での生産中の生産量(OP1).2)補助方程式とレイト方程式：工場の在庫限度(NI1),適正在庫量(ID1),遅れ変数(DF1),流出レイト(ST1),適正受注残(UN1),適正パイプライン注文(LD1),実際のパイプライン注文(LA1),生産決定レイト(MW1)などを用いた.

2)サプライヤ（セクター２）におけるフローダイグラムは図 10 のようになる.サプライヤのシステム方程式は工場の方程式と同様の形式になる.生産規模などの違いはパラメータにより変化させることができる.注文処理とモノの流れによる処理の異なった遅れの間隔や在庫調整速度に関する政策もパラメータの変更で可能になる.

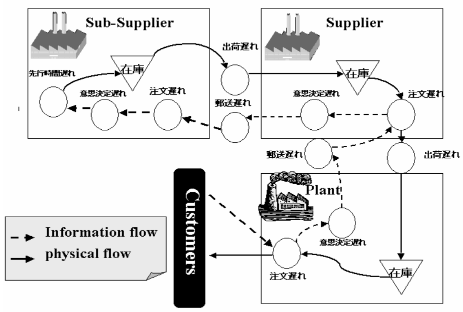


図 8　３つのエシェロン構造から構成されるサプライチェーンシステム

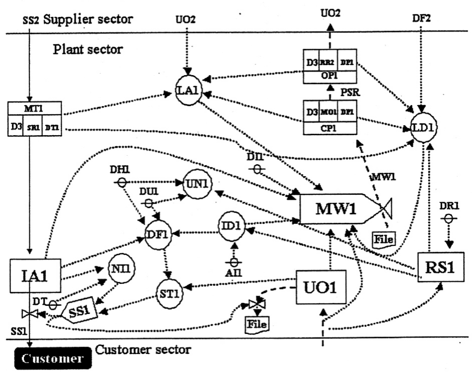


図９　工場（セクター１）におけるフローダイグラム

3) サブサプライヤにおけるフローダイグラムは図 11 のようになる.サブサプライヤにおけるシステム方程式はサプライヤや工場と同様の式で表現できる.サプライチェーンにおいてはサブサプライヤの遅れが工場に大きな影響を与える.

5.2 システム・ダイナミクスによる要因解析の結果

鞭効果発生は多くの要因が影響をしている.ここではつぎの２つの要因を解析してみる.

1)需要パターン：需要パターンがサプライチェーンシス

テム（以下SCSと略する）にどのような影響を与えるかを分析する.

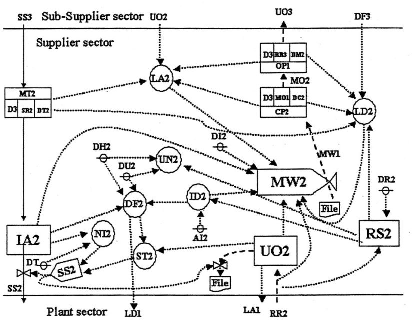


図10　サプライヤーにおけるフローダイグラム

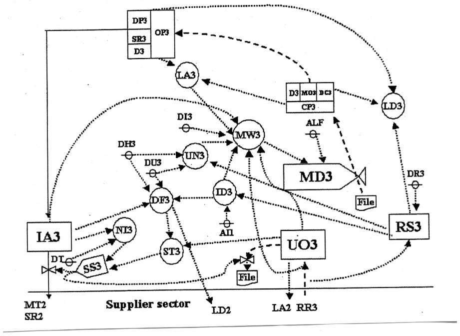


図11　サブサプライヤーにおけるフローダイグラム

2)在庫調整速度：SCS では各工程において在庫や受注残が滞留するため,各プロセスにおける生産レートの修正をしながら決定していく必要がある.生産レートを決定するうえで在庫調整速度に対する因果関係を明らかにしていく.３種類の需要パターンを用いてシミュレーションを行った.

1)Case1:ステップ関数による需要系列(15%増加)

2)Case2:周期性のある需要系列(周期:24,振幅:150)

3)Case3:ランダムな需要系列(平均:1000,標準偏差:150)

ステップ関数による需要パターンをSCSに入力することによりシステムの応答を明らかにする.もし,SCS が振動するような応答ならばステップ関数は振動の自然周期の減衰などを判断する目安になる.Case2 の周期変動はライフサイクルが短く,製品開発の周期が短いものにたいしてどのような反応を示すかを明らかにした.ランダムな需要系列は予期できない外乱にたいしてSCSがどのような修正行動をおこなうかを分析する.各Caseにおいてシミュレーションを行った結果を表1,表2に示す.表1より周期性における在庫量の変動が大きい.そして,工場,サプライヤ,サブサプライヤの順に変動が大きくなる.つまり,SCS が多段階になると需要パターンは各エシェロン階層に順番に拡大しながら影響をあたえていく.この

表 1 初期値から在庫量増加(%)

レベル	ステップ関数	周期性	ランダム
工場	15.07	18.54	3.60
サプライヤ	29.59	28.56	5.42
サブサプライヤ	44.74	50.82	8.98

表2 初期値からの在庫量低下(%)

レベル	ステップ関数	周期性	ランダム
工場	-12.21	-11.99	-3.74
サプライヤ	-12.08	-29.72	-6.22
サブサプライヤ	-14.62	-33.63	-9.27

ため.部品調達をするサプライヤでも中小の部品メーカでは鞭効果が大きく出る.これは経営にも大きな影響をあたえ,部品メーカや中小企業は厳しい状況に立たされていることが理解できる.

5.3　各エシェロン階層の在庫

1)工場での在庫変動

工場における在庫変動を図12に示す.３つの入力パターンにより在庫変動が大きく異なる.Case1 はステップ型需要が一時的に増加後に変動が激しくなるが,時間の経過とともに収束していく.Case2 は周期型需要量の変動に比例して,在庫変動にも周期性が出ている.この周期は変動も大きく,一定の周期で変動している.Case3 はCase2 と比較して全体に振幅は小さいが,在庫変動は不安定になる.

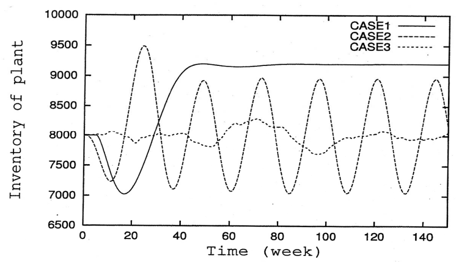


図12　工場における在庫変動

2)サプライヤの在庫変動

図13から各Caseにおける在庫変動は工場とほぼ同様の特徴がある.しかし,Case1 ではステップ入力の後に発生する需要量の増加による在庫量の減少率が工場に比べて低くなっている.また,Case2 について工場と比較すると在庫量が周期的に変動しているが位相のずれが発生している.

3)サブサプライヤの在庫変動

サブサプライヤにおいてもサプライヤ,工場と同様に在庫変動を示すが,値は大幅に異なる.特にCase3のランダムな需要に対して工場では在庫変動は不規則な状態になっている.しかし,サブサプライヤでは在庫は不規則であるが値は平滑化された変動になっている.これは顧客の

ランダムな注文に対して工場，サプライヤを通して，いわ

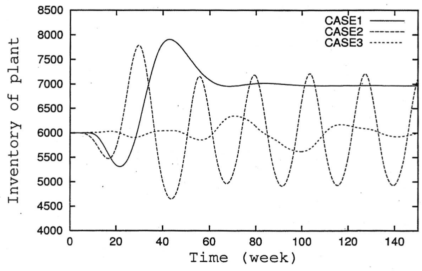


図 13　サプライヤにおける在庫変動

ゆる２つのエシェロン階層により変動が滑らかになっている.

5.4　在庫調整速度が与える影響

在庫調整速度の要因が SCS にどのように影響を与えているかを分析する. 在庫調整速度は次式で決定される.

$$MW = RR + \left[\frac{1}{DI}\right](EIA + ELA + EUN)$$

ここで，MW:適正生産レート，DI:在庫調整速度，EIA:在庫量誤差，ELA:パイプライン誤差，EUN：受注残誤差.

上式より在庫調整速度(DI)は適正生産レートに影響を与える要因である. 各ステージにおける在庫調整速度(DI)が在庫とパイプラインのモノの流れを調整する場合の速さを決定する. つまり，発注レートに導入される在庫やパイプライン誤差の日を表す重要な要因である. ここでは各ステージにおける在庫調整速度の値を変化させて SCS にどのような影響をあたえるかを３個の Case によりシミュレーションをおこなった. 図 14 より在庫調整速度の値が小さいときはサブサプライヤにおける生産レートの振幅が大きく，変動が安定しないために収束が遅れてくる. 在庫調整速度が大きくなるにつれて誤差に対する調整がゆるやかになり生産レートの振幅が小さくなる. 以上から在庫調整速度は SCS に大きな影響をあたえる要因である(16).

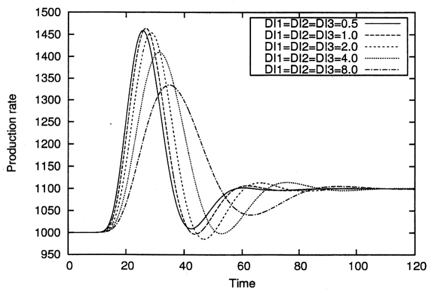


図 14　在庫調整時間によるサブサプライヤの生産レートの変化

5.5 待ち行列理論によるサプライチェーンの解析

マクロ面からみると図 8 のようなサプライチェーンは図 15 のような待ち行列理論におきかえることができる. サプライチェーン上の各ステージにおける製品のリードタイム（滞留時間）は待ち行列に相当し，処理時間（生産能力）はサービス時間に相当する. このため，図 8 のようなサプライチェーンはオープン型待ち行列理論で解析できる.

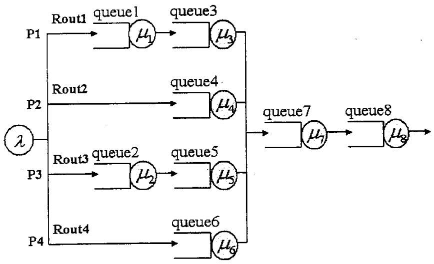


図 15 サプライチェーンのオープン型待ち行列

図 8 のサプライチェーンシステムにおいて到着率λ，サービス率μ，分岐確率を P とすると図 15 のようなオープン型待ち行列のネットワークになる. ここでは到着率λ＝10.0，サービス率をそれぞれサービス窓口の順番に決めて，分岐確率を 0.25 としてシミュレーションをおこなった. 図 16 はサプライヤのリードタイムである. 図 16 より各ステーションにおけるリードタイムは出力個数が少ないと振幅が大きな状態が続くが，個数が増えると理論式に収束する. Quequ3. Queqe5 が他の値に比べて振幅が大きく収束までの時間がかかっている. Quequ3. Queqe5 はサブサプライヤから部品を調達してモジュール生産するため，サブサプライヤからの影響を大きく受けている. 以上のようにサプライチェーンのリードタイムの変動は鞭効果と同じ現象を示す. 定常状態になっても受注率が変化すると再び同じような変動が発生する.

6. サプライチェーンの構造とモデル

6.1　システムの構造

5 章はフォレスターの提案したシステムダイナミクスを基本にしている. しかし. 現実の鞭効果を分析するにはこの基本モデル以外に多くのモデルが現実に適用されている. ここでは F.V.Moran と P.Barrar(17)の提案した RUS，OUT，CSI，SRS，DSC，AFC の 6 個のモデルの中から 4 つのモデル特性を STELLA に変形し調べてみる.

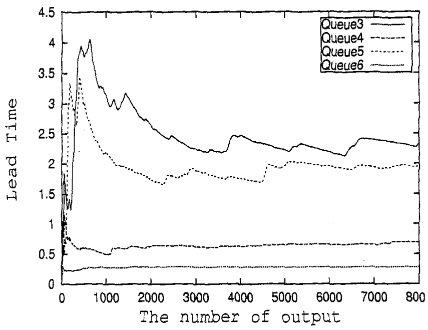


図16　サプライヤーにおけるリードタイム

6.2 制約型システム入力の構造モデル：Constrained System's Input structure (CSI)

CSI は.Goldratt(18)によって提案された制約理論（Theory of Constraints）を拡張したものである.これらの研究から多くの変形モデルが提案されている.しかし,基本はすべてCSIを拡張したものである.CSIモデルは図17のように『ロープとドラム』システムとして表示できる.『ロープ』は売上高による市場情報と工場を直接接続したもので,工場ではリアルタイムに市場の需要がオンラインで入る.このロープにより,工場と結合した市場に必要な品物を流しその途中にある流通センターと地域流通センター（DC-RDC）へは何も流さない.在庫量は市場の需要量で決定される.

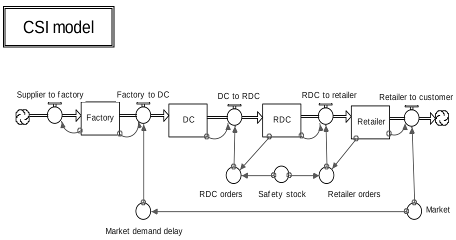


図17　CSIモデル（出典：F.V.Moran and P.Barrar をSTELLAに変形）

6.3　簡易補充構造モデル Simple Replenishment Structure models (SRS)

SRS モデルはパイプラインシステムとして表現できる.製品の注文が工場レベルで出されと,最終的には小売店まで,サプライチェーンの中を直接流れる.SRSモデルはサプライチェーンで意思決定をするために市場からの情報をとる.しかし,CSIモデルとは異なり市場からの情報はジャストインタイムの構造をしている.そして,部品の調達と生産指示を出すのに需要予測をおこなう.図18はSRSモデルで,予測は過去のデータを用いて線形予測をおこなう.

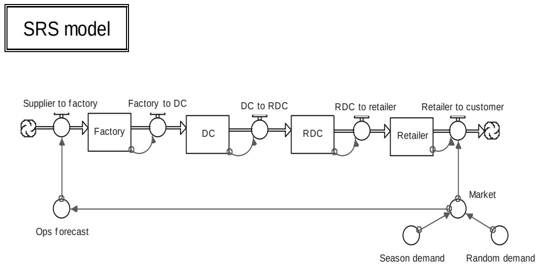


図18　SRSモデル（出典：F.V.Moran and P.Barrar をSTELLAに変形）

6.4 需要情報共有調整構造モデル Full Demand-sharing Coordination structuremodel (FDC)

FDCモデルとはERPシステムを含んでおり,従来の古典的なモデルになつている.この原理は,サプライチェーンですべての管理者がリアルタイムに需要情報を共有するということである.現在の在庫と安全在庫の情報に基づいて.注文量を決定する.図19に示すように,それぞれの決定は1週遅れで実行される.FDCモデルでは1)需要予測も未来予想もおこなわないという前提と,2)在庫管理では受注残を認めないという前提に立っている.FDCモデルにおいて,すべての管理者はERPにより需要情報を共有する.

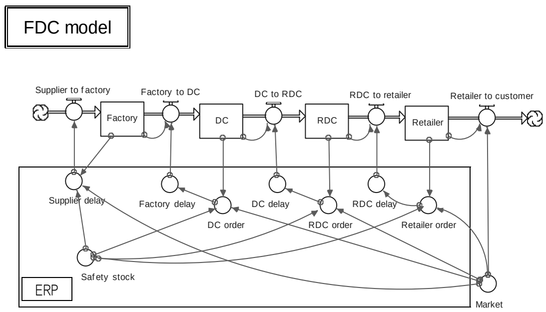


図19　FDCモデル（出典：F.V.Moran and P.Barrar をSTELLAに変形）

6.5 予測共有調整モデル Advanced Forecasting-sharing coordination model (AFC)

AFC モデルは.サプライチェーン管理者が市場需要の情報を使うだけでなく管理者が将来の需要予測をする.そして,この予測値を管理者の間で共有する.このモデルでは,調達担当は市場から輸送配送保管などのロジスティクス時間について既知とする.たとえばDCとRDCがそれぞれ2週と1週の予測をする間に,管理者は4週先の予測をおこなう.予測値は実際値と異なるため,管理者は目標在庫に近づけるために現在の在庫量の過不足を修正す

る.図20はAFCモデルであり,市場での需要予測値は各週前にそれぞれのエシェロン階層間で管理者によって販売予測をおこなう.意思決定における要因としては現在の在庫数と安全在庫量である.そして,意思決定者は市場に影響を与える時間を考慮しなければならない.

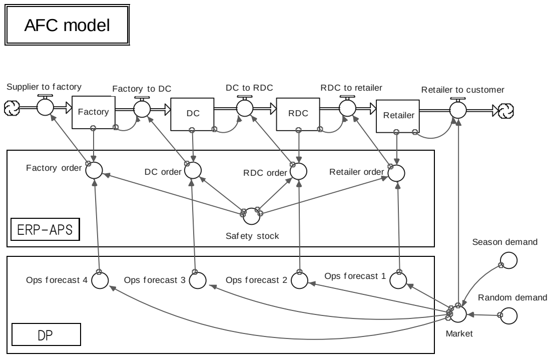


図 20　AFC モデル（出典：F.V.Moran and P.Barrar をSTELLA に変形）

6.6　SCM 構造の比較

F.V.Moran and P.Barrar(17)は6個のモデルの特性をシミュレーションから比較している.比較はステップ型需要.季節型需要.ランダム型需要から分析している.分析の結果 AFC,SRS,CSI が良い結果が出ている.しかし,FDCモデルも情報を共有しているためモデル構造の改良でSRS,CSI と同じような結果が得られる.1)SRS のような単純なモデルが FDC のような複雑なモデルよりも優れた結果を出ている.2)正確な需要予測ができない場合に,CSIは需要予測を用いないで生産システムの処理とその反応をするようなシステムになっている.このため,予測に依存しないときは CSI モデルが参考になる.とくに季節変動のある需要において AFS,SRS よりも優れた結果が出ている.

7.鞭効果の発生原因とその対策

7.1 SRS モデルにおける鞭効果の理論的解析

鞭効果の変動を起こす原因の中でサプライチェーンの構造における業務内容からみると,特に影響の大きいのが1)リードタイム,2)予測法,2)情報集中化である.ここではこの３つの要因からその原因を整理した.

1)リードタイムと予測期間による鞭効果の原因

小売業者は過去のデータから売上高の動向を知ることができる.そのデータにより工場に発注を出す.工場は注文量にしたがって生産をおこなう.小売業者が工場に発注を出して品物が入荷するまでのリードタイムをＬとする.ある時点ｔ期で小売業者が発注をすると商品は t+L 期に入荷する.このとき小売店は在庫管理を発注点法を用い,発注量は需要予測により予測量を発注する.発注点法では期間ｔの補充目標点は次式になる

$$y_t = \hat{\mu}_t L + \alpha\sigma_t\sqrt{L} \tag{1}$$

ここでμ_tは需要の平均値でσ_tは需要の標準偏差である.小売店は売り上げ情報から平均値と標準偏差から計算する.小売店は売り上げ予測をｋ期間の移動平均法(指数平滑法もこの一種になる)を用いるものとする.需要の平均値と分散は次式になる(19)(20)(21).

$$\hat{\mu}_t = \frac{\sum_{i=t-k}^{t-1} S_i}{k}$$
$$V_t = \frac{\sum_{i=t-k}^{t-1} (S_i - \hat{\mu}_t)^2}{k-1} \tag{2}$$

小売店は発注点法とｋ期の移動平均予測式を用いて生産工場に発注をしている.小売店は需要の平均値と分散式を用いて発注点を計算する.このため,在庫水準は毎期変化する.小売点の発注量が変化するため工場での生産計画は大きく変動する.SRS モデルで小売店における需要の分散を$V_R(S)$とする.小売店から工場に対する発注量の分散を$V_F(Q)$とするとその比は次式になる.

$$\frac{V_F(Q)}{V_R(S)} \geq 1 + \frac{2L}{k} + \frac{2L^2}{k^2} \tag{3}$$

この式は小売店から工場への発注変動と小売店での需要変動の比率Ｐである.移動平均の期間ｋを大きな値にし,リードタイムＬを小さい値にすると予測誤差による変動比率Ｐの値は小さくなる.すなわち鞭効果は減少する.逆にリードタイムLを長くして,移動平均の期間kを小さくすると比率は大きくなる.

2)情報集中による鞭効果減少の効果

2.1)情報集中化による効果

情報共有化はAFCモデルとFDCモデルになる.FDCモデルは各エシェロン階層の需要予測はサプライチェーンの１つ下流のエシェロン階層の注文情報でなく,顧客の情報を共有することになる.小売店は移動平均により過去 k期の実績データを用いて予測をする.予測結果により目標在庫レベルを計算する.その情報から卸店に発注する.１階層上の卸業者は小売業者の注文とともに小売店の実績データを受け取る.卸業者 はこのデータを用いて予測をして流通センターDC に発注を出す.以下,流通センターも小売店の情報を共有化して予測する.在庫管理方式は発注点と移動平均法による予測を用いる.ここで顧客の需要変動の分散を $V_R(S)$でサプライチェーン内での ｅ

番目のエシェロン階層の業者からの注文の分散 V(Qe)とするとつぎのような式が導入できる．

$$\frac{V_F(Q)}{V_R(S)} \geq 1 + \frac{2\sum_{i=1}^{e} L_i}{k} + \frac{2\left(\sum_{i=1}^{e} L_i\right)^2}{k^2} \qquad (4)$$

リードタイム Li はエシェロン階層 i とエシェロン階層 i+1 との間のリードタイムである．小売店と卸店の間でのリードタイムはL1=1とする．以下同様に卸店から配送センター(DC)の間は L2,配送センター(DC)から工場の間は L3 とする．FDC モデルでは小売店から工場までは L=L1+L2+L3となる．図21はリードタイムが3個のエシェロンの中で L の値と移動平均の期間の関係を示す．リードタイムが大きくなると変動比率は大きくなる．すなわちFDCモデルでは小売店から工場と上流になるほど変動は大きくなるという現象を示す．

2.2)個別情報による非集中化の効果

サプライチェーンの中で顧客の需要情報が小売店のみにしか伝わらないものである．このため各階層では前のエシェロン階層の売り上げ予測をする．小売店の売り上げ

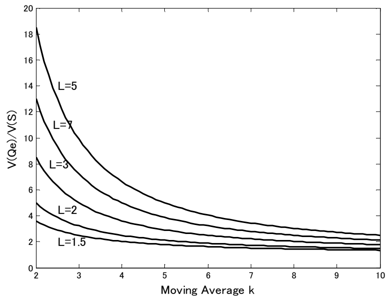


図21　小売店の情報共有化による変動比率

情報は卸店 RDC には届かない．卸店は小売店からの注文情報から独自に需要予測をする．以下同様に流通センターでは卸店での予測をし，工場も流通センターでの売り上げ予測をする．予測は移動平均を用いる．各エシェロン階層では望ましい在庫を発注点と移動平均予測で決定する．各階層では前段階のエシェロン階層の売り上げ予測を k 期の移動平均で求める．このとき先と同様に顧客の需要変動の分散をVR(S)でサプライチェーン内での e 番目のエシェロン階層の業者からの注文の分散 V(Qe)とするとつぎのような式が導入されている．

$$\frac{V_R(Q_e)}{V_R(S)} \geq \prod_{i=1}^{e}\left(1 + \frac{2L_i}{k} + \frac{2L_i^2}{k^2}\right) \qquad (5)$$

図22は小売店から工場までのリードタイムがL=2,3,4のときの小売店の情報を共有化しないときの変動比率である．図21と図22を比較すると移動平均k=5で情報を共有化しないときは共有化したときに比べて L=4 で 15倍,L=3で8倍,L=2で4倍以上の変動が起きる．すなわち．小売店から工場に向かって鞭効果は大きくなっていることを示す．

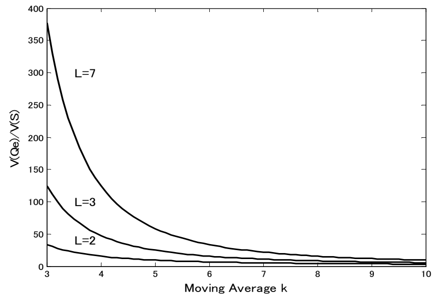


図22　小売店の情報を非共有化したときの変動比率

7.2　サプライチェーンにおける鞭効果低減の方法

鞭効果低減の中で有効な手法にインダストリアル・エンジニアリング(IE)があり，その手法が広く利用され効果をあげている．その代表的なIE手法は1)ジャストインタイム(JIT),2)カンバン方式,3)MRPⅡ方式,4)APS(Advanced Planning Systems),5)TOC(Theory of Constraints)である．その効果の大きさはケース研究などで報告されている．情報は共有化すると鞭効果は減少できることを明らかにした．小売店での需要情報を卸店，流通センター，工場で共有化することで鞭効果は下流の階層ほど少なくなる．しかし．情報を完全に共有化し，科学的管理法を適用しても鞭効果は小さくなるが完全になくならない．エシェロン階層があるところには必ず鞭効果が発生する．サプライチェーンにおける鞭効果を減少させるのに IE 手法以外に次のような方法が提案されている．

1)需要情報を共有化するためにはサプライチェーンの中で不確定要素をなくすることで鞭効果を減少させることができる．

2)小売店での需要の変動を減少させることで鞭効果を減少させることができる．特に小売店での売り上げ変動は卸店，流通センター，工場に行くほど拡大される．このため．小売店での変動をできるだけ小さくすることで鞭効果を減少できる．

3)図21.22で示したようにリードタイムは短くなると鞭効果は減少する．このためリードタイムをできるだけ短縮させることが鞭効果を減少させることができる．

8.結論

鞭効果の産業への波及効果についてその一例としてアメリカの工作機械産業を例にとり検討した．しかし，アメリカの工作機械業界は衰退したとはいえ宇宙航空などの高

度な工作機械技術では世界一である.つぎに,鞭効果のこれまでの研究成果について整理してみた.ここでは 1960 年代後半の食品企業を例にして詳細なシステムダイナミクスモデルを構築して鞭効果を測定した.遅れが原因でシステムの変動が大きくなる.また,生産と流通システムの詳細化なモデル化をして分析した.単純化したモデルで分析した結果と詳細なモデルも同じ内容が得られた.詳細なシステムダイナミクスモデルのかわりに基本となる要因のみをとらえた単純なモデルでサプライチェーンの構造を記述できる.そして,サプライチェーンにおける需要変動と生産調整の特性について検討した.また,同じシステムをネットワーク型の待ち行列理論により解析し,鞭効果発生の原因を示した.つぎにサプライチェーンにおける構造を明確にするために 6 つの代表的なモデルの特徴について検討した(17).さらに鞭効果の原因を理論式から明確にするために文献(20)(21)を用いて在庫理論.予測理論からその理由を明らかにした.　最後に鞭効果低減の方法を整理した.

参考文献

(1)C.Fines.小幡照雄訳”サプライチェーンデザイン”.日経 BP 社(1999)
(2)G.H.Stalk and T.H.Hound.”Competing Against Time:How Time Based Competition is Reshaping Global Markets” .New York.Fress Press.(1990)
(3)US Federal Reserve.Series G211 and N213111
(4)de Kok.T..F..Janssen..et al.”Phillips Electrics Synchronizes Its Supply Chain to End the Bullhips”. Interfaces.35(1). (2005).p.37-48
(5)J.W.Forrester”.Industrial Dynamics”.Cambridge.MA:MIT Press.(1961)
(6) J.D.Sterman.”Operational and Behavioral Causes of Supply Chain Instability”.Palgrave Macmillan. (2006).p.17-56
(7)P.Senge.”The Art and Practice of the Learning Organization”.New York.Double Currency(1990)
(8)J.F.Magee and D.Boodman.”Production Planning and Inventory Control.2ndedn”.New York:McGraw-Hill.(1967)
(9)C.Holt..F.Modigliani.J.Muth and H.A.Simon.”Planning Production.Inventories and Work Force”. Englewood. (1987).
(10)A.Blinder.”Retail Inventory Behavior and Business Fluctuations”.Brooking Papers on EconomicActivity. Vol.2.(1982).p.443-520
(11)O.Blanchard.”The Production and Inventory Behavior of the American Automobile Industry”.Journal Political Economy. Vol.91. (1983).p.365-400
(12)H.V.Lee.V.Padmanabhan and S.Wang.”Information Distortion on a Supply Chain.:The Bullwhio Effect”. Management Science.Vol.43(4).(1997).Vol43. No.4. p. 546-58
(13)H.A.Simon. “On the Application of Servomechanism Thoery in the Study of Pruduction Control”. Econometrica. (1952).Vol.20.p.247-67
(14)J.Dejonckheere.S.M.Disney.M.R.Lambrecht and D.R.Towill.”Transfer Function Analysis of Forecasting Induced Bullwhip in Supply Chains”.International Journal of Production Economics.(2002).Vol.78.p.133-44
(15)北岡正敏.”バッチ処理工程をともなった製造工業での生産と流通システムに関するシステム・ダイナミクスによる分析”.神奈川大学工学部研究報告.第１７号.(1979).pp.49-58.
(16) 北岡正敏,”ファジイ物流管理”,中央経済社.(1993),p.24-76
(17)F.M.Moran and P.Barrar.”Supply Chain Dynamics: Structural Causes of the Bullwhio Effect”.The Bullwhip Effect in Supply Chainjs.(2006).p.71-92
(18)E.Golddraft.”Theory of Constraints”.North Croton-on Hudson.NY.North River Press.(1999).
(19)久保幹雄,”ロジスティクス工学”朝倉書店.(2003).p.47-62
(20)H.L.Lee.V.Padamanabhan.and S.Whang.” Information distortion in a supply chain”.The Bullwhip Effect. Management Science.Vol43(4).(1997).p.546-558
(21)D.Simichi-Levi and P.Kaminsky.”Designing and Managing the Supply Chain”. McGraw-Hill .(2000)

総説

経営工学の役割

松浦　春樹*

The Role of Industrial Management

Haruki MATSUURA*

１．はじめに

小文の目的は，経営工学の役割を，筆者の生産の計画と管理に関する研究の紹介を通じて明らかにすることである．このために，「経営工学とは何か」について検討を加えた後，「経営工学はどのように社会に貢献するのか」について整理する．その後に，筆者の行ってきた研究をその中で位置づけし，経営工学の目指すものの一例を示したい．

この種の問題の取り上げ方，また重点の置き方は，産業界の実務家，高等教育機関の教員（学部・大学院），研究者などの立場によって当然異なってくるであろう．小文は，研究者としての立場からであることをお断りしておく．

２．経営工学とは何か

1977 年に（社）日本経営工学会から本節と同じ題名の書物 [1] が出版されている．当時は国公立を含む全国 34 の大学に「経営工学科」が設置されていた．同書の中で当時の主導的立場にあった 30 名の教育研究者が，書名の主旨に答える形で論考を寄せている．神奈川大学からは大村実名誉教授が寄稿されている．当時も今も，経営工学と何かという問いかけは続いている．表現は様々なのであるが，それらの回答は以下の 3 通りにまとめられる．

1) 現場の効率化のノウハウ・技術の集大成の延長線上で経営工学をとらえる立場．

2) 企業の諸業務を個別ではなく，全体としてシステムととらえるシステムズアプローチを強調する立場．企業を社会環境の中の経営システムと見て様々な角度から方法論を動員して総体的に分析・設計してゆこうとする．

3) 経営管理を支援するための工学的アプローチであるとする立場．経営の諸機能を場として，固有の要因間の因果関係を明らかにして，設計論に高めようとしたねらい．

1）の立場は，古典的なインダストリアル・エンジニアリング（IE）の定義にあてはまる．テイラーやギルブレスを代表とする科学的管理法から発展してきた諸技法を中心として，現場に密着して現場を良くしてゆくことで社会に貢献しようとする．実践的であって，必要なことなのである．しかしながら，経営工学をこのように規定してしまうことに筆者は満足できない．それは，技法の寄せ集めのきらいがあり，自然科学に基礎を置く工学としての観点から限界があることへの危惧を抱くためである．

2）の立場は，複雑な相互関係をもつ経営活動を構成する諸機能を総合的に見て，しくみを設計してゆこうというマネジメントの視点からの本来的なものであり，実務として必須のものである．システムエンジニア（SE）との職種の本来的な役割は，このような視点からシステムを設計することであろう．しかしながら，実務的にはノウハウの集大成，学術面では他分野と共有のシステム工学の援用となって，経営工学独自としての積み重ねに弱いとの認識から，この立場にも筆者は満足できない．また，一部に始めにコンピュータありきの視点で，マネジメントの視点が後退する現象が生まれていることも事実と思う．

3）の立場は，経営工学の固有の場として経営管理活動をすえて，経営工学を工学の一分野として確立してゆこうとのねらいが込められている．1）の立場との違いは，1）の立場による経営活動への経営工学の貢献は，現場に近いオペレーショナルな活動が主対象となる．これに対して，3）の立場は，より上位の経営管理や経営戦略とい

*教授　情報システム創成学科（経営工学コース）
Professor，Dept. of Information Systems Creation

った活動にまで対象範囲を広げている．同様に 2）の立場との違いは，2）の立場が，ノウハウの集大成あるいはシステムツールの応用例になるのにたいして，経営諸機能について，工学的なアプローチによって諸機能の構造を明らかにし，それを積み重ねることによって設計に結び付けたいとの視点が強調されることである．

筆者は，村松林太郎教授・十代田三知男教授の研究グループに入門し，生産管理を学んだが，故村松早稲田大学理工学部教授（当時工業経営学科）は同書に寄せた論考の中で経営工学は「経営活動のしくみを研究し発展させる学問」と述べ，さらに「具体的･工学的な方法で研究し，成果を得ようという立場」であると経営学との違いを説明している．さらに，同教授は，研究室の目指すものとして「生産管理の理論体系の構築」を掲げていた(2)．故千住鎮雄慶應義塾大学工学部教授（当時管理工学科）も，簡潔には「経営のための工学」，よりていねいに「企業の経営・管理に関するこのような密接不離な 2 種類の問題に対して，工学的側面から援助するのが経営工学である」と論じている．「このような密接不離な 2 種類の問題」とは，「全社的な立場からの企業の進路を決めること」と「決められたその方向に向かって企業内の有形･無形の力を効率的に結集して効果をあげること」である．併せて，同書および別な論考 (3) で，問題の実体を正しくとらえ，枝葉を切り落として，問題を簡略化して，ことにあたる経営工学の活用技術が必要だと指摘している．

筆者は，3）の主旨を理解するまでに時間を要したが，理解に及んで以後 3）の立場から生産管理の場の構造を明らかにする研究を目指してきた．以下に筆者なりの経営工学の定義をまとめておきたい．

「組織の経営管理機能のしくみとその相互関係を，自然科学とくに工学的思考および方法論によって明らかにし，組織体がその使命を効果的かつ効率良く達成することに貢献することを目的とする学問分野」

組織体が製造企業であれば，中核的な経営管理機能は，開発，調達，生産，販売などであり，その目的は，市場競争力を高め利益を確保することによって，製品・サービスの供給を通じて社会に貢献すると共に，利害関係者にその利益を公平に配分することである．経営工学は，開発，調達，生産，販売など経営管理機能のしくみを工学的に明らかにするとともに，機能間の相互関係を明らかにして，それらの機能が連携してシステムとして競争力を高め，社会および利害関係者に報いる方策を提供することに存在意義がある．

3．経営工学と組織デザイン

これまで経営工学の諸分野が，どのようにして社会に貢献してゆくのかという一貫してかつ簡潔なわかりやすい表現が不足していたように思われる．多くの表現は，積み木細工の印象で，要素間の論理的関係の提示に不足していて，経営工学が雑多な技法の寄せ集めのように見えしまう．全体の使命にたいして部分がどのような役割をもち，どのような因果関係にあるのか．さらに，変動する環境に対しての動きを生き生きと感じさせる表現が必要である．筆者は，前述の経営工学の定義において，経営工学諸分野の全ての一貫した目的は，組織にその使命を効果的かつ効率良く達成させることであるとした．**図 1** に経営学の源流を示す (4)．経営学の源流と経営工学の源流には共通部分が少なくない．第一に，テイラーやギルブレスたちを始祖とする科学的管理法である．経営工学では科学的管理法が技術として，作業研究などとして発展した．第二は，ファヨールたち (5) に始まる工場管理論として，組織論の源流を共有していた．この部分は，余り工学としての取り扱いはされなかったと思う．そのような事情もあるか，科学的管理法の発展系として経営工学の体系を説明することが多かったように考える．実は，第二の源流である組織論の流れの中で，経営工学の体系を説明する方が，前述の理由から筆者はわかりやすいのではと考えている．

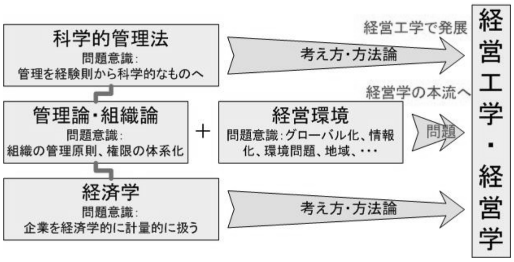


図 1　経営工学と経営学の源流（宮川 (4) の図を参考に筆者作成）

現代の組織論は，不確実な環境に対して組織がうまく適応してその目的を達成するためにはどのようなしくみを組織に組み込めばよいかを，環境に不確実性がある故に必要となる情報処理の観点から論ずる立場が主流となっている．その枠組みを**図 2** に示す．ここでの情報処理とは，事前に起きることが想定されておらず，対応策が事前に用意されていないときの対応に要するための情報の処理のことを言っている (6)．コンピュータによる情報処理よりも非常に広い範囲の人間によるものを含む情報の処理のことを意味している．

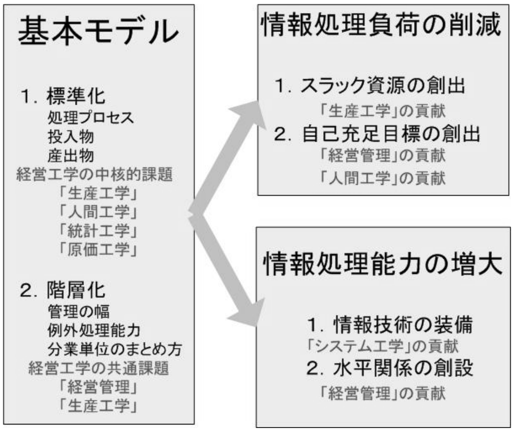


図 2　不確実な環境下での組織目的の達成に向けた経営工学の貢献（沼上 (6) の図を参考に筆者作成）

図 2 に基づいて，ガルブレイスらを代表とする情報処理の観点からの組織設計論 (7) の枠組みを説明する. 組織設計論の目的は，組織がその使命を，不確実性を伴う環境下で，効果的かつ効率良く達成できるようにするにはしくみをどのようにすればよいかを明らかにすることにある．フランク・ナイトは、不確実性とリスクを区別して、リスクを確率分布の情報があるもの、不確実性を確率分布がわからず、主観的に推測しかないものとした。ここでの不確実性は後者に近い。以下，沼上幹氏の著作 (6) を参考にして概略を述べよう. ある目的を達成するためには，人を集めることに加えて，集めた人を効果的に編成する必要がある．これが組織である．編成には，各人の仕事の分担（分業化）と分担した仕事の，組織全体としての目的へ向けての統合（調整）のためのルールづくり（標準化）が必要になる．加えて，組織の置かれた環境は完全に予測可能ではないので，ルール（標準）にあてはまらない例外処理のための階層化も必要になってくる．以上が**図 2** の左側，基本モデルの部分である．

環境の不確実性が大きくなると，ルール（標準）と階層化に加えて，調整の手段をしくみに入れる必要がある. これには，情報処理負荷を削減する方法と情報処理能力を増大する方法がある. 以上が**図 2** の右側の部分である．

次に，**図 2** の枠組みが，経営工学の諸分野が社会に貢献する枠組みになっていることを説明しよう．経営工学の諸分野を規定するために, かつて 1965 年に大学基準等研究協議会が文部大臣に答申した「経営工学科で主要科目として開設するもの」を使うことにする．これを**表 1** に示す．この**表 1** には 1）の立場が色濃く，筆者自身が賛成するものではなく，かつて公的に近いものであった理由から，経営工学の社会への貢献を説明するために敢えて使うことにする.

処理プロセス, 投入物および産出物の標準化は，「生産工学」，「人間工学」，「統計工学」，「原価工学」の使命の大きな部分である．現代的な分野であるサプライチェーン･マネジメント (8) もトヨタ生産方式 (9) も制約条件の理論（TOC：Theory of Constraints）(10) も，標準化のねらいとして処理プロセスの各段階が円滑に連結するようにしてゆくことを強調したものと位置づけられる．さらに，製品アーキテクチャ (11) に関する議論も，根幹は投入物および産出物の標準化の問題であると考えられる．柔軟性の問題 (12) も関わっている.

階層化は，「経営管理」そのものの問題である．「生産工学」では，階層化された計画と管理が体系の枠組みの一つとなっている．例外処理能力の向上 (13) は，柔軟性と関わり，今日的な課題である.

情報処理負荷の削減のための, スラック資源の創出は, 長い間の「生産工学」の課題であった．緩衝はスラック資源であるからである．緩衝とは，たとえば在庫，ゆとりとして用意される時間，予備的に準備されている能力である (14) (15)．この視点に立つと，トヨタ生産方式は，スラック資源をシステム内に置くことを嫌って，システムに柔軟性を組み込むことに意を注ぐ立場であることがわかり興味深い．自己充足目標の創出は，「経営管理」，「人間工学」の課題であるだろう.

情報処理能力の増大を図るための情報技術の装備は，「システム工学」の使命であろう．この部分の発展は著しい. 水平関係の創設は，「経営管理」の守備範囲である.

以上のように組織設計の具体的な方法論を支える足腰の多くを経営工学の諸理論，諸技法が提供しているのである．経営工学は，組織がその目的を効果的かつ効率良く果たすための工学的アプローチを提供する.

表 1　経営工学科に設置すべき主要科目（1965 年）（文献 (1) より）

学科目	授業科目
経営管理	工業経営学、経営組織論、経営経済、経営政策、産業論、工業標準化、労務管理、産業法規、職務評価等
システム工学	OR、システム工学、電子計算機
統計工学	数理統計学、品質管理、実験計画法、標本調査法、経営数学
生産工学	工程管理、資材管理、運搬管理、設備管理、工場計画
人間工学	作業研究、労働科学、人間工学、安全管理、産業社会心理学
原価工学	原価計算、原価管理、工業簿記、財務分析、予算統制、賃金管理、事務管理、販売管理

4．生産管理システム設計の枠組み

筆者は生産の計画と管理，すなわち生産管理を専攻している．**表 1** の枠組みでは，「工程管理」が最も近い.

工程管理との表現は，前述の 1）の立場の色彩が強いのに対して，生産管理といった場合，現場の運用の問題だけでなく，上位の戦略的な計画まで対象範囲が及び，強いて言えば 3）の立場が含まれる．

筆者は, 生産管理の構造を明らかにすることを通じて, 実務に役立ちたいと念じて研究を進めてきた．小文の主題である筆者の研究の紹介に先立ち，その位置づけのために生産管理システム設計の枠組みを図 3 に提示している．文献 [29] を使って説明する。

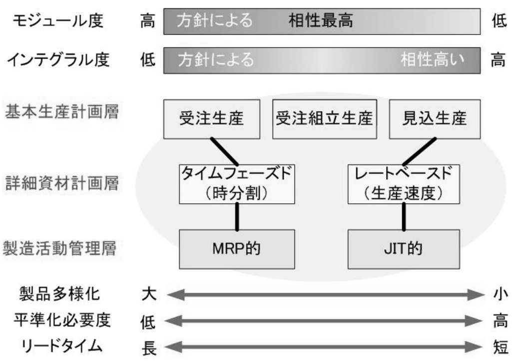


図 3　生産管理システム設計の枠組み（文献 [16] を参考に筆者作成）

Vollmann ら [16] は，生産の計画と管理システムを基本生産計画, 詳細資材計画, 製造活動管理の 3 層に分けて, 第 1 層では，受注生産，受注組立生産，見込生産の，第 2 層では，タイムフェーズド，レートベースドの，第 3 層では，MRP 的，JIT 的のそれぞれ選択肢があると述べている．これらは，生産戦略に基づき決まるものも，政策によって選択できるものもある．受注組立生産とは, 製品は受注によるが，組立に要する部品群は見込生産しておくといった生産形態である．

詳細計画層のタイムフェーズドは, MRP のように計画期間を区切って資材を計画するアプローチであるのに対して，レートベースドは，供給速度および消費速度によって資材を計画するアプローチ（見込生産向き）である．製造活動管理層の MRP 的管理とはワークセンタごとにディスパッチングによって進行を管理する伝統的アプローチであって，JIT 的とは，プルシステムを使ったトヨタ生産方式的アプローチである．JIT は Just-In-Time（ジャストインタイム）のアクロニムである．受注生産であれば，タイムフェーズドによる資材計画で，MRP 的な活動管理の選択が一つの典型であろうし，見込生産であれば，レートベースドによる資材計画と JIT 的な活動管理が典型となる．

製品構造の型の概念であるモジュール型とインテグラル型がある．モジュール型とは，製品の機能間に相互関係をなくすように切り分けて別々なユニット部品化した上で，それらを組み合わせて最終製品とする製品構造である．これに対してインテグラル型は，製品の互いに関連する機能を総合的に発揮できるように設計された独自部品群からなる製品構造である．見込生産の特長を生かし得る製品構造はインテグラル型であり，受注組立生産に適合するのはモジュール型である．受注生産では，方針によってモジュール型もインテグラル型もとり得る．見込生産では量産効果を狙うため品種数は限られるのに対して，受注生産では多様な製品を提供できる．

平準化には，数量面と品種面がある．数量の平準化とは，生産計画を実施するために必要な日々の所要能力がばらつかないようにすることである. 品種の平準化とは, 複数の品種を同一設備で連続的に生産するときに，同じ品種が連続しないようにすることである．レートベースドによる資材計画と JIT 的な活動管理の前提条件は，高度な平準化である．

このような生産形態の選択は市場の要件と事業規定を受けた製造戦略によって決まってくる．最も生産性を高くできる可能性があるのは，レートベースドによる資材計画と JIT 的な活動管理の採用である．市場の要件と事業規定を受けた製造戦略が許す限り，このような方向性を目指すのが現時点での共通認識であるように思われる. もちろん，これに対して必須となる単純化と平準化の観点への考慮を抜きにした JIT 化一辺倒の流れに 警鐘を鳴らす論者もいる．

5．生産管理の構造を明らかにする試み

5.1　研究の出発点

筆者の研究は, 需要予測のツールである指数平滑法 [17] から始まった [18]．指数平滑法は，重み付け移動平均法の一種で，現在も株価の平滑化などに使われ，組み込み関数の一つしてマイクロソフトの表計算ソフトウェア Excel に搭載されている．研究グループ出身の大先輩からこの方向で予測の研究を続けたらどうかとも誘いを受けたが，経営工学の枠内での予測はあくまでツールに過ぎず，生産管理の構造を明らかにすることにはならないと感じて，脱皮したいと考えていた．

5.2　プッシュ方式とプル方式の研究

当時は，現在の生産管理実務の 2 大潮流である MRP システム [19]（現在は ERP パッケージに発展している）が日本に紹介されると同時に，トヨタ生産方式が脚光を浴び始めていた．当時，細かい手法は別として，生産管

理で共通しているのは概念のみで，生産の計画と管理の論理は各社各様であったように思う．論理を捜し求めていた筆者は, MRPシステムの論理構造に深い印象を受けた．MRP システムの情報も少なかったので，日本へのMRP システムの導入に奮闘しておられた早稲田大学吉谷龍一教授（故人）と中根甚一郎教授（当時）主宰の実務家中心の研究会に先輩の紹介で入れてもらった．この研究会には長い間お世話になった．この研究会では，MRP システムのみならずトヨタ生産方式に関する議論も活発に行われた．また，早い時期から TOC も話題に上っていた．これらの生産管理方式からの抽象である，プッシュ（押し出し）型，プル（引っ張り）型の生産指示方式の特徴整理が中根教授によって行われていた.

これらをヒントにして，また，恩師である十代田三知男教授の学位論文 [20] を下敷きとしてプッシュ型とプル型の生産指示方式を，多段の生産在庫システムとして定式化して，在庫量分散評価尺度から，生産指示量の決定ルールを導いた研究 [21] をまとめることができた．この論文で，生産管理の構造を明らかにする研究を職業的に進めてゆくことに自信をもてた. この論文の派生論文 [22] で経営工学会の論文奨励賞を受けた．当時の経営工学会長は，トヨタ生産方式のパイオニア，大野耐一トヨタ自動車副社長であって，同氏から授与されたのも思い出である. なお, これらと一連の論文 [23] [24] [25] をまとめて，工学博士号を取得し，修業時代を終えることができた.

これらの研究は，**図3**においては見込生産で期間ごとに資材を計画する際の資材の所要量の算定方式を明らかにしたものと位置づけできる．また，**図2**では，スラック資源である在庫量を最小にする運用方式を明らかにしたことになる．また，各処理プロセスの円滑な連結のための工学的基礎を提供したものである．しかしながら，最も基礎となる論文 [21] を英文誌に投稿する機会を逸してしまったことを残念に思っている．プッシュ，プルの研究は世界的にその後広まって行ったが，その基礎となる研究ではなかったかと考えているためである．また，研究の原点の一つに，状態空間表現の制御理論をツールとして使いたいとの思いがあった．このことが，経営工学分野の研究の動機として不純であるとの反省があり，以後徐々に，手法へのこだわりを捨てている．同時に，プッシュ，プルの研究からこれ以上多くは得られないと考え，この方向の研究を自然に打ち切ることとなった.

5.3 負荷計画と計画用リードタイムの研究

MRP システムにおいては計画リードタイム，TOC においてはタイムバッファと呼ばれるリードタイム（先行計画期間）の長さをどのように決定すればよいのかという問題が，プッシュ，プル問題よりも，生産管理の構造に関わる中核的問題であると考えていた．リードタイムを正面から扱った研究は現時点にいたるも極めて少ない. 計画に用いるリードタイムの根幹は負荷期間であるとの解釈から，負荷期間の長さを一定に抑えた上で，負荷量分散を最小化する計画リードタイムの決定方法を導く研究 [26] [27] がまとまり, 外国誌に掲載された. これは, 個々のジョブの負荷量の分布形に依存しない結果であり，密かに自己評価している研究である．同時に，リードタイムに深く関わる，負荷計画のあり方を論ずる目的で，能力有限負荷と能力無限負荷を比較するシミュレーションによる研究 [28] も手がけている．リードタイムに関しては，実務家向けのサーベイ論文 [29] がある．これらの研究は，**図3**では，詳細資材計画層と製造活動管理層の相互関係を明らかにすることを狙ったと位置づけることができる．**図2**では，主として標準化の部分に貢献するものである.

5.4 変動する環境下におけるスケジュールの頑健性の研究

能力無限負荷とはある計画期間の能力の所要量を計画する際に，当該計画期間の計画された能力に厳密に合わせることを目的として，山崩しと言われる過負荷分の仕事を前後の計画期間に移動させることが，現実的に意味がないと主張する立場である．その理由は，生産活動を取り巻く環境は，安定させようという努力にも拘わらず流動的な要素が少なからず残る．顧客からの納期変更, 数量変更, 工程内の機械故障, 計画上の誤差などである. これに対して能力有限負荷では，山崩しを行いの計画能力内で負荷された仕事の実行可能性を「保証」する.
このような実務家の論議に解答を示そうとして開始したのが，変動する環境下で最適化スケジュールがどれほど有効かを調べる研究である．古典的なジョブショップモデルにおいて，最適化手法で生成させたスケジュールと極めて単純な優先番号法によるスケジュールが，機械故障の発生，特急ジョブの追加投入の条件下で，どちらが優れているかをシミュレーション実験した. この論文 [30] は外国誌掲載の10余年後にサーベイ論文 [31] によって半ページにわたって紹介され，高い評価を得た．筆者にとっては意外であった. 先に示した論文 [21] [26] の方が評価されてしかるべきだと考えていたためである．筆者がこのサーベイ論文での取り上げに気づいたのは2年後であったが, 大いに励みとなっている. この論文については, 研究者からの参照回数が年々増えている.

このような変動する環境下での頑健なスケジュールの研究について，最近研究を再開し，より構造に迫った結

果を得たもの[32]，あるいはより実践的な結果を得たもの[33]などがある．たとえば，**図 4** に示す結果は，ジョブショップ・スケジューリング環境を支配する最も重要な要因はジョブの加工経路であることの事実確認，すなわち生産管理の場の構造の性質を示すものである．この構造の認知によって実務がどのように変わり得るかについて述べれば，スケジューリングの条件を良くするためには，加工時間を問題にするよりも先に加工経路を問題とすべきということである．改善するなら加工経路の検討が先で，最も有効な要因だということである．これは，現時点での生産マネジメントの実務が，ランダムショップをフローショップに向けて改善してゆくとの方向にあることを下支えするのである．

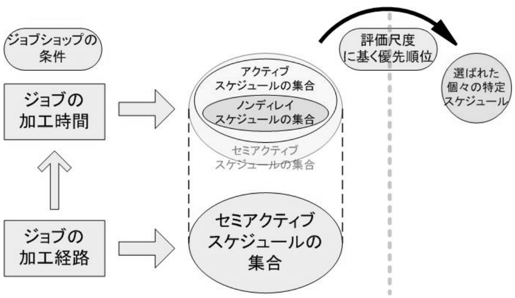


図 4　ジョブショップの条件とスケジュールのタイプの関係（文献[32]より）

これらの研究は，**図 3** では，受注生産，タイムフェーズド詳細資材計画，MRP 的製造活動管理に相当する．**図 2** では，基本モデルおよび情報処理必要量の削減に貢献している．

5.5　生産システムの柔軟性と緩衝の研究

わが国製造業は，柔軟性を重視してきた．米国ほどの国内需要がないとの認識から，多品種少量生産でなければ立ち行かないとの判断があったものと思われる．日本の製造業が好調である原因の一つを柔軟性と見て，各方面から柔軟性の研究が行われている．筆者は日米欧の製造業未来プロジェクトに参加して，アンケート調査を分析している[34]．この一つの結論が日本製造業の柔軟性重視であった．また，共同研究であるサーベイ論文[35]，柔軟性と緩衝の違いを明瞭にして，柔軟性と緩衝を生産システムへ組み込むための考え方を提示した[36]がある．多段階の生産指示方式の研究は，緩衝の研究としての側面もあったわけである．

これらの研究の意義付けであるが，生産システムに柔軟性や緩衝が適切に組み込まれるならば，**図 3** の選択肢を選べる条件範囲が広がり，設計を行いやすくなる．**図 2** においては，緩衝はスラック資源に相当し，柔軟性は例外事項の処理能力を向上させる．

5.6　今後の展開

今後の研究の展開であるが，第一に，「変動する環境下で頑健なスケジュール」について．この方向での研究は，有望な鉱脈に当たっていると感じているので今後も研究室を挙げて大いに推進したいと考えている．この分野は，世界的に急速に立ち上がりつつある．第二に，生産システムの頑健性，柔軟性，緩衝の相互関係の定量的研究である．物による緩衝，時間による緩衝，能力による緩衝間の定量的相互関係は明らかになっていない．柔軟性と緩衝の関係も未開拓なテーマである．これも大いに推進したいと思う．先のスケジュールの頑健性も，言い方を変えると計画の柔軟性の問題なのである．第一と第二のテーマはつながりをもっている．

6．おわりに

小文では，筆者の研究活動の紹介と意義付けを通じて，経営工学とは何であって，どのように社会に役立っているかを再確認することを目的として，以下の内容について述べた．まず，その性格から，決定版がない経営工学の定義について検討した．これを受けて，経営工学がどのように社会に貢献するのかを，経営活動の根幹問題である組織デザインの枠組みを通じて説明すること試みた．このような枠組みによれば，生きている環境の中で組織がその使命を動的に果たすための，経営工学の貢献を一貫した論理の下，生き生きと表現できると感じているためである．もとよりはじめての試みとして不十分であり，今後，おさめ切れなかった経営工学の多様な側面をとらえきるように検討を進めたい．

経営工学分野の研究者としての筆者は，経営の工学としての経営工学が対象とする経営活動の構造を明らかにしようとする意図で，多段階の生産指示方式の研究，リードタイムと負荷計画の研究，変動する環境下で頑健なスケジュールの研究，柔軟性と緩衝の研究などを行ってきた．これらを概説すると共に，意義を明らかにし，今後の展開を示唆した．

参考文献

(1)（社）日本経営工学会編，“経営工学とは何か”，開発社（1977）．
(2) 早稲田大学理工学研究科，“学修要項 1975”，p. 349.
(3) 千住鎮雄，“学位を目指す研究について”，日本経営

工学会誌，Vol.26，No.4（1977）， pp.368-370.

（4）宮川公男，“意思決定論”，丸善（1975）.

（5）上野一郎，“マネジメントの発展系譜 テイラーから現代まで”，産業能率大学出版局（1976）.

（6）沼上幹，“組織デザイン”，日経文庫（2004）.

（7） Jay R. Galbraith，“Organization Design”，Addison-Wesley（1977）.

（8）D. J. バワーソクス，D. J. クロス，M. B. クーパー著，松浦春樹，島津誠訳者代表，“サプライチェーン・ロジスティクス”，朝倉書店（2004）.

（9）門田安弘，“トヨタプロダクションシステム その理論と体系”，ダイヤモンド社（2006）.

（10） R. E. Stein，“Re-engineering the Manufacturing System Applying the Theory of Constraints”， Dekker（1996）.

（11）藤本隆宏，“生産マネジメント入門（Ⅰ）（Ⅱ）”，日本経済新聞社（2001）.

（12）坪根斉，“製造戦略としての柔軟性設計のためのフレームワーク”，日本経営工学会誌， Vol.51， No.5（2000），pp.504-517.

（13）小池和男，“日本企業の人材形成 不確実性に対処するためのノウハウ”，中公新書（1997）.

（14）村松林太郎，“生産管理の基礎”，国元書房（1979）.

（15）市村隆哉，村松林太郎，“弾力的スケジューリングへの考察”，事務と経営，1969 年 4 月号（1969），pp.17-23.

（16）T. E. Vollmann， W. L. Berry， and D. C. Whybark，“Manufacturing Planning and Control Systems”，4th Ed.， Irwin （1997）.

（17）R. G. ブラウン著，“関根智明訳，”在庫管理のための需要予測”，紀伊国屋書店（1964）.

（18）松浦春樹，“加法的な周期変動を含む需要系列の指数平滑法による予測”， 日本経営工学会誌，Vol.30， No.1（1979）， pp.72-77.

（19）中根甚一郎編著，“統合化 MRP システム”，日刊工業新聞社（1984）.

（20）十代田三知男，“定期発注システムの解析（Ⅰ）（Ⅱ）（Ⅲ）”，インダストリアル・エンジニアリング，Vol.11，Nos.8-10（1969），pp.51-58，pp.93-100，pp.67-74.

（21）松浦春樹，“多段階生産指示方式の設計”，日本経営工学会誌，Vol.31， No.1（1980）， pp.88-93.

（22）松浦春樹，“製品需要水準の変化と多段階生産工程における生産指示方式”，日本経営工学会誌， Vol.31，No.4（1980）， pp.458-463.

（23）松浦春樹，“多段階生産工程における発注量変動のコントロール”，日本経営工学会誌，Vol.31， No.4（1980），pp.405-409.

（24） H. Matsuura and H. Tsubone，“Determining Net Requirements for Material Requirements Planning”， J. Opl. Res. Soc.，Vol.42，No.11（1991），pp.981-990.

（25） H. Matsuura and H. Tsubone，“A Comparison of Centralized and Decentralized Control Rules in Push-type Production Ordering System”， Eur. J. Opl. Res.，Vol.70，No.2，（1993），pp.199-211.

（26）H. Matsuura and H. Tsubone，“Setting Planned Leadtimes in Capacity Requirements Planning”，J. Opl. Res. Soc.， Vol.44， No.8 （1993）， pp.809-816.

（27） H. Matsuura， H. Tsubone and M. Kanezashi，“Setting Planned Lead Times for Multi-Operation Jobs”，Eur. J. Opl. Res.，Vol.88， No.2（1996）， pp.287-303.

（28） H. Matsuura，H. Tsubone and K. Kataoka，“Comparison between Simple Infinite Loading and Loading Considering a Workload Status under Uncertainty in Job Operation Times”， Int. J. Prod. Econ.，Vol.40, No.1（1995），pp.45-55.

（29）松浦春樹，“リードタイムの類型化とその短縮方策”， IE レビュー， IE レビュー， Vol.44，No.1，229 号（2003）， pp.6-11.

（30）H. Matsuura， H. Tsubone and M. Kanezashi，“Sequencing， Dispatching， and Switching in a Dynamic Manufacturing Environment”， Int. J. Prod. Res.， Vol.31，No.7（1993），pp.1671-1688.

（31） Aytug Haldun， Lawley Mark A.，McKay Kenneth，Mohan Shantha， Uzsoy Reha，“Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions”，Eur. J. Opl. Res.，Vol. 161 Issue 1 （2005），pp.86-110.

（32）松浦春樹，“加工時間変動に対して頑健なジョブショップ・スケジュールの新しいタイプ”，国際経営フォーラム，No.19（2008），pp.209-224.

（33）松浦春樹，“NEH アルゴリズムに基づくジョブショップ・スケジューリングのためのヒューリスティック” ，国際経営論集， No.36（2008），pp.1-13.

（34）J. Nakane， S. Kurosu， H. Matsuura，“Creating Customer-driven Flexibility”， Chapter of “Benchmarking Global Manufacturing”， Business One Irwin（1992），pp.111-128.

（35）坪根斉，松浦春樹，“生産システムの柔軟性について”，日本経営工学会誌，Vol.46， No.1，（1995）， pp.1-12.

（36）松浦春樹，“生産システムの緩衝と柔軟性について”，国際経営論集”，No.35（2008），pp.1-12.

総説

わが国戦前期の近代住宅にみられる設計手法について

－1935 年及び 1939 年発行の清水組『住宅建築図集』掲載の住宅建築を中心として－

内田　青蔵*

A Study on the Design Technique of Modern Dwelling of Prewar Japan

Seizo UCHIDA*

1．緒言

文化庁では，近年に国費補助事業として「近代和風建築」と称される建築の調査を全国で展開している．こうした全国を対象とした事業の進展とともに，調査対象である「近代和風建築」をテーマとする研究熱も高まりつつある．

ところで，この「近代和風建築」とはいかなる建築を指すのであろうか．これまで発行された報告書を散見する限り，明快に建築様式などを定義したものはなく，一般には幕末から終戦までの間に建設された建築を指し，また，様式的には伝統的意匠や技法といった要素を持つ建築ということになる[1]．より噛み砕いて言えば，「近代和風建築というものは，それ自体で建築的な様式をもつわけではない．日本が近代化を果たしつつある時期に生み出された伝統的建築すべてを含むもの」[2]といった広義の解釈が一般的である．

ただ，このように極めてあいまいな定義ではあるものの，「近代」という時代に建てられた「和風建築」をひとつの様式として区別するのは，近世までのいわゆる伝統建築とは異なる時代背景の中で造られたものゆえ，その様相もその建築の持つ意味も近世以前のものとは明らかに異なる近代特有の特徴を有するものという解釈があるからに他ならない．その意味では，現在，この文化庁主導による「近代和風建築」の全国の遺構調査が進行中であることからも分かるように，様式的特徴もその意味も解明途上にあるといえるのである．

ところで，筆者は2009 年5 月に『明治・大正の邸宅－清水組作成彩色図の世界』を監修し，上梓した．この中で筆者も小論「『彩色図集』に見られる近代上流住宅の設計手法について」を論じている[3]．この小論の目的は，近代以降に建設された建築・・・いわゆる「近代建築」[4]・・・における独自性としての近世以前の建築とは異なる特徴や性格の一端を解明し，ついで，その解釈を提示することであった．すなわち，現在の清水建設株式会社には，前身である清水組[5]の手掛けた建築作品のうち，明治40年（1907）から関東大震災前の大正11年（1922）までの住宅建築 45 件の彩色された図面・・・「彩色図面」・・・が残されている[6]．これらは当時の建築図面として貴重なばかりではなく，関東大震災前に存在していた住宅建築の姿を知ることのできる貴重な歴史的資料ともいえるのである．そこで，筆者らは，こうした貴重な歴史資料としての図面の存在を広く周知させるために，図面の紹介を主とした出版を行い，加えて，筆者はこれらの建築図面を史料として，当時の住宅作品の設計手法に着目し，近世以前とは異なる設計方法が見出されることを示唆したのである[7]．

本稿は，この小論の続報で，清水組が自ら手掛けた住宅建築を取り上げて紹介している2 冊の『住宅建築図集』（1935 年版，1939 年版）[8]を資料とし，その設計手法について考察を試みたものである．

2．拙稿「『彩色図集』に見られる近代上流住宅の設計手法について」で指摘した内容

本稿を進める前に，先に提示した拙稿の内容を整理しておきたい．既に紹介したように清水組の手掛けた明治40 年から大正11 年までの住宅建築45 例の設計手法について分析を試みた結果，その事例は少ないものの，以下の諸点が明らかとなった．すなわち，

①　ひとつの同一の建物でありながら「田舎間」と「京

*教授　建築学科
Professor, Dept. of Architecture

間」の 2 種の設計寸法が並存して使用されている事例が 6 例確認される

② 「田舎間」と「京間」が並存される場合，「京間」は接客の場である「座敷・次之間」にみられる

③「田舎間」「中京間」「京間」の 3 種の設計寸法が見られる場合もあり，この場合は「京間」は接客の場と主人の生活の場，「中京間」は家族の生活の場，「田舎間」は使用人の場にみられる

こうした 2 種類，あるいは 3 種類の異なった設計寸法を同時に並存させる設計手法は，後藤久太郎博士によれば，例外的に元禄から享保期の津軽家江戸屋敷に確認されるものの，他の各藩の江戸藩邸はすべて 6.5 尺の「京間」という単一の設計寸法を用いて設計されるのが一般的であり．江戸期の一般的な考え方によるものではなかった．ちなみに，津軽家江戸屋敷のみが書院などの主要建物は 1 間 6.5 尺, 付属屋は 1 間 6.3 尺と 6 尺で設計されている．後藤博士は，この津軽藩にみられる 3 種の設計寸法の並存は設計上・作事技術上の利点はなく，津軽家の国許の木材の規格が 1 間 6 尺であった可能性が高いことから，経済的な諸事情から主要建物の部材のみを購入し，一部を寸法体系の異なる国許の規格材を用いたことによるものであろうと推測している [9]．すなわち，繰り返しになるが，同一建物で 2 種・3 種の設計寸法を用いるのは江戸時代に建設された武家住宅である各藩の江戸藩邸の中では例外的な存在で，あくまでも当時は「京間」という 1 つの設計寸法で設計することが一般的手法であったのである．このことは逆に彩色図面に散見される 2 種あるいは 3 種の設計寸法を並存させる設計手法は，近代特有のものであった可能性を示唆するのである．

いずれにせよ，このことの解釈の私見を述べれば，近代以降，わが国の上流層の住宅の近代化は在来の和館に洋館を並存させることから始まり（図 1）[10]，その際の使い方を大別すれば，明治期では，和館は日常生活ゾーン・洋館は接客ゾーンとして使い分け，また，和館もさらに家族の生活ゾーン，接客ゾーン，使用人が働く台所を中心としたサービスゾーンにうまく分けられて配置されていたのである．こうした明治期の伝統的な住宅建築の間取りに見られるゾーニングは，機能的な分離というよりも武家住宅の中で培われてきた身分制を根幹とした差別化の表現として生まれてきたものを受け継いだものと考えている．そして，筆者はこの「京間」と「田舎間」のようにひとつの建物の中で「京間」を接客ゾーンに，「田舎間」を家族の生活ゾーンやサービスゾーンにそれぞれ使い分けるという設計手法は，近代という新しい時代の中で，近世以来の接客性を重視した生活思想を受け継ぎながら新たに発展的に創り出された表現方法なのではないかと考えているのである．

このように本稿では，近世以前の建築とは異なる近代特有の建築特性の一端を明らかにすることを目的とし，先に手掛けた「彩色図面」以降の作品，具体的には『住宅建築図集』に掲載されている大正 12 年（1923）以降から昭和 13 年 6 月（1938）までの清水組の手掛けた住宅建築を通して，「京間」「田舎間」などの異なった基準寸法の並存という設計手法の様相を整理し，その知見を報告するものである．

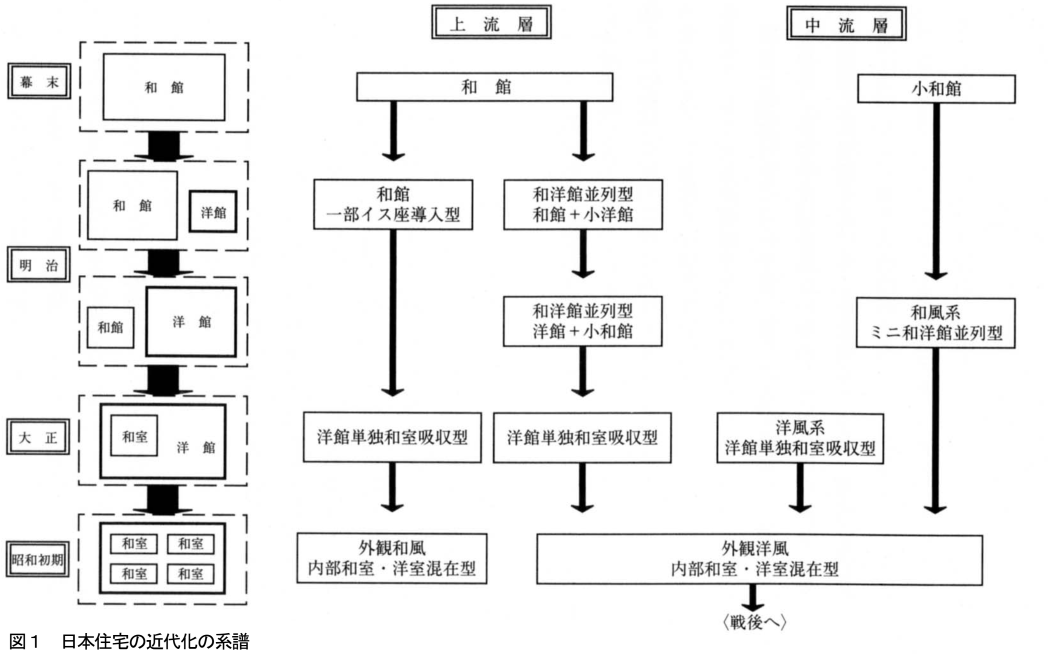


図 1　日本住宅の近代化の系譜

３.『住宅建築図集』にみられる数種の設計寸法が確認される住宅事例について

改めて『住宅建築図集』を見てみよう．昭和 10 年 4 月 1 日発行，編集・合資会社清水組の『住宅建築図集』（以下，昭和 10 年度版，と称する）には「本住宅建築図集は昭和九年十二月末迄に弊社清水組が施工いたしました住宅建築の一部を輯録したものであります」とあり，邸宅として 196 件の住宅建築が集録されており，大正 12 年以降のものは 184 件となる [11]．同様に昭和 14 年 5 月 25 日発行，編輯兼発行者・株式会社清水組の『住宅建築図集』（以下，昭和 14 年度版，と称する）には 165 件の住宅建築が集録されている．このことから資料とするのは 349 件の住宅建築となる [12]．

さて，これらの住宅は，竣工年，構造，様式，屋根形状，内外仕様は明記されているものの，施主名や住所は明記されてはおらず，図面も掲載されているものと掲載されていないものがある [13]．また，図面があっても設計寸法を確認できるものは極めて少ない．そこで，本稿では平面図上の「京間」や「中間」という寸法に関する書き込みを手掛かりに分析を試みた．

その結果，同一建物で異なった設計寸法が用いられていると考えられる事例は，昭和 10 年度版では，H 邸(大正 13 年：1924)，A 邸（大正 14 年：1925)，K 邸（昭和 3 年：1928)，K 邸（昭和 6 年：1931)，S 邸（昭和 7 年：1932)，Y 邸（昭和 8 年：1933)，T 邸（昭和 9 年：1934）の 7 件, 昭和 14 年度版では I 男爵邸 (昭和 10 年:1935)，I 邸（昭和 11 年：1936)，K 邸増築（昭和 12 年：1937)，K 邸（昭和 13 年：1938 年）の 4 件をそれぞれ確認することができた．この結果をまとめたのが表 1 である．これによれば，「京間」と記された部屋が存在する事例は 9 例，「中間」と記された部屋があるのは 3 例であり，「京間」と「中間」が同時に記された事例が 1 例みられる．以下，各住宅建築の設計寸法について確認したい．

表１　数種の設計寸法が確認される住宅リスト

住宅建築名	施　主　名	設　計	竣工年代	建設地	設計寸法の書き込み
H邸	堀越角次郎	清水組	大正13年9月	東京市	「京間」
A邸	浅見又蔵	清水組	大正14年7月	東京市	「京間」
K邸	(柏原)	桜井小太郎	昭和3年2月	東京市	「京間」
K邸	熊谷直之	清水組	昭和6年	京都市	「京間」
S邸	鈴木三千代	清水組	昭和7年12月	兵庫県	「中間」
Y邸	山田三次郎	清水組	昭和8年7月	東京市	「中間」
T邸	(田中)	清水組	昭和9年12月	新潟県	「京間」
I男爵邸	伊藤文吉男爵	(清水組)	昭和10年7月	東京市	「京間」「中間」
I邸	磯村豊太郎	清水組	昭和11年3月	東京市	「京間」
K邸増築	木村茂男	清水組	昭和12年10月	東京市	「京間」
K邸	古賀政男	清水組	昭和13年4月	東京市	「京間」

H 邸（堀越邸）：：この住宅は，東京市内に大正 13 年 9 月に竣工した木造 2 階建ての建築である．その規模は延坪約 350 坪の大規模な伝統色の強い和風建築で，洋館も併設していた和洋館並列型住宅である．間取りは，三つの中庭を取り囲むように各部屋が配されている．部屋配置から見て，玄関側は東面と考えられる [14]．この東側の玄関側を表とすれば，式台に続いて 6 畳の「表玄関」，その横には寄木張りの洋風の「応接室」があり，「表玄関」を挟んで反対側には 8 畳の「執事室」があり，大きな中庭側には畳廊下がある．洋館と和館の間部分には南面して「離レ座敷・次之間」と「御仏間」，中庭の南側には「御居間・次之間・参之間」が配されている．大きな中庭南

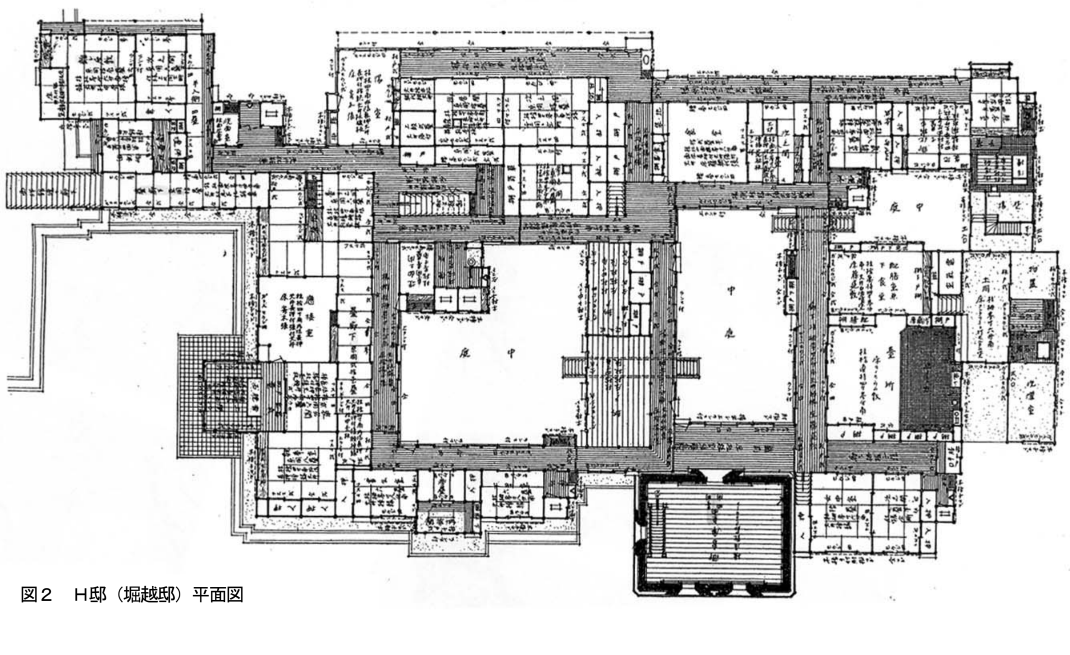


図２　H邸（堀越邸）平面図

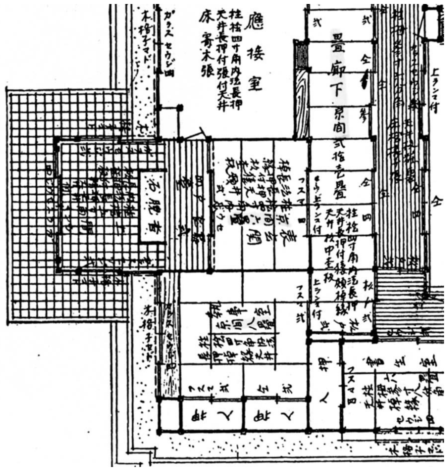


図３　H邸（堀越邸）「執事室」と「書生室」の納まり

側の「御居間・次之間・参之間」の「御居間」は二畳の上段を備えており，主人の日常生活の場と考えられる．また，家族の生活の場は，もうひとつ奥の中庭の南側であり，その奥は台所などの使用人の働くサービスゾーンといえる．なお，中庭を挟んで北西側には鉄筋コンクリート構造による「御倉庫」が配されている．

さて，玄関周りに配された和室を見ていくと，畳廊下を含め「京間」と記されている．具体的には，玄関周りの「表玄関」「執事室」「台子之間」「洗面之間」及び畳廊下，洋館と和館の間にある「離レ座敷・次之間」「御仏間」および畳廊下，南側の「御居間・次之間・参之間」，そして「御倉庫」である．図面には寸法の記述がなく，具体的な寸法は明らかではないが，「執事室」の横に位置する「書生室」「内玄関」「下男室」などには「京間」の記述はみられず，残りの諸室の設計寸法は「田舎間」と考えられる（図２）．なお，「京間」の「執事室」と「田舎間」の「書生室」が隣接するため，その柱間寸法の違いの処理のためと考えられるが，「書生室」と接する「執事室」側の壁面に柱が２本隣接して配置されている部分がみられ，興味深い（図３）．いずれにせよ，玄関周辺の接客ゾーンは，基本的には「京間」で設計され，他の諸室は「田舎間」で設計されていたと考えられる．

A邸（浅見邸）：：この住宅は，東京市内に大正 14 年７月竣工した木造２階建て一部地階及び屋根裏部屋付きの「英国風」と記された洋風住宅である．間取りはコンパクトにまとめられており，広間と廊下を介して和室と洋室が並存している．このうち，２ 階には「座敷・次之間」が設けられており，この和室だけに「京間」の記述がある．また，この図面では寸法も読み取れる．すなわち，「座敷」は二間が真々で 13 尺とあり，1 間が 6.5 尺の真々で設計されていることがわかる（図４）．一方，1 階と 3 階には「女中室」があり，その寸法は二間で真々12 尺とあり，1 間 6 尺で設計されている．このことから「座敷・次之間」のみが 1 間 6.5 尺の「京間」の真々で設計され，他は 1 間 6 尺の「田舎間」の真々で設計されていることがわかる．

K邸（柏原邸）：：この住宅は，東京市内に昭和 3 年に竣工した木造２階建ての妻面にハーフチィンバー風の装飾を配する英国風の洋風住宅で，設計はロンドン大学を首席で卒業した桜井小太郎である[15]．洋館の背後に和館を付設した形式の建物で，この付設された和館の１階の続き間部分の部屋に「京間」の記述がみられる．これらの二間は部屋名称がないためその用途が不明だが，この住宅では唯一の入側つきの床・棚・付け書院を配した

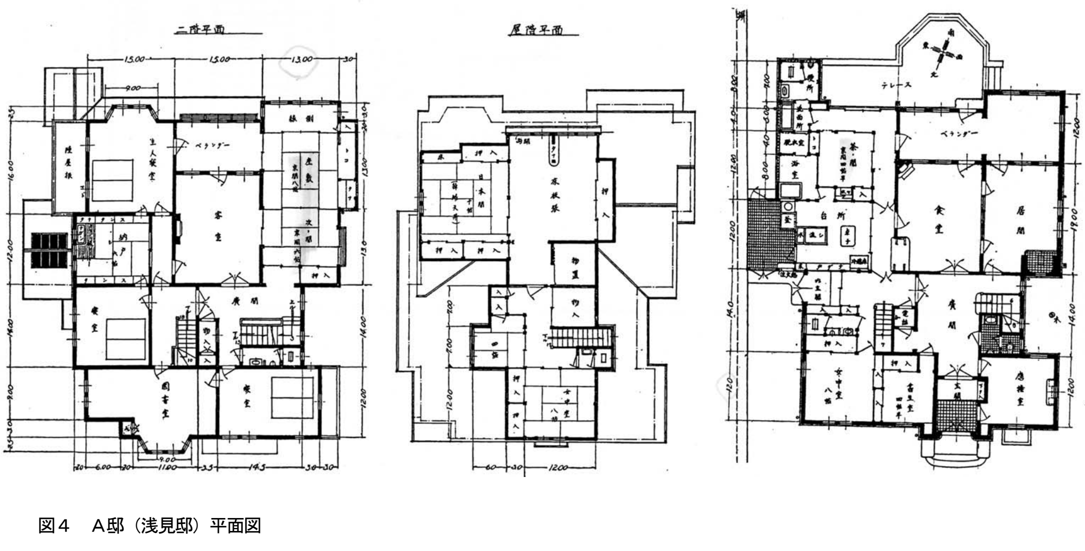


図４　A邸（浅見邸）平面図

続き間であり，最も質の高い座敷に相当する部屋と考えられる．寸法は，平面図から真々で 1 間 6.5 尺であるのに対し，他の和室は真々で 1 間 6 尺の「田舎間」であることがわかる．

K 邸（熊谷邸）：：この住宅は，京都市内に昭和 6 年竣工した鉄筋コンクリート構造三階建てのスパニッシュ様式を基調とした洋風住宅で，洋風住宅の背面には木造 2 階建ての和風住宅が並存している．この背面の木造住宅は 1 階が 4 室の「御居間」，2 階が「御客間・次之間」で，すべての部屋が「京間」と記されている．一方，鉄筋コンクリート構造の建物の中に設けられた和室のうち，「内玄関・控室」が「京間」とあり，「女中室」は何も記されていない．ちなみに，この住宅の建設関連図面が清水建設株式会社に所蔵されており(16)，寸法が確認できる．すなわち，「弐階御客間次之間詳細」と記された図面によれば，「御客間」の床の間部分は真々1 間 6.5 尺である（図５）．一方，「平面図」と記された図面によれば，鉄筋コンクリート構造の建物の中の和室のうち，「京間」とある「内玄関・控室」は鉄筋コンクリート構造の躯体の中に和室を入れ込むことによるためか真々で 1 間 6.66 尺（1 間半で 10 尺），「女中室」は真々で 1 間 6 尺の「田舎間」である（図６）．

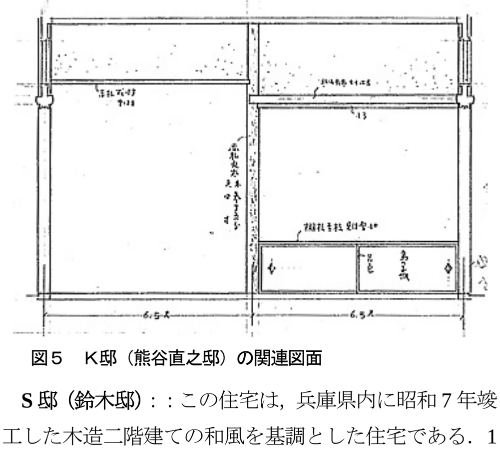


図５　K邸（熊谷直之邸）の関連図面

S 邸（鈴木邸）：：この住宅は，兵庫県内に昭和 7 年竣工した木造二階建ての和風を基調とした住宅である．1 階平面の「御居間・御茶之間」の続き間部分に「中間」の記述がある．『住宅建築図集』では 1 階の平面図しかないが，この住宅の建設関連図面が清水建設株式会社に所蔵されており，他の様子もわかる．すなわち，所蔵関連図面の「平面図」によれば 2 階には「児童室」「予備室」とともに「御客間・次之間」の続き間があり，この「御客間・次之間」には「中間」の記述がみられる（図７）．また，寸法をみると「中間」と記された各部屋は真々で 1 間 6.3 尺である．このことから，「中間」は真々で 1 間 6.3 尺を意味していたことがわかるし，この寸法は一般的に「中京間」と称されるものに近いといえる(17)．なお，他の和室は真々で 1 間 6 尺の「田舎間」である．

Y 邸（山田邸）：：この住宅は，東京市内に昭和 8 年に竣工した木造二階建てのスパニッシュ様式の影響を受けた洋風住宅である．内部は和室と洋室が混在して配されているが，1 階では「御居間・次之間」，「御茶之間」および「納戸」，2 階では「予備室」が「中間」と記されており，他の「女中室」などの和室には何も記されていない．この住宅の建設関連図面が清水建設株式会社に所蔵されており，寸法がわかる．すなわち，「平面図」と記された図面をみると，「中間」の寸法は真々で 1 間 6.3 尺，他の諸室は真々で 1 間 6 尺の「田舎間」である．

T 邸（田中邸）：：この住宅は，新潟県内に昭和 9 年に竣工した木造二階建ての和風住宅である．この住宅には「茶室」があり，その部屋が「京間」と記されている．具体的な寸法はわからない．

I 男爵邸（伊藤男爵邸）：：この住宅は，東京市内に昭和 10 年に竣工した木造二階建ての和風住宅である．この住宅の設計寸法は複雑で，「京間」と「中間」の両方が確認される．また，この住宅の建設関連図面が清水建設株式会社に所蔵されており，寸法がわかる．すなわち，「一・二階平面図」と記された図面によれば，「京間」と記された部屋は，1 階では「寄付」と「夫人室」，2 階では「小座敷」で，「中間」は 1 階では「御主人室・次之間」，2 階では「客間・次之間」である（図８）．

その寸法は，図面によれば「京間」は，1 階の「夫人室」は 1 間が真々で 6.48 尺，2 階の「小座敷」は 1 間が真々で 6.53 尺と 6.61 尺で，1 間真々で 6.5 尺前後となる．「中間」は，1 階「御主人室・次之間」では 1 間真々で 6.19 尺，2 階「客間・次之間」では 1 間真々で 6.19 尺あるいは 6.25 尺であり，1 間真々で 6.2 尺前後となる．

I 邸（磯村邸）：：この建物は茶室で，具体的な寸法は不明だが「京間」と記されている．茶室は，現在でも京間が一般的であり，そうした流れを汲んだものと思われる．

K 邸増築（木村邸）：：この建物は，東京市内に昭和 12 年に竣工した，木造平屋建ての和風の小住宅の増築である．「仏間」のみ「京間」で設計された．建設関連図面が清水建設株式会社に所蔵されており，これによれば寸法は，1 間真々で 6.5 尺である．他の和室はすべて 1 間真々で 6 尺の「田舎間」である．

K 邸（古賀邸）：：この建物は，東京市内に昭和 13 年に竣工した木造 2 階建ての伝統色の残る和風住宅である．1 階の最も格の高い「客間・次ノ間」が「京間」と記さ

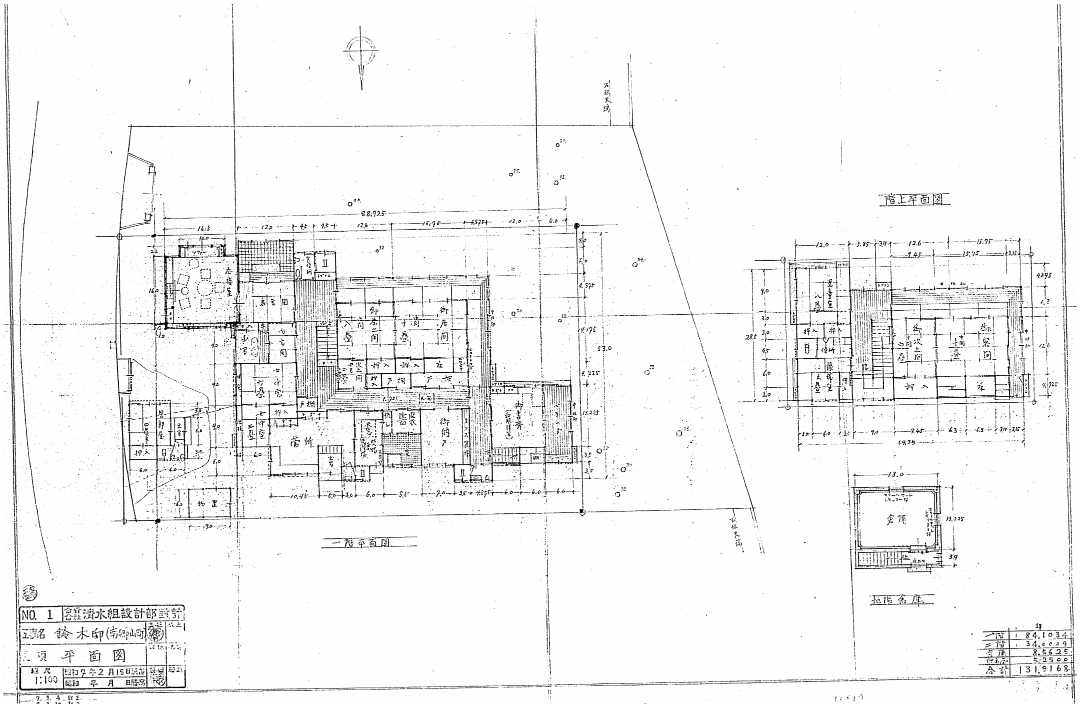


図６　K邸 （熊谷邸） の関連図面 「平面図」

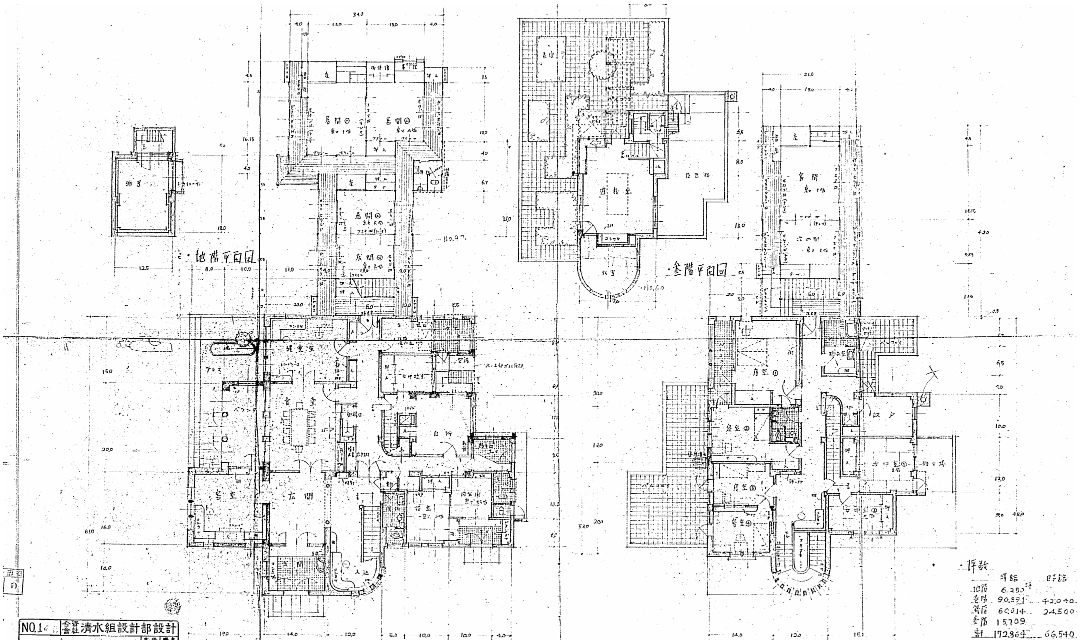


図７　S邸 （鈴木邸） の関連図面 「平面図」 （昭和７年２月１５日製図）より

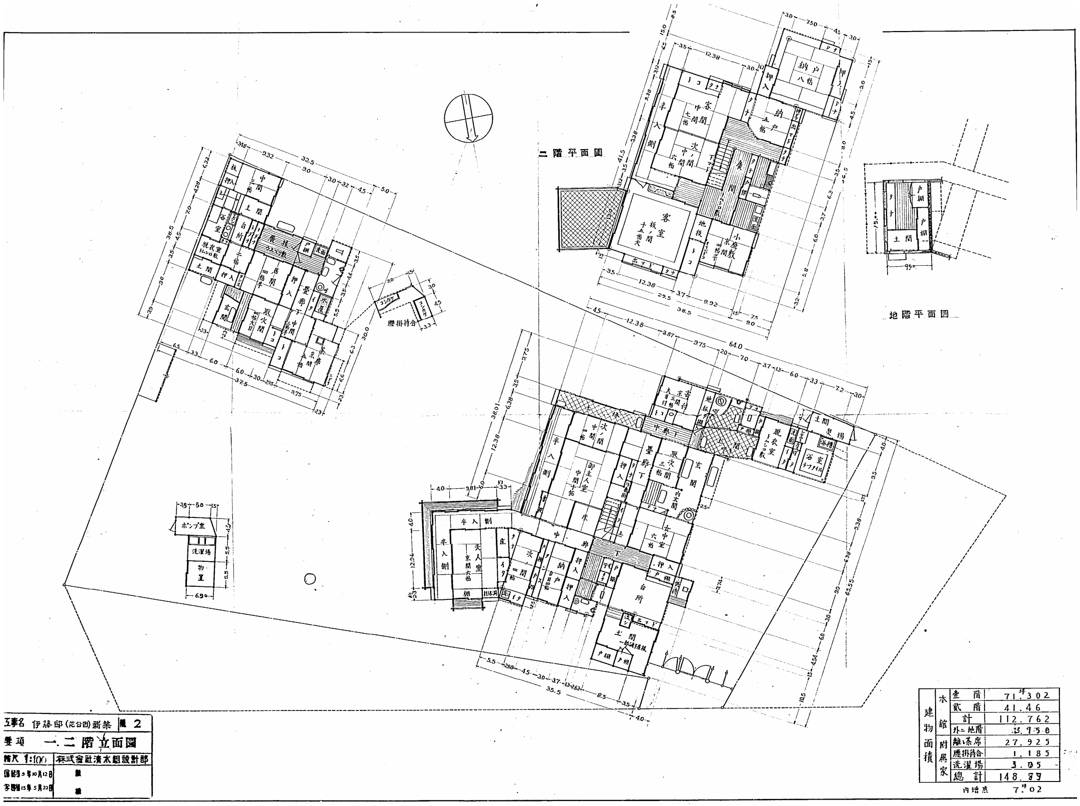


図８　Ｉ男爵邸（伊藤男爵邸）の関連図面「一、二階平面図」（製作年代未記入）

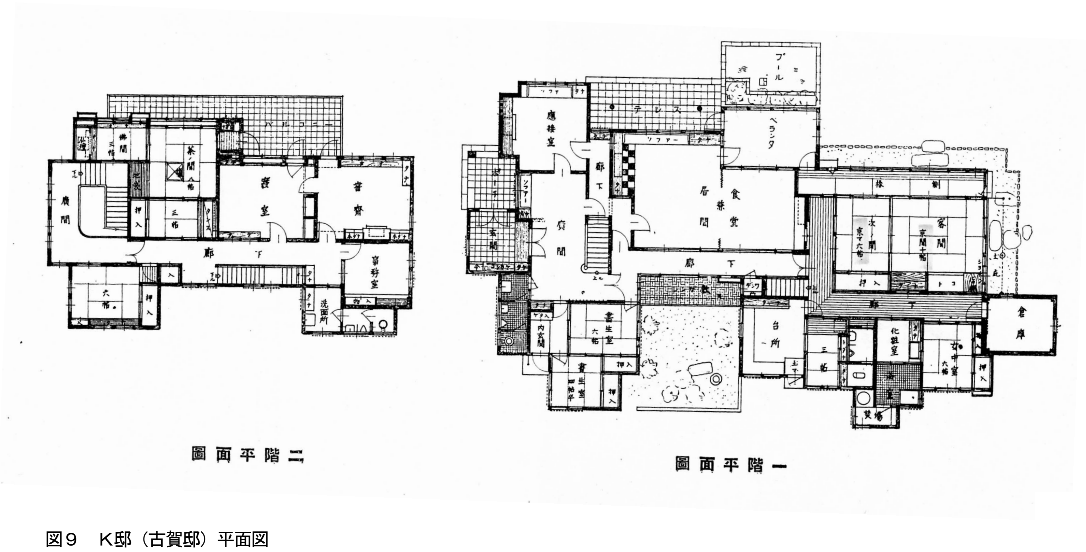


図９　Ｋ邸（古賀邸）平面図

れている．寸法は確認できないものの，階段の柱位置などと対応せず,柱間寸法が異なっている様子が窺える(図９)。

４.「京間」「中間」と記された諸室にみられる傾向

次に，この時期の住まいの間取りは概ね<接客ゾーン>，<生活ゾーン>，<サービスゾーン>の 3 つのゾーンからなるため [18]，これらの 11 例の住宅建築の和室に注目し，その部屋名称から 3 つのゾーンのいずれに属するかを分類し，かつ，その設計寸法毎に整理したものが表 2 である.

これによれば,「京間」と記された部屋の事例のうち,「茶室」あるいは「茶席」のみを「京間」としたものが 11 例中 2 例存在する．これは，現在でも茶室は「京間」で設計する事例がみられることからも明らかなように,伝統的な風習を踏襲したものといえるであろう.

一方,「京間」と「田舎間」が併用されている事例 7 例をみてみると,「座敷・次之間」のように最も格の高い接客の場を「京間」としているものは 7 例中 5 例であり，このうち K 邸（柏原邸）と K 邸（古賀邸）の 2 例は「座敷・次之間」の接客の場だけを「京間」としているこの 2 例に端的に示されているように「京間」が採用され最も格式の高い場に用いられていることが窺える.

また，H 邸（堀内邸）・A 邸（浅見邸）・K 邸（熊谷邸）にみられるように家族生活の場にも「京間」が採用されている事例がみられる．しかしながら，接客の場が「田舎間」で家族生活の場だけが「京間」といった逆の事例はみられない．このことから，基本的には住宅建築の中でも格の高い部屋である座敷部分，そして，家族の使用する部屋に順次「京間」が優先的に採用されていると考えられる.

同様に,「中間」と「田舎間」が併用されている事例をみると，S 邸（鈴木邸）では「中間」は「座敷・次之間」の接客の場と家族の生活の場であり，また，Y 邸（山田邸）では接客の場と家族生活の場が「中間」を採用している．また，Y 邸（山田邸）では「中間」で設計された「御居間・次之間」は，名称から家族生活の場に相当するものの，住宅内の唯一の続き間で，かつ，離れ的な場所に立地し,「御居間」には床と棚が備わるなど隠居部屋

表２　各住宅の和室の設計寸法から分類表

住宅名	各ゾーン	「京間」の部屋名称	「中間」の部屋名称	「田舎間」の部屋名称
H邸（堀越）	接客ゾーン	「表玄関」「離レ座敷・次之間」		
	生活ゾーン	「御仏間」「御居間・次之間・参之間」「台子之間」「洗面之間」		「御化粧室」「脱衣室」「食堂次之間」等
	サービスゾーン	「執事室」「御倉庫」		「書生室」「下男室」「女中室」等
A邸（浅見）	接客ゾーン	「座敷・次之間」		
	生活ゾーン	「茶ノ間」		「日本間」？
	サービスゾーン			「女中室」「書生室」
K邸（柏原）	接客ゾーン	「座敷・次之間」？		
	生活ゾーン			「茶ノ間」等
	サービスゾーン			「執事室」「書生室」「女中室」等
K邸（熊谷）	接客ゾーン	「御客間・次之間」		
	生活ゾーン	「御居間」「内玄関・控室」		
	サービスゾーン			「女中室」「女中寝室」
S邸（鈴木）	接客ゾーン		「御客間・御次之間」	「表玄関」
	生活ゾーン		「御居間・御茶之間」	「内玄関」「児童室」「予備室」
	サービスゾーン			「女中室」
Y邸（山田）	接客ゾーン		「予備室」	
	生活ゾーン		「御居間・次之間」「御茶之間」	「内玄関」
	サービスゾーン		「納戸」	「裁縫火熨斗部屋」「女中部屋」
T邸（田中）	接客ゾーン			「客間・次之間」など
	生活ゾーン	「茶室」		
	サービスゾーン			「女中室」等
I男爵邸（伊藤）	接客ゾーン	「寄付」「小座敷」	「客間・次之間」	「取次ノ間」
	生活ゾーン	「夫人室」	「御主人室・次之間」	
	サービスゾーン			「女中室」「納戸」等
I邸茶席		茶席		
K邸増築（木村）	接客ゾーン			
	生活ゾーン	「仏間」		「寝室」「居間」等
	サービスゾーン			「女中室」等
K邸（古賀）	接客ゾーン	「客間・次之間」		
	生活ゾーン			「茶の間」「仏間」等
	サービスゾーン			「女中室」「書生室」等

座敷的割も兼ね備えていたとも推察され，基本的にはやはり住宅内で最も格の高い部屋に採用されていたと考えることができる．

また，「京間」と「中間」と「田舎間」の3種類を並存させているI男爵邸（伊藤男爵邸）は，「京間」は「寄付」という簡単な接客の場と「夫人室」に採用されている．そして，「中間」は続き間の「客間・次之間」と「御主人室・次之間」に採用されている．この住宅で最も格の高い部屋は「客間・次之間」であり，次いで「御主人室・次之間」と考えられる．その意味では，「京間」と「中間」の使い方は，これまでの事例にみられる傾向とは異なる．ただ，それでも，接客の場や主人や夫人の生活の部屋が，「田舎間」による他の部屋と区別されて「京間」や「中間」で設計されていたことは明らかである．このように11例とその事例は少ないものの，意図的に同一建物のなかで，その部屋の用途や役割に準じて「京間」と「中間」と「田舎間」の設計寸法を使い分ける設計手法が存在していたことが窺えるのである．

なお，具体的な寸法をみてみると，「京間」は11事例をみる限り，1間を真々で6.5尺とするのが標準であったといえる．一方，「中間」は1間を真々で6.3尺ならびにその前後の値を指していたようである．この「中間」の寸法は，従来「中京間」と称していた寸法と近いが，この「中間」を「中京間」と称すべきかどうかはもう少し検討が必要であろう [19]．

５．結言　・・・異なった基準寸法を同一建築で用いる設計手法について

本稿では，清水組の手掛けた住宅建築349件を対象に，各住宅の平面図の記述を手掛かりにして，同一建物でありながら「田舎間」と「京間」のように異なった設計寸法を併用している事例を取り上げ，その報告を行った．現段階では，異なった寸法を併用していると確認できた事例は349件中11件，既報でも45件中6件と少なく，例外的な存在との判断も可能である．しかしながら，筆者は，この異なった基準寸法を同一建築で併用する設計手法は，極めて意図的な新しい設計手法であったと考えている．すなわち，江戸期においても，「座敷・次の間」を特別な素材や技術，あるいは，意匠を用いて備えることは一般的に行われていた設計方法であった．「京間」や「中間」が「座敷・次の間」に優先して用いられている傾向から考え，異なった設計寸法を同一建築で用いるのは，この従来の「座敷・次の間」を意匠的に重視する方法を，新たに寸法を用いて表現したものと推測できるのである．

なお，近代和風建築の寸法に着目した研究は極めて少なく，佐賀県の近代和風建築調査を終え，その特徴をまとめた伊東龍一博士らの研究が知られる．伊東博士らは伝統的な佐賀間畳と京間畳の存在に注目し，「建築家が設計した建物や近代になって現われた新しい用途の建物，新たに興った企業家の家には京間が多い」[20] と述べている．ここでは，異なった設計寸法の同一建物内での併用に関する報告ではないが，近代以降に建築家が関与した建物に設計寸法を「京間」とした事例が増えたことを指摘している．この指摘は，「京間」が近代以降に「建築家」にとって重要な意味を持っていたことを窺わせるものであり，興味深い．また，同様に伊東博士らは調査物件について「如蘭塾は寄宿舎，迎賓館とも建築家・遠藤新の設計であるが，寄宿舎は田舎間（6尺）の心々制のようであるが，迎賓館の方は，京間（6尺5寸）畳割で設計されている」と報告している．これは，読み換えれば，如蘭塾の施設として，寄宿舎と迎賓館を手掛けた建築家の遠藤新が，その建物の用途にふさわしい表現を追求する中で，接客の場である迎賓館を京間，学生の寄宿舎を田舎間でそれぞれ設計したことを意味している．それは，これまでの住宅建築にみてきたひとつの住宅のなかで座敷部分のみに京間を用いる設計方法と共通した設計姿勢といえるように考えられるのである．いずれにせよ，こうした事例の存在からも窺えるように，設計寸法を意図的に使い分ける新しい設計手法が近代において試みられていたと考えられるのであり，こうした設計手法に近代建築特有の特徴のひとつをみることができると考えている．

注

(1) 例えば，1996年に発行された『佐賀県の近代和風建築』（佐賀県教育委員会）では，「幕末から昭和20年までに建設された諸建築のうち次の条件を満たすもの．」と述べられている．また，条件としては特徴と種類に大別され，特徴は「１．伝統的様式や技法で建てられた木造建造物，２．一部洋風の様式や技法が用いられているが，主に伝統的様式や技法で建てられた建築物」，種類は「１．住宅等，２．公共建築等，３．宗教建築等，４．以上のほか，これらと一体となって保存されるべき門，塀，蔵などを含む」とある．

なお，この定義は，平成16年の『千葉県の近代和風建築』（千葉県教育委員会），平成19年の『北海道の近代和風建築』（北海道教育委員会）にもそのまま踏襲され用いられている．

(2) 鈴木博之「近代和風建築を味わう 7 つのキーワード」『東京人』(2009 年 10 月号) pp20-25.

(3) 内田青蔵監修，住宅総合研究財団編，柏書房 2009 年 5 月.

(4) 「近代建築」の定義もいろいろ解釈が見られるが，そのひとつに「近代」という時代に建てられた建築すべてを指すという解釈もある.

(5) 清水建設株式会社の社名は，「清水喜助（文化元年～明治一四年三月），清水満之助/清水満之助店（明治一四年三月～大正四年一〇月），合資会社清水組（大正 4 年一〇月～昭和一二年二月），株式会社清水組（昭和一二年一一月～昭和二三年一月），清水建設株式会社（昭和二三年二月～現在)」(『明治・大正の邸宅』凡例 p6）と変更されている.

(6) 「彩色図集」は，文字通り着色された平面図・立面図・断面図などからなる図面集である．こうした見せることを意識した図集が何ゆえ作成されたのかは明らかではないが，極めて精緻な図面で，資料的な価値に加え，美術品としての価値も高いものと思われる. 45 作品が集録されており，その内訳は個人住宅 31 件，別邸 7 件，貸家 2 件，寄宿舎 1 件，その他 4 件である.

(7) 前掲３）参照．pp167-178.

(8) 昭和 10 年度版（1935 年度版）は「昭和九年十二月末迄」，昭和 14 年度版（1939 年版）は「昭和九年七月より昭和十三年六月末迄」に清水組が施工した住宅建築を収録している．本書発行の目的は，1935 年版によれば，住宅建築の過渡的な状況の中で，「完全なる住宅建築の発達を期し，設計並に施工上好個の資料に供せんとするもの」と記されている.

(9) 後藤久太郎「近世指図の作図技法と図面表現－諸藩江戸藩邸指図を中心に」『生活科学研究所研究報告』第 23 巻 pp50-69 宮城学院女子大学生活科学研究所 1991.

(10) ひとつの仮説として理解していただきたい.

(11) なお，196 件の中には大正 12 年以前の事例が 12 件含まれている．この中には「彩色図面」に含まれるものもあるため 12 件の事例は除外した．また，付録としてこれら住宅建築以外に料亭や旅館が 7 件紹介されている.

(12) 作品の内訳は，個人住宅とともに，別荘建築，茶室や増築などもそれぞれ 1 件として含まれている.

(13) 清水組には『住宅建築図集』に集録されている住宅事例を含む住宅建築に関する図面がマイクロフィルムとして保存されている．設計施工した作品全ての図面が存在するかどうかは検討を要するが，これら 349 件の図面の存在を確認し，存在するものに関しては図面から設計寸法を割り出すことも可能である．ただ，その図面数は膨大で，今後の課題としたいと考えている．なお，施主の氏名は，現在清水建設株式会社に保管されている「工事竣工報告書」などから明らかになる場合がある.

(14) この当時，座敷は南面するように配されるのが一般的であった．そのため，「離レ座敷・次之間」，「御居間・次之間」の縁側が設けられているほうが南面と判断される.

(15) 桜井の経歴は『建築人物群像』(土崎紀子・沢良子編 住まいの図書館出版局 1995 年) pp60-61 に詳しい.

(16) 図面はマイクロフィルムとして所蔵されている．ちなみに，熊谷邸の関連図面は 18 枚で，配置図，平面図・立面

図・断面図などが確認される.

(17) 『建築用語辞典』(建築用語辞典編集委員会 技法堂出版 1995 年）によれば中京間は「柱割については，1 間を 6.2 尺とし，畳割については，畳の基準寸法を 6 尺×3 尺としている」とあり，真々1 間 6.3 尺は中京間より少し大きいことがわかる．本稿ではこの「中間」は一応「中京間」と称することにする．なお，江戸時代の 1 間の長さに関しては，西和夫は江戸時代の建築の修理工事報告書をもとに「中部から関東にかけて六尺が分布している．しかし，栃木・千葉に六尺二寸五分が，茨城から北には六尺三寸が，盛岡から岩手には六尺五寸が，秋田には七尺がある．一方近畿から中国・四国には六尺三寸が分布し，奈良と四国北部には六尺五寸がある」(『建築技術史の謎を解く』p73 彰国社 1986 年）と述べている．この建物は，兵庫県に建てられた建物であり，1 間 6 尺 3 三寸は伝統的な寸法を採用した可能性も考えられる.

(18) 明治後期の住宅設計論を記したものとして知られる『和洋住宅建築学 下』(駒杵勤治著・越本長三郎編 須原屋 1907 年）では，当時の住宅について「大なる住宅には数棟を以て一家を為し其間を連続するに渡り廊下を以てするを普通とせり．其区分する部を大別すれば三とす．玄関，応接，控室，客室等を一括したるもの其一なり. 家族の居間を一括したるもの其二なり. 下卑部屋，台所等雇人占用の部を一括したるもの其三なりとす.」とし，住宅を接客ゾーン，家族の生活ゾーン，使用人の働くサービスゾーンの 3 つの機能からなることを述べている．これから，こうした捉え方が当時の一般的認識であったことが窺える.

(19) 拙稿「『彩色図集』に見られる近代上流住宅の設計手法について」(注３参照）では，「中間」を「中京間」として扱っているが，詳細な検討を加えて再考したい.

(20) 久保田貴紀・北野隆・伊東龍一「佐賀県の近代和風建築に関する研究—和室の柱間基準寸法について」日本建築学会中国・九州支部研究報告 pp621-624　1996 年 3 月.

出典

図１：内田青蔵（監修）住宅総合研究財団（編）『明治・大正の邸宅　清水組作成彩色図の世界』柏書房（2009）p.167

図２：合資会社清水組編集『住宅建築図集』土木建築資料新聞社（1935）p.21

図３：同上，p.21

図４：同上，p.35

図５：清水建設株式会社所蔵資料

図６：同上

図７：同上

図８：同上

図９：株式会社清水組（編）『住宅建築図集』株式会社清水組（1939）p.224

集落の空間，その持続的自律的空間構造と近代主義計画モデルとの矛盾

重村　力*

Space of Hamlet, Sustainable and Autonomous Spatial Order, A Contradiction to Modern Planning Theory

Tsutomu SHIGEMURA*

１．集落の自然的性格

集落という言葉は本来都市集落や農村集落など居住地の集積一般を指すのが正しいがここでは通例に従い集落について，村落の意味で用いる．集落とはひとまとまりの居住地を意味する．だが集落が，近代以降の計画やインフラストラクチャーに規定され短期に形成された居住地と大きく異なるのは，自然的条件に規定されさらに時間をかけ社会的条件に関係づけられて居住地空間が形成されてきた点である．集落空間は居住地として人為的に形成され，時間をかけて調整されてきたのだが，あたかも自然に形成されてきたかのように見える．集落には豊かに自然が介在している．居住地内にも緑地の占める率は高く，さらに圃場などの生産緑地や生活の持続を支える里山などの緑地が居住地を包んでいる．集落の立地においては地形を選択し，地形の庇護や地形を利用した生業・生活の利点などを大いに重視し，それらが植生の選択操作や土地利用（海岸や河川の利用）に反映している．したがって自然地形と植生・土地利用・集落居住域の関係が包摂関係として成立している．同時にこの関係は有機的に生産空間や生活空間を内包した構造を形成しており，その大きな拠点である住宅および屋敷地はその構造の要となっている．集落の空間構造のありようが散村・集村の違いなどとして表現されるのだが，これらを構成する要素と自然に対応したあらわれ方は実に多様である．

*教授　建築学科
Professor, Dept. of Architecture

２．集落の社会的形成過程と持続性

近代的な計画によって大きく改変されていない集落空間は，近代以降に形成された居住地と異なる特徴を持っている．自然は微細な単位まで豊かに集落空間に編み込まれている．住居相互の関係はよく吟味調整され，配置は幾何学的ではないが時にフラクタルな構造をもち，一定の多様性を容認する暗黙の大きな規則性を内包し，地域の住宅様式を単位とする町並み・家並みを形成している．

集落は社会的な単位でもある．住戸＝家族を単位として，基礎集合としての群＝数戸から二十戸弱までの群を形成し，さらにこれらが１～数群集まって一つの集落を形成する．この数値については多くの研究者がすでに指摘しているが，一般の人間組織＝会社・軍隊・スポーツゲームなどを通じた個人からなる組織単位の人間数とも近似し，また指の数に起因する脳の数値認識に基礎があると推察されている．これらは居住を通じたさまざまな協同の単位である．土地や環境を管理する単位であり，産業生産の単位であり，かつてはより広域の社会に対する意思表示の単位でもあった．近代的空間と大きく異なる点は，これらは住居を単位とする社会の単位（家族）を基礎に形成されている長期の参加型環境管理の秩序であることである．すなわち個々の住宅の形は物的な劣化陳腐化に応じ，また世代変化などの居住者の内部事情を反映し数十年単位で個々に変化する．時に単位の消滅や新設も行われるのだが，これらからなる住宅群と集落の関係は相互に調整され，更新が行われるがそのつど新たな平衡を見いだし，調和が更新され，持続的に充実してゆく構造を持っている．これらの社会的な単位の維持・持続的更新が損なわれると，集落は衰退の道を歩む．

３．意識空間としての集落の構造

こうした物的な構造，社会的な構造に加えて，もう一つ大きな空間構造として，意識構造をあげなければならない．集落空間はさまざまな信仰的な空間性を帯び,そこには意識と結びついた多くのオブジェクトがある．さらに平常の空間でも生活の節目や場面によっては特別な意味が付与されることがあり，日常もそのことが心の底に意識されている．その意識がまた空間を際だたせ強調することになる．鎮守の森は伐らないなどの行為によって鎮守はひときわ異なる植生をもち目立つ存在となる．このような構造は，日常の活動に基礎づけられているのだが，これに加えて非日常＝年中行事や生死や成長や老いに関わる通過儀礼・天候・豊不作，さらには長周期の出来事（開拓や災害など）に起源を発するさまざまな祈り願い想いが加わっている．このような意識空間の構造（心的空間構造）は，社会的な空間構造とともに物的な空間構造の背後からこれらを強化し保持している．日本では今日消滅する集落，あるいは消滅の危機にある集落が，いわゆる「限界集落」として議論されるようになった．しかし内田多喜生によれば 2005 年農林業センサスではこれまででもっとも狭義に定義して調べた結果，集落機能のある農業集落はまだ 11 万１千も存在している．(1) ここでは集落機能とは合意形成を経て，農業生産に関わる環境資産を共同管理している活動の存在することとして厳密に定義されている．集落の消長はこの社会的単位による集落空間の管理に関わっており，それらの背後には集落意識空間の保持も含まれていると筆者は考える．

４．集落の骨格的構造とその発展

さてこのように形成されてきた集落空間における個々の公的空間は，一空間や一施設に単一の機能を期待し，足し算的積み上げ的に計画され形成されてきた近代都市計画のそれとは大きく異なり，複合的意味が付与されており，（たとえば道と水路と農地のように）同時に集落に存在するさまざまな空間と密接不可分な共存関係を構築している．これらが形成する骨格的構造について見てみる．

2006/6/28 に逝去した地井昭夫博士元日本建築学会農村計画委員長（元広島大学教授　広島国際大学教授）に敬意を表し，地井の漁村に関する講義資料を参照しつつ，筆者自身がこの集落を観察して見る．伊根浦（京都府伊根町平田亀島地区）の浜沿いの舟屋と母屋からなる配置構造は，干満の差が著しく少なく平地や緩斜面がないこの浦の自然的構造と，浜辺に接する社会的権利＝株によって規定されている．立地した舟屋とその奥の母屋との間の連続する空隙（にわ）が道路となるのは近代以降の乗り物の登場からであるという．ここではいわば浦（湾）が第一の構造であり，そこにとりついた舟屋と母屋がなす道の構造が第二の構造である．そこから山の方へ農地や寺社や学校などの施設が発展しまた浜に沿って第三第四の構造が発展している．

より複雑化した構造ではどうであろう？同じく地井講義資料に登場する下関市豊北町島戸集落では，小さな湾を取り巻く緩斜面を住居が埋め尽くしているが，浜辺の道から居住地を形成する道筋がほぼ三重の格子状で単位を形成されている．また寺院や神社に向かって放射状の主要道が中央の市場などの漁港施設から延びており，そこに公共施設がとりつくと共に先の居住地の単位を結びつけている．

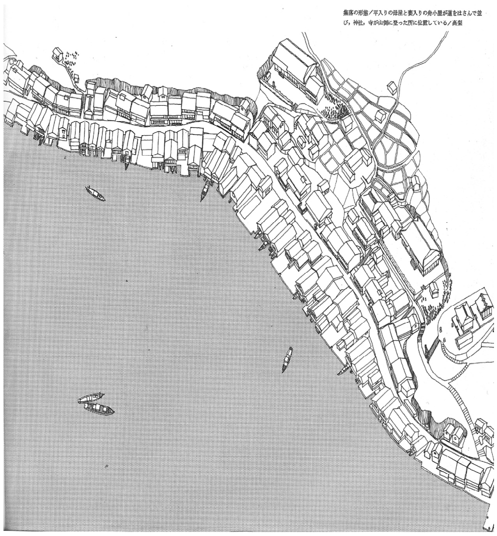


図１　京都府伊根町伊根浦

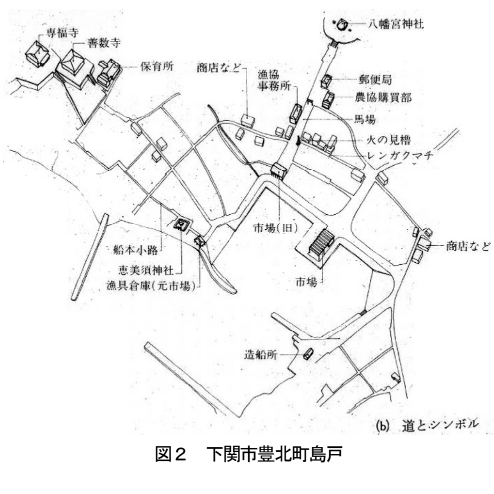


図２　下関市豊北町島戸

５．骨格構造の複合的性格

これらの骨格構造はさまざまに複合的役割を果たしていると考えられる．居住に関わる生活の機能や産業的生産の行為の場となると共に，交通などの複合的な機能が互いに互いを制約する形でいわば融通しあって存在している．だから道とはいっても通過交通は大いに制御されている．また集落内の内部交通や内外の交通も非交通の機能たとえば市やこどもの遊び，産物や漁具の乾燥といった機能が成立しあう範囲で成立している．非日常の行事，祭りや葬儀はこれらの骨格を全面的に変換して共同空間としての性格をあらわにする．このような非日常の節目において，これが「天下の公道」のように無限定な公共空間ではなく，集落の社会的単位によって管理され，集落の意識空間の構造に強く組み込まれ，視覚的にもいっそう強調された共同空間の構造として明らかになる．60 年代末期から 70 年代に歩車共存の考えが近代都市計画にもようやく取り入れられるが，集落はもともともっと複合的であった．もうすこし正確に言えば近代以前の都市空間も含めて集住空間はそのような複合性を帯びていた．都市では部分的に空間が継承されることはあってもかつてあった構造性を失っているのに対し，多くの集落ではその中心性と全体性を含めて現代でも読み取れる構造をこれまで持続してきたといえるであろう．

６．都市に残る集落のなごり

関西には地蔵盆という習慣が広く強く残り，関西の都市を８月 24 日前後に注意深く歩いていると，こんなにも多いかと思うほど密度濃く地蔵が分布していることに気づく．だいたい小学校区や幼稚園分布などのスケールよりずっと細かく，先に述べた数戸から二十戸までの基礎単位（都市では隣保）のスケールまたはそれ以上細かい密度で地蔵が分布している．地蔵堂などは独自の境内などをもっていることは少なく，たいがいは道路に向かった小さな祠（ほこら）として存在している．地蔵盆の日が来ると，それまで隠れていた広がりが突然見えてくる．神戸市などで比較的近年（戦後）まで集落の骨格が残っていた地区（たとえば灘区・東灘区）では，区画整理や都市計画道路などのつくった秩序に対して，まったくこれを無視したしつらえと利用の形態が出現することがある．たとえば突然道路をまたいで竹とよしずのルーバーがかけられ，車道にゴザ（うすべり）が敷かれ，ベンチや座卓がおかれて，こどもたちをもてなす空間や大人たちの待機場所が作られる．道路占有の許可などとは無縁に至極当然の行為としていわば無礼講のようにこの空間が現れる．失われていた集落空間の出現に驚き，戦前の地図を取り出して確認してみると，隠れていた構造が一時復活したのだとようやく納得することができる．古い住み手から見れば日常の都市空間の方が異常なのかも知れない．

７．広域骨格の暴力性

70 年代に沖縄県北部の西海岸の恩納村・名護市の計画[(2)] を行っていた時に直面した問題に，（米軍）軍用道路１号線という道路が集落を突っ切って走り，この騒音や危険を何とかしなければならないという課題があった．近代以前では海岸線の集落は必ずしも海岸縁の道路によって結ばれていたのではなく，古い道は尾根道など山道でむしろ海辺の移動は珊瑚礁で波も穏和な海路に頼っていただろうし，台風などの暴風雨時には海辺は不安定稲荷黒であったことが推察される．海岸縁の道路骨格は明治以降も未発達であり，後に広域を結ぶ道が必要になったとき，集落の中に海岸線に沿った水平軸となる道路があり，これらをつなぐ形で広域道路が形成された．だが軍用道とはもとあった道路にアスファルトを簡易舗装しただけの道路である．ヴェトナム戦争中戦車や戦闘車両を積んだ大型車両が北部の演習場と中南部の中枢を結んで疾走するので道路は傷む．そうするとまたその上にアスファルトをつぎたし舗装することになる．72 年の復帰時点で，道路は周囲の家から数十センチ，時に一メート

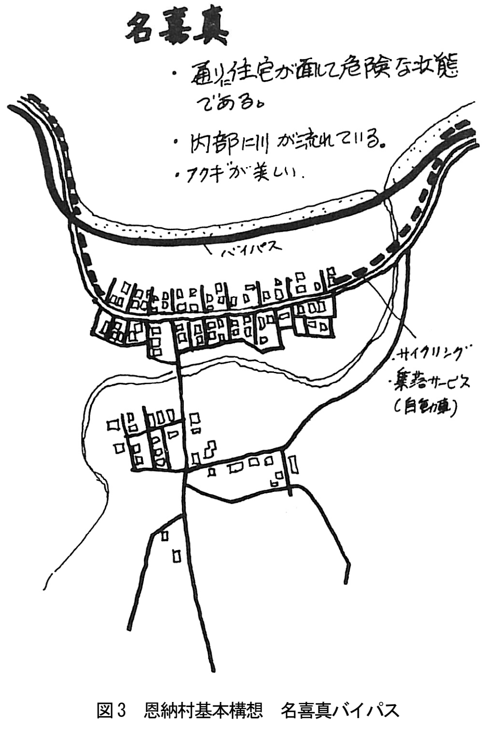


図３　恩納村基本構想　名喜真バイパス

ルも高いものとなっていた．復帰以降の計画でこれら交通の集落分断進入を回避する計画を策定する必要があった．だが集落に接しながら集落内交通を回避する的確な通過ルートはない．珊瑚礁の浜と集落の関係，集落と背後の山（くさてのもり・うたき）との関係を注意深く吟味しなければならないことがわかった．(3) やがて正解は海側バイパス・山側バイパスのいずれにもないことに気づいた．必要に応じ広域バイパスを遠隔ルートに設置しつつ，集落をサービスしつつ広域をつなぐバスルートとなる国道などは，場所ごとに吟味してルートを集落分断型ではない形を選ぶ必要があった．集落の意識空間構造の根幹をなすヤマとムラ，ハマとムラの伸びやかなアクセスが確保される場合においてのみ，部分的な迂回路が許されるのである．沖縄本島北部＝山原（やんばる）において集落の前の浜，後ろの山も集落空間の大事な要素である．浜は漁労や海産物採集の場となるだけではなく，ハマシビ＝浜遊び＝海辺の歌垣ともいえる民俗行事の場であり，後背の森はクサテヌムイ＝腰宛の森＝集落抱護林として重視される里山であり，内部にウタキ＝御嶽など信仰の対象となる聖域＝鎮守を持っている．

８．集落空間と防災区画整理

1995 年阪神淡路大震災に際してきわめて被災の程度が大きかった北淡町（現淡路市）富島地区には震災復興事業として区画整理がかけられることになった．淡路島の北西の沿岸の漁村集落であるが，集落規模が大きく，集落内道路は２m 程度の狭いものが多く，広域道路もまた狭かったため，災害に安全な居住地をつくるという名目と，接道条件をみたした建築基準法上の適格宅地をつくり出すという大義名分のもとに区画整理がかけられた．賛成反対入り乱れての紛糾の末，区画整理事業は何度も原案を変更して難航し，10 年後ようやく仮換地が終了，12 年を経た現在ようやく完成像が見える形になってきた．ここでは 15mの幅員の広域道路をはじめ，6m を超す広幅員の街路が縦横につくられ，たしかに道路率は増えたが，広がった道路はかつての漁師町のようではない様相を呈した．広い道はただ意味もなく駐車空間になり，それまで軒を接するようにたてられていた漁師町の住居は，車道歩道を介し小さな塀を回して建てられる都市型戸建て住宅のように変わった．かつて狭い漁村の街路は，おびただしく存在した地蔵や稲荷，恵比寿，弁天などの祠（ほこら）や社（やしろ），寺を結節点として編み目のように組み立てられていたが，いまではこれらの祠の多くが道路から切り離された場所に取り残されたり失われたりしている．人口は３割，住戸数は２割減った．(21ha

図４　富島震災復興土地区画整理事業計画

震災以前 720 戸)．まだ十分な社会調査が行われてはいないが，社会的構造がシャッフルされると共に，共同空間が消滅し，公共空間が肥大化し，社会単位ごとの空間管理が行われる構造が失われたのは明らかであり，信仰空間の減少と後退は意識空間の破壊にもなっていると共に，集落を結びつけていた構造が失われた．かつての細街路（＝網道とよばれた）にそって民家がひしめき合っていたときは近隣の人が誰それはどの部屋で寝ていると言うことがわかっていたため，大半の家屋が倒壊するという惨事の中でほとんどの人が生きて救出されるという不幸中の幸いがあったのはこの空間構造のおかげでもあった．車社会にはなったが人づきあいと鍵をかけずにすむコミュニティが失われたと嘆かれている．区画整理はドイツにおいて相続を重ねて利用不可能なほどに細分割された街村状の土地権利を清算し，必要なインフラを均等負担により生み出し，新しい付加価値の大きい都市空間を作り出す不動産経済的観点にもとづく近代主義の手法であった．都市計画においては何がえられるかという視点も大切であるが，持続してきた何が失われるかという視点はもっと大切である．一方で現状の持続を尊重しながら不足分を補う手法をとった島の反対側北東部の東浦町（現淡路市）仮屋地区では漁村集落整備事業と密集住宅市街地整備促進事業の合併施工を行い，顕著な成果をあげ従前の延長線上に集落生活が復活したことと富島地区は対比的である．集落の空間がもっていた複合的機

能はそれを清算して単能的近代空間を足し算によって付加しても回復しにくいこと，社会空間と意識空間に裏付けられた空間の改編は容易ならざる結果をもたらすことを，この結果は示している．

９．土地改良と集落計画

1988-89 年に関わった滋賀県蒲生郡蒲生町横山集落においては，琵琶湖総合整備事業に関連して集落農業のための大規模区画の土地改良事業の実現が目的とされていた．それまでの土地改良事業であると，優良な圃場の実現のために，集落周りの空間やお墓・社寺などの信仰空間，集落近傍に通常ある菜園用地，農村のさまざまなレクリエーション空間が犠牲になることが少なくない．ここでは徹底した調査と参加型の計画立案を行うことにより，これらの空間とその発展形を計画に盛り込むことに成功した．[(4)] 約 50 戸の集落の居住域近傍ではレクリエーション空間や立地可能性のある共同施設の用地を留保し，集落の外周に自動車道路，バス停用地駐車場大型農機具庫用地を確保すると共に，塊村状の集落内部への自動車の進入路は縦横一筋ずつの最小限とした．集落の内部は基本的に自動車進入のための若干の拡幅を行うほか，社寺やここでも随所にある祠や住宅を含めて大きくは変えず，むしろ現在の景観的空間的特徴を変えずに住宅を改良し，また建て替えるにはどうしたらよいかというガイドラインを作ることにした．集落の後継者が新宅を造る住宅保留地を集落の外周道路の内部に確保し，広域では内水からの増水に備えて古くからある堤と可動の堰板を常に皆がレクリエーションなどで意識する場所におくことにした．集落を取り巻く大きな自然の中に墓地もある山を公園として整備し，そこに至る道を特別な道としてつくるなどの計画を行った．山間部にある棚田とため池を伝統農法保存農地として保存整備する提案をしたがこれはかなわず，通常の圃場整備がなされた．

現在この集落は集落単位で営農を共同化し，先進的有機農業を行い，こどもたちのにぎやかな声も聞こえる集落として知られる．ここでは近代的手法と集落空間の持続発展を強く意識した計画が実現できたが，第一にムラづくり委員会という 40 代の後継者世代と共同で作業したこと，さらにはムラに泊まり込みわかりやすく絵で示

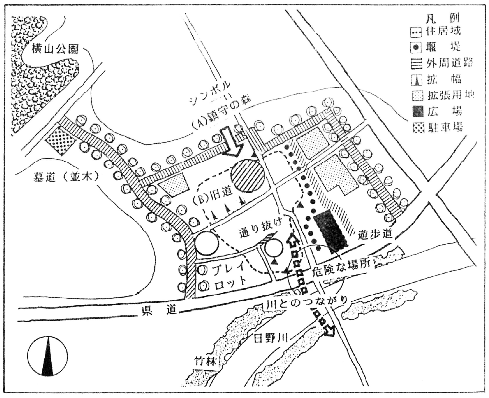


図５　横山集落空間計画概念図

図６　横山集落の当時の現況図

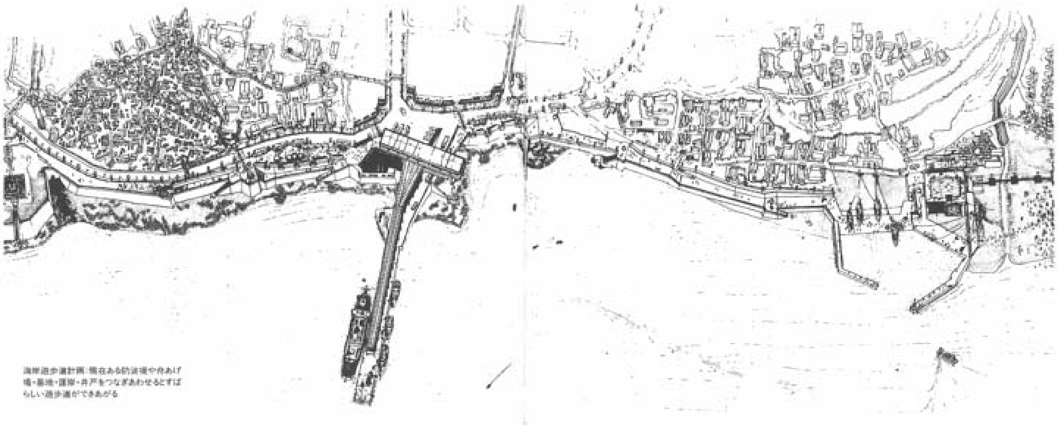


図１０　大島計画　海岸計画図

しながら合意に導いたことなど，ワークショップとフィールドワークを重ね，住民と専門家が共に集落空間を読み解き，発展形を探る手法がそれを可能にした．[5]

10. 大島計画と発見的方法

これら紹介した事例からも明らかなように，自律的に形成され持続的に充実してきた結果構成された集落空間には，個別機能の集合によって都市空間を構築しようとする近代主義都市計画モデルでは置き換えることのできない文化的豊かさが内包されており，逆に生活空間一般を私たちが計画対象にするときに大いに学ばなければならない内容を持っている．まことに「集落は生活空間の学校」である．このような集落空間が都市空間とは別に国土に 11 万もあるという豊かさは日本の国土を保持する重要な拠点網であり，また地域社会を持続的に継承して行く上での重要な社会的基層を構成しているとも言える．

このような集落に対する空間整備の方法は漸進的で空間文脈を読み取りながら持続的に充実して行く方法を住民やステークホルダーの参加によって進めなければならないのは多くの事例から明らかである．そして実は都市空間をその生活文化的背景を損なうことなく充実しながら環境整備して行く方法も実はこの方法によらなければならにことも集落における経験から学ぶことができる．私たちはこのような方法を発見的方法と名付けている．発見的方法とは前述の地井昭夫（のち広島大学教授）や大竹康一（のち象設計集団）が吉阪隆正（早大教授）に率いられて 1960 年代に，伊豆大島元町の大火後の復興計画を練った大島計画の際につくられた言葉である．筆者は最末端の支援スタッフであった．ここではボンエルフに先立つ歩車共存の手法や，神社参道や聖水，墓地などの信仰と共同行事に関わる空間を，復興区画整理に盛り込んだ．[6] 元町の海浜整備計画は地井昭夫によって描かれたもので，浜における朝市や祭り，早朝や夕方の人々の振るまい，桟橋に着いた観光客の行動観察などからその空間性を読み取り，浜辺の空間の使われ方と潜在ニーズいわば期待され方を観察発見し，それを計画案にしたものである．集落空間の多義的性格とその全体的構造性を洞察し，その発展形を発見してゆく手法こそ近代的計画の呪縛を解く道であろう．

本稿は2007.8の日本建築学会大会研究協議会資料「近代の空間システムと日本の空間システムの形成と評価 」pp.9-13 における重村力「集落の空間　その構造をどう読むか　持続的充実の理論と近代主義モデルとの乖離」を加筆修正したものである．

参考文献

（1）内田多喜生，「調査と情報」，2006 年6月
（2）恩納村基本構想案　象設計集団　重村　大竹　地井
名護市土地利用基本計画　策定グループ　大竹　重村　地井
（1977 年日本都市計画学会石川賞受賞）
（3）仲松弥秀，「神と村」，琉球大学沖縄文化研究所刊，1968年
（4）農村地域における整備技術調査 昭和 63 年度報告書「横山地区農業集落計画」，農村地域における整備技術調査検討会近畿地方部会 全国土地改良事業団体連合会，1989 年
（5）李瑛一，重村力，横山集落の共同空間とその性格　－コミュニティの共同空間の場所性－，神戸大学大学院自然科学研究科紀要９－B，p61-73，1991 年３月
（6）大島元町復興基本計画 1965　早稲田大学吉阪研究室　吉阪隆正，大島元町環境計画 1966　同

総説

構造信頼性解析の４次モーメント法

趙　衍剛*　　　盧　朝輝**

A Fourth Moment Method for Structural Reliability Analysis

Yan-Gang ZHAO*　　Zhao-Hui LU**

１．はじめに

信頼性設計法では、想定した限界状態に対して適切な信頼性を確保することが目標となり、破壊確率を効率よく計算することが重要な命題である。破壊確率を計算するために、一次信頼性解析法(FORM)は一般的な手法として広く認識されているが[1)]、信頼性指標は標準正規空間における原点から限界状態曲面への最短距離として定義され、限界状態関数の導関数を求めなければならず、設計点を求める時に局部収束などの問題点がある[2)]。

FORMの問題点改善を目的とし、2次信頼性解析法(SORM)[3)]、応答曲面法(RSA)[4)]、重点サンプリング(IS)[5)]、高次積率標準化(HOMST)[6)] 及び一次近似3次モーメント法(FOTM)[7)]など多くの手法が提案されたが、設計点に関わる問題は線形計画法を用いる繰返し計算に固有な問題点であり、改善することは難しい。また、FORMでは限界状態関数の1次テーラー展開に基づいているため、その精度はテーラー展開近似の精度に依存する。

こうした FORM 設計点に関する問題点を回避するために、限界状態関数の確率モーメントを利用して破壊確率を計算するモーメント法が提案されている[8,9,10,11)]。モーメント法では設計点の概念を用いないため、繰り返し計算、導関数及び設計点に係わる問題が存在しないが、代わりにモーメントの情報だけを用いて信頼性指標を精度よく評価する必要がある。3 次モーメント信頼性指標については既に簡便な計算式が提案されている[12)]が、その適用範囲以外では、無視できない誤差が生じる可能性があり、その場合には4次モーメントを用いる必要がある。４次モーメント信頼性指標についても現在までにいくつかの考察が行われているが[11,13,14,15)]、現状では信頼性指標のパラメータを計算するために非線形方程式を解いたり、積分を行う必要がある。そこで、本稿文では限界状態関数の４次モーメント標準化に基づいて信頼性指標の簡単計算式を提示し、その精度、適用性などを明らかにすることを目的とする。

２．モーメント法の概要

限界状態関数$Z=G(\mathbf{X})$に対して破壊確率P_fは次式のように定義することができる。

$$P_f = P[Z = G(\mathbf{X}) \le 0] = \int_{-\infty}^{0} f_Z(z)dz = F_Z(0) \qquad (1)$$

ここでは $f_Z(z)$と $F_Z(z)$はそれぞれ $Z=G(\mathbf{X})$の確率密度関数(PDF)及び累積分布関数(CDF)である。

まず、限界状態関数の関数値 Z を次式により標準化する。

$$Z_s = \frac{Z - \mu_G}{\sigma_G} \qquad (2)$$

ただし、μ_Gとσ_Gは$Z=G(\mathbf{X})$の平均値と標準偏差である。

$$\begin{aligned} P_f &= Prob[G \le 0] = Prob[Z_s\sigma_G + \mu_G \le 0] \\ &= Prob[Z_s \le -\frac{\mu_G}{\sigma_G}] = Prob[Z_s \le -\beta_{2M}] \end{aligned} \qquad (3)$$

より、破壊確率は次式のように表される。

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta_{2M}} f_{Z_s}(z_s)dz_s \qquad (4)$$

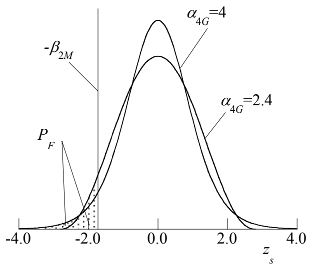
ただし、

$$\beta_{2M} = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \qquad (5)$$

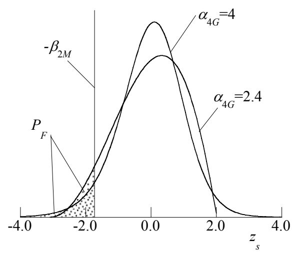
は2次モーメント(2M)信頼性指標である。

限界状態関数$G(\mathbf{X})$は複数の確率変数の関数であり、その関数値Zの確率密度関数を求めることは一般に困難であるので、Zの平均値、標準偏差、歪度、尖度などのモーメントを利用して式(1)及び(3)の破壊確率を求めることが

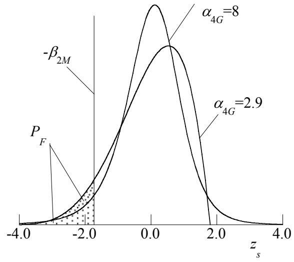
*教授　建築学科
Professor, Dept. of Architecture
** JSPS ポスドク研究員　建築学科
JSPS Postdoctoral Research Associate, Dept. of Architecture



(a) α_{3G}=0.0



(b) α_{3G}=-0.3



(c) α_{3G}=-0.6

Fig. 1　Effects of the kurtosis on probability of failure

モーメント法の基本である。

限界状態関数の平均値と標準偏差のみを利用する方法は2次モーメント法である。Zが正規確率変数以外の場合には信頼性解析結果に誤差が大きいことは周知の事実であり、限界状態関数の歪度a_{3G}は次式に示す範囲に収まらなければならない[12]。

$$|\alpha_{3G}| \le \frac{6r}{(\beta_{2M} - 1/\beta_{2M})} \tag{6}$$

ただし、α_{3G}はZ=G(**X**)の無次元3次モーメント、即ち、歪度である。rは許容する誤差である。

α_{3G}は式(6)の範囲を越えると、限界状態関数の歪度を考慮する必要がある。3次モーメント法については様々な手法が提案されており、筆者は次式の簡単な3次モーメント(3M)信頼性指標を提案している。

$$\beta_{3M} = \frac{1}{\alpha_{3G}}\left(3 - \sqrt{9 + \alpha_{3G}^2 - 6\alpha_{3G}\beta_{2M}}\right) \tag{7}$$

式(7)は限界状態関数の3次までのモーメントを利用しており、限界状態関数の非正規性が強くない場合には十分な精度を有する。また、α_{3G}は次式の範囲に収める必要がある[12]。

$$-120r/\beta_{2M} \le \alpha_{3G} \le 40r/\beta_{2M} \tag{8}$$

限界状態関数の４次モーメント a_{4G} が破壊確率に与える影響を **Fig.1** に示す。限界状態関数の歪度 a_{3G} が同じであっても、a_{4G} の違いによる破壊確率への影響が大きいことが分かる。即ち、破壊確率のより高精度な計算には限界状態関数の尖度を考慮する必要がある。

３．分布システムによる４次モーメント法

4次までのモーメントを用いて確率変数の確率分布を表すことは確率統計学における大きな命題で、多くの変換式が提案されている[16]。Gram-Charlier級数とEdgeworth級数は限界状態関数の累積分布関数(CDF)の展開の陽的で簡単な式として考察されているが、ほとんどの場合に適切な結果が得られないことがすでに判明している[2,17]。限界状態関数のPDFとして、Johnsonシステム、Burr システム、Lambda分布等の分布システム（systems of frequency curves）を利用して適切な信頼性解析結果を得ている研究があるが[8,17,18]、これらのシステムのパラメータを得るには複雑な非線形方程式を解く必要があり、パラメータを簡単に計算できるPearsonシステムを用いるのが一般的である。

Pearson システムでは、式(2)で表す標準化限界状態関数 Z_s の PDF, f は次式の微分方程式を満足することによって求められる。

$$\frac{1}{f}\frac{df}{dz_s} = -\frac{az_s + b}{c + bz_s + dz_s^2} \tag{9}$$

ただし、

$$a = 10\alpha_{4G} - 12\alpha_{3G}^2 - 18 \tag{10a}$$

$$b = \alpha_{3G}(\alpha_{4G} + 3) \tag{10b}$$

$$c = 4\alpha_{4G} - 3\alpha_{3G}^2 \tag{10c}$$

$$d = 2\alpha_{4G} - 3\alpha_{3G}^2 - 6 \tag{10d}$$

α_{3G} と α_{4G} の値によって、式(10)のパラメータが得られ、式(9)を解くことによって、Z_s の PDF, f が得られる。式(4)によって破壊確率を計算することができ、4M 信頼性指標は次式により表される。

$$\beta = -\Phi^{-1}\left[\int_{-\infty}^{-\beta_{2M}} f_{Z_s}(z_s)dz_s\right] \tag{11}$$

上述の方法では、パラメータが簡単に得られるが、α_{3G} と α_{4G} の値の相対的な大きさにより、式(9)の解は十数種類が存在し、各種類の PDF の陽的表現を得るには数値積分が不可避であり、破壊確率を計算するにも数値積分が必要となる。

3.2　標準正規化関数による4M信頼性指標の一般式

標準化限界状態関数 Z_s と標準正規確率変数 U の関係を次式のように仮定する。

$$Z_s = S(U,\mathbf{M}) \tag{12a}$$

$$U = S^{-1}(Z_s,\mathbf{M}) \tag{12b}$$

ただし、$\mathbf{M}$ は $Z=G(\mathbf{X})$の統計モーメントであり、S^{-1} は S の逆関数で、限界状態関数の標準正規化関数ともいう。

Z_s の CDF を F とすると、次式が成り立つことが分かる。

$$F(Z_s) = \Phi(U) = \Phi[S^{-1}(Z_s,\mathbf{M})] \tag{13}$$

ただし、Φは標準正規確率変数の累積確率分布関数である。

式(3)により、破壊確率は次式のように表され、信頼性指標は式(15)のように計算される。

$$P_f = F(-\beta_{2M}) = \Phi[S^{-1}(-\beta_{2M},\mathbf{M})] \tag{14}$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = -S^{-1}(-\beta_{2M},\mathbf{M}) \tag{15}$$

ここでは、F は式(14)を導出することのみに使用しており、実際の信頼性指標の計算には用いる必要はない。即ち、モーメント信頼性指標は限界状態関数の標準正規化関数のマイナス 2M 信頼性指標の関数値のマイナスである。限界状態関数の標準正規化関数が求めることができれば、モーメント信頼性指標を計算することができる。

限界状態関数の標準正規化関数としては多くの式が提案されている[19,20,21]。正規確率変数に近づくとき、次式の Cornish-Fisher級数がよく用いられる。

$$Z_s = S(U) = U + \frac{1}{6}\alpha_{3G}(U^2-1) + \frac{1}{24}(\alpha_{4G}-3)(U^3-3U) \tag{16}$$

式(16)は限界状態関数の正規性に要求がかなり厳しく、Fleishman[21]より、次式の簡単な多項式が提案されている。

$$Z_s = a_1 + a_2 U + a_3 U^2 + a_4 U^3 \tag{17}$$

ただし、未定係数 a_1, a_2, a_3, a_4 は確定的な係数で、式(17)の左右両辺の 4 次までのモーメントが等しくするようにして得られる。

式(17)の逆関数を式(15)に代入すれば、4M信頼性指標が求められるが、未定係数a_1, a_2, a_3, a_4を決めるには次の複雑な連立非線形方程式を解く必要があり、大変煩雑となる。

$$2A_1A_2 = \alpha_{3G}^2 \tag{18a}$$

$$3A_1A_3 + 3A_4 = \alpha_{4G} \tag{18b}$$

ただし、

$$A_1 = 1 - a_2^2 - 6a_2a_4 - 15a_4^2 \tag{19a}$$

$$A_2 = 2 + a_2^2 + 24a_2a_4 + 105a_4^2 \tag{19b}$$

$$A_3 = 5 + 5a_2^2 + 126a_2a_4 + 675a_4^2 \tag{19c}$$

$$A_4 = a_2^4 + 20a_2^3a_4 + 210a_2^2a_4^2 + 1260a_2a_4^3 + 3465a_4^4 \tag{19d}$$

である。

3.3 陽的4次モーメント信頼性指標の提示

式(18)と(19)のような複雑な非線形方程式を解くことを回避するために、次式の標準正規化関数[22]を用いる。

$$Z_s = -l_1 + k_1U + l_1U^2 + k_2U^3 \tag{20}$$

ただし、

$$l_1 = \frac{\alpha_{3G}}{6(1+6l_2)},\quad l_2 = \frac{1}{36}\left(\sqrt{6\alpha_{4G} - 8\alpha_{3G}^2 - 14} - 2\right) \tag{21a}$$

$$k_1 = \frac{1-3l_2}{(1+l_1^2-l_2^2)},\quad k_2 = \frac{l_2}{(1+l_1^2+12l_2^2)} \tag{21b}$$

式(20)は陽的表現を保ちながらも式(16)より適切な標準正規化結果を得ることができる。なお、式(20)は分布形が分からない確率変数を標準正規変換するために提案された[22]ものであり、ここでは、限界状態関数に適用し、限界状態関数の４次までのモーメント情報を利用して破壊確率を求める。

式(20)と式(16)と比較すると、式(16)の係数 l_1、k_1 及び k_2 は次式で表される。

$$l_1 = \frac{\alpha_{3G}}{6},\quad k_1 = \frac{1}{8}(11-\alpha_4),\quad k_2 = \frac{1}{24}(\alpha_{4G}-3) \tag{22}$$

Fig. 2 にα_{3G}とα_{4G}が次式に示す４つの関係を満足するときの式(20)と式(16)の係数を示す。これらの関係を満足すると、α_{3G}が 0 に近づくと、$\alpha_{4G} \to 3$となり、限界状態関数の正規性が強くなることが分かる。

$$\alpha_{4G} = 3 - \alpha_{3G}^2 \tag{23a}$$

$$\alpha_{4G} = 3 \tag{23b}$$

$$\alpha_{4G} = 3 + \alpha_{3G}^2 \tag{23c}$$

$$\alpha_{4G} = 3 + 2\alpha_{3G}^2 \tag{23d}$$

Fig. 2 により、$\alpha_{3G} \to 0$と$\alpha_{4G} \to 3$、即ち、限界状態関数が正規関数に近づくとき、式(20)は式(16)で近似することができることが分かる。

ここで、式(20)により、4M 信頼性指標を導出する。式(20)の逆関数を式(15)に代入することにより、次式の 4M 信頼性指標が得られる。

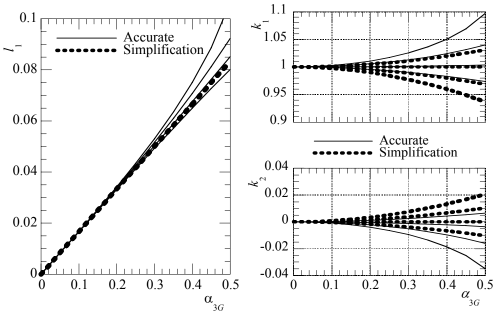
$$\beta_{4M} = Dp - \frac{1}{D} + l \tag{24a}$$

ただし、

$$D = \sqrt[3]{2}\left(\sqrt{q^2+4p^3} - q\right)^{-1/3},\ q = l(2l^2-k-3) + \beta_{2M}/k_2$$

$$p = k/3 - l^2,\quad k = k_1/k_2,\quad l = l_1/k_2/3 \tag{24b}$$

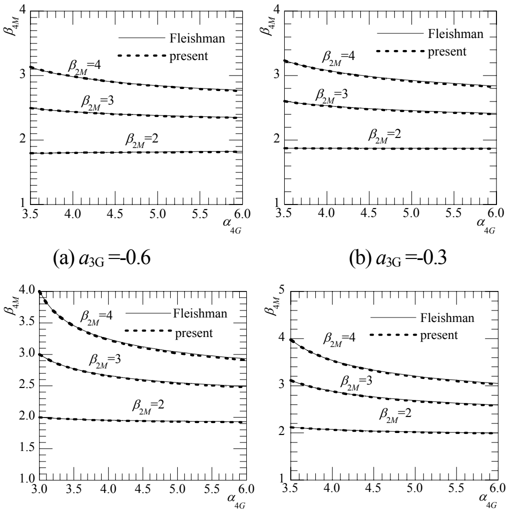
式(24)は本論文で提示する 4M 信頼性指標である。限界状態関数が正規関数に近づくとき、式(22)を代入すること



(a) l_1 Coefficient (b) k_1 and k_2 Coefficients

Fig. 2 Coefficients changed with skewness and kurtosis

により、更に簡単化することができる。



(a) a_{3G} =-0.6 (b) a_{3G} =-0.3

(c) a_{3G} =0 (d) a_{3G} =0.3

Fig. 3 Comparisons between simple and accurate reliability indices

3.4 4次モーメント信頼性指標の考察

提示した4M信頼性指標を考察するために、α_{3G}=-0.6, -0.3, 0.0, 0.3の場合に4M信頼性指標がα_{4G}の変化により受ける影響を**Fig. 3**に示す。図中、細い実線はFleishman式による4M信頼性指標の正確値であり、太い点線は本論文で提示した4M信頼性指標である。考察範囲内では、提示した4M信頼性指標は厳密な4M信頼性指標を精度よく追従していることが分かる。

3.5 限界状態関数の確率密度関数

式(20)より一つの確率変数として、限界状態関数Zの確率密度関数は次のように求められる。

$$F_Z(z) = \Phi(u) \tag{25}$$

$$f_Z(z) = \frac{\phi(u)}{\sigma\left(k_1 + 2l_1 u + 3k_2 u^2\right)} \tag{26}$$

ただし、

$$u = S^{-1}\left(\frac{z-\mu_G}{\sigma_G}\right) = \frac{1}{D'} - D' p - l \tag{27}$$

$$D' = \sqrt[3]{2}\left(\sqrt{q'^2 + 4p^3} - q'\right)^{-1/3}, \quad q' = l(2l^2 - k - 3) + \frac{z-\mu_G}{k_2\sigma_G}$$

いうまでもなく、z=0のとき、$q = q'$、$D = D'$となり、uの絶対値は4M信頼性指標となる。

4. 計算例

例題1 Fig. 4に示す崩壊機構の限界状態関数は次式で表わされる。

$$G(\mathbf{X}) = X_1 + 4X_2 + X_3 - 5X_4 - 5X_5 \tag{28}$$

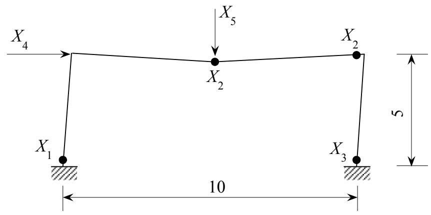


Fig. 4 A mechanism of a one-story one-bay frame

ただし、X_i は互いに独立な対数正規確率変数であり、平均値と変動係数はそれぞれ μ_1= μ_2= μ_3=120, μ_4=50, μ_5=40, V_1=V_2=V_3=0.1, V_4=V_5=0.3. で、歪度と尖度はそれぞれ α_{31}= α_{32}= α_{33}=0.301, α_{34}= α_{35}=0.927 である。FORM 信頼性指標は β_F=2.297 と得られ、対応する破壊確率は P_f=1.08×10^{-2} となる。

付録の式(34)より限界状態関数の４次までのモーメントは $\mu_G = 270$ ， $\sigma_G = 108.706$ ， $\alpha_{3G} = -0.434$ ， $\alpha_{4G} = 3.506$ となる。

式(7)により 3M 信頼性指標は β_{3M}=2.205 となり、対応する破壊確率は P_f=1.374×10^{-2} となる。

式(21)および式(24b)により、各係数は次のように得られる。

$l_1 = -0.06826$, $l_2 = 0.00979$, $k_1 = 0.966$, $k_2 = 0.00973$, $k = 99.265$, $l = -2.337$, $p = 27.625$, $q = 468.665$, $D = 0.289$

式(24a)により 4M 信頼性指標は $\beta_{4M} = 2.195$ となり、対応する破壊確率は P_f=1.410×10^{-2} となる。

サンプル数が 500,000 の Monte-Carlo Simulation (MCS) の計算結果は破壊確率が P_f=1.422×10^{-2}、信頼性指標が β=2.191 であり、4M 信頼性指標の結果とほぼ一致していることが分かる。

例題2 Fig. 5 に示す両端ピンの部材の座屈信頼性を評価する。限界状態関数は次式で表す。

$$G(\mathrm{X}) = \frac{\pi^2 EI}{H^2} - D - L \tag{29}$$

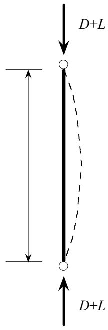
ただし、E, I, H, D と L はそれぞれヤング率、断面２次モーメント、柱の長さ、固定荷重及び積載荷重であり、確率特性は **Table 1** に示す。FORM 信頼性指標は β_F=2.918 として得られ、対応する破壊確率は P_f=1.760×10^{-3} となる。

$Y = 1/H^2$, $Z = EIY$ とし、$G(\mathrm{X}) = Z - D - L$ となる。

式(38)により、Y の４次までのモーメントは次のように得られる。

$\mu_Y = 0.0630$, $\sigma_Y = 0.00629$, $\alpha_{3Y} = -0.302$, $\alpha_{4Y} = 3.162$

式(36)により、Z の４次までのモーメントは次のように



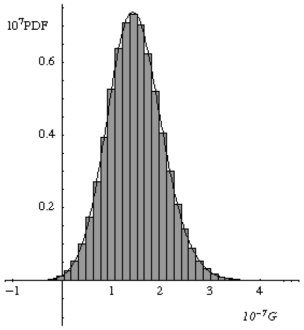


Fig. 5 A buckling problem　**Fig.6** Histogram and PDF in Ex. 2

Table 1　Properties of Random Variables in Ex. 2

確率変数	平均値	標準偏差	分布
E	2×10^{11}N/m^2	2×10^{10}N/m^2	正規分布
I	2.24×10^{-4}m^4	2.24×10^{-5}m^4	正規分布
H	4m	0.2m	対数正規分布
D	9×10^6N	1.8×10^6N	対数正規分布
L	4×10^6N	2×10^6N	グンベル分布

得られる。

$\mu_Z = 2.821\times10^6$, $\sigma_Z = 491376$, $\alpha_{3Z} = 0.407$, $\alpha_{4Z} = 3.290$

式(34)により、限界状態関数 $G(\mathbf{X})$の４次までのモーメントは次のように得られる。

$\mu_G = 1.484\times10^7$, $\sigma_G = 5.546\times10^6$, $\alpha_{3G} = 0.1978$, $\alpha_{4G} = 3.217$

式(5)により 2M 信頼性指標は β_{2M}=2.676 として得られ、対応する破壊確率は P_f=3.722×10^{-3} となる。

式(7)により 3M 信頼性指標はβ_{3M}=2.925 として得られ、対応する破壊確率は P_f=1.720×10^{-3} となる。

式(21)および式(24b)により、各係数は次のように得られる。

$l_1 = 0.0317$, $l_2 = 0.00651$, $k_1 = 0.980$, $k_2 = 0.00649$
$k = k_1/k_2 = 150.770$, $l = 1.628$, $p = 47.606$,
$q = 170.190$, $D = 0.1579$

式(24a)により 4M 信頼性指標は $\beta_{4M} = 2.808$ として得られ、対応する破壊確率は P_f=2.490×10^{-3} となる。

サンプル数が 500,000 の MCS の計算結果として P_f=2.526×10^{-3}, β=2.804 が得られ、4M 信頼性指標の結果と一致していることが分かる。なお、MCS で得られたヒストグラムと式(26)で得られた確率密度関数の比較を **Fig.6** に示し、両者が精度よく対応していることが分かる。

例題3　**Fig. 7** に示すラーメンの A 点の水平変位の信頼性を評価する。限界状態関数は次式で表す。

$$G(\mathrm{X}) = \Delta_A - \frac{(D+L_S+S)HL^3}{12EI} \tag{30}$$

ただし、Δ_Aは A 点の許容変位、D, L と S はそれぞれ固定荷重、積載荷重及び積雪荷重、E, I, H と L はそれぞれヤング率、断面２次モーメント、階高及びスパン長さであり、確率特性は **Table 2** に示す。

FORM より、信頼性指標はβ_F=3.740 となり、対応する破壊確率は P_f=9.21×10^{-5} となる。

$X = D + L_S + S$, $Y = L^3$, $Q = 1/E$, $W = 1/I$, $Z = XHYQW$, とし、$G(\mathrm{X}) = \Delta_A - Z/12$ となる。X, Y, Q, W, Z, G の４次までのモーメントは **Table 3** に示す。

式(5)により２次モーメント信頼性指標はβ_{2M}=4.396 となり、対応する破壊確率は P_f=5.513×10^{-6} となる。

式(7)により３次モーメント信頼性指標はβ_{3M}=3.859 が得られ、対応する破壊確率は P_f=5.697×10^{-5} となる。

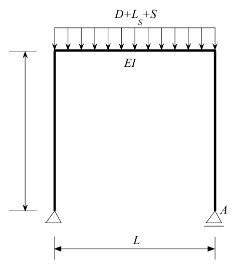
式(21)および式(24b)により、各係数は次のように得られる。

$l_1 = -0.0458$, $l_2 = 0.00745$, $k_1 = 0.9756$, $k_2 = 0.00743$

$k = k_1/k_2 = 131.25$, $l = -2.0535$, $p = 39.53$, $q = 849.76$, $D = 0.2458$

式(24a)により 4M 信頼性指標は $\beta_{4M} = 3.715$ となり、対応する破壊確率は P_f=1.015×10^{-4} となる。

サンプル数が 1,000,000 の MCS の計算結果として P_f=1.15×10^{-4}, β=3.684 が得られ、4M 法の結果と一致していることが分かる。なお、MCS で得られたヒストグラムと式(26)で得られた確率密度関数の比較を **Fig.8** に示し、両者が精度よく対応していることが分かる。



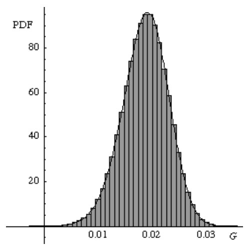


Fig. 7. A frame　　**Fig.8** Histogram and PDF in Ex. 3

Table 2　Properties of Random Variables in Ex. 3

確率変数	平均値	標準偏差	分布
Δ_A	3cm	0.3cm	正規分布
E	2×10^{11}N/m^2	2×10^{10}N/m^2	対数正規分布
I	6.06×10^{-4}m^4	3.03×10^{-5}m^4	対数正規分布
H	3m	0.15m	対数正規分布
L	6m	0.3m	対数正規分布
D	2×10^4N/m	4×10^3N/m	正規分布
L_S	2×10^3N/m	8×10^2N/m	対数正規分布
S	3×10^3N/m	1.5×10^3N/m	グンベル分布

例題 4　次の二つの限界状態関数に対応する信頼性を評価する。

$$G(\mathrm{X}) = 9 + (X_1 - 10)^2 - X_2 \tag{31a}$$

$$G(\mathrm{X}) = 9 - (X_1 - 10)^2 - X_2 \qquad (31b)$$

ただし、X_1, X_2 は相互独立の正規確率変数であり、平均値と変動係数をそれぞれμ_1=10, μ_2=5, V_1=0.1, V_2=0.4 とする。

式(31a)に対して、FORM 信頼性指標は **Fig. 9** に示すようにβ_F=2 となり、対応する破壊確率はP_f=0.0228 となる。本論文の提案手法で解析すると次のような結果が得られる。

$$\mu_G = 5,\ \sigma_G = 2.45,\ \alpha_{3G} = 0.5443,\ \alpha_{4G} = 4.3333$$

$$\beta_{4M} = 2.2266,\ P_F\text{=}0.01299$$

サンプル数が 100,000 の MCS の計算結果はP_F=0.0125, β=2.242 であり、4M 法の結果とほぼ一致していることが分かる。また、この例題では限界状態関数の非線形性が強いため、FORM の結果に誤差が大きいことも分かる。

式(31b)に対して、初期計算点の選択によって **Fig. 10** に示すように三つの設計点が得られ、対応する三つの FORM 信頼性指標はβ_{F1}=1.732, β_{F2}=1.732, β_{F3}=2 となり、破壊確率を求める事は困難となる。本論文の提案手法で解析すると限界状態関数の４次までのモーメントは簡単に求められ、信頼性指標も式(24)により次のようになる。

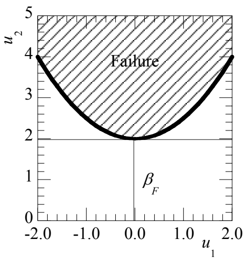
$$\mu_G = 3,\ \sigma_G = 2.45,\ \alpha_{3G} = -0.544,\ \alpha_{4G} = 4.333$$

$$\beta_{4M} = 1.245,\ P_F\text{=}0.1067$$

サンプル数が100,000のMCSの計算結果としてP_f= 0.1046, β=1.258が得られ、4M法の結果とほぼ一致していることが分かる。

Table 3　Moment computation for Ex. 3

関数	式	μ	σ	α_3	α_4
$X = D + L_S + S$	(34)	2500	4346.3	0.055	3.038
$Y = L^3$	(38)	217.64	32.81	0.456	3.371
$Q = 1/E$	(38)	5.05×10^{-12}	5.05×10^{-13}	0.301	3.162
$W = 1/I$	(38)	1654.3	0.05	0.150	3.040
$Z = XHYQW$	(36)	0.1364	0.0359	0.658	3.805
$G(\mathrm{X}) = \Delta_A - \dfrac{Z}{12}$	(34)	0.0186	0.0042	-0.232	3.201



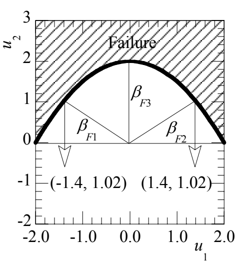


Fig. 9 Limit state of Eq. 31a　**Fig. 10** Limit state of Eq. 31b

例題 5　圧縮を受ける円型断面圧縮材の信頼性を評価する。 設計の基準によって、四つの限界状態関数は次式で

Table 4　Results of Moment methods of Ex. 5

G	μ_G	σ_G	α_{3G}	α_{4G}	β_{2M}	β_{3M}	β_{4M}
G_1	8.6×10^{-6}	2.4×10^{-6}	-0.198	3.689	3.584	3.265	2.975
G_2	21394.5	5240.3	-0.603	4.329	4.083	3.172	2.963
G_3	88.8	24.5	-0.454	3.467	3.628	3.016	2.957
G_4	271.7	66.5	-0.605	4.332	4.085	3.172	2.963

定義される。

$$G_1(\mathrm{X}) = \frac{1}{4}\pi D^2 F_y - N \quad （圧縮荷重基準） \qquad (32a)$$

$$G_2(\mathrm{X}) = \frac{1}{4}\pi D^2 - N/F_y \quad （断面積基準） \qquad (32b)$$

$$G_3(\mathrm{X}) = D - \sqrt{\frac{4N}{\pi F_y}} \quad （直径基準） \qquad (32c)$$

$$G_4(\mathrm{X}) = F_y - \frac{4N}{\pi D^2} \quad （応力基準） \qquad (32d)$$

ただし、D, F_y, N は相互独立な対数正規であり、平均値はそれぞれμ_D=200mm, μ_{Fy}=400N/mm^{-2} とμ_N=4×10^{6}N であり、標準偏差はそれぞれ σ_D=10mm, σ_{Fy}=40N/mm^{-2} と σ_N=1.6×10^{6}N である。

各限界状態関数に対して、４次までのモーメント及び２、３、４次モーメント信頼性指標は**Table 4**に示す。**Table 4**より、限界状態関数の違いによって、2M信頼性指標に大差があるが、4M信頼性指標はほぼ一定であることが分かる。

5. まとめ

1)限界状態関数の４次モーメント標準化に基づく4M信頼性指標を提示した。提示式は陽的式で、従来指標における積分や、非線形方程式を解くことを回避した。

2)提示式が3M信頼性指標の精度を改善し、厳密式に十分な精度で追従している。

3)限界状態関数の違いによって、2M信頼性指標に大差があるが、提示した4M信頼性指標はほぼ一定である。

参考文献

1) Bjerager, P.: “Methods for Structural Reliability Computation.”, *Reliability Problems: General Principles and Applications in Mechanics of Solid and Structures,* ed. by F. Casciati, Springer Verlag Wien-New York, 89-136,1991.

2) 趙　衍剛, 小野徹郎: “構造信頼性解析における３、４次モーメント法の考察.”, 日本建築学会構造系論文集, *No.*530, 21-28, 2000.4.

3) Tvedt, L.: "Distribution of quadratic forms in the normal space - application to structural reliability." *Journal of Engrg. Mech., ASCE*, 116(6), 1183-1197, 1990.

4) Faravelli, L.: "Response surface approach for reliability analysis." *J. Engrg. Mech., ASCE*, 115(12), 2763-2781, 1989.

5) Mori, Y. and Ellingwood, B. R.: “Time-dependent system reliability

analysis by adaptive importance sampling.", *Structural Safety*, 12(1),59-73, 1993.

6) 小野徹郎、井戸田秀樹: "高次積率標準化手法の提案とそれに基づく信頼性指標の設定.", 日本建築学会構造系論文報告集, *No*.359, 43-49, 1986.1.

7) Tichy, M.:"First-order third-moment reliability method." *Structural Safety*, 16, 189-200, 1994.

8) Grigoriu, M. and Lind, N.C.: "Optimal estimation of convolution integrals", *J. of Eng. Mech., ASCE*, 106(6), 1349-1364, 1980.

9) 米澤政昭等: 1 次元 4 次モーメント近似による構造物の信頼性解析、材料、*Vol*. 31, *No*. 351, 82-88, 1982.

10) Ugata, T. and Moriyama, K.: "Simple method of evaluating the failure probability of a structure considering the skewness of distribution." *Nuclear Engineering and Design*, 160, 307-319,1996.

11) Zhao, Y.G. and Ono, T.: "Moment methods for structural reliability.", *Structural Safety, Vol*. 23, *No*. 1, 47-75, 2001.

12) Zhao, Y.G., Lu, Z.H., and Ono, T.: "A simple third-moment method for structural reliability.", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1). 129-136, 2006.

13) Winterstein, S. R.: "Nonlinear vibration models for extremes and fatigue." *J. Engrg. Mech.,* ASCE, 114(10), 1772-1790,1988.

14) Hong, H. P. and Lind, N. C.: "Approximation reliability analysis using normal polynomial and simulation results." *Struct. Safety*, 18(4), 329-339, 1996.

15) Chen, X. and Tung, Y. K.: "Investigation of polynomial normal transform." *Struct. Safety*, 25(4), 423-455, 2003.

16) Stuart, A. and Ord, J. K.: *Kendall's advanced theory of statistics*. London, Charles Griffin & Company LTD., *Vol*.1, 210-275,1987.

17) Hong, H. P.: "Point-estimate moment-based reliability analysis." *Civil Engineering System*, 13, 281-294, 1996.

18) Zhao, Y.G., Lu, Z.H., and Ono, T.: "4P-Lambda distribution and its application to structural reliability.", *Journal of Structural & Construction Engineering, AIJ, No*.604, 61-67, 2006.

19) Withers, C. S.: "Asymptotic expansions for distributions and quantiles with power series cumulants.", *J. R. Statist. Soc. B*, 46, 389-396, 1984.

20) Zhao, Y.G. & Ono, T.: "Third-moment standardization for structural reliability analysis.", *Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.* 126, No. 6, 724-732, 2000.

21) Fleishman, A. L.: "A method for simulating non-normal distributions." *Psychometrika*, 43(4), 521-532, 1978.

22) Zhao, Y.G. & Lu, Z.H. "Fourth-moment standardization for structural reliability assessment.", *Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.* 133, No. 7, 916-924, 2007.

23) Zhao, Y.G. and Ono, T.: "New point estimates for probability moments." *J. Engrg. Mech., ASCE,* 126(4), pp433-436,2000.

付録：限界状態関数のモーメント計算

一般に限界状態関数のモーメントは点推定法[23]などにより得られる。ここで、本稿で用いている互いに独立な確率変数の和、積などの常用される関数のモーメント計算式を要約する。

付 1、相互独立確率変数の和のモーメント

$$Y = \sum_{i=1}^{n} a_i X_i \tag{33}$$

の４次までのモーメントは次のように得られる。

$$\mu_Y = \sum_{i=1}^{n} a_i \mu_i \tag{34a}$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^{n} a_i^2 \sigma_i^2 \tag{34b}$$

$$\alpha_{3Y} = \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_{3i} a_i^3 \sigma_i^3\right) \Big/ \sigma_Y^3 \tag{34c}$$

$$\alpha_{4Y} = \frac{1}{\sigma_Y^4}\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_{4i} a_i^4 \sigma_i^4 + 6\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j>i}^{n} a_i^2 a_j^2 \sigma_i^2 \sigma_j^2\right) \tag{34d}$$

ただし、X_i, i=1, ..., n は相互独立確率変数であり、a_i, i=1, ..., n は確定的係数である。μ_i (μ_Y), σ_i (σ_Y), α_{3i} (α_{3Y}) と α_{4i} (α_{4Y}) はそれぞれ X_i (Y),の平均値、標準偏差、歪度及び尖度である。

付 2、相互独立確率変数の積のモーメント

$$Y = \prod_{i=1}^{n} X_i \tag{35}$$

の４次までのモーメントは次のように得られる。

$$\mu_Y = \prod_{i=1}^{n} \mu_i \tag{36a}$$

$$\sigma_Y^2 = \mu_Y^2\left[\prod_{i=1}^{n}\left(1+V_i^2\right)-1\right] \tag{36b}$$

$$\alpha_{3Y} = \left[\prod_{i=1}^{n}\left(\alpha_{3i}V_i^3 + 3V_i^2 + 1\right) - 3\prod_{i=1}^{n}\left(1+V_i^2\right) + 2\right] \Big/ V_Y^3 \tag{36c}$$

$$\begin{aligned}\alpha_{4Y} = \frac{1}{V_Y^4}&\Big[\prod_{i=1}^{n}(\alpha_{4i}V_i^4 + 4\alpha_{3i}V_i^3 + 6V_i^2 + 1) \\ &- 4\prod_{i=1}^{n}(\alpha_{3i}V_i^3 + 3V_i^2 + 1) + 6\prod_{i=1}^{n}(1+V_i^2) - 3\Big]\end{aligned} \tag{36d}$$

ただし、V_i と V_Yはそれぞれ X_iと Yの変動係数である。

付 3、対数正規確率変数の任意乗のモーメント

$$Y = X^a \tag{37}$$

の４次までのモーメントは次のように得られる。

$$\mu_Y = \mu_X^a (1+V_X^2)^{\frac{a(a-1)}{2}} \tag{38a}$$

$$V_Y^2 = (1+V_X^2)^{a^2} - 1 \tag{38b}$$

$$\alpha_{3Y} = 3V_Y + V_Y^3 \tag{38c}$$

$$\alpha_{4Y} = 3 + 16V_Y^2 + 15V_Y^4 + 6V_Y^6 + V_Y^8 \tag{38c}$$

ただし、a は任意の実数である。

総説

磁性研究の最前線―希土類化合物の新しい秩序状態

椎名　亮輔*

A Frontier in Studies of Magnetism - New Ordered State in Rare-earth Compounds

Ryousuke SHIINA*

1．はじめに

古来より鉄の磁性は神秘的な現象として知られていたようです。しかしながら、実際に磁石のミクロな起源にメスが入り始めたのは、量子力学が誕生して間もない今世紀初頭のことでした。それは磁性が本質的に量子現象そのものだからです。以来、固体磁性を巡って膨大な研究成果が蓄積され、現在その恩恵は磁気ディスクなど、様々な先端技術の中に見出すことができます。本稿では、基礎物理としての磁性研究を振り返りながら、現在その最前線として集中的な研究が進められている希土類・アクチナイド化合物の新奇な磁性を紹介したいと思います。

2．問題の背景

われわれの身の回りにある物質は、原子や電子がアボガドロ数(10^{23}個)ほど集まって構成された**凝縮体**です。磁性を含む物性物理の問題とは、極言すれば、凝縮体全体の示すマクロな性質が、ミクロな構成粒子の性質とどう関連しているか、を明らかにすることなのです。では、こうした観点から、磁性の問題とは何でしょうか？

固体は、大雑把に言って、堅く結合し合ったイオンと、イオンから離れて動き回ることのできる電子から構成されています。しかしながら、後述するように、鉄などの磁性を示す物質では、強い電子間のクーロン相互作用のため電子はイオンの近傍に**局在**していることが多く、孤立原子の性質がある程度保たれています。そして、こうした局在電子が磁性の担い手となるのです。

強磁性（すなわち固体全体が大きな磁石になること）は、この局在電子の持つ小さな磁石が一斉に同じ方向に整列することだと考えられます。こうした強磁性の問題は、量子力学の発展とともに解明が進み、20世紀半ば頃までに定性的な理解に到達したと考えられています。

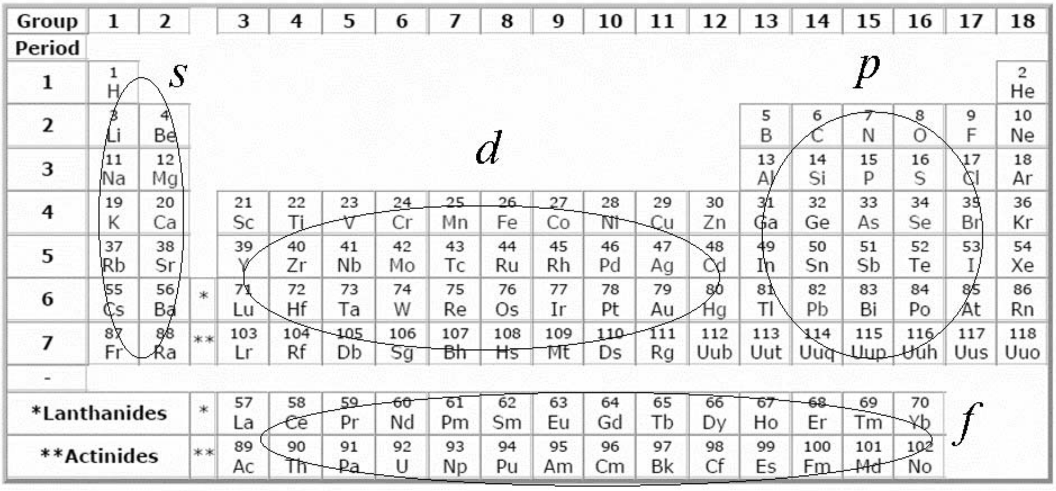
一方で、磁性が極めて多彩な現象であることが分かってきたのも、そのころからでした。物質内部の格子状態の情報を得るためのいろいろな実験手段が考案されてきたからです。なかでも、磁性の規則配列を観測する強力な方法が**中性子散乱**で、1950年頃から実用化され始めました。中性子は、電荷をもたずスピンを持つ素粒子で、物質中の磁性のみと相互作用するからです。こうした実験研究によって、20世紀の後半に、夥しい数の強磁性以外の磁性が見つかってきました [1]。

すぐに明らかになったのは、隣り合う原子に属する電子の磁気モーメントの向きが互い違いに並んだり、あるいは、さらに複雑な磁気配列を持つ物質が存在することです。このような現象は**反強磁性**と呼ばれており、しばしば強磁性にはない特異な性質を示します。反強磁性における**強い量子ゆらぎ**は現在も活発に研究されている問題の一つです。なお、こうしたミクロな整列現象は、常に何らかの秩序形成と関連しているという意味合いで、**秩序状態**と総称されています。

上記の磁性研究は、主に、**鉄族**と呼ばれる、鉄に近い性質を持つ元素（コバルト、ニッケルなど）を含む化合物を舞台に行われてきました。一方、鉄族同様に磁性を示すことが予想される物質が、周期表の下端に位置する**希土類およびアクチナイド元素**を含む化合物群です（図１）。希土類の磁性研究は、鉄族の研究がほぼ一段落した1980年ごろから盛んになり、多くの異常現象が見いだされました。特に、鉄族に比べて原子構造が複雑で、電子の持つミクロな磁気モーメントの性質に関する、より根本的な問題が研究対象になっています。こうした希土類化合物の理論は、私が長年取り組んできた課題の一つであり、本稿後半に詳しく取り上げます。

---

*准教授　物理教室
Associate Professor, Institute of Physics



Group	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
-																			
*Lanthanides			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
**Actinides			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

図１．元素の周期表：原子番号 26 が鉄（Fe）で、下から２段目（57-70）が希土類系列、下端（89-102）がアクチナイド系列.

３．原子と固体の量子力学

3.1　電子軌道

磁性の問題を正確に扱うには、量子力学に基づく議論が不可欠になります。そこで、以下に原子核に束縛された一電子問題（水素原子と等価）を復習しましょう。上述のように、磁性を引き起こす電子は局在性が強く、固体中でも孤立原子に近い状態にあると考えられているからです。

一般に量子力学では、シュレディンガー方程式の解として与えられる**エネルギー準位と波動関数**により粒子の運動状態が決まります。中心力場中における電子に関して最も重要なポイントは、量子状態を表す波動関数が以下の**４つの指数（量子数）**により特徴づけられることです。

主量子数 n ＝ １，２，３,・・・

方位量子数 l ＝ ０，１，２，３,・・・

磁気量子数 m = $-l$, $-l+1$，・・・, $l-1$，l,

スピン量子数 s = $-1/2$，$1/2$

n、l、m は波動関数の空間変化に関連した指数で、特に l は軌道角運動量の大きさ、m は軌道角運動量の z 成分という物理的意味があります。一方、スピン量子数 s は大雑把に言えば、定まった大きさ 1/2 を持つ電子の自転による角運動量（の z 成分）に対応します。中心力場では、実空間およびスピン空間の対称性のために、エネルギー準位が n、l だけに依存し、m、s によらないことが分かっています。そして、n、l で指定される（$2l+1$）×２個の量子状態のセットを**殻**と呼びます。

3.2　多電子系における不完全殻

一般の原子の場合、n、l、m、s で指定されるエネルギー準位が多数の電子によって占有されることになります。ここで重要なのが**パウリの排他原理**です。すなわち、「同一の量子状態を複数の電子が占有することはできない」というものです。このため、電子は、エネルギーの低い状態すなわち n、l の小さい殻から順次占有してゆくことになります。

このとき、一つの殻にはエネルギーが等しい（$2l+1$）×２個の状態があるので、高エネルギー領域に、電子が部分占有しているが充満していない殻が現れます。これが、いわゆる**不完全殻**であり、原子の性質を決める要因なのです。

不完全殻は n、l で指定されるわけですが、なかでも波動関数の角度変化を表す l の値が重要です。このことは、原子が結合して分子や固体を構成しても同様であり、大雑把に言えば、電子物性は指数 l によって決まっていると言っても過言ではありません。

l の値には、伝統的に ***s*殻**（$l=0$）、***p*殻**（$l=1$）、***d*殻**（$l=2$）、***f*殻**（$l=3$）などと名前が付けられています。電子数が 20～30 個の鉄族原子の不完全殻は d 殻であり、50～100 個もの多数の電子を持つ希土類原子やアクナイド原子の不完全殻は f 殻となります（図１）。このことが、鉄族元素や希土類元素を含む化合物を d 電子系あるいは f 電子系と呼ぶことの由来となっているのです。

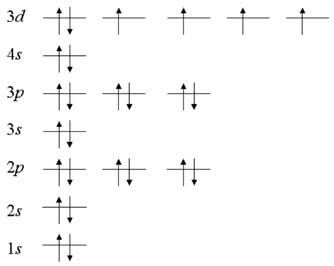


図２．鉄原子の電子配置：　矢印は、状態を占有した電子のスピンの向きを表す。4 個の不対電子が 3d 殻に現れることが分かる。

3.3　不対電子と原子磁性

さて、電磁気学によれば、荷電粒子の回転運動は磁石と等価であることが分かっています。したがって、電子の軌道角運動量とスピン角運動量は、それぞれ**軌道磁気モーメント**と**スピン磁気モーメント**に対応するということができます。電子は２種類の磁石を持っているわけです。しかしながら、パウリ原理に基づいて電子を内殻から詰めていくと、多くの場合、逆向きの磁性を持つ電子同士が対になって現われ、磁性が消えてしまいます。唯一、不完全殻のみで磁性が消えない**不対電子**が生じるのです（図２）。

3.4　固体のバンド形成

このように、不完全殻の電子が磁性に関与していることは確かなのですが、固体における磁性の機構はそう簡単ではありません。例えば疑問点として、多くの原子が不対電子を持つにもかかわらず、なぜ d、f 電子系でのみ磁性が発生し、s、p 電子系では見られないのでしょうか？この問いの答えは、原子の集団としての**固体における電子状態**に関連しているのです。

一般に固体中では、隣接した原子の周りの電子軌道が混ざり合って、固体全体にわたる電子の通り道として、新たな電子軌道すなわち**バンド**が形成されます（図３、より詳しくは文献 [2]など参照）。s 軌道が重なってできるバンドを s バンド、p 軌道に由来するものを p バンドと呼んだりします。

バンド内には、異なるエネルギーをもつ多くの量子状態が存在します。そこにパウリ原理に基づいてエネルギーの低い状態から電子を詰めてゆくことで、固体全体の性質が決まるわけです。このとき、バラバラの原子では不対電子だったもののほとんどが、**バンド内状態に再配置**されることで、磁石を打ち消しあう対を作ることになります。s、p 電子系で磁性が生じない理由は、まさにこの点、すなわち固体におけるバンド形成にあるのです。

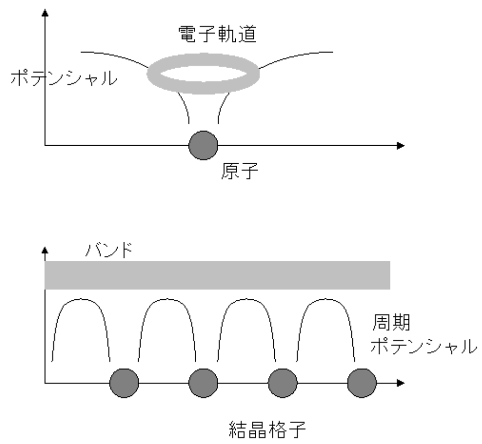


図３．原子と結晶の電子状態の模式図.

では逆に、d 電子系や f 電子系でなぜ磁性が発生しやすいのでしょうか？この問題の鍵は電子同士にはたらくクーロン反発力にあります。d、f 軌道は原子核の周囲での広がり方が s、p 軌道に比べて小さく、クーロン反発力の影響が非常に大きくなるからです。（希土類元素 Ce の波動関数を例として図４に示します。）そして、そのため d、f 電子系の固体では、電子が原子間を自由に行き来できなくなり、バンドを組めなくなることがしばしば起こるのです。これを、電子の相互作用による局在化と呼びます。その結果として、固体中で局在した d、f 電子は不対電子に近い状態となり、原子での性質をある程度保ちながら、集団的な磁性を示すことになるのです [3]。

このように、固体の磁性は、端的に言えば、原子における電子状態、バンド形成、電子間の相互作用（力の及ぼし合い）といった３要素によって決まっているのです。

４．*f* 電子系における多極子秩序の物理

4.1　隠れた磁性

電子が **2 種類の磁石**を持つことはすでに記しました。**軌道とスピン**です。しかしながら、1970 年頃まで主に研究されていたのはスピンによる磁性でした。その理由は、その当時に見つかっていた物質や現象が比較的単純だったこと、現象の定性的理解が目標となっていたこと、そして軌道磁性を考慮した解析が通常かなり複雑な理論になること、などです。例えば、古典的な鉄の強磁性は、

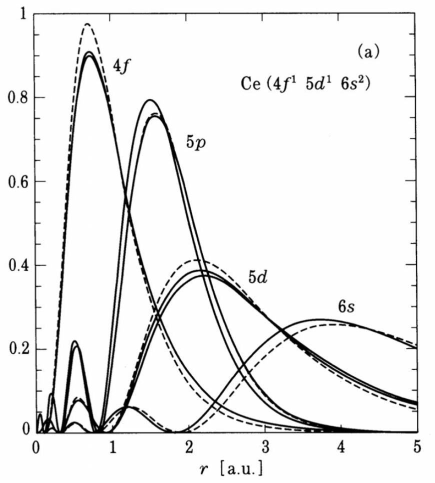


図４．希土類元素セリウム（Ce）の動径波動関数の計算値（ｒは原子核の中心からの距離）：f軌道が内殻に局在していることが分かります [3].

スピンによる磁性としてかなり良く理解できる現象であることが分かっています。それでは軌道は磁性に関与しないのでしょうか？

1980 年代になって、それまで未踏領域であった**希土類化合物**（すなわちf電子系）の物性研究が大規模に行われるようになりました。その結果、鉄やその類似物質（すなわちd電子系）とは全く性質の異なる磁性がぞくぞくと見つかってきたのです。結論から言えば、希土類の磁性では軌道が極めて重要かつ面白い役割を果たすのですが、その前に問題点を少し詳しく説明しましょう。

一般に、磁性を示す物質は、加熱すると、ある温度を境に磁性を失います。整列していた電子の磁石が、温度上昇によって、バラバラの向きになったということです。磁性のあるなしが切り替わる境目の温度を**転移温度**、こうした現象全般を**相転移現象**と呼びます [1]。相転移にはいくつかの普遍的な性質があって、例えば比熱やその他の物理量の温度変化が、転移点で発散や折れ曲がりなど、共通の異常を示すことが知られています。f電子系の磁性研究も、こうした相転移特有の熱力学的異常が実験的に観測されたことから始まりました。

相転移が磁性の発生によることを証拠づけるための最も直接的な実験手段は、冒頭でも触れた**中性子散乱**です。電荷を持たずスピンのみを持つ中性子は、結晶中の不対電子により散乱されるので、その様子を観測することで磁性を含めた不対電子の様々な性質を知ることが出来るのです。しかしながら、相転移による明確な異常にもかかわらず中性子散乱で磁性が観測できない、という奇妙な例が、いくつかのf電子系化合物で見つかったのです。それらは、実験的に磁性が“見えない”という意味合いで、**隠れた磁性の問題**と呼ばれるようになり、物性物理学における謎の一つとして盛んに研究されるようになりました。このような新奇な磁性の理解が一気に進んだのが最近の 10 年ほどのことで、そこではf電子状態の特性を考慮した理論が大きな役割を果たしました。以下にかい摘んでまとめてみます。

4.2 多極子とは？

前述したとおりf軌道の半径は大変小さいため（図４）、f電子の磁気的性質には２つの特徴が現れます。一つ目は、電子間のクーロン反発力の影響が非常に大きくなり、d電子系と比べてより明確な電子の局在化が実現することです。そしてその結果、大きな角運動量$l=3$が保たれ、軌道磁性が現れやすい状況となっています。小さな軌道半径に起因する二つ目の重要な特徴は、**スピンと軌道の間の相互作用**が非常に大きくなることです。そのため、例えばセリウム（Ce）イオンでは、１電子が持つスピンと軌道が互いに逆向きになって結合し、**全体で一つの磁石**として振舞うようになるのです [4]。

このようにスピンと軌道が混然一体となったf電子の磁性が際立った性質を持っていることが、近年徐々に分かってきました。f電子系では、規則配列する微小磁石が、単純な磁石ではなく、**多極子**と呼ばれる複雑なかつ興味深い形態の磁石になることです [5,6,7,8]。この点を少し詳しく説明するために、f電子の全角運動量を$\boldsymbol{J}=(J_x, J_y, J_z)$と定義しましょう。単純な磁気モーメントは、これに定数をかけた$\boldsymbol{M}=\alpha * \boldsymbol{J}$（$\alpha$はボーア磁子$\mu_B$とｇ因子の積）と与えられます。これは$J_z$の符号±（２つの極）に合わせて**双極子**と呼ばれています。

一方、Jの積例えばJ_xJ_yのような量を**四極子**、$J_xJ_yJ_z$のような量を**八極子**と呼びます。Jの符号変化に応じて四極子なら４個の極、八極子なら８個の極を持つからです。これら多極子は、数学的にはテンソルとして記述され、その階数（ランク）や結晶中の対称性によって分類されています。いくつかの例を図５に示します。f電子系では、こうした**高次多極子の整列現象**が実現することが明らかになったのです。その理由は、やや込み入っていますが、以下の通りです。

通常、磁気モーメントの整列をもたらすのは、隣接する原子に局在した電子を量子力学的なメカニズムで交換することによって生じる相互作用、すなわち**交換相互作用**であることが分かっています。電子はスピン 1/2 を持っているので、スピン交換によって生じる相互作用は、s

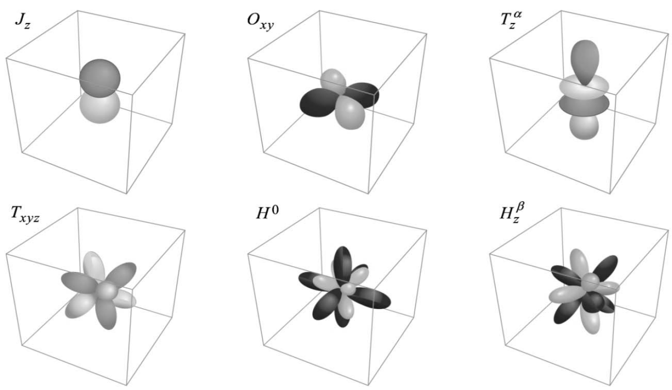


図５．様々な多極子：J は双極子、O は四極子、T は八極子、H は十六極子を表し、対称性に応じて様々な添字を付けることになっています．高次になればなるほど、金平糖のような複雑な分極となります．

= 1/2 を-1/2 に、あるいはその逆に反転させる性質を持ちます。このように角運動量が１だけ変わる過程が、通常の双極子の相互作用に対応するのです。一方、**軌道角運動量の交換**が許される場合、l の大きな変化（$\Delta l > 1$）が１電子の入れ替えに際して可能になります。f 電子系では、この軌道交換がスピン交換と同様な頻度で生じるので、高次の多極子相互作用が大きな値で存在することが可能になるのです。（若干説明に飛躍がありますので、詳細については文献[7,9]などを参照ください。）

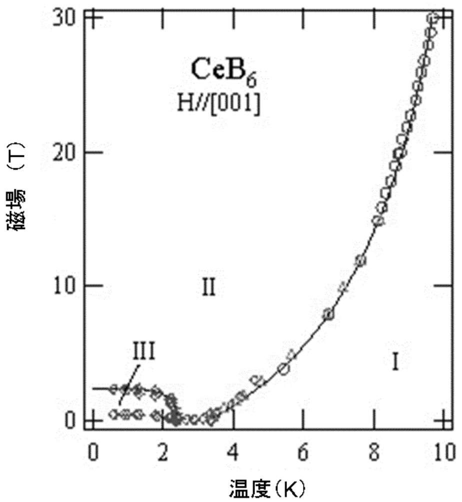


図６．セリウムヘキサボライド（CeB_6）の磁場 - 温度相図：II 相が反強四極子秩序、III 相が反強磁性秩序を表します．

4.3　多極子の秩序化

高次多極子の整列状態は様々な不思議な性質を呈します。通常、磁石が互い違いに並ぶ反強磁性は磁場をかけると容易に破壊されますが、互い違いに並んだ多極子（反強多極子状態）は、しばしば磁場に対して強い耐性を示すばかりか、磁場による安定化すら見られる場合があります。

最も有名な物質である**セリウム・ヘキサボライド**（CeB_6）を例として取り上げましょう。図６は、温度と磁場に関して、この物質の秩序相の領域を表す相図です[10]。5K以下の極低温領域で顕著な多極子現象が見られます。無磁場では**反強四極子相**（II 相）と反強磁性相（III 相）の転移温度はそれぞれ T_Q = 3.3 K、T_N = 2.3 Kで、かなり近接しています。しかし、反強磁性相は弱い磁場ですぐに消滅し、その反対に四極子相の転移温度は磁場とともにぐんぐん上昇していくことが分かります。これは、大雑把に言えば、複数の多極子が磁場によって誘発され、整列状態を安定化してゆく面白い現象であることが解明されています [5,11]。こうした磁場効果は、近年、他の多くの物質でも見出されており、多極子秩序の重要な特性の一つとして広く知られています。

多極子には、図５に一例を示したように、多くの種類が存在し、我先に秩序状態を形成しようとひしめき合っています。しかし、通常は、同時に整列できず競合関係となってしまいます。こうした機構によって、f 電子系では、お互いに秩序化を妨げ合い、多極子の局所的整列が揺らぎながら起こっている状態がしばしば実現します。つまり、多極子は**強い揺らぎ**をもたらすわけです。一例として CeB_6 の**比熱**のデータを図６に示しますが [12]、

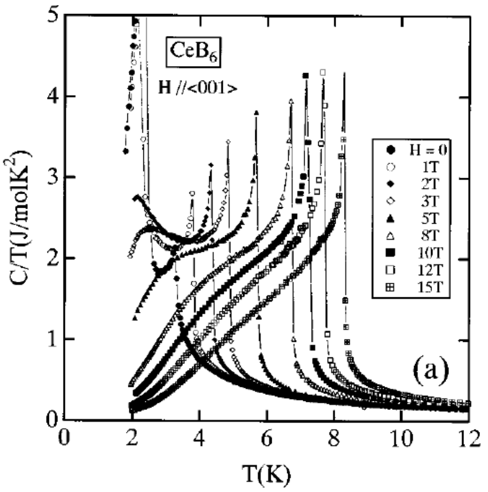


図７．様々な磁場における比熱の温度変化：ゼロ磁場の 3.4Kの小さなカスプが四極子転移、2.3K以下の大きなピークが磁気転移を表します。四極子転移による異常は磁場とともに大きくなっていくことが分かります.

相転移による比熱の異常が磁場とともに顕著になってゆく様子がよく分かります。この現象は、ゼロ磁場で存在する多極子の競合と強い揺らぎが、磁場の印加により緩和されてゆく機構によって理解されています [13,14]。このように、多極子の秩序と揺らぎは、通常の磁性とは大きく異なる熱力学的性質を導くのです。

4.4　多極子の観測

多極子整列が実現していることを実験的に証明するにはどうしたら良いのでしょうか？中性子のスピンは電子の双極子と強く相互作用するので、双極子がなければほとんど散乱されません。この意味で、高次多極子は確かに「隠れた磁性」の資格を有するのです。

しかしながら、ごく最近、中性子散乱による多極子整列の観測が不可能ではないことが分かってきました。**短波長中性子線**を用いた**高強度**の実験により初めて八極子散乱が観測されたのです [15,16]。短波長領域では、原子の周囲の微妙な磁気分布の変化による弱い散乱が可能となるからです [17]。

そのほか、**核磁気共鳴**（NMR）や**共鳴X線散乱**といった先端技術も、多極子整列の同定に極めて有効な手法であることが示され､応用が広がっています。一例として、共鳴Ｘ線散乱により決定された**ネプツニウム・ダイオキサイド**（NpO_2）という物質の**八極子秩序状態**の模式図を図８に示します [18]。Np イオンは体心立方格子を構成し、その上に縞模様の円盤として描かれた八極子が規則整列していることが分かります。実は、この物質の奇妙な磁性は半世紀も前から知られた未解決問題だったのですが、その多くの謎が八極子モデルによって見事に統一的に解明されたのです。このように、現在、多方面の集中的な研究によって､複雑かつ神秘的な f 電子系の「隠れた磁性」のベールが徐々に剝されているのです。

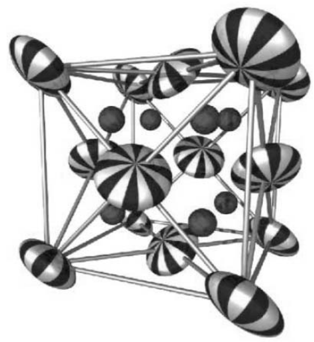


図８．ネプツニウム・ダイオキサイド（NpO_2）の八極子秩序状態の模式図：丸は酸素（O）サイトを表し、円盤がネプツニウム（Np）サイト上の八極子を表します.

５．まとめと展望

30 年ほど前からスタートした f 電子系の磁性研究は、従来の鉄族の磁性と明らかに異なる現象の発見と、それに伴う様々な謎の提示から始まりました。 f 電子系では電子軌道の重要性が指摘されていましたが、近年、それが多極子という新概念によって一貫して記述されることが示され、謎の多くを解明することができました。このように、 f 電子系の磁性は、現在では全く新しい普遍性を持った物理現象として位置付けられ、さらに活発な研究がなされている分野なのです。

最後に、今後の研究の展望として、超伝導との関連について簡単に記したいと思います。超伝導とは、ある温度以下で突然電気抵抗が厳密にゼロになる現象です。技術応用の面で大きな期待が集まる一方で、基礎物理の問題としても量子効果がマクロに現れる現象として研究者を魅了し続けている問題です。また、超伝導の機構を完全に理解し、半導体のように自由自在に制御すること、これは基礎と応用の研究者に共通した長年の夢なのです。

では、超伝導がなぜ多極子と関係するのでしょうか？従来、超伝導は磁性とは相性が良くないと考えられてきたのですが、 f 電子系では、多くの超伝導が、磁性相の近傍で現れたり、磁性と共存したりするのです。このことは**超伝導と磁性の密接な協力関係**を示唆しています

が、注目度の高さの一方で、難問として理解が遅れてきました。しかしながら、 *f* 電子磁性の理解が飛躍的に進んだ現在、こうした風変わりな超伝導の解明も視野に入ってきました。実際、多極子効果による超伝導と思われる例が報告され始めています。多極子研究が、壁に突き当たっている超伝導解明のブレークスルーとなることを期待しつつ、筆を置きたいと思います。

参考文献

(1) 芳田奎, “磁性”, 岩波書店, 1991. 磁性の教科書は数多いが、現実的な固体電子の磁性を量子力学的に扱った良書。

(2) 斯波弘行, “基礎の固体物理学”培風館, 2007. 固体電子論の基礎に関する良い教科書。

(3) 上田和夫, 大貫惇睦, “重い電子系の物理”裳華房, 1998. f 電子系の物理全般の教科書。

(4) 軌道角運動量 $l = 3$、スピン $s = 1/2$ であるため、 *f* 電子一個が局在する Ce イオンでは、全角運動量は $J = 5/2$ となる。

(5) R. Shiina *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **66** (1997) 1741.

(6) 椎名亮輔, 固体物理 **43** (2008) 249-263.

(7) P. Santini *et al*., Rev. Mod. Phys. **81** (2009) 807.

(8) Y. Kuramoto *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 072001.

(9) H. Shiba *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **68** (1999) 1988.

(10) D. Hall *et al*., Phys. Rev. B **62** (2000) 84.

(11) 椎名亮輔, 酒井治, 固体物理 **33** (1998) 631-643.

(12) M. Hiroi *et al*., Phys. Rev. B **55** (1997) 8339.

(13) R. Shiina: J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 2746.

(14) N. Fukushima and Y. Kuramoto: J. Phys. Soc. Jpn. **67** (1998) 2460.

(15) K. Kuwahara *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 093702.

(16) 現在、大強度陽子加速器施設 J-PARC の建設が国内で進められており、中性子散乱に用いるビーム強度がさらに 10 倍以上も高まるとされています。したがって、近い将来、さらに多くの未解明の秩序状態の検証が可能になるはずです。

(17) R. Shiina *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 094702.

(18) J. A. Paixão *et al*., Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 187202.

テレスコープアレイ実験による最高エネルギー宇宙線の探索

有働　慈治*

Search for the Ultra High Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment

Shigeharu, UDO*

1　宇宙線

宇宙線とは地球の外から到来する放射線の総称で，陽子やヘリウム（α 線）などの原子核が主な成分だが，広義には γ 線やニュートリノを含めることもある．宇宙線なるものの存在が初めて確認されたのは二十世紀初頭のことで，オーストリアの物理学者ヘスが箔検電器によってその存在を明らかにした．それから 100 年あまり経った今でも， 我々の修士論文の多くは“1912 年ヘスが，”と書き出されている．ヘスは後に，宇宙線の発見によってノーベル物理学賞を受賞している．その後の様々な観測により，宇宙線が地磁気によって跳ね返される 10^{9} eV から 10^{20} eV に及ぶ広いエネルギー領域にわたって地球に飛来していることが分かって来た．人類が加速器によって原子核に与えられる最大のエネルギーは現在でも～10^{13} eV であり，宇宙線観測は素粒子理論の検証実験という側面も持っている．

宇宙線実験において実際に観測される“宇宙線”は，必ずしも宇宙空間から飛来する原子核そのものではなく，大きく一次宇宙線と二次宇宙線とに分けられる．一次宇宙線は宇宙からやってくる宇宙線そのものであり，人工衛星，気球などによって，地球に到達する直前に観測されている．これらの一次宇宙線が地球大気に突入すると，大気中の原子・分子と核相互作用，または電磁相互作用を起こして様々な二次粒子を作る．これが二次宇宙線で，無数に増殖した二次宇宙線粒子がシャワーのように地表に降り注ぐ現象を空気シャワーと呼ぶ．空気シャワー現象は地表に設置した荷電粒子検出器群（アレイと呼ばれる）やチェレンコフ望遠鏡などで観測される．二次宇宙線からは一次宇宙線の情報の多くが失われてしまうが，衛星などによる一次宇宙線の直接観測に比べて大面積化や長時間の観測が容易なこと，また前述のように素粒子物理学としての関心もあり，相補的に観測が進められている．

そもそも宇宙線のような高エネルギー粒子が「どこで」「どのように」加速され，どんな経路を辿って地球へとやってきたのかは，宇宙線発見当初から現在に至るまで謎のままである．近年では，国際宇宙ステーションの利用など，一次宇宙線観測の大面積化・高性能化によって～10^{12} eV の領域で詳細なエネルギースペクトルが測定できるようになってきたこと，また，X 線天文学の延長としての γ 線天文学によって宇宙線加速源の探索・観測が数多く行われるようになったことから，銀河系内に起源を持つ宇宙線の加速機構については詳細な議論がなされている．

あるエネルギーを持った宇宙線の起源が銀河系内であるか系外であるかの判断は，銀河系内の磁場の強さによる．銀河磁場はおおよそ 3 μG 程度と推測されており，10^{18} eV 程度のエネルギーを持った宇宙線のラーモア半径は数百 pc となる．これは銀河円盤の厚みとほぼ同程度なので，これよりも低いエネルギーの宇宙線は磁場によって銀河円盤内に捕らえられることになる．地球で観測される宇宙線は，このようにして銀河系内を旅してきたものであり，そのため一様等方に飛来するように観測される．逆に，10^{18} eV よりも高いエネルギーの宇宙線が銀河系内で生み出された場合，その宇宙線は加速源からまっすぐにやってくるはずである．しかしながら，現在までの観測ではそのような異方性（非等方性）は確認されておらず，10^{18} eV を超える宇宙線の起源は銀河系外であると考えられている．

宇宙線のエネルギースペクトルは 10^{9}～10^{20} eV にわたっておおよそ E^{-3} の冪で滑らかに繋がっている．スペクトルが冪関数で表せるということは，宇宙線が非熱的な加速によって作られていることを示している．

*特別助手　物理学教室
Research associate, Institute of Physics

もし宇宙線の起源が 10^{18} eV を境に銀河系内から系外に変わっているならば，加速機構が異なることも予想され，その場合は当然スペクトルの冪も変化するはずである．図 1 に示すように，10^{15} eV 付近に Knee(膝)，$10^{18\sim19}$ eV 付近には Ankle（踵）と呼ばれる微かな折れ曲がりが見られるが，明確に冪が変わる程ではない．このように滑らかに繋がったスペクトルも，宇宙線をめぐる大きな謎の一つである．

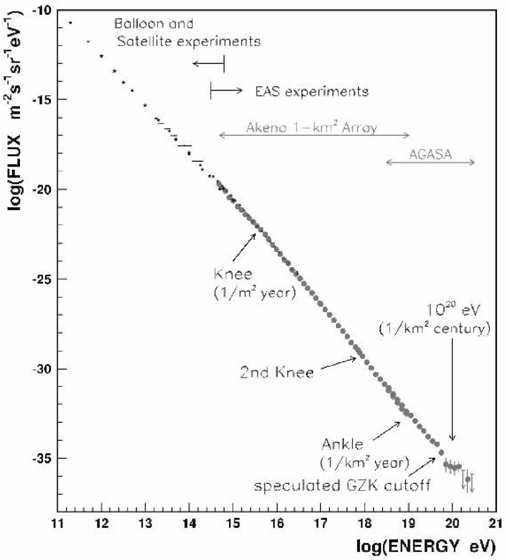


図 1: 地磁気カットオフ以降の宇宙線エネルギースペクトル．

2 最高エネルギー宇宙線と GZK カットオフ

広範なエネルギーにわたって観測される宇宙線であるが，その到来頻度はエネルギーの 3 乗に比例して減少しており，図 1 中に示されているように，10^{20} eV では 1 km^2 あたり 100 年に 1 イベントという低頻度になってしまう．従って観測例も少なく，低エネルギー領域に比べて統計誤差も大きくなっている．観測の難しい領域ではあるが，現在までに観測された中で最も高いエネルギーとされるものが 10^{20} eV のオーダーであることから，この領域を最高エネルギー領域と呼び，100 km^2 を越える大型の空気シャワーアレイによる観測が進められている．

1966 年，宇宙線エネルギースペクトルの上限に関する論文が発表された[1] [2]．10^{20} eV 領域の宇宙線を考えると，2.7K の宇宙背景輻射光子は相対論的には（宇宙線の静止座標系では）$\sim10^8$ eV の高エネルギー γ 線と等価となる．宇宙線粒子が陽子であるとして，背景輻射光子との π 中間子光生成の平均自由行程は，光子密度 550cm^{-3} の仮定の下におよそ 3Mpc と予想された．これは銀河間の距離スケール(～10Mpc)より少し小さい程度であり，銀河系外を起源と考えた場合，最高エネルギー宇宙線が我々の銀河に到達するまでに衝突を起こす可能性は非常に高い．1 回の反応で陽子は 1/10 程度のエネルギーを失うとされ，また反応の断面積は 3×10^{19} eV 以下では十分に小さい．つまり，10^{20} eV 以上の宇宙線は 10^{19} eV 程度にエネルギーを失った後に地球へ到達する．これを，提唱した 3 人 (Greisen, Zatsepin, Kuz'min) の名をとって GZK カットオフと呼ぶ．

3 AGASA, HiRes からハイブリッド観測へ

1998年，日本の大型空気シャワーアレイ実験 AGASA(Akeno Giant Air Shower Array) は，10^{20} eV を超える最高エネルギー宇宙線が 1 event/100 km^2/year の頻度で観測され，GZKカットオフの予想に反してエネルギースペクトルが延びているとする論文を発表した[3]．また，2000年には$10^{19.6}$ eV以上の宇宙線の中で，2.5° 以内の同一方向から2イベントないしは3イベントが到来していると考えられる6組を報告している[4]．銀河磁場による曲がりが少ないという最高エネルギー宇宙線の性質から，複数の事例の到来方向に加速源があると考えるのは自然であるが，10年近く経った現在でもAGASAの示す方向に電磁波（電波～γ 線）で同定できる天体は見つかっていない．

AGASA から数年遅れて 2004 年，アメリカ・ユタ州で大気蛍光法によって最高エネルギー宇宙線を観測していた HiRes(High Resolution Fly's Eye)実験は，AGASA とは逆に GZK カットオフを再現するエネルギースペクトルを発表した[5]．図 2 に示されるように，GZK カットオフが予想される 5×10^{19} eV 以上で AGASA とは異なる振る舞いを見せている．両者の到来頻度の絶対値のずれは～25%で，二つの実験があげているエネルギーの系統誤差(～20%) にほぼ等しい．仮にどちらかのエネルギースケールを 25%ずらすと，10^{20} eV 以上での差異は残るが，到来頻度の絶対値はおおよそ一致する．このことから，両者の観測方法，特にエネルギー決定に系統的なずれがある可能性が高いが，どちらがより正しい結果を示しているのかを判断することは難しい．

HiRes 実験で用いられている大気蛍光法は，前身である Fly's Eye 実験によって確立された．大気蛍光法

では,大気中で発生した宇宙線空気シャワー中の電子が窒素分子を励起することで発せられる微かな蛍光によって宇宙線を検出する．この大気蛍光は二次粒子から等方に発せられるため，広視野・高感度の望遠鏡を用い，空気シャワーを真横から観測する方法がとられる．AGASAのように，二次粒子そのものを地表に設置した装置で検出する地表検出器アレイと比べて，

- 1 ヶ所に設置した装置で，広範囲を観測できる
- 空気シャワーの縦方向発達が観測できる

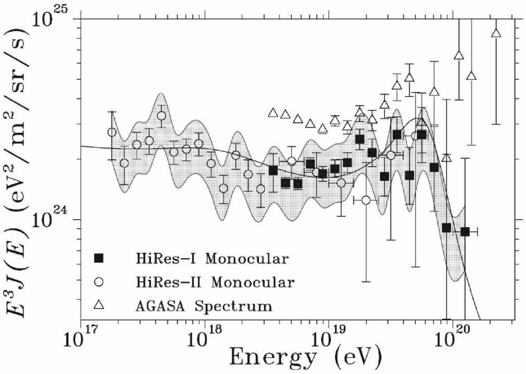


図2: HiRes 実験によって発表された10^{17}～10^{21} eVの宇宙線エネルギースペクトル．冪の変化が分かりやすくなるよう，縦軸にはエネルギーの 3 乗がかけられている．紗のかかった領域は系統誤差を表す.

- 一次宇宙線エネルギーの見積もりにシミュレーション依存が少ない

などの利点がある．反面,

- 月のない晴れた夜しか観測できない
- 蛍光の発光効率に不定性がある
- 蛍光減衰量は大気透明度に左右されやすい

といった点では地表検出器アレイに劣る.

AGASAとHiResの不一致は単に二つの実験の齟齬というだけではなく，GZKカットオフの有無によって素粒子論・宇宙論にまで大きな影響を及ぼす話題となった.仮にAGASAの観測結果が正しいとして，宇宙背景輻射の存在，銀河系近傍に加速源が見つからないことを説明するために次のような可能性が考えられている.

- ビッグバンの生き残りの超重粒子の崩壊[6]
- 超高エネルギーニュートリノから生成されたウィークボゾン(Z^0) の崩壊[7]
- 超高エネルギー領域での特殊相対論（ローレンツ変換）の破れ[8]

いずれも俄かには受け容れがたいものであるが，これらの説が 2，3 年のうちに続々と提案されたことが，AGASA の観測結果が驚きをもって迎えられたことを物語っている.

これらの素粒子論・宇宙論的な興味も尽きないが，まずは実験的な不一致を解消し，GZKカットオフの在否に決着をつけなければならない．そのために計画されたより大規模な実験が，南半球で行われている Pierre Auger 実験と，北半球で行われている TA (Telescope Array) 実験である．どちらも大規模地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡の両方を備えており，一つの空気シャワーを二つの装置で同時に観測することによってAGASAとHiResの差異を明らかにしようしている．その規模は，Auger が 3000km²，TA で 700km²とされており，どちらも AGASA の有効面積（100 km²；最高エネルギー宇宙線を年間に 1 例検出できる大きさ）を上回っている．Auger 実験は 2008 年の完成を前に，一部の検出器を用いた観測で既に AGASA の 3 倍のデータを取得し，解析結果を発表している．エネルギースペクトルについては HiRes 同様$10^{19.5}$eVから先で到来頻度が減少するようなスペクトルを公表している[9] が，到来頻度の絶対値は HiResよりも 20%程度低い．また，6×10^{19} eV 以上の宇宙線到来方向について，AGN（Active Galactic Nuclei： 活動銀河核）と相関が見られると報告したが [10]，統計量が増えるにつれて相関は弱くなっているようだ.

4 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ(Telescope Array：TA）実験は，AGASA，HiRes の結果を受けて日本とアメリカの研究者の協力の下に 2004 年に建設が開始された．先行するAuger実験との大きな違いは，地表検出器アレイにAGASAと同じプラスチックシンチレーターを用いていること，HiRes 実験と同じ大気状態を期待できるアメリカ・ユタ州を実験地に選んだことである．更に，HiRes 実験で実際に使用されていた大気蛍光望遠鏡をそのまま移設し，新たに製作した望遠鏡と同時に観測しているため,TA実験とHiRes実験の比較が可能となっている.

大気蛍光望遠鏡は HiRes 実験からの移設も含め,2007 年末に全数が完成し観測を開始した．地表検出器アレイも, 2008年春にほぼ全数の設置が完了し大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測を続けている.

4.1 地表検出器アレイ

4.1.1 検出器

TA 実験の地表検出器アレイは，507 台の検出器をおよそ 700km^{2}の領域に 1.2 km の格子状に配置したものである(図 3)．各検出器は 3m^2 のプラスチックシンチレーター二層からなり，シンチレーター上に 2cm 間隔で波長変換ファイバーを這わせることよって効率的に光を光電子増倍管(PMT) に集めている．データ収集には無線 LAN を使い, PMT やエレクトロニクスに必要な電力は全て太陽電池によって賄われ，日中の余剰電力はバッテリーに蓄えられ，夜間の動作電力になる．

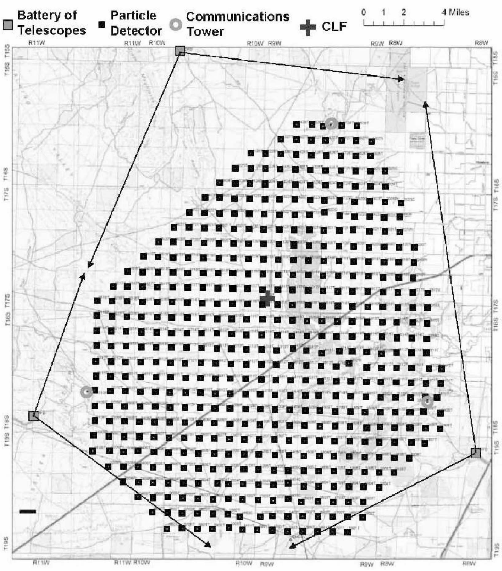


図 3: TA 実験サイト俯瞰図．小さな黒四角は地表検出器，その周囲には 3 ヶ所(北，南東，南西) の大気蛍光望遠鏡ステーションがある．望遠鏡ステーションの少し内側，地表検出器アレイの縁の丸印はコミュニケーションタワーを示す．

各検出器は個別のトリガーによって 0.3MIP (Minimum Ionization Particle：物質中での電離損失が最小の状態にある粒子，またはその電離損失量) 以上の信号を検知すると，PMT の波形を FADC によって記録する．個別トリガーの頻度は 750Hz にのぼり，後述するシャワートリガーのために一時保存される他，検出器のキャリブレーションデータとしても使われる．個別トリガーの中で 3MIP 以上の信号を検知した検出器は，無線 LAN を通じてコミュニケーションタワーと呼ばれるホスト・エレクトロニクスにそのトリガーのタイムスタンプを送る.コミュニケーションタワーはアレイ全体で3 ヶ所に設置されており，それぞれが 100〜200 台の検出器からトリガーのリストを受け取り，“隣接する 3 台” が 8μs 以内に信号を検知した場合に空気シャワーと判断する．3MIP トリガーは 20 Hz, 空気シャワートリガーは 0.01Hz 程度で，トリガー効率は $10^{18.7}$ eV 以上で 100 %である[11]．図 4 はユタ州の砂漠に設置された地表検出器である．左側手前から右奥に向かって数台の検出器が整然と並んでいる様子がわかる．

図 4: 南から北へと並ぶ地表検出器．黒く格子模様が入ったように見えるのはソーラーパネルで，シンチレーターは暗箱に入れられてテーブルの天板の位置に置かれている．検出器右側のポールに取り付けられた無線 LAN アンテナはコミュニケーションタワーの方向を向いている．

地表検出器にはプラスチックシンチレーターの他に Auger 実験にも採用されている水チェレンコフ検出器が良く使われる．空気シャワー粒子を平面で検出するプラスチックシンチレーターに比べ，背の高いタンクを使う水チェレンコフ検出器は，天頂角の大きな空気シャワーに対しても高い感度を維持できるという利点がある．しかし，体積の大きさ故に，空気シャワー中の電磁成分(電子やγ線など) による信号に比べて，高エネルギーμ粒子からの信号を強く検知してしまう．空気シャワー中でμ粒子に分配されるエネルギー量は核相互作用や一次宇宙線の核種に依存するため，電磁成分に強い感度を持つプラスチックシンチレーターに比べてエネルギー決定が困難である．そのため，Auger 実験では大気蛍光望遠鏡によってのみ一次宇宙

線のエネルギーを決定しており，AGASA と HiRes のエネルギースケールの違いについて，本質的な理解を得られないと思われる．また，一次宇宙線がγ線であった場合にはμ粒子はほとんど発生しないため，エネルギーの見積もりには電磁成分に感度の高いシンチレーターが有利である．

4.1.2 モンテカルロ・シミュレーション

水チェレンコフ検出器であれプラスチックシンチレーターであれ，地表検出器アレイによるエネルギー決定にはシミュレーションが不可欠である．空気シャワー中の二次粒子の約 90%は電磁成分と考えられており，これらの粒子は臨界エネルギー(それ以上他の粒子と反応せず，増殖に寄与しなくなるエネルギー）になるまで制動輻射と電子対生成によってエネルギーを失い，増殖していく．その過程は計算によってよく再現できることが知られている．しかし，空気シャワー中には電磁成分に比べて寿命が長く，高いエネルギーを保持したまま地表に到達するμ粒子や，稀には核子も存在する．これらの粒子がどのくらい生成されるかは確率的に決まるため，モンテカルロ・シミュレーションによってたくさんの仮想空気シャワーを生成し，観測量から統計的にエネルギーを推定する．

最高エネルギー宇宙線による空気シャワーのシミュレーションには，大容量の HDD と高速な CPU が必要となる．空気シャワー中の二次粒子数は，10^{20} eV の場合でおおよそ 10^{11} コであり，それら膨大な数の粒子一つ一つについてエネルギーなどの物理量を全て記録することは難しい．従来はモンテカルロ・シミュレーションに近似計算を混ぜ，例えば検出される粒子数だけを記録するなどの方法で簡易シミュレーションが行われていた．

TA 実験では，空気シャワーシミュレーションコード COSMOS [12] を用い，近年の高速な CPU を並列化することによって 10^{19} eV の空気シャワーシミュレーションを 10 日程度で生成することを可能とした．この方法によって，エネルギー，到来天頂角，一次宇宙線核種別に 100 例以上のシミュレーションを行い，空気シャワーの発達段階毎に二次粒子の物理量(粒子種別，エネルギー,距離，到来方向，到来遅延時間など）のデータベースを作成した．それとは別に，大量生成が可能な簡易シミュレーションから各粒子ではなくシャワー全体の情報(全粒子数など）のデータベースを用意し，この二つのデータベースから適宜，詳細な物理量を呼び出すことで“疑似”フルモンテカルロ・シミュレーションとして利用できる[13]．

モンテカルロ・シミュレーションによるエネルギー推定において，最も不定性が高い部分は核相互作用モデルである．現在，代表的なモデルがいくつか存在するが，いずれも加速器実験(10^{14} eV 程度）からの外挿であり，モデル毎の違いは高エネルギーになるにつれて大きくなる.これらのモデルを比較するために，異なる核相互作用モデルによる複数のデータベースを構築中である．

4.2 大気蛍光望遠鏡

4.2.1 検出器

大気蛍光法は大気をシンチレーターとした巨大な全吸収型カロリーメータと考えることができる．空気シャワーの縦発達を観測でき，全発光量からエネルギーを見積もるために地表検出器アレイと比べてエネルギー決定精度が高いとされる．しかし，大気蛍光は非常に弱い光であるため，どれだけ集光力があるかが光学系の重要な性能のひとつである. TA 実験で新たに開発した大気蛍光望遠鏡は 40 km 遠方の 10^{18} eV の空気シャワーを検出できるよう設計された．

大気蛍光望遠鏡は広範囲を観測するために 12～14 台が 1 ヶ所に設置され，風雨をしのぐためのステーションと呼ばれる建物に収容されている．TA 実験では，地表検出器アレイの北西，南東，南西の 3 ヶ所にステーションが設置されている．それぞれは約 30km 離れており, 100° 以上の広い方位角を観測することで，地表検出器アレイで検出される空気シャワーを必ず 1 ヶ所以上のステーションで検出することができる．

北西の MD (Middle Drum）と呼ばれるステーションには，HiRes 実験で使用されていた望遠鏡がそのまま移設されている. MD ステーションに設置された 14 台の望遠鏡は 4 分割された直径 2 m の鏡と 256 本の PMT からなり，方位角 16°，仰角 14° の視野をもっている．後述する他の 2 ヶ所のステーションと同程度の視野になるよう, 7 列 2 段に配置されて 112° ×28° を観測している[14]．南側の 2 つのステーションは BR (Black Rock）と LR (Long Ridge）と呼ばれ，日本で開発されたより大型の望遠鏡が 12 台ずつ設置されている．各望遠鏡の視野は方位角 18°，仰角 15° で，これを 6 列 2 段に配置し,108° ×30° の視野を観測している．反射鏡は 18 枚の分割鏡によって構成される直径 3m の球面鏡で，焦点面には六角形の光電面をもつ PMT 256 本を蜂の巣状に並べたカメラを設置してい

る. 図 5 に BR ステーションの外観を示す. 3 つの開口部からそれぞれ 4 台の望遠鏡が夜空を観測している. ステーションは高さおよそ 10 m, 開口部は 8 m 四方である.

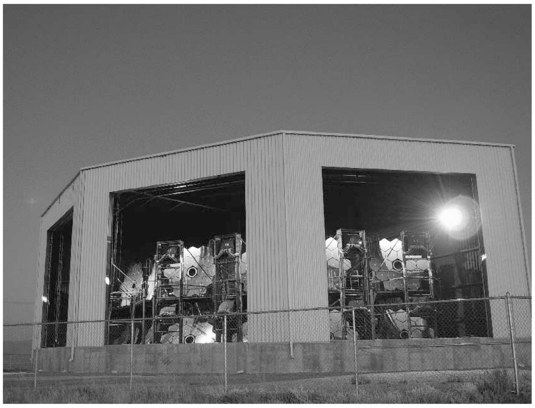


図 5: 観測前の BR ステーション. 反射鏡と梯子状の架台に載せられたカメラが開口部から見えている.

各 PMT からの信号は FADC でデジタル化され, バックグラウンド光量の移動平均・標準偏差と比較することで光の入射を検知する. 光を検知した PMT の情報は 1 カメラ毎にまとめられ, 隣接する 5 本以上の PMT が空気シャワーらしき軌跡を構成しているかどうかの判定が行われる. もし軌跡が検出されれば, ステーション全体にトリガーが送られ, 隣接するカメラでもデータが保存される. 空気シャワーの軌跡が 2 つ(以上) のカメラにまたがっている場合には, カメラ周辺部で隣接する 4 本以上の PMT が判定基準となる. ステーション全体にトリガーを送るエレクトロニクスには GPS が組み込まれており, 内部クロックと連携して全カメラを 2.5μs 以内に同期させている. この GPS による同期は 3 ステーション全てで行われており, 複数のステーションによる同時観測(ステレオ観測) を可能にしている. また, 同じ精度の GPS が地表検出器にも搭載されており, ハイブリッド観測に役立てられている.

4.2.2 キャリブレーション

大気蛍光法は光学的な観測であるため, PMT で検出する光量がエネルギー決定精度に直接影響する. そのため,TA 実験では PMT ゲインの絶対較正と相対較正[15],大気による減衰量の見積り[16] および電子ビームを用いた蛍光発光量測定[17] を行っている.

- PMT ゲイン較正

  BR, LR ステーションの全 6144 本の PMT は二段階のゲイン較正によって感度を調整されている.

  まず, 絶対光量測定システム CRAYS (Caliblationusing RAYleigh Scattering) [18] によって, 印加電圧とゲインの関係が測定された. CRAYS は波長 337.1nm の窒素レーザーを窒素ガスを充填した暗箱に通して, 暗箱中のレイリー散乱光を PMT で検出するもので, レーザー強度とバッフルによる PMT 視野の調整によって入射光量を制御することができる. 入射光量は 8%の精度で制御され, 測定した 75 本の PMT の光電子 1 コあたりの FADC カウント値は, 印加電圧の調整によって RMS 1%で揃えられた.

  これら 75 本の PMT は, 基準 PMT として 1 カメラに 3 本ずつが取り付けられている. 基準 PMT 以外の PMT のゲインは, 反射鏡中央に設置された一様光源 Xe フラッシュによって基準 PMT と同じゲインになるよう調整される. 全 PMT のゲインは, Xe フラッシュの光源の一様性, 幾何学的な補正も含めて 2%の精度で調整されている.

  この他, 基準 PMT の劣化などを発見するために, PMT 中央部に YAP (YAlO3:Ce+241Am) と呼ばれる密封放射線源による定常光源が取り付けられ,観測中も常時モニターされている. また, Xe フラッシュでは PMT 光電面の積分値によってゲインが調整されているが, 光電面の感度は必ずしも一様ではない. そこで光源に UV LED を用いた X-Y ステージを作成し, 光電面の相対的な感度を 4mm 間隔で測定した. これらのキャリブレーションによって, 全 PMT の出力が 3% 以内で安定していることが確認されている.

- 大気モニター

  大気蛍光は空気シャワーから望遠鏡に届くまでに散乱され, 光量を失う. 光量の減衰は空気分子によるレイリー散乱と, 塵や埃, エアロゾルによるミー散乱にわけて考えられる. このうち, レイリー散乱による減衰は, 大気の温度分布などを考慮することで 5%程度の精度で計算できる. 温度分布は観測サイト近傍で打ち上げられているラジオゾンデのデータを利用し, 極端な天候の日を除いた毎月の平均値からレイリー散乱の寄与を計算している.

大気透明度は大気蛍光の波長に近い紫外線レーザーを用いた LIDAR(LIght Detection And Ranging)によって測定する. LIDAR は BR ステーションに設置されており, 大気中に射出したレーザーの後方散乱光を小型の望遠鏡と PMT で受光し, 距離毎の減衰の変化から微分的に大気透明度を導く. 透明度の指標は消散係数 α と呼ばれ, 指数関数で表される減衰量 $\exp(-\alpha R)$ の形で現れる. レイリー散乱による消散係数は地表付近ではおおよそ $0.06\mathrm{km}^{-1}$ で,10km 遠方からの光は $\exp(-0.06\times10)$ ≃54.9 %に減衰する. 仮にミー散乱成分が $0.01\mathrm{km}^{-1}$ だけ上乗せされたとすると減衰量は 49.7 %となり,5.2%の差が生じる. 実際の α の値は高度によって変化するため, できるだけ精度良く高度の関数として求める必要がある. 2007 年秋からの定常的な観測によって消散係数の分布が求められ, その最頻値は $0.09\ \mathrm{km}^{-1}$ であった.

LIDAR と同様に紫外線レーザーを使用した CLF(Central Laser Facility) が実験サイト中央に設置されている. CLF は 3 つの大気蛍光望遠鏡ステーションからほぼ等距離となるような地点に設置され, 垂直に射出したレーザーの側方散乱をすべてのステーションで観測する. ある高度(LIDAR での観測によれば～5km) 以上ではレイリー散乱が支配的であるという仮定の下で, 計算で求めたレイリー散乱量と実際に観測された光量との差がミー散乱による減衰を表すことになる. ここでの透明度の指標は VAOD(Vertical Aerosol Optical Depth) と呼ばれ, 減衰量は exp(−VAOD) で表される. ミー散乱の消散係数 α_{mie} との関係は $\mathrm{VAOD}(R)=\int_0^R \alpha_{\mathrm{mie}}(r)dr$ であり, 一次元大気(大気状態が高さのみに依存する)と考えた場合には LIDAR によって求められた消散係数と比較することが可能である. CLF と同様の観測は HiRes 実験でも行われており, その際に求められた VAOD は高度 2.5～3.5 km で 0.034～0.036 であった. TA 実験サイトでは 10%程度の違いがあると予想される.

現在, LIDAR は大気蛍光観測の開始前と終了直前に水平と垂直の消散係数を測定している. CLF は大気蛍光観測中, 30 分毎にレーザーを射出し大気蛍光望遠鏡で観測している.

- 電子線形加速器

ELS (Electron Light Source) と呼ばれる小型電子加速器を用いて, エネルギーの分かっている電子ビームを大気中に射出し, そこから発生する空気シャワーによる大気蛍光を大気蛍光望遠鏡で直接測定する. これによって, 電子のエネルギーと蛍光光量, PMT 信号までの絶対較正を行う. これまでの大気蛍光観測では, 別に測定された蛍光の発光効率を仮定し, 更に鏡の反射率・PMT 感度などを積み重ねる必要があったが, ELS によって発光効率・望遠鏡感度などをまとめて較正することが可能となる. ELS は BR ステーションの正面, 100 m 離れた場所に設置され, 最大で 4×10^{7} eV の電子ビームを射出できる. 1 μs のパルス中には 10^{9} コの電子が含まれ, これは 4×10^{16} eV のエネルギー損失に相当し, 10km 先の 4×10^{20} eV と等価である. 電磁成分のエネルギー損失はシミュレーションで良く再現できるため,実際に観測された光量と比較することで絶対較正ができる. ELS は高エネルギー加速器研究機構の協力によって製作され, 現在は実験サイトに設置されて最終調整が行われている.

4. 3 観測状況

TA 実験は, 2008 年より地表検出器と大気蛍光望遠鏡によるハイブリッド観測を開始した. 2007 年末から続けられている大気蛍光望遠鏡の観測時間は実稼働率およそ 10%で 2000 時間を越えた. 地表検出器の観測は 1 年半にわたって 96%以上の稼働率を保ち, AGASA 実験の全観測量の 2/3 に達しようとしている.

図 6 に, 3 ヶ所の大気蛍光望遠鏡と地表検出器で観測された空気シャワーの例を示す. 空気シャワーの中心は BR ステーションに近い領域で地表に到達しており, BR ステーションではっきりと大気蛍光イメージが捉えられている. MD, LR の両ステーションからはそれよりも 2 倍程遠いが, MD ステーションでは空気シャワーが 3 つのカメラの視野を横切っている様子がわかる. このようなハイブリッドイベントは, 2008 年 5 月～2009 年 5 月の 1 年間で 2000 例以上が観測され, そのうち 200 例が 2 ヶ所以上の大気蛍光望遠鏡で観測されたステレオ・ハイブリッドイベントである [19].

5 最高エネルギー宇宙線観測の今後

近年, γ 線天文学の発展によって銀河系近傍に宇宙線加速源が次々と発見され, 宇宙線加速のメカニズム

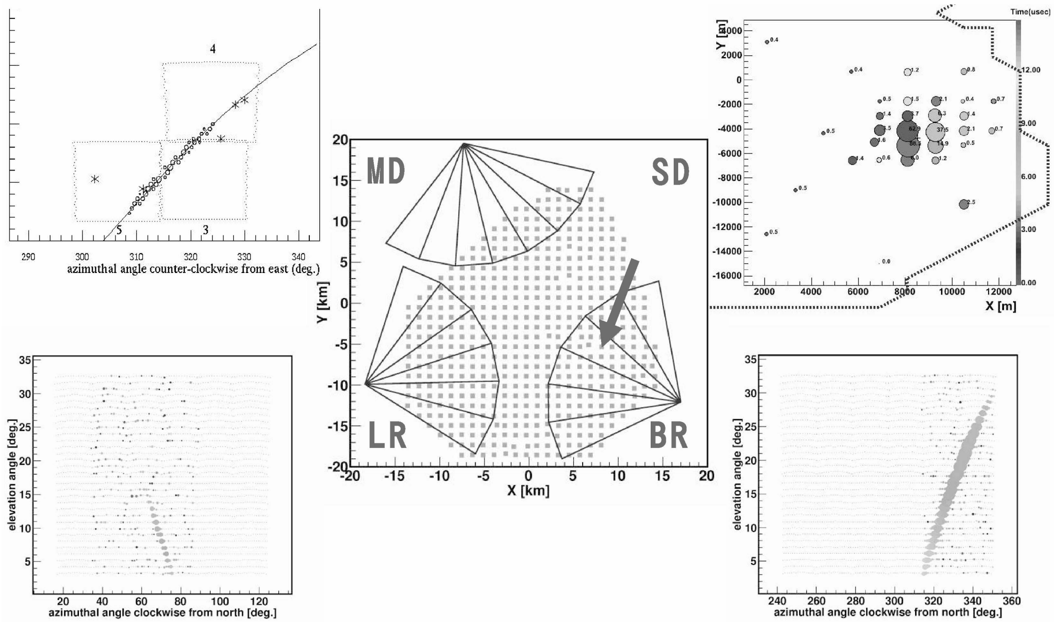


図 6: 2008 年 10 月に観測されたトリプル・ハイブリッドイベント．中央の図は実験サイトの俯瞰図で，図中の矢印は空気シャワーの地表到達点と到来方向の方位角を表している．右上は地表検出器のイベント・ディスプレイで，円の大きさは各検出器の検出粒子数に比例している．点線は検出器アレイの縁を表す．右下と左側の 2 つの図は，それぞれ BR, MD, LR の大気蛍光望遠鏡で捉えられた空気シャワーのイメージである．

についても徐々に解明されつつある．しかし，観測されている高エネルギーγ線は～10^{12} eV までの領域で，これらの観測から予想される粒子加速では超高エネルギースペクトルを説明できない. GZK カットオフ問題から始まった最高エネルギー宇宙線観測であるが，銀河磁場による曲がりが無視できるという特徴から，γ線天文学の先の超高エネルギー宇宙粒子線天文学としての可能性も含んでいる．

また，Auger 実験が発表しているエネルギースペクトルは $10^{19.5}$ eV での冪の変化を示唆してはいるが，10^{20} eV を越える宇宙線の存在は否定していない．つまり，GZK カットオフが正しいとしても，スペクトルはさらに高いエネルギー領域に続いており，そこから宇宙線化学組成などの情報が得られるはずである．同時に，十分な統計量によって少し低い Ankle 領域のスペクトルを詳細に調べることも，宇宙線加速の謎に近付く鍵のひとつかも知れない.

現在稼働中の Auger 実験と TA 実験は，それぞれ南半球と北半球を観測しており，銀河系外からの宇宙線を観測する上では相補的と言える．Auger 実験では北天を観測する北 Auger 計画が進められている．TA 実験では, Ankle 領域よりも低い 3×10^{16} eV から 10^{18} eV を狙う TALE (Telescope Array Low Energy extension) を計画している[20]．その他にも，新たな試みとして，空気シャワーが発する大気蛍光を宇宙から観測する JEM-EUSO 計画[21]が進行中である．JEM-EUSO 計画は地上の検出器を凌駕する 200,000km^2 の領域を観測でき，圧倒的な統計量による GZK カットオフ問題以後の宇宙粒子線天文学を目的としている.今後 5 年の間にはこれらの実験によって GZK カットオフ問題が決着し，宇宙粒子線天文学によって最高エネルギー領域での物理過程の理解が深まることが期待される．

参考文献

[1] Greisen, K., Physical Review Letters, 16, 748, (1966)
[2] Zatsepin, G. T. and Kuz'min, V. A., Soviet Journalof Experimental and Theoretical Physics Letters,4, 78, (1966)
[3] Takeda, M. et al., Physical Review Letters, 81,1163, (1998)
[4] Uchihori, Y. et al., Astroparticle Physics, 13, 151,(2000)
[5] Abbasi, R. U. et al., Physical Review Letters,

92,151101, (2004)

[6] Kuzmin, V. and Tkachev, I., Soviet Journal ofExperimental and Theoretical Physics Letters, 68(1998), p.271

[7] Weiler, T.J., Astroparticle Physics, 3, 303, (1999)

[8] Sato, H. and Tati, T., Progr. Theor. Phys., 47,1788, (1972)

[9] Yamamoto, T. et al., in Proc. of the 30th ICRC,4, 335, (2007)

[10] Abraham, J. et al., Science, 318, 938, (2007)

[11] Nonaka, T. et al., in Proc. of the 31st ICRC,(2009)

[12] Kasahara, K., http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/

[13] Kido, E. et al., in Proc. of the 31st ICRC, (2009)

[14] Jui, C.C.H. et al., in Proc. of the 31st ICRC,(2009)

[15] Tokuno, H. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 601, 364, (2009)

[16] Tomida, T. et al., in Proc. of the 31st ICRC,(2009)

[17] Shibata, T. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 597, 61, (2008)

[18] Kawana, S. et al., in Proc. of the 31st ICRC,(2009)

[19] Ikeda, D. et al., in Proc. of the 31st ICRC, (2009)

[20] Matthews, J.N. et al., in Proc. of the 31st ICRC,(2009)

[21] http://jemeuso.riken.jp/

酸性霧の樹冠への沈着と森林衰退

井川　学*、松本　潔**、大河内　博***

Acid fog deposition on canopy and forest decline

Manabu IGAWA,* Kiyoshi MATSUMOTO,** and Hiroshi OKOCHI***

１．緒言*

かつてわが国は、1960 年をピークとする高い二酸化硫黄濃度のために森林が衰退したが、その後は二酸化硫黄による激しい衰退は終了した。その典型例が丹沢大山のモミである。しかし、1980 年以降、これとは別の地域での新たな衰退が始まり、丹沢山塊山頂のブナ林は枯木のオブジェと化している。一方で、丹沢山塊北側斜面では美しいブナ林が今も広がっており、衰退の地理的依存性は極めて大きい。このような森林衰退の及ぼす環境影響は極めて大きく、生態系破壊、水資源の枯渇ばかりでなく、山塊の崩壊にもつながる。この地域では玄倉川での急な出水のために、多くの犠牲者を出した水難事故が記憶に新しいが、ブナは保水能力が大きいのでその衰退を放置するなら同様な事故は今後もさらに頻発するであろう。このように森林衰退は極めて深刻な問題であるにもかかわらず、その原因解明はこれまでなされておらず、適切な改善策も得られていない。

研究代表者は既に、酸性霧の実態と森林衰退への影響に関する研究を 20 年近く続けている。これまでの研究から、丹沢で起こりうる pH3 の酸性霧の長期暴露により、ブナが枯れることを明らかにした。このような事象の発生機構を明らかにすることは極めて重要な課題であるため、これを 19 年度から 20 年度までの工学研究所の共同研究として行った。

平成 19 年度には、次のような研究を行なった[1)]。

1. 酸性霧の成分分析と濃度支配要因の解明

丹沢大山をフィールドとして霧水の成分分析によって霧の特徴とその酸性化機構を解明した。特に霧水の粒径分布の時間変動を検討した。

2. 丹沢大山の林内雨と樹幹流の分析

丹沢大山のモミ、ブナおよび被害を受けていないスギの樹冠下で林内雨、樹幹流を採取分析し、溶脱する金属イオンごとの特徴を明らかにした。

3. 実験室における疑似酸性霧暴露実験

正常なブナ苗木に酸性溶液を暴露し、枝葉からの溶脱成分をフィールドと同様な手法で分析した。また、膜に結合したカルシウムは酸によりどれだけ溶脱するかを、蛍光顕微鏡を用いて明らかにした。

平成 20 年度はさらに、次のテーマの研究を行った。

1. 酸性霧の成分分析と濃度支配要因の解明

新たに測定項目を増やすとともに、霧沈着量の支配要因について解析を進めた。また、視程の変化も常時観測した。

2. 丹沢大山のモミの林内雨と樹幹流の分析による酸性霧へのモミの応答の把握

初年度の分析に加えて、林内雨液量と組成を、雨のとき、霧のとき等で詳細に検討した。また、有機物の成分分析も行った。

3. 実験室における疑似酸性霧暴露に対する苗木の応答

これまでの曝露条件に加えて、オゾンの曝露も開始した。曝露後に、葉の内部構造、組成の変化について SEM-EDX、IR 等の機器により詳細に解明した。

この研究遂行により目標とする到達点としては、丹沢大山における大気汚染物質および酸性霧沈着実態の把握、発生源ごとの汚染の寄与度の解明、酸性霧による衰退のメカニズムの解明、樹種による酸性霧への抵抗性の違いの解明である。以下に、今年度の研究成果を中心にこれまでに明らかになったことを述べる。将来的にはさらに、汚染源からどのように酸性物質が生成し拡散しているか、

---

*教授　物質生命化学科
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry
**准教授　山梨大学
Associate professor, Yamanashi University
***教授　早稲田大学
Professor, Waseda University

その山岳地形依存性はどうなのか、丹沢にはこれまでにどれだけ汚染物質が沈着したのか、このまま汚染物質の影響が継続するなら生態系はどのように変わるのか、健全な生態系を維持するためにどの程度まで大気汚染に対する規制を強めることが必要なのか、等についても明らかにしていきたい。

2.実験

2.1 大山でのフィールド観測

霧水試料は関東平野南西部に位置する丹沢山塊の東端、大山(標高 1252 m)の中腹に位置する大山阿夫利神社下社(標高 680 m)で、自動霧水採取装置とパッシブ霧水採取装置を用いて採取した。得られた試料は吸引ろ過(孔径 0.2μm メンブランフィルター)し分析に供した。また、気象状況を把握するため、中腹において降雨強度、風向風速、気温、湿度を観測した。麓の大気汚染物質濃度については伊勢原市役所の常時監視測定データを用いた。また、大山の南東斜面、標高 400 m—1252 m (山頂)間の各標高において、林外雨、スギおよびモミの林内雨と樹幹流、霧、ガスを約１ヶ月毎に採取した。また、890m 地点ではモミ林内雨の方角による沈着量差について検討するため、1 本のモミの樹幹の周囲の 3 ヶ所(北、南、西)に林内雨採取器を設置した。680 m 地点では沢水を約 1 週間毎に採取した。

これらの試料は吸引濾過処理を行った後に、導電率および pH は、それぞれ伝導率計、pH 計により測定を行った。また、主要無機イオンはイオンクロマトグラフ (IC)、中性糖 (アルジトールアセテート誘導体)はガスクロマトグラフ (GC)[2]、ウロン酸は紫外可視分光光度計(UV-VIS)[3]、ホウ素は誘導結合プラズマ発光分光光度計(ICP-AES)により定量した。また、気象場の把握を行なうために、風向風速、降雨強度、温湿度の観測も行なった。

2.2 エピクチクラワックスや植物細胞壁成分に対する酸性霧の影響

葉面を保護するエピクチクラワックスの流亡や変質過程、植物細胞壁成分への酸性霧の影響を調査するために、9年生モミ苗木から採取した枝葉に対し硝酸でpH調整した擬似酸性霧 (SAF)を小型チャンバー(0.6 m×0.6 m×高さ 0.9 m)の中で曝露し、接触溶液を一定時間毎に回収した。葉表面におけるワックスの状態を走査型電子顕微鏡(SEM-EDX)により観察した後に、ワックスをクロロホルムにより抽出し[4]、フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR)やサイズ排除クロマトグラフ (SEC)、GCにより分析した。なお、接触溶液中の塩基性陽イオンや中性糖、ウロン酸およびホウ素は、フィールド試料と同様に測定した。また、酸性霧処理した針葉から細胞壁をアルコール不溶性画分(AIR)として抽出し、細胞壁内のホウ素の存在形態をSECにより測定した[5]。

2.3 モミおよびスギ針葉中のmCa、全葉内カルシウム(tCa)に対する酸性霧の影響

9年生モミ苗木に対し2007年5月から2008年7月 (1- 3月、8月を除く)まで、硝酸でpH調整したSAFを大型チャンバー(2.4 m×2.4 m×高さ1.8 m)の中で１週間に4時間の曝露を行った。また、比較検討のために大山で衰退が確認されていないスギ (7年生苗木)についても同様な処理を行った。酸性霧処理した針葉は、ミクロトームにより断面厚50 μmにカットし、この断面を蛍光プローブであるクロルテトラサイクリン (CTC)により染色した。画像撮影は、一定条件下で正立型蛍光顕微鏡システムと自動露光制御備えたカメラにより行い、画像解析ソフトで撮影した画像の蛍光輝度を測定することにより葉内のmCa変化を評価した[6]。また、tCaについては湿式分解法により測定した[7]。

2.4 酸性霧の単独或いはO_3との複合ストレスに対するブナ苗木の生長および生理応答

酸性霧の単独影響を調査するために、7年生ブナ苗木に対し2004年9月から2006年7月 (1- 3月、8月を除く)まで硝酸でpHを調整した溶液を大型チャンバー (1.8 m×1.5 m×高さ1.6 m)の中で１週間に4時間の曝露を行った。その影響については、樹高、幹直径、葉数、葉面積、炭素蓄積量および乾物生長量を測定することにより評価した。また、酸性霧とO_3との複合影響を調査するために、3年生ブナ苗木に対し2007年5月から2008年7月 (1- 3月、8月を除く)まで、硝酸でpH調整したSAFを大型チャンバー(2.4 m×2.4 m×高さ1.8 m)の中で１週間に4時間の曝露を行った。また、O_3の曝露は2007年9月から2008年7月 (1- 3月を除く)に行い、60 nl l^{-1}で１週間に28時間の曝露を行った。なお、複合ストレスに対するブナ苗木の応答は、乾物生長量、デンプン含有量および葉内の無機イオン濃度の測定等により評価した。

3. 結果および考察

3.1 大山で観測される雨と霧の特徴

図1に林外雨 (以下全て、試料は特に断らない限り2007年12月12日から2008年12月21日まで) の体積加重平均による沈着量、pH、成分割合、降水量を示した。大山での降水量は940 m地点でやや低いものの、標高による変化は小さかった。沈着量をみると890 m地点の沈着量が多いが、こ

れは採取器の上方に樹木の枝葉があり、この影響でK^+の沈着量が増加したためである。890 mを除くと標高による沈着量変化は見られない。pHについても樹冠からの溶脱イオンの影響を受ける890 m地点以外は、ほぼ同じpHを示した。

図2に林内雨の体積加重平均による沈着量、pH、成分割合、降水量を示した。林外雨の降水量は標高依存性を示さなかったが、林内雨はモミ、スギ共に標高の増加により降水量の増加が確認された。これは霧水によるもので、高い標高では霧の発生頻度が増すことと風速が増大するためだと考えられる。大山では1062 m地点は後述するように、パッシブサンプラーによる霧水採取量が非常に多いため、霧の影響が強いものと思われる。また、林内雨による沈着量はモミ、スギ共に標高依存性を示し、林内雨降水量に依存する結果となった。

モミ、スギともに林内雨のpHは標高の上昇と共に低下していた。これは標高の上昇に伴いSO_4^{2-}やNO_3^-といった大気汚染物質を含み酸性度の高い霧水の影響が増すためだと考えられる。モミとスギではスギの方が沈着量が大きくpHも低いのは、衰退したモミとの樹勢の違いによると思われる．

図3に霧水の成分濃度、pH、成分割合、採取量を示した。採取量は1062 m地点において一番多かった。1062 m地点は尾根上にあり地形的な影響で霧の影響を受けやすく、このため採取量が極端に多かったと考えられる。

pHでは、標高が高くなると低下する傾向が見られた。また、1252 mの北側と南側ではpHに大きな違いが無かったが、南側の方が成分濃度は高く液量は少ない。これは、北側は前面に樹木があるため、採取地点で霧が薄くなることによると思われる。化学組成では大きな標高依存性がなかった。940 m地点と1252 m地点における霧水量の差はあまりないが、成分濃度では、1252 m地点の方が高く、高い標高の霧でも高濃度であることがわかる。

どの標高の試料にも海塩粒子であるNa^+、Cl^-が多く含まれているが、本研究では霧水採取をパッシブサンプラーで採取しているため粗大な海塩粒子の乾性沈着の影響を受け易いと考えられる。

湿性沈着物中には有機炭素だけでなく有機窒素が溶けており、この溶存有機窒素はタンパク質、ペプチド、アミノ酸、尿素などが主であるがその詳しい成分はよく知られていない．図4に2008年4月22日から12月21日までの間に採取した各試料中の溶存有機物質と溶存無機イオンの濃度を示す。溶存有機物質は特に樹幹流から多く検出された。有機窒素は樹幹流や林内雨で高く、季節ごとに見ると7月を中心に高い値が示された。有機窒素は植物由来であると思われるが、7月は林外雨や霧でも

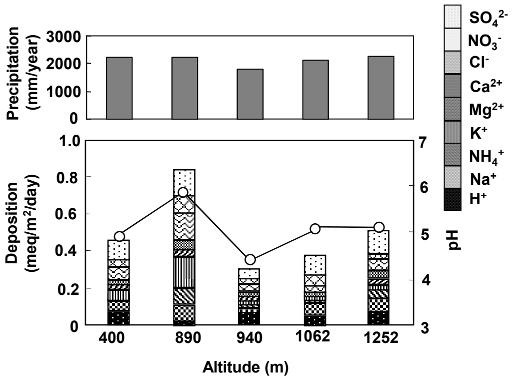


Fig. 1 Deposition of rainfall at different altitudes in Mt. Oyama in 2008.

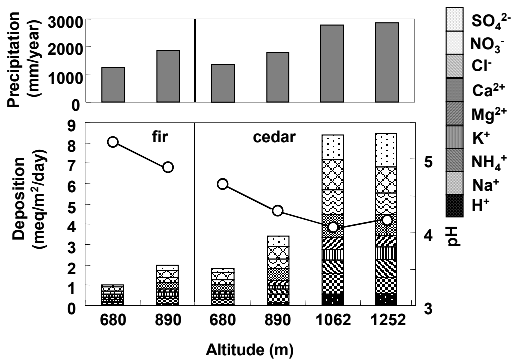


Fig. 2 Deposition of throughfall at different altitudes in Mt. Oyama in 2008.

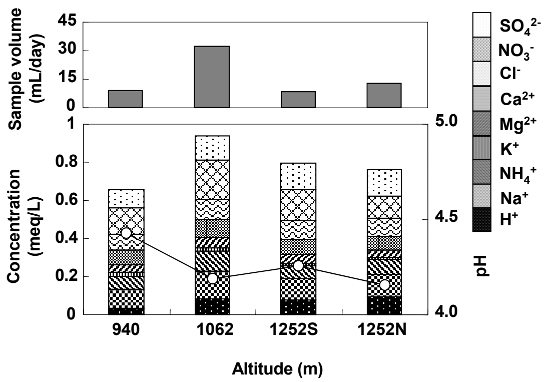


Fig. 3 Fog-water concentration at different altitudes in Mt. Oyama in 2008.

高い濃度になった。

ガス成分濃度の標高分布については、全体にばらつきがあるがNH_3ガス濃度は標高の上昇に伴って減少している。NH_3ガスは都市部や農村部で濃度が高く、これらの地域か

ら離れるにつれて減少するものと考えられる。HNO_3ガスは標高の上昇に伴い減少していた。これはNOxの酸化により生じたHNO_3ガスが斜面を上っていく際に霧などに沈着し、除去されていることを示唆している。SO_2とHClガスは標高の上昇に伴い増加する傾向を示した。SO_2は乾性沈着速度が小さく、沈着しにくいこと、HClガスは酸性ガスと海塩粒子との反応による発生が考えられるが，都市部の上層気塊の移流が標高の高いところほど影響を与えていることも考えられる。

3.2 大山の気象要因

大山では標高680ｍ（谷部）、1062ｍ（尾根上）、1252ｍ（山頂）の3地点に風向風速計を設置している。各地点における風向には特徴があり、680ｍでは谷に沿う方向、1062ｍ（尾根上）では尾根を横切る方向からの風が多く、1252ｍ（山頂）では風向が南側にまとまっており特に南西と南東からの風が多い。1252ｍ地点において風向が南側にまとまっているのは、観測装置が山頂の南斜面側に設置されているためと考えられるが、谷に沿って流れてきた風を観測していることによる。

各標高の平均風速は1062 ｍが大きい場合がほとんどである。季節別の平均風速を見ると、夏季において1252 ｍの風速が1062ｍよりも若干高くなる傾向を示したが、その他の季節では1252 ｍの風速よりも1062 ｍが上回る。1062ｍにおける風向は、冬季から夏季にかけては南西、南南西からの寄与が大きいが、秋季には北東からの寄与が大きくなる。北東からの風は南西、南南西からの風よりも風速が強い傾向があり、秋季の平均風速は風向の頻度の違いの影響を受けたと考えられる。

大山の標高400 ｍ、680 ｍ、890 ｍ、1062 ｍ、1252 ｍの5地点で温度測定も行った。一般に山間部での気温は標高の上昇とともに低下する。しかし大山では日中において逆転している地点があった。890 ｍ地点は森の中のため，他の地点に比べ、日中と夜間と気温差が小さかった。また、400ｍ地点と山頂1252 ｍ地点の温度差は夜間よりも日中の方が大きかった。

図5に2008年後期(9/5-9/18、11/2-12/21)の山頂における視程計のデータによる霧発生イベントの時間帯別発生頻度を示した。一般に霧は夜間の方が発生しやすいと言われているが、大山では日中の方が霧発生時間が長い。これは、大山では夜間よりも日中の方が山頂と麓との気温差が大きいことが関係していると考えられる。

山頂における霧イベント発生と風向との関係では、無風時の発生が一番多かったが、風向判別可能な時では南西の風が一番多く、次いで北西の風が多かった。

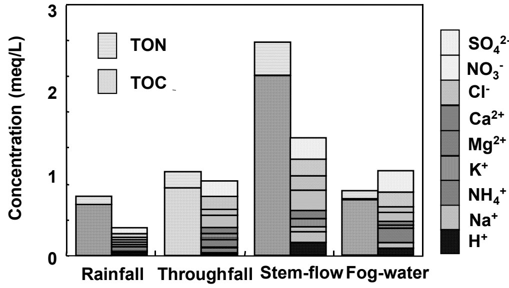


Fig. 4 Concentration of various components at different wet deposition in Mt. Oyama (Apr. 2008 to Dec. 2008).

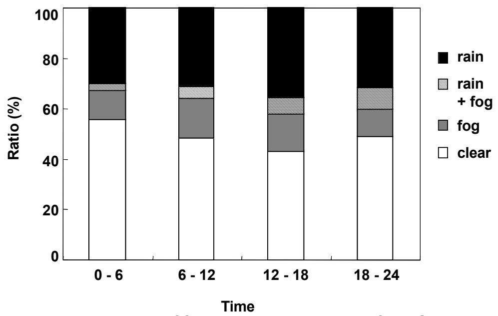


Fig. 5 Frequency of fog and rain at the top of Mt. Oyama.

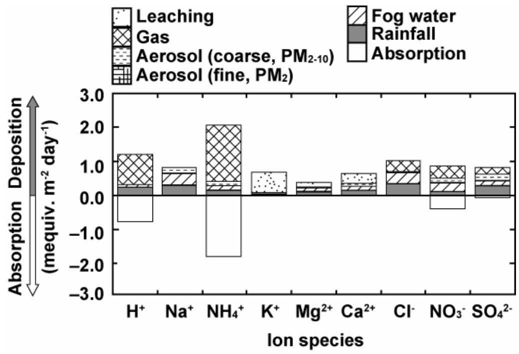


Fig. 6 Contribution of each deposition pathway to throughfall chemistry besed on the measurement for a fir stand at 680 m altitude.

3.3 森林樹冠への沈着寄与度

森林床に到達した降水の化学組成は、(1) 森林樹冠からの水分蒸発、(2) 葉表面に付着した乾性沈着物の洗浄、(3) 樹冠への成分吸収或いは樹冠からの成分溶脱により影響を受ける[8]。2004年のフィールド観測結果に基づき、大山中腹（標高700 ｍ)におけるモミ樹冠下の林内雨成分沈着量に対する霧水、林外雨、エアロゾルおよびガスの寄与度を樹冠収支法により見積もり、その結果を図6に示した。

H^+およびNH_4^+はそのほとんどが大気ガス由来であり、林内雨沈着フラックスの70%以上を占めていた。一般的に、NH_3ガスは畜産、化学工場、生物呼吸および微生物分解を発生源としており、雨水や霧水の酸性度を低下させる最も重要な成分である。NO_3^-およびSO_4^{2-}は湿性沈着、乾性沈着共にほぼ同程度の割合を占めており、これらのイオン種の排出源は主に工業地帯の固定発生源や自動車をはじめとする交通手段の移動発生源からのNO_XやSO_2である。現在、我が国において観測される霧水の酸性度にはHNO_3が大きく関与しているが、これに対する沈着寄与は大山中腹で低い方からエアロゾル (PM2, 1%)、エアロゾル (PM2-10, 14%)、林外雨 (14%)、霧水 (29%)、ガス (42%)の順であった。樹冠から溶脱した無機イオン成分はK^+, Mg^{2+}およびCa^{2+}であり、これらの総溶脱量(K^++Mg^{2+}+Ca^{2+})は、H^+吸収量 とほぼ等しい。また、林内雨沈着フラックスへの各溶脱成分が占める割合は、K^+, Mg^{2+}およびCa^{2+}でそれぞれ92, 35, 46%であった。

3.4 エピクチクラワックスに対する酸性霧の影響

植物葉が空気に触れる表面部分は、エピクチクラワックスと呼ばれるクロロホルム可溶な非揮発性の脂質層で覆われている。このワックス層は、水分の損失を抑制しており、これによって植物は陸上での生存が可能となっている。pH 2, 3, 5に調整したSAFの曝露後、モミおよびスギ針葉の表面エピクチクラワックスの状態をSEMにより観察し、その結果を図8に示した。これより、SAFのpH低下に伴いモミ針葉表面の損傷が大きくなることが観察され、特にpH 2処理区ではワックスの層厚が減少し下層部位が露出していることも確認された。このような変質は葉表面の親水性を増加させ、結果として濡れ性上昇の要因となる[9]。また、紫外線に対する防御力の低下や病害虫・微生物に対する抵抗力の低下、クチクラ蒸散や栄養塩類の溶脱等が促進されると考えられる。一方、スギ針葉では著しい流亡や変質現象が確認されなかった。このことから、ワックスの流亡や変質の度合は、霧水の酸性度に依存すると共に樹種により大きく異なることが新たに明らかとなった。

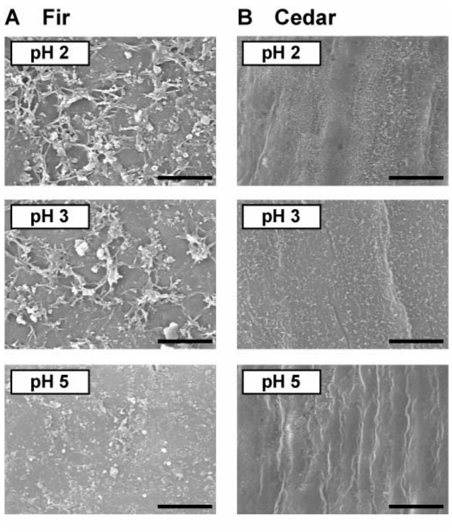


Fig. 7 Scanning electron micrographs of the leaf surface of fir (A) and cedar (B) exposed to SAF at pH 2, 3, and 5. The SAF were nitric acid with ammonium sulfate and sodium chloride. Scale bar is 10 μm.

図8にはSAFのpHと抽出したエピクチクラワックス量との関係を示した。モミ針葉中のワックス量は、SAFの酸性度の増加に伴い減少傾向を示しており、pH 5処理区に比べpH 2処理区で有意に減少した (P<0.05)。これは、葉面への酸性霧液滴の沈着によりワックスが溶解したためであるが、スギではpHの低下によるワックス量の減少は確認されなかった。図9にモミおよびスギ針葉から抽出したワックスのSECクロマトグラムを示した。モミではSAFのpHの低下に伴い主に低分子量領域の成分が溶解しており、これら

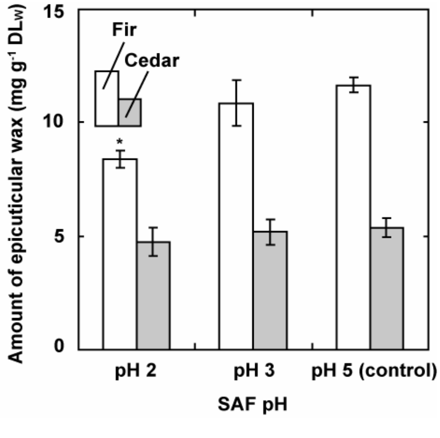


Fig. 8 Effect of pH of SAF on the amount of epicuticular wax.

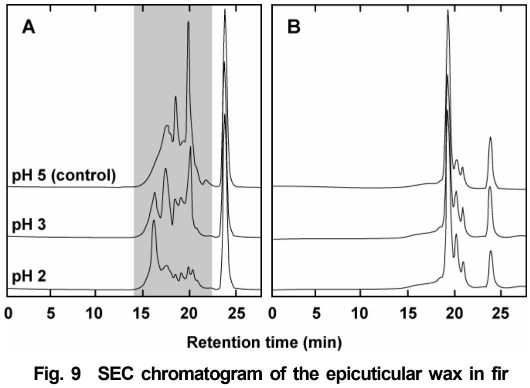


Fig. 9 SEC chromatogram of the epicuticular wax in fir (A) and cedar (B) treated with SAF at pH 2, 3, and 5.

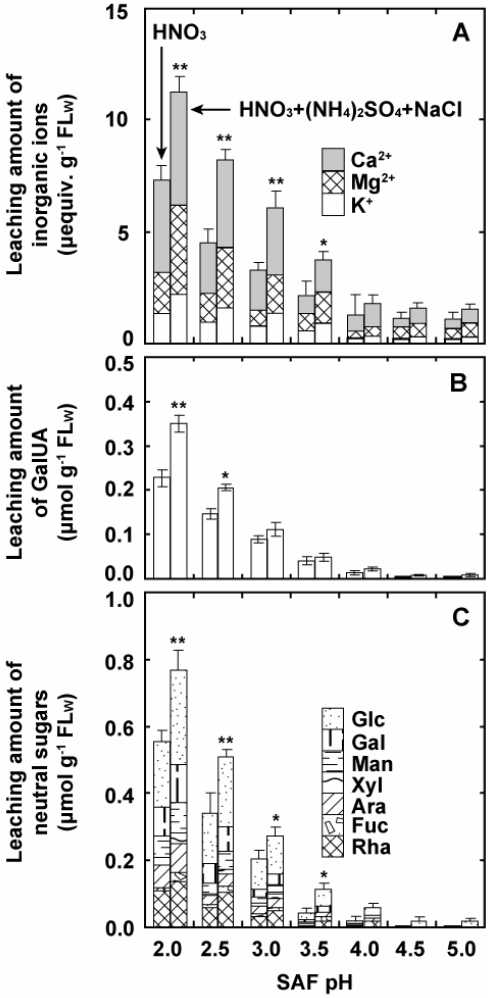


Fig. 10　Effect of pH of SAF on the concentrations of base cations (A), uronic acid (B), and neutral sugars (C) leached from the needles.

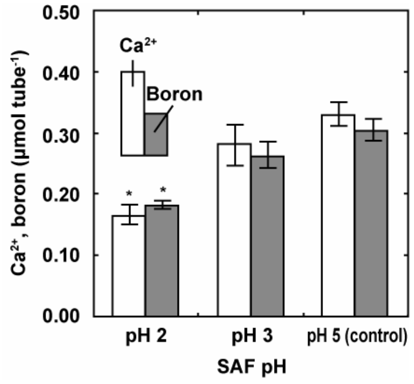


Fig. 11　Effect of SAF pH on Ca^{2+} and boron contents in dRG-II-B. *, significant at *P*<0.05.

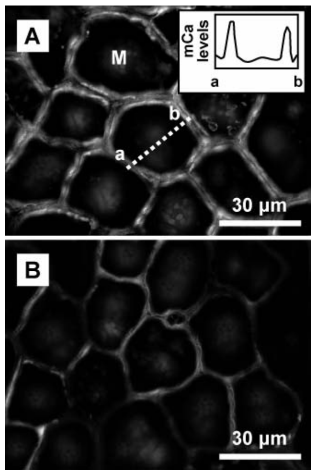


Fig. 12　Digitally acquired images showing treatment effects on mCa in current-year fir needles. (A) pH 5 (control); (B) pH 3.

の溶解成分は親水性の低級アルコールであろうと推測される。一方、スギではワックス量に変化が見られなかったように、分子量分布でも霧水酸性度の影響は確認されなかった。また、分子量較正曲線を使用して算出されたモミおよびスギの分子量分布は、それぞれ200－3500、100－800 g mol^{-1}であった。このように、酸性霧によるワックスの溶解性やその構成成分がモミとスギで異なっており、このことが樹種による耐酸性の違いとして現れると考えられる。

3.5 溶脱量や植物細胞壁成分に対する酸性霧の影響

モミ針葉に対するSAFの曝露終了後に、枝葉に接触したSAF溶液を回収し、葉からの成分溶脱量を測定した。6時間曝露処理後のSAFのpHと無機イオン、中性糖およびウロン酸溶脱量との関係を図10に示した。溶脱現象はpH 5付近でも確認されるが、SAFの酸性度の増加に伴いこれらの成分の溶脱量は増加した。図にはHNO_3に$(NH_4)_2SO_4$およびNaClを添加した系だけでなくHNO_3単独系の溶脱量変化についても示した。HNO_3単独系に比べ2種の塩を添加した系では、モミ針葉からの各成分の溶脱量が明らかに増加し、特にpH 3.0－3.5付近でその増加率は顕著となった。大山でのフィールド観測でも林内雨中のpNO_3が3.0－3.5の時に樹冠からの成分溶脱量が急増することを確認しており、このことは酸性霧の植物影響について検討する上で重要な情報と成り得る。溶脱は葉内の塩基性陽イオンと霧水中のH^+やNH_4^+とのイオン交換現象であるので、無機イオンや糖類の溶脱量は表面エピクチクラワックスの流亡の度合いに依

存すると推測される。実際、塩を添加した系ではエピクチクラワックスの損傷が大きいことを確認しており、このことが葉からの成分溶脱量を増加させる一因となっている。

このように、酸性霧の影響によりモミ針葉からCa^{2+}や糖類が溶脱することは確認されており、細胞壁への影響が懸念される。そこで、モミ針葉の細胞壁からdRG-II-ホウ酸錯体（dRG-II-B）を可溶化し、次にdRG-II-Bの形態やその分子量に対する影響を新たに調査した。SAF曝露したモミ針葉からAIRを分画し、これにエンド型ポリガラクツロナーゼ（EPG）を処理することで細胞壁のdRG-II-B領域を可溶化することができる。モミ針葉から抽出したEPG可溶性成分のSECクロマトグラフィー分析を行った。どの処理区においても、dRG-II-Bと単量体RG-II（mRG-II）が検出された。各成分の分子量はdRG-II-Bで12.0 kDa、mRG-IIで6.2 kDaであり、mRG-IIの分子量はdRG-II-Bのそれに比べ半減していた。また、総RG-II（= dRG-II-B + mRG-II）に占めるdRG-II-Bの割合はpH 5処理区で82.6%であったのに対し、pH 2処理区では76.1%まで減少していた。図11にはdRG-II-B検出時におけるCa^{2+}およびホウ素含有量を各処理区毎に示したが、これらの成分含有量はSAFの酸性度の上昇に伴い明らかに減少した。酸性霧により引き起こされる細胞壁からのホウ素やCa^{2+}の溶脱がdRG-II-Bによる架橋を切断させ、その結果として細胞構造が弱まったことが予想される。

3.6 葉肉細胞内のmCaに対する酸性霧の影響

植物葉に酸性霧液滴が付着すると、イオン交換作用によりCa^{2+}を葉表面に分泌することはよく知られており、霧水の酸性度が高いほどその溶脱量は増加する。特に葉肉細胞内に局在するmCaは、細胞膜構造とその機能を維持する上で重要な役割を担い、また環境ストレスに対して強い応答を示すことも報告されている[6]。このようなCaが酸性霧によりどの程度減少するかを調査することは重要である。ここで使用したCTCは、生体膜と結合しているCaと特異的な親和性を有する選択的蛍光プローブである。図12にはCTCで染色したモミ当年生針葉のCa^{2+}-CTC錯体の蛍光発光を示

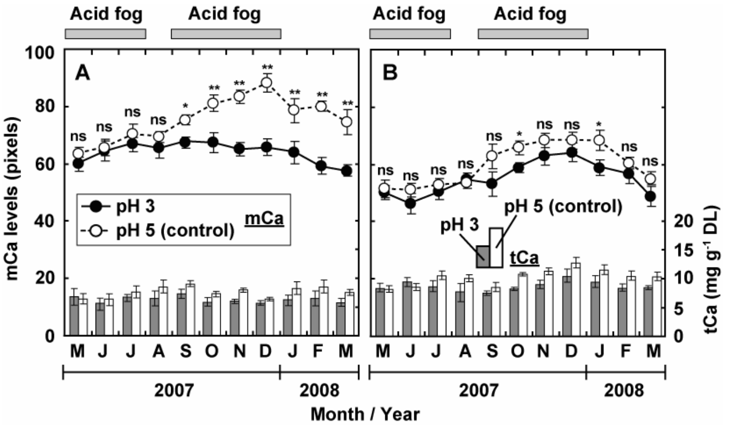


Fig. 13　Seasonal variations in mCa and tCa from current-year needles exposed to SAF of pH 3 and pH 5 (control). (A) Fir needles; (B) Cedar needles. *, significant at *P*<0.05; **, significant at *P*<0.01; ns, not significant.

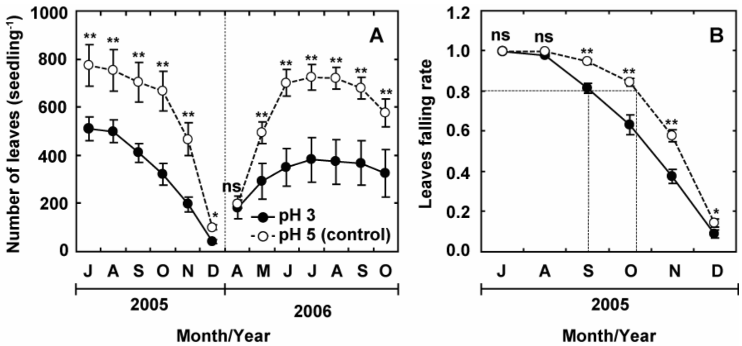


Fig. 14　Effect of SAF treatment on number of leaves during July-December 2005 and during April-October 2006 (A) and relationships between the normalized leaf number index and temperature during July-December 2005 (B). *, significant at *P*<0.05; **, significant at *P*<0.01; ns, not significant.

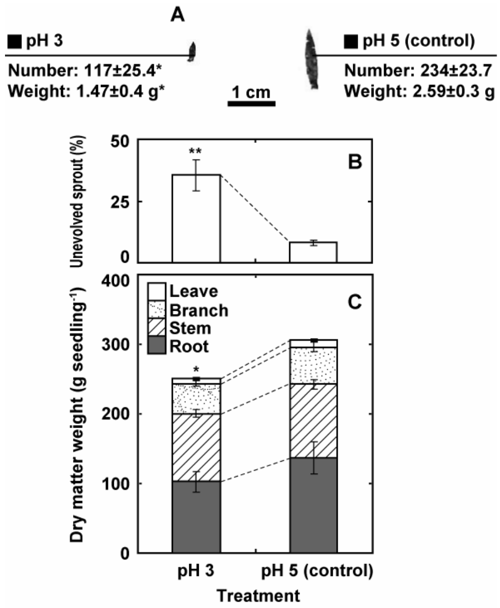
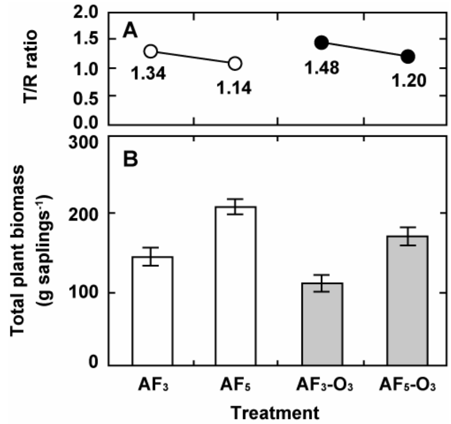


Fig. 15　Effects of long-term exposure to acid fog on beech seedlings relative to the number of winter buds and the weight (A), evolution of sprouts (B), and dry matter weight in parts of beech seedlings (C). *, significant at *P*<0.05; **, significant at *P*<0.01



ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			T/R ratio
AF_5	**	-		
AF_3+O_3	ns	**	-	
AF_5-O_3	ns	ns	**	-

ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			Biomass
AF_5	**	-		
AF_3+O_3	ns	**	-	
AF_5-O_3	ns	ns	**	-

Fig. 16　Effect of long-term exposure to acid fog and/or O_3 on beech saplings relative to the top-root (T/R) ratio (A) and total plant biomass (B). Data are presented as average values and standard errors (n=8).

す。図中に表示したダイアグラムより、葉肉細胞に隣接した細胞膜上で蛍光輝度強度が強くなること、つまりmCaが検出されていることを確認した。上下の蛍光画像の大きな違いは、蛍光輝度強度がpH 5処理区に比べpH 3処理区で低いことである。2007年5月から2008年3月までにおけるモミ針葉中のmCaおよびtCaの季節変化を図13に示した。晩夏から初冬にかけてpH 5処理区ではpH 3処理区に比べmCaレベルが大幅に増加しており（$P < 0.01$）、2007年12月には最頂点に達した。植物組織は低温のような環境ストレスに曝された時、アポプラストのCa^{2+}を細胞内のプールに輸送することがこれまでに明らかとなっている[10]。それ故に、初秋から冬にかけて気温が下がる時に、pH 5処理区における両樹種の当年生針葉中のmCaレベルは増加したと予想される。図にはスギ針葉中のmCaの季節変化も示したが、モミ針葉の場合と同様に、pH 5処理区における当年生針葉のmCaレベルは冬季に最も高くなった。しかしながら、モミ針葉で観測された結果とは対照的にSAF曝露の影響は確認できなかった。このことは、スギに比べモミは酸性霧に対する高い感受性を保有していることを示している。なお、tCaの季節変化はmCaとは異なりモミおよびスギ針葉共に観測されておらず、このことはH^+とmCaのイオン交換反応の方がtCaのそれよりも重要であることを示している。

3.7 酸性霧の単独或いはO_3との複合ストレスに対するブナ苗木の生長および生理応答

丹沢山地で観測されるブナ林枯損に対する酸性沈着物の役割を明らかにするために、ブナ苗木に対して2004年9月から2006年7月までの長期間にわたるSAFの曝露実験を行い、その影響について調査した。可視障害 はpH 3処理区の大半の苗木で発生しており、液滴が滞留する葉脈沿い或いは葉縁の先端で特に著しかった。また、pH 3処理区では2005年4月に2個体が、2006年4月にはさらに1個体が枯死した。　次に葉の展開パターンに対する酸性霧の影響を調査するために、芽吹き以降に各苗木の葉数を測定し、その結果を図14に示した。2005年7月時点の葉数は、pH 3処理区および対照区でそれぞれ510±48（$n = 10$）、775±86（$n = 12$）であり、両処理区間の差は有意であった（$P < 0.05$）。2006年7月にはこの傾向が一段と明確化し、pH 3処理区の葉数は381±93（$n = 9$）まで減少し、対照区（$n = 11$）の約53%になった。各処理区における葉数の測定結果から落葉

速度を算出したところ、pH 3処理区では9月頃から落葉が始まっており、この時点の落葉速度は3.04 day^{-1}でありpH 5処理区の1.75 day^{-1}と比べ約2倍高く、葉数は7月当初の80%程度まで減少した。また、同じく80%となった時期をpH 5と比較すると落葉時期は約1.5ヶ月早まっていた。

幹内の栄養供給状態を把握するために、2006年12月の収穫時に幹根元から3 ㎜厚の切片を切り出し、ヨウ素デンプン反応を利用してデンプン存在域を青紫に呈色した[11]。なお、幹内のデンプン蓄積量は、幹断面積に対する染色面積の割合として算出した。その結果、pH 3処理区およびpH 5処理区における平均デンプン蓄積量は、それぞれ7.73±1.6 (n = 9)、21.4±2.3% (n = 11)であった 。落葉樹は冬芽を形成するために、秋季から冬季にかけて枝や幹中の柔細胞に蓄積したデンプンを材料として使用する。ここで観測された幹内のデンプン蓄積量の減少は、葉数の減少が主な原因であると考えられる。

Table 1 Effect of long-term exposure to acid fog and/or O_3 stress on the concentration of starch in roots, leaves, and winter buds and the number of leaves of beech saplings harvested in August 2008.

Treatment	Amount of starch (mg g^{-1} DL_W) Roots	Leaves	Winter buds	Number of leaves
AF_3	75.2±5.8	9.94±0.7	6.08±0.7	299±28
AF_5	101±11	14.1±0.9	7.02±0.7	402±39
AF_3+O_3	53.3±4.3	7.58±0.3	5.99±0.3	205±24
AF_5-O_3	88.4±10	12.1±0.3	6.71±0.6	321±32

Roots

ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			
AF_5	**	-		
AF_3+O_3	*	**	-	
AF_5-O_3	ns	*	**	-

Leaves

ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			
AF_5	**	-		
AF_3+O_3	ns	**	-	
AF_5-O_3	ns	ns	**	-

Winter buds

ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			
AF_5	ns	-		
AF_3+O_3	ns	ns	-	
AF_5-O_3	ns	ns	ns	-

Number of leaves

ANOVA	AF_3	AF_5	AF_3-O_3	AF_5-O_3
AF_3	-			
AF_5	**	-		
AF_3+O_3	*	**	-	
AF_5-O_3	ns	*	**	-

Data are presented as average values and standard errors (n=8).
*, significant at P<0.05; **, significant at P<0.01; ns, not significant.

2006年12月に各SAF処理区から全てのブナ苗木を収穫したところ、pH 3処理区の冬芽は対照区に比べほとんど生長しておらず、冬芽の数とその質量は、pH 5処理区に比べpH 3処理区で有意に減少していた (P< 0.05) (図15) 。また、2006年10月時点における総冬芽数に占める未展開冬芽数の割合を示したが、その割合はpH 3処理区で著しく高く (P< 0.01)、このことが葉数の減少の一因であると推測される。さらに、葉や枝、幹、根 といった各部位の乾物生長量を測定したところ、pH 5処理区に比してpH 3処理区で生長量の減少が観測され、 特に葉部や根部で有意に低下した (P < 0.05)。以上のような実験的研究により、丹沢山地で進行しているブナ林衰退の原因の一つとしての酸性霧の影響が明らかになった。しかしながら、丹沢山地では光化学オキシダントの主成分であるO_3の大気濃度も高く、衰退に関与している可能性が指摘されている[12]。現在、フィールドで観測される濃度レベルの酸性霧やO_3が樹木の衰退に関与している可能性を検討するには、ブナ苗木に対する長期間の曝露実験が不可欠であり、このような実験例はまだ報告されていない。そこで、2007年5月から2008年7月までブナ苗木に対して長期間の酸性霧とO_3の曝露実験を行い、生長および生理応答の評価を行った。

図16には総乾物生長量 (=冬芽重量+葉重量+枝重量 +幹重量+根重量)および地上部 (=冬芽重量+葉重量+枝重量 + 幹重量)と地下部重量 (根重量)の比 (Top-root ratio, T/R)を示した。酸性霧或いはO_3の影響によりT/Rは減少、すなわち根の生長が抑制されたが、その他の部位については酸性霧単独処理と酸性霧-O_3複合処理区間との間に有意な差は見られなかった。酸性霧やO_3の単独曝露による乾物生長量の低下はこれまでにも報告されているが[13, 14]、酸性霧とO_3の相加作用についても本実験で設定した条件下において確認された。

表1に各部位におけるデンプン含有量の測定結果を示す。植物体内に貯蔵されるデンプンは次年度の新芽の準備や葉のフラッシュの原動力となるばかりでなく、環境ストレスにより傷付いた箇所の修復に用いられるなど非常に重要な役割を果たす。酸性霧やO_3の曝露が招いた葉の減少により、植物体内のデンプン含有量は有意に減少した。特にpH 3 SAF-O_3 (AF3-O_3)処理区において相加効果が観測され、根や葉内のデンプン濃度は他処理区に比べ著しく減少していた。根部におけるデンプン蓄積量の測定は、植物全体の炭水化物含有量を予測する上でよい指標となることが知られており[15]、それ故に、根部のデンプン含有量の低下はブナ苗木の寿命を縮めることが予想される。

以上のように、フィールド観測および長期にわたる環境ストレス負荷実験により、酸性霧が森林樹木に及ぼす影響について総合的に明らかにされた。酸性霧ストレスを樹木に負荷することにより、水分ストレスや低温ストレスを招く可能性を示し、また、植物に有害な大気汚染ガスとして知られるO_3の感受性を高めていることが明らかとなった。さらに、大山で衰退が観測されるモミと観測されないスギとで樹種間の比較を行った結果、エピクチクラワックスやmCaレベルに著しい樹種間差異が見出された。

本研究の実施により、緒言で掲げた目的はほぼ達成したと考えられるが、今後はさらに、酸性霧の沈着がフィールドにどのように影響を及ぼしているか,丹沢山塊全体および日本全体に把握し、今後の対策を検討していく必要がある。

謝辞

以上、2008年度の研究成果を中心にこの共同研究で明らかになったことをまとめて示した。なお、この研究は当研究室構成員全員でサンプリングや分析を協力して行っており,この報告は2008年度の鴨原亜土君の博士論文と桜井　怜君の卒業論文を元にしている。また、採取やデータ取得に当たっては大山阿夫利神社や伊勢原市役所のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

4. 引用文献

(1) 井川　学、松本　潔、大河内　博、神奈川大学工学研究所報、31, 58-63 (2008).

(2) P.Albersheim, DJ.Nevins, PD.English, A.Karr, *Carbohydr. Res.,* 5, 340-345 (1967).

(3) N.Blumenkranzt, G.Asboe-Hansen, *Anal. Biochem.*, 54, 484-489 (1973).

(4) H.Sase, T.Takamatsu, T.Yoshida, *Can. J. For. Res.,* 28, 87-97 (1998).

(5) T.Ishii, T.Matsunaga, N.Hayashi, *Plant Physiol.,* 126, 1698-1705 (2001).

(6) M.Jiang, R.Jagels, *Tree Physiol.,* 19, 909- 916 (1999).

(7) M.Igawa, H.Kameda, F.Maruyama, H.Okochi, I.Otsuka, *Environ. Exp. Bot.,* 38, 155-163 (1997).

(8) GG.Parker, *Advances in Ecological Research,* 13, 57-133 (1983).

(9) H.Sase, Y.Takamatsu, T.Yoshida, K.Inubuki *Can J For Res* 1998; 28: 546-556.

(10) PG.Schaberg, DH.DeHayes, GJ.Hawley, PF.Murakami, GR.Strimbeck, SG.McNulty, *Can. J. For. Res.,* 32, 1351-1359 (2002).

(11) A.Peirs, N.Scheerlincl, AB.Perez, P.Jancsók, BM.Nicolaï. *Postharvest Biol. Technol.*, 26, 199-207 (2002).

(12) M.Takeda, K.Aihara, *J. Jpn. Soc. Air Pollut.*, 42, 107-117 (2007)[in Japanese].

(13) M.Igawa, T.Kase, K.Satake, H.Okochi, *Environ. Pollut.,* 119, 375-382 (2002).

(14) CP.Andersen, R.Wilson, M.Plocher, WE.Hogsett, *Tree Physiol.,* 17, 805-811 (1997).

(15) P.Ziegler, Advances in phloem transport and assimilate compartmentation, *Presses Academiques* (1991) p.196- 203.

出会い頭事故未然防止の研究

－交差点カーブミラー視認性評価と再設計マニュアル開発－

堀野　定雄*　　森　みどり**　　久保　登***　　北島　創****

Ergonomics study on prevention of crossing collisions at urban intersections

-Visibility evaluation and manual development of re-installing traffic convex mirrors-

Sadao HORINO*　Midori MORI**　Noboru KUBO***　Sou KITAJIMA****

１ はじめに

わが国では，以前より交通事故件数の 1/4 を出会い頭事故が占める状況が続いている．本研究室は神奈川県警の依頼で横浜市鶴見区の事故多発交差点でフィールド調査を行い，無信号交差点における出会い頭事故の要因が，一時不停止や安全不確認を生み出す「見えない交差点環境」にあることを見出した[1,2,3]

無信号交差点の左右の視界は，一般に道路隅部の建物などによって遮られている．このため，特に非優先道路から交差点に差し掛かった車両に対して，左右の視界を補助し，安全確認を円滑にするよう，反射鏡（以下カーブミラーと呼ぶ）が設置される場合がある[4,5]．上記フィールド調査では，このカーブミラーが映し出す鏡像の視認性の適否によって，出会い頭事故の発生に差があることがわかった．

本稿では，無信号交差点でのカーブミラー鏡像による補助視界に着目し，適切な補助視界が得られるようなカーブミラー設置条件を整理・評価し，このような条件を容易に実現できるようなカーブミラー設置・調整方法について検討を行った．また，これらの結果をもとに，カーブミラー設置作業に用いることができるような指針の策定も考慮した．

本稿は，2007・2008 年度にわたって研究助成を受けた，工学研究所共同研究の成果概要を報告するものである．研究方法・経過の詳細については，2007 年度共同研究中間報告(2008 年度工学研究所所報)[6]においても報告しており，あわせてご参照頂ければ幸甚である．

*准教授　情報システム創成学科
Associate Professor, Department of Information Systems Creation
**助手　情報システム創成学科
Research Associate, Department of Information Systems Creation
***客員研究員　工学研究所高安心超安全交通研究所
Guest Researcher, Research Institute for Well-informed and Risk-free Transportation (KU-WIRF)
****特別研究員　工学研究所高安心超安全交通研究所
Research Fellow, Research Institute for Well-informed and Risk-free Transportation (KU-WIRF)

２．研究目的

全国に 224 万本以上設置されている（2009-7）カーブミラーは視認性に問題があるものが少なくない．本研究は，これらのカーブミラー設置の適否を容易に総点検できるような手法の開発，および新設・改修工事に際して，現場での設置・調整方法を標準化・簡易化することを目的とした．また同時に，3 次元コンピュータグラフィックス(CG) を活用したシミュレーション手法を開発し，カーブミラーの視認性評価方法と適切な補助視界を得るために有効な設置基準を明らかにして，カーブミラー再設計・調整の指針を道路管理者に提案する事も企画した．

３．研究方法

筆者らが提案する，カーブミラー視認性の人間工学 3 原則(図 1)[1,2,3]を満たすミラーの設置条件(位置・角度)を迅速かつ正確に測定し調整する方法について，特に実際の交差点で最小限の交通阻害で安全円滑に実施できることを前提条件とし，フィールド研究および 3 次元 CG ソフトウェアを用いたシミュレーション研究を併用した実証的な研究開発を試みた．

研究に際しては，必要に応じて，国土交通省道路局，横浜市鶴見・港南土木事務所，(社)全国道路標識標示業協会，警察庁，神奈川県警など，関係行政機関のご協力を得た．

3.1　カーブミラー視認性評価のフィールド実証実験

（財）日本自動車研究所(JARI) 模擬市街路実験施設および同研究所城里屋外実験施設(テストコース)で，ミラーの設置位置・角度(水平角・俯角)と視認距離の関係を測定す

るため，以下の実験を行った(図 2, 図 3)．

(1)カーブミラーによる接近車両の視認距離測定

高齢者 3 名・非高齢者 3 名を被験者とした，乗用車・50cc 原付バイクの視認距離実測に基づき，ミラーの直径・曲率と視界の有効性を検討した．

(2)カーブミラー設置条件(許容範囲)の測定と評価

乗用車/小型トラック運転者視点から，ミラーで視認できる車両の視距離かつ衝突回避可能な安全視距離を満たす条件(設置位置・角度)を測定，整理した．最終的に，直接視界/ミラー間接視界の連続性確保(隅切り・妨害物効果)の視点から，ミラー設置条件を基準化する．

(3)カーブミラー位置決め・調整方法の開発と評価

実路・テストコースなどで視環境の適否を検討するため，可搬型組立式ミラーやミラー位置決め用マーカーランプなどを製作し，実用性を確認した後，これらの実験装置・器具を用いた視認性実験を実施した．ミラー設置条件を道路における設置位置・角度(水平角・俯角)条件で表すこととし，設置角度測定法を開発し，精度・効率を実験的に評価した．

3.2　3 次元 CG ソフトウェアを用いたカーブミラー設置シミュレーション

高速画像処理コンピュータを駆使し，3 次元 CG ソフトウェアを用いたシミュレーション手法を実践的に開発した．シミュレーションの再現性を検証後，典型的な交差点環境におけるミラー設置条件をシミュレーションし，ミラー視認性評価，調整手順の標準化・簡易化に資する．

4．研究成果

4.1　カーブミラー視認性評価のフィールド実証実験

実際の交差点環境を模擬した実験路等において，以下の項目を確認，観察した(JARI つくば模擬市街路：2007-8, JARI 城里屋外実験場：2007-12, 2008-3, 神奈川大学体育館：2008-2)．

4.1.1 カーブミラーの大きさ・曲率と接近車両の視認性

ミラーの大きさ・曲率（①直径 600mmφ：曲率半径 2200mm，ステンレス製、②800mmφ：曲率半径 3000mm，ガラス製)と接近車両(①乗用車セダン、②原付バイク)のミラーによる視認距離の関係を測定する実車走行実験を行った．被験者 6 名対象に，交差路右方の交差点境界線より 200m 遠方から 0m 地点まで車両を低速走行させ，交差点左方コーナーに交互に設置した 2 種類のカーブミラーによる見え方(視認距離)を比較測定した(図 2，図 3)．

視認距離実測値と安全視距離(理論値)に基づき，ミラー視界(見え方・視認距離)の有効性・妥当性を検討した．対象が乗用車の場合，大型ミラー（800mmφ)での視認距離は平均

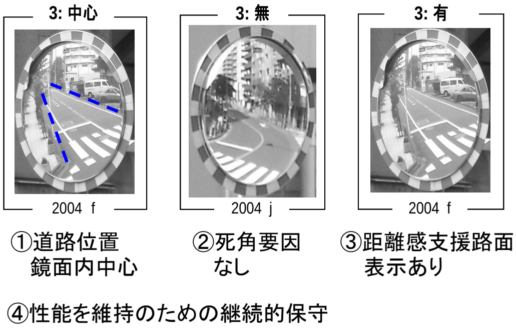


図１　カーブミラーの人間工学設置基準

図２　カーブミラー視認性評価実証実験の状況
(JARI 模擬市街路施設)

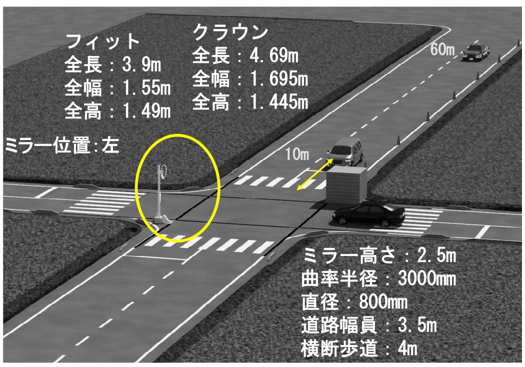


図３　3 次元 CG シミュレーション結果
[事例 1]カーブミラー視認性実証実験の再現
(JARI 模擬市街路施設)

86m，レンジ（66, 101 m）に対し，小型ミラー(600mm$^{\varphi}$)は 58m（49, 70 m）と縮小した．原付バイクの場合，大型ミラーでの視認距離は 50m（40, 56m），小型ミラーでの視認距離は 39m（30, 55m）であった．ミラーの大きさ・曲率や車両の種類による視認距離など大まかな傾向が確認でき，ミラーを介して接近車両を安全に発見する有効性・妥当性が予備的に検討できた．

ミラーの主要な素材としては，ガラス，ステンレス，メタクリル樹脂，ポリカーボネート樹脂があり，各々反射率などの特性が異なる[(4)(5)]．ミラーの大きさ・曲率や車両の要因に加えて，ミラー材質，実験条件・手順，被験者属性など諸要因の効果を実証すること，実際の交通場面での視認性の推定と安全視距離確保の検討等が今後の課題と確認できた．継続研究として，ミラー視認距離測定実験を実施し検討する予定である．

4.1.2 カーブミラー設置条件(許容範囲)の測定・評価

交差点の左・中央・右の 3 箇所に設置したカーブミラーで, 安全視距離を確保できる条件として, 右方の遠点(境界線から 60m)と近点(0m)の車を同時に映す角度を乗用車およびトラックの運転者視点から測定し，ミラー鏡像を写真記録した. その結果, 上記の条件を満たす範囲は, 左では水平角 43-46°，俯角 4-9°，中央で水平角 33-36°，俯角 6-9°，右で水平角 21°，俯角 10°程度で，調整可能な水平角・俯角の許容範囲は狭いことが実証された(図 4).

4.1.3 カーブミラー設置位置検討・調整方法の開発と評価：可搬型・組立式カーブミラー

実路・テストコースなどで視環境の適否を検討するため，新たに可搬型組立式カーブミラーや位置決め用マーカーランプなどの実験装置・器具を製作した.

<u>(1)組立式カーブミラー(1 号機)の試作と実用性評価</u>

普通乗用車で簡易に搬送でき，実際のカーブミラー（800mm$^{\varphi}$および 600mm$^{\varphi}$）を設置できる実験用の組立式ミラー(1 号機)を, 市販のアルミ製伸縮式脚立と特注のアルミ製支柱を使用して製作した．屋外組立試験・テストコース実験により，学生４人程度の協同作業で短時間での組立・分解が可能であること，安定性・強度など実用上の問題がないことを確認した.

<u>(2)水平角調整式カーブミラー (2 号機)の試作と機能評価</u>

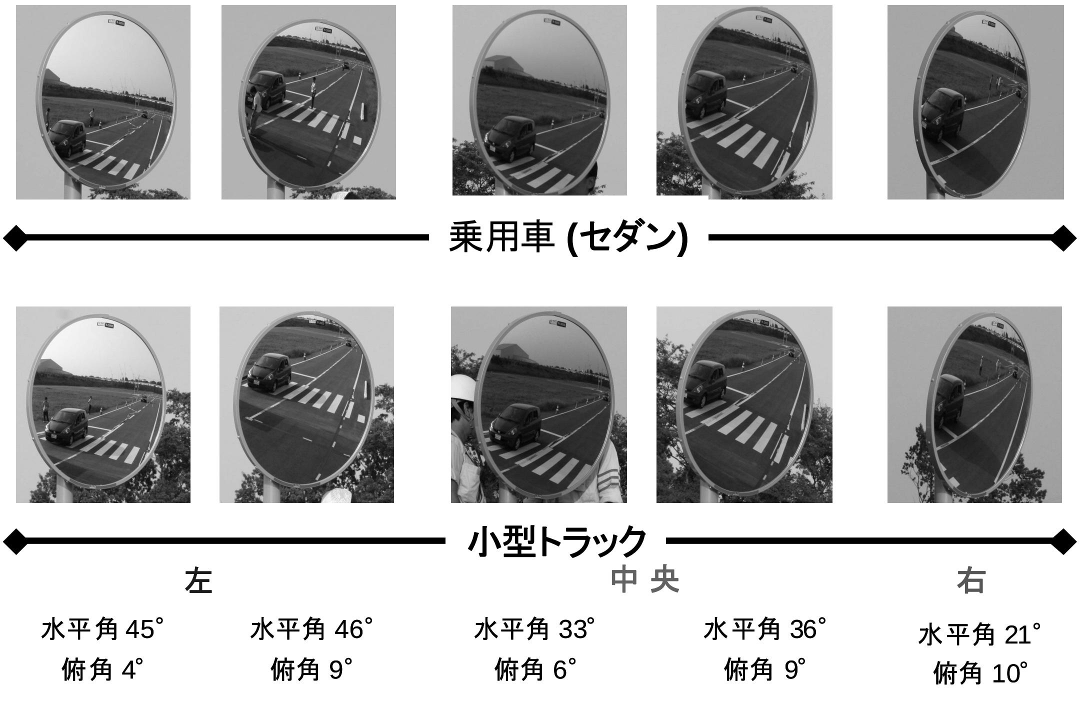


図４　カーブミラーの視認性評価実験：設置条件(位置・角度)の検討
(乗用車とトラック運転者視点の比較)

ミラーの水平角を調整できる実験用カーブミラーとして，アルミ製の筒状ポール 2 本をつなぎ，水平角 1 度刻みの目盛りを付けて＋（時計回り），－（反時計回り）方向に微調整が出来る構造の 2 号機を設計・製作した．本ミラーの組立をテストコースで行い，構想どおりに容易に組み立て，角度が変化できることを確認した. 1 号機・2 号機を利用して，実際のミラーと同様の鏡像をフィールドで容易に得られることを確認，いつ，どこでも簡便にミラー実証実験を実施する手法を整えることができた.

4.1.4 カーブミラー設置位置検討・調整方法の開発と評価：カーブミラー位置決め用マーカーランプ

工事現場を想定して工事中の交通阻害を最少化し，ミラーが確保すべき見通し距離を検証するため，実際の車両を使用せず，高輝度マーカーランプで道路上の交差車両を代替する手法を開発した．ミラー位置決め・調整時の視界確認方法として，視界限界となる遠・近距離２点を特定するため，ミラー反射で視認可能な高輝度光源を市販品から選定あるいは自作し，視認性・実用性を実験的に評価した.

(1)ミラー位置決め用マーカーランプの視認性評価

マーカーランプの候補として，高輝度光源４種類各２色計７種類の，①TV 局照明用 LED ランプ（DC12V LED1.2w[A1 白･A2 黄]），②100V 用白熱灯（100W ハロゲンランプ）[B1 白]），③回転灯（パトライト）35w[C1 黄･C2 青]，④反射鏡つき LED ランプ 3LED 直列型 DC12V, 3w[D1 白･D2 緑]を用意し，テストコースの交差道路中央線の高さ１m に設置し，被験者７名を対象に視認距離を測定，各ランプが直接目視およびカーブミラー鏡像内で確認できる距離を測定した．各ランプを連続光，点滅光の２モードで実験した結果，視認距離が最長だった光源は回転灯（C1 黄色），反射鏡つき 3LED 直列型（D1 白・D2 緑）の 3 種類で，境界線から 150m の位置で点滅させても全員が見えた．全ての光源が，最短でも 90m 以上視認可能で実用上問題はなかった．電源確保などの使いやすさ，コスト面を考慮すると，今回自作した反射鏡つき 3LED 直列型が最適であった.

(2)ミラー位置決め用マーカーランプの輝度測定

神奈川大学体育館内で，(1)の実験で視認性の高かった回転灯，反射鏡つき LED ランプ，100V 用白熱灯について，70m の距離から直接およびカーブミラー（600mm$^{\varphi}$, 800mm$^{\varphi}$）鏡像内における輝度を測定した．輝度については，カーブミラー反射により，ガラス製 800mm$^{\varphi}$ では平均 22%，レンジ（8%，73%），ステンレス製 600mm$^{\varphi}$ では平均 15%，レンジ（7%，51%）に減衰した．これは、ミラーは反射光全てを反射せず一部吸収するが、その度合いは素材によってばらつくことを示している。また，光源の種類によって減衰程度にばらつきがあり，実際の交差点ミラーに当てはめると，接近車両が発する光の種類で視認距離が左右されることを示唆している.

4.1.5 可搬型カーブミラー・位置決め用マーカーランプを用いたカーブミラー視認性評価実験

(1)カーブミラーの設置角度の簡便で正確な測定法

ミラー設置角度（水平角・俯角）は，ミラーの光軸（カーブミラー中心の接平面における法線）を求めることで測定できる. 光軸は，光軸上の観測者が鏡面中心に映る，あるいは鏡面中心の像をなす物体とその観測者を結ぶ線分は光軸と交わることを利用して求めることができ，テストコースにおいて確認した. 鏡面中心は、ミラー直径方向に張ったゴム紐２本の交点で特定し、マーキングした.

(2)カーブミラー設置角度による鏡像範囲の変化

ミラー鏡面に映し出すべき路面領域は，ミラー設置角度（水平角・俯角）のわずかな変化で大きく変化する. このため，ミラー設置角度を少しずつ変化させ，鏡像に映る領域がどのように変化するかをテストコースで観察した. その結果，適切な鏡像を得られる範囲は，水平角・俯角の双方とも数度以内であることがわかった.

今後は，ミラー設置角度（水平角・俯角）や光軸角度を簡便かつ高精度に測定する方法の検討が必要である.

4.2 3 次元 CG ソフトウェアを用いたカーブミラー設置シミュレーション

テストコース・実路を対象に，3 次元 CG ソフトウェアを用いたシミュレーション環境・手法を開発した．交差点に設置されたカーブミラー反射像を，実際の道路交通状況に合わせて再現できるシミュレーターを構築し，カーブミラー視認性評価・調整手順の確立を図った.

4.2.1 [事例 1] カーブミラー視認性評価実験状況と実験用カーブミラー視界の再現：模擬市街路実験施設

第１段階として， JARI 模擬市街路実験施設で実施した，カーブミラー視認性評価実験の実験状況と実験用カーブミラー視界の再現を行った．CG ソフトウェアとして，モデリング・レンダリング等の手法が多様で高速処理が可能，比較的安価で汎用性が高いことから，「Shade 9」を選定した.

開発したシミュレーションツールに実験状況（道路形状・諸元，車両・ミラー・路面表示・実験設備の位置・距離・寸法等）を入力し，実データの再現性を検証した

結果，これらの条件をほぼ正確に再現でき（図 2，図 3），実用性があることが実証できた．

図 5 は，交差点右に設置し，ミラー視認性 3 基準を満たすよう右方視界を写した実験用カーブミラー視界（左）とシミュレーションしたカーブミラー視界（右）の一例で，鏡像の形状・大きさや見え方の細部に若干の相違が見られるものの，道路・路面表示・車両等の位置・距離はどの事例でもほぼ一致した．

図 5　[事例 1] カーブミラー鏡像の再現
左：実際，右：シミュレーション
車の位置，大きさが一致している．

4.2.2 [事例 2] カーブミラー設置交差点におけるミラー鏡像シミュレーション：横浜市鶴見区芦穂崎交差点

人間工学研究室では，2004 年より，横浜市鶴見区芦穂崎地区の市街地交差点でミラー設置状況および改善提案の実施状況をフィールド調査し，改善効果を検討してきた[(1)(2)(3)(7)]．横浜市道路局鶴見土木事務所は，芦穂崎交差点に設置した死角のあるミラーに対して，電柱による死角が道路を遮蔽しないようにミラー取付方法を微調整（支柱からアームを延長）し実質的に死角を解消する改善を実施した（2007-7，図 6）[(7)]．この改善効果を確認するフォローアップ調査を行い，事例 2 として開発した 3 次元 CG シミュレーションを適用，この交差点の視環境と改善後のミラー設置状況を模擬し，鏡面内実鏡像と視界や死角発生状況の再現性･一致度が高い事を確認した．

以上，3 次元 CG シミュレーション法を活用し，既設ミラーの点検・補修工事の計画段階で，ローコストで点検・改修効果を詳細に検討することが可能になった．

図 6　カーブミラー視認性の改善
（横浜市鶴見区芦穂崎交差点，　2007-7 補修）
死角は残るが、道路を遮蔽していない

4.2.3 [事例 3] カーブミラー未設置交差点におけるミラー設置シミュレーション：横浜市港南区日野交差点

事例 3 として，横浜市港南区の住民が危険性を認識しているミラー未設置の十字路無信号交差点で，3 次元 CG シミュレーションを実施した．すなわち，交差点環境を再現し（図 7，図 8），各方向の乗用車運転者視点から，直接視界と視認性が最大となるミラー設置案（交差道路の目視距離最大、死角なし）を検証した．また，可搬型組立式ミラー（800mmφ）を現場に設置してシミュレーション案を再現し，鏡面内実鏡像との整合性を確認した[(8)]．

<u>(1) ミラー設置最適解シミュレーションおよびフィールド実験</u>

4 方向各々の乗用車 EP（運転者視点）からミラー視認性が最大となる最適設置案をシミュレーションした．例えば，③車ミラー視界では，交差点中心から C 方向 70m，D 方向 50m 程度の視認距離を確保できた．実験用ミラーを用いたフィールド実験でこの案を再現したところ、視認距離･死角発生状況を含め，鏡面内実鏡像との一致度は高い事を確認できた（図 9）．

<u>(2) ミラー角度微調整と鏡像の変化</u>

コーナーAD 設置ミラーの水平角を 1°調整すると、鏡面内車両②の後方視認距離は約 10m 変動することが実証できた（図 10）．同様の傾向は俯角でもみられ，俯角･水平角の微調整は、適切なミラー視界の確保上重要な要

因であるとわかった.

以上，3 次元 CG シミュレーション法の活用により，ミラー未設置交差点においてミラー新設後の鏡像の状況を模擬し，設置案の適否を詳細に検討することで，安全視認距離確保、交差車両の早期発見が実現，フィージビリティの高いミラー設置最適解を導くことが可能になる.

4.3　カーブミラー設置，調整用マニュアル開発

カーブミラー設置・改修計画段階で利用できる資料作成の第 1 段階として，複数の交差点環境でカーブミラー視認性基準を満たす一定の設置位置・角度条件(許容範囲)を整理し基準化を進めた. 一方，現場で短時間に調整出来るカーブミラー位置決め，設置角度測定・調整簡便法と標準化手順を開発・検討し，マニュアルの骨子の整備を進めた.

図 7　[事例 3] カーブミラー未設置交差点における ミラー設置シミュレーション
横浜市**港南区日野交差点の視環境**：
③→①　優先側(坂下) の交差点視界

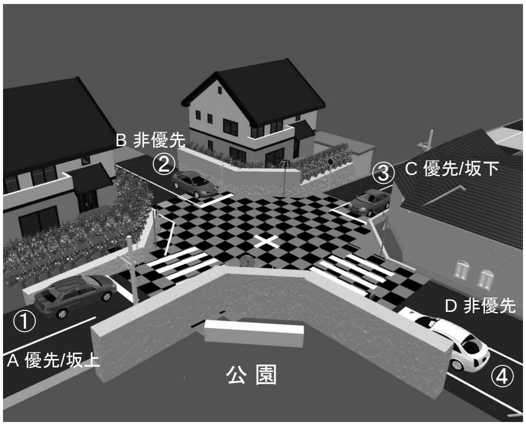


図 8　[事例 3] カーブミラー未設置交差点における ミラー設置シミュレーション
横浜市港南区日野交差点の再現

5. まとめ

本研究では，カーブミラー総点検および新設・改修工事に利用できるミラー設置・調整の標準的簡便法を提案するために，(1)交差点視環境の定量評価，(2)視環境検討用の可搬型組立式カーブミラー・位置決め用マーカーランプなどの開発，(3)これらの実験装置・器具を用いたミラー視認性評価フィールド実験，(4)コンピュータ上でミラー視界を含む視環境を再現する 3 次元CG ソフトウェアを用いたシミュレーターの開発，(5)開発したシミュレーターによる最適な視環境やミラー設置位置の検討，などを実施してきた.

この結果，これまでのカーブミラー設置・調整法は現場適用が容易な基礎的方法論が不足し現場作業は感覚と経験に多く依存していること，不良な交差点視環境の原因が種々の視覚的障害物や不適切に設置したミラー等にあること，ミラーにより良好な補助視界を得るための調整範囲（位置・角度）は予想外に狭いこと，鏡像内に映る接近車両の視認距離がミラーの大きさ等によって変化すること，などが明らかになった.

また，現場での設置・調整方法の標準化・簡易化以前に，一定の視界・視認性を確保するカーブミラーの設置条件を検討する基礎的データベース，特に良好な補助視界を得るために有効な交差点ミラーの指針が土木工学分野の産官学いずれにおいても存在しないことも明らかになった. この事実を関係諸機関に指摘した結果，現在は国・県レベルで現状改善の真剣な動きが起こっている.

以上，これまでの研究成果として，カーブミラーの視認性評価方法と適切な補助視界を得るために有効な設置基準，カーブミラー再設計・調整の指針を抽出する第 1 段階として，研究方法論と基礎的知見が整備できた. 今後は，これらの成果を活かし，カーブミラー視認性評価実験およびカーブミラー視認性シミュレーションを系統的に展開していく予定である.

カーブミラーによる間接視界の改善は，既設ミラーについては角度の調整，新設ミラーについては適切な設置位置・角度の決定で十分であるため，基本的にローコストで実現できる. 今後は，本研究内容を理解し，協力体制を取りつつある国・県レベルの行政組織に働きかけて，カーブミラー視環境改善を全国展開することにより，カーブミラーの間接視界不良による出会い頭事故の低減を図りたい.

謝　辞

本研究を進めるに当たり，人間工学研究室所属の卒業研究生であった，猪股裕二，笹山博樹，廣田祐子，杉山

洋紀，小野雅史，福永佳洋，渡邉修平の各氏にフィールド調査，3 次元 CG シミュレーションなど熱心な協力を得た．さらに，行政として国土交通省道路局地方道・環境課，関東地方整備局，神奈川県警，横浜市道路局，同鶴見土木事務所，同港南土木事務所、川崎市道路整備課など交通管理・道路管理関係各氏，（社）全国道路標識標示業協会関係各氏，産業界として道路反射鏡協会関係各氏, 学術研究者として（財）日本自動車研究所安全研究部, 予防安全部, 研究管理部関係各氏，（独）国土技術政策総合研究所土木工学研究者各氏、更に地域住民として、横浜市港南区日野住宅地自治会長以下会員各氏に多大の助言やご協力を得た．心からの謝意を表すものである．

参考文献

(1) M. Mori, S. Horino, S. Kitajima, M. Ueyama, T. Ebara, T. Itani, “Ergonomics solution for crossing collisions based on a field assessment of the visual environment at urban intersections in Japan”, Applied Ergonomics 39, (2008-8) , pp. 697-709.

(2) M. Mori, S. Horino, Y. Inomata, H. Sasayama, Y. Hirota, “Low-cost and low-technology oriented improvement of visual environment at intersections by ergonomic installation of traffic convex mirrors for preventive safety against crossing collisions”, Proceedings of the 10th Korea-Japan Joint Symposium on Ergonomics, CD-ROM, (2007-5).

(3) 堀野定雄，森みどり，猪股裕二，笹山博樹，廣田祐子，“カーブミラー視認性改善と出会い頭事故削減ー横浜市内生活道路広域交差点でのフィールド調査ー」日本人間工学会誌第 43 巻特別号，(2007-6)，pp. 62-63.

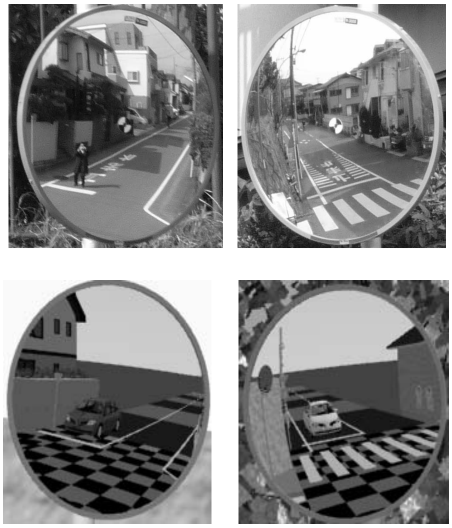
(4) (社)日本道路協会，“道路反射鏡設置指針”，丸善出版，（1980）.

(5) 国土交通省道路局監修, (社)全国道路標識標示業協会編, “道路反射鏡ハンドブック”, (社)全国道路標識表示業協会，（2001）.

(6)堀野定雄，森みどり，久保登，北島創，平成 19 年度神奈川大学工学研究所共同研究中間報告“出会い頭事故未然防止の研究ー交差点カーブミラー視認性評価と再設計マニュアル開発ー”，神奈川大学工学研究所所報，第 31 巻，(2008-11)，pp.78-84.

(7) M. Mori, S. Horino, N. Kubo, S. Kitajima, “Ergonomics proposal for visibility requirements at urban intersections in Japan for preventing frequent crossing collisions”, Proceedings of the Applied Human Factors and Ergonomics 2nd International Conference, CD-ROM (2008-7).

(8)森みどり，堀野定雄，久保登，福永佳洋，渡邉修平，



左：コーナーAD　　右：コーナーAC

図 9　[事例 3] カーブミラー未設置交差点における
ミラー設置シミュレーション
横浜市港南区日野交差点：
③車からみたミラー設置最適解
（上：フィールド実験、下：シミュレーション）

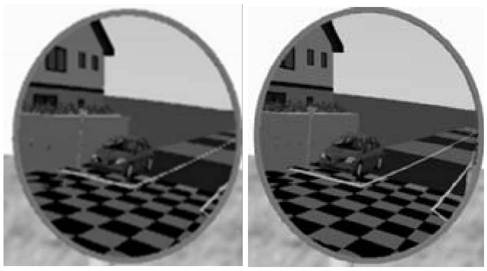


図 10　[事例 3] カーブミラー未設置交差点における
ミラー設置シミュレーション
横浜市港南区日野交差点：
③車→②方向　ミラー設置案の検討
ミラー水平角と②車後方視認距離の変化
(左：−42°/ 約 60m、右：−43°/ 70m 以上)
設置最適解
[俯角：7°(左右共通)、白黒マーク各 10m]

“市街地無信号交差点における視環境評価と出会い頭事故防止”，日本人間工学会誌第 45 巻特別号，(2009-6) ，pp.286-287.

計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発

山家　京子*　荏本　孝久*　曽我部昌史*
山本　俊雄**　佐々木一晋***　飯澤　清典****

Spatial Information Visualization System with for Planning Support

Kyoko YAMAGA*　Takahisa ENOMOTO*　Masashi SOGABE*
Toshio YAMAMOTO**　Isshin SASAKI***　Kiyonori IISAWA****

1. はじめに

物理データやシミュレーション結果から得られた数字や文字列で構成された無機質で大規模な情報群を理解するためにさまざまな視覚化手法が開発されてきた. 近年, 地理情報システム（Geographic Information System）の普及により, 誰もが大量な空間情報（空間の位置データと属性データを合わせもつデータ形式）をコンピュータで扱うことが可能になってきている. 主に, GISの1つの入力ツールとしてGPS(Global Positioning System)機能が付属した小型コンピュータやGoogleMapにみられる位置情報の検索サービスが進展することによって, 大量な空間情報を個別に俯瞰できようになってきている.こうした状況下において, 空間情報の活用の場が単なる1ユーザーに限定したものではなく, 地域に根ざしたコミュニティの内縁で共有される有用な情報として積極的に活用されていくことが期待されている. 地方公共団体や研究機関を通じて整備された空間情報を傍観するだけではなく， 地域住民と一緒に地域固有の空間情報を画策していくことによって応用的理解を手助けできるような開示的なプロセスおよび視覚的で分かりやすい表現技法が望まれている.

著者らは, 2007年度から神奈川県域を対象としてGISシステムを活用して地盤関連情報のデータベース化作業を進めてきた. これらのデータを利用して市町村単位で細密な3次元的地盤構造モデル（市町村単位）を作成し, 震源断層モデルにより生成される地震波の波動伝播特性を簡単な差分法によるシミュレーションを用いて実施することにより, これまで不可能であった細密な地震予測が可能となり, 地域の地震防災活動に有益な情報を提供することが可能となっている. また, 2008年度からは横浜市神奈川区と鎌倉市O地区を対象として防災に関連した空間情報の整備・検証を進め, 横須賀市S地区・I地区の郊外住宅地を対象として日常生活の行動域の空間情報化の作業を進めてきた.

以下, 3つのケーススタディを通じて, 地域コミュニティにおいて共有化され得る地域固有の空間情報の可能性を探ると共に, 空間情報視覚化手法の開発経過の報告を行う.

2. 空間情報視覚化のケーススタディ

ｉ）地域防災力の総合的可視化

横浜市神奈川区を対象として区内全自治会町内会へ配布した防災活動・意識に関連するアンケートの集計結果の指標化を進め, GISデータに基づく地震災害危険度と併せて災害に対する地域防災力の総合的評価の視覚化を行った.

ｉｉ）避難経路情報の可視化

鎌倉市0地区全域を対象として, 災害時に想定される移動経路の困難度を経路ネットワークの重み付けとして設定することにより避難経路網の可視化を行った. 本年度末に予定している住民参加型ワークショップにおいて, 0地区の各自治会から回収した現地特性に基づく避難経路情報と避難経路全域のシミュレーション結果の検証作

＊教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture
＊＊助手 建築学科, ＊＊＊特別助手 建築学科
Research Associate, Dept. of Architecture
＊＊＊＊株式会社パスコ
PASCO corporation

業を進める予定である.

iii）郊外住宅地における生活行動域パターンの可視化

横須賀市S地区・I地区の郊外住宅地を対象として「生活支援施設と住民意識に関するアンケート調査」を行い，日常生活の行動域パターンと生活支援施設の分布域の視覚化作業を通じて少子高齢化が進む郊外住宅地居住の現況を明らかにすることを目的とする.

3. 空間情報視覚化システム

3-1. 空間情報視覚化の現状

はじめに空間情報の視覚化手法の現状把握，および防災に関連した空間情報視覚化の既往研究の概観を行った.空間情報視覚化システムは地図のデジタル化による共有管理機能の向上，およびデータベース化への実利性から，社会的需要を受けて災害対策に関連した研究事例が数多く報告されている．そのため，今後の表現手法を検討していく上で，「どのようなプロセスを経て空間情報が可視化されているのか」，あるいは「空間情報がどのようにして地域住民に還元されているのか」，現状と課題の整理を行った.

3-2. 防災に関連した空間情報視覚化の現状・課題

阪神・淡路大震災や新潟中越大地震の経験以降，「潜在的な防災力」として地域に根ざしたコミュニティの重要性が再認識され，これらコミュニティ同士の連携的な防災活動を支援する仕組みが求められている．一方で，近年地図は進展し，地域の災害危険度がハザードマップとして広く一般に普及するようになった．しかし，これらの危険度情報は，地域全体の危険度が漠然と表現されたものに過ぎず，前述した現状において，日常生活レベルでの具体的な防災活動を支援する表現としてふさわしいものとは言い難い.

日本建築学会学術講演梗概集（F：都市計画）の 2001 年から 2008 年に掲載された防災に関する研究事例の収集を進め，その中から空間情報化の目的が明確に読み取れる60の表現を対象に，基本情報として以下の項目について調査を行った. 表現の［目的］，表現内容を示す［コンテンツ］，対象とした地域の［スケール］，表現された空間情報を閲覧・使用する［使用主体］，最終的な表現方法としての［アウトプット（媒体，表現）］，住民との［インタラクションの有無］，さらに研究概要，表現イメージを加え，これらをデータシート（図1）にまとめた. 以下，表1に調査結果の要旨を項目別に示す.

住民との［インタラクション］の有無にみられる表現と住民との関係から，表現の目的は従来のような作成者側からの一方的な情報提供から，住民の主体的な関与を促す方向へと変わりつつあることが伺える. 一方で地域の危険度を評価・分析した表現では，その評価内容が災害そのものの危険度や避難所配置等，災害へのハード面における対応であることが多く，地域の防災活動やコミュニティのつながりといった災害に対する主体（住民）側の能動的な活動を評価し，表現したものは見られない.［意識啓発］や［活動支援］を目的にした表現はインタラクションに富んだものになる傾向が強い．しかしながら，ここでのインタラクションとは数値入力等，個人単位での入力作業のプロセスが結果的に自治会内における

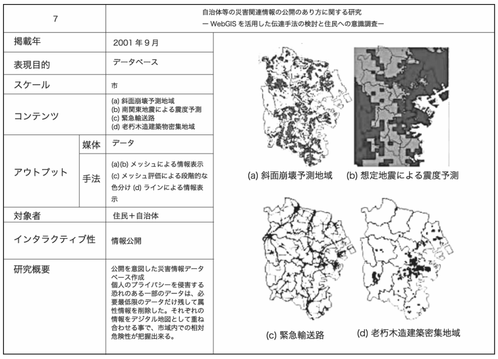


図1　データシート

表現目的	その表現が担う具体的な防災行為の段階に応じて、「情報の記述」、「評価・分析による危険地域の抽出」、「意識啓発」、「活動支援」に分類できる。
コンテンツ	住民を使用主体とした表現では災害時の危険箇所や利用箇所の記述や意識啓発を目的とした災害危険度評価が多く、地域の防災力を評価したものはみられない。
スケール	「ミクロスケール（自治会範囲などの生活圏）」、「メソスケール（学校区・広域避難場所区域など）」、「マクロスケール（市・区）」の３段階に分類でき、アウトプットの媒体が紙でないものの中には、あらかじめ３段階に対応したものも見られた。
使用主体	住民や住民を含む「住民＋α」、自治体や消防署等の「公共機関」、「研究者・専門家」、「その他（不特定多数など）」に分類でき、ここで言う住民とは、自治会役員または自主防災組織のリーダーレベルの人種を指していることが多い。
アウトプット	住民を対象とした表現では、紙を媒体にした災害時の危険・利用箇所のアイコン表記が主流である。また、評価・分析内容を表現したものは、町丁目・街区単位やメッシュ等による段階的な色分け表示が多く、評価指標に統計資料を用いたものでは町丁目単位での表現が目立つ。
インタラクション	WebGIS を用いた防災マップ作成支援では、ネット環境において住民がいつでも情報を更新・閲覧・検索・印刷することができ、さらに災害時には、自治体との協働による被災情報や避難者情報の収集システムとしての運用を試作している。その他、情報入力による各種シミュレーションや災害図上訓練（DIG）、シミュレーション結果を用いたゲームなどがある。

表1　防災空間情報の表現方法調査項目

活動を支援しているのが現状であり，自治会内の作業や合意形成を直接支援するものや，自治会間の連携等を促すものは見られなかった.

以上の考察を踏まえ，地域住民および地方自治体の協力の下で対象地域に相応する空間情報の検討を行ってきた. 以下の 3 地区におけるケーススタディの経過報告を示す.

4. ケーススタディⅠ

4-1. 地域防災力の総合的視覚化

横浜市神奈川区では，武石によってハードの観点から，地震災害危険度評価が行われ，地域によって危険度に差があることが明らかにした１）. ここでは，アンケート調査から，災害に対する地域の防災力を指標化し，ソフトの観点から評価を行い，さらにハード・ソフト 2 つの評価を重ね合わせた総合的な視覚化を行った.

4-2. 地域防災に関する意識調査

神奈川区連合町内会のご協力の下，区内全自治会町内会１８６団体を対象に，郵送によるアンケート調査を実施した*１. 調査の概要は表２に示し，結果については，地域防災力評価項目に係る内容について，その要点を表３に示す.

4-3. 地域防災力の評価

⑴ 地域防災力の定義

地域防災力の定義は様々である. しかし，現時点で地域がどのような被害を受け，それに対してどの程度の「備え」ができているかを知ることは，具体的な対策へ向けての判断基準となり，さらには地域内での継続的な防災活動につながると考えられる. 本研究では，既往研究２）と総務省消防庁が示す地域防災力評価指標３）を参考に，「基礎的活動力（潜在的な防災力）」，「災害対応力（実践的な防災力）」，「危険度想定力（意識的な防災力）」，「総合地域防災力」の４つの地域防災力を設定した. 評価項目には，アンケート調査結果を基に，地域住民の活動実態に加え，災害に対する認識や災害との関わり方といった住民の主観的な地域事情を取り込んでいる.

⑵ 地域防災力評価マップの作成

GIS を利用して地域防災力を概観する. まず，自治会ごとの傾向を明確にするため，神奈川区を自治会区域に区切り，区域ごとに評価項目の情報入力を行った. 次に各評価項目の値を５段階に分類し，その各評価点を乗算，引算することで地域防災力評価を行う. 表４に評価項目を示し，表５に各評価項目の算出方法を示す.

⑶ 地域防災力評価の結果

「基礎的活動力」では，六角橋地区，松見地区，菅田地区を中心に高い活動力を示し，三枚地区，白幡地区，青木第一・第二地区周辺では活動力が低い. 「災害対応力」では，六角橋周辺と三枚地区で比較的安定した対応力を示し，羽沢・菅田地区，白幡地区では自治会によって対応力の差が顕著に現れた. 「危険度想定力」では，菅田地区，六角橋地区周辺がまとまって高い想定力を示し，白幡地区，新子安地区，青木第一・第二地区では想定力の低さが伺えた. 「総合地域防災力」では，３つの評価において，安定して高い値を示していた六角橋地区を中心に高い防災力を示し，また菅田地区，松見地区周辺でも防災力の高さが伺えた. 一方で青木第一・第二地区，新子安地区周辺，白幡地区東部で低い値を示した. 全体として，基礎的活動力が示す傾向と総合地域防災力との傾向には類似性が見られ，コミュニティにおける日常の活動や人々のつながりが防災力に影響しているといえる.

調査期間	2008 年 7 月 25 日から 8 月 8 日
配布数	186 票
回収総数	73 票
回収率	39.2%
設問項目	質問１．防災活動について
	質問２．防災マップについて
	質問３．災害に対する地域の安全性や防災への関心度について
	質問４．自治会町内会における通常の活動について

表２　調査概要

防災活動内容	重視して取り組んでいる防災対策は、「防災訓練」、「近隣町内会との連携」、「非常用物資・食料の備蓄」である。
防災訓練	平均年間実施回数は「２回」であり、参加率は「20%前後」と回答した団体が６割であった。訓練内容では、７割以上の団体が「消火訓練」「避難訓練」を行っており、平均訓練内容数は３である。
連携団体	訓練を含め連携して防災対策を行っている団体は、「他町内会」、「消防団」、「学校」が挙げられ、連携団体数の平均は２である。また、交流のある町内会では「地区連合町内会」の回答が目立った。
資機材保有数	保有数が多いほど、用途（救出、消火、避難生活）に関係なく充実しており、平均保有数は 11 であった。
防災関心度	「関心が高い」と認識している団体は 24% であり、関心度が高い団体ほど防災活動実施数が多い。
想定災害	危険だと認識している想定災害では、「木造出火」、「木造倒壊」、「弱者の避難」が上位に挙げられ、平均想定災害数は 4.6 である。
通常活動内容	平均活動実施数は 11.3 であり、活動数が多い団体ほど地域全体の親睦を向上させる活動が多い。
活発度	４割の団体が、地域の活動は「活発である」と認識している。また、その理由などからリーダー（指導者）の有無や活動への参加人数、参加世代のバランスなどが活発度の指標になっているようである。

表３　アンケート結果

地域防災力	評価項目
基礎的活動力	活発度　×　活動実施状況
災害対応力	防災活動実施状況 × 訓練充実度 × 資機材充実度 × 連携力
危険度想定力	防災関心度　—　想定災害危険度
総合地域防災力	「基礎的活動力」「災害対応力」「危険度想定力」の３つの地域防災力の重ね合わせにより評価を行う

表４　地域防災力評価項目

評価項目	算出方法
活発度	地域の活動状況における自己評価
活動実施状況	平常時の活動実施数
防災活動実施状況	防災活動実施数
訓練充実度	年間訓練実施数・参加率・訓練項目数にそれぞれ得点を与え、乗算した値
資機材充実度	保有・点検を行っている資機材数
連携力	連携して防災対策を行っている団体数
防災関心度	地域の防災への関心度自己評価
想定災害危険度	危険であると認識している想定災害数

表５　評価項目の算出方法

4-4. ハード・ソフトを融合した総合評価

「4-3」で行った地域防災力を基に，どれだけ地震災害危険度が軽減されるかを見るため，２つの評価結果を重ね合わせ，評価ランクの差（地震災害危険度—地域防災力）から総合的な評価を行う．まず，地震災害危険度を自治会区域単位で今一度概観する．神奈川区中部から東部にかけて高い危険度が伺え，白幡地区，大口・七島地区を中心に最高ランクの危険度を示した．

総合評価では，地域防災力で低い値を示していた青木第一・第二地区，白幡地区，新子安地区において，高い危険度がそのまま維持され，地震災害危険度で低い値を示していた神奈川区西部では，防災力の低さから危険度がプラスに変化した自治会がみられた．一方で，高い地域防災力を示していた六角橋地区及び周辺の自治会では，災害危険度が軽減される傾向にあり，地域コミュニティにおける防災力が，実際の危険度に対して影響を与えることが視覚的に確認できたと言える．尚，評価結果は図２に示す．

今回は地域防災力を空間情報として視覚化する上で，自治会ごとの防災力特性を重視して，自治会区域単位で評価を行ったが，アウトプット（表現方法）としては，いまだ住民にとって「漠然とした表現」の領域から発展できてはいないと言える．しかし，ただ表現の精度を上げればよいというわけでもないだろう．なぜなら，地域防災力の評価項目には自治会内でのローカルな情報が多く含まれているため，住民の合意なくして，こうした自治会の情報を詳細に公開することは難しいと考えられるからである．そこで，今後の方向性として，表現の精度そのものではなく，描かれた表現に操作性をもたせ，住民が自ら自分たちの活動や地域の状況を評価し，地図に反映させていくような表現が望ましいだろう．

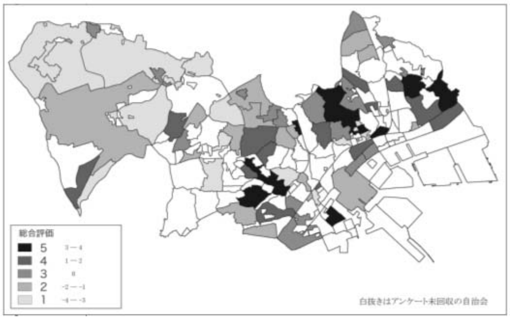


図２：ハード・ソフトを融合した総合評価

5. ケーススタディⅡ

5-1. 避難経路情報の視覚化

鎌倉市 O 地区は，９つの自治会で構成され，地区の半分が谷戸であるという地理的特性から，避難経路と避難場所について図３に示すような問題を抱えている．

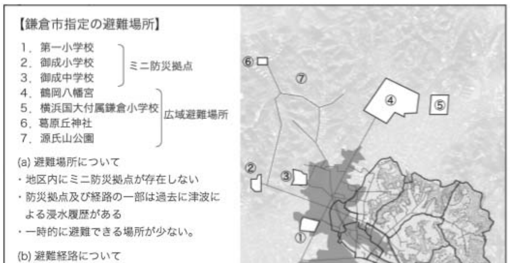


図３　O 地区と避難場所との地理的関係

5-2. 住民に主眼をおいた防災空間情報の抽出

防災マップ作成ワークショップ*2 と世帯を対象としたアンケート調査*3 から，住民の考える避難場所と避難経路を抽出し，また想定している災害危険についての調査を行った．調査結果は要点を表６にまとめ，抽出した避難場所と避難経路を図４に示す．

アンケート調査結果では，過去の津波による浸水被害の経験からミニ防災拠点（第一小学校）の安全性を懸念

し，高台や他の自治会の一時集合場所を含め，地区内に複数の避難場所を設定しているという回答が目立ち，谷戸の自治会においては，避難距離と避難経路上の危険性を意識して，自宅周辺での対処を考えているという意見が見受けられた．また，想定している災害では，谷戸の自治会において「地域の孤立」（地区全体では 20%）を強く懸念する傾向がみられ，他の自治会との間に意識の差が伺えた．

今後はこの結果を踏まえ，自治会間の連携を促し，O 地区全体としての具体的な防災計画を考える必要がある．

避難場所	ワークショップ：鎌倉市が防災面から定めることを奨励している、地区内の「一時集合場所」は、オープンスペースの少なさ等から定めることができない自治会があり、また定めている自治会においても具体的な収容可能人数までは、把握していない。
	アンケート：第一小学校の認知度は大変高い。一方で、浸水履歴があることから、浸水を危惧して高台への避難を考えているなど、災害の種類や規模に応じて避難場所を複数設定しているという意見が多く見受けられた。
避難経路	ワークショップ：全自治会ともに、幅員のある最短経路に集中する傾向がみられた。
	アンケート：防災拠点から最も遠い谷戸の自治会では、避難距離と避難経路上の危険性を考慮し、自宅周辺での対処を検討しているという意見が見受けられた。
想定被害	アンケート：地区全体として危険であると認識している想定被害は、「弱者の避難」、「木造倒壊」、「木造出火」、「水・食料不足」、「避難経路の混乱」、「情報伝達の不備」が挙げられた。一方で、谷戸の自治会では「地域の孤立」（地区全体では 20%）を強く懸念しており、他の自治会との間に意識の差が伺えた。

表6　調査結果

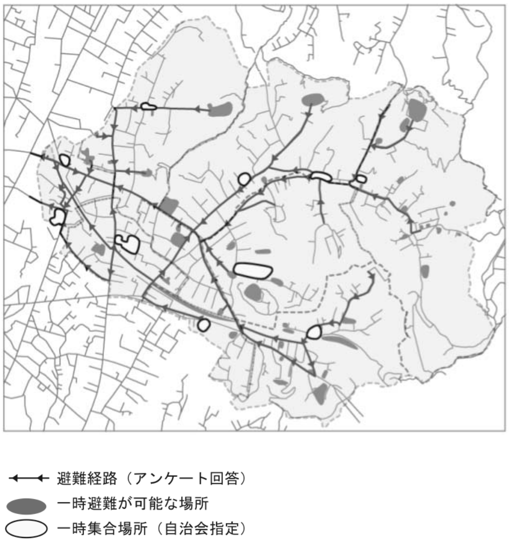


図4　抽出した避難場所と避難経路

5-3　避難困難度評価

ワークショップとアンケート調査から，避難に関する地域住民の意向が自治会によって様々であり，地区全体として鎌倉市が指定するミニ防災拠点への避難を懸念する傾向があることが明らかとなった．そのため，今後の避難計画を考える上で，まずは地域住民が想定しているこれらの危険度を視覚的に把握する必要があると考えられる．そこで，アンケート調査から得られた避難に関する不安要素（弱者の避難・避難経路の混乱・木造倒壊）を評価値として道路に与え，避難にかかる時間を避難困難度の指標として，各自治会の一時集合場所への到達圏評価を行い，次に各自治会の一時集合場所から鎌倉市が指定する防災拠点までの最短経路検索行う．

［評価方法］

災害時における住民の避難速度を設定し，O 地区と鎌倉市が指定する避難所を含むエリアの道路を抜けるのに要する時間の累積から避難困難度評価を行う．その際，避難速度は高齢者を想定して設定し，道路幅員及び木造倒壊（図５）による道路閉塞から各ノード区間に通過困難度を与えた（図 6）．次に，道路ネットワークにルート検索をかけて，各自治会の一時集合場所から鎌倉市が指定する防災拠点までの最短経路検索を行った．

［避難困難度の設定］

避難速度の設定方法と通過困難度指標を以下に示す．

・避難速度

災害時は歩行により避難するものとした．文献[1]で一般成人の場合，歩行速度は 1．1 m/sec なので，高齢者を考慮し，本研究では 0．55 m/sec として設定している．したがって，各ノード区間を通過するのに要する時間は，［ノード区間長］／［避難速度］で算出する．

・道路幅員による困難度

道路幅員は，建物倒壊などによる経路の閉塞性や人々が集中した場合の混乱度に直接関わる指標である．そこで，既存道路の幅員に重み付けを行い，困難さを設定する．

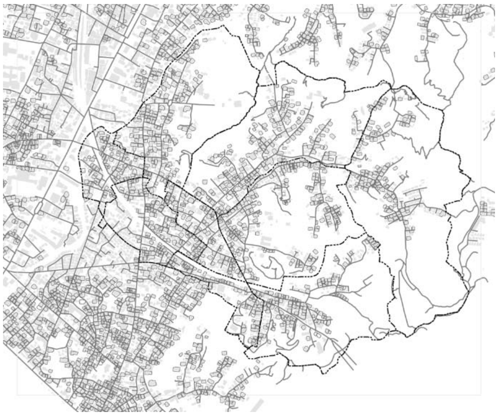


図５　倒壊危険箇所

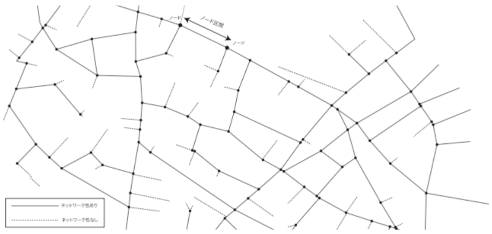


図６　道路ネットネットワーク図

5-4. 評価結果

避難困難度評価及び最短経路検索結果を概観的に示し，自治会の評価マップ例を次頁図７に示す.

［避難困難度］

道路のネットワーク性に富み，幅員の広い道路を有している自治会ほど一事集合場所への避難が容易であり，地区内を東西に通る国道に沿って到達圏域が広がる傾向にある. 特に谷戸側の自治会ではその傾向が一層強く，0 地区４丁目自治会，0 地区５丁目自治会，松葉町内会では，国道を経由して互いの一時集合場所が結びついている. 一方で，0 地区３丁目自治会，0 地区６・７丁目自治会では狭隘道路が多く，ネットワーク性が乏しいことから，２０分以内の到達圏が自治会内に収まっている. また，市街地側の自治会では，２０分以内の到達圏が他の自治会域にまたがり，比較的避難困難度は低い傾向にあるが，辻町自治会では自治会域のおおよそ４分の１が２０分以内に一時集合場所へ到達できないという結果が出ている. JR の線路で自治会域が分断され，また他の市街地側の自治会に比べて道路ネットワーク性が乏しいことが要因として考えられる.

［最短経路］

鎌倉市が指定する避難所への最短経路は，八雲自治会を除いた全ての自治会が国道を経由して「御成小学校」へ向かうという結果であった. 避難時間は米町自治会がおおよそ２７分と最短時間を示し，0 地区６・７丁目自治会ではおおよそ９０分の避難時間を要する. 一方で，辻町自治会と名越自治会では，辻町自治会の一時集合場所の方が御成小学校に近いにも関わらず，一時集合場所が国道に面している名越自治会の方が２０分近く早く到達するという結果が出ている.

経路上の危険度による避難時間に着目して，各自治会及び0 地区全体の避難困難度を概観した. その結果，避難困難度は道路ネットワークによるところが大きく，ミニ防災拠点や広域避難場所への避難に際し，住民の移動負荷が大きい自治会や道路状況によっては自分の自治会の一時集合場所よりも他の自治会の一時集合場所への避難の方が容易である地域があることが明らかとなった. また，津波による浸水被害を考慮すれば，他の自治会同士での災害情報の共有，また避難場所の共同運営などを連携して行っていく体制が必要であると考えられる.

図７　自治会の評価マップ例（0 地区５丁目）

6. ケーススタディⅢ

6-1. 郊外住宅地における生活行動域パターンの可視化

郊外住宅地の多くは1960年代ー1970年代にかけて丘陵地を切り開いて開発された. 戦後の出生数の増加や高度経済成長などを背景にして, 都市圏では大量の郊外住宅地が形成されてきた. その立地から, 生活者が利用する生活支援施設となる商業施設への移動手段も自動車主体としたものが多くみられる. しかし, 開発から30ー40年が経過した今日, 生活者の高齢化に伴って郊外住宅地の生活パターンが変化しつつあり,住宅地の空洞化により区画内に多くの空き地や空き家, 駐車場が増加傾向にある. 郊外住宅地が開発された当初の計画概要とは異なって現在の生活層や生活様式は大きく変化しており, 新たな用途への転換等の検討策が必要となってきている.

以降, 神奈川県南部の郊外住宅地を対象に, 生活支援施設と移動手段及び居住動向に関するアンケート調査を行ない, 郊外住宅地における日常生活の行動域パターンと生活支援施設の分布域の視覚化を通じて現状の課題を明らかにすることを目的とする.

6-2. アンケート調査

6-2-1. 調査対象地区

調査対象地区の選定は, 神奈川県南部に位置し, 1980年以前に民間により開発され, 形成時期が異なる郊外住宅地を対象として「生活支援施設と住民意識に関するアンケート」調査を行うにあたっては横須賀市役所市民部市民生活課と相談の上, アンケート調査協力の得られる地区に決定した. 地区は横須賀市S地区と横須賀市I地区の２地区を対象とし, 調査対象範囲は世帯数の多い, 横須賀市S地区５丁目, 横須賀市I地区３丁目とした.

6-2-2. 調査概要

S地区・I地区の２地区を対象に「生活支援施設と住民意識に関するアンケート調査」を行った. アンケートは各地区の町内会長に配布の協力を得て2008年10月初旬に各世帯に配布, 最終期限を10月末日とし郵送にて回収した. 設問の項目は主に選択形式をとり, 必要なところは記述形式の設問を採用した. アンケート設問項目および回収率を表7,表8に示す.

A,家族構成	B,住居について
C,交通機関について	D,隣、近所との関係、地域交流について
E,利用施設について	F,宅配サービスの利用について
G,住環境について	H,商業・サービス施設の利用について

表7 アンケート調査の設問項目

	湘南鷹取地区	岩戸地区	全体
配布数（部）	1092	835	1927
回収数（部）	225	135	360
回収率（%）	20.6	16.1	18.6

表8 アンケート配布数および回収率

6-2-3. 調査結果

以下, アンケート結果の概要を以下に記す. 結果の詳細は原田の論文(6)を参照のこと.

[住民の居住動向について]

交通アクセスが不慣などの問題はあるが, 現在住んでいる地区に住み続けたいという回答が2地区において60%程（S地区60%, I地区59%）であった. 現在の地区環境（自然環境, 住宅環境, 地域交流など）が良好であるために定住希望があることが伺える. しかし, 老後の居住環境については交通アクセスが良い場所(S地区21%, I地区20%）や利便性の高い場所（S地区21%, I地区14%）に移住したいと考えている回答が多い.

[今後必要と考える施設について]

地区ごとに差はあるものの, 共通して高齢化に対して住民の意識が高いことから「医療・福祉」施設があげられる. 地区別では, I地区は防犯を意識している回答者が多く, 「派出所」が必要と考えている回答者が多かった. S地区は「レストラン・料理店」「カフェ・喫茶店」が今後必要という回答者が多く, 身近な場所に飲食店がないことから手軽に食事やお茶を楽しむ場所が求められている. I地区の生活圏は最低限の生活支援施設が整っているといえる. 一方, S地区は他地区への生活支援施設への依存が高く, I地区と比べ生活圏が広いことが確認できる.

6-3. 郊外住宅地における生活行動域パターンの視覚化

6-3-1 自己組織化マップによる分類マップ

S地区およびI地区のアンケートから生活行動域に関する設問項目の集計を行い, 行動域パターンの可視化作業を行った. なお, ここでの行動域パターンとは, 生活支援施設への「交通手段」とその「施設区分」, および施設の所在を示す「移動地区（生活支援施設を単位とするではなく移動地区を単位とする)」の組み合わせのことを示す. 生活支援施設の属性データとして「施設区分:12属性」と「移動地区:9属性」の区別を行った後に(表9), 各属性項目は103次元のマップ作成時において実数値として規格化を行った. なお, 特定の施設区分に対応する

交通手段の属性項目数はアンケートの有効回答数に応じて調整を行った.

施設区分（12 属性）： スーパー・コンビニ・生鮮食品・酒／米店・ドラッグストア・電気店・書店・飲食店・理容室／美容室・クリーニング・病院／クリニック・余暇活動（図書館・スポーツジムなど）
交通手段（7 属性）： 自動車・電車・バス・タクシー・自転車・バイク・徒歩
移動地区（9 属性）： 岩戸・佐原・久里浜・衣笠栄町・汐入駅周辺・横須賀中央駅付近・県立大学駅付近・その他・宅配サービス

表 9　生活行動域に関する属性区分

6-3-2. 行動域パターンの類似度

生活行動域に関する属性区分の入力内容をコホネン型ネットワーク(6)に学習させた後に,2 次元マップで可視化を行った（図 8）. 行動域パターンの類似度に従って 113×103（S 地区）, 225×103（I 地区）の 2 次元ニューロンユニットをもつ SOM に射影を行った. 各地区における生活行動パターンの類似度に基づいてグループ化されていることが確認できる.

以下,2 地区における行動域パターンの類似性について要旨を示す.

(i)I 地区における行動域パターン特性について

I 地域内への行動域パターンの類似性が高い施設には「スーパー,ドラッグストア」に続いて[病院/クリニック,クリーニング,理容室,生鮮食品,電気,電気店, 酒/米店,]が確認できる. 一方で,[書店]の行動域パターンは I 地区内および近隣地区のさまざまな書店に足を運ぶ傾向があると同時に[その他]の地域において依存度が高くなっている. また,[コンビニ]においては隣接地区および[その他]の地域へのさまざま行動域パターンが確認できる一方で,地区内の[コンビニ]への行動パターンの依存度が低くなっている.

(ii)S 地区における行動域パターン特性について

S 地区の行動域パターンは,[スーパー,クリーニング,病院,生鮮食品,理容室,酒/米店]への類似度が高く S 地区内での依存度が高い. 一方,[ドラッグストア]の行動域パターンにおいては近隣地区のさまざまな地区へ分散していることが確認できる. また, [飲食店,コンビニ,酒/米店]においては近隣の Oi 地区への依存度が高く,S 地区内の[電気店]を訪れる住民の行動域パターンと類似傾向にある.

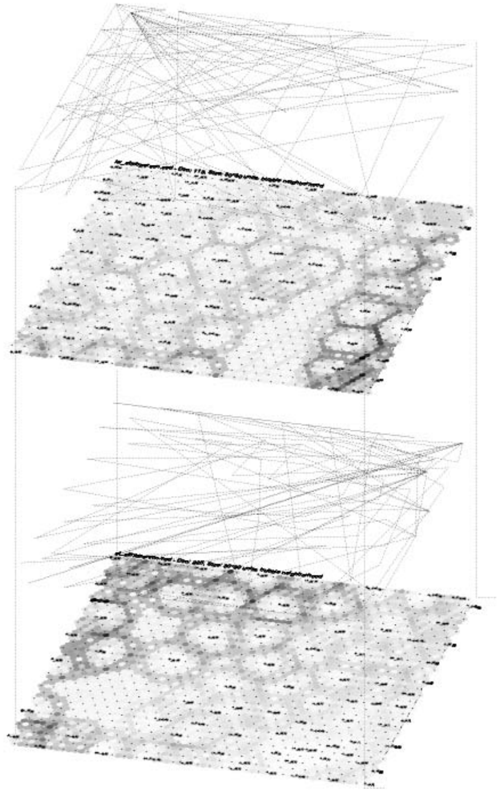


図 8　2 次元 SOM の分類マップ
上図：I 地区, 下図：S 地区, マップサイズ(x,y)および近傍半径初期値：30,学習率係数α1=0.05,α2=0.02,学習回数 1000 回,

以上, 郊外住宅地における生活支援施設の現状把握およびアンケートの実態調査を踏まえ, 現状の研究経過を引き継いで行動域パターンの視覚化手法の検討および課題の抽出作業を進めていく.

7. まとめ

空間情報視覚化手法の目的は, 一方的な空間情報の提供から, 地域住民の主体的な活動を支援する方向へと移行しつつある. しかし,同時に,これらの手法が抱えている現状の課題は, 対象地域の住民の方々と共同して空間情報を拾い上げる作業プロセスを具体的手法として提示することである. 今後も地域住民および地域行政の方々と共同して研究を進めていく.

以上, 2008 年度の研究の経過報告を行った. 空間情報視覚化の概観を進め, 3 つのケーススタディを通じてコ

ミュニティの主体的かつ継続的な活動を支援する防災空間情報表現の検討を行ってきた. 当該研究は2009年度も引き続き実施していく予定であり, 次年度以降に成果報告はまとめて示させていただく予定である. なお, 本稿におけるケーススタディⅠおよびⅡは山家研究室の齋藤千夏君の修士論文（2008 年度）, ケーススタディⅢは原田佳幸君によっている. ワークショップの開催およびアンケート配布・回収の補助に当たっては鎌倉市市役所市民経済部市民活動課の方々, 鎌倉市０地区自治会町内会の方々, 神奈川区全自治会町内会の方々, 横須賀市役所市民部市民生活課の方々, Ｉ地区３丁目の町内会長様, S 地区５丁目の町内会長様および住民の方々にはご協力を頂いた. ここに謝意を表する.

［補注］

＊1 : 横浜市では「町の防災組織（自主防災組織）」を自治会町内会単位で結成することを奨励していることから, 自治会町内会と自主防災組織はほぼ一致するため, 本研究では同一のものとして扱う.

＊2 : 神奈川大学都市計画研究室では 2008 年 7 月から 10 月にかけて鎌倉市と共同で「O 地区防災マップ作成ワークショップ」を行い, 避難経路と鎌倉市が推奨している地域内の災害時における一時集合場所を自治会毎に抽出した.

＊3 : O 地区９自治会に 220 票を均等になるよう配布した. 調査期間は 2008 年 10 月 25 日から 11 月上旬までとし, 回収総数は 127 票であった.

参考文献（ケーススタディⅠ, Ⅱ）

(1)武石遥 : 横浜市における自主防災活動に関する研究
平成１８年度　神奈川大学大学院　工学研究科建築学専攻修士論文

(2) 岡西他 : 地域防災力向上のための自治会町内会における地域コミュニティと災害対策に関する調査研究　日本建築学会計画系論文集 pp. 77-84 2006 年 11 月

(3) 総務省消防庁「地方公共団体の地域防災力・危機管理対応力評価指標」2002 年 10 月

倉田和四生 : 「防災コミュニティ地域福祉と自主防災組織の統合」

参考文献（ケーススタディⅢ）

(4)郊外住宅地における生活支援施設と住民意識に関する研究, 原田佳幸

(5)越智 正和, “都市郊外住宅地における施設利用実態に関する研究 : 熊本市武蔵ヶ丘周辺の住環境に関する意識調査 “, 学術講演梗概集. E-2, 建築計画 II, 住居・住宅地, 農村計画, 教育, (1999), pp.365-366

(6) T. コホネン, 徳高平蔵 他(監修), 自己組織化マップ, シュプリンガーフェアラーク東京, (2005)

構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の高性能化に関する研究

米田　征司*　　山口　栄雄**　　大杉　功***　　Ravhi S. Kumar****

Possibility of improving thermoelectric performance of chalcogen compounds by structural phase transition

Seiji YONEDA*　Shigeo YAMAGUCHI**　Isao J. OHSUGI***　Ravhi S. KUMAR****

１．緒言

熱電発電とは熱を電気に直接変換するエネルギー変換である．これは未利用熱や排熱をリサイクリングすることによって，エネルギーの有効利用が可能となり，CO_2 排出量削減にも繋がることからエネルギー・環境問題の切札として期待が高まっている．この効果は，熱電発電のエネルギー変換効率を上げることで，さらにその効果を増すことが期待できる．現在の高効率熱電変換発電モジュールのエネルギー変換効率の開発目標は最大で 15 %程度となっているが, 我々は 15 %を超える高性能な熱電変換発電モジュールの開発を１つの目標としている．このためには，高性能な新規熱電変換材料の創生が必要である．

カルコゲン系熱電材料，特にテルル化物熱電材料は，非常に性能が高いことで知られている．室温近傍で最も性能が優れ，熱電冷却・加熱では産業・商業等の用途に実用されているのは Bi_2Te_3 系化合物である．この化合物の発見から 50 年以上も様々な材料研究が行われているにも関らず，未だにそれを凌ぐ材料は現れていない．また, 500℃近傍の中温度領域で発電用熱電材料として実用されているものとして PbTe 系化合物が挙げられる．この化合物は発電システム構築上，優れた適応性を有することから，世界で広く研究開発が行われている．最新の研究動向においても，アメリカやドイツで PbTe 熱電モジュールを用いた自動車からの廃熱回収のための研究が行われている[1),(2)].

一方，本執筆者らは過去の研究において $AgSbTe_2$ 系化合物が最大性能指数 $Z_{max} = 1.8 \times 10^{-3}\ K^{-1}$（$Z$: 性能指数，熱電材料の良否を決める指標．熱電能の二乗を比抵抗と熱伝導率で割ったもの）を示すことを報告してきた[3]．このときの無次元性能指数は $ZT = 1.2$（T : 絶対温度，性能指数に絶対温度を掛けたもの.）に到達した．この数値は他の材料と比較して高く，高性能な p 型熱電材料として有望である．ここで，$AgSbTe_2$ を含む一般的な式 ABX_2 (A = Cu，Ag ; B = In，Ga，Sb ; X = S，Se，Te)で表される三元系の半導体は, 黄銅鉱もしくは岩塩構造を有する．この系の材料はデバイスの応用として広く使われている．Ag 系の化合物は, 光学式相変化製品および周波数変換装置など利用が広がっている[4),(5]．In や V を添加した $AgSbTe_2$ は，局部的な融解で急速な結晶-アモルファス相への相転移が生じることから CD や DVD のような書き換え可能なディスクにも広く利用されている[6),(7]．これらの材料の相変化は，熱によって引き起こされている．$AgSbTe_2$ の結晶構造は，岩塩構造型Ⅱ - Ⅵカルコゲナイドに類似している． Ⅱ - Ⅵ化合物の岩塩構造を持つほとんどの化合物は，圧力に敏感で B1 相 から B2 相に変化する．このことは $AgSbTe_2$ 単体においても圧力下で構造相転移の発生が期待される．

また，2004 年に学術雑誌 Science で $AgPb_{18}SbTe_{20}$ 化合

*助教　電子情報フロンティア学科
Assistant Professor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers
**教授　電子情報フロンティア学科
Professor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers
***教授　サレジオ工業高等専門学校
Professor, Salesian Polytechnic
****ネバダ大学
Associate Research Professor, University of Nevada Las Vegas

物の熱電性能に関する論文が発表された[8]．この論文で $AgPb_{18}SbTe_{20}$ 化合物の無次元性能指数 *ZT* は 2.2 に達することが報告された．性能指数向上の主な要因は，ナノサイズにおける Ag と Sb の構造にあることが述べられている．この無次元性能指数は現在までに最高値を示しており，この材料系の研究が広く行われている[9],[10],[11]．

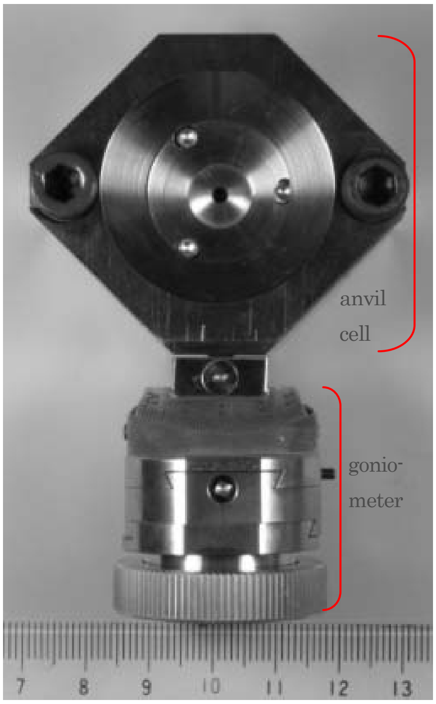
カルコゲン系熱電材料は，圧力による結晶構造の変化が報告されているが，その熱電特性については調べられてこなかった．近年の薄膜・ナノ物性の研究の広がりに伴って，微細な試料の熱電特性についても評価できるようになり，結晶構造が変化したカルコゲン系熱電材料についても評価は可能となってきた．

そこで，本研究ではカルコゲン化合物でも高い性能を有する化合物として $AgSbTe_2$，$AgPb_{18}SbTe_{20}$ を取り上げて，圧力誘起構造相転移について調べ，その熱電特性についても評価し，熱電特性向上の可能性について調べることを目的とした．

2．実験方法

高純度 (6N) の Ag, Sb, Te 各原料を希望組成に秤量し，透明石英アンプルに入れて，油拡散真空装置と酸水素バーナーを用いて真空封入した．アンプルを攪拌溶解ロッキング炉内に配置し，一方向性凝固法を用いて $AgSbTe_2$ インゴットを作製した．得られたインゴットは，粉末 X 線回折を用いて単相であることを確認した．各高圧実験はインゴットから小片サンプルを切り出し，ルビーチップとともに，ダイアモンドアンビルセルの中に設置した．また，圧力伝達媒体としてシリコン溶液で行う他に窒素，メタノール・エタノール混合液でも行った．X 線回折実験は，回転対陰極X線発生装置（Rigaku Mo-Kα）とシンクロトロン X 線を使って行った．X 線回折パターンは，イメージングプレートカメラを使って検出した．

次に $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の実験について述べる．圧力下における長周期的な構造や局在的な構造を調べるために，高分解能粉末 X 線回折，EXAFS，XANES を使用した．さらに，結晶構造に関して得られた結果と高圧下で行われた比抵抗の熱電特性の結果を比較した．作製した $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の粉末試料は，ダイアモンドアンビルセルを用いて加圧した．圧力媒体としてシリコン溶液と圧力マーカーとしてルビーチップを用いた．次にメタノール・エタノール混合液を圧力透過媒体として使用した．回折像は30GPaまでイメージングプレートを用いて検出し，Fit2D ソフトウェアを用いて統合し，解析を行った．



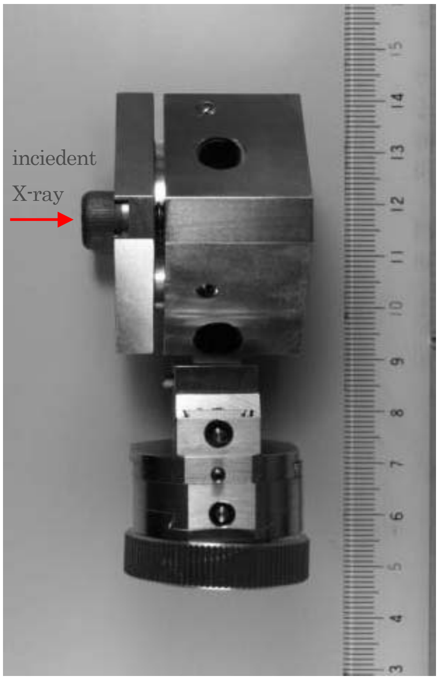


図 1　ダイアモンドアンビルセル概観．

３．結果および考察

$AgSbTe_2$の圧力誘起構造相転移について述べる．作製した $AgSbTe_2$ は，大気圧では金属原子が位置する（0,0,0）と Te 原子位置の（0.5,0.5,0.5）で岩塩構造(Fm3m)で結晶化していた．大気圧において，回折ピークから格子定数 a = 6.0780 (1) Åの fcc 格子で同定された．次に圧力を増加させたときの様子を図 2 に示す．

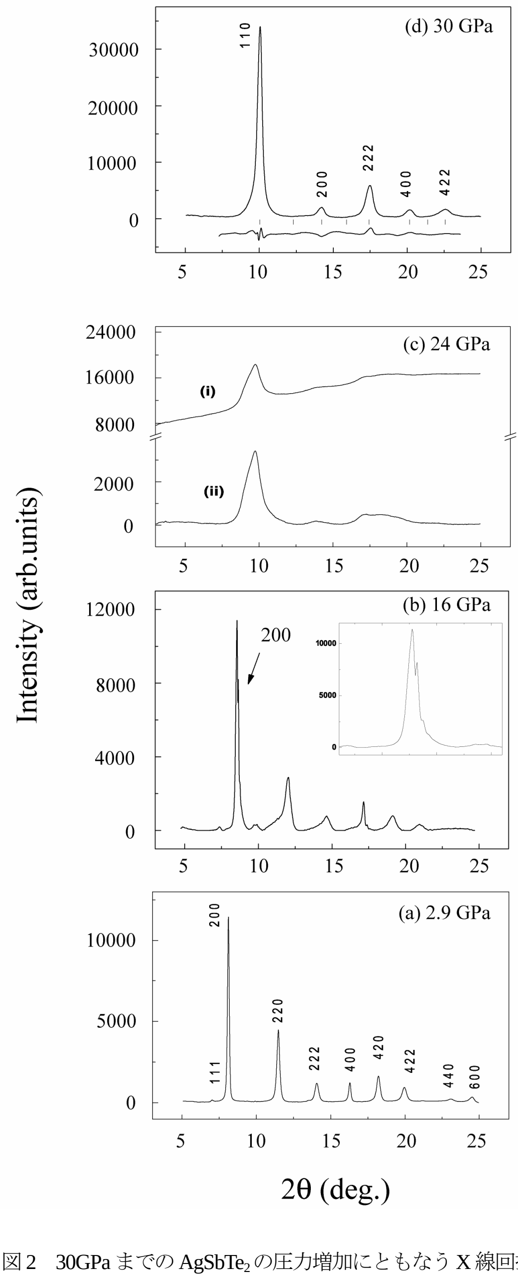


図２　30GPa までの $AgSbTe_2$ の圧力増加にともなう X 線回折パターン変化．それぞれ、(a) 2.9GPa, (b) 16GPa, (c) 24GPa, (d) 30GPa．(b)の挿入図は，アモルファスになる前の(200)回折線で観測された回折線の分離の様子を示している(c)の(i)は 24GPa でバックグランドを含めた回折パターン．(ii)は背景差分法適用後の回折パターン．

図の回折線に示されるように，圧力の増加とともに鋭いピークは維持され，また対称性を維持しながら高角度側にシフトしている．Ag/Sb-Te 間距離が 0.0118 Å/GPa の割合で減少するのに対して，0.024 Å/GPa の割合で格子定数 a は減少した．Ag/Sb-Te 間距離の変化がわずかなのは，金属—カルコゲン原子の強い結合を示しているものと考えられる．15GPa まで岩塩構造相は安定していた．シリコン圧力媒体とともに 16GPa で(200)と(420)の回折ピークが分離（図 2_b の挿入図）し，他の回折ピークは広がることがわかった．これらの特徴的な変化は，明らかに構造相転移の発現を示している．さらに，17GPa ではすべての回折線の強度が突然低下するのを確認した．この圧力における X 線回折パターンは，アモルファス化合物の典型的なパターンに似ていた．図 2_c に示されるようなアモルファス相は 25GPa まで維持された．窒素とメタノール－エタノール混合液の圧力媒体での実験では，24GPa でアモルファスが確認され，圧力媒体に依存しないことが示された．過去に行われた II-VI カルコゲナイドに関する高圧構造相転移の研究では，斜方晶系の相（Cmcm あるいは Pbnm）への相転移が示された[12),(13),(14)]．そこで，Cmcm と Pbnm 構造を持つ歪んだ類似型に対して，16GPa で得られた X 線回折パターンを調べた．Pbnm と Cmcm の両方の構造を考慮し，リートベルトで解析した．その結果，4a サイト（0, 0, 0）を Ag / Sb 原子が位置し，8d サイト（0.75, 0.25, 0.5）を Te 原子で占めている Cmcm 空間群が，良い一致を示した．斜方晶系の相に対して得られた格子定数は，a = 3.7974（3）Å，b = 4.238（4）Å と c = 5.6358（1）Å であった．２つの相が共存し相転移が連続的であることがわかり，B1 と斜方晶の相の間では著しい体積変化は見られないことがわかった．

　結晶相とアモルファス相の共存が $FePO_4$ で見られ，また局部的なアモルファス化が Nguyen らによって Co（OH）$_2$ で報告されていることから[(15)]，アモルファス領域での結晶相の相対存在量を調べた．しかしながら，図 2（c）に示されるように結晶的な特徴を認識することはできなかったが，26GPa で結晶性を示す回折線が現われ始めた．これはアモルファス状態から新しい結晶相に相転移していることを示す．この X 線回折パターンを解析したところ，格子定数 a = 3.4500(a) Å を持った CsCl 相であることがわかった．この CsCl 相は本実験において到達した最高圧力である 62GPa まで安定していることがわかった．

　Cmcm 斜方晶の歪みと中間のアモルファ相の観測によって，6 倍に配位された B1 相から 8 倍に配位された B2 相に相転移する間，欠陥の入った立方体構造と Te 原子の動きから配位フラストレーションが起きていることを明らかにした．減圧時の回折パターンを図 3 の(a)に示す．CsCl 相に対応している回折ピークは，12GPa に下がるまで，そのまま保持されていた．12GPa 以下では，ピークは広がり CsCl 相からアモルファス相への相転移でヒステリシスを示しながら，アモルファス状態に相転移した．このアモルファスの特徴は，B1 相へ部分的な結晶化部を有しながら，ダイヤモンドアンビルセルの圧力を開放した後でもアモルファスは残っていた．このダイヤモンドアンビルセルを 100 ℃以上 1 時間加熱した後，図 3 の(b)に示されるように， B1 相に対応している鋭い回折ピークが再び現われた．この B1 相の格子定数は，はじめの大気圧の値と一致した．これらのことは，$AgSbTe_2$ では圧力誘起によるアモルファス化は可逆性であることを示した．また，熱処理によってアモルファス—結晶のエネルギー障壁を越えるエネルギーを供給したことを示した．このことは $AlPO_4$ と KH_2PO_4 で観察されたものと全く同じ B1 相に戻る再結晶過程が生じた[(16),(17)]．

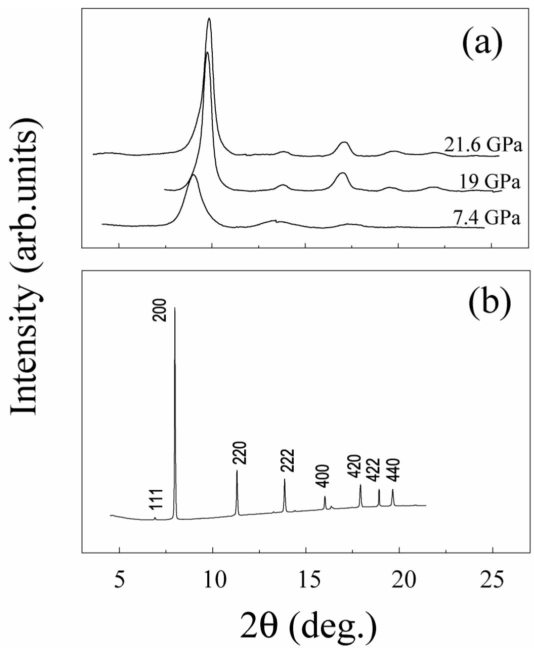


図 3　(a) $AgSbTe_2$ の減圧時の各圧力における X 線回折パターン．
(b) 大気圧で 100℃，1 時間熱処理後，B1 相と一致した X 線回折パターン．

観察された B1 と B2 相の安定性を知るために, 理論計算を行なった. 結合エネルギーは図4の上段に示されるように, 大気圧条件において, B2 相に対して 0.18 eV/atom 程度 B1 相が低く, B1 相がエネルギー的に生じやすいことを示した. B1 相に対して計算された格子定数は 5.93 Åであった. これは 6.08 Å の実験値と非常に良く一致した.

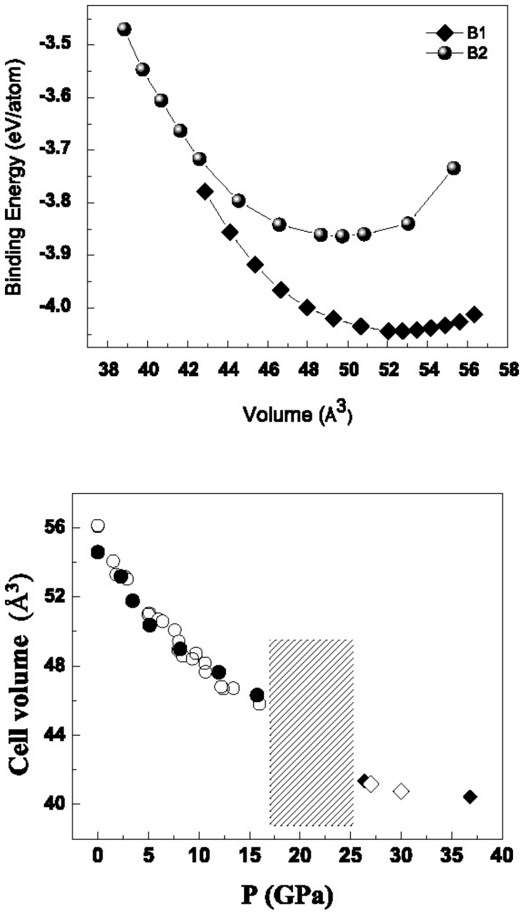


図4　$AgSbTe_2$ の体積の圧力依存性.
○：B1 相の実験データ, ●：B1 相の計算値,
◇：B2 相の実験データ,　◆：B2 相の計算値

次に $AgPb_{18}SbTe_{20}$ に対する高圧 X 線回折実験で得られた結果を図5に示す. この結晶構造は, Pb-Te 母相と Ag-Sb のわずかな領域から構成される PbTe 二元化合物に非常に良く似た立方晶, 空間群 Fm-3m であった. 5.5GPa までの回折パターンは, この圧力までは Fm-3m 構造が安定していることを示している. また, 圧力の増加にともない全ての回折ピークは高角度側にシフトする傾向を示した. これは格子定数が減少することを示している. すなわち, 圧力によって結晶が収縮する様子を示している.

次に 6.4GPa 近傍では, $2\theta = 7 \sim 10°$ の間に新たな回折ピークが現れることがわかった. 特に $2\theta = 7.4°$ で立方晶の相を示す高い強度のピークが分離した. これらの結果から, この圧力で圧力誘起構造相転移が発生していることを示している. この新たに出現した相は, 11GPa まで安定だった. 12.1GPa 以上で得られた回折パターンは, 単純なパターンを示した. この圧力で, 2 回目の圧力誘起構造相転移が発生した. この第二相は, さらに 30GPa までの圧力でも安定であった. また, 第一相と大気圧での相は, セルからの圧力を開放する過程で, わずかなヒステリシスをともなって戻ることがわかった. すべてのプロファイル調整を行うことで, 高圧相の第一相と第二相の結晶構造の情報を得ることができた. それらのパターンから, Pnma 型斜方晶と CsCl 型立方晶が同定された. 斜方晶として 7.3GPa で得られた格子定数, a = 8.1178(6) Å, b = 4.4566(4) Åであった. また, 立方晶として 14.4GPa での格子定数は, a = 3.6115(7) Åであった. $AgPb_{18}SbTe_{20}$ はその多くの割合を占める PbTe を母相としている. また大気圧での結晶構造は PbTe に非常に類似していることから, PbTe の高圧下における結晶構造の振る舞いと今回得られた結果について比較することができると考える. PbTe の中間高圧相は, いくつかのグループで研究されている[18], [19]. Pnma 型斜方晶への相転移は PbTe でも明らかとなっている. 今回実験で得られた高圧下での相転移において, 構造的特性はホスト格子内の Ag もしくは Sb 原子によって影響されないことを示しており, 多数を占めている PbTe 母相によって主に影響されているので PbTe の結果と比較できる.

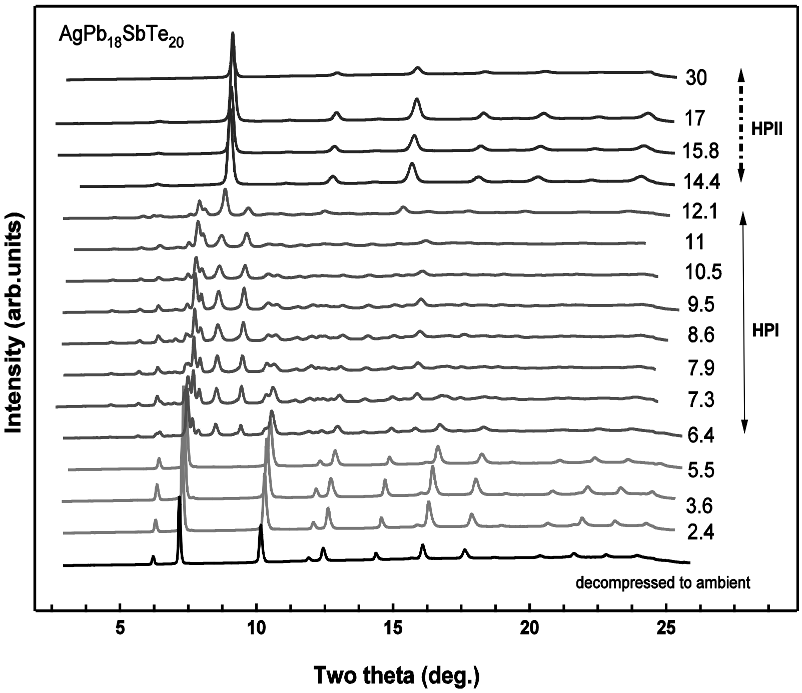


図 5　30GPa までの $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の圧力増加に伴う X 線回折パターン変化.
HPI （6.4 ～ 12.1GPa の圧力領域）： Pnma 型斜方晶
HPII（14.4 ～ 30GPa の圧力領域）： CsCl 型立方晶

20GPa まで検出された入射 Ag-K 端エネルギーと Pb-L3 端エネルギーのX線吸収端近傍構造（XANES）スペクトルを図 6 と 7 に示す．分析の結果，圧力の増加とともに異なる Ag-端スペクトルを比較したが，著しい違いは見られなかった．大気圧，4GPa，9.6GPa で得られた Pb-L3 端 XANES スペクトルにおいて，大気圧と 4 GPa でのスペクトルは非常に良く類似していた．しかしながら，9.6GPa のスペクトルは，大気圧および 4GPa で得られたスペクトルと大きく異なっていたが，このことは 5.1GPa まで立方晶の相が存在し，その後に Pnma 型斜方晶の相が現われる回折実験結果と一致した．Pb の局所構造が圧力による変化に敏感であり，それに反して Ag の局所構造は，圧力に対して敏感ではなかった．高圧下での回折実験から得られた結果と XANES の実験結果に基づくと，高圧下での $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の振舞いは PbTe 単体の振舞いに類似しているものと言える．

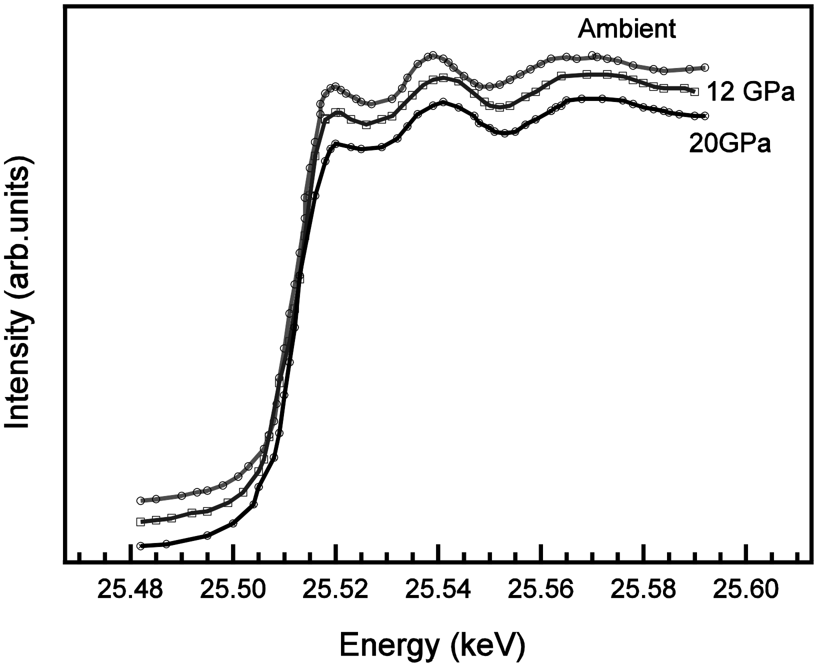


図 6　20GPa まで測定された $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の Ag-K 端 XANES スペクトル．大気圧，12GPa，20GPa で得られた XANES スペクトルを比較したが，圧力の増加とともに Ag-端スペクトルには，著しい違いは見られなかった．

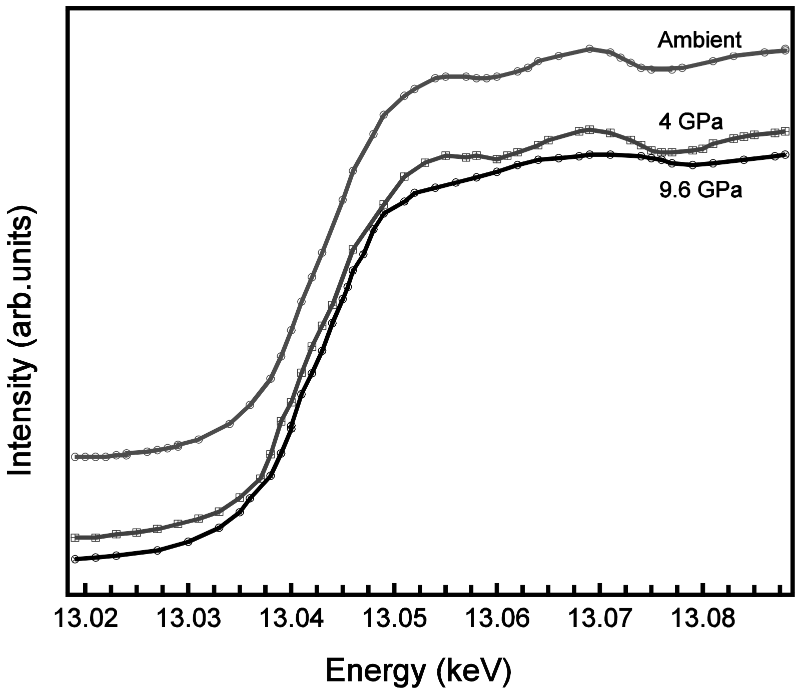


図 7 9.6GPa まで測定された $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の Pb-L3 端 XANES スペクトル．
大気圧，4GPa，9.6GPa で得られた Pb-L3 端 XANES スペクトルにおいて，大気圧と 4 GPa でのスペクトルは非常に良く類似していた．しかしながら，9.6GPa のスペクトルは，大気圧および 4GPa で得られたスペクトルと大きく異なっていたが，このことは 5.1GPa まで立方晶の相が存在し，その後に Pnma 型斜方晶の相が現われる回折実験結果と一致した．Pb の局所構造が圧力による変化に敏感であり，それに反して Ag の局所構造は，圧力に対して敏感ではなかった．高圧下での回折実験から得られた結果と XANES の実験結果に基づくと，高圧下での $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の振舞いは PbTe 単体の振舞いに類似しているものと言える．

20GPa までの比抵抗を圧力の関数として図 8 に示す．比抵抗は5GPaまで圧力に依存して急激な減少を示した．構造相転移を示した 4.7GPa 近傍で，比抵抗は突然大きく減少した．この測定結果はX線実験結果に一致している．２回目の構造相転移が現れる 14GPa 近傍では，著しい変化は確認されなかった．

比抵抗の減少は，圧力によって格子定数の減少，すなわち体積収縮を生じることがわかったが，これによって格子欠陥の低減などの影響によって，移動度の増加によるものと考察する．移動度の変化にともない，キャリアの散乱パラメータの変化が期待でき，熱電能に対しても影響を及ぼしていることが示唆される．したがって，比抵抗の低減化によって，熱電特性の向上の可能性が示されたと言える．

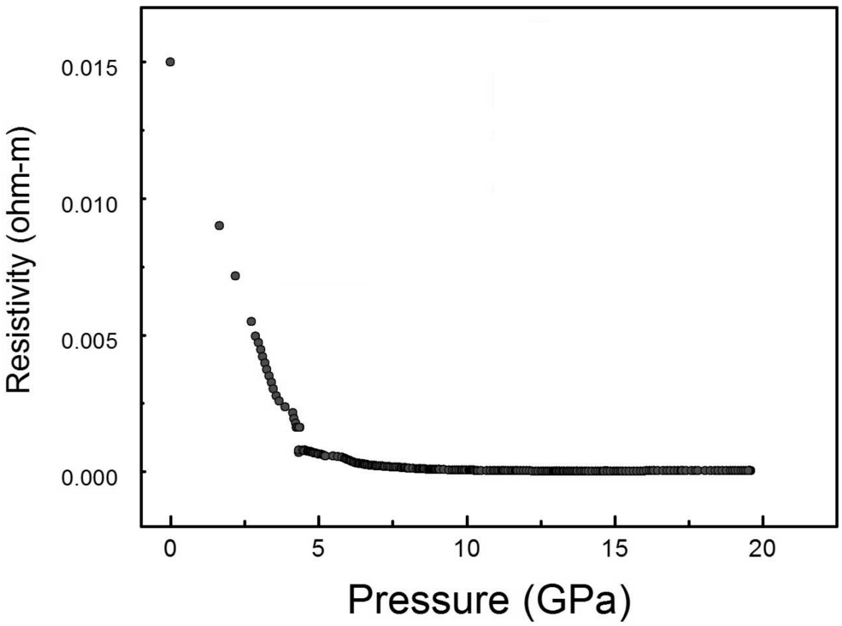


図 8　20GPa までの $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の比抵抗の圧力依存性．比抵抗は 5GPa まで圧力に依存して急激な減少を示した．構造相転移を示した 4.7GPa 近傍で，比抵抗は突然大きく減少した．この測定結果は X 線実験結果に一致した．２回目の構造相転移が現れる 14GPa 近傍では，著しい変化は確認されなかった．

４．まとめ

ダイアモンドアンビルセルを用いて $AgSbTe_2$ の圧力誘起構造相転移について調べ，$AgSbTe_2$ の構造相転移を示すことができた．これは圧力伝達媒体に依存しない中間のアモルファス相をともなったB1からB2への相転移であった．$AgSbTe_2$ の高圧誘起アモルファス化に関する結果では，高い再現性が得られた．

次に X 線回折およびX線吸収端近傍構造（XANES）を用いて，30GPa までの圧力に対する $AgPb_{18}SbTe_{20}$ の結晶構造について調べた．圧力下における比抵抗についても調べた．$AgPb_{18}SbTe_{20}$ の立方晶 Fm-3m 相から 6.4GPa 近傍で Pnma 型斜方晶の相に構造相転移し，さらに 14.4GPa 近傍でCsCl 型立方晶の相へと構造相転移することが明らかになった．X線吸収端近傍構造実験の結果では，X 線回折実験と一致し，構造相転移において Pb 局所構造が著しく変化することを示した．圧力増加にともなう比抵抗の減少傾向から，熱電特性向上の可能性が示された．

５．参考文献

(1) D. Crane and J. LaGrandeur, “Progress report on BSSt Led, US DOE automotive waste heat recovery program”, Abstracts of ICT2009, (2009), p.52.

(2) G.. Buschmann, “Thermoelectric goes Automotive”, Abstracts of ICT2009, (2009), p.42.

(3) S. Yoneda, Y. Ohno, E. Ohta, N. Yuhashi, I. Shiota, Y. Shinohara, H.T. Kaibe, I.J. Ohsugi and I.A. Nishida, IEEJ Trans. FM, Vol.124, No.4, (2004), p. 312.

(4) J. Feinleib, J. de Neufville, S. C. Moss, and S. R. Ovshinsky, Appl. Phys. Lett. **18** (1971), p.254.

(5) R. Detemple, D. Wamwangi, M. Wuttig, and G. Bihlmayer, Appl. Phys. Lett. **83** (2003), p.2572.

(6) J. Tominaga, T. Kikukawa, M. Takahashi, and R. T. Phillips, J. Appl. Phys. **82** (1997), p.3214.

(7) W. K. Njoroge and M. Wuttig, J. Appl. Phys. **90** (2001) , p. 3816.

(8) K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J. S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. K. Polychroniadis, and M. G. Kanatzidis, Science **303** (2003), p. 818.

(9) L.J. Wu, J.C. Zheng, J. Zhou, Q. Li, J.H. Yang, Y.M. Zhu, J. Appl. Phys. 105 (2009), p. 094317.

(10) A. Kosuga, M. Uno, K. Kurosaki, S. Yamanaka, J Alloy Compd. **387** (2005), p. 52.

(11) KF. Cai, C. Yan, ZM. He, JL. Cui, C. Stiewe, E. Muller, H. Li, J Alloy Compd. **469** (2009), p. 499.

(12) H. Luo, R. G. Greene, K. Ghandehari, T. Li, and A. L. Ruoff, Phys. Rev. B **50** (1994), p.16232.

(13) R. J. Nelmes, M. I. McMahon, N. G. Wright, and D. R. Allan, Phys. Rev. B **51** (1995) , p.15723.

(14) M. I. McMahon, N. G. Wright, D. R. Allan, and R. J. Nelmes, Phys. Rev. B **53** (1996), p.2163.

(15) J. H. Nguyen, M. B. Kruger, and R. Jeanloz, Phys. Rev. Lett. **78** (1997), p. 1936.

(16) M. B. Kruger and R. Jeanloz, Science **249** (1990), p. 647.

(17) Y. Kobayashi, S. Endo, L. C. Ming, and T. Kikegawa, Phys. Rev. B **65** (2002), p. 132105.

(18) G. Rousse, S. Klotz, A. M. Saitta, J. Rodriguez-Carvajal, M. I. McMahon, B. Couzinet, and M. Mezouar, Phys.Rev.B., 71 (2005) , p. 224116.

(19) S.V. Ovsyannikov, V.V. Shchennikov, A.Y. Manakov, A.Y. Likhacheva, I.F. Berger, A.I. Ancharov, and M.A. Sheromov, Phys. Stat. Solidi (b), **244** (2007) , p. 279.

講演会記録

2008 年ノーベル物理学賞と加速器科学の進展

渡邊　靖志*

Nobel Physics prize in 2008 and Development of Accelerator Science

Yasushi WATANABE*

1．はじめに

2008 年ノーベル物理学賞が日本の 3 氏に授与された．南部陽一郎氏の理論は 1960 年初頭に，小林・益川理論は 1972 年に発表されたものである．受賞までなぜこのような長い年月を要したのであろうか．ここでは主に小林・益川理論の内容と意義について概説し，受賞までに要した年月の陰にあった加速器科学の進展について述べる．

図 1 益川敏英，小林誠，南部陽一郎の各氏

2．2008 年ノーベル物理学賞

2008 年 10 月，日本中うれしいニュースに沸き立った．2008 年ノーベル物理学賞を日本の 3 氏が独占したのである（図 1）．そのキーワードは「対称性の破れ」であり，南部陽一郎氏は「自発的対称性の破れ」，小林誠・益川敏英両氏は「*CP* 非保存」である．南部氏の仕事を一言で言うと「素粒子に質量を与える機構を発見した」こと，小林・益川理論は「*CP* 非保存を標準理論の枠内にピタリと収めた」ことになる．

本稿では主に小林・益川理論の内容と意義，および，その検証に至るまでの道のりを概説する．そこには加速器科学の進展が不可欠であったことを見る．最後に南部理論について簡単に紹介する．

3．*CP* 非保存とは？

CP 対称性とは，一言で言うと物質・反物質間の対称性である．反物質とは何だろうか？まず物質について考えよう．物質は分子から，分子は原子から，原子は原子核と電子からできている．原子核は陽子と中性子（核子と総称する）が結びついてできている．陽子，中性子，電子などを「素粒子」を呼んでいる．素粒子には反粒子も存在する．陽子，中性子，電子の反粒子はそれぞれ，反陽子，反中性子，反電子である．陽子はプラスの電荷，電子はマイナスの電荷をもっているが，反陽子はマイナス，陽電子はプラスの電荷をもつ．すなわち，粒子と反粒子の量子数（質量，電荷，寿命など）の絶対値は等しく，符号は逆である．電荷をもたない反中性子は中性子とどう違うのであろうか？実は，陽子や中性子はバリオン数という量子数をもっていて，バリオン数=1 と定義される．バリオン数保存則が非常によい精度で成り立っているため，陽子の寿命はとてつもなく長い（$>10^{34}$ 年）．バリオン数保存則が破れているかどうかを実験的に探ろうというのが，核子崩壊の探索実験である [(1)]．その探索が，小柴昌俊氏の 2002 年ノーベル物理学賞受賞に至る実験の主目的であった．反中性子はバリオン数=−1 で，中性子と全く同じ質量，寿命等をもつ粒子である．これら反粒子から構成される物質が反物質である．たとえば水素原子は陽子のまわりに電子が雲のように存在しているが，反水素原子は反陽子のまわりに陽電子がまわっている．反物質と物質が出会うと互いに消滅して膨大なエネルギーを放出する．

CPT 定理というものがある [(2)]．*CPT* 定理は，物質・反

*教授　機物理学教室
Professor,　Institute of Physics

物質間の対称性を完全に保証する．*C* 変換（Charge Conjugation）は粒子を反粒子に，反粒子を粒子に置き換える変換，*P* 変換（Parity Transformation）は空間反転（鏡に映した世界），*T* 変換（Time Reversal）は時間反転，すなわち $t \to -t$ の変換である．*CPT* 定理は，これらの変換の積に対する不変性が自然界で厳密に成り立っていることを主張し，実験的にも非常に高精度で確かめられている．*CPT* 定理の帰結として，粒子には必ず反粒子が存在し，その量子数の絶対値は等しく，符号は逆であることが保証される．

CP 不変性は，*C* と *P* の積の変換に対する不変性で，自然界はこの不変性を破っていることが 1964 年に実験で発見された [3]．このことは，*CPT* 定理によれば，自然界は *T* 不変性，すなわち時間反転不変性をも破っていることになって驚きをもって迎えられた．そもそも，1950 年代半ばまでは，*C* 不変性，*P* 不変性，*T* 不変性はそれぞれ別々に成り立つと思われていた．

1956 年末にリー（T.D. Lee）とヤン（C.N. Yang）は *P* 不変性が破れている可能性を指摘した [4]．ウー（C.S. Wu）女史らはすぐに実験によって *P* 非保存を確かめ，世界を驚かせた [5]．若きリーとヤンがその翌年の 1958 年ノーベル物理学賞を受賞したのは，その驚きの大きさを表している．*P* 不変性が破れていると，*C* 不変性も破れていることは自明であった．すぐにわかったことであるが，ニュートリノという粒子の存在自身が *P* 非保存，*C* 非保存を示している．ニュートリノとは一言で言うと，電子から電荷を取り去った粒子である．電荷がないので電磁力を感じず，物質とほとんど相互作用しない．そのため大変捕まえにくい粒子で，よく幽霊粒子とも言われる．実際，身の回りに多数存在しているが，見えない．ニュートリノは，進行方向に左回転している（左巻きニュートリノという）ことがわかった．それを *P* 変換すると，進行方向に右回転する（右巻き）ニュートリノになって自然界には存在しない．同じくニュートリノに *C* 変換をすると，左巻き反ニュートリノになり，やはり自然界に存在しない．すなわち，*P* 不変性，*C* 不変性は破れている．そこで考えられたのが *CP* 不変性である．ニュートリノに関しては *CP* 不変性は成り立っている．すなわち，ニュートリノを *CP* 変換した右巻き反ニュートリノは存在する（図 2）．まさか *T* 不変性も破れているとはとうてい思えないから，*CP T* 定理によって *CP* 不変性も破れてはいないだろうと理論家たちは確信していた．ところが，実験家は何でも疑い，測定してみようとする人種であり，上記の大発見となったのである．やはり，すべては実験で確かめられなければならないという好例である．

$$
\begin{array}{ccc}
\text{左巻きニュートリノ} & \xrightarrow{P\text{変換}} & \text{右巻きニュートリノ} \\
\text{(存在する)} & & \text{(存在しない)} \\
\downarrow C\text{変換} & & \downarrow C\text{変換} \\
\text{反左巻きニュートリノ} & \xrightarrow{P\text{変換}} & \text{反右巻きニュートリノ} \\
\text{(存在しない)} & & \text{(存在する)}
\end{array}
$$

図２　ニュートリノの *P*,*C* 変換

CP 非保存の理論的説明は困難だった．すぐに現象論的にこれを説明する理論が提唱されたが，その現象だけを新しい相互作用を仮定して説明する理論であり，魅力的ではなかった [6]．

４．小林・益川理論

やっと 1972 年になって，*CP* 非保存を説明する，理論らしい理論が提唱された．小林・益川理論である [7]．しかし，世界ではこの理論はしばらく全く注目を浴びなかった．それは当時としてはかなり大胆な仮定をしていたからである．しかし，後にその仮定も正しいことがわかり，小林・益川理論が的をついた理論であるという定評を得るに至った．

しかし，それを実際に実験で確かめるのは容易ではなかった．物理ではどんなすばらしい理論でも，自然がそうなっていること，すなわち，実験で検証されてはじめて意味がある．その検証には長い年月と工学技術の進歩が必要だったのである．

小林・益川理論のエッセンスは「6 個以上のクォークが存在すると *C P* 非保存を説明できる」というものである．クォークとは何だろうか？実は，陽子や中性子は本来の意味での素粒子ではなく，クォークと名付けられた基本粒子からできていることが 1960 年代半ばからわかってきた．電子やニュートリノなどはクォークと並んで基本粒子と思われている．1972 年当時には，クォークには 3 種類あることが知られていた．小林・益川理論は，クォークの種類が一気に 2 倍以上存在するとしたのである．実はクォークは，姉妹のように非常に似ていて，電荷が 1 だけ違う「対」として存在している．これは，陽子と中性子が電荷だけが違っていて質量等は似ていることに対応している．また，ニュートリノと電子とは同じく姉妹のようである．すなわち，小林・益川理論は，クォーク対が 3 種類（3 世代という）以上あると，*CP* 非保存が説明できるという理論である．

クォークは相互作用によって姉から妹に，またその逆にも変わることができる．さらに確率は小さいが，別の世代のクォークに変わることもできる．この「クォーク

間の変換行列が 3 行 3 列，またはそれ以上であると，その行列要素に複素数が必ず含まれる」というのが小林・益川両氏の発見であった[8]．クォークが 3 世代の場合，妹クォークの d,（ダウン），s（ストレンジ），b（ボトム）から姉クォーク u（アップ），c（チャーム），t（トップ）（それぞれ左巻き（L））への変換は W 粒子により媒介され，相互作用ラグランジアンは次のように書ける．

$$L_{\mathrm{int}} = g(\bar{u}\ \bar{c}\ \bar{t})_L \gamma_\mu \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{ub} \\ V_{td} & V_{us} & V_{ub} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L W^\mu$$

ここで，g は結合定数，γ_μ は γ 行列，V は 3 行 3 列の小林・益川行列（または CKM（Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)行列）である．行列 V はユニタリー行列であり，その行列要素の自由度は 4 個である．そのうち 3 個は実数で，回転角度に相当する．もう一つ，「複素数の位相の自由度が残る」というのが小林・益川理論の真髄である．

複素数は，反粒子（CP 変換）では虚数部分が符号を変える．したがって，粒子と反粒子の振る舞いに違いが生じる．すなわち CP 非保存である．このように小林・益川理論は CP 非保存を説明するために，間接的に，6 種類以上のクォークの存在を予言したが，まず 4 番目のクォークが 1974 年 11 月に 2 か所の研究所でほぼ同時に発見された．このニュースは衝撃的で，この発見は「1974.11 革命」と呼ばれている．それまで，クォークの実在について半信半疑だった物理学者も少なくなかったが，この発見でクォークが実際に存在することを確信するに至った．その後，1986 年に 5 番目，1995 年に 6 番目のクォークが発見された．これらのクォークの質量は大きいため，十分高いエネルギーの加速器と注意深い検出方法を必要としたのである．その後の実験で，クォークの種類は 6 種類（3 世代）であり，それ以上ではないらしいということもわかった．

素粒子の理論として「標準理論」（Standard Model）が 1970 年代に完成した．標準理論は，自然界に存在する 4 つの力のうち重力を除く 3 つの力を記述する理論である．3 つの力とは，クォークを結びつける「強い力」（固有名詞；核力ともいう），マクスウェルによって定式化された電磁力，そして，ベーター崩壊などで働く「弱い力」（固有名詞）である．実は小林・益川理論で説明しようとした「クォークが別のクォークに変わるときに働く力」が弱い力である．また，ニュートリノは弱い力と重力しか感じないため，ほとんど物質と相互作用しない．標準理論は，美しい対称性（ゲージ対称性等）をもち，クォーク，電子，ニュートリノなどの相互作用を矛盾なく記述する．小林・益川理論は，標準理論の中に CP 非保存をピタリと組み込む役割をした．すなわち小林・益川理論によって標準理論が完成したとも言える．

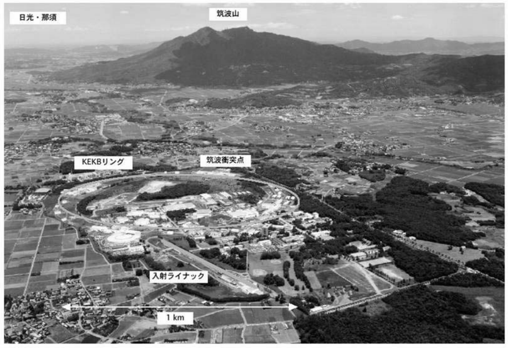


図 3　KEK と KEKB 加速器

5．B ファクトリーと小林・益川理論

小林・益川理論によって CP 非保存の存在を説明できることはわかったが，果たしてそれは正しいのだろうか？それを検証するためには，小林・益川理論のもとでの新たな予言が必要である．その計算を行ったのが三田氏らであり，1980 年初頭のことであった[9]．3 行 3 列の変換行列ではたった一つの複素数が存在するため，この複素数だけで全ての CP 非保存等を説明しなければならず，それだけ小林・益川理論に対する制限が厳しい．

1964 年に発見された CP 非保存は第 2 世代のクォークが関与する過程であったが，三田氏らは第 3 世代のクォークからなる「B 中間子」に注目した．B 中間子は生成後約 10^{-12} 秒で崩壊してしまう．三田氏らはその崩壊の時間依存性を測ると数十%の CP 非対称が期待できることを発見した．

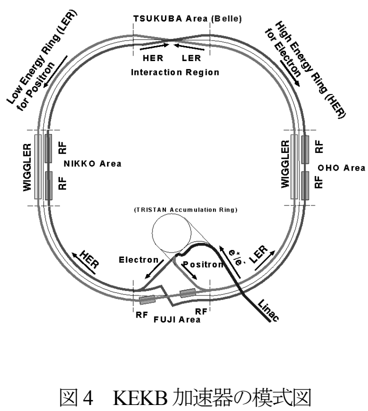


図 4　KEKB 加速器の模式図

しかしそれを実験的に検証するには二つの困難があった．一つは輝度（ルミノシティという）がこれまでの百倍以上の加速器が必要であること．二つ目はそのような短寿命の崩壊の時間依存性を測る方策と測定技術である．大輝度の加速器が要る理由は，大量の *B* 中間子が必要だからである．生成される *B* 中間子の数は輝度に比例する．年間 10^8 個以上もの大量の *B* 中間子を生成することが *CP* 非保存の研究のために必要である．なぜなら，*CP* 非保存研究のために *B* 中間子の特定の崩壊モードを見る必要があり，その崩壊確率が大変小さい($<10^{-4}$)ためである．*B* 中間子を大量に作るには重心系のエネルギーが 10.58 GeV の電子・陽電子衝突型加速器が必要である．その輝度は従来の加速器の最大輝度 10^{32} cm^{-2}s^{-1} の 100 倍，すなわち 10^{34} cm^{-2}s^{-1} が必要である．*B* 中間子と反 *B* 中間子は，その重心系では生成から崩壊までに約 10 μm しか走らない．そこで陽電子と電子を異なるエネルギーで衝突させる非対称エネルギー方式が提案された．すると生成された *B* 中間子は平均 200 μm 走って崩壊する．進展著しい半導体検出器を用いれば，その崩壊点を数十ミクロンの精度で測定できる．

三田氏らは加速器をもつ研究所に *B* ファクトリー（*B* 中間子を大量に生成する加速器）の建設を説いてまわった．その結果，1990 年代になってやっと，日本の KEK（現在の高エネルギー加速器研究機構）とアメリカの SLAC（Stanford Linear Accelerator Center）の 2 箇所に *B* ファクトリーの建設が決まった．それぞれ KEKB [10]（図 3，図 4）と PEP-Ⅱと呼ばれる．そしてそこで *CP* 非保存等を測る実験グループ Belle [10] と BaBar が結成された．測定器に対する要請は，生成される粒子を高効率，高分解能で検出し，粒子識別に優れていること，*B* 中間子の崩壊点を精度よく測定することなどである．Belle（図 5）と BaBar はそれぞれ独自の工夫を凝らした測定器を建設した．

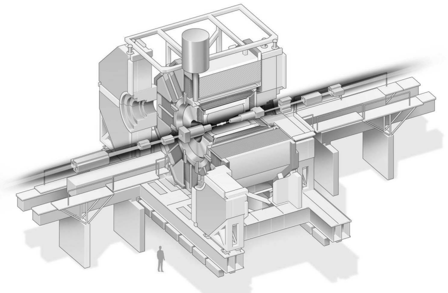


図 5　Belle 測定器

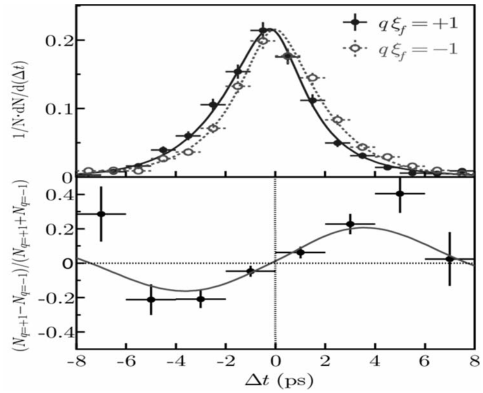


図 6　B 中間子に於ける CP 非保存

1999 年に実験が始まり 2001 年夏の国際会議で最初の *CP* 非保存の結果が両グループから発表された [11]．その結果は，三田氏らの計算結果，すなわち小林・益川理論による予言と矛盾しないものであった．その後さらに統計をためて得られた結果を図 6 に示す．図 6 上は，*B* 中間子（実線）と反 *B* 中間子（点線）の崩壊確率の時間依存性を，図 6 下は，その差の，和に対する比をプロットしたものである．*B* 中間子と反 *B* 中間子の振る舞いの違いを見てとれる．すなわち *B* 中間子系での *CP* 非保存の発見である．

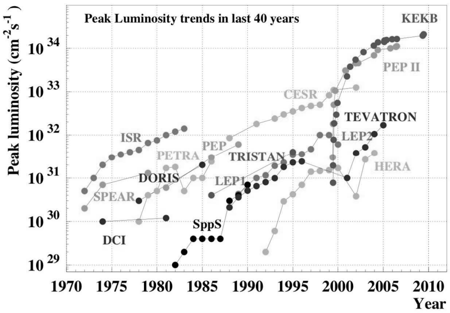


図 7 加速器とルミノシティの発展

KEKB-Belle と PEPⅡ-Babar はともに同じ目的をもつ仲間であるとともに大変なライバル関係にもある．PEPⅡ加速器は既存の設備をうまく使った結果，ビームコミッショニングは KEKB より半年ほど早かった．KEKB と PEPⅡのデザインの違いを表 1 にまとめる．従来の 100 倍の輝度を達成するために，数々の独創的なアイデアが考案され，実際に採用された．たとえば，PEPⅡでは電子・陽電子のビームを正面衝突させる「安全な」方式を採ったのに対し，KEKB では±11 mrad の有限角度で交差させる「野心的な」方式を採用した．ビーム交差後の

ビームの分離を容易にするためであったが，輝度が低下する恐れがあった．入念なシミュレーション計算によって，その効果は大きくないとの結論からの重大な決定であった．しかしながら，当初なかなかピークルミノシティは上がらず，PEPⅡの後塵を拝していた．蓄積ルミノシティもBelleはBaBarに遅れを取っていてBelleグループ関係者をはらはらさせた．しかし，加速器グループ，そして実験グループの不断の努力が実り，KEKBは世界一のルミノシティを更新し続け（図7），KEKB-Belle の積分ルミノシティはPEPⅡ-Babarを追い越し，そしてはるかに抜き去るに至った．PEPⅡ-Babarは所期の目標に達したとして2008年にシャットダウンすることになったが, KEKB-Belleの後塵を拝することになったこともシャットダウンの一因であろう．

表1　KEKBとPEPⅡのデザイン（達成）パラメータ

諸元	KEKB	PEPⅡ
場所	つくば，日本	カリフォルニア州，米国
エネルギー (GeV)（電子）	8	9
エネルギー (GeV)（陽電子）	3.5	3.1
設計（最高）輝度($10^{32}cm^{-2}s^{-1}$)	100 (210)	30 (120)
リング周長(km)	3	2.2
衝突角度 (mrad)	±11	0
衝突点収束マグネット	超伝導	永久磁石
加速空洞	超伝導と常伝導	超伝導

さて小林・益川理論であるが，*CP* 非保存を標準理論の中に収めることに成功したものの，*CP* 非保存の大きさまでは予言できない（すなわち，たった一つ現れる複素数の数値自身は予言できない）. だからいろいろな実験値を総合して，小林・益川理論に矛盾がないかどうかを判断する必要がある．図8は，小林・益川行列に現れる複素数の値について，いろいろな実験結果を総合したものである．小林・益川理論では，全ての値がこの複素平面上の1点に集中するはずである. 図8では, 三角形（ユニタリティ三角形と言う）の頂点付近が全ての測定結果を満足する領域であり，現在のところ数%の精度でそれが正しいことが見てとれる．

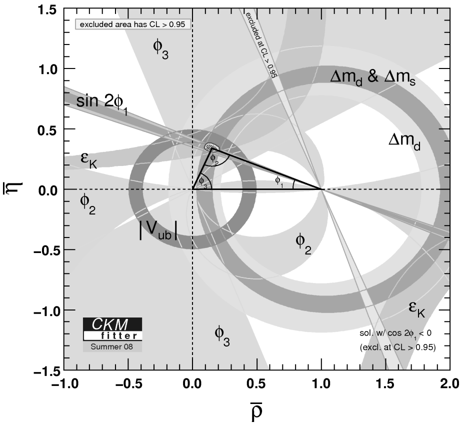


図8　小林・益川理論の複素平面と各種実験結果

ところで，物質・反物質の対称性について，宇宙規模の非対称性がある．宇宙を見渡す限り，反物質から成る銀河は存在しないという事実である．どうしてそんなことがわかるのであろうか？見える限りの宇宙には1兆個もの銀河が存在し，その銀河の間の空間は空虚である．しかし，空虚と言っても$1m^3$当たり1個くらいの水素原子等が存在する．銀河と銀河の空間には膨大な数の物質または反物質が存在する. もし, 反物質から成る銀河（反銀河）が存在すると，物質から成る銀河との境界では大量の物質と反物質が出会い，大爆発を起こしているはずである．そういう爆発現象は発見されていない．したがって，見える限りの宇宙には反物質から成る銀河は存在しない．ビッグバン宇宙論と*CPT*定理に依れば，宇宙誕生の初期には物質と反物質は等量生成された．宇宙が冷えるにしたがって物質と反物質は互いに消滅し合い，十分な量の物質（または，反物質）は残らない．計算に依ると実に11桁も足りない．とても現在のような，銀河で一杯の宇宙にはならなかった．そこで「宇宙初期に *CP* 非保存が働いたはずである」とサハロフが指摘した [12]．そのエッセンスを簡単に説明しよう．宇宙誕生の後，非常に重い*X*粒子と反*X*粒子は同じ数だけ生成されたが, *CP* 非保存によって，その崩壊生成物の粒子と反粒子の数に違いが生じたとする．小林・益川理論は，残念ながらこの宇宙規模の物質・反物質の対称性の破れを直接説明するものではない．しかし，小林・益川理論は標準理論の枠内で *CP* 非保存を説明することに成功し，宇宙規模の物質反物質の非対称性への謎解明に大きな手掛かりを与えたことも事実である．

6．南部理論について

最後に南部陽一郎氏の業績について概説する．南部氏

の業績は数多く，もっとずっと早くノーベル物理学賞に輝いても不思議ではないと皆思っていたが，今回の受賞で「遅かったけれどよかった」と皆納得した．でもなぜこんなに受賞まで時間がかかったのだろうか？まずはその仕事について見てみよう．1911 年にカメリング・オネス（Kamerling-Onnes）によって発見された超伝導現象はやっと 1957 年に BCS（Bardeen, Cooper and Schrieffer）理論によって説明されるに至った[13]．南部氏はこの理論を「場の理論」に書き直し，そこに「自発的対称性の破れ」が働いていることを発見した．自発的対称性の破れとは，系のもつ対称性が自発的に破れる現象を言う．簡単な例として，棒をまっすぐ立てたとしよう．棒は不安定で倒れてしまう．立っている状態でもっていた棒のまわりの回転対称性は，棒がある方向に倒れることによって破れた．物理的な例としては磁石がある．磁石をキュリー温度以上に熱すると磁石の性質が無くなってしまう．すなわち方向性をもたない．磁石が冷えてくると，ある方向に磁化する（実際は磁化の向きがそろった磁区の集まりとなる）．すなわち，自発的に方向性が現れた．

この自発的対称性の破れによって，南部氏は，陽子や中性子などに質量をもたせることが可能であることを発見した[14]．粒子が質量をもっていることは実験的事実だから，この理論は基本的過ぎて，ノーベル賞への道は遠かったのかも知れない．しかし，この「自発的対称性の破れ」を応用して，基本粒子であるクォークや電子などに質量をもたせる機構が発見され，標準理論が確立されるに至った．この機構（ヒッグス機構）が正しいかどうかはまだ明らかではない．2009 年 11 月に実験を開始する LHC（Large Hadron Collider）での検証が待たれる．

７．終わりに

以上，2008 年ノーベル物理学賞受賞に輝いた小林・益川理論，南部氏の理論の概要，意義，そしてなぜ受賞まで時間がかかったかについて概説した．物理学と数学の大きな違いの一つは，物理学の対象が自然そのものであることである．数学では美しい理論はそれだけで評価される．しかし，物理学では，それを「自然が採用」していなければ全く意味がない．それを検証するのが実験である．実験では，ハイテクを駆使した装置や工夫によって「自然」に問いかける．理論の予言を検証するのに，工学技術の進歩を待たねばならないことも多い．小林・益川理論の検証はまさにその典型例であった．逆に実験が新たな難題を発見することも多い．*CP* 非保存の発見はその好例である．発見された *CP* 非保存を説明しようとして小林・益川理論が生まれた．また，南部氏が発見，定式化した「自発的対称性の破れ」を応用した「基本粒子の質量生成機構」の正否は 2009 年 11 月実験開始予定の LHC での実験で明らかにされるであろう．そして，さらに，標準理論では説明できない新物理現象の発見が期待されている．標準理論は，小林・益川理論の *CP* 非保存パラメータをはじめ，25 個の任意のパラメータを内蔵する．そのような理論が究極の理論であるはずがなく，重力をも含む究極の理論に向けての発見が待たれる．

このような物理学の進歩は，工学技術の進歩と切っても切り離せない．物理学での理論と実験との切り離せない関係と同じように，物理学と工学との関係も切り離せない関係にある．すなわち，工学技術の発展が物理学の発展に大きく寄与し，その成果が，直接的または間接的に新たな工学技術の発展を促すのである．

参考文献

(1) 渡邊靖志，“核子崩壊の探索—物質の安定性”，工学研究所所報，30 号（2007－11），p.19.

(2) G. Lűders, kgl, Danske Videnkab, Selskab, Mat-Fys. Medd. ,28, No.5 (1954); W. Pauli, “Niels Bohr and the Development of Physics”, Pergamon, London, 1955.

(3) J.H. Christenson, J.W. Cronin, V. L. Fitch and R. Turlay, Phys.Rev.Lett.13,138(1964)

(4) T.D. Lee and C.N. Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956).

(5) C.S.Wu *et.al*., Phys. Rev. 105, 1413 (1957).

(6) L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. 13, 562 (1964).

(7) M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog, Theor. Phys. 49, 652 (1973).

(8) 三田一郎，“CP の破れ一新しい物理を探る“，工学研究所所報，29 号（2007－11），p.35 を参照のこと．

(9) A.B. Carter and A.I.Sanda, Phys. Rev. D 23, 1567 (1981); I.I. Bigi and A.I. Sanda, Nucl. Phys. B 193, 85 (1981).

(10) S. Kurokawa and E. Kikutani, Nucl. Instr. and Meth. A 499, 1 (2003)およびその中の論文.

(11) A. Abashian *et.al*. (Belle Collab.) Nucl. Instr. and Meth. A 479, 117 (2002).

(12) B. Aubert *et.al*. (BaBar Collab.) Phys. Rev. Lett. 89, 201802 (2002).; K.Abe *et al*. (Belle Collab.) Phys. Rev. D 66, 071102 (2002).

(13) A.D. Sakharov. Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5,32 (1967) (JETP Lett. 5 (1967)).

(14) J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).

(15) Y. Nambu, and G. Jona-Lasino, Phys. Rev. 122, 345 (1961).; *ibid*. 124, 246 (1961).

随想

メモリー効果

佐藤 祐一*

The Memory Effect

Yuichi　SATO*

はじめに

23年間お世話になった工学部を来年3月には去らなければならない。この間、約300名の卒研生諸君とともに、研究に励んできた。その成果の中身には忸怩たるものがあるが、とにかく何の制約もなく思う存分研究をやらせていただいたことに感謝の気持ちでいっぱいである。赴任した最初の年に研究室立ち上げのためにと、応用化学科予算の中から皆さんが出し合って、確か500万円ほど余分の予算をいただいた。これで最新の電気化学計測装置を購入することができ、おかげで1年目の終りには学会発表もすることができた。ありがたいことに研究予算は潤沢だった。これで研究費が少ないので研究ができないなどと言ったら罰が当たると思った。電気化学をベースに電池とめっきの研究を続けてきた。さて、研究内容にはいろいろのタイプがある。不思議な現象、新しい現象を見出し、その原因を究明する研究、新しい物質を合成して、そこに新機能を見出し、材料として実用化にまで持っていくような研究、データとしては貴重であるが、こうやったらこうなりましたといったあまり面白くない研究など様々である。物質合成が得意でなく、推理小説の好きな私にはおのずから解析的な謎解きのような論文が多くなった。その中でも研究の話をするとき、比較的多くの方から興味を持って聞いていただいたのが、表題のメモリー効果である。私としても思いの深いテーマだったので、ここで紹介したい。

メモリー効果とは

充電可能なアルカリ系二次電池内蔵のシェイバーや音響機器、電動ハブラシ等を使用中に、以前はもっと永く使えたのにと感じられた事はないだろうか。メモリー効果とは、ニッケル・カドミウム電池(Ni-Cd電池）やニッケル・水素電池(Ni-MH電池、M：水素吸蔵合金)のようなNi極を用いるアルカリ系二次電池において、全容量を使用しきらないで、短時間使用しては充電する操作を続けていると放電電圧が低下し、使用時間が短くなるという困った現象のことである。あたかも電池が短い使用時間を記憶したように見えるので、これをメモリー効果いう。不思議なことにこのような電池は強制放電して空にした後、充電することを数回繰り返すと正常の電池に復活する(リコンデショニングという)。しかし、電池は一般に機器に組み込まれており、ユーザーには強制放電など出来ないから、その機器は故障したと思われ破棄されてしまう。

ところで、今年は月に宇宙船アポロ 11 号が到着してから 50 年になる。当時から宇宙船には太陽電池で発電された電力の貯蔵のために Ni-Cd 電池が使用されていた。このころからメモリー効果は問題となっており、リコンデショニングの方法が検討された。その原因については、当初、この現象が Ni-Cd 電池に認められ、Cd 極に原因があるとされた[1,2,3]。すなわち、充放電を繰り返すと Cd 極が変形して、Cd の突起部がセパレータを圧迫し、正極との間でセミショートのような状態になるため、電圧が低下する。強制放電によって突起部を溶解させれば、容量は復活すると言われていた[1]。あるいは Cd 極で集電体の Ni と負極活物質の Cd との間に金属間化合物が生成するためであるとも言われていた[4]。したがって、Cd の代わりに負極として、水素吸蔵合金を使用する Ni-MH 電池ではメモリー効果はなくなると信じられていたが、やはりメモリー効果が現れた[5]。これらの様子を放電曲線で示すと図1のようになる[6]。曲線Aは正常の Ni-MH 電池の放電曲線、B は浅い充電と放電を300回繰り返したあとの放電曲線で放電電圧が低下しており、たとえば1.1Vまで使用可能な機器では作動時

＊ 教授　　物質生命化学科

Professor、 Dep. of Materials and Life Chemistry

間が短縮される。しかし、0.8Vまでの深い放電を行なったあと、再び充電することを繰り返すと正常な放電曲線(C, D)に近づくことがわかる(リコンデショニング)。これらのことより、メモリー効果の原因はNi極側にあると考えられていたが、その詳細は不明であった。

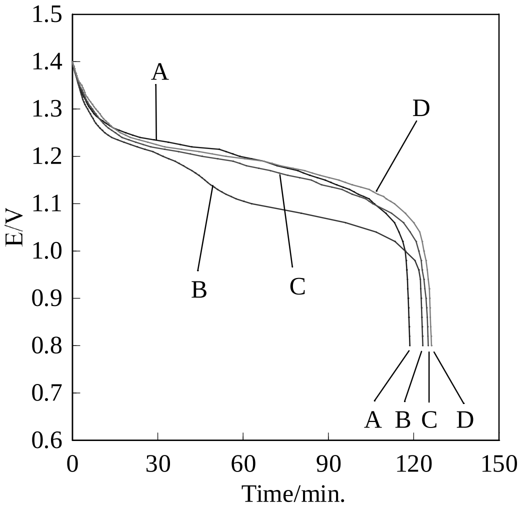


図1 単4形Ni-Cd電池の放電曲線(250 mA, 30℃)
(A) 正常電池, (B)-(D) 放電電流50 mAで1.2Vまで放電後, 充電電流25 mAで10 h充電することを50サイクル繰り返した後, (A)1回目, (B)2回目, C)3回目, (D) 4回目の放電曲線. (A)-(D) の放電終止電圧0.8V, 充電は25 mAで16h実施.

メモリー効果原因の究明[6,7,8]

1)　過充電によって発生するメモリー効果の原因[6,7,8]

メモリー効果の原因をさぐるためには確実にこの現象を起こさなければならないが、その条件を見出すのが難しかった。市販電池では、充放電に長時間を要するので、短時間にメモリー効果を発現させるために、市販のNi-Cd電池からNi極とCd極をとりだし、小型の電池を作製した。図2にはNi極容量規制のNi-Cd電池について、種々の状態の放電曲線を示す。正常な充放電を5サイクル繰り返した後の正常な放電カーブ(A)に比べて、浅い放電と充電を50サイクル繰り返した後の放電カーブ(B)では、明らかに放電電圧が低下し、メモリー効果の発生が示唆される。一見放電時間が長くなっていることから、容量は劣化していないように見えるが、作動電圧が低下していることから、本電池使用の機器に設定されている作動電圧の閾値(例えば1.2V)までの作動時間は短縮されることになる。次に浅い放電と充電を繰り返した後、0.8Vまでの深い放電と充電を繰り返すと(C、D)、電圧低下は解消され正常な状態(A)に近づき、メモリー効果が解消されることを確認した。

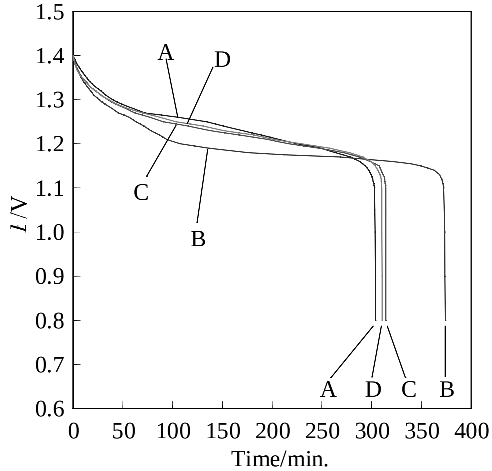


図2　ニッケル容量規制 Ni-Cd 電池の放電曲線 (4.4 mA cm^{-2}, 30℃)
(A) 正常電池, (B)-(D) 放電電流2.22 mA cm^{-2}で1.2Vまで放電後, 充電電流2.22 mA cm^{-2}で7 h充電することを50サイクル繰り返した後, (B)1回目, (C)2回目, (D)3回目の放電曲線. (A)-(D) の放電終止電圧0.8V, 充電は2.22 mA cm^{-2}で7 h実施.

一方、Cd極容量規制Ni-Cd電池の放電曲線は図3のようである。充放電サイクルテスト後の曲線Bには正常な場合に比べ、約40 mVの電圧低下が見られるが、Ni極容量規制電池の場合ほど著しい低下ではない。また、深い放電と充電を繰り返しても電圧の復帰は見られない(C, D)。このようなCd極表面のSEM観察を行うとCdの粒子径が大きく成長しているのが認められ、電圧低下は電極表面積低下に基づく電流密度の増大によるiR降下の増大によるものと考えられる。充放電サイクルテスト後のNi極とCd極の充電状態の電位を酸化水銀電極に対して測定するとNi極の電位のみ正常値より約75 mV低下していたが、深い放電を行った後充電すると正常の電位に復活した。これらの現象はメモリー効果の原因が主にNi極にあることを示唆している。図4は、充電状態のNi極のXRD回折パターンである。浅い放電と充電を5サイクル繰り返すと放電曲線は低下し、メモリー効果が表れるが、そのNi極BのXRDパターンは、正常状態のNi極Aのそれとほとんど一致しており、主としてNi, β-$Ni(OH)_2$とβ-NiOOHに基づく回折ピークのみである。しかし、この電極Bの表面を細かいメッシュのエメリー紙で削り取ると約13度、26度付近にγ-NiOOHに基づく(003)、(006)

回折ピークが現れ, さらに削るとそれらのピーク強度は増加した(B_D)。以上の事実は、浅い放電と充電を繰り返したとき、γ-NiOOH が Ni 極の集電体/活物質界面に生成し、

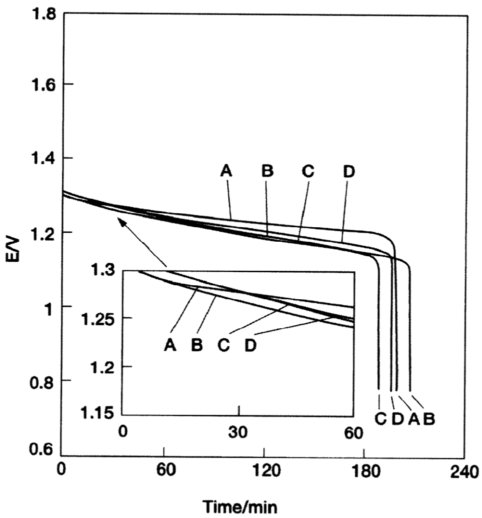


図３　カドミウム容量規制 Ni-Cd 電池の放電曲線(4. 4 mA cm^{-2},　30℃)

(A) 正常電池、(B)- (D) 放電電流 2. 22 mA cm^{-2} で 1.2 V まで放電後、充電電流 2. 22 mA cm^{-2} で 7 h 充電することを 50 サイクル繰り返した後、(B) 1 回目, (C) 2 回目, (D) 3 回目の放電曲線. (A)- (D) の終止電圧 0.8 V, 充電は 2. 22 mA cm^{-2} で 7 h 実施.

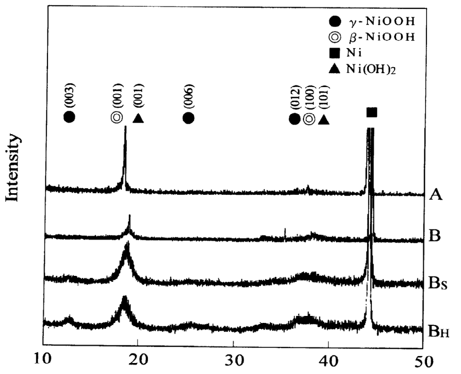
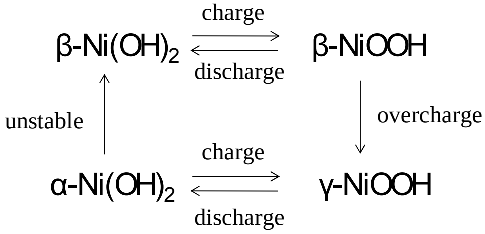


図４　充電状態のニッケル極の X 線回折図

A) 正常状態, (B) 浅い放電と充電を 5 サイクル繰り返した後の電極, (B_S)　(B)の表面を 0.11 mm 削り取った電極, (B_H)　(B)の表面を 0.17 mm 削り取った電極.

充放電サイクルの進行に伴って、溶液方向に向かって成長していくことを示唆している。これはγ- NiOOH が Ni 電極において過充電により、β- NiOOH を経由して生成すると考えられていること [9,10,11] とも矛盾しない。放電状態にあるβ- $Ni(OH)_2$ は次のように変化する [12] 。



すなわち、充電過程では、まず、電解液中の水酸化物イオンが活物質内部より拡散してきたプロトンと結合して、水分子となり、β- $Ni(OH)_2$ はβ- NiOOH に酸化される。放電過程はその逆である。正常状態ではβ- $Ni(OH)_2$ とβ- NiOOH の間で充放電が行なわれるが、β- NiOOH がさらに充電されるとγ- NiOOH に変化する。γ- NiOOH は放電によりα- $Ni(OH)_2$ となるが、この物質はアルカリ水溶液中では非常に不安定ですばやくβ- $Ni(OH)_2$ に変化する。γ- NiOOH とβ- NiOOH では化学ポテンシャルが異なり、γ- NiOOH を含む Ni 極の放電はβ- NiOOH の放電より負電位で進行することが知られている [13, 14, 15] 。これは Ni 極と Cd 極と組み合わせたとき、γ- NiOOH が存在すると作動電圧が低くなることを意味する。浅い充放電をくりかえした Ni 極を作用電極としてサイクリックボルタングラムを測定すると、β- NiOOH の還元に対応する還元ピークとそれより負の電位にγ- NiOOH の還元に対応すると考えらピークが現れた [16] 。γ- NiOOH には Ni^{4+} が含まれるため、その平均酸化数は 3 より高く、3. 6- 3. 67 に近いことが知られており [10, 17, 18]、β- NiOOH の酸化数は 2. 8 から 3. 2 である [10, 17, 18, 19] 。したがって、より Ni の酸化数の高いγ- NiOOH が存在すれば放電電圧は低いものの放電容量は大きくなり [12] 、実験結果をよく説明している(Fig.2, B)。この試作電池のみならず、メモリー効果を示した市販単 4 形の Ni- Cd 電池および Ni-MH 電池においても、おのおの充電状態の Ni 極からは、γ- NiOOH が確認された [8] 。また、数回の深い放電と充電を繰り返すことによって、メモリー効果は消失し、γ- NiOOH も検出されなくなった。したがって、メモリー効果発生の主原因は、過充電により Ni 極の集電体界面に生成するγ- NiOOH によるものと考えられ、深い放電と正常な充電を数回以上繰り返すことにより消滅する。

2) 部分充放電過程で発生するメモリー効果とその抑制の可能性[20、21]

ここ数年、ハイブリッド自動車(HEV)の普及が著しいが、その駆動電源として Ni-MH 電池が搭載されている。HEV は発進・低速走行、また急速加速時には電池からの電力をモーターに供給して走行する。一方、定常走行時には充電されると共に減速時にはブレーキの回生エネルギーを電池に蓄積するエネルギー変換システムが採用され、電池は充電されることになる。したがって HEV 搭載の電池は、電力受け入れ、放出特性を高めるために、満充電にならないように未充電部分を残しつつ一定の電気量を保持しながら、部分的な充放電を繰り返すことになる。そのため、過充電とはならないのでメモリー効果は発生しないと予想されたが、やはり発生し、γ- NiOOH が検出された。これは、見掛け上過充電とはならなくても、導電材が均一に分散していないため、局部的に過充電になるためであろう。$Ni(OH)_2$は電導性に乏しいから、一般に Co 化合物が導電材として添加されている。もし、$Ni(OH)_2$粒子の中に、導電性粒子である Co 化合物と未接触の孤立したβ- $Ni(OH)_2$粒子が存在すると仮定すると、充電時には先ず Co 化合物と接触しているβ-$Ni(OH)_2$粒子がβ- NiOOH に酸化されよう。その後、Co 化合物と接触していないβ- $Ni(OH)_2$が電極中に存在するにもかかわらず、そのβ- $Ni(OH)_2$ がβ- NiOOH へ酸化されるより先に、導電性ネットワークの発達した部分で先に生成したβ- NiOOH がさらにγ- NiOOH へ優先的に酸化されると予想される。したがって、部分充放電サイクルを行なうと導電性ネーッとワークの発達した部分における充電電流の局所集中化により Ni 極のある部分のみにγ- NiOOH が生成し、メモリー効果が発生するものと考えられる。この機構を確認するために、$Ni(OH)_2$ 中にナノメータから、マイクロメータの異なる粒子径の $Co(OH)_2$ を一定量添加した数種類の Ni 極を作製し、充電深度 50～70%の部分充放電サイクル試験を行った結果、粒子径の小さい $Co(OH)_2$を含む Ni 極ほどメモリー効果が起こりにくいことが確認された。図 5 はマイクロメータオーダとナノメータオーダの導電材($Co(OH)_2$)を含む 2 種類の Ni-極を用いた電池の放電曲線で、a は正常状態、b は充電深度 50-70 %で 100 サイクルの部分充放電テストを行なった後の放電曲線である。Ni 極内の $Ni(OH)_2$ 含有量は同一であるにもかかわらず、ナノメータオーダの導電材を使用した Ni 極からなる電池 B の方がマイクロメータオーダ導電材を使用した Ni 極からなる電池 A よりはるかに高容量を示している。これは電池 B の方が活物質の利用率が高まったことを意味している。さらに、電池 A, B の放電曲線 b を見ると a より、電圧が低下している。すなわち、100 サイクルの部分充放電により、メモリー効果が発生しているが、作動電圧の低下度合いは

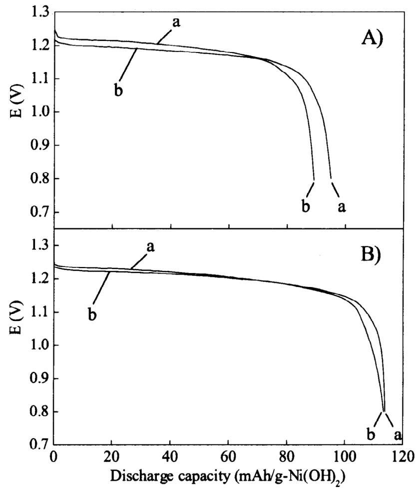


図 5　ニッケル容量規制 Ni-Cd 電池の SOC 50 %からの放電曲線(0. 2 C レート, 30℃)
a) 正常電池, b) SOC 50- 70 %で 100 サイクル充放電後(0. 2 C)、 A) ニッケル極にマイクロメータサイズとナノメータサイズのコバルト化合物を含む, B) ニッケル極にナノメータサイズのコバルト化合物を含む.

電池 B の方が少ない。これら二つの事実は、ナノサイズ導電材の方がマイクロサイズ導電材より均一に活物質内に分散しており、電極 B の方がより優れた導電性ネットワークを形成しているので、電極 B を用いた電池の方が電極 A を用いた電池よりメモリー効果が起こりにくいだろうという予想を裏付けた。したがって、Ni 極内に導電材を均一に分散させ Ni 極活物質の利用率を高めることによって、過充電により発生するメモリー効果は阻止できないが、部分充放電サイクル使用時に発生するメモリー効果はある程度抑制できる可能性があることがわかった。以上の内容は、Elsevier 社から著書として 10 月発行される予定である[22]。

メモリー効果から連想されること

われわれ人間社会にもこのようなメモリー効果が存在するような気がしてならない。毎年、卒業研究のために研究室に入ってくる学生諸君をみていると、永年にわたって、君の力はこのくらいと思い込まされた、あるいは自分で勝手に思い込んできた学生のなんと多いことか。

もっとやればできるのにと歯がゆい思いをすることがたびたびである。このような学生を変身させるチャンスが「卒業研究ではないか」と考え、種々試みるのであるが、力およばずということを繰り返してきた。中には時々大化けする学生がいる。組織においても同じであろう。うまくいった方式を永年にわたって安易に繰り返してきた結果、周囲の状況が変わって制度疲労を起こし、これをなんとかしなければと必死なのが昨今の諸状況ではないだろうか。失礼ながら我が工学部もその範ちゅうにいるような気がしてならない。工学部再構築のために変身しようではありませんか。

文献

1) C. Lurie, *Extended Abstract of 15th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, p. 634 (1980).
2) S. F. Penseabene and J. W. Gould, *IEEE Spectrum*, *Sept.* p.33 (1976).
3) R. Barnard, G. T. Crickmore, J. A. Lee, and F. Y. Tye, *Power Sources* (ed. D. H. Collins), Vol. 6, p. 161 (1976).
4) T. R. Crompton, *Battery Reference Book*, 19.1.2, Butterworths, London (1990).
5) S. Venkatesan, M. Feteenko, B. Reichman, D. Magnuson, and S. K. Dhar, Proceedings of the 33rd International Power Sources Symposium, Cherry Hill, NJ, June 13-16, p. 476- 488 (1988).
6) Y. Sato, S. Takeuchi, S. Magaino, and K. Kobayakawa, *Bull. Chem. Soc. Japan,* **73**, 1699-1773 (2000).
7) Y. Sato, K. Ito, T. Arakawa, and K. Kobayakawa, *J. Electrochem. Soc.,* **143**, L225-L228 (1996).
8) Y. Sato, S. Takeuchi, and K. Kobayakawa, *J. Power Source,* **93**, 20-24 (2001).
9) P. Oliva, J. Leonardi, J. F. Laurent, C. Delmas, J. J. Branconnier, M. Figlarz, F. Fivet, and A. de Gulbert, *J. Power Sources*, **8**, 229-255 (1982).
10) D. A. Corrigan, and S. L. Knight, *J. Electrochem. Soc.*, **136**, 613-619 (1989).
11) A. N. Mansour, C. A. Melendres, and J. Wong, *J. Electrochem. Soc.*, **145**, 1121-1125 (1998).
12) H. Bode, K. Dehmelt, and J. Witte, *Electrochim. Acta,* **11,** 1079-1087(1966).
13) N. Yu. Uflyand and S. A. Rozentsveig, Sbornik Rabot po Khimicheskim Istochnikam Toka, p. 180, No. 3, Energiya, Leningrad (1986).
14) R. Barnard, C. F. Randel, and F. L. Tye, *J. Electrochem. Soc.*, **119**, 17-24 (1981).
15) L. H. Thaller, A. H. Zimmerman, and G. A. To, *J. Power Sources,* **114**, 309-319 (2003).
16) M. Morishita, K. Kobayakawa, and Y. Sato, *ITE Letters*, **6**, 22-26 (2005).
17) R. Barnard, C. F. Randell, and F. L. Tye, *J. Appl. Electrochem.* **10**, 109-125 (1980).
18) A. V. D. Ven, D. Morgan, Y. S. Meng, and G. Ceder, *J. Electrochem. Soc.*, **153**, A210-A213 (2006).
19) W. E. O'Grady, K. I. Pandya, K. E. Swinder and D. A. Corringan, *J. Electrochem., Soc.*, **143**, 1613-1616 (1996).
20) M. Morishita, S. Shikimori, Y. Shimizu, A. Imasato, H. Nakamura, K. Kobayakawa, and Y. Sato. *Electrochemistry*, **74**, 532-535 (2006).
21) M. Morishita, Y. Shimizu, K. Kobayakawa, and Y. Sato, *Electrochim. Acta,* **53**, 6651-6656 (2008).
22) Y. Sato, Memory effect of nickel electrode, "Encyclopedia of Electrochemical Power Sources", ed., J. Garche et al., Elsevier, 2009.

随想

IE の理論と実際の統合教育 40 年

上野　俊夫*

Forty Years Doing Synthetic Education Between Theory and Practice of Industrial Engineering

Toshio UENO*

1．はじめに

神奈川大学が IE 関係の学科を創設したのが、昭和１４年（１９３９年）ということであるが、これは日本では早稲田大学と並んで最も古い伝統を持っている学科ということになる。この学科を具体的に実施に移したのは上野陽一先生であると聞いている。私はこの事実を知ったとき、運命みたいなものを感じた。すなわち、私は昭和１４年生まれであり、名前は上野である。だから私が大学に残った頃、よく上野先生の関係者ではないかと言われた。しかし全く関係はないのである。それでも生まれ落ちたときから、何か上野先生と見えない糸でつながっているのではないかと思うほど、因縁めいたものを感ぜずにいられないのである。

それはさておき、私は神奈川大学の経営工学科（当時は工業経営学科）に入学して以来、今日まで約５０年間（半世紀）IE 関係の学問に接してきたのである。学生時代の４年間と助手時代の６年間を経て、専任講師以上の教員になり、学生への教育に本格的に関与して今日までの４０年間、この IE に関する教育を一貫して理論と実際を通して行ってきた。４０年間といえばかなり長いようであるが、私にとっては無我夢中の４０年であり、研究や教育には、まだかなりやり残したという印象である。ここで特に、私が学生に対して関与した IE 教育の理論と実際を振り返り、私の学生との大学生活のまとめとしたい。

*教授　情報システム創生学科
Professor, Dept. of Information Systems Creation

2. 駆け出しのころの私と IE

私が助手として大学に残った頃の本学の IE(Industrial Engineering)教育は、狭義の IE（作業研究)を中心としたカリキュラムで行われていた。したがって私も助手として駆け出しの頃、教授の先生からまず作業研究に関する研究をしなさいと言われ、すなおにその方向で研究を始めたと記憶している。ただ私がそのころ IE に関して一つ不安を感じていたことは、IE はアカデミック的な研究ではなさそうだ、せっかく大学に残ったのであるからアカデミックな研究をしたいという考えを持っていたので、その点でやや不満でもあった。しかしそのことについて教授から「上野君、IE は実際の企業の業務から発生してきたものだから、実際の現場も知らないで理論研究したって無意味であり、真の研究にはならないよ」と言われ、最初は半信半疑であったが、ある時ある工場の現場を観測していたとき、ふとその観測の従来からの理論が実際に欠けている面があることに気づいたのである。そこでその実際をよく観察してそれにより適合する理論を開発することによって、その理論が従来の理論よりも実際にかなっていることが証明され、若手研究者に与えられる「論文奨励賞」という研究のスタートとして励みとなる賞をとることができたのである。それ以来私の IE に対する不満、不安は解消し、積極的に現場を見ることによって研究を進めるという考えを持ったのである。この考え方が専任講師に昇格して卒業研究という科目を持ったとき、卒論生に対して「理論と実際の統合教育」という形で、約４０年間実行してきたと思っている。

3. 初期の理論と実際教育

卒論生を持ってしばらくの間、私は学生に対して狭義の IE である作業研究の技法を指導しながら実際の製造現場にそれらの技法を適用させ、学習した理論が実際を通してどのくらい理解できたか、また実際との違いや問題点はどこにあるのかを考えさせることによって、理論と実際の統合教育をスタートさせた。現場に入った学生は当初、当然のことであるが実際を知らないので、これまで本や黒板から学習した知識と理解が、いかに不十分なものであったかを思い知らされ戸惑いの境地に陥っていたが、何日も現場に入って実習調査研究(通常夏休みの１ヶ月間)しているうちに、本に書いてあったこと、黒板で習ったことが次第にわかるようになり、実習期間が終了するころには学習した理論を実習工場に応用した資料をまとめられるところまでできるようになっていた。これらの資料と学習した理論を基にして卒業論文の作成が終了するころ、多くの学生から「先生、もし自分があともう１年卒業論文をやったら、もっといろいろなことがわかりすばらしいものに仕上げられます」という言葉を聴くたびに、スタートさせた自分の理論と実際の教育は、よかったのだと確信することができた。しかし最初のころは、自分の方もまだ企業の実際には十分精通しているとはいえず、自信を持って学生を指導するには不十分であると反省せざるを得ない日が多々あった。

4. IE 教育の拡大

上述するように私の初期の IE に対する研究・教育は、作業研究という狭義の IE に属するものであったので、かなりその範囲が限られていた。しかし企業の実際を見ているうちに、もっと範囲を広げる必要を感じはじめていたのである。学生教育をはじめて１０年以上経ち理論と実際教育も板についてきたころ、引退する先生の科目を担当する番が回ってきた。それは「生産管理」という科目で、IE の学問ではより広い範囲を扱う科目であったので、私にとって渡りに船であった。この時点から私は自己の研究と学生への理論と実際の統合教育を、より広い範囲の IE によって行うことになったのである。

学生の企業実習調査研究に対する実習先企業の反応は、おおむね良好であり、特に「自分たち企業人は、ともすると日常の業務に埋没していろいろな問題点を見過ごしてしまっているが、素人であるが学生がまったく違った新鮮な目で見てくれることによって、思わぬところの問題点を指摘してくれるという点に価値が見出せる」とよく言われた。このような評価に私はますます自信を持ち、企業実習を積極的に進めたのであるが、最初はある限られた企業(私が知っていて実習のお願いができる企業)しか学生へ提供できなかったが、そのうち学生の就職の決定が早く(５月末まで)なってきたころ、それぞれ就職が決まった企業へ実習のお願いをしたところ、快く引き受けてくれるところがほとんどであったので、そのとき以来私は基本的に学生の就職した企業にお願いすることにしたのである。

5. 実際教育の難しさ

企業実習調査研究の指導で難しいことは、理論と実際に逆の乖離がある場合、学生はあくまでも理論と対応させて自己の研究を進めているので、もし自分の改善案が実際よりもよい数値になれば、うまく改善したという結論を出してしまうことである。しかし会社側からするとそのような実際の数値になっているのは、理論とは別の会社の方策からのもので、やむを得ずそのような結果となっていると主張された場合、学生にはその事を理解するのは難しい。なぜ理論的にはそうでならなければならないのに、それとは逆の結果になってしまっているのだろうかというような疑問を払拭することができず、悶々としているのを見かけるにつけ、わたしは授業で教えている理論の限界を感ぜざるを得なかった。このような時私は学生に対して、「企業の問題には理論を超越したその企業の政策（たとえば、協力企業との関係、政治的・政策的な関係など）があるので、そのような結果となる場合もあるが、このことは君たちが実際に企業で働くようになればわかるでしょう」ということで、その場を凌いでいるのである。

またこのような状態とは逆の現象が起きることもある。それは学生があまりにも企業の実際を表面的に捉えて、自ら「そんなことは実際にはムリだ」「そんな改善は実際にはできない」と考えてしまうような、せっかく企業人とは異なる新鮮な目で見て問題点を指摘し、改善案を出すという芽を摘んでしまうような状態が生ずるのである。このようなときには私は、「そんな否定的なことは言わず、とにかくどんな改善案でも（それが実際的でなくても）よいから出して見なさい」と言って、学生の改善欲を失わせないようにしている。それによって学生が出した改善案は、たいてい企業人に否定されることはないのである。問題解決の科学的アプローチの手順中にも、「問題に対する改善案を出すとき、まずこんな案は不可能だとか、実際的でないなどと最初から制約条件を課してはならない」ということが述べられている。したがって私は学生に対して、科学的アプローチのことを思い出させ、説得するようにしている。これに対して直に納得する学

生もいれば、なかなか納得しない学生もおり、この点で理論と実際の双方から統合して教えることは、それほど容易ではないと実感した。

6．対象企業の拡大

IE の考えはどんな企業にも適用できることは以前よりわかっていたが、昭和の時代は、学生の実際教育の対象は製造業であった。もちろん IE は第２次産業である製造業から発生したのであり、したがって多くの製造企業では生産性の向上を図るべく、大いに IE の考えを採り入れていたので、学生への実際教育も製造業中心になったのは必然的な帰結なのである。しかし将来は別な業種にも適用したいと、かなり以前から思っていた。

私は若い頃から旅行好き温泉好きで、いろいろな地方のいろいろな旅館に泊まることが好きだったので、これまでにかなり多くの温泉旅館に泊まった経験がある。それらの旅館に泊まったとき、私の専門である IE の考えがつい頭をもたげて来て、そこで働く従業員の仕事ぶりを見るにつけ、何と非効率的なやり方をしているのだろうか、だから顧客に対するサービスも悪くなるのは当然であると思ったのである。いくつかの旅館でそのようなことを考えている内に、何とか旅館業にも IE を適用して作業の改善を行い、そこで働く従業員にもっと仕事（顧客への直接的なサービスとは関係しない仕事）を効率的にやってもらい、楽になり余った時間を顧客の直接的なサービスに振り向けたら、顧客満足が向上し、その旅館の評価も上昇するのではないかと考えたのである。昭和の終わり頃、ふとしたきっかけである大きな旅館の社長が、「ウチの旅館にも製造業のような進んだ仕事のやり方を適用し、もっと効率を上げるために IE を適用したい」と言うことを聞いて、運よくその社長とお会いすることができ、早速そこで私の考えている IE のやり方を適用したのである。そのころの現状の多くの旅館（現在でもそうと思われる）では、残念ながら IE の適用など考えている経営者はいないようで、その実態は従業員が汗水流して一生懸命働いている割には、能率は上がらず、したがって顧客に対する直接的なサービスも十分できず、顧客不満足の原因になっていたと思われた。

旅館業の仕事を見てみると、顧客への直接的なサービス（例えば、フロントでの挨拶、種々な案内、食事でのもてなし、など）以外はかなり製造業と共通している部分があることがわかった。すなわち、夕食や朝食などの料理作り、それを客室や宴会場や食堂に持って行く運搬作業など、大いに製造業と共通しているのである。したがってこれらの仕事に IE の適用によって、効率を上げるような改善を行うのは容易であった。そこで平成の時代になって製造業の他に、旅館業にまで学生の実際教育を拡大したのである。

さらにそれと前後してスーパーやコンビニ、デパートなどの販売サービス業や病院などの医療サービス業などにも適用し、学生への実際教育を広げていったわけである。

7．IE の理論と実際の統合教育の重要性

IE は単に机上の理論だけで教育しても不十分であり、あまり学生に実力を付けることはできないし、新たな方向へと応用・拡張させることはできないと考えている。理論を学び実際を知ることによってのみ、それを達成することができると思っている。

たとえば、IE の技法の中に「ラインシステムの設計」というものがあり、この技法を単に机上だけの理論として習うとすると、その基本理論は、対象作業の全体（たとえばある組立製品を作る場合のその組立作業の全体）をいくつかの工程に分割し、各工程を遂行する作業時間をできる限り同じ時間になるように、全体の作業をうまく割り当てるという考え方である。学生がこの理論を学んで企業の実際に適用したとき、確かに理論上はうまく割り当てられたのに、実際にその案を作業者にやってもらうと、期待していた効率とはかなり違って、効率がダウンしている状況を呈した。そこでなぜこのようなことが起こるのかという疑問が出てくるわけである。このような疑問は単なる机上の理論だけでは生じないのである。そこでこの疑問を解決するための実際上の探求が行われ、それは作業者の技量の違いや心理的なことに原因しているということが明らかにされるのである。そのことは学生に単なるライン設計の純粋理論だけでなく、ものづくり技術や心理学の方向まで拡張して考えなければ、実際にはうまく適応できないことを学修させることができるのである。

だから IE は多くの場合、問題解決に単なる純粋な単一理論だけでなく、他のいくつかの理論や考えを導入しなければならず、そのことを見いだすには、実際を見なければならないのである。ここに IE の理論と実際の統合教育の重要性があると考えている。

なぜそのような統合的な考えを使って解決しなければならないのか。それは IE が解決する企業問題の多くには、「人間」という要素が絡むからであり、その人間は単なる純粋理論では解決できない要因をはらんでいるからである。このような点からも学生に理論と実際の統合教育をする難しさはあったが、やってよかったと思ってい

る。

8．おわりに

IE の理論と実際の統合教育を４０年あまりやってきたが、必ずしも十分な教育ができたとは思っていない。それは前述した IE の問題解決には、複数の理論・考え方が必要となるからと考えられる。そのような複数的なものを、完全に配慮して学生に教育することは、至難なことと言わねばならない。しかしそうであるからこそ問題解決の更なる探求の必要性を､実際を通して私自身は、身をもって体験できたと考えている。

最後に私がこれまでやってきた理論と実際の教育が、社会に出て行った学生たちから、少しでも役に立っていることを聞けたことは、なによりも嬉しく思っている。

随想

何でも見える磁気共鳴（NMR）に魅せられて

高山　俊夫

Being attracted to NMR in which it is possible to see even in what

Toshio TAKAYAMA*

＜はじめに＞

私の研究の一つに、固体 NMR（Nuclear Magnetic Resonance）を用いた解析があります。NMR というのは、核磁気共鳴という現象を利用した分光法の一種で、液体を対象とした溶液 NMR と、固体を対象とした固体 NMR とがあります。身近な例では、病院で利用されている、体を輪切りにした画像が撮影できる MRI があります。あれは、まさに NMR の原理を利用した装置です。つまり、あんなふうに液体や固体の分子構造などを、さまざまな角度から知ることができるのです。ですから、私はNMRのことを"何でも(N) 見える(M)レゾナンス(R)"なんて呼んだりしています。

＜NMR の歴史＞

NMR が出現してから６５年間、この装置は物質を扱う研究者にすばらしい情報を与えつづけています。とりわけ超伝導磁石とフーリエ変換法の出現は NMR 装置に画期的な性能を付与したといえます。このような装置上の発展（高磁場、高出力装置）に加えて最近では高性能コンピュータを駆使したソフトウエア技術も飛躍的に発展し、低濃度の試料および感度のわるい核種の観測をも可能にしてきました。さらには固体状態でも高分解能 NMR スペクトルが測定できるようになってきています。

＜多核 NMR＞

これまで NMR といえば^{1}H,^{13}C 核を中心とする NMR 法が主体であり、それ以外には^{19}F,^{31}P 核が感度のよいことから早くから観測されていましたが、その他の核種はほとんど観測が行われませんでした。しかし、最近

600MHzNMR装置

の装置の発展によって周期表のほとんどの元素核（多核種）の NMR が測定可能となりました。

＜NMR の背景＞

多核種 NMR を理解するためには「錯体化学の基礎」の知識は必要であります。このことを裏返ししてみると錯体化学を理解するためには多核種 NMR の知識が必要になるということでもあります。私が NMR に魅せられたのも錯体化学を深く理解したいがためであったともいえます。

＜NMR の原理＞

NMR スペクトルを測定して得られる情報はきわめて豊富であります。観測される信号または共鳴線には化学シフト、スピン－スピン結合定数、緩和時間の３つの情

*准教授　神奈川大学物質生命化学科
Associate Professor, Material and Life Chemistry

報量が含まれています。

化学シフトは注目する核の周りの電子状態に依存して変わります。たとえば最も単純である^{1}H 核の場合には、s 電子の影響しか受けませんが、これよりもっと質量数の大きい^{13}C 核では、s　電子のほかに p 電子の影響を受けるので、両者の化学シフトの様相は、当然異なったものになります。^{1}HNMR の化学シフトの範囲は、約 15 ｐｐｍ程度でありますが、^{13}CNMR のほうは、約 300 ｐｐｍにも及びます。^{13}C 核よりさらに質量数の大きな核の NMR, たとえば^{31}PNMR も比較的広いシフト範囲（820ｐｐｍ）をもちます。一方、金属核の^{59}Co NMR(1800ｐｐｍ)、^{195}Pt(15000ppm),^{199}Hg(3000ｐｐｍ）等はきわめて広いシフト範囲を有しています。

＜測定した核種＞

私は、この多核種 NMR を利用して、^{1}H, ^{2}H, ^{7}Li, ^{13}C, ^{15}N, ^{23}Na, ^{27}Al, ^{29}Si, ^{31}P, ^{51}V, ^{59}Co, ^{65}Cu, ^{113}Cd, ^{119}Sn, ^{119}Hg, ^{195}Pt, ^{207}Pb 核の測定を対象に解析してきました。

＜抗がん剤の研究＞

研究成果の一例を示しますと、抗がん剤である白金化合物をつくり、その抗がん剤の中心にきちんと白金が配位しているかどうかを固体 NMR を測定し明らかにし、抗がん効果を裏づけることができました。このように NMR による解析は、製品の裏づけをとり、後押しすることにも活用できるのです。

＜さめない魅力＞

学生時代からずっと NMR を使った研究をしてきましたが、今もその魅力は尽きません。非破壊で構造が見られる点と、多核を見ることができる点に、何よりも面白みを感じています。

＜機能性シリコンの構造解明＞

無機高分子であるポリジメチルシラン（ＰＤＭＳ）の構造解析に固体 ^{29}SiNMR を効果的に利用した例をスペクトルを交えて紹介します。

＜PDMS について＞

ＰＤＭＳは紫外線を照射すると Si-Si 結合が切断されることを利用してレジスト等の材料として使用されているものでありますが、固体^{29}SiNMR の基準物質としても利用されています。

＜^{29}Si 核について＞

^{29}Si 核は核ピン I=-1/2 で、天然存在比は 4.67％であり、^{13}C に対する総合相対感度は 2.09 であります。I=-1/2 の核種の緩和時間(T_1)は一般に長く、^{29}Si の T_1 は 2～150 秒と特に長いため繰り返し測定時間に注意を払う必要があります。

＜固体 NMR の特徴＞

JEOL 製 EX-270 装置を用いて固体状態での^{29}SiNMR 測定を行いました。固体状態で測定するのはありのままの PDMS の真の姿を見るためであります。溶液状態では得られない構造や固体状態での構造変化などを明らかにするために、室温から 150℃までの範囲で測定を繰り返し行いました。

＜PDMS の ^{29}SiNMR スペクトルの問題点＞

PDMS は ^{29}SiNMR の基準物質として安定な物質でありますが、室温で高磁場（右側）側にブロードなピークが観測されていてピークの左右の位相が決めにくいことが欠点として指摘されていました。このブロードなピークが一体何なのかと長い間、謎として残っていました。この謎の解明に挑戦したのがこの研究です。
合成した PDMS の化学構造を図１に示します。

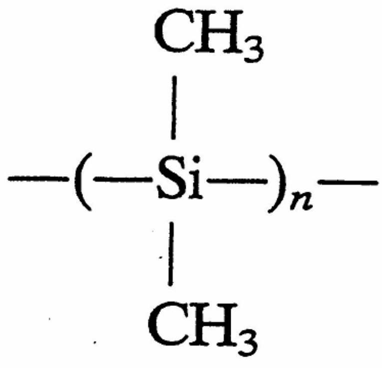


図１　ＰＤＭＳの化学構造

＜固体 NMR 測定条件＞

PDMS を専用のセラミックス製測定試料管に入れ、試料管を 6,000 回／秒に高速回転(MAS)して、室温から徐々に昇温し、一定の温度になるまで十分な時間を保持してから、クロスポーラリゼーション(CP)パルス条件にて測定を開始しました。そのスペクトルを図２に示します。この測定方法を^{29}SiCP/MAS NMR 測定といいます。

CH_3 基に置換している ^{1}H核の磁気効率を ^{29}Ｓｉ核に移して ^{29}Si 核の感度向上に役立てている方法です。この方法の発見によって固体 NMR 法が飛躍的に進展しました。

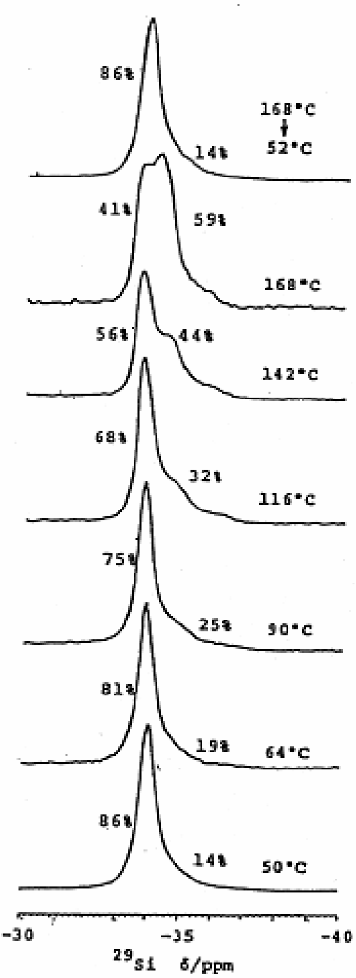


図２ ^{29}Si-CP/MASNMR スペクトル

＜^{29}Si-CP/MASNMR スペクトルの特徴＞

110℃付近で高磁場にブロードなピークが出現し始め、さらに温度を上昇すると、高磁場側のピークが大きくなりました。測定が終了後、降温したときのピークはまた室温のピークと同じになりました。このことは PDMS の構造が温度可逆であることを示しています。

＜量子化学計算の必要性＞

このピークの変化は構造の変化によっていることは明らかでありますが、それが何に由来するのかを理論的に理解する必要があります。そこで、量子化学法を用いた分子軌道法（FPT/CNDO2）を開発し、そのプログラムを用いて化学シフトの計算を大型計算機にて行いました。

＜モデル化合物での理論計算＞

計算は数多くのモデル化合物を想定して長時間の計算を行いました。その結果の一例として、モデル化合物として n-デカシラン($n\text{-}Si_{10}H_{22}$)を用いての計算結果を図３に示します。n-デカシラン($n\text{-}Si_{10}H_{22}$)のほぼ真ん中の Si(4)-Si(5)-Si(6)-Si(7)の Si-Si 結合軸(5,6 位)の角度を少しずつ変化させて、量子化学計算を行いました。横軸に結合角度、縦軸に計算化学シフト値を示してあります。

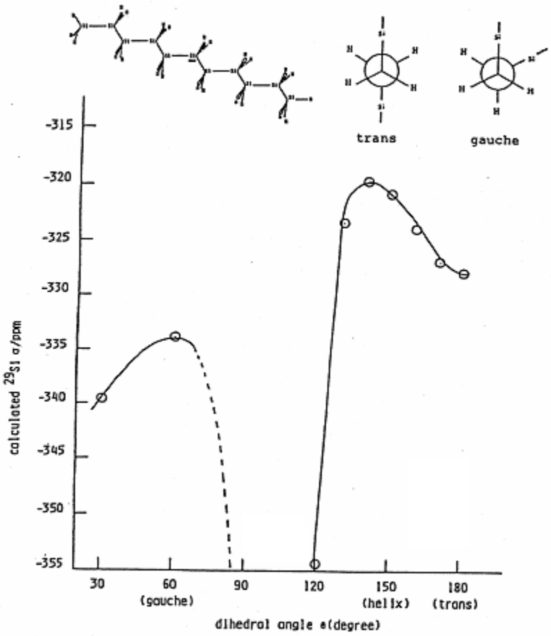


図３　量子化学計算による ^{29}SiNMR 化学シフト

その角度がゴーシュ角度(60^0)の化学シフトはトランス角度(180^0)より高磁場シフト（負の値が小）することが分かりました。すなわち、Si-Si-Si-Si 結合のコンフォメーションによって化学シフトが異なることが分かりました。

なお、角度 90～120^0 間では量子化学計算値が発散していました。これは Si(4)-Si(5)-Si(6)-Si(7)結合による立体障害のためと考えられます。

＜量子化学計算から得られた結論＞

この量子化学計算の結果から、高磁場シフト(右側)はゴーシュ構造に起因していることが分かりました。

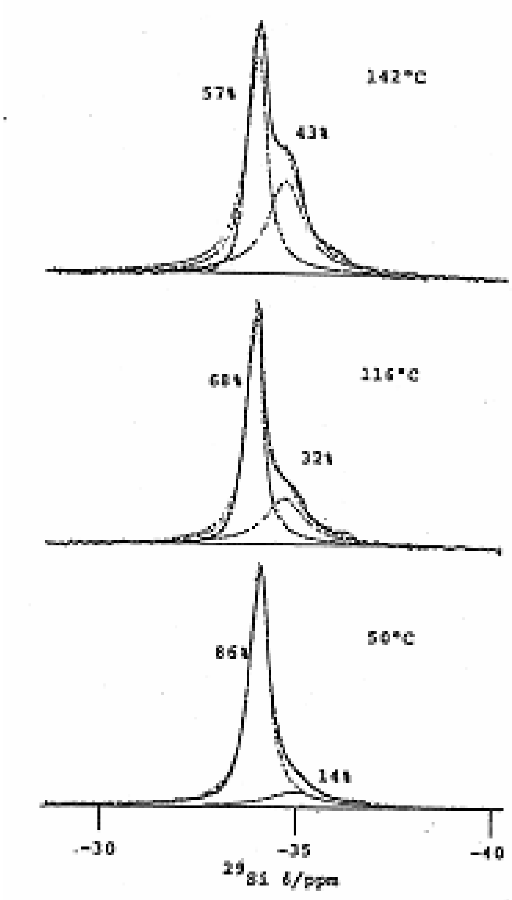


図４　ガウス関数を用いて計算したNMRシグナルの線形解析

量子化学計算の結果、このモデル化合物の^{29}SiNMR化学シフトはトランス構造とゴーシュ構造の２成分からなることが分かりました。

＜スペクトルの線形解析＞

そこで、NMR スペクトルの線形解析プログラムのうちのガウス関数を用いて計算した NMR シグナルの線形解析結果を図４に示しました。

その結果、昇温に伴ってゴーシュ構造の割合が増加していることが定量的に得ることが出来ました。

＜むすびに＞

以上のように、大学、メイカーまでも巻き込んで論争した、

「PDMS の高磁場側のブロードピークは何なのか？」の長年の論争・疑問に対して温度可変固体^{29}SiNMR 測定、スペクトルの理論的解明に量子化学計算の導入を行って決着をつけることが出来ました。

これは固体 NMR 研究者の多くが参加している国際学会でも認められた、画期的な発見であったと自負しております。

２３号館Ｂ１NMR室

この部屋で何百時間、何千時間過ごしたことかと思うと感無量になります（涙、喜び）。

一人でも多くの学生、研究者がこの部屋を訪ねて、

化合物が出来た！　嬉しい！

残念！　よしまたやるぞ！！

と

喜び、悩んで・・・、

一喜一憂することを願って私の随筆のお開きと致します。

ご精読に感謝申し上げます。

高山　俊夫

［参考文献］

１）Toshio Takayama, “Solid State NMR of Polymers ”,Chapter 17, Inorganic Polymers, p.613-666, Elsevier (Amsterdam), 1998.

2008年度（ 平成20年度）工学研究所年次報告

1．人事

1）運営委員

所　　長	許　　瑞邦	教　授
機械工学科	伊藤　勝悦	教　授
電子情報フロンティア学科	山口　栄雄	教　授
物質生命化学科	池原　飛之	准教授
情報システム創成学科	瀬古沢照治	教　授
建 築 学 科	鎌田　元康	教　授
物理学教室	大成　逸夫	教　授
物質生命化学科	山村　　博	教　授（所長指名）

2）研究所客員教授

沼田　俊一（2008.4～2009.3）

3）研究所客員研究員

藤田　正則（2006.11～2010.3）
武田　重喜（2007.10～2009.9）
篠原　嘉一（2008．4～2010.3）
磯田　幸弘（2008．4～2010.3）
堀　　康彦（2008．4～2010.3）
小原　晴彦（2008．4～2010.3）
山本　淳　（2008．4～2010.3）
李　　徳成（2008．4～2010.3）
南部　洋子（2008．4～2010.3）
石川　博敏（2008.10～2010.9）
大和　裕幸（2008.10～2010.9）
久保　登　（2008.10～2010.9）
龍　　重法（2008.10～2010.9）
石倉　理有（2008.10～2010.9）

4）研究所特別研究員

小川　隆博（2007.10～2009.9）
北島　創　（2008.10～2010.9）

5）研究所職員

教務技術職員 萩原健司
　　技術員 八高優勝

2．予　算

平成20年度の予算・決算額を表－1に示す。

表－1　（単位：千円）

業　務　項　目	予 算 額	決 算 額
研究所運営費	3,026	3,174
大型共同設備管理運営	4,600	4,201
工学研究所共同研究*	12,950	12,793
（特）テクノフェスタ	3,500	2,990
合　　計	24,076	23,158

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者	予算額（千円）
井川　教　授	4,500
堀野　教　授	1,600
山家　准教授	1,850
米田　教　授	5,000
計	12,950

３．共同研究／プロジェクト研究

平成20年度の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表－２に示す。

表－２

共同研究

計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発	山家　京子／建築
構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の高性能化に関する研究	米田　征司／電子情報フロンティア
酸性雨の樹冠への沈着から森林衰退までのプロセスの解明と森林再生のプログラムの検討	井川　学　／ 物質生命化学
出会い頭自己未然防止の研究交差点カーブミラー視認性評価と再設計マニュアル開発	堀野　定雄／情報システム創成

プロジェクト研究

A	熱電発電システム構成のための基礎研究	大野　吉弘／電子情報フロンティア
A	次世代自動車高性能蓄電システム技術開発事業／要素開発／高容量電池の開発	佐藤　祐一／物質生命化学
A	高性能高分子膜材料の開発と評価	西久保　忠臣／物質生命化学
A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発 —固有モードに基づく厳密な等価回路を適用して—	許　瑞邦／電子情報フロンティア
B	建築鋼構造のリユースシステムに関する研究	岩田　衛　／建築
C	町づくり研究所	西　和夫／建築
C	大気汚染環境化学研究所	井川　学　／物質生命化学
C	高安心・超安全交通研究所	堀野　定雄／情報システム創成

4．講演会

「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：安全・安心社会の実現―交通と生活―

場所：ＫＵポートスクエア

第１回　2008年11月7日（金）14:00～16:00

人間中心設計による交通安全―安全・安心社会を実現するための道すじ―

神奈川大学工学部準教授　堀野定雄

第２回　2008年11月14日（金）14:00～16:00

事故現場に見る疲労と安全の関係―安全・安心社会を支える基礎―

労働科学研究所所長　酒井一博　氏

第３回　2008年11月21日（金）14:00～16:00

21世紀の安全を考える―責任追及から原因究明へ―

元ＮＨＫ解説委員　吉村秀實　氏

第４回　2008年11月28日（金）14:00～16:00

ユーザー視点に立つ交通行政―世界一の安全・安心社会実現へ―

自動車事故対策機構理事長　金澤　悟　氏

「科学と工学の最前線」連続講演会

テーマ：環境・エネルギー問題解決の最前線

場所：神奈川大学横浜キャンパス

第１回　2008年11月8日（土）13：00～16：30

1. 環境とエネルギーのかかわりについての問題の切り口

神奈川大学工学部教授　大野吉弘

2. CO2排出権取引―京都議定書からの出発

日本カーボンファイナンス㈱特別顧問　田中弘　氏

第２回　2008年11月15日（土）13：00～16：30

1. 温暖化対策技術の切り札―太陽エネルギー―

再生可能エネルギー協議会代表　黒川浩助　氏

2. 低炭素社会実現のための基幹エネルギー技術―水素燃料電池

電力中央研究所上席研究員　渡辺隆夫　氏

創立80周年記念講演会（主催：神奈川大学　共催：工学研究所）

テーマ：研究者が若者に語る　宇宙・人間・素粒子

場所：神奈川大学セレストホール

2008年7月29日（火）14:00～15:30

東京大学特別栄誉教授　小柴昌俊　氏（2002年ノーベル物理学賞受賞）

5．神大テクノフェスタ2008

日時： 2008年10月17日（金）　11時より

内容：研究成果発表（2号館）

私学助成2件／重要機器整備費10件／プロジェクト研究 4件

ポスター発表・作品展示　116件（2号館）

企業展示　13社（2号館）

招待講演（16号館セレストホール）

『Ｆ１参戦と技術開発』

元　本田技研研究所　常務取締役　保坂　武文　氏

（現　東洋電装株式会社　代表取締役副社長）

懇親会（ラックスホール）

６．大型装置使用実績

平成 20 年度の大型装置装置使用実績を表－３に示す。

表－３　（時間）

研究室名	TEM	SEM	XRD	XPS	ICP	CCD
機械工学科	0	26	259	0	0	0
工藤研究室			243			
竹村研究室		26	16			
電子情報フロンティア学科	0	619	64	11	0	0
大野研究室		17	45			
中山研究室		4				
平手研究室	11	446				
山口研究室		152	19	11		
物質生命化学科	599	371	624	150	384	664
井川研究室		54			312	
池原研究室	69	32	90			
小出研究室		92	3		8	636
佐藤(憲)研究室						6
佐藤(祐)研究室	5	91	126	50	32	
内藤研究室	469		20	86		
西久保研究室			9			
引地研究室			5		16	22
横澤研究室	56	22				
山村研究室		80	376	14	16	
共通教室	0	36	0	0	0	50
亀山研究室						50
田島研究室		36	0	0		
理学部	0	9	22	194	0	20
森研究室		9	22	110		20
山口研究室				84		
合計時間	610	1052	969	355	384	664
機械工学科（%）	0.0	2.5	26.7	0.0	0.0	0.0
電気工学科（%）	1.8	58.8	6.6	3.1	0.0	0.0
応用化学科（%）	98.2	35.3	64.4	42.3	100.0	83.3
共通教室（%）	0.0	3.4	0.0	0	0.0	11.9
理学部（%）	0.0	0.9	2.3	54.6	0.0	4.8

工学研究所だより

2008 年 5 月 9 日　発行　No. 2008-1
神奈川大学工学研究所
〒221－8686　横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
Tel 045-481-5661 （内線 3631）
hagi@kanagawa-u.ac.jp

今年度の計画について

所長　許　瑞邦

今年度も従来の業務を着実に実行した上、以下の計画を推進し社会に開かれた工学研究所を実現したいと考えております。

１．神大テクノフィエスタの開催（10 月 17 日予定）
工学部・工学研究科と連携して構成されたテクノフィエスタ 2008 実行委員会（原村委員長）の下で実施案が練られておりますので、所員各位のご協力（研究発表・卒業生、学外者への参加案内）を是非お願いいたします。なお　本テクノフェスタ開催のためにの費用は新規予算として理事会より承認されております。

２．工学部・工学研究科・工学研究所紹介の冊子の刊行
外部の企業・社会に対して工学のポテンシャルを広報するための冊子を広報委員会と連携して構成した編集委員会（成田編集委員長/宇佐見作業責任者）の下で発行する準備が進行しております。（原稿締切は５月 10 日ですのでよろしくお願いします。）

３．ノーベル賞受賞者　小柴東大特別栄誉教授による講演会（本学８０周年記念行事の一環）
昨年度　本学８０周年記念行事の一環として　ノーベル賞受賞者小柴東大特別栄誉教授による講演会を提案し広報部主管で７月２９日開催の了承が得られました。現在　準備実行委員会（三田委員長、大成幹事）を構成し積極的に神奈川県及び近県の高校生に参加を呼びかける準備をしております。所員各位の身辺の学生・高校生にも口をかけて頂ければ幸いです。

４．テクノサイエンス連続講演会
「科学と工学の最前線」/「暮らしの中のサイエンス」
昨年度より工学研究科研究委員会と連携して始めた企画で　今年度は以下の企画が講演会企画委員会（井川委員長）の下で進行中です。
科学と工学の最前線「エネルギ問題」（大野先生企画）
暮らしの中のサイエンス「安全安心」（堀野先生企画）
なお、本企画は広報部が協力しております。

５．企業の方・社会人・卒業生の工学研究所への積極的な参加・参画への招請
本学の各種のイベントに一般の方にも参加して頂くだけでなく　４万人に及ぶ本学工学部卒業生にも積極的な参加を呼びかけてゆきたいと考えております。更に　外部の新しい考えを本研究所の運営に参画していただくため外部より運営委員を招聘したいと計画しております。

なお、岩田教授のプロジェクト研究Ｂは外部資金を獲得したこと、および、西教授の町づくり研究所は新聞等に掲載され好評を博しておりますことを申し添えます。

2008 年度運営委員の紹介と役割分担

運営委員会は各学科および教室系より選出された６人の運営委員と所長指名の運営委員（山村教授）と所長の８名で構成され、工学研究所の運営のために以下の分担で仕事を進めております。

運営委員会の構成
許　　瑞邦（所長）
伊藤　勝悦（機械工：所報編集委員長）
山口　栄雄（電子情報フロンティア：大型装置管理委員会幹事、産官学関係イベント担当）
池原　飛之（物質生命化：研究支援委員会幹事、工学研究所だより担当）
瀬古沢照治（情報システム創成：自己点検・評価学外への情報発信企画担当）
鎌田　元康（建築：研究専門部会の構成検討担当）
大成　逸夫（教室系：講演会関係担当）
山村　博　（所長指名：運営委員会幹事）
事務局：萩原健司、八高優勝、沼田智恵

研究支援委員会
委員長：青木　勇　　副委員長：大野　吉弘
委　員：大熊　武司　　大成　逸夫　　北岡　正敏
　　　　山村　博　　池原　飛之（幹事）

大型装置管理委員会
委員長：内藤　周弌
委　員：井川　学　　岡本　専太郎　　平手　孝士
　　　　山村　博　　横澤　勉　　山口　栄雄（幹事）

他部署との関連各種委員会
神大テクノフェスタ 2008 実行委員会
委員長：原村　嘉彦
委　員：山口　栄雄　　池原　飛之　　北岡　正敏
　　　　冨井　正憲　　朝倉　史明
　　　　高山　俊夫（広報委員会）

工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子編集委員会
委員長：成田　清正　　副委員長：原村　嘉彦
委員：新中　新二　　宇佐見　義之　　島　健
　　　鎌田　元康　　瀬古沢　照治　　山村　博
　　　島崎　和司（協力）

講演会企画委員会
委員長：井川　学
委員：青木　勇　　大成　逸夫　　山口栄雄

神奈川大学創立 80 周年記念講演会準備実行委員会
委員長：三田　一郎　　顧問：渡邊　靖志
幹事：大成　逸夫　　委員：田村　忠久　日比野　欣也

工学研究所共同研究、プロジェクト研究

１．共同研究について
工学研究所は、工学研究の進展に資するという本研究

所設立の目的を促進するため、共同研究に対して研究費の助成を行っております。

2007 年度（終了）共同研究

・07-A2 統合ファサードシステムに関する研究
（岩田：建築）

・07-A3 歴史的建造物を生かした町づくりの実践的研究 山形県長井市・岐阜県各務市を中心に　（西：建築）

2008 年度 共同研究

・07-A1 酸性霧の樹冠への沈着から森林衰退までのプロセスの解明と森林再生プログラムの検討
（井川：物生　450 万円）

・07-A4 出会い頭事故未然防止の研究
交差点カーブミラー視認性評価と再設計マニュアル開発
（堀野：情シ　160 万円）

・08-A1 計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発（山家：建築　185 万円）

・08-A2 構造相転移によるカルコゲン系熱材料の高性能化に関する研究　（米田：電フ　500 万円）

２．プロジェクト研究について

本年度より開始するプロジェクト研究は以下の通りです。

・08-A1 熱電発電システム構成のための基礎研究
（大野：電フ３年）

・08-A2 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発事業／要素開発／高容量電池の開発　（佐藤：物生３年）

工学研究所からのお知らせとお願い

１．運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2007 年度　第 10 回（2 月 6 日開催）
・客員教授の申請について
・所員会議の議題について
・神大テクノフェスタ準備企画委員会の報告
・大学創立 80 周年記念講演会進捗状況
・研究員等の交通費について

2007 年度　第 11 回（3 月 5 日開催）
・来年度の運営委員の確認と分担
・研究支援専門部会の構成
・大学創立 80 周年記念講演会進捗状況
・神大テクノフェスタ準備企画委員会の報告
・工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子編集委員会の設立提案について
・客員研究員・プロジェクト研究の申請について
・研究員等の交通費について

2008 年度　第 1 回（4 月 16 日開催）
・所長指名の運営委員について
・平成 20 年度予算について
・運営委員の分担について
・工学研究所組織について
・工学研究所活動計画
・プロジェクト研究・客員研究員・特別研究員の募集について
・クリーンルーム・質量分析室の管理について
・自己点検・評価及び認証評価について
・研究専門部会について
・80 周年記念講演会について

２．所員会議報告

2 月 13 日開催の第 3 回所員会議にてお認めいただきました内容については以下の通りです。
・所長選挙投票結果（許所長　再任）
・客員教授（沼田氏）の申請
・客員研究員（藤田氏）の再任

３．2008 年度工学研究所予算について

本年度の工学研究所の経常予算は、申請額どおりの 20,537,000 円となりました。内訳は以下の通りです。

共同研究	12,950,000 円
大型共同設備運用	4,600,000 円
研究所運営	3,026,000 円

また、特別予算、神大テクノフェスタ 2008 として 350 万円が認められました。したがって、本年度の工学研究所総予算は 24,037,000 円となります。

４．工学研究所所報原稿の募集

所報 31 号の総合論文、トピックス、随想等の原稿を募集いたします。詳しくは近日中に所員メーリングリストにてお知らせいたします。

原稿締切 9 月末　　発行予定 11 月末

５．工学研究所プロジェクト研究の募集

平成 20 年度前期　工学研究所プロジェクト研究のテーマを募集しております。詳細については 5 月 7 日にメール配信した工学研究所プロジェクト研究の募集の案内をご覧ください。

申請書応募締切 5/30（金）　　ヒアリング 6/20（火）

６．総合学術研究推進委員会／研究委員会報告

前号の工学研究だよりからこれまでの 2 回にわたる委員会での議題は以下の通りです。

2007 年度　第 9 回（2 月 20 日開催）議題
・文部科学省の動向について（報告）
・不正行為に係る予備調査及び本調査規程(案)について
・共同研究奨励助成金及び学術褒賞について（報告）
・グローバル COE の申請について（報告）
・研究所客員教授の任用について

2007 年度　第 10 回（3 月 19 日開催）議題
・2008 年度文部科学省補助金の学内予算決定結果について（報告）
・2008 年度国際交流(学術研究)事業の学内予算結果について（報告）
・2008 年度学術振興資金の結果について（報告）
・不正行為に係る予備調査及び本調査規程(案)について

2008 年度　第 1 回（4 月 16 日開催）議題
・昨年度の活動総括および本年度の活動予定
・2008 年度学外学会等出張旅費配分（案）について
・プロジェクト研究所について
・研究所客員教授について
・競争的資金等の不正使用に係る調査に関する規定について

工学研究所だよりの内容等について、ご質問、ご意見等がございましたら工学研究所　事務局：萩原（内線 3631、hagi@kanagawa-u.ac.jp）までお知らせください。

工学研究所だより

2008 年 8 月 6 日　発行　No.2008-2
神奈川大学工学研究所
〒221－8686　横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
Tel 045-481-5661　(内線 3631)
hagi@kanagawa-u.ac.jp

神大テクノフェスタ 2008 の概要について

実行委員長　原村 嘉彦

実行委員会では、神大テクノフェスタを以下の要領で開催すべく現在準備を進めています。工学研究所所員の全面的な支援をいただけますよう、お願い申し上げます。

開催の趣旨／神奈川大学工学部・工学研究科・工学研究所の研究実績・ポテンシャルを社会に広くアピールし、「神奈川大学」のブランドを高めるため、工学研究所・工学研究科・工学部及び各ハイテクリサーチセンター、学術フロンティアプロジェクトが共同して、研究成果の発表・展示・実演を実施する。

キャッチフレーズ　**「見せます 神大の工学力」**

開催日／2008 年 10 月 17 日（金）

開催内容

(1)補助金等を導入した研究成果発表
文部科学省私立大学等研究設備整備費等補助金・工学部重要機器整備費による大型機器の購入（2005～2006 年度）を伴う研究に関して、その成果発表を行う。それぞれ２件、10 件。２号館演習室 A において、11:00～12:00、13:00～14:00 を予定。

(2)私立大学学術研究高度化推進事業成果･進行状況発表会
学術フロンティア推進事業（２件）、ハイテクリサーチセンター整備事業（１件）による研究の成果ならびに進行状況について、責任者による発表を行う。２号館演習室 A において、14:15～15:45 を予定。

(3)工学研究所共同研究･プロジェクト研究の成果発表
「歴史を生かしたまちづくり」の発表を２号館演習室 A で行う、15:45～16:15 を予定。

(4)研究室/大学院生によるポスター発表･作品展示･実演展示
広く研究内容とその成果を発表することを目的に、ポスター発表形式で、大学院生が研究発表する。建築学専攻の作品模型展示を伴う発表を含む。優秀プレゼンテーションに対して表彰を行う。選考は、研究委員会等に依頼する。発表件数 110 件程度。２号館演習室において、12:00～14:00 を予定。

(5)研究相談窓口
産官学連携室が外部からの研究相談を受け付ける窓口を開設する。２号館演習室において、13:00～16:00 を予定。

(6)企業展示
企業における技術者の仕事を中心に企業紹介をしていただく。各学科から推薦をいただいた合計 15 社を予定。
２号館演習室において、12:00～15:00 を予定。

(7)招待講演
機械工学科卒業生、東洋電装(株)副社長、元ホンダＦ１責任者、保坂武文氏による「Ｆ１参戦と技術開発」
１６号館セレストホールにおいて、16:30～17:40 を予定。

(8)懇親会　学内で、18:00～19:30

(9)テクノフェスタ開催予算　3,5000,000 円

開催組織／開催委員長　工学部長　佐藤 祐一
開催副委員長　工学研究科委員長　遠藤 信行
工学研究所所長　許　瑞邦
実行委員長　原村 嘉彦
実行委員　山口 栄雄、池原 飛之、北岡 正敏、冨井 正憲、朝倉 史明
広報委員　高山 俊夫

なお、上記の部屋割・時間割等は現在調整中で、変更することがありますので、ご承知おきください。また、当初予定していた工学研究所共同研究の成果発表は、工学研究所運営委員会のご理解を得て、(3)に記載の１件を除き来年度に延期いたしました。　以上

工学研究所共同研究、プロジェクト研究の募集

2009 年度共同研究と 2008 年度後期プロジェクト研究のテーマを募集しております。詳細については８月３日にメール配信した募集の案内をご覧ください。
応募の締切は 10 月 10 日（金）となっております。
※共同研究継続の場合も継続申請書をご提出ください。

---

(1)**共同研究**にはＡ・Ｂの２種類があり、どちらに対しても研究費の助成が行われます。Ａ・Ｂの詳細は以下の通りです。
(A)研究期間は１年または２年で、本学工学部の教員が主体となり、必要に応じて本学他学部・他大学の教員、他研究所・企業の研究者・技術者と共同で行う研究です。また研究終了後は学外の研究費を得てさらに研究が発展していくことが望まれています。
(B)研究期間は１年で、新規研究テーマについての萌芽的研究という位置づけになっています。
　共同研究の募集は年１回行われ、審査委員会のヒアリングを経て審査の結果、助成額を決定することになります。
(2)**プロジェクト研究**にはＡ・Ｂ・Ｃの３種類があります。研究期間は全て 3 年以内ですが、研究期間終了後、再度、申請・審査の上、継続することは可能です。Ａ・Ｂ・Ｃ詳細は以下の通りです。
(A)「研究組織を充実して実行する研究」で、客員研究員・特別研究員制度を活用し、学内外の人材を研究課題遂行のため積極的に招聘して行う研究です。
(B)「外部研究資金を獲得して実行する研究」で、競争的資金獲得申請に必要な経費(事務連絡費・交通費等 20 万円程度)は申請・審査の上支給でき、客員研究員・特別研究員制度の利用も可能です。
(C)「課題研究所を設立して実行する研究」で、社会における具体的な課題を集中的に研究する課題研究所を設立し社会に貢献するものです。客員研究員・特別研究員制度の利用や外部に課題研究所支所の開設も可能です。課題研究所の経費は基本的に外部資金に依ります。
　プロジェクト研究の募集は年２回（5 月と 11 月）受付け、審査委員会のヒアリングの上採択を決定します。

不明な点は工学研究所事務局までお問い合わせ下さい。所員の方々におかれましては是非これらの制度を活用され、研究の発展に役立てていただければと思います。

客員教授ご推薦のお願い

工学研究所客員教授の推薦をお願いいたします。必要書類は申請書/推薦書で、締切は 10 月 10 日(金)を予定しています。なお詳細は 8/6 発信のメールをご参照ください。

工学研究所からのお知らせ

１．運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2008 年度 第 2 回（5 月 21 日開催）
・所報 31 号について
・大学創立 80 周年記念講演会進捗状況について
・テクノサイエンス連続講演会の進捗状況について
・外部イベントの企画について
・クリーンルーム・質量分析室の貸与について
・専門分野の構成について
・来年度の客員教授の募集について
・自己点検・評価について
・神大テクノフェスタ 2008 進捗状況
2008 年度 第 3 回（6 月 25 日開催）
・所報 31 号について
・大学創立 80 周年記念講演会進捗状況について
・テクノサイエンス連続講演会の進捗状況について
・工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子について
・クリーンルーム・質量分析室の貸与について
・専門分野の構成について
・所員会議について
・プロジェクト研究について
2008 年度 第 4 回（8 月 1 日開催）
・大学創立 80 周年記念関連の講演会の開催報告
・外部イベントの報告
・自己点検評価についての報告
・テクノフェスタ 2008 の準備状況
・来年度の共同研究募集について
・プロジェクト研究（後期）募集について
・客員教授募集の件について
・2009 年度テクノフェスタ企画委員会について

２．所員会議報告

7 月 9 日開催の第 1 回所員会議にてお認めいただきました内容については以下の通りです。
・西久保チーム客員研究員（南部氏）の申請・承認
・堀野チーム客員研究員（久保氏、石川氏、大和氏、龍氏、石倉氏）の申請・承認
・テクノフェスタの準備状況および参加要請

３．小柴昌俊博士による講演会の報告

7 月 29 日予定通りセレストホールで開催された。ノーベル物理学賞受賞者の講演とあって、ホール一杯の参加者の半数強が高校生・大学生であった。極微の自然界(素粒子)と宇宙の理解を結ぶキーワードがニュートリノ(中性微子)であるという話を発端に宇宙・高エネルギーの世界をわかりやすく話された。研究のみならず人生において、ナンバーワンたるよりはオンリーワンを目指そうと若者たちに呼びかけられた。

４．神大テクノフェスタ 2009 企画委員会構成

来年度のテクノフェスタの内容を企画検討するため、神大テクノフェスタ 2009 企画委員会を工学部長、工学研究科委員長の了承のもとで以下のように構成いたしました。企画案は 10 月に出来次第ご報告いたします。

委員長	成田 清正	教授(情報システム創成学科)
副委員長	齊藤 隆弘	教授(電子情報フロンティア学科)
委 員	山崎 徹	准教授(機械工学科)
	岡本 専太郎	教授(物質生命化学科)
	山家 京子	教授 (建築学科)
	朝倉 史明	准教授(生物学教室)
協 力	原村 嘉彦	教授 (現実行委員長)

５．総合学術研究推進委員会／研究委員会報告

前号の工学研究だよりからこれまでの 2 回にわたる委員会での議題は以下の通りです。
2008 年度 第 2 回（6 月 18 日開催）議題
〈報告事項〉日本私立学校振興・共済事業団学術研究資金の採択状況について／グローバルＣＯＥプログラム 申請・採択状況一覧について／科学研究費補助金 申請・採択状況について／「競争的資金等の不正使用に係る調査に関する規定」(案)について／共同研究奨励助成金交付の対象となる共同研究の審査結果について
〈検討事項〉2009 年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究資金（若手研究者奨励金）の公募について／2009 年度文部科学省補助金に係る構想調書・計画調書等の資料(仮)作成・提出について／2009 年度国際交流(学術研究)事業の公募について／プロジェクト研究所の設置申請について／研究所客員教授の任用について
2008 年度 第 3 回（7 月 23 日開催）議題
〈報告事項〉2007 年度競争的資金に係る「間接経費」の使用報告について
〈検討事項〉ヴェネツィア大学東アジア学科と神奈川大学人文学研究所との交流協定(案)について／スリランカ民主社会主義共和国ルフナ大学化学科と神奈川大学理学部化学科の交流協定について／プロジェクト研究所の設置について／研究所客員教授の任用について／2008 年度グローバルＣＯＥプログラム申請・採択状況一覧について

６．学術情報委員会／委員会報告

今年度の学術情報委員会における議題は以下の通りです。
2008 年度 第 1 回（4 月 23 日開催）議題
・学術情報委員会に係る 2008 年度予算について
・部局図書目録のデータベース化（遡及入力について）
・国立情報学研究所次世代学術コンテンツ基盤共同構築事業学術機関リポジトリ構築連携支援事業平成 20-21 年度委託事業への応募について
2008 年度 第 2 回（7 月 23 日開催）議題
・国立情報学研究所次世代学術コンテンツ基盤共同構築事業学術機関リポジトリ構築連携支援事業平成 20-21 年度委託事業公募提案書の選定結果について
・神奈川大学機関リポジトリの構築について

連続講演会の企画について　　企画委員長 井川 学

工学研究所・工学研究科共催の連続講演会のテーマ、日程および企画責任者が以下のとおり決定いたしましたのでお知らせいたします。

○暮らしの中のサイエンス
安全・安心の実現－交通と生活－ ／堀野定雄
日時：11/7～11/28 金曜日 14:00～16:00 全４回

○科学と工学の最前線
環境・エネルギー問題解決の最前線 ／大野吉弘
日時：11/8,15 土曜日 13:00～16:30 全２回

冊子編集委員会からのご報告　　委員長 成田清正

皆様のご協力の下、研究室紹介冊子は無事初稿も上がり順調に仕上がっておりますことをご報告いたします。
なお、今回はサイズのばらつき等の理由から顔写真の掲載を見送ることといたしました。皆様にはせっかくご提出いただいたのに申し訳ありませんでした。来年度の課題といたしますのでご理解とご了承をお願いいたします。

工学研究所だよりの内容等について、ご質問、ご意見等がございましたら工学研究所 事務局：萩原（内線 3631、hagi@kanagawa-u.ac.jp）までお知らせください。

工学研究所だより

2008 年 10 月 7 日　発行　No.2008-3
神奈川大学工学研究所
〒221－8686　横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
Tel 045-481-5661 （内線 3631）
hagi@kanagawa-u.ac.jp

平成 21 年度 科学研究費補助金の申請について

工学研究科 研究委員会　委員長　伊藤勝悦

研究者としては，マイペースで仕事をすれば良いだけであって，例えば，筆者は机上のワークステーションとThomson Reuters の ISI Web of Knowledge があれば十分に研究活動を継続する事が出来る．しかし，第 3 者機関によって，大学の研究力が評価される時，科研費の採択状況が重要な因子としてカウントされる．このため，大学としては，科研費の採択率の向上を図る事は極めて重要となる．教員は，採択されるように書類を整えて，科研費を申請する必要がある．このための一助になればと思って，工学研究科研究委員会から，採択されるように書類を整えるための勘所が，レターにまとめられて 9 月 1 日に，工学部全教員に配布された(お手元に無い場合は，島崎先生あてご連絡戴ければ幸いです)．

配布されたレターに書類作成の勘所が全て書かれているので，ことさら追加する事項もない．しかし，これまでに一度も採択された事がない筆者が少しばかり気が付いた点を述べさせて戴く事は無意味で無いように思われる．インターネットには，審査委員のお名前と，採択テーマが詳細に公開されている．採択されたテーマを見ただけで，全てのテーマは国際的な水準にあるハイレベルの研究である事が分かる．筆者のこれまでの申請書は，審査員が研究テーマを見ただけで，不採択の籠に投げ捨てられたものと思われる．

テーマの選定には，十分，留意する必要があると思われる．アメリカの大学の教授のホームページに入れば，研究内容が，綺麗な絵や写真が添えられて紹介されている．このような研究が出来れば，外部資金の導入も可能なはずだと納得してしまう．これらの多くの研究は，実験が基盤になっている．解析と数値計算を専門としてきた老齢の筆者にとっては，今更，研究の方向を変えることは無理である．テーマを変えた場合，論文をこれまでに掲載してきた水準の雑誌に掲載出来ない可能性が濃厚となる点が不安で，テーマの変更は出来ない．若手教員は自分の専門に接近しているアメリカの大学教員のホームページを是非見て下さい．もし可能であるならば，その方向の研究テーマに徐々に変えて行ってみては如何でしょうか．

科研費の採択状況は，今後とも，大学評価の観点から，益々重要視されてくる事は確実です．より多くの先生方が，採択されるように書類を整えて，申請して戴きますようお願い致します．

○9 月末に学長室よりお知らせがありましたとおり、科学研究費補助金の説明会が **10 月 8 日（水）** 12:00-13:00 に 1 号館 3 階 308 会議室にて開催されます。
○計画調書送信(提出)の期限は **10 月 31 日（金）** となっております。詳しくは学長室にお問い合わせください。
○工学研究所事務室(23-B112)に「**文部科学省科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧（平成 16・17・18・19 年度）**」がございますので、ご活用ください。

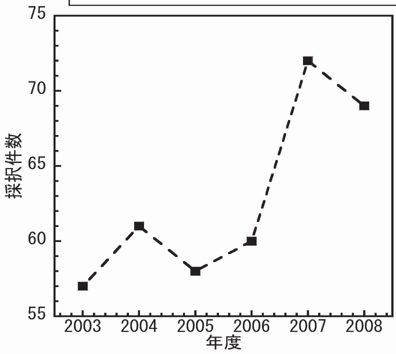


図1：本学の科研費採択件数の推移

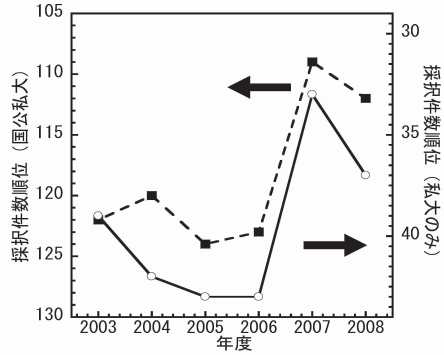


図2：本学の科研費採択件数順位の推移

工学研究所からのお知らせ

1．運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2008 年度　第 5 回（9 月 24 日開催）
・神大テクノフェスタ 2008 について
・特別予算の申請について
・外部イベントについて
・外部運営委員について

2．工学研究所に関連する申請の締切

10 月 10 日（金） が以下の締切となっております。詳しくは工学研究所（内線 3631）までご連絡ください。

（1）共同研究　（2）プロジェクト研究
（3）客員教授　（4）客員研究員・特別研究員

3．特別予算の申請内容について

工学研究所として、以下の項目について特別予算を申請しましたので、お知らせいたします。

（1）神大テクノフェスタ 2009　350 万円
（2）テクノサイエンス連続講演会　40 万円
（3）”若者と語る”シリーズ講演会　20 万円
（4）プロジェクト研究 C「高安心・超安全研究所」の立上経費　140 万円

神大テクノフェスタ 2008

日時 10 月 17 日（金） 11：00 から メイン会場 横浜キャンパス 2 号館
内容 研究発表会（16 件）、ポスター発表（108 件）、作品・実演展示（8 件）、企業展示（13 社）
研究相談窓口（産官学連携推進室）、招待講演 **「F1 参戦と技術開発」** 保坂武文氏

<table>
<tr><td rowspan="2">時間</td><td colspan="3">2 号館（メイン会場）</td><td>3 号館</td></tr>
<tr><td>演習室 A
（口頭発表）</td><td colspan="2">演習室 B・C</td><td>地球史博物館
（3階）</td></tr>
<tr><td>11:00〜12:00</td><td>第 1 部</td><td colspan="2"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>12:00〜13:00</td><td></td><td rowspan="2">ポスター発表
作品展示
実演展示</td><td rowspan="4">研究相談窓口
企業展示
休憩 13:00〜14:00</td></tr>
<tr><td>13:00〜14:00</td><td>第 2 部</td></tr>
<tr><td>14:00〜14:15</td><td></td><td rowspan="2">（説明者なしで展示が継続されます。）</td><td rowspan="2">14:10 より上映</td></tr>
<tr><td>14:15〜16:15</td><td>第 3 部</td></tr>
<tr><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>16:30〜17:40</td><td>16 号館セレストホール
招待講演
（保坂武文氏）</td><td>18:00〜19:30</td><td>19 号館ラックスホール
意見交換会・懇親会</td><td></td></tr>
</table>

口頭発表一覧

実行委員長 挨拶 原村教授

第 1 部 座長：山村教授

重要機器整備費

栗原教授：高臨場感仮想体験装置を活用した情報技術教育
岩本准教授：サーマルマネキンによる室内温熱環境の評価
田島教授：チタン合金の昇温に伴う相変態と物性の変化（高温弾性率測定装置）
島 教授：FPGA ボードを利用した LSI の設計学修教育（LSI 設計実習設備）
遠藤教授：新しい水中音響レンズ開発のための音響レンズ材の音速の温度依存性の精密測定
（シングアラウント式音速測定装置）

私学助成

山村教授：リガク/X 線物性解析システム「RINT-UltimaⅢ」

第 2 部 座長：成田教授

私学助成

横澤教授：レーザイオン化飛行時間型質量分析装置

重要機器整備費

小野教授：生体分子精製分析システムをもちいる新規機能を有する核酸誘導体の開発研究
小出教授：From Fluorescent Materials to Dendrimers – Synthesis of Aluminum Coordination Compounds from AlO(OH) （有機溶媒精製装置）
中尾教授：ウォータドライブスピンドルによるダイヤモンド切削加工（超精密加工ステージ）
田村准教授：粒子線 XY 多層検出フロントエンド回路システム
宇佐見准教授：プラズマ 3 面マルチ画面システム

第 3 部 座長：遠藤教授

ハイテクリサーチセンター

穴田教授:チップ上に広がる人間環境系を支える知能集積技術

学術フロンティア

荏本教授:災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究
内藤教授:機能物質創製を目指す化学空間の設計と制御

工学研究所プロジェクト研究

西教授：町並み調査と町づくり －学生と私の社会貢献－

工学研究所だより

2009 年 2 月 27 日　発行　2008-No. 4
神奈川大学工学研究所
〒221－8686　横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
Tel 045-481-5661 （内線 3631）
hagi@kanagawa-u. ac. jp

テクノフェスタ 2008 の報告

関係各所のご協力により、以下のとおり、神大テクノフェスタ 2008 を開催し、おかげさまをもちまして、無事に終了することができました。『神大テクノフェスタ』が神奈川大学の大きなイベントの一つとして定着し、発展していくために、今後ともご協力いただけますようご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

開催委員長　：佐藤　工学部長
開催副委員長：遠藤工学研究科委員長／許工学研究所長
実行委員長　：原村　教授
日時： 2008 年 10 月 17 日（金）
場所：2 号館（メイン会場）／16 号館（招待講演会場）
23 号館（工学研究所公開）／ラックスホール（懇親会）
内容：
１．大型機器購入を伴う研究の成果発表
（文科省補助金，重要機器整備費）
２．大型プロジェクト研究の成果・経過発表
（ハイテクリサーチセンター・学術フロンティア）
３．工学研究所プロジェクト研究成果発表
（歴史を生かした町づくり：西教授）
４．大学院生によるポスター発表・作品展示 110 件
（機械 19 件，電電情 21 件，応化 56 件，経工 4 件，建築 4 件＋作品展示 6 件）
５．研究室による展示（ポスター３件，デモ展示３件）
６．企業展示（１３件）
７．研究相談窓口（相談者５人程度）
８．招待講演（保坂武文氏，「Ｆ１参戦と技術開発」）
９．懇親会
10.　工学研究所の施設公開（参加者約 15 名）

参加者の状況：

外部参加者	一般参加	８９名（事前 15，当日 74）
	企業展示	３１名
	取材	3 名
大学関係者（名誉教授等）		6 名
学外者合計		１２９名
学内者	教職員	約５０名
	学生	約１４０名（発表者別）
	発表者	約１２０名

（この他に中島学長、正野常務理事、事務職員が出席）
総参加者合計　約４５０名

招待講演『Ｆ１参戦と技術開発』　保坂武文氏


2 号館　ポスター発表

テクニカクルショウヨコハマ 2009 のご報告

「テクニカルショウヨコハマ」は地域企業の技術や製品の展示発表の場として、歴史を積み重ねている。本学は産学連携コーナーに展示ブースを平成 12 年より出展しており、今年２月の参加で連続 10 回の参加になります。この展示発表会は神奈川県と横浜市の支援によって行なわれており、主催者は（社）神奈川県産業貿易振興協会と（社）横浜市工業会連合会となっています。産学連携コーナーは、先の横浜市の財団が横浜市内にキャンパスを持つ理工系８大学（神奈川大、横浜市大、関東学院、横浜国大、桐蔭横浜大、武蔵工大、慶応大学、東工大）が協力し合って出展し、その後、横浜市立大学の付置研究所である木原記念横浜生命科学振興財団や理化学研究所横浜研究所、よこはま TLO、東工大 TLO の参加があり、最近では、東海大学、広島大学、千葉大学、山形大学など参加大学が増えるとともに大学発ベンチャーの出展などもあり、このコーナーの規模はますます大きくなり、注目を集める存在になってきています。

日時：２月４日（水）から６日（金）　10:00－17:00
場所：パシフィコ横浜展示ホールＣ・Ｄ　（入場無料）
出展：
○山口教授（電子情報フロンティア学科）
『高速電子冷却加熱素子の開発と応用』
○江上教授（機械工学科）
『メカニカルシステムの経路制御手法の提案とその応用』
○工学研究所
『先端的研究設備及び共同／プロジェクト研究の紹介』
ワークショップ及び出展：
○田嶋特別招聘教授
Change!!柔らかいナノ粒子による乳化技術：三相乳化法

工学研究所からのお知らせ

1．運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

第6回（10月15日開催）
・共同研究/プロジェクト研究の応募状況
・客員教授/客員研究員/特別研究員の申請

第7回（10月29日開催）
・工学研究所の今後の方針について

第8回（11月26日開催）
・共同研究/プロジェクト研究申請の審査結果
・客員教授の継続申請
・所員会議の議題について
・次期運営委員の選出について
・連続講演会の実施報告
・大型装置管理委員会の開催報告

第9回（1月21日開催）
・次期運営委員（候補者）について
・今年度および来年度予算について
・「若者と語る」連続講演会について
・テクノフェスタ2008の報告および来年度の企画

4．神大テクノフェスタ2009準備企画委員会の構成

開催予定日時：2009年10月16日（金）
委員長 成田　清正 教授　　副委員長 齊藤　隆弘 教授
委　員 山崎　徹　准教授　委　　員 岡本専太郎 教授
委　員 山家　京子 教授　　委　　員 朝倉　史明 准教授

2．次年度共同研究／プロジェクト研究のテーマ決定

2009年度工学研究所共同研究は4件の申請（新規2件、継続2件）があった。工学研究所運営委員会より委嘱された工学研究所研究支援専門部会により結成された工学「共同研究審査委員会」において、2008年10月15日（水）に4件のヒアリングと質疑応答を行った。その後、慎重な審議を経て、表1に示す4件のテーマの採択、並びに研究経費を決定した。

表1　2009年度工学研究所共同研究採択テーマ

研究課題	研究代表者	研究経費（千円）
計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発	山家京子（建築）	2,250
構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の高性能化に関する研究	米田征司（電情）	2,000
超電導粒子干渉計のオンチップ・アレイ化による高感度磁束計の製作	中山明芳（電情）	4,750
人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築－カーブミラーの視認性	堀野定雄（情シ）	4,000
	合計	13,000

2009年度工学研究所プロジェクト研究は新規2件（A:1件 C:1件）と継続1件(C)の申請があった。共同研究と同様に審査委員会を結成し、2008年10月15日（水）にヒアリングと質疑応答を行った。その後、慎重な審議を経て、表2に示す3件のテーマの採択を決定した。

表2　2009年度工学研究所プロジェクト研究採択テーマ

整理番号	研究課題・課題研究所名	研究代表者
A	2020年の電子デバイスを想定した電子回路の研究	島　健（電情）
C	防災まちづくり支援研究センター	荏本孝久（建築）
C	地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と運営	山家京子（建築）

3．第2回所員会議報告

2008年12月10日の教授会終了後に本年度第2回所員会議を開催した。議題は以下のとおりです。
◎工学研究所客員教授(4名)客員研究員(1名)特別研究員(1名)の申請および客員教授(1名)の再任について

5．2009年度版工学系冊子編集委員会構成

委員長 成田　清正 教授　　副委員長 原村　嘉彦 教授
委　員 島　　健　教授　　委　　員 山村　博　教授
委　員 瀬古沢照治 教授　　委　　員 鎌田　元康 教授
委　員 朝倉　史明 准教授　協　　力 新中　新二 教授
作業責任者　宇佐見義之准教授

6．総合学術研究推進委員会「研究委員会」報告

前号の工学研究所だよりからこれまでの3回に亘る委員会での議題は以下の通りです。これらの議題に関するご意見がございましたら、所長までご連絡下さい。

第5回（10月22日開催）議題
1）21世紀ＣＯＥプログラム　H15年度採択拠点事後評価の事前開示
2）H21年度「グローバルＣＯＥプログラム」審査結果
3）H21年度「共同利用・共同研究拠点」の認定に関るスケジュール等
4）2009年度「グローバルＣＯＥプログラム」学内募集
5）「研究機関における公的研究費の管理・監査のガイドライン」に基づく体制整備等の実施状況報告書について

第6回（11月19日開催）議題
1）常民文化研究所非文字史料研究センターと中山大学の非文字資料研究に係る学術交流の覚書について
2）2009年度国際交流事業の審査について
3）プロジェクト研究所の設置について

第7回（12月17日開催）議題
1）2009年度国際交流事業の審査結果
2）2009年度文科省補助金申請に係る審査について

第8回（1月21日開催）議題
1）2009年度文科省補助金申請に係る審査結果
2）H21年度日本学術振興会特別研究員の選考結果
3）常民文化研究所非文字史料研究センターと浙江工商大学の非文字資料研究に係る学術交流の覚書締結について
4）2009年度共同研究奨励助成金の募集および選考日程
5）グローバルＣＯＥの申請について
6）神奈川大学21世紀ＣＯＥ拠点形成委員会規定および関連諸規定の廃止について
7）神奈川大学・上海師範大学学術交流協定書について

神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978 年（昭和 53 年）2 月　5 日
改訂 1988 年（昭和 63 年）4 月 13 日
改訂 1990 年（平成　2 年）7 月 18 日
改訂 1991 年（平成　3 年）5 月 29 日
改訂 1994 年（平成　6 年）1 月 26 日
改訂 2005 年（平成 17 年）1 月 27 日

1．投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部属教職員とする．ただし原稿を編集委員会が依嘱する場合はこの限りではない．また連名者については制限しない．

2．記事の種類

巻　頭　言

論　　　説　学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説，意見．

総 合 論 文　専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として，著者の一連の研究をまとめ，これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの．

共同研究報告　発足時点では〔共同研究の紹介〕，中間時点では〔共同研究の現況〕，研究終了または一段落の時点では〔共同研究の成果要約〕として，その現状が報告される．

総　　　説　総合論文と略同一性格の記事であるが，解説的色彩の強いもの．

トピックス　その時々のトピックスについての展望あるいは解説．

随　　　想　研究・開発などの思い出，意見，感想，経験談など．

国際交流研究　学外（国内，国外）における研究・講義・出張に関する経験談など．

特　　　集　その号の特集として特別記事を設けることがある．

3．用語

用語は和文とする．ただし総合論文に限り欧文でもよい．また〔英文目次〕作成のため，原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名，所属〕の英語名をつける．

4．提出期日

その年度により定める．

5．頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す．

総 合 論 文　原則として 20 頁以内．和文の場合は〔欧文内容概要（1 頁以内）〕，欧文のときは〔和文内容概要（1 頁以内）〕をつけることができる．

論説・随想　原則として 4 頁以内．

総説・トピックス・その他の記事　原則として 8 頁以内．

6．原稿の書き方

原稿の書き方は，この〔規程〕ならびに〔神奈川大学　工学研究所　所報　執筆要領〕による．

7．原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする．またその著作権・編集出版権は〔神奈川大学工学研究所〕に属する．

8．採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学　工学研究所　編集委員会〕において行う．

9．原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学　工学研究所　事務室〕とする．そこで受領した日を原稿受付日とする．

10．その他

（1）　原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが，状況により超過分の実費を徴することがある．

（2）　図が印刷に不適当な場合は，専門家に依嘱して書直すことがある．この場合の経費は著者負担とする．

編集後記

　編集委員ならびに工学研究所事務職員のご協力のもと、工学研究所所報第３２号が刊行となりました。お忙しいところ、進んで原稿をお寄せ下さいました先生方に厚くお礼申し上げます。

　所報の編集にあたっては、所報を通して工学研究所の年間活動および所員の研究分野の紹介を兼ね研究のポテンシャルの高さを発信できるよう配慮しました。新任の教員には、これまでやってこられた専門分野の研究を存分にアピールして頂けるように、総説を執筆頂きました。また、本年度をもって退職される教員には大鑑を短く纏めた随想を執筆頂きました。さらに、工学研究所共同研究の成果報告に加えて工学研究所の年間活動が一目で分かる年次報告等が記載されております。

　なお、今年度から所報をホームページにも掲載しておりますので、より多くの方々にお読み頂けるものと期待しております。発刊にあたりご協力頂きました方々に改めて敬意を表するとともに、ご協力に感謝申し上げます。

（物質生命化学科　佐藤憲一）

工学研究所　所報（No.32）

SCIENCE　REPORTS（No. 32）
of
Research　Institute　for　Engineering (KANAGAWA　University)

神奈川大学工学研究所所報第32号

2009年11月25日　印　刷
2009年11月30日　発　行

編集兼発行者　神奈川大学工学研究所
〒221-8686　横浜市神奈川区六角橋3-27-1

印　刷　所　共立速記印刷株式会社
東京都千代田区飯田橋 3-11-24

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY
3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan