

工学研究所所報第31号目次

巻 頭 言

今年度の活動計画ー社会に開かれた工学研究所をめざしてー…………… 許 瑞邦 …… 1

総 説

メソスケールモデルによる風向風速の推定…………… 吉田正邦, 大熊武司 …… 2
マルコフ決定過程における適応型アルゴリズム…………… 堀口正之 …… 22
建築の空間構成計画学…………… 中井邦夫 …… 30
日本のX線天文学の歩み…………… 長瀬文昭 …… 38
き裂を有する材料の破壊と応力拡大係数について…………… 伊藤勝悦 …… 49

共 同 研 究

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 …… 58
統合ファサードシステム…………… 岩田 衛、大熊武司、岩本静男 …… 64
町づくり研究所の報告…………… 西 和夫 …… 74
出合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
…………… 堀野定雄、森みどり、久保 登、北島 創 …… 78

随 想

フィンランドの学位論文公聴会…………… 浦田暎三 …… 85
私は学生に鍛えられて成長できました…………… 丹下 敏 …… 89
学生たちと建築史に浸るー歳老いたカウボーイの感慨ー…………… 西 和夫 …… 93
贅沢で我が儘な時間…………… 室伏次郎 …… 95
楽しい大学生活でした…………… 大熊武司 …… 97

国際交流研究

ICT2007に参加して…………… 米田征司 …… 101

外部イベント

第2回先端技術見本市テクノトランスファーinかわさき2008に参加して
ー超伝導電子デバイスの磁界特性ー…………… 中山明芳、阿部 晋、渡邊騎道 …… 103

年 次 報 告…………… 105

神奈川大学工学研究所所報執筆規定…………… 117

編 集 後 記…………… 118

CONTENTS

Preface

2008 Annual Activity Plan -for contribution to society-	Zuihou KYO	1
---	------------	---

Review

Prediction of Wind Speed and Wind Direction by Mesoscale Model	Masakuni YOSHIDA Takeshi OHKUMA	2
Adaptive Algorithms for Markov Decision Processes	Masayuki Horiguchi	22
Compositional Planning Theory of Architecture	Kunio NAKAI	30
Progress of Japanese X-ray Astronomy	Fumiaki NAGASE	38
Stress intensity factors valid for linear elastic fracture mechanics	Shouetsu ITOU	49

Joint Research

Acid fog deposition on canopy and forest decline	Manabu IGAWA Kiyoshi MATSUMOTO Hiroshi OKOCHI	58
Integrated Façade System	Mamoru IWATA Takeshi OHKUMA Shizuo IWAMOTO	64
Laboratory of town planning	Kazuo NISHI	74
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	78

Essay

Lecture for Dr. Theses in Finland	Eizo URATA	85
I was brushed up by companionship with students for many years	Satoshi TANGE	89
Practice in History of Architecture	Kazuo NISHI	93
Willful and luxurious life	Jiroh MUROFUSHI	95
It was satisfactory life with the university	Takeshi OHKUMA	97

International Exchange

A Report on ICT2007	Seiji YONEDA	101
---------------------	--------------	-----

External Event

Magnetic Characteristics of Superconducting Electronic Devices Presented in 21 st TECHNO TRANSFER in KAWASAKI 2008	Akiyoshi NAKAYAMA Susumu ABE Norimichi WATANABE	103
---	---	-----

Annual Reports of the Institute	105
---------------------------------	-----

Manuscript Submission Instruction	117
-----------------------------------	-----

Letters from the Editors	118
--------------------------	-----

巻頭言

今年度の活動計画

- 社会に開かれた工学研究所をめざして -

許 瑞 邦*

2008 Annual Activity Plan

-for contribution to society -

Zuihou KYO*

今年度も昨年度に引き続いて工学部・工学研究科と協力して「社会に開かれた工学研究所」実現を目指して以下の行事・企画を予定しています。

1. 神大テクノフェスタ2008の新規開催

これまでに実施してきました工学研究所公開を進展させて、今年度は神大テクノフェスタ2008を10月17日に開催することを予定しております。テクノフェスタの目的は、工学部・工学研究科・工学研究所の研究成果とそのポテンシャルをこの機会にまとめて公開（発表・展示）し、本学と外部との交流をより一層深める機会にしたいと考えております。また、神奈川県産業技術センター、横浜市企業経営支援財団、川崎市産業振興財団のご後援を頂きましたことを心から感謝致します。

2. 工学部・工学研究科・工学研究所の

研究室・施設設備の紹介冊子の編集・発行

外部の社会・企業に対して本学の工学関係の研究活動とその可能性をご理解頂くため、今年度より毎年標記の冊子を発行することに致しました。神大テクノフェスタ開催時に配布の予定です。尚、別途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。

3. 「若者と語る」講演会の開催

今年度より標記の講演会を毎年開催することを計画しております。講演会の目的は、これからの若者に学問の面白さも含めて、若者の可能性について経験豊かな方に語って頂き、将来の進路の指針として少しでもお役に立てればと考えております。今年度は、ノーベル賞受賞者の小柴東大特別栄誉教授に講演を依頼しました。当日は400人程度の聴衆が集まり、ご自身の体験を含めて現代の物理学について、短時間ではありましたが蘊蓄を傾けてご講演頂き若者に大きな感銘を与えました。

4. テクノサイエンス連続講演会の開催

昨年度に引き続いて工学の外部社会への還元の一環として、今年度も以下の2種類の連続講演会を企画します。

- 1) 「暮らしの中のサイエンス」：多くの人が関心を持ち一般の人の実生活に役に立つ講演会

安全・安心の実現—交通と生活—

コーディネーター：堀野准教授、講師4名

- 2) 「科学と工学の最前線」：科学と工学に関して専門的だが分かりやすく、専門家でも視野の広がる講演会

環境・エネルギー問題解決の最前線

コーディネーター：大野教授、講師4名

（開催日等の詳細は、本学広報部にお尋ね下さい。）

尚、今後の連続講演会に関してご希望・ご意見がありましたら、工学研究所にご連絡下さい。

5. 工学研究所プロジェクト研究 (A,B,C) の募集

本学と外部との共同研究を積極的に推進する事を目的としたプロジェクト研究 (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A3件、プロジェクト研究B1件、プロジェクト研究C3件が工学研究所で承認され研究が順調に進行しています。特に岩田教授のプロジェクト研究Bは、多額の外部資金を獲得しましたこと、西教授の「町作り研究所」の活動が当地での新聞をにぎわせたこと等は大変喜ばしい限りです。現在1名の客員教授、14名の客員研究員、1名の特別研究員が工学研究所に在籍し、プロジェクト研究等の研究に従事しております。プロジェクト研究A,B,Cの趣旨は以下の通りで、今後とも研究所内外よりプロジェクト研究を積極的に募集いたしますので、ご興味のある方は是非ともご応募下さい。

A=研究員を採用（研究組織の充実）し実行する研究

B=外部の研究資金を獲得して実行する研究

C=社会のニーズに合った課題研究所を設立して研究

尚、プロジェクト研究の詳細は工学研究所にお問い合わせ下さい。（本号がお手元に届くときには既に終了している行事もあります点ご了承下さい。）



メソスケールモデルによる風向風速の推定

吉田 正邦*

大熊 武司**

Prediction of Wind Speed and Wind Direction by Mesoscale Model

Masakuni YOSHIDA*

Takeshi OHKUMA**

1. 緒言

計算機の進歩に伴い、非線形数値計算による風向風速の評価が現実味を増していることから、筆者等は台風時の風向風速統計値を求めるシミュレーションプログラムの開発を進めている⁽¹⁾。ただし、統計量のシミュレーション計算では、膨大な数の台風を解析することになるため(再現期間 1,000 年以上)、解析式は空気密度の変化を考慮しない非圧縮性流体の静水圧近似モデルとして演算時間を短縮している。

提案するモデルは、風向風速と温湿度を予測する Mellor & Yamada⁽²⁾ の Level 2.5 メソスケールモデルを改良したモデルであり、地形と地表状況は国土地理院提供の標高データと土地利用データにより、気圧と台風進路は気象記録に基づく統計値とすることを目的としている。ただし、解析モデルの精度検証を目的とする本論文では、風向風速観測値と予測値の対応を検討する。このため、気圧分布は気象庁提供の領域客観解析データ(GPVデータ:6時間間隔, 20km メッシュ)や毎時の気象官署観測値により、台風進路は気象庁提供の台風データとした。

GPVデータや毎時の観測値は風向風速や温湿度データも提供しており、耐風設計への直接的適用も考える。しかし、GPVデータは時間間隔と格子間隔が粗いだけでなく、平滑化が施されている。また、毎時の気象官署観測値は観測点が粗いだけでなく、定点観測値であるため高さ方向の分布が得られない。この他、地形、移流、拡散、浮力などが影響しあうことから、補間計算は不可能であり、3次元の非線形解析による補強が不可欠である。

数値解析では、①解析領域の広さ、②解析領域の境界値と領域内予測値の整合、③乱流拡散モデルの適正な選択が計算遂行上問題となる。

メソスケールモデルの場合、①の解析領域は、1,000×1,000km 程度の広さが対象になる。このため、短時間に高精度の解析を行うには対象点周りの格子間隔だけを細かくする nesting 手法の適用が必要である。これに対して、台風時の風が円運動することを考慮して、座標系を円柱座標とした場合、座標中央(台風中心)の円周方向格子間隔は細かいが、台風中心から離れるに従って格子間隔が粗くなる。このため、対象地点が解析領域外周に近い場合には、nesting 計算が必要と考えられる。しかし、台風は時々刻々移動するため、時々刻々の地形変更に要する演算時間を考えると nesting 計算の適用は困難である。

②の境界値との整合は、解析領域外から物理量が流入する風向では支障を生じないが、流出するときには境界近傍で齟齬をきたす可能性がある。台風時の風向風速を予測する円柱座標の場合、円周方向に境界が発生しないことから、境界値との整合は台風中心近傍だけが問題になる。今のところ、台風中心近傍の極大極小値は直線補間し、物理量を平滑化して数値発散を防止しているが、現在用いている2次中心差分の移流項を、粘性減衰が付加される1次風上差分に変更することや境界近傍に更なる減衰を付加することなども検討する必要がある。

③の乱流拡散モデルは、近似次数に相当する数の解を有する。また、高精度の解を得ようとして高次式にすると適切な解が選択されず、数値発散を起こす可能性がある。台風風速のシミュレーションにおいては、適切な比較データがなかったため、鉛直方向の拡散係数 K_V に関与する鉛直方向の渦拡散係数 S_m , S_h と乱れスケール l の検討を行っていない(S_m , S_h は Mellor らの Level 2 モデル, l は Level 2.5 モデル)。これに対して、中西ら⁽³⁾ は LES モデルと整合する Level 2.5 および Level 3 モデルの S_m , S_h と数値発散を起こさない Level 2 モデルの l の適用を推奨している(Level 2.5 の S_m , S_h と Level 3 の S_m , S_h の性能は同程度⁽⁴⁾)。そこで、モデル改良の可能性を調べるため、中西らの乱流

*研究員 建築学科
Researcher, Dept. of Architecture
**教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

拡散式による予測値と台風時の風向風速評価に用いた筆者らの式による予測値の比較検討を行った。

2章では解析モデルの概要を、3章ではLevel 2の S_m, S_h とLevel 2.5の l を用いた筆者らのモデル(以降**台風モデル**と呼ぶ)と、中西が提案するLevel 2.5の S_m, S_h とLevel 2の l を用いたモデル(以降**中西モデル**と呼ぶ)による風向風速予測値を一般的な平行座標系と比較し、4章では円柱座標系の台風モデルによる台風時の風向風速予測値を示す。5章では検討結果をまとめる。

3章の S_m, S_h, l による影響を比較検討した解析日時は、予測値に差が生じ易い不安定大気状態を考え(風が弱い晴天時)、MM5モデルによる詳細な検討⁹⁾が行われている、2005年8月5日(典型的夏日)と15日(午後雷雨)とした。検討項目は風向風速と大気温度とし、比較基準は東京気象台の観測値(地上74.5m)と気象庁提供6時間間隔、水平方向格子間隔20kmのGPVデータとした。

4章の台風時の風向風速観測値と予測値を比較するときの解析対象は、地形と台風特性が違う、T9119の長崎県ハウステンボス地上高さ100m(1991年9月27日)の観測値⁹⁾とT0314の宮古島地上14.5m(2003年9月10-11日)の宮古島気象台観測値の2種類とした。なお、ハウステンボスは湾に面する山裾、宮古島は平坦な島という差がある。台風特性での大きな違いは、T9119の台風移動速度 $C_T=15\sim 22\text{m/sec}$ 、最大旋風半径 $R_m=70\sim 90\text{km}$ に対する、T0314の $C_T=3\sim 12\text{m/sec}$ 、 $R_m=30\sim 43\text{km}$ である。

繰り返し現れる変数および煩雑な評価式は、巻末の”記号”および“付録A~F”に示した。

2. 解析モデル

付録Aに支配方程式と係数を定める基礎方程式を、付録B~Eに、研究者によって違いうる、晴天の弱風時に発生する不安定大気の解析で重要な物理モデル(下部境界の温湿度評価式)を、付録Fに気圧のモデル化を詳細に示している。ここでは概要、省略した式および特筆すべき事項に限定して示す。

支配方程式は、(a)非圧縮・静水圧近似の運動量保存式と(b)質量保存式、(c)熱エネルギー保存式および(d)水分保存式で構成され、風速 U, V, W 、温位 H および水分量 E を求める。圧力 P を入力値として U, V を計算する(a)の運動量保存式と他の保存式との関係を示すと、(b)の質量保存式は U, V を入力値として鉛直方向風速 W を、(c)の熱エネルギー保存式は日射、赤外放射と U, V を入力値として温位 H を、(d)の水分保存式は地表面の水分と U, V を入力値として水分量 E を計算する； W からはそれに対応する圧力成分(Π_w)が、 H と E からは浮力(Π_h)が計算され、(a)の運動量

保存式の圧力に加算される。なお、支配方程式内の物理量に連続性を持たせるため、 H は水分が全て水蒸気状態にあるとした仮温位であり、 E は水蒸気と雲の和としている。

座標系は、3章のGPVデータを初期値とする弱風の解析モデルは、平行座標系(以降**平行座標モデル**と呼ぶ)、台風時の風向風速の解析モデルは、円柱座標系(以降**円柱座標モデル**と呼ぶ)と異なる。しかし、鉛直方向は共に地表の凹凸を考慮する z^* 座標(terrain following coordinate)である。なお、平行座標モデルと円柱座標モデルの違いは、方向性のある U, V の円周角 θ による微分形が異なるだけであり、その他の微分形などは平行座標の x, y が円柱座標の半径および円周角 r, θ に代るだけである。

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial y} \rightarrow (1/r)(\partial U / \partial \theta - V), \\ \frac{\partial V}{\partial y} \rightarrow (1/r)(\partial V / \partial \theta + U), \end{cases} \quad (1)$$

物理モデルは、地表あるいは水面の温度を定めるDeardorffの植生モデル¹⁰⁾とKimuraらの都市モデル⁷⁾、雲量を求めるMellorらの雲モデル⁸⁾、地表への日射量と地表からの赤外放射量を求めるKatayamaの放射モデル⁹⁾、台風気圧分布を定めるSchloemerの気圧モデル¹⁰⁾である。

水平方向の計算進行は層別に計算する陽解析、鉛直方向は層間の相関を考慮する陰解析である。時間進行は、差分計算の時間間隔 Δt が長い、移流項を2段階で計算する松野法による¹¹⁾。

$$\begin{cases} \frac{\Phi^+ - \Phi^{n-1}}{\Delta t} = -ADV(\Phi^{n-1}) + RHS(\Phi^{n-1}), \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\Phi^n - \Phi^{n-1}}{\Delta t} = -ADV(\Phi^+) + RHS(\Phi^{n-1}), \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 ADV は移流項を、 RHS はその他の項を、 Φ は物理量を、 $n-1, +, n$ は前ステップ、中間、現ステップを表す。

本論文で提案する解析モデルは、解析領域側面と頂部に境界値を設けている。このため、平行座標モデルでは、側面の移流項の計算時に粘性減衰を設けて解析領域側面の物理量を極力境界値(GPVデータ等)に近づけることなどを試みているが、場当たりの処置は数値発散を誘発する。このため、最外端の物理量 $\Phi(1)$ にはOrlanskiのopen boundaryモデル¹²⁾による平滑化を加えて解析領域内の物理量との整合を図っている。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0, \quad C = -\frac{\Phi(2)^n - \Phi(2)^{n-1}}{\Phi(3)^{n-1} - \Phi(2)^{n-1}} \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (3)$$

ここに、 C は移流成分だけ考える位相速度を、()内の数値は境界から数えた格子点番号を表す。

頂部境界は、平行座標モデルで弱風を予測するときの頂部物理量は全てGPVデータとし、円柱座標モデルで台

風時の風向風速を予測するときには頂部風速だけ Schloemer の気圧モデル⁽⁴⁰⁾に基づく円周方向風速 $V_0=V_F$ (Friction free wind)⁽⁴³⁾とその下の格子点における風速の平均値としている(温湿度は free slip).

$$V_F = \frac{(V_*^2 + 4V_+^2)^{1/2} - V_*}{2} \quad (4)$$

$$V_* = C_T \sin \phi + f \cdot r, \quad V_+^2 = -\frac{R_m(P_{out} - P_c)}{\rho \cdot r \cdot e \times \bar{R}_m / r},$$

ここに、 ϕ は台風中心から見た台風進行方向と対象点がなす反時計回りの角度を表す。このような頂部境界値を設けることによって発生する数値発散は、解析領域頂部の鉛直方向風速 W に対応する圧力成分を Klemp らの圧力緩和式⁽⁴⁴⁾で計算し、解析領域内の圧力に加えて防止している(付録F)。

下部境界は、接地層を6カテゴリ(水面、裸地、水田、草地、森林、都市)に分類し、各カテゴリの表面が独立に大気と運動量、熱エネルギーおよび水分の flux 交換を行うとして評価する。この場合、各カテゴリの面積率を a_k とすれば、運動量 flux ($Flxu, Flxv$), 熱エネルギー flux ($Flxh$) および水分 flux ($Flxe$) は次式で表せる。なお、接地層は、flux 一定の仮定がまぼ成り立つ地上から 40m 程度までの領域であり、その上には 1,000~2,000m の大気境界層(planetary boundary layer)がある。

$$\left\{ \begin{array}{l} Flxu = \sum_{k=1}^6 a_k Flx_{u(k)}, \quad Flxv = \sum_{k=1}^6 a_k Flx_{v(k)}, \\ Flxh = \sum_{k=1}^6 a_k Flx_{h(k)}, \quad Flxe = \sum_{k=1}^6 a_k Flx_{e(k)}, \end{array} \right. \quad (5)$$

円柱座標モデルによる台風時の風向風速シミュレーションでは格子間隔を変える nesting 計算を行わないが、平行座標モデルによる GPV データを初期値とするシミュレーションでは解析領域の幅と格子間隔を 1/2 づつ小さくする4段階の nesting 計算を行なっている。

3. 平行座標モデルによる解析手法の検討

3-1. 検討事項

乱流拡散の評価に必要な変数を定めるには、既知数が不足している。従って、解析精度の向上を図ろうとすればするほど高次の未知数が発生する。また、これらの未知数は実験値や観測値に基づき定量化されるため、高次式にしても精度が向上するとはいえない。

Mellor ら⁽⁴⁵⁾は最も低 Level の Level 1 モデルから最も高 Level の Level 4 モデルまでを示している。ただし、大気境界層の解析では、本研究でも用いている Level 2.5 モデルが、適切かつ十分な性能を有するとしている。

乱流拡散に支配的影響を及ぼす係数は鉛直方向の係数

$K_V(U, V$ の場合 $K_m=lqS_m$, H と E の場合 $K_h=lqS_h$)であり、 l と q の式は更に K_V を内蔵している。 S_m, S_h, l, q は、各々高次の関数であり、各変数のモデル化を高 Level にすると、数値発散の恐れが増大する(Level 1 と Level 2 モデルは数値発散を起こさない)。

筆者らの台風モデル⁽¹⁾は、 S_m, S_h を Level 2 モデル、 q を Level 2 と Level 2.5 の平均値、 l は限界値(<2,000m)を設けた Level 2.5 モデルとして数値発散を防止している。これに対して、中西ら⁽⁹⁾は LES モデルの解析値と整合する Level 2.5 モデル(あるいは Level 3)の S_m, S_h と Level 2 モデルの l の組み合わせを提案している。そこで、台風モデルの S_m, S_h, l 評価式を中西らの提案式に変更したときの風向風速や温度の予測値への影響を比較検討した。

平行座標モデルによる検討の主目的は、上述した K_V の評価 Level を代えることによる予測値への影響であるが、nesting による精度向上と境界値を固定することによる数値発散の防止法も検討している。 K_V による影響と nesting 効果は図を用いて後述するが、境界値を固定(GPV データを適用)することに起因する数値発散は図を用いた説明が難しいので、ここで結果を記述しておく。

平行座標モデルの解析で数値発散が発生した位置は、風速の場合 解析領域外周部、温位の場合 解析領域最下端(以降レベル 1 と呼ぶ)の格子点である。風速の数値発散は、解析領域端の風速が極大あるいは極小になると、計算が進むにつれ境界値との差を増す可能性があることによる。温位の数値発散は、地表温度の上昇下降によりレベル 1 の温位に極大極小が現れることによる。本研究での差分は 2 次中心差分を原則とし、極力数値粘性が付加される 1 次風上差分を使いたくないあるいは使用箇所を限定したいが、平行座標モデルによる弱風の解析では移流項を全て 1 次風上差分とした。また、全面 1 次風上差分としても解析領域外周部の風速が数値発散する現象が止まらなかったため、解析領域外周部には粘性減衰 (1 次風上差分)-(2 次中心差分)を更に付加した[式(A7)]。

検討の主対象とする K_V の検討方法は次の通りである(風速の係数 $K_m=lqS_m$, 温湿度の係数 $K_h=lqS_h$)。

中西らは Level 2.5 と Level 3 モデルの S_m, S_h , Level 2 モデルの l を提案し、数値解析への適用を推奨している。一方、台風モデルは S_m, S_h を Level 2 モデル、 l を Level 2.5 モデルとしている。即ち、変数の Level が違う $3 \times 2=6$ 組のモデル組合せを考えうるが、比較検討は台風モデル(Level 2 の S_m, S_h , Level 2.5 の l)と中西モデル(Level 2.5 の S_m, S_h , Level 2 の l)の 2 組に限定した;両モデルの違いは S_m, S_h と l の 3 式だけである。

3-2. 計算条件

不安定大気では、風向風速や温度の予測値に乱流モデルの違いによる影響が現れやすい。即ち、地表温度が上昇する弱風かつ晴天時の裸地や都市で、乱流モデルの違いによる予測値の差が発生しやすい。

このことから、対象地点は、周辺建物の影響が大きく予測値の精度検証には適さないが、東京気象台(高さ 74.5m)とした。対象とする日は、晴天、弱風 かつ MM5 モデルを用いた解析が行われている 2005 年 8 月 5 日(典型的な夏日)と 15 日(午後雷雨)とした⁴⁾。ただし、解析モデルの安定性を確認するため、計算期間は対象日を含む 7 日間とした(7 月 30 日 21 時~8 月 7 日 3 時と 8 月 9 日 21 時~17 日 3 時; MM5 の解析結果⁴⁾に対応する図 1~3 の時間帯は 120~144 時)。予測値との比較に用いるデータは東京気象台の観測値(1 時間間隔、地上 74.5m)と GPV データ(6 時間間隔、水平方向格子間隔 20km)とした。

座標系は z^* 平行座標(平行座標モデル)、計算進行は 4 段階 nesting である。x および y 方向の格子点数は共に 50 であり、格子間隔は nesting 段階が進む毎に 1/2 に低減した(20, 10, 5, 2.5km 等間隔、東京気象台は常に解析領域中央)。ただし、鉛直方向の格子間隔は、全て標高 6,000m 迄を対数スケールで 15 分割している(15~6,000m)。

nesting 第 1 段階の物理量(格子間隔 20km の U, V, H, E)初期値と 6 時間間隔の境界値は GPV データとし、第 2~4 段階の物理量境界値(1 時間間隔)は前段階の計算値を空間補間して定めた。ポアソン方程式によらない各格子点の静水圧近似した気圧は、全て解析領域頂部と海面の GPV データを境界値とし、その間は温度予測値に基づく浮力を考慮して鉛直方向に変化させた。演算の時間間隔は $\Delta t =$ 格子間隔(km)の数値 ≤ 10 sec である。

3-3. シミュレーション結果

図 1~3 には、東京気象台の観測値と比較した 7 日間の風向風速(U, Θ)と気温(T)の時刻歴波形を全て示す。しかし、図 4, 5 の鉛直方向プロファイルは 8 月 5 日と 15 日の 3 時と 15 時に限定している(グリニッジ時刻 0 時を基準にした 6 時間間隔の GPV データは明石時刻 3, 9, 15, 21 時のデータ)。なお、図 1 と 2 は東京気象台・地上 74.5m の U と Θ を各々 2 種類示す; 上側の図 1-1 と 2-1 は nesting 第 1 段階(格子間隔 20km)、下側の図 1-2 と 2-2 は nesting 第 4 段階(格子間隔 2.5km)の U と Θ である。

凡例の“気象庁”は東京気象台・1 時間間隔の 10 分平均値を、“GPV”は 6 時間間隔の GPV データを、“台風”は Mellor らの Level 2 モデルの S_m, S_h と Level 2.5 モ

デルの I で乱流量を評価した結果(台風モデル)を、“中西”は中西らが提案する Level 2.5 の S_m, S_h と Level 2 の I で乱流量を評価した結果(中西モデル)を表す。

図 3 は nesting 第 4 段階の気温 T の時刻歴波形を示す。

図 4 は 8 月 5 日、図 5 は 8 月 15 日の 3 時と 15 時の高さ方向プロファイルであり、(a)はベクトル合成した風速 $|U|$ (m/sec)、乱れ強さ $I=q/|U|$ と鉛直方向風速の乱れスケール l (m)を、(b)は一般的表記法($N=0$, 時計回り正)の風向 Θ (deg)を、(c)は気温 T ($^{\circ}\text{C}$)を、(d)は渦拡散係数 S_m, S_h を示す。

観測値(気象庁)と予測値(台風、中西)の対応は興味ある事項である。しかし、風向風速の場合、周辺構造物の局所的影響を解析では無視すること、格子間隔が粗いため地形の凹凸が平滑化されること、弱風では真値に対する数値誤差の比率が大きいことなどの誤差要因がある。温度は予測値への影響が大きい地中温度 T_g を GPV データ地表温度の期間平均値(地上 1.5m, 7 日間)とするなど定数が未調整なため、観測値と予測値の直接的な比較は難しい。このため、以降の検討は、主に nesting 効果とモデル(台風モデルと中西モデル)による影響とする。

図 1 と図 2 によると netting 効果が読みとれる。これらの図は、nesting 段階が増す($\Delta t, \Delta x, \Delta y$ が小)と、風向風速の時間・空間変動が細くなること、台風モデルと中西モデルの間に差が生じることを示している。しかし、nesting が予測精度を向上させるか否かを判断するのは難しい。また、GPV データや観測値との差に比べ、台風モデルと中西モデルの違いによる差は小さく、モデルの優劣を判定することも難しい。

図 3 に示す温度 T の場合、乱流モデルの違いによる影響は微細であり無視しうる。なお、GPV データの観測値との整合は、予測値より劣っているようである(この傾向は図 1, 2 の風向風速にも見られる)。

図 4 と図 5 の鉛直方向プロファイルで特徴的な事項は次の通りである。 S_m, S_h は、3 時の場合 中西モデルに、15 時の場合 両モデルの地表近くで、大気が不安定状態になることを示している。また、乱れスケール l の違いは全高さに亘り顕著であり、台風モデル(Level 2.5)の l は複雑な高さ方向変化を示している。

$|U|$ と I は、 K_v の関数であるため、台風モデルと中西モデルの違いによる影響を受ける(風向 Θ への影響が大きいのは風速が 1~6 m/sec と小さいことにもよる)。しかし、同じく K_v の関数である T には、モデルの違いによる影響がほとんど見られない。このように、 $|U|, I$ にはモデルの違いが現れ T に現れないのは、 T に比べ $|U|$ や I の時間・空間変動が激しいことによると考えられる。しかし、GPV データとの関係なども考慮すると、鉛直方向プロファイル

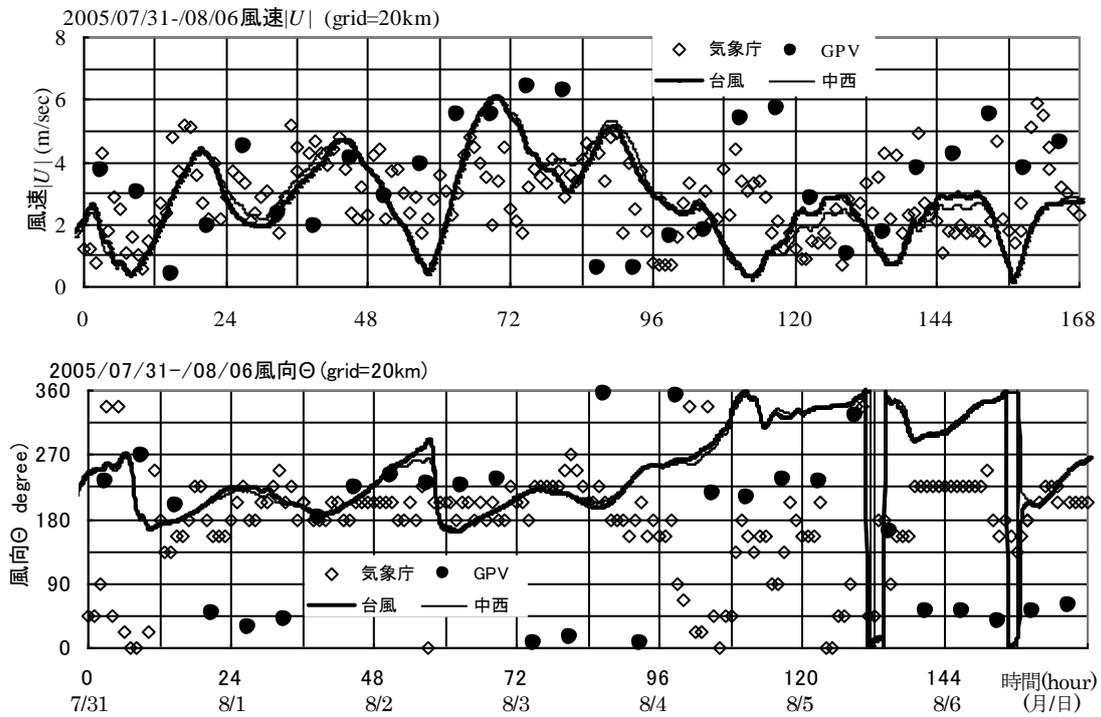


図1-1 ネスティング第1段階の風向風速時刻歴波形 (東京気象台, 地上 74.5m, 2005年7月31日~8月6日)

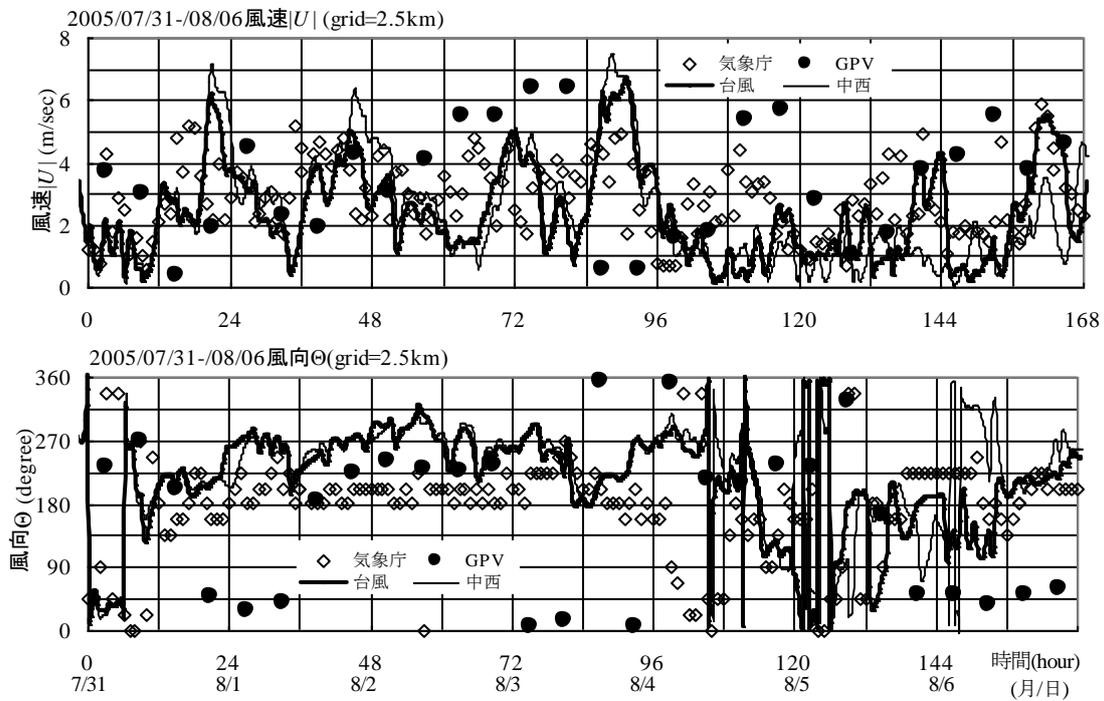
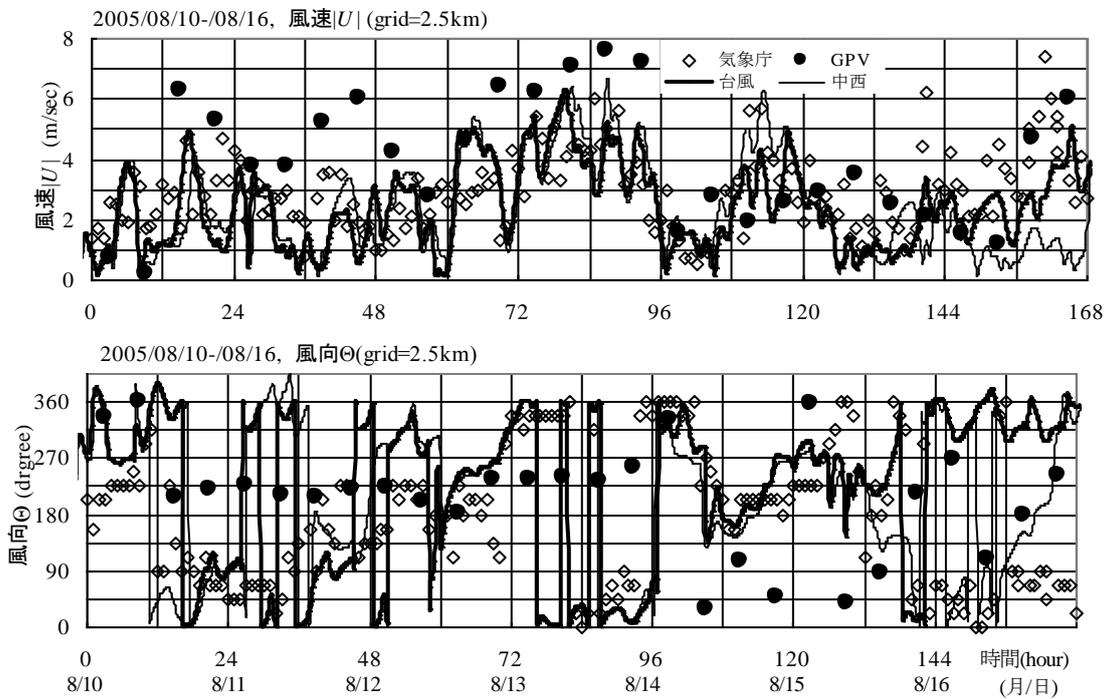
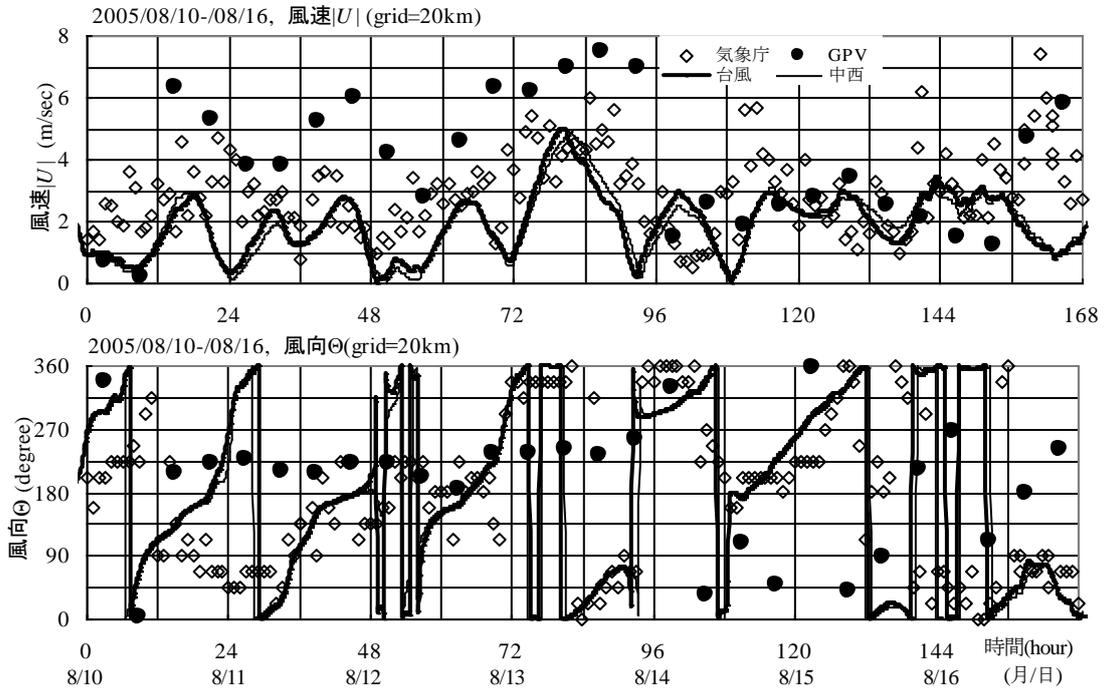


図1-2 ネスティング第4段階の風向風速時刻歴波形 (東京気象台, 地上 74.5m, 2005年7月31日~8月6日)



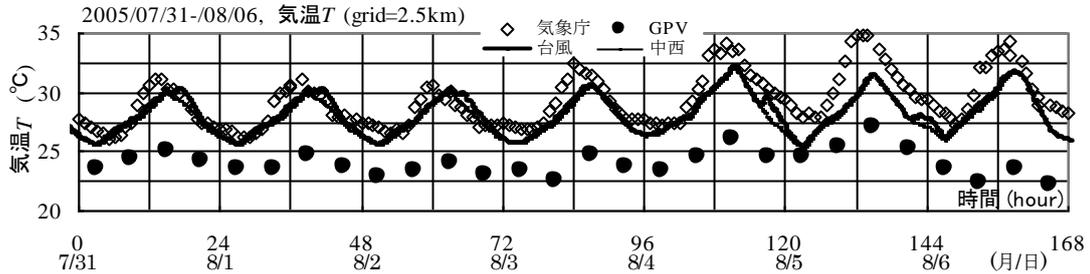


図3-1 ネスティング第4段階の気温時刻歴波形 (東京気象台, 地上 74.5m, 2005年7月31日~8月6日)

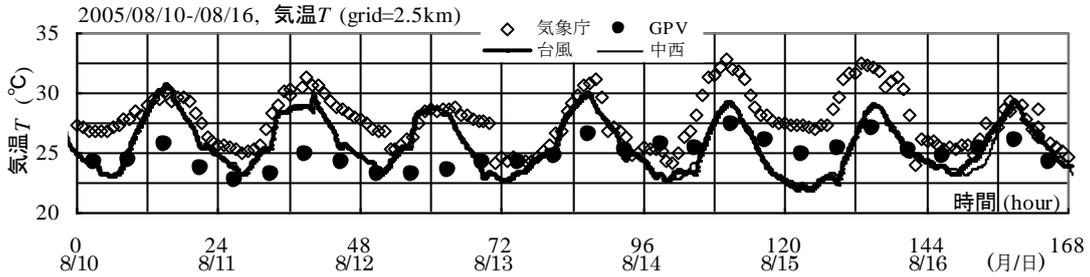


図3-2 ネスティング第4段階の気温時刻歴波形 (東京気象台, 地上 74.5m, 2005年8月10日~8月16日)

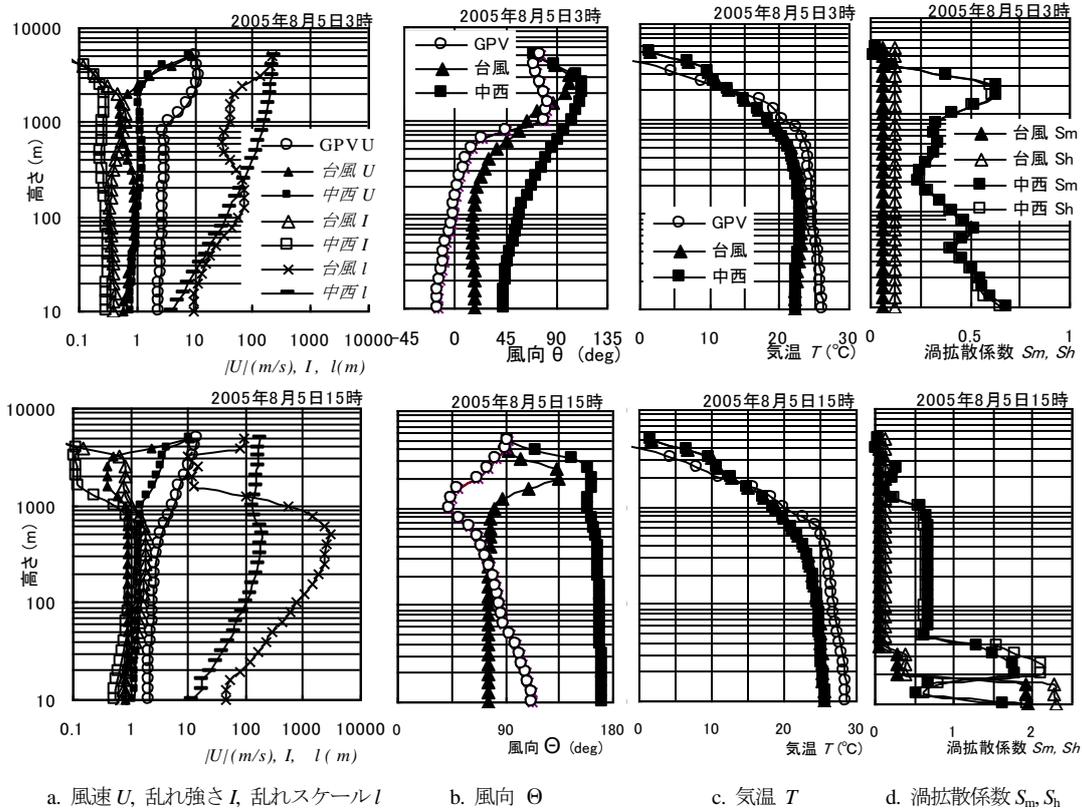


図4 鉛直方向プロファイル (東京気象庁, 2005年8月5日3時および15時, nesting第4段階, 格子間隔2.5km)

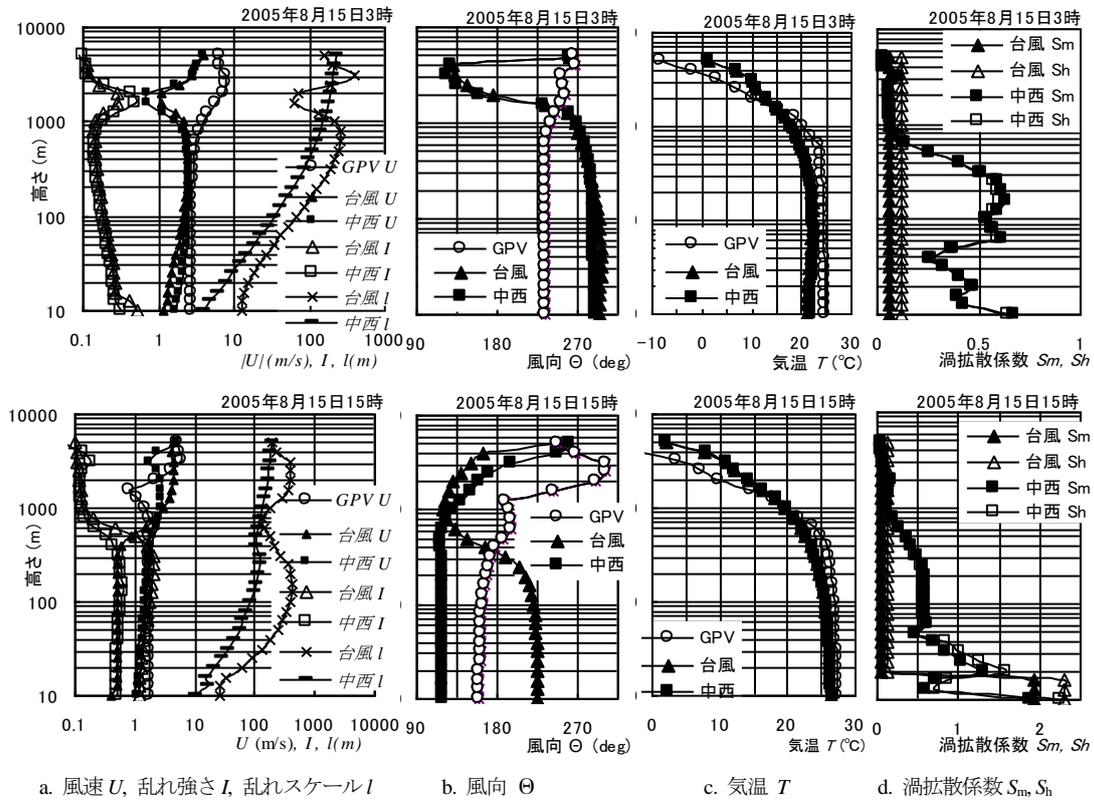


図5 鉛直方向プロファイル (東京気象庁, 2005年8月15日3時および15時, nesting第4段階, 格子間隔2.5km)

に対しても両モデルは優劣つけがたく, 同程度の性能を有するとして良さそうである。

Level 2.5モデルの S_m, S_h およびLevel 2モデルの l の計算がシミュレーションの演算時間に占める割合は少ない。従って, 平行座標モデルの検討結果に基づき, 台風モデルの S_m, S_h を他の式と整合するLevel 2.5モデルにし, 数値発散を予防するため l をLevel 2モデルとLevel 2.5モデルの平均値とするようなモデルの改良が考えうる。

4. 台風時の風向風速

台風時の風向風速 (U, Θ) の予測法および予測結果は参考文献1に詳述しているので, 本論文では図と表を抜粋してメソスケールモデルの性能を示すに止める。

4-1. 計算条件

計算の対象にした台風はT9119(1991年9月27日, 台風19号)とT0314(2003年9月10-11日, 台風14号)であり, それらの台風パラメータは表1-1と1-2に示す。予測値と比較する観測値は, T9119の場合, 長崎県ハウステ

ンボス(N32.8°, E129.7°, 観測高さ地上100m)の観測値⁵⁾であり, T0314の場合, 宮古島気象台(N24.8°, E125.3°, 観測高さ地上14.5m)の観測値である。観測点周辺の地形は, ハウステンボスの場合, 南-西-北が日本海, 南-東が湾に面し, 北-東には1,000mを超えるような山々がある。一方, 宮古島気象台の場合, 西側が東シナ海, 東側が起伏の小さい陸地に面している。

基礎方程式や物理モデルは3章の解析に用いた平行座標モデルと同一であるが(付録および参考文献1参照), 座標系は z^* 円柱座標である(台風中心は常に座標中央)。

台風時の風向風速のシミュレーションは, 前述した平行座標モデルによる検討を行うより以前に行なわれている。従って, 移流項の計算は2次中心差分であり, 台風中心近傍の極大極小値は補間して平滑化しており, 乱流モデルは台風モデルとなっている。鉛直方向格子間隔は3章の平行座標モデルの解析と同じく標高6,000m迄を対数スケールで15分割(15~6,000m)しているが, 半径方向 r と円周方向 θ の格子点数は共に64とし, r 方向の格子間隔は5kmとした(nesting無)。演算の時間間隔は $\Delta t=9\text{sec}$ である。

4-2. シミュレーション結果

図6は、T9119の地上100mにおける $|U|$ と Θ を、図7はT0314の地上14.5mにおける $|U|$ と Θ を示す。

図6の風速 $|U|$ は、 $\Theta \approx 90^\circ$ となる台風接近時の観測値⁽⁵⁾と予測値に差がある。一方、図7の宮古島気象台の $|U|$ は、台風最接近時、特に通過後11日6~12時の差が大きい。なお、T9119の最大風速は予測値31.2m/sec、観測値34.6m/s(差 $\Delta U=3.4$ m/s)であり、T0314の最大風速は予測値39.3m/sec、観測値38.4m/s(差 $\Delta U=0.9$ m/s)である。

観測点が解析領域の外周に近くなる場合、円周方向の

格子間隔が粗くなる(外周の円周方向格子間隔31km)。この粗い格子間隔を考慮し、観測位置を囲む4格子点の最大最小値と観測値を比較すると⁽⁴⁾、T9119の観測値はほぼ最大最小値の範囲内にあった。しかし、T0314の台風通過後(11日6~12時)の過小な観測値は最大最小値の範囲外となった。これらは、T9119の場合、風上の山による後流が正しく評価できていないこと、T0314の場合、観測高さが14.5mと低いことから周辺障害物が影響していることを示していると考えられる。しかし、最大風速の予測値と観測値の差は10%以下であり、観測地点が台風中心に近い(円周方

表1-1 T9119の台風パラメータ (ハウステンボス)⁽⁵⁾

日時	λ (deg)	ϕ (deg)	C_T (m/s)	C_D (deg)	P_c (hPa)	P_{out} (hPa)	R_m (km)
27/10	127.9	33.3	15.15	62.3	935	1013	67.1
11	128.1	30.8	15.13	62.4	935	1013	71.8
12	128.4	31.2	15.24	60.5	935	1013	75.1
13	128.7	31.6	15.55	59.7	935	1013	78.0
14	129.0	32.1	15.54	59.8	935	1013	77.2
15	129.3	32.5	14.49	51.1	935	1013	78.0
16	129.7	32.8	17.13	50.1	940	1013	84.4
17	130.2	33.4	20.55	55.8	942	1013	88.7
18	130.6	33.9	21.17	52.1	945	1013	89.5
19	131.2	34.4	21.90	49.1	945	1013	87.3
20	131.7	35.0	21.84	49.3	945	1013	88.1

表1-2 T0314の台風パラメータ (宮古島気象台)

日時	λ (deg)	ϕ (deg)	C_T (m/s)	C_D (deg)	P_c (hPa)	P_{out} (hPa)	R_m (km)
10/06	127.5	23.5	2.99	151.3	928		
12	126.9	23.7	3.29	143.8	920	1008	23.2
18	126.3	24.2	2.99	118.6	910	1009	29.5
11/00	125.7	24.6	3.29	75.6	910	1010	30.5
06	125.3	24.8	2.88	76.2	910	1011	34.7
12	125.3	25.7	3.70	78.5	923	1012	40.7
18	125.5	27.0	5.79	75.1	930	1012	42.9
12/00	125.9	28.7	7.25	71.6	935	1012	43.3
06	126.5	30.6	11.2	63.0	934	1012	43.3
12	127.2	32.8	11.6	60.2	939		
18	127.9	34.1	12.4	60.2	945		

(注) λ =傾度, ϕ =緯度, C_T =台風進行方向, C_D =東を0°, 反時計回り正の台風進行方向, P_c =台風中心気圧, P_{out} =周辺気圧, R_m =最大旋衡風速半径

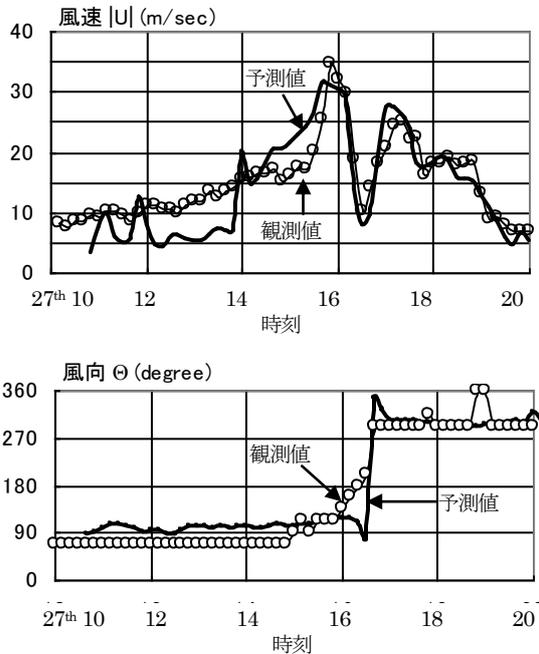


図6 T9119の風向風速時刻歴波形 (ハウステンボス, 観測高さ100m)

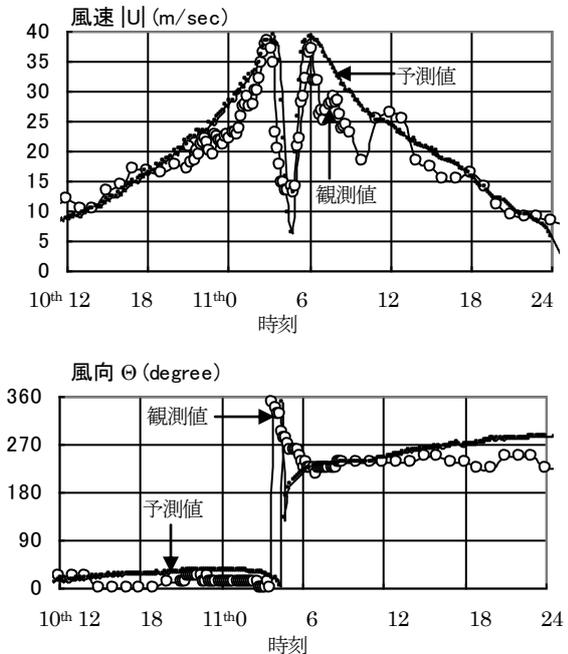


図7 T0314の風向風速時刻歴波形 (宮古島気象台, 観測高さ14.5m)

向の格子間隔小)ときの最大風速はシミュレーションによって評価できる可能性を示している。

図8は T9119 (27日16時)台風進行方向側の|U|の鉛直方向分布を示す、① $R_m=84.4\text{km}$ 、②表示断面は NE (ハウステンボスを通る台風中心→長崎→下関ライン)、③観測位置は台風中心から 75km。なお、ハウステンボス周辺の複雑さを示すため、図10には地上高さ125mの半径方向風速分布と海面からの地表面高さ(標高)の変化を示す。

図9は T0314 (11日0時)台風進行方向側の|U|の鉛直方向分布を示す、① $R_m=30.7\text{km}$ 、②表示断面は WNW (台風中心と宮古島気象台を通る半径r方向のライン)、③観測位置は台風中心から45km。

台風時の鉛直方向風速分布を観測している例は少なく、表2⁽¹⁷⁾に示すような鉛直方向風速勾配を表すベキ指数 α

表2 台風風速の鉛直方向ベキ指数と傾度高さ観測値⁽¹⁷⁾

著者	観測地点	ベキ指数 α	傾度高 Z_g m	備考
林田 et al.	筑波市	0.24	600~700	台風中心近傍
天野 et al.	那覇市,市街地	0.45	50~200	台風中心近傍
Powell et al.	USA 海上	0.077	500~600	台風中心近傍
Wilson	Australia 海岸	0.14~0.18	60~	台風中心近傍
	"	0.12	-	外側強風域
Lau & Shun	香港	-	2,000	外側強風域
Franklin et al.	USA 海上	0.09	900~1,000	外側強風域
石崎	日本各地	0.24~0.33	-	-
Choi	香港	0.19~0.28	1,460	-

(注1) 天野 et al.: 6枚の図から求めたベキ指数範囲は $\alpha=0.24\sim 0.73$ 。算術平均値 $\alpha=0.48$ 、幾何平均値 $\alpha=0.45$ 。

(注2) 石崎: $\alpha=0.33$ は台風中心近傍、 $\alpha=0.24$ は外側強風域と考える。

と傾度高さ Z_g を示せる程度である。ただし、台風中心近傍や最大旋衡風速半径 R_m 近辺の強風域を狙った観測が一般

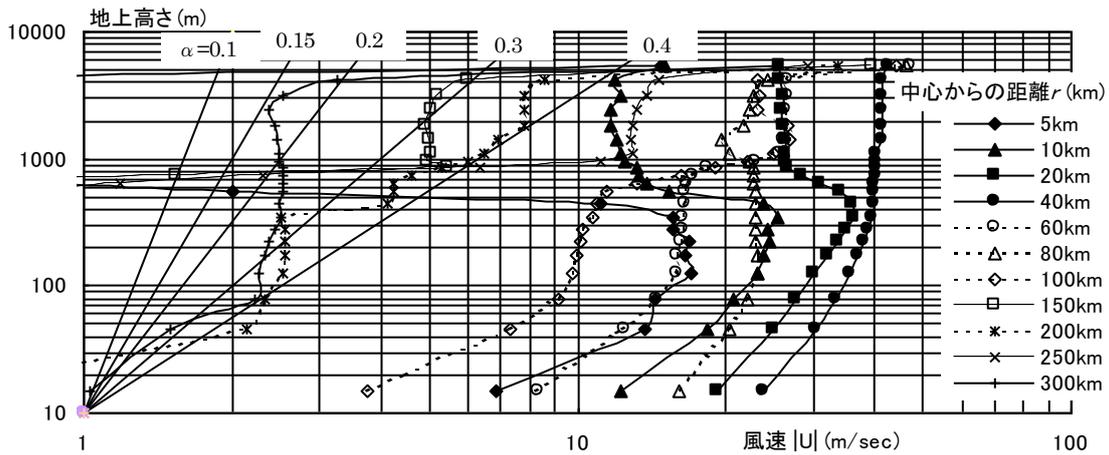


図8 T9119の風速高さ方向プロファイル (27日16時, $R_m=84.4\text{km}$). (注) 直線は $U=(z/10)^\alpha$ を表す。

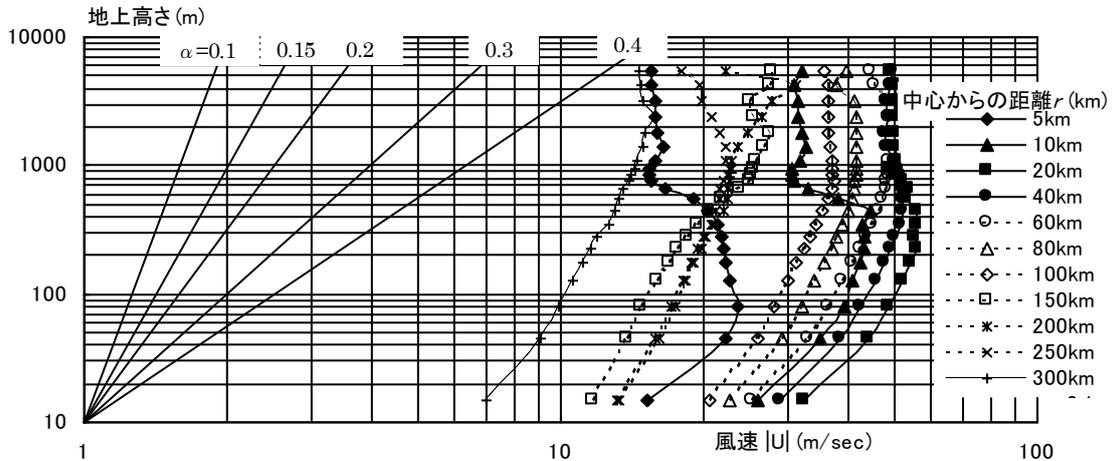


図9 T0314の風速高さ方向プロファイル (11日0時, $R_m=30.7\text{km}$). (注) 直線は $U=(z/10)^\alpha$ を表す。

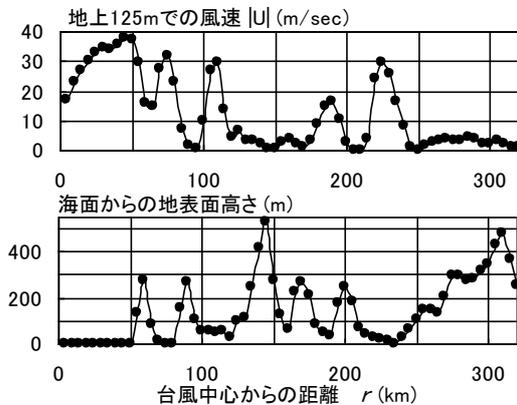


図10 地上高さ125mにおける半径 r 方向の風速分布と
地表面高さ分布 (T9119:1991年9月16日16時)

的なことから、数値の変動幅が大きい。

数値解析に基づくべき指数 α には、地上高さ $z=45\text{m}$ を境に変化する傾向が見られる。このため、 $z=45\text{m}$ の下と上に分けて表2との関係を検討する；対応する表2の観測値は、()内に論文著者名で示す。

台風中心近傍 $r < R_m$ の α は、T9119とT0314の間に大きな差がなく、 $z \leq 45\text{m}$ で $\alpha = 0.3 \sim 0.4$ (天野,石崎,Choi)、 $z > 45\text{m}$ で $\alpha = 0.15 \sim 0.2$ (林田,Wilson)となる；天野の市街地の観測値 $\alpha = 0.45$ は大きく、Powellの海上の $\alpha = 0.077$ は小さい。

外側強風域 $r > R_m$ は地表面粗度によって差があり、 $z \leq 45\text{m}$ 場合、粗度が大きいT9119で $\alpha > 0.4$ (表2に該当例無)、海上T0314で $\alpha = 0.2 \sim 0.25$ (石崎,Choi)である。しかし、上空 $z > 45\text{m}$ は逆に、T9119の $\alpha < 0.12$ (Franklin, Wilson)と比べ、T0314の方が $\alpha = 0.14 \sim 0.16$ (Choi)と大きい。

最大風速が、解析領域頂部 $z=6,000\text{m}$ 以下で発生する領域は、粗度の大きいT9119の場合 $r < 40\text{km}$ ($\approx R_m/2$)に限られる。しかし、T0314の最大風速は全て $z < 2,000\text{m}$ で発生している。

風速極大値の発生高さを傾度高さ Z_g とすると、 $r < 40\text{km}$ では図8,9共 $Z_g < 500\text{m}$ 、 $r > R_m$ では表2と同様な $Z_g = 1,000 \sim 2,000\text{m}$ である(粗度が大きいT9119の方が高め)。

なお、台風時の気圧分布観測値は高さによって変化し、上空では滑らかになるが⁽¹⁷⁾、数値計算では台風気圧成分 Π_i に全高さ同一のSchloemerモデルを適用した。しかし、 Π_i の高さ方向変化を無視した計算でも、高さ方向プロファイルの予測値は観測値と対応する結果を示している。

5. 結言

耐風設計に活用できる台風時の風向風速統計値を数値解析によって評価することを目指し、メソスケールモデルの特性と改良を検討した。乱流拡散への影響が大きい不安定大気を対象にした弱風の解析は平行座標モデルで、中立安

定大気と考えられる台風時の解析は、円柱座標モデルで行った。平行座標モデルで検討した事項は①nesting手法、②解析領域の境界値と領域内予測値の整合、③乱流拡散モデルの違いによる影響であり、円柱座標モデルで検討した事項は④台風時の風向風速観測値を基準にした解析モデルの性能である。

①のnestingについては、nesting段階が増し時間刻み Δt 、格子間隔 $\Delta x, \Delta y$ が小さくなると物理量の時間・空間変動が細くなる。しかし、これが解析精度を向上させるか否かは判定できなかった。②が関係する、境界値を設けると数値発散することに対しては、移流項に粘性減衰の付加が必要なることを確認した(2次中心差分を1次風上差分にすることなど)。③の乱流拡散のモデル化については、筆者らの台風モデルと中西らが提案する中西モデルによる予測値を比較し、両モデルの性能に大きな差がないことを確認した。ただし、解析モデルの改良に際しては、評価式のLevel統一を考え、筆者らの渦拡散係数 S_m, S_h はLevel 2.5とし、論理性のある数値発散防止法として、鉛直方向の乱れスケール l はMellorらのLevel 2.5と中西らが提案するLevel 2モデルの平均値とするのが適切と考えられた。④の台風時の風向風速の予測に用いた円柱座標は、円座標の中心(台風中心)で格子間隔が細かく、外周部では粗くなる。このため、予測対象点が台風中心から外れると、解析誤差が大きくなる可能性がある(格子間隔が粗いと地表の凹凸が平滑化される)。また、地表面データとして国土地理院の標高データを用いることから、周辺構造物などの影響を予測値に反映できないことなどメソスケールモデルの限界も把握できた。しかし、円周方向の格子間隔が狭い、台風中心近傍の最大風速の予測精度が良好であること、鉛直方向の風速分布も観測値と対応していることから、使用目的を限定すればメソスケールモデルによる風向風速の予測も有用である。

パソコン(Dell Dimension C521)が、7日間4段階のnesting計算(並列計算、平行座標モデル、最小時間刻み $\Delta t = 2.5\text{sec}$ 、格子点数 $50 \times 50 \times 15$)に要した時間は約40時間であり、ワークステーション(COMPAQ Alpha-server ES45)が、1日の計算(nesting無、円柱座標モデル、 $\Delta t = 9\text{sec}$ 、格子点数 $64 \times 64 \times 15$)に要した時間は約3時間であった。なお、 Δt が3.6倍粗いとしてCOMPAQの計算時間を見ると、COMPAQの計算時間はDell Dimensionと比べ長い。この理由は、COMPAQが購入後約10年を経過した機種であること、台風進行に伴う地形データの更新を演算の各ステップで行うことによる。

今後は、メソスケールモデルの性能を更に調査すると共に、耐風設計用統計値の評価を考慮した演算時間の短縮にも挑戦したい。

6. 謝辞

本研究は、筆者の1人である吉田が鹿島建設株式会社に在職していた1996年に始まり現在に至る。シミュレーションプログラムの導入には気象庁気象情報課(元気象研究所)高橋俊二予報官のご指導を賜りました。本研究に対する協力および資料の提供を頂きました鹿島建設株式会社技術研究所太田勝矢氏、高木賢二氏、山本学氏、山中徹氏に感謝します。また、2004年に吉田が神奈川大学の研究員となって以降、有用な助言を頂きました三井建設株式会社技術研究所野田博氏、(株)泉創建エンジニアリング岡田創氏に感謝します。

付録A 基礎方程式

座標系は地形の凹凸を考慮する z^* 座標(terrain following coordinate)であり、変換式は次の通りである。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x^*} + \left(\frac{z^* - z_T}{z_h} \frac{\partial z_g}{\partial x^*} \right) \frac{\partial}{\partial z^*}, \\ \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y^*} + \left(\frac{z^* - z_T}{z_h} \frac{\partial z_g}{\partial y^*} \right) \frac{\partial}{\partial z^*}, \\ \frac{\partial}{\partial z} = \frac{z_T}{z_h} \frac{\partial}{\partial z^*}, \end{cases}$$

$$z_h = z_T - z_g, \quad z^* = (z_T / z_h)z$$

ここに、上付きの*は z^* 座標の距離を、 z_T は解析領域の頂部高さを、 z_g は地表高さ(標高)を、 z^* は($z_g \sim z_T$)を(0 ~ z_T)に拡大した鉛直座標値を表す。なお、 x 方向と y 方向の距離 x, y は z^* 座標の距離 x^*, y^* と一致するので、後述する各式では z^* を除き、上付きの*を省略している。

本研究での圧力 P はExner関数 Π に変換し、温度 T は圧力変化に起因する可逆な断熱変化を陰に含む温位 H に変換している。

$$\begin{cases} \Pi = c_p(P/P_0)^\gamma = c_p T/H, \\ H = T(P_0/P)^\gamma = c_p T/\Pi, \end{cases}$$

ここに、 $\gamma = (c_p - c_v)/c_p$ は比熱比を、 c_p は等圧比熱を、 c_v は等容比熱を、添え字 o は代表値を表す。

海面などを基準高さ($z=0$)にした高さ z における、 T と H の関係は、状態方程式 $P = \rho R_c T$ と静水圧近似の条件 $\Delta P = -\rho \Delta z$ を適用すると、

$$\frac{T(z)}{H(z)} \approx \frac{1}{c_p} \left[\Pi_{z=0} - \frac{1}{\alpha_h} \ln \frac{H_{z=0} + \alpha_h z}{H_{z=0}} \right]$$

ここに、 $\alpha_h \approx 0.0035 \text{ K/m}$ は温位の高さ方向勾配を表す。

空気密度 ρ を H と Π の関数で表わすと次のようになる。

$$\rho = P_0 (\Pi / c_p)^{(1/\gamma)-1} / (R_c H)$$

ここに、 $R_c = (c_p - c_v)$ は気体定数を表す。

A 1. 支配方程式

支配方程式は非圧縮・静水圧近似の運動量保存式と質量保存式、熱エネルギー保存式と水分保存式とし、風速 U, V, W 、温位 H 、水分 E 、圧力(Exner関数) Π を計算する。なお、基礎方程式内での H は水分が全て気体(水蒸気)とした仮温位であり、 E は液体・水蒸気のトータル量とする。

運動量保存式は、

$$\begin{cases} z_h \frac{\partial U}{\partial t} = -ADV(U) - \frac{z_h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + z_h fV + DIF(U), \\ z_h \frac{\partial V}{\partial t} = -ADV(V) - \frac{z_h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - z_h fU + DIF(V), \end{cases} \quad (\text{A1,2})$$

ここに、 ADV は移流項を、 DIF は拡散項を、 f はコリオリパラメータを表す。

熱エネルギー保存式は、

$$z_h \frac{\partial H}{\partial t} = -ADV(H) + DIF(H). \quad (\text{A3})$$

水分保存式は、

$$z_h \frac{\partial E}{\partial t} = -ADV(E) + DIF(E). \quad (\text{A4})$$

質量保存式は、次の通りである。

$$\frac{\partial z_h U}{\partial x} + \frac{\partial z_h V}{\partial y} + \frac{\partial z_h W^*}{\partial z^*} = 0, \quad (\text{A5})$$

$$W^* = \frac{z_T}{z_h} \left[W_z + \frac{z^* - z_T}{z_T} \left(\frac{\partial z_g}{\partial x} U + \frac{\partial z_g}{\partial y} V \right) \right],$$

ここに、 U, V は z^* 座標としても数値が変化しない風速であり、 W^* は平行座標の鉛直方向風速 W_z に水平風速2成分 U, V の z^* 座標への写像で発生する鉛直成分を加えた z^* 座標の鉛直方向風速である。

ADV は、 U, V, H, E など、物理量 Φ の関数である(下式は台風シミュレーションでの ADV であり、弱風を対象にした平行座標モデルの場合は $C_{Tx} = C_{Ty} = 0$ となる)。

$$ADV(\Phi) \equiv \frac{\partial z_h (U - C_{Tx}) \Phi}{\partial x} + \frac{\partial z_h (V - C_{Ty}) \Phi}{\partial y} + \frac{\partial z_h W^* \Phi}{\partial z^*}, \quad (\text{A6})$$

ここに、 C_T は台風進行速度を、添え字 x, y は x 方向と y 方向成分を表す。台風シミュレーションの場合に、進行速度を含めるのは、台風進行速度の時間・空間変化が小さいとして、台風進行速度 $\{C_T\}$ を ADV 内で考慮することによる。移流項は数値発散を発生させる要因となるので、1次風上差分、2次中心差分、3次風上差分、4次中心差分など、差分計算法に対する提案や検討が数多くなされている。これらを大別すると風上差分は評価点も考慮して物理量勾配を定めるが、中心差分は評価点の値を無視して勾配を評価している。例えば、風速 U を正とし、評価点を o 、風上点を -1 、風下点

を1としたときの1次風上差分と2次中心差分の差(粘性減衰)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & (1次風上差分)-(2次中心差分) \\ & = U[(\Phi_o - \Phi_{-1})/\Delta x - (\Phi_1 - \Phi_{-1})/2\Delta x] \quad (A7) \\ & = U[\Phi_o - (\Phi_1 + \Phi_{-1})/2]/\Delta x, \end{aligned}$$

上式の差は、評価点oの物理量と風上風下の物理量平均値の差に基づく勾配に相当する。例えば、2次中心差分で計算すると、平行座標モデルは境界値(GPV データ)を設定するxおよびy方向の側面境界の近くに、円柱座標モデルは、連続性を保つため、流入流出する物理量を調整する座標中心近くに、数値発散あるいは異常な値が発生する。そこで、平行座標モデルの解析では、移流項を1次風上差分とし、更に評価点の物理量が3点(評価格子点+前後格子点)中で極大極小となる場合は、式(A7)に相当する粘性減衰量を更に加算する試みを行っている。

DIFは拡散項であり、地表の凹凸が水平方向の格子間隔と比べ無視できるとした近似式である。

$$\begin{aligned} DIF(\Phi) \approx & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial z_h \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial z_h \Phi}{\partial y} \right) \\ & + z_h \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V \frac{(z_T - z_h)^2}{z_h} \frac{\partial \Phi}{\partial z^*} \right), \quad (A8) \end{aligned}$$

ここに、 K_H は水平方向の拡散係数を、 K_V は鉛直方向の拡散係数を表す(Φ が風速の場合 $K_V=K_m$ 、温湿度の場合 $K_V=K_h$ 、 K_H は全成分同一)。

圧力項は、安定大気の温位 H_o とそれからのずれ ΔH に分解し、 H_o は物理量の時間変化に影響しないとして無視する Boussinesq 近似の $\partial \Pi / \partial z^* \approx (z_T / z_h) [\Delta H \cdot g / (H_o H)]$ を適用した次式による ($H=H_o + \Delta H$)。

$$\frac{z_h}{\rho} \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} \right\} \approx H \left\{ \frac{\partial z_h \Pi}{\partial x} + z_h \frac{(z^* - z_T)}{z_T} \frac{\partial z_g}{\partial x} \frac{g \Delta H}{H_o H} \right\}, \quad (A9)$$

$$\frac{z_h}{\rho} \left\{ \frac{\partial P}{\partial y} \right\} \approx H \left\{ \frac{\partial z_h \Pi}{\partial y} + z_h \frac{(z^* - z_T)}{z_T} \frac{\partial z_g}{\partial y} \frac{g \Delta H}{H_o H} \right\},$$

支配方程式が静水圧近似式であるため、浮力と風速 W に対応する圧力成分は別式で評価している。ただし、弱風を対象にした場合、浮力による圧力への影響が大きく、圧力変化が滑らかでないことがある。そこで、平行座標モデルの解析では、評価点の圧力が極大極小となる時は圧力勾配を0とした(解析結果への影響は微少であった)。

A.2. 拡散係数

水平方向の拡散係数 K_H は Deardorff の SGS モデル⁽¹⁸⁾ による。z*座標の場合、 K_H も複雑になるので、式(A8)と同様、水平方向の格子間隔と比べ標高の差分 Δz_g が小さいとした近

似式としている。

$$K_H \approx (c_s \Delta)^2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{(\partial U / \partial y + \partial V / \partial x)^2}{2} \right)^{1/2}, \quad (A10)$$

ここに、 c_s はスマゴリンスキー定数であり、 $\Delta = (\Delta x \Delta y)^{1/2}$ は格子間隔の代表幅を表す

風速と温湿度の鉛直方向の拡散係数、 $K_{V(U,V)} = K_m = lq S_m$ と $K_{V(H,E)} = K_h = lq S_h$ を定める渦粘性係数 S_m 、 S_h は、

Level 2 モデルの場合、

$$\begin{cases} S_{m2} = \frac{A_1 F_1}{A_2 F_2} \frac{R_{f1} - R_f}{R_{f2} - R_f} S_{h2}, \\ S_{h2} = 3A_2 (\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_{fc} - R_f}{1 - R_f}, \end{cases} \quad (A11)$$

$$\gamma_1 = 1/3 - 2A_1/B_1,$$

$$\gamma_2 = 2A_1(3 - 2C_2)/B_1 + B_2(1 - C_3)B_1,$$

$$F_1 = B_1(\gamma_1 - C_1) + 2A_1(3 - 2C_2) + 3A_2(1 - C_2)(1 - C_5),$$

$$F_2 = B_1(\gamma_1 + \gamma_2) - 3A_1(1 - C_2),$$

$$R_{f1} = B_1(\gamma_1 - C_1)/F_1, \quad R_{f2} = B_1\gamma_1/F_2, \quad R_{fc} = \gamma_1/(\gamma_1 + \gamma_2),$$

Level 2.5 モデルの場合、

$$\begin{cases} S_{m2.5} = (A_2 E_2 - R_1 E_4)/(E_2 E_3 - E_1 E_4), \\ S_{h2.5} = (R_1 E_3 - A_2 E_1)/(E_2 E_3 - E_1 E_4), \end{cases} \quad (A12)$$

$$E_1 = 1 + 6A_1^2 G_M - 9A_1 A_2 (1 - C_2) G_H,$$

$$E_2 = -3A_1 [4A_1 + 3A_2(1 - C_5)](1 - C_2) G_H,$$

$$E_3 = 6A_1 A_2 G_M,$$

$$E_4 = 1 - 12A_1 A_2 (1 - C_2) G_H, \quad E_4 = E_4 - 3A_2 B_2 (1 - C_3) G_H,$$

$$R_1 = A_1(1 - 3C_1),$$

$$G_M = (l/q)^2 (\partial U / \partial z)^2, \quad G_H = -(l/q)^2 (g/H_o) (\partial H / \partial z),$$

ここに、Mellor らは上式中の係数を実験データから次のように定めており、

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08),$$

$$(C_2, C_3, C_4, C_5) = (0, 0, 0, 0),$$

中西は LES データと整合する次の値を提案している。

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (1.18, 0.665, 24.0, 15.0, 0.137),$$

$$(C_2, C_3, C_4, C_5) = (0.65, 0.294, 0.0, 0.2),$$

flux Richardson 数 $R_f \leq 0.191$ と gradient Richardson 数 $R_i \leq 0.195$ は、次の通りである。

$$R_f = 0.6588 [R_i + 0.1776 - (R_i^2 - 0.3221R_i + 0.03156)^{1/2}],$$

$$R_i = g \frac{\beta_T \cdot \partial H / \partial z + \beta_E \cdot \partial E / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2 + (\partial V / \partial z)^2},$$

ここに、 β_T と β_E は湿潤大気の温位と水分に対する温度膨張係数成分を表す⁽⁶⁾ (付録 D 参照)。

A 3. 乱流エネルギー q^2 (水平方向拡散は無視)

Mellor らの Level 2.5 の q^2 は次式による²⁾.

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_h q^2}{\partial t} = & -ADV(q^2) + \frac{z_T^2}{z_h} \left\{ \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z^*} \right) \right. \\ & + 2K_V(U,V) \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z^*} \right)^2 \right\} \\ & \left. - 2g \cdot K_V(H) z_T \left(\beta_T \frac{\partial H}{\partial z^*} + \beta_E \frac{\partial E}{\partial z^*} \right) - 2z_h \frac{q^3}{B_l} \right\}. \end{aligned} \quad (A13)$$

ここに、 $K_q \approx 0.2 l q$ である。

上式は、 K_V, l, q の関数であり、不安定気では発散の恐れがある。そこで、本研究での q^2 は Level 2.5 モデルと次に示す Level 2 モデルの q^2 ,

$$q^2 = [B_l(\phi_m - \zeta)]^2 / 3 u_t^2 \quad (A14)$$

の平均値としている。ここに、 $\phi_m = (\kappa z / u_t)(\partial U / \partial z)$ は無次元プロファイル、 $\zeta = \kappa R_{ib}(C_h / C_d^{3/2})$ は Monin-Obukov の無次元高さを、 $u_t = (C_d |U|^2)^{1/2}$ は摩擦速度を、 $R_{ib} = (g/H_0)(H - H_g)z / U^2$ は bulk Richardson 数を、 C_d, C_h は伝達(抵抗)係数を表す。収斂計算となる KEYPS の手法²⁰⁾によれば、 ϕ_m, u_t などが正確に評価できる。しかし、本研究では演算時間短縮のため、 C_d, C_h は R_{ib} の関数となる Louis²¹⁾ の近似式によっている。

[安定気の場合： $\zeta > 0$]

$$\begin{aligned} C_d &= a [1 + 10R_{ib} / (1 + 5R_{ib})]^{1/2} - 1, \\ C_h &= a [1 + 15R_{ib} / (1 + 5R_{ib})]^{1/2} - 1, \\ a &= [\kappa / \ln(z/z_0)]^2 \quad (\text{中立安定状態の } C_d), \end{aligned}$$

[不安定気の場合： $\zeta < 0$]

$$\begin{aligned} C_d &= a \{1 - 10R_{ib} / [1 + 75a(|R_{ib}|z/z_0)^{1/2}]\}, \\ C_h &= a \{1 - 15R_{ib} / [1 + 75a(|R_{ib}|z/z_0)^{1/2}]\}, \end{aligned}$$

A 4. 代表長さ l (水平方向の拡散は無視)

代表長さ l を定める Mellor らの²⁾ Level 2.5 の $q^2 l$ 方程式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_h q^2 l}{\partial t} \approx & -ADV(q^2 l) + \frac{z_T^2}{z_h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_l \frac{\partial q^2 l}{\partial z^*} \right) \\ & + |E_1| \left\{ K_V(U,V) \frac{z_T^2}{z_h} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z^*} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. - g \cdot K_V(H) z_T \left(\beta_T \frac{\partial H}{\partial z^*} + \beta_E \frac{\partial E}{\partial z^*} \right) \right\} \\ & - z_h \frac{q^3}{B_l} \left[1 + E_2 \left(\frac{z_T}{z_h} \right)^2 \left(\frac{l}{\kappa \cdot z} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (A15)$$

ここに、 $K_l \approx 0.2 l q$ 、 $(E_1, E_2) = (1.8, 1.33)$ である。この式も K_V, l, q の関数であり、不安定気の場合に発散の恐れがある。このため、平行座標モデルによるシミュレーションでは、次

に示す発散が生じない中西の Level 2 提案式³⁾との平均値を解析に用いることの可能性を検討している。

$$1/l = (1/L_S) + (1/L_T) + (1/L_B) \leq 1/L_{MY}, \quad (A16)$$

$$L_S = \begin{cases} \kappa z / 3.7, & \zeta \geq 1 \\ \kappa z (1 + 2.7\zeta)^{-1}, & 0 \leq \zeta < 1 \\ \kappa z (1 - \alpha_4 \zeta)^{0.2}, & \zeta < 0 \end{cases}$$

$$L_T = \alpha_1 \int_0^\infty q z dz / \int_0^\infty q dz,$$

$$L_B = \begin{cases} \alpha_2 q / N_b, & \partial H / \partial z > 0 \text{ \& } \zeta \geq 0 \\ \frac{[\alpha_2 q + \alpha_3 q (q_c / L_T N_b)^{1/2}]}{N_b}, & \partial H / \partial z > 0 \text{ \& } \zeta < 1 \\ \infty, & \partial H / \partial z \leq 0 \end{cases}$$

$$1/L_{MY} = 1/\kappa z + 1/(L_T / 2.3),$$

ここに、 L_S, L_T, L_B, L_{MY} は、各々接地層内、境界層内、浮力効果、Mellor らの鉛直方向乱れスケール、 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = (0.23, 1, 5, 100)$ 、 $N_b^2 = (g/H_0) \partial H / \partial z$ 、 $q_c = [(g/H_0) < w \theta >_g L_T]^{1/3}$ である。

付録 B. 日射量

地表 g に直達する日射量 S_o^\downarrow は次式による⁶⁾。

$$S_o^\downarrow = S_\infty^\downarrow (1 - A_{cloud}) \tau_o \cdot \cos(\theta_g), \quad (B1)$$

$$\begin{cases} S_\infty^\downarrow = S_c / (1.00028 - 0.016718 \cos M)^2, \\ \tau_o \approx \lambda_w (\Psi_v + \Psi_w) + \Psi_{scat}, \\ M = (2\pi / 365.25) (Day - 2.36), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_v \approx 0.349 \left[1 - 0.271 [(\Psi_{out} + \Psi_{vapor}) / \cos \zeta_s]^{0.303} \right], \\ \Psi_w \approx 1.66 (\Psi_{cloud} + \Psi_{res}), \end{cases}$$

ここに、 S_∞^\downarrow は大気上限に到達する日射量を、 $S_c = 8.2 \text{ J/cm}^2 \text{ min}$ は太陽定数を、 A_{cloud} は多層雲のアルベドを、 τ_o は雲や水蒸気などによる日射量低減係数を、 θ_g は地表面の鉛直線と太陽方向のなす角度を、 $\lambda_w = 42 \text{ J/cm} \cdot \text{min}$ は水の熱伝導率を、 M は冬至を 0、1 年を 2π とする日数換算値を、 Day は 1 月 1 日 0 時を起点として数えた日数を、 ζ_s は天頂角を、 $\Psi_v, \Psi_{vapor}, \Psi_{out}$ は水蒸気関連の有効水分率を、 $\Psi_w, \Psi_{cloud}, \Psi_{res}$ は雲や水滴関連の有効水分率を、 Ψ_{scat} は散乱光によって増大する有効水分率を表す。

有効水分率の各成分は次式による^{9,19)}。

$$\Psi_{vapor} \approx -(1/g) \int_{P_g}^{P_{top}} [E_{vapor}(P/P_o)]^{\alpha_p} dp,$$

$$\Psi_{cloud} \approx -(1/g) \int_{P_g}^{P_{top}} E_{cloud} dp,$$

$$\Psi_{out} \approx -(1/g) \int_{P_{top}}^{P_\infty} [E_{top}(P/P_o)]^{\alpha_p} dp,$$

$$\Psi_{scat} \approx 0.651(1 - A_a)(1 - A_a A_g), \quad \Psi_{res} \approx 0.5,$$

$$\begin{cases} A_a \approx 1 - (1 - A_{cloud})(1 - A_{ao}), \\ A_{ao} \approx 0.085 - 0.247 \cdot \log_{10}[(P_g / P_o) \cos \zeta_s], \\ E_{top} \approx 0.6 E_{sat(top)}, \end{cases}$$

ここに、 $\alpha_p \approx 0.6$ は気圧指数効果係数を、 A_a は雲も考慮した大気アルベド実効値を、 A_{ao} は晴天時の大気アルベドを表す。

添え字 top は解析領域頂部を、g は地表を、 ∞ は大気層上限を($P_\infty=0$)、vapor は水蒸気を、cloud は雲を表す。なお、 E_{top} は湿度を 60% と仮定している。

付録 C. 赤外放射量

i 点からの赤外放射基本形は次の通りである。

$$R_i = \varepsilon \cdot \sigma_{ste} T_i^4,$$

ここに、 ε は赤外放射率を(黒体は 1)、 σ_{ste} は Stefan-Boltzman 定数を表す。

放射要素として炭酸ガスと水分が支配的とすれば、地表 g に到達する赤外放射量は次の経験式で近似できる⁹⁾。

$$R_o^\downarrow \approx \sigma_{ste} \sum_i (\tau_{co2} \cdot \tau_{vapor} \cdot \tau_{cloud})_i (T_i^4 - T_{i-1}^4), \quad (C1)$$

$$\begin{cases} \tau_{co2}(i) \approx 0.791 - 0.066 \log_{10} [(P_g^2 - P_i^2) / P_o^2], \\ \tau_{vapor}(i) \approx (1.0 + 1.746 \lambda_w \Psi_{vapor}(i))^{-1}, \\ \tau_{cloud}(i) \approx \exp(-1400 \lambda_w \Psi_{cloud}(i)), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_{vapor}(i) \approx -(1/g) \int_{P_g}^{P_i} [E_{vapor}(P/P_o)]^\alpha P dp, \\ \Psi_{cloud}(i) \approx -(1/g) \int_{P_g}^{P_i} E_{cloud} dp, \end{cases}$$

ここに、 τ_{co2} 、 τ_{vapor} 、 τ_{cloud} は各々炭酸ガス、水蒸気、雲の透過係数を表す。なお、解析領域外(上空)からの放射も $T_{top} \approx 220K$ と仮定した Ψ_{vapor} と Ψ_{cloud} を解析領域頂部の値として加算する⁹⁾。

裸地および水面の赤外放射は $\varepsilon_a \ll 1$ 、 $\varepsilon_g \approx 1$ として次式で近似する。

$$\begin{cases} R_g^\downarrow \approx R_o^\downarrow + \varepsilon_a \sigma_{ste} T_1^4 \approx R_o^\downarrow, \\ R_g^\uparrow \approx (1 - \varepsilon_g) R_g^\downarrow + \varepsilon_g \sigma_{ste} T_g^4 \approx \sigma_{ste} T_g^4, \end{cases} \quad (C2)$$

しかし、植生層(あるいは都市 canopy)は地表と葉間(あるいは建物の)反射を考えなければならぬ¹⁰⁾。

$$\begin{cases} R_g^\downarrow \approx (1 - \sigma_f) R_o^\downarrow + \sigma_f [(1 - \varepsilon_g) R_g^\uparrow + R_{f*}^\downarrow], \\ R_g^\uparrow \approx (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma_{ste} T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) R_g^\downarrow] \\ \quad + \sigma_f [R_g^{*\uparrow} + (1 - \varepsilon_g) R_{f*}^\downarrow], \end{cases} \quad (C3)$$

ここに、 $\sigma_f \approx 0.8$ は葉面率を、添え字*は反射を考慮した級数和を、添え字 f、g は各々葉面と地表を表す。上式右辺第 1 項は葉による遮蔽がない領域の赤外量、第 2 項は葉と地表の反射を、[]内第 1 項は地表での反射を、[]内第 2 項は葉(あるいは上空)からの入射を表す。例えば、m 回の反射を考えた $R_g^{*\uparrow}$ の級数和は次のようになる。

$$R_g^{*\uparrow} \approx \varepsilon_g \frac{[(1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_g)]^m - 1}{(1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_g) - 1} \sigma_{ste} T_g^4 = \frac{\varepsilon_g \sigma_{ste} T_g^4}{\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f}$$

このような級数和を求め、 $\varepsilon_g \approx \varepsilon_f \approx 1$ とすれば、地表の赤外吸収量は次式で近似できる¹⁰⁾。

$$R_{net(g)}^\downarrow = R_g^\downarrow - R_g^\uparrow \approx (1 - \sigma_f) R_o^\downarrow + \sigma_{ste} (\sigma_f T_f^4 - T_g^4), \quad (C4)$$

また、葉は上面で上空への放射、下面で地表への入射と反射があるので、葉による赤外吸収量は次のようになる。

$$R_{net(f)}^\downarrow = R_f^\downarrow - R_f^\uparrow \approx \sigma_f [R_o^\downarrow + \sigma_{ste} (T_g^4 - 2T_f^4)]. \quad (C5)$$

付録 D. 雲モデル

本研究で用いる、降雨と氷結を考慮しない雲モデル⁸⁾ (warm モデル)の温度 H と水分 E は、熱エネルギー保存式および水分保存式と同様、連続な変数 H_l と E_l とする(混乱を避けるため添え字 l を付ける)。

$$\begin{cases} H_l = H_{cloud} - (L_v / \Pi) E_{cloud}, \\ E_l = E_{vapor} + E_{cloud}, \end{cases}$$

ここに、 L_v は蒸発潜熱を、添え字 l は水分を全て水蒸気とした仮想状態を(以降雲なしと呼ぶ)、添え字 cloud は実大気状態(雲ありの湿潤大気)の温度と雲量を、vapor は雲あり大気の水蒸気量を表す(浮力の計算には H_{cloud} を用いる)。

雲なしでのサブグリッド内各点の H と E の成分 e_l と h_l に 2 重正規分布を仮定して得られる曇量統計値 E_{cloud} (グリッド内平均値)は次のようになる($\langle e_l \rangle = E_l$ 、 $\langle h_l \rangle = H_l$)。

$$E_{cloud} \approx a_{cloud} R_l E_{wo} + \sigma_l \exp(-Q_{gauss}^2 / 2) / \sqrt{2\pi}, \quad (D1)$$

ここに、 E_{wo} は温度と水分量がサブグリッド内で均一($h_l \equiv H_l$ 、 $e_l \equiv E_l$)としたときに飽和水蒸気量 E_{sat} を超えて液化する水分量の和を、係数 a_{cloud} はサブグリッド内の h_l と e_l の分布による液化率の変化を、第 2 項は液化増分量を表す。 R_l は $e_l \geq E_{sat}$ となる領域の面積率を、 Q_{gauss} は中央最頻点(E_l が対応する点)を 0 とする正規分布図の横座標値(偏差)を、 σ_l は e_l の偏差値を表す。

式(D1)中の変数は下式による。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_l^2 \approx (\Lambda_2/q)K_h[a_{cloud}(\partial E/\partial z)_{T=T_l} - b_{cloud}(\partial H/\partial z)_{T=T_l}]^2, \\ R_l = 0.5 [1 + (2/\sqrt{\pi}) \int_0^{Q_{gauss}/\sqrt{2}} \exp(-y^2) dy], \\ Q_{gauss} \approx a_{cloud}E_{wo}/\sigma_l, \\ a_{cloud} \approx [1 + (L_v/c_p)(\partial E_{sat}/\partial T)_{T=T_l}]^{-1}, \\ b_{cloud} \approx a_{cloud}(\Pi/c_p)(\partial E_{sat}/\partial T)_{T=T_l}, \\ E_{wo} = E_l - E_{sat}(T=T_l), \quad T_l = (\Pi/c_p)H_l, \end{array} \right. \quad (D2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{sat}(T) \approx 0.622P_{sat}(T)/(P - P_{sat}(T)), \\ \partial E_{sat}(T)/\partial T \approx [L_v/(47.06g)][P/(P - P_{sat}(T))](E_{sat}(T)/T^2), \\ P_{sat}(T) \approx 6.0 \exp \frac{L_v(T - 273.15)}{47.06 \times 273.15gT}, \end{array} \right.$$

ここに、 a_{cloud} と b_{cloud} はサブグリッド内の水分分布と温度分布を考慮した係数を、 $\Lambda_2 = B_2 l \approx 10.1 \cdot l$ は温位変動の長さスケールを表す。添え字 sat は飽和を表す。

R_l, q^2, l などの評価に用いる温度膨張係数 β を、温位成分と水分成分に分割した係数 β_T と β_E は次の手順で求める。

仮温位瞬間値 H_v^* を次式で表わす。

$$H_v^* \approx (1 + 0.61E_l^* - 1.61E_{cloud}^*)H_{cloud}^*,$$

ここに、上付添え字*は瞬間値を表し、係数0.61と1.61は空気の組成を N_2, O_2, Ar と H_2O として得られる値である。

各物理量の瞬間値を、 $H_v^* = H_v + h_v$ のように、平均成分と変動成分に分解して時間空間平均し、 $\langle h_v^2 \rangle, \langle e_l h_v \rangle, \langle e_l^2 \rangle$ などの高次項を省略すると、仮温位の平均成分 H_v と変動成分 h_v は次式で近似できる。

$$\left\{ \begin{array}{l} H_v \approx (1 + 0.61E_l - 1.61E_{cloud})H_{cloud}, \\ h_v \approx (\beta_T^+ h_l + \beta_l^+ e_{cloud} + \beta_w^+ e_l) / \beta, \\ \beta_T^+ / \beta \approx 1 + 0.61E_l - 1.61E_{cloud}, \quad (\beta \equiv H_o^{-1}), \\ \beta_l^+ / \beta \approx (1 + 0.61E_l - 3.22E_{cloud})(L_v/\Pi - 1.61H_l), \\ \beta_w^+ / \beta \approx 0.61 [H_l + (L_v/\Pi)E_{cloud}]. \end{array} \right.$$

h_v に風速変動 w を乗じてアンサンブル平均した、

$$\beta \langle wh_v \rangle \approx \beta_T^+ \langle wh_l \rangle + \beta_l^+ \langle we_{cloud} \rangle + \beta_w^+ \langle we_l \rangle,$$

の w と e_{cloud} に2重正規分布を仮定して積分した、

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle we_{cloud} \rangle \approx (a_{cloud} \langle we_l \rangle - b_{cloud} \langle wh_l \rangle) \cdot R^+, \\ R^+ \approx R_l - (E_{cloud} \exp(-Q_{gauss}^2/2)) / (2\sqrt{2\pi}\sigma_l), \end{array} \right.$$

を代入して、 $\beta \langle wh_v \rangle$ を次のように表現すると、

$$\beta \langle wh_v \rangle \approx \beta_T \langle wh_l \rangle + \beta_E \langle we_l \rangle,$$

係数 β_T と β_E は次のように近似できる。

付録E. 下部境界の温度と水分量

E 1. 水面および裸地

水面と裸地の温湿度は解析領域最下端の層(以降レベル1と呼ぶ)と地表の2層で評価する。この場合、前ステップの地表温度 T_g^{n-1} とレベル1の水分 E_1^{n-1} を用いて、現ステップの水分量 E_g^n を近似すれば⁽⁶⁾、未知数は地表面温度 $T_g (=T_g^n)$ だけとなる。

$$(E_g^n - E_1^{n-1}) \approx \beta_g (E_{sat(T=T_g^n)} - E_1^{n-1}), \quad (E1)$$

ここに、 $\beta_g \approx 2w_g \leq 1$ は土壌の蒸発散効率、 w_g は湿潤度を表す。地表の温度 T_g は、熱収支の釣り合いによる^(6,19)。

$$(1 - A_g)S_o^\downarrow + (R_o^\downarrow - R_g^\uparrow) + Flx_h^\downarrow + Flx_e^\downarrow + Q_a/2 + H_{soil}^\downarrow = 0 \quad (E2)$$

ここに、 A_g は地表のアルベドを、 S は日射量を、 R は赤外放射量を、 Q_a は人工排熱を、 H_{soil} は地中から地表に向かう顕熱fluxを表す。添え字 o は地表への直達を、 \downarrow はレベル1あるいは地中から地表 g への入射を表す(人口排熱の入力は $1/2 Q_a$ とし、残り $1/2$ はレベル1のfluxに加算する)。

T_g を近似的に求める force restore 式は地中の熱拡散式を、

$$\partial T / \partial t = (\lambda_{soil} / c_{soil})(\partial^2 T / \partial z^2),$$

とし、地表の境界条件を周期関数で近似し、

$$T_g(t) \approx T_g + \Delta T_g \sin(\omega t + \phi_o),$$

更に、流入流出する熱総量が等価となる温度一定な仮想の土壌厚を z_h として H_{soil}^\downarrow に適用する⁽¹⁹⁾。

ここに、 $\lambda_{soil} \approx 0.042 (0.276 + 0.11 + 0.15w_g) \text{ J/cm}\cdot\text{min}$ は土壌の熱伝導率を、 $c_{soil} \approx 0.84(1 + w_g) \text{ J/cm}^3\text{K}$ は土壌の熱容量を(水は $c_w \approx 4.2$)、 $\langle T_g \rangle$ は地表の温度日平均値を、 ΔT_g は温度変動の片振幅を、 ω は温度変動の卓越振動数を($2\pi/1$ 日)、 ϕ_o は位相のずれを表す。

このような仮定に基づく force restore と呼ばれる熱収支式は、次のようになる^(6,19)。

$$T_g^n = T_g^{n-1} + (\Delta t / C1)[(1 - A_g)S_o^\downarrow + (R_o^\downarrow - R_g^\uparrow) + Flx_h^\downarrow + Flx_e^\downarrow]^{n-1} + Q_a/2 - (C2\Delta t)(T_g^{n-1} - T_g^o), \quad (E3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Flx_h^\downarrow \approx \rho c_p C_h (H_1 - H_g) U_a, \\ Flx_e^\downarrow \approx \rho L_v C_e (E_1 - E_g) U_a, \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} U_a \approx (U_1^2 + V_1^2)^{1/2}, \\ C1 \approx z_h c_{soil} \approx \sqrt{\lambda_{soil} c_{soil} / \omega}, \quad C2 = \omega, \end{cases}$$

ここに、添字 n と n-1 は各々現時刻と前時刻を、 T_{g0} は温度が変化しない不易層の地中温度を、C1 は単位面積あたりの熱容量を、C2 は温度減衰係数を、 z_h は熱総量が等価な温度一定を仮定する仮定の土壌厚さを表す。

E 2. 植生層

評価式は4式しかない。そこで、植生内の風速は代表値 U_a とし、葉と地表の水分 E_f 、 E_g と地表と葉の伝達係数 C_{hg} 、 C_{hf} を近似した後⁽⁶⁾、4変数 T_g 、 T_f 、 T_a 、 E_a を計算する。ただし、 T_g はタイムラグがあるとして、 H 、 E 、 T_f^4 、 T_g^4 を前時刻 n-1 の値として連立方程式から外す。

地表、葉、植生内、レベル1は各々添え字 g, f, a, 1 で区別する。

$$\begin{cases} U_a \approx 0.83 \sigma_f u_\tau + (1 - \sigma_f) U_1, \\ E_f \approx r^n E_{sat}(T=T_f) + (1 - r^n) E_a, \\ E_g \approx \beta_g E_{sat}(T=T_g) + (1 - \beta_g) E_a, \\ \begin{cases} C_{hg} \approx C_{eg} \approx [\kappa / \ln(z_1 / z_0)]^2 / P_r, \\ C_{hf} \approx C_{ef} \approx 0.01(1 + 0.3 / U_a), \end{cases} \\ \begin{cases} r^n \approx 1 - \delta_c r_s / (r_s + r_a), \\ r_s \approx r_c S_{max}^\downarrow / (S_o^\downarrow + 0.03 S_{max}^\downarrow), \quad r_a = (C_{hf} U_a)^{-1}, \end{cases} \\ T_g^n \approx T_g^{n-1} + (\Delta t / C1) [(1 - \sigma_f)(1 - A_g) S_o^\downarrow \\ + (1 - \sigma_f) R_o^\downarrow + \sigma_f \sigma_{ste} T_f^4 - \sigma_{ste} T_g^4 - Flx_{hg}^\uparrow \\ - Flx_{eg}^\uparrow]^{n-1} + Q_a / 2 - (C2 \Delta t) (T_g^{n-1} - T_{g0}), \end{cases} \quad (E4)$$

$$\begin{cases} Flx_{hg}^\uparrow \approx \rho c_p C_{hg} (H_g - H_a) U_a, \\ Flx_{eg}^\uparrow \approx \beta_g \rho L_v C_{eg} (E_{sat}(T=T_g) - E_a) U_a, \end{cases}$$

ここに、 $\sigma_f \approx 0.8$ は植生による地表の被覆率を、 r^n は葉の蒸発能を(地表の β_g に相当)、 r_a は大気抵抗を、 r_s は気門抵抗を、 r_c は気門抵抗に乗じる係数(牧草地や水田は 1sec/cm、森林は 3sec/cm)を、 C_{hf} ($\approx C_{ef}$) は葉面温位(水分)の伝達係数を、 C_{hg} ($\approx C_{eg}$) は地表温位(水分)の伝達係数を、 $S_{max}^\downarrow \approx 5.0$ J/cm²min は日最大日射量を、 δ_c は step 関数(凝縮時は0)を表す。

現ステップ n の飽和水分量は Taylor 級数の 1 次近似値とする。

$$\begin{cases} E_{sat}(T=T_f)^n \approx E_{sat}(T=T_f)^{n-1} + (T_f^n - T_f^{n-1}) (\partial E_{sat}(T=T_f) / \partial T)^{n-1}, \\ E_{sat}(T=T_g)^n \approx E_{sat}(T=T_g)^{n-1} + (T_g^n - T_g^{n-1}) (\partial E_{sat}(T=T_g) / \partial T)^{n-1}, \end{cases}$$

以下、現時刻 n の 3 変数 T_f 、 T_a 、 E_a を計算する手順を示す。

レベル1から植生に向う flux は、flux の連続条件から、

$$\begin{cases} Flx_{h1}^\downarrow = -Flx_{hg}^\uparrow - Flx_{hf}^\uparrow \approx \rho c_p C_{h1} U_1 (H_1 - H_a), \\ Flx_{e1}^\downarrow = -Flx_{eg}^\uparrow - Flx_{ef}^\uparrow \approx \rho L_v C_e U_1 (E_1 - E_a), \end{cases} \quad (E5)$$

ここに、 $C_h \approx C_e$ はレベル1と植生層間の抵抗係数を表す。

葉面の熱収支は、葉に蓄熱なしを仮定した次式による。

$$\sigma_f (1 - A_f) S_o^\downarrow + R_{net(f)}^\downarrow - Flx_{hf}^\uparrow - Flx_{ef}^\uparrow = 0, \quad (E6)$$

$$\begin{cases} Flx_{hf}^\uparrow \approx 1.1 N_f \sigma_f \rho c_p C_{hf} U_a (H_f - H_a), \\ Flx_{ef}^\uparrow \approx r^n N_f \sigma_f \rho L_v C_{ef} U_a (E_{sat}(T=T_f) - E_a), \end{cases}$$

ここに、 $C_{hf} \approx C_{ef}$ は植生層と葉面間の抵抗係数、 A_f は葉のアルベドを、 N_f は葉の重なりを考慮した係数(水田と草地3、森林7)、係数 1.1 は葉以外の枝や幹を考慮する係数を表す。

式(E5)と(E6)を次のように分解し、

$$\begin{cases} \rho c_p C_{h1} U_1 (H_1^{n-1} - H_a^n) = -\rho c_p C_{hg} U_a (H_g^n - H_a^n) \\ - 1.1 N_f \sigma_f \rho c_p C_{hf} U_a (H_f^n - H_a^n), \\ \rho C_{h1} U_1 (E_1^{n-1} - E_a^n) = -\beta_g \rho C_{hg} U_a (E_{sat}(T=T_g)^n - E_a^n) \\ - r^n N_f \sigma_f \rho C_{ef} U_a (E_{sat}(T=T_f)^n - E_a^n), \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \sigma_f (1 - A_f) S_o^\downarrow + \sigma_f [R_o^\downarrow + \sigma_{ste} (T_g^n)^4 - 2 \sigma_{ste} (T_f^n)^4] \\ & - 1.1 N_f \sigma_f \rho c_p C_{hf} U_a (H_f^n - H_a^n) \\ & - r^n N_f \sigma_f \rho L_v C_{ef} U_a (E_{sat}(T=T_f)^n - E_a^n) = 0, \end{aligned}$$

温位 H を温度 T に変換し、 $(T_f^n)^4$ を Taylor 級数 1 次近似値 $(T_f^n)^4 \approx (T_f^{n-1})^4 + 4(T_f^{n-1})^3 (T_f^n - T_f^{n-1})$ として、現時刻 n の項を左辺に、前時刻 n-1 の項と T_g^n 項を右辺に移項すると、 T_f 、 T_a 、 E_a の連立方程式が得られ、

$$\begin{bmatrix} A1 & B1 & 0 \\ A2 & 0 & C2 \\ A3 & B3 & C3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_f^n \\ T_a^n \\ E_a^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix},$$

その解は次のようになる。

$$T_f^n = \frac{(B1 \cdot X3 - B3 \cdot X1) C2 - B1 \cdot C3 \cdot X2}{(A3 \cdot B1 - A1 \cdot B3) C2 - A2 \cdot B1 \cdot C3}, \quad (E7)$$

$$T_a^n = (X1 - A1 \cdot T_f^n) / B1, \quad (E8)$$

$$E_a^n = (X3 - A3 \cdot T_f^n - B13 \cdot T_a^n) / C3, \quad (E9)$$

E 3. 都市 canopy

都市内も植生層と類似するモデルとする⁽⁷⁾。ただし、構造物の保水は無視する(構造物面での水分 flux は0)。

植生モデルと極力同じ順で式を示す(植生モデルの添字 f は b に置き換わり、 C_{hf} の係数 0.01 は C_{hb} の場合 0.05 となる)。

$$\begin{cases} U_a \approx 0.83\sigma_b\mu_r + (1-\sigma_b)U_1, \\ E_b \approx 0, \\ E_g \approx \beta_g E_{sat}(T=T_g) + (1-\beta_g)E_a, \\ C_{hg} \approx C_{eg} \equiv [\kappa/\ln(z_1/z_0)]^2/P_r, \\ C_{hb} \approx C_{eb} \approx 0.05(1+0.3/U_a), \end{cases} \quad (E10)$$

$$T_g^n \approx T_g^{n-1} + (\Delta t/C1)[S_{net(g)}^\downarrow + R_{net(g)}^\downarrow - Flx_{hg}^\uparrow - Flx_{eg}^\uparrow + (1-\sigma_b)Q_a/2]^{n-1} - (\Delta t C2)(T_g^{n-1} - T_{go}), \quad (E11)$$

ここに、 $\sigma_b \approx 0.5$ は構造物による地表の被覆率を表す。

植生層の葉面温度は連立方程式内で求めたが、それに対応する構造物面の温度は、次の force restore 式で定める。

$$T_b^n \approx T_b^{n-1} + (\Delta t/C_b)(S_{net(b)}^\downarrow + R_{net(b)}^\downarrow - Flx_{hb}^\uparrow - Flx_{eb}^\uparrow)^{n-1} + \sigma_b Q_a/2, \quad (E12)$$

$$C_b = \sigma_b \alpha_{area} d_b c_b,$$

ここに、 $S_{net(b)}^\downarrow$ は構造物の日射吸収量を、 $R_{net(b)}^\downarrow$ は赤外吸収量を、 C_b は単位面積あたりの熱容量を、 $d_b \approx 5\text{cm}$ は構造物の等価壁厚を、 $c_b \approx 2.1 \text{ J/cmK}$ は壁面の熱容量 (密度と比熱の積)を、 $\alpha_{area} \approx 5$ は大半の構造物が5面(屋根+壁4面)であるとした係数を表す。

$$\begin{cases} Flx_{hg}^\uparrow \approx (1-\sigma_b)\rho_p C_{hg} U_a (H_g - H_a), \\ Flx_{eg}^\uparrow \approx (1-\sigma_b)\beta_g \rho L_v C_{eg} U_a (E_{sat}(T=T_g) - E_a), \end{cases}$$

レベル1から都市 canopy に向かう flux は、flux の連続条件から、

$$\begin{cases} Flx_{hl}^\downarrow = -Flx_{hg}^\uparrow - Flx_{hb}^\uparrow \approx \rho_p C_h U_1 (H_1 - H_a), \\ Flx_{el}^\downarrow = -Flx_{eg}^\uparrow - Flx_{eb}^\uparrow \approx \rho L_v C_e U_1 (E_1 - E_a), \end{cases}$$

$$\begin{cases} Flx_{hb}^\uparrow \approx \alpha_{area} \sigma_b \rho_p C_{hb} U_a (H_b - H_a), \\ Flx_{eb}^\uparrow \approx 0, \end{cases}$$

都市地表への日射は構造物の鉛直面(壁)によっても遮られる。これを天空率 $\Psi_g \approx 0.5$ とし、陽の当たる地表の面積率を $(1-\sigma_b)\Psi_g$ とすれば、構造物(屋根+壁)の日射吸収量は次のようになる [壁の面積率 $(1-\sigma_b)(1-\Psi_g)$].

$$S_{net(b)}^\downarrow \approx [1 - (1-\sigma_b)\Psi_g](1-A_b)S_o^\downarrow,$$

ここに、 $A_b \approx 0.12$ は構造物のアルベドを表す。

赤外放射にも Ψ_g を適用し、反射率を $\epsilon_g \approx \epsilon_b \approx 1$ と仮定すれば次のようになる。

$$R_{net(b)}^\downarrow \approx [1 - (1-\sigma_b)\Psi_g]R_o^\downarrow - \sigma_b \sigma_{ste} T_b^4 + (1-\sigma_b)(1-\Psi_g)\sigma_{ste}(T_g^4 - 2T_b^4),$$

同様に、地表への日射量と赤外放射量は次のようになる。

$$\begin{cases} S_{net(g)}^\downarrow \approx (1-\sigma_b)\Psi_g(1-A_g)S_o^\downarrow, \\ R_{net(g)}^\downarrow \approx (1-\sigma_b)[\Psi_g R_o^\downarrow + (1-\Psi_g)\sigma_{ste} T_b^4 - \sigma_{ste} T_g^4], \end{cases}$$

なお、都市 canopy 内の温湿度は連立方程式によらず、個別の式として直接計算している。

付録F. 圧力

圧力 P は空気密度の断熱変化を陰に含む Exner 関数 Π で表わし、次のように分解して評価する。

$$\Pi = \Pi_h + \Pi_w + \Pi_t, \quad (F1)$$

Π_h は Boussinesq 近似による浮力成分であり、

$$\Pi_h = \Pi_{top} - g \int_z^{z_{top}} \frac{H_{cloud} - H_o}{H_o H_{cloud}} dz, \quad (F2)$$

ここに、 Π_{top} は解析領域頂部の圧力であり、平行座標モデルによる弱風の解析では GPV データにより、円柱座標モデルによる台風の解析では、台風移動速度と傾度風速が等しいとした運動量保存式、 $H_{cloud}(\partial \Pi_{top} / \partial x) = f C_{Ty}$ 、 $H_{cloud}(\partial \Pi_{top} / \partial y) = -f C_{Tx}$ による(移流項と拡散項を無視した運動量保存式)。

$$\Pi_{top} = f(C_{Ty}x - C_{Tx}y) / H_{cloud}, \quad (F3)$$

ここに、 C_{Tx} 、 C_{Ty} は x 方向と y 方向への台風移動速度を表す。

Π_w は空気を上部境界で流入流出させる圧力成分であり、次のフーリエ係数をフーリエ逆変換した値となる⁽¹⁴⁾。

$$\Pi_w^F = \frac{N_b}{H_{cloud}(k_x^2 + k_y^2)^{1/2}} W_{top}^F, \quad (F4)$$

$$k_{xi} = 2\pi / x_i, \quad k_{yj} = 2\pi / y_j,$$

ここに、 Π_w^F 、 W_{top}^F は解析領域頂部の Exner 関数と鉛直方向風速成分 W のフーリエ係数を、 k_x 、 k_y は x 方向と y 方向の波数を、 x_i 、 y_j は側面境界から各格子点までの距離を、 i 、 j は x 方向と y 方向の格子点番号を、 $N_b^2 = (g/H_{cloud})\partial H_a / \partial z$ は Brunt-Väisälä frequency を表す。

Π_t は Schloemer モデル⁽¹⁰⁾による海面気圧 P を Exner 関数に変換したものである(Π_{top} に GPV データを用いる平行座標モデルの場合は $\Pi_t = 0$)。

$$P_t(r) = P_c + (P_{out} - P_c) / \exp(R_m / r), \quad (F5)$$

ここに、 $P_t(r)$ は台風中心から半径方向に r 離れた地点の圧力を、 P_c は台風中心気圧を、 P_{out} は台風領域外側の気圧を、 R_m は最大旋衡風速半径を表す。

[記号]

変数名(記号)は極力本文中に記載したが、利便を考え、繰り返し使われる記号や混乱を招きやすい記号を示す。

A_{a0}	晴天時の大気アルベド,	P_{sat}	飽和水蒸気圧 (hPa),
A_{cloud}	多層雲のアルベド (0.2),	P_{top}	解析領域頂部の気圧 (hPa),
A_g	水面あるいは地表のアルベド (0.12),	q	乱流エネルギー q^2 の平方根 (m/sec)
A_r, A_b	葉面および建物のアルベド (0.12),	Q_a	人工排熱量,
C_T	台風進行速度 (m/sec),	r	円柱座標の半径方向距離 (m),
C_d, C_h	U, V の抵抗係数と H, E の伝達(抵抗)係数,	R_c	気体定数 ($= c_p - c_v$),
$C1$	単位面積当たりの土壌の熱容量,	R_{ib}	bulk Richardson 数,
$C2$	温度減衰係数 ($=\omega$)	R_f	flux Richardson 数 (≤ 0.191),
c_s	スマゴリンスキー定数 (0.2),	R_i	gradient Richardson 数 (≤ 0.195),
c_p	等圧比熱 (1004 J/kgK),	R_m	最大旋衡風速半径 (m),
c_v	等容比熱 (716 J/kgK),	S_m, S_h	風速 U, V と温湿度 H, E の渦拡散係数,
E	雲と水蒸気を加えた水分量 (kg/kg),	S_o	地表への直達日射量,
E_{cloud}	雲量 (kg/kg),	T	温度 (K),
E_{sat}	飽和水蒸気量 (kg/kg),	T_{go}	不易層の土壌温度 (K),
E_{top}	解析領域頂部高さの水分量(湿度 60%仮定),	U, V, W	風速3成分 (m/sec),
E_{vapor}	雲あり大気の水蒸気量 (kg/kg),	$ U $	ベクトル合成風速 $[(U^2+V^2)^{1/2}]$ (m/sec),
f	コリオリパラメータ (0.4),	U_a	下部境界(接地層)の風速 (m/sec),
Flx	風速あるいは温湿度の flux,	V_F	台風気圧場の friction free wind (m/sec),
g	重力加速度 (9.8 m/sec ²),	u_t	摩擦速度 ($(C_d U ^2)^{1/2}$) (m/sec),
H, H_i	全水分水蒸気状態を仮定する仮温位 (K),	w_g	湿潤度(水1,裸地・草地0.2,森林0.4,都市0.05),
H_{cloud}	雲を有する湿潤大気の温位 (K),	x, y	平行座標の x 方向と y 方向距離 (m),
H_o	安定大気の温位 (K),	z_g	地表高さ(標高, m),
K_H	水平方向の拡散係数,	z_h	地表から解析領域頂部までの高さ(m),
K_V	鉛直方向拡散係数 K_m と K_h を総称する変数,	z_o	対数則の地表面粗度長 (m),
K_m	U, V の鉛直方向の拡散係数 ($l \cdot q \cdot S_m$),	z_T	解析領域頂部高さ(6,000m),
K_h	H, E の鉛直方向の拡散係数 ($l \cdot q \cdot S_h$),	z^*	$(z_g - z_T)$ を(0 $\sim z_T$)とした z^* 座標鉛直座標値,
l	鉛直方向風速 W の乱れスケール (m),	α_h	温位 H の高さ方向勾配 ($\approx 0.0035K/m$),
L_S, L_T, L_B, L_{MY}	中西提案の Level 2 モデルの l を構成する 接地境界層内の鉛直方向乱れスケール (m), 境界層(PBL)内の鉛直方向乱れスケール (m), 浮力効果による鉛直方向乱れスケール (m), Mellor らの鉛直方向乱れスケール (m),	$\beta = H^{-1}$	乾燥空気温度膨張係数,
L_v	水の蒸発潜熱 (2486 J/g),	β_T, β_E	温度膨張係数の温位成分と水分成分,
N_b	Brunt-Väisälä frequency,	β_g	土壌の蒸発散効率 ($\approx 2w_g \leq 1$),
P	圧力 (hPa),	γ	比熱比 [$(c_p - c_v) / c_p = 0.285$],
P_c	台風中心気圧 (hPa),	θ	円柱座標の円周方向角度 (radian),
P_∞	大気層上限の気圧 (≈ 0 hPa),	θ_s	対象面鉛直線と太陽方向のなす角度,
P_g	水面あるいは地表の気圧 (hPa),	Θ	風向 (degree),
P_o	代表圧力 (1,000 hPa),	λ_w	水の熱伝導率 (≈ 42 J/cm-min),
P_{out}	台風領域外側の気圧 (hPa),	Π	Exner 関数 (J/kg K),
P_r	Prandtl 数 (0.75),	Π_h, Π_w, Π_t	各々, 浮力, Klemp ら ⁽¹⁴⁾ の緩和圧力, Schloemer モデルの Exner 関数 (J/kg K),
		ρ	空気密度,
		σ_b, σ_f	都市の建物率(0.5)および植生層の葉面率(0.8),
		σ_{ste}	Stefan-Boltsman 定数 [$5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$],
		ζ	Monin-Obukov の無次元高さ,
		ζ_s	天頂角,
		τ_o	雲, 水蒸気, 塵などによる日射量低減係数,

Φ	物理量 U, V, H, E を総称する変数,
ϕ_m	無次元化した鉛直方向プロファイル,
Ψ_v	水蒸気関連の有効水分率,
Ψ_w	雲や水滴関連の有効水分率,
$\Psi_{\text{vapor}}, \Psi_{\text{cloud}}, \Psi_{\text{scat}}, \Psi_{\text{out}}, \Psi_{\text{res}}$	各々解析領域内の有効水蒸気率, 雲の有効水分率, 散乱光による有効水分率の増分量, 領域外上空の有効水蒸気率補正值, 大気中に散在する水分や塵を考慮した有効 水分率補正值,
Ψ_g	都市の天空率 (≈ 0.5)
ω	日変動周期 ($2\pi/1$ 日),

参考文献

- (1) Yoshida, M., Yamamoto, M., Takagi, K., Ohkuma, T., "Prediction of typhoon wind by level 2.5 closure model", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96, (2008), p.2104-2120.
- (2) Mellor, G.L., Yamada, T., "Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems", *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, No.4, (1982), p.851-875.
- (3) Nakanishi, M., Niino, H., "An improved Mellor-Yamada Level-3 model with condensation physics: its design and verification", *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, (2004), p.1-31.
- (4) 佐々木澄, 川本陽一, 山中徹, 土屋直也 他, "気候解析のための MM5 におけるパラメタリゼーションの相互比較 (その 1~4)", 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 40371~40374, (2007), p.781-788.
- (5) Meng, Y., Matsui, M., Hibi, K., "An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 56, (1995), p.291-310.
- (6) Deardorff, J.W., "Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation", *J. Geophysical Research*, (1978-4), p.1889-1903.
- (7) Kimura, F., Takahashi, S., "The effects of landuse and anthropologic heating on the surface temperature in Tokyo metropolitan area : A numerical experiment", *Atmospheric Environment*, Vol.25B, No.2, (1991), p.155-164.
- (8) Yamada, T., Mellor, G.L., "A numerical simulation of BOMEX data using turbulence closure model coupled with ensemble cloud relations", *Q. J. Meteorol. Soc.*, 105, (1979), p.915-944.
- (9) Katayama, A., "A simplified scheme for computing radiation transfer in the troposphere", *Numerical Simulation of Weather and Climate Technical Report No.6*, Department of Meteorology University of California, Los Angeles, NASA-CR- 132873, (1973), pp.76.
- (10) Schloemer, R.W., "Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida", *Hydrometeorological Report*, No.31, (1954).
- (11) Matsuno, J., "Numerical integrations of the primitive equations by a simulated backward difference method", *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 44, (1966), p76-84.
- (12) Orlanski, L., "A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows", *Journal of Comput. Phys.*, 21, (1976), pp.251-269
- (13) 藤井健, 光田寧, "台風確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション", 京都大学防災研究所年報, 第 29 号, B-1, (1986-4), p.229-239.
- (14) Klemp, J.B., Durran, D.R., "An. upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models", *Mon. Weather Rev. Am. Meteorol. Soc.* 111, (1983), p.430-444.
- (15) Mellor, G.L., Yamada, T., "A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers", *J. Atmos. Sci.*, 31, (1974 - 10), p.1791-1806
- (16) 中西幹郎, "大気境界層: モデル研究を中心に", 日本気象学会, 天気 Vol.54, No.2, (2007), p.115-118.
- (17) Tamura, Y., Giang, L.T., Cao, S., Matsui, M., "Wind speed profiles in tropical cyclone", 3rd Workshop on Regional Harmonization on Wind Loading and Wind Environmental Specifications in Asia-Pacific Economies, (2006-11), pp13.
- (18) Deardorff, J.W., "Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers". *J. Atmos. Sci.*, 29, (1972).
- (19) 日本気象学会, "気象研究ノート, 第 134 号", (1978), p.153-249.
- (20) Lumley, J.L., Panofsky, H.A., "The structure of atmospheric turbulence", Interscience Publishers, New York, (1964), pp239.
- (21) Louis, J.H., "A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere", *Boundary Layer Meteorology*, (1979), p.187-202.

マルコフ決定過程における適応型アルゴリズム

堀口正之*

Adaptive Algorithms for Markov Decision Processes

Masayuki HORIGUCHI*

1. はじめに

マルコフ決定過程は、意思決定と確率的な状態推移を表現する多段決定過程の一つであり、その端緒を開いたのはBellman[4]である。“マルコフ連鎖”や“動的計画法”のキーワードは今日では馴染み深いものである。Bellman[3, 4]やHoward[9]による著書は多段決定過程としてモデル化できる問題を扱う幅広い分野の研究発展に影響を与えた。マルコフ決定過程はその表現される動的システムの構造から統計科学や確率的な最適制御、適応制御などの問題として定式化され、コンピュータの進歩も伴い動的計画法のいわゆる「次元の呪い(Curse of Dimensionality)」の克服に道が開け人工知能の研究分野でも「強化学習(Reinforcement Learning)」と呼ばれるニューロ・ダイナミックプログラミングによる学習アルゴリズムの研究が活発になされている(cf. [1, 5, 6, 13, 24]).

本稿では、不確実性の下でのマルコフ決定過程の問題において推移確率法則が未知であるモデルの適応型学習理論について述べる。適応型マルコフ決定過程の先行研究としては[8, 14, 17, 18]などが上げられる。ここで扱うモデルは部分観測可能なマルコフ決定過程(e.g. [20])の問題とは異なり、各期の状態は観測できるが状態推移確率が未知であるため政策反復法や価値反復法による最適政策の解析はできない。適切な条件下において、1. 状態集合がただ一つの互いに到達可能な状態から成る場合、2. 状態集合が一つの互いに到達可能な状態類と一つの絶対消散状態類から成る場合、3. 状態集合がマイノリゼーション条件を満たすときのニューロ・ダイナミックプログラミングによる時間差分法の適用、について逐次、状態を観測し推移法則に関する情報を収集しながら適応的に最適政策を構築する学習アルゴリズムをそれぞれ示す。

2. 準備

マルコフ決定過程(Markov Decision Processes, MDPs)は、次の4つの構成要素によって定義される:

$$\{S, A, (q_{ij}(a)), r(\cdot, \cdot)\}.$$

S, A はそれぞれ状態空間(state space)と決定空間(action space)を表し本報告では S, A の要素の数は有限

$$|S| = N < \infty, |A| = K < \infty$$

であることを仮定する。 $q_{ij}(a)$ は意思決定者(decision maker)が状態 i で決定 a と取ったとき次の期に状態 j へ推移する確率を表す。また、 $r(i, a)$ ($i \in S, a \in A$) は状態 i で決定 a を取ったときの利得関数を表す。

マルコフ決定過程における基本的な最適化問題においては、完全情報とくに推移確率が既知であることを前提にしているが、ここでは推移確率が未知の問題(Uncertain MDPs)について考察する。 K 個の未知の推移確率行列によるパラメータ空間を

$$\mathcal{Q} = \{q \mid q = (q_{ij}(a) : i, j \in S, a \in A), \\ q_{ij}(a) \geq 0, \sum_{j \in S} q_{ij}(a) = 1 (i, j \in S, a \in A)\}$$

と定義する。

記号 $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots)$ は政策(policy)を表す。政策の全体集合を Π と表す。例えば、第 n 期に状態 i_n で決定 a_n をとる確率が p_n であればその時のマルコフ政策は

$$\pi_n(a_n | i_n) = p_n$$

と表される。特に、それぞれの状態 i で特定の決定 a_i を確定的に取る政策を定常政策と呼び、 $f : S \rightarrow A$ で $f(i) = a_i$ である関数 f として表現する。

$$\pi_n(f(i) | i) = 1 (i \in S, n \geq 0)$$

であり $f \in \Pi$ と表される。一般に第 n 期の政策は

$$\pi_n \in P(A | (S \times A)^n \times S) (n \geq 0)$$

と条件付き確率で表される。また、第 n 期までの履歴(history)を表す確率変数を

$$H_0 := X_0, H_n := (X_0, \Delta_0, X_1, \dots, X_n) (n \geq 1)$$

と表す。ただし X_n, Δ_n はそれぞれ第 n 期の状態と決定を表す確率変数である。マルコフ決定過程に関する詳しい用語の定義や取り扱いについては例えば[22, 28]などを参照されたい。

期待平均利得(long-run expected average reward)関

*准教授 数学教室
Associate Professor, Institute of Mathematics

数を

$$\psi(i, q|\pi) = \liminf_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T+1} E_{\pi} \left(\sum_{t=0}^T r(X_t, \Delta_t) \mid X_0 = i, q \right) \quad (1)$$

とする。ただし、 $E_{\pi}(\cdot | X_0 = i, q)$ は初期状態が i で $q \in \mathbb{Q}$ のときの政策 π による確率測度 $P_{\pi}(\cdot | X_0 = i, q)$ に関する期待値を表す。 \mathcal{D} を \mathbb{Q} の部分集合とする。すべての政策 $\pi \in \Pi$ と任意の $i \in S, q \in \mathcal{D}$ について式(1)を最大化する最適化問題を考える、すなわち、

$$\psi(i, q) = \sup_{\pi \in \Pi} \psi(i, q|\pi)$$

を価値関数(value function)とし、すべての状態 $i \in S$ について $\psi(i, q|\pi^*) = \psi(i, q)$ が成り立つ政策 $\pi^* \in \Pi$ を q -最適(q -optimal)政策と呼び、すべての $q \in \mathcal{D}$ に対して π^* が q -最適であるとき、その π^* を \mathcal{D} に関して適応型最適政策(adaptively optimal)であると呼ぶ。

各期の政策列 $\{\pi_n\}_{n=0}^{\infty}$ について

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \psi(i, q|\pi_n) = \psi(i, q) \quad \text{for all } q \in \mathcal{D}$$

であるとき、この政策列をほとんど最適な適応型政策列(asymptotic sequence of adaptive policies with nearly optimal properties)と呼ぶ。

以後、推移確率行列 \mathbb{Q} を3つの場合に分けてそれぞれの適応型政策を構成するためのアルゴリズムについて考察する。必要な用語の定義といくつかの命題をこの節でまとめておく。

● 到達可能行列: 推移確率行列 $q = (q_{ij}(a)) \in \mathbb{Q}$ について、任意の状態 $i, j \in S$ が互いに到達可能(communicating)であるとき、すなわち、ある $\{i_1 = i, i_2, \dots, i_l = j\} \subset S, \{a_1, a_2, \dots, a_{l-1}\} \subset A, 2 \leq l \leq N$ について

$$q_{i_1 i_2}(a_1) q_{i_2 i_3}(a_2) \cdots q_{i_{l-1} i_l}(a_{l-1}) > 0$$

が成り立つとき、 i から j へ到達可能であると言い $i \rightarrow j$ と表し q を到達可能行列と呼ぶ。到達可能行列の全体を \mathbb{Q}^* で表す。

● 到達可能類: 状態部分集合 $E \subset S$ について、 $q \in \mathbb{Q}$ が次の条件を満たすとき、 E を q の到達可能類(communicating class)と呼ぶ。

- (i) 任意の状態 $i, j \in E$ について $i \rightarrow j$,
- (ii) E は閉じている、すなわち、

$$\sum_{j \in E} q_{ij}(a) = 1 \quad (i \in E, a \in A(i)).$$

ただし、 $A(i)$ は状態 i での選択可能な決定(available actions)の集合を表す。

● 正規到達可能行列: 推移確率行列 $q \in \mathbb{Q}$ について、ある状態部分集合 $\bar{E} \subsetneq S$ が存在して、

(i) \bar{E} は q の到達可能類である、

(ii) $T = S - \bar{E}$ は一つの絶対消散類(absolutely transient class)である、すなわち、すべての $\pi \in \Pi$ に対して

$$P_{\pi}(X_t \in \bar{E} \text{ for some } t \geq 1 | X_0 \in T) = 1$$

が成り立つとき、 q を正規到達可能(regularly communicating)行列と呼ぶ。正規到達可能行列 q に応じて決まる上記(i)の到達可能類 \bar{E} を $\bar{E}(q)$ で表す。状態 $i_0 \in S$ が $i_0 \in \bar{E}(q)$ となるような正規到達可能行列の集合を $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ と表す。

● マイノリゼーション条件: 任意の $\delta > 0$ を一つ選び固定したとき

$$\mathbb{Q}_{\delta} = \left\{ q = (q_{ij}(a)) \mid q_{ij}(a) \geq \delta, \sum_{j \in S} q_{ij}(a) = 1 \right. \\ \left. \text{for } i, j \in S, a \in A \right\} \quad (2)$$

をマイノリゼーション条件を満たす行列集合と呼ぶ。

● 割引消滅法: 割引率 $(1 - \tau)$ の $i \in S, q \in \mathbb{Q}, \pi \in \Pi$ についての期待総利得(expected total $(1 - \tau)$ -discount reward)を

$$v_{\tau}(i, q|\pi) = E_{\pi} \left(\sum_{t=0}^{\infty} (1 - \tau)^t r(X_t, \Delta_t) \mid X_0 = i, q \right) \quad (3)$$

と定義する。また、

$$v_{\tau}(i, q) = \sup_{\pi \in \Pi} v_{\tau}(i, q|\pi)$$

を割引率 $(1 - \tau)$ の価値関数と呼ぶことにする。 S 上のすべての関数の全体集合を $B(S)$ と表す、すなわち、

$$B(S) = \{f | f : S \rightarrow \mathbb{R}\}$$

とおく。 $q = (q_{ij}(a)) \in \mathbb{Q}$ と $\tau \in (0, 1)$ に対して作用素 $U_{\tau}\{q\} : B(S) \rightarrow B(S)$ を各 $i \in S, u \in B(S)$ に関して次のように定義する:

$$U_{\tau}\{q\}u(i) = \max_{a \in A} \left\{ r(i, a) + (1 - \tau) \sum_{j \in S} q_{ij}(a) u(j) \right\}. \quad (4)$$

次の補題は割引消滅法(vanishing discount approach)として知られている。(cf. [22, 23]).

補題 1.

- (i) 作用素 $U_{\tau}\{q\}$ は係数 $(1 - \tau)$ を持つ縮小写像である。
- (ii) 割引率 $(1 - \tau)$ の目的関数 $v_{\tau}(i, q)$ は作用素 $U_{\tau}\{q\}$ の一意な不動点である。すなわち、

$$v_{\tau} = U_{\tau}\{q\}v_{\tau}$$

を満たす。

(iii) f_τ を式(4)の右辺の最大化(maximizer)関数とするとき、

$$v_\tau(i, q) = v_\tau(i, q|f_\tau), \lim_{\tau \rightarrow 0} \tau v_\tau(i, q) = \psi(i, q)$$

が成り立つ。

はじめに、到達可能行列 $q \in \mathbb{Q}^*$ に関する最適方程式を導く。 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) \in P(S)$ を用いて、 q に関する摂動推移確率行列 $q^{\tau, \mu} = (q_{ij}^{\tau, \mu}(a))$ を次のように定義する: $i, j \in S, a \in A$ のそれぞれについて

$$q_{ij}^{\tau, \mu}(a) = \tau \mu_j + (1 - \tau) q_{ij}(a). \quad (5)$$

式(5)は N -次元列ベクトル $(1, 1, \dots, 1)$ の転置ベクトル $e = (1, 1, \dots, 1)^t$ を用いて

$$q^{\tau, \mu} = \tau e \mu + (1 - \tau) q$$

と行列で表せる。 $P(S)$ を S 上の確率分布とする。

定理 1. (\mathbb{Q}^* での最適方程式) 到達可能行列 $q \in \mathbb{Q}^*$ を任意の一つ選び固定する。このとき

- (i) $\psi(i, q) := \psi(q)$ は状態 $i \in S$ に依存しない。さらにある関数 $u \in B(S)$ は次の最適方程式を満たす: $i \in S$ について

$$u(i) = \max_{a \in A} \{r(i, a) + \sum_{j \in S} q_{ij}(a) u(j)\} - \psi(q) \quad (6)$$

- (ii) 任意の $\mu \in P(S)$ に対して $\tau \rightarrow 0$ とするとき $\psi(q^{\tau, \mu}) \rightarrow \psi(q)$ 。

次に \mathbb{Q}_δ に関する最適方程式を示そう。マイノリゼーション条件を満たす推移確率行列 $q \in \mathbb{Q}_\delta$ に対して作用素 $U\{q\}: B(S) \rightarrow B(S)$ を次のように定義する:

$$U\{q\}u(i) = \max_{a \in A} \{r(i, a) + \sum_{j \in S} (q_{ij}(a) - \delta) u(j)\} \quad (7)$$

このとき、 $U(q)$ が縮小写像であることは容易に示される。 $h(q) \in B(S)$ を $U(q)$ の一意の不動点とする、すなわち、

$$h(q) = U\{q\}h(q) \quad (q \in \mathbb{Q}_\delta) \quad (8)$$

であるとすると、式(8)において

$$\psi^*(q) = \delta \sum_{j \in S} h(q)(j)$$

とすれば

$$h(q)(i) = \max_{a \in A} \{r(i, a) - \psi^*(q) + \sum_{j \in S} q_{ij}(a) h(q)(j)\} \quad (9)$$

と平均期待利得に関する最適方程式として表されることから次の定理を得る:

定理 2. ($q \in \mathbb{Q}_\delta$ に関する最適政策)

$$\psi^*(q) = \psi(i, q) \quad (i \in S)$$

である。すなわち、 $\psi(i, q)$ の値は初期状態に依存しない。さらに、もし、すべての $i \in S$ に対して $f(i) \in A^*(i|q)$ とすれば f は q 最適定常政策である。ただし $A^*(i|q)$ は状態 i での最適決定(optimal action)の集合で式(9)の右辺のmaximizerの決定集合である。

3. 適応型政策の構成

未知の推移確率行列を持つマルコフ決定過程での適応型政策の構成方法について説明しよう。第 n 期に状態 $i \in S$ で決定 $a \in A(i)$ を取ったときの次の期の状態が $j \in S$ である頻度を次のように定義する:

$$N_n(i, j|a) = \sum_{t=0}^n I_{\{X_t=i, \Delta_t=a, X_{t+1}=j\}}, \quad (10)$$

$$N_n(i|a) = \sum_{t=0}^n I_{\{X_t=i, \Delta_t=a\}}. \quad (11)$$

ただし I_D は集合 D の指示関数である。 $q_{ij}^n(a)$ を次のように定義する。

$$q_{ij}^n(a) := \begin{cases} \frac{N_n(i, j|a)}{N_n(i|a)}, & N_n(i|a) > 0 \text{ のとき,} \\ 0, & \text{その他.} \end{cases}$$

このとき $q_{ij}^n = (q_{ij}^n(a))$ は未知の推移確率行列に対する最尤推定量を表している。 $q^0 = (q_{ij}^0(a)) \in \mathbb{Q}$ を任意に選び $\tilde{q}^n = (\tilde{q}_{ij}^n(a)) \in \mathbb{Q}$ を

$$\tilde{q}_{ij}^n(a) = \begin{cases} q_{ij}^n(a), & N_n(i|a) > 0 \text{ のとき,} \\ q_{ij}^0(a), & \text{その他.} \end{cases}$$

によって定義する。任意の $\tau \in (0, 1)$ に対して更新関数(update function) $\{\tilde{v}_n\}_{n=0}^\infty$ に関する次のような反復スキーム(iterative scheme)を考える。

$$\tilde{v}_0 = 0, \quad \tilde{v}_{n+1} = U_\tau\{\tilde{q}^n\}\tilde{v}_n \quad (n \geq 0) \quad (12)$$

式(12)の第2の式における右辺の最大化関数のひとつを \tilde{a}_{n+1} と表し、各状態 i における最大化関数で定義される決定政策は $\tilde{a}_{n+1}(i)$ と表される。すなわち、

$$\tilde{a}_{n+1}(i) \in \arg \max_{a \in A(i)} \{r(i, a) + (1 - \tau) \sum_{j \in E_{n+1}} \tilde{q}_{ij}^{n+1}(a) \tilde{v}_n(j)\}. \quad (13)$$

$\{b_n\}_{n=0}^\infty$ は $b_0 = 1$ である正の狭義単調減少数列であるとし $\phi: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ は

$$\phi(b_n) = b_{n+1} \quad (n \geq 0) \quad (14)$$

を満たす狭義単調増加関数とする。適応型政策を構成するための学習アルゴリズム(learning algorithm)は式(12)の最大化関数 a_{n+1} と関数 ϕ から成る。

$$\tilde{\pi}_n^\tau(a|i) = P(\Delta_n = a | X_0, \Delta_0, \dots, X_n = i)$$

とおくとき、各反復での適応型政策 π_n^τ は次のように改定される: $a_i = \tilde{a}_{n+1}(i)$ ($i \in S$) とするとき、

$$\begin{aligned}\pi_{n+1}^\tau(a_i|i) &= 1 - \sum_{a \neq a_i} \phi(\pi_n^\tau(a|i)), \\ \pi_{n+1}^\tau(a|i) &= \phi(\pi_n^\tau(a|i)) \quad (a \neq a_i).\end{aligned}\quad (15)$$

政策列 $\pi^\tau = (\pi_0^\tau, \pi_1^\tau, \dots)$ は初期政策 π_0 を与え、 π_n^τ ($n \geq 1$) を式(12)と(15)によって逐次決める。

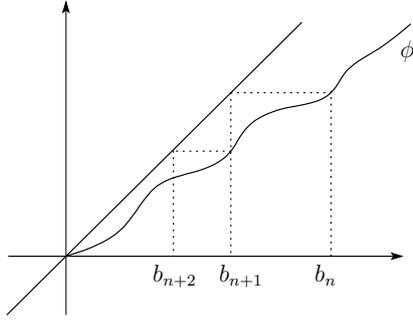


図1 ϕ と $\{b_n\}_{n=0}^\infty$ の関係

ここでいくつかの点について言及しておく。式(12)は Federgruen and Schweitzer[7]によって提案された非定常価値反復スキーム(non-stationary value iteration scheme)の一つの変形ととらえることができる。さらに、式(12)での更新価値関数 \tilde{v}_n に関して最大化関数 \tilde{a}_{n+1} を決めることは、その時点で得られている推移と更新関数の値の情報から一期間先に推移した時の価値を最大にするような貪欲政策(greedy action)を選択することであって、式(15)は関数 ϕ によって次の期に取るべき政策は $\tilde{a}_{n+1}(i)$ の選択される確率が増加され他の決定の選択される確率は減少されるように更新される。また、 ϕ の性質について詳しく説明すると、正の狭義単調減少数列 $\{b_n\}$ で式(14)の関係を満たすような関数は、直交座標平面での直線 $y = x$ ($x \geq 0$) のグラフの下側に関数 ϕ があって図1のように直線 $y = x$ 上に点 $(b_{n+1}, \phi(b_{n+1}))$ が取れることと視覚的に確認できる。式(15)の学習アルゴリズムは利得罰金(reward-penalty)タイプ[15]と呼ばれる(cf. [16, 19, 24])。また、到達可能行列と正規到達可能行列における以下の結果はKurano[15]における推移確率行列が

$$\begin{aligned}\mathbb{Q}^+ &:= \{q = (q_{ij}(a)) \in \mathbb{Q} | \\ & q_{ij}(a) > 0 \text{ for all } i, j \in S \text{ and } a \in A\} \quad (16)\end{aligned}$$

で与えられる適応型最適政策の結果の拡張であり本報告で述べられる定理の証明方法は一部その結果の適用によっている。

3.1 到達可能行列

反復スキームにおける $\tilde{q}^n, \tilde{v}_n, \pi_n^\tau$ に関するそれぞれの収束性を得るために次の仮定をする:

仮定 1.

$$(i) \quad b_n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty), \quad \sum_{n=0}^\infty b_n^N = \infty.$$

$$(ii) \quad \text{すべての } i \in S, a \in A \text{ に対して } \pi_0^\tau(a|i) > 0.$$

このとき次のような補題が得られる。

補題 2. $q \in \mathbb{Q}^*$ とする。仮定 1のもとで以下の (i)–(iii) が $P_{\pi^\tau}(\cdot | X_0 = i, q)$ -a.s. で成り立つ:

$$(i) \quad \tilde{q}^n \rightarrow q \quad (n \rightarrow \infty),$$

$$(ii) \quad \tilde{v}_n(i) \rightarrow v_\tau(i, q) \quad (n \rightarrow \infty),$$

$$(iii) \quad \pi_n^\tau(A_\tau^*(i|q) | H_n, X_n = i) \rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty),$$

ただし $A_\tau^*(i|q)$ は式(6)の右辺のmaximizerの集合である。

${}^\tau\mathbb{Q}^* := \{q^{\tau, \mu} | \mu \in P(S), q \in \mathbb{Q}^*\}$ とおく。摂動推移確率行列の族 ${}^\tau\mathbb{Q}^*$ について次の定理が得られる:

定理 3. 仮定 1のもとで π^τ は ${}^\tau\mathbb{Q}^*$ に関して適応型最適政策である。

ここでは詳しく取り上げないが、 $\tau_n \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) とすることによる価値関数 v_{τ_n} の連続性と摂動行列 $q^{\tau_n, \mu}$ の連続性などにより、反復スキームを進めていくことで得られる政策列が漸的に最適政策となるほとんど最適な適応型政策を得ることが示される[11]:

定理 4. 仮定 1のもとで、政策列 $\{\pi_n^\tau\}_{n=1}^\infty$ ($\tau_n \rightarrow 0$ as $n \rightarrow \infty$) は \mathbb{Q}^* に関するほとんど最適な適応型政策列である。

3.2 正規到達可能行列

次に正規到達可能行列 $\mathbb{Q}^*(i_0)$ での最適政策の存在に関して説明する。 $E \subsetneq \bar{E}(q)$ を取り以下のような状態部分集合列 $J_k(E)$ ($k = 1, 2, \dots$) を再帰的に定義する:

$$J_1(E) = \{i \in E | \sum_{j \in \bar{E}(q) - E} q_{ij}(a) > 0 \text{ for some } a \in A(i)\}$$

$$J_k(E) = \{i \in E - \bigcup_{l=1}^{k-1} J_l(E) |$$

$$\sum_{j \in J_{k-1}(E)} q_{ij}(a) > 0 \text{ for some } a \in A(i)\} \quad (k \geq 2).$$

また、

$$K(\bar{E}(q)) = \{(i, a, j) | p_{ij}(a) > 0, i, j \in \bar{E}(q), a \in A(i)\}$$

と定義し、この $K(\bar{E}(q))$ に関する推移確率行列 q の成分の最小値を δ とおく、すなわち、

$$\delta = \min_{(i, a, j) \in K(\bar{E}(q))} p_{ij}(a)$$

とおく. このとき, 以下の補題が示される.

補題 3. 任意の $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ ($i_0 \in S$) と $E \subsetneq \bar{E}(q)$ を選ぶとき, ある自然数 $l(E)$ ($1 \leq l(E) \leq N$) で

$$J_k(E) \neq \emptyset \quad (k = 1, 2, \dots, l(E)), J_{l(E)+1}(E) = \emptyset$$

を満たすものが存在する.

補題 4. $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ ($i_0 \in S$) とする. 政策 $\bar{\pi} = (\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_1, \dots)$ と正の実数の単調減少列 $\{\varepsilon_n\}_{n=0}^\infty$ は, 各 $n \geq 0$ について $\bar{\pi}_n(a|h_n) \geq \varepsilon_n$ ($a \in A(x_n), h_n = (x_0, a_0, x_1, \dots, x_n) \in H_n$) とする. このとき任意の状態部分集合 $E \subsetneq \bar{E}(q)$ に対して

$$P_{\bar{\pi}}(X_{n+l} \in \bar{E}(q) - E \text{ for some } l(1 \leq l \leq N) | X_n \in E) \geq (\delta\varepsilon_{n+N})^N.$$

が成り立つ.

状態 $i_0 \in S$ について $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ を一つ選んだとき, 停止時刻列 $\{\sigma_n\}$ とそれによって定められる部分集合列 $\{E_{\sigma_n}\} \subset \bar{E}(q)$ を次のように定義する:

$$\begin{aligned} E_0 &:= \{i_0\}, T_0 := \bar{E}(q) - E_0, \\ \sigma_1 &:= \min\{t | X_t \in T_0, t > 0\}, \\ E_{\sigma_1} &:= E_0 \cup \{X_{\sigma_1}\}, T_{\sigma_1} := \bar{E}(q) - E_{\sigma_1}, \\ &\text{とおき以下再帰的に } n = 2, 3, \dots, \text{ について} \\ \sigma_n &:= \min\{t | X_t \in T_{\sigma_{n-1}}, t > \sigma_{n-1}\}, \\ E_{\sigma_n} &:= E_{\sigma_{n-1}} \cup \{X_{\sigma_n}\}, T_{\sigma_n} = \bar{E}(q) - E_{\sigma_n} \end{aligned} \quad (17)$$

と定義する. ただし $\min \emptyset = \infty$ である.

$E \subset \bar{E}(q)$ に対して

$$\bar{n}(E) = \min\{n \geq 1 | E_{\sigma_n} = \bar{E}(q)\}$$

とおく. このとき, もし $\bar{n}(E) < \infty$ ならば推移確率行列 q に関するパターン行列(pattern-matrix) $M(q)$ を構成することができる(cf. [10]). パターン行列は多重マルコフ連鎖(multi-cahin)における到達可能部分集合類を探索する際に用いられる行列表現であり, 正規到達可能行列 $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ に対しては

$$M(q) = \begin{pmatrix} E & \vdots & O \\ \cdot & \bar{R} & \vdots \\ & & \bar{T} \end{pmatrix}$$

と表される. ここで $\bar{E}(q)$ の要素数を $n(\bar{E}(q))$ と表したとき E は $n(\bar{E}(q))$ 次正方小行列で, T は $(S - \bar{E}(q)) \times n(\bar{E}(q))$ 小行列, E と R 成分はすべて1であって $M(q)$ において $i \rightarrow j$ は (i, j) 成分が1であることに相当する. 正規到達可能行列の状態集合は小行列 E に対応する1つの到達可能類と T の対応する1つの絶対消散類に分類される. したがって, 式(17)によって $\bar{n}(E) < \infty$ となることがわかればパターン行列 $M(q)$ を構成することができる

て正規到達可能行列に関する適応型政策の学習アルゴリズムは到達可能行列に関する問題に帰着できる.

補題 5. 推移確率行列 q を $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ ($i_0 \in S$) とする. $\bar{\pi}$ は補題 4の仮定を $\sum_{t=0}^\infty \varepsilon_t^N = \infty$ となる $\{\varepsilon_t\}_{t=0}^\infty$ について満たしているとする. このとき任意の $E \subsetneq \bar{E}(q)$ に対して次が成り立つ:

- (i) $P_{\bar{\pi}}(\bar{n}(E) < \infty | X_0 = i_0, q) = 1$,
- (ii) 任意の $k \leq \bar{n}(E)$ に対して $P_{\bar{\pi}}(\sigma_k < \infty | X_0 = i_0, q) = 1$.

上記の補題5により, $q \in \mathbb{Q}^*(i_0)$ に関して初期状態 i_0 から出発したとき, 第 $\bar{n}(\{i_0\})$ 期以降には i_0 を含む到達可能類 $\bar{E}(q)$ を見つけることができ, 次の定理を得る.

定理 5. 仮定 1のもとで, 政策列 $\{\bar{\pi}^n\}_{n=1}^\infty$ ($\tau_n \rightarrow 0$ as $n \rightarrow \infty$) は $\mathbb{Q}^*(i_0)$ に関するほとんど最適な適応型政策列である.

3.3 ニューロ・ダイナミックプログラミング

推移確率行列 $q \in \mathbb{Q}_\delta$ において確率過程 $\{X_n\}_{n=0}^\infty$ に対する更新関数 $\{\tilde{v}_n\}_{n=0}^\infty$ の確率アルゴリズムとしてニューロ・ダイナミックプログラミング[5] (Neurodynamic programming, Neuro-DP)における時間差分法(Temporal Difference method, TD-method)の適用について説明する.

任意の写像 $H : B(S) \rightarrow B(S)$ に関して, 更新関数 \tilde{v}_n を以下の方程式で各 $i \in S$ について

$$\begin{aligned} \tilde{v}_0(i) &\equiv 0, \tilde{v}_{n+1}(i) = (1 - \tilde{\gamma}_n(i))\tilde{v}_n(i) + \\ &\tilde{\gamma}_n(i)(H\tilde{v}_n(i) + W_n(i) + u_n(i)), \quad (n \geq 0) \end{aligned} \quad (18)$$

と与える. ただし, $\tilde{\gamma}_n(i)$ は時刻 n でのステップサイズを表し, 前もって与えられる $\{\gamma_n(i)\}$ によって

$$\tilde{\gamma}_n(i) = \begin{cases} \gamma_n(i), & X_n = i \text{ のとき,} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

と定義される. また, $\{W_n(i)\}$ と $\{u_n(i)\}$ はともに各状態 $i \in S$ でのランダムノイズ(random noise)を表す.

補題 6.(cf. Proposition 4.5 in [5]) 以下の条件 (i) - (v) が成り立つと仮定する.

- (i) 各 $i \in S$ に対して $E[W_n(i) | \mathcal{F}_n] = 0$.
- (ii) ある $A, B > 0$ が存在して

$$E[W_n(i)^2 | \mathcal{F}_n] \leq A + B\|\tilde{v}_n\|^2 \quad (n \geq 0, i \in S)$$

が成り立つ.

- (iii) H は一意の不動点 $v^* \in B(S)$ を持つ縮小写像である.
- (iv) $\tilde{\gamma}_n(i) \geq 0, \sum_{n=0}^\infty \tilde{\gamma}_n(i) = \infty, \sum_{n=0}^\infty \tilde{\gamma}_n(i)^2 < \infty$ ($n \geq 0, i \in S$).

- (v) $i \in S, n \geq 0$ について $|u_n(i)| \leq \theta_n(\|\tilde{v}_n\| + 1)$ を満たす非負の確率変数数列 $\{\theta_n\}$ が存在し、確率 1 で $\{\theta_n\}$ は 0 に収束する。

このとき、式(18)の \tilde{v}_n は確率 1 で v^* に収束する。ただし $\|\cdot\|$ は sup ノルム (supremum norm) であり \mathcal{F}_n は $\{X_\ell(\ell \leq n), W_\ell(\ell \leq n-1), U_\ell(\ell \leq n-1)\}$ によって生成される最小の σ -集合体を表す。

補題 7. 政策 $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots) \in \Pi$ は状態 $i, j \in S$ と推移確率行列 $q \in \mathbb{Q}_\delta$ について

$$\begin{aligned} \pi_n(A^*(j|q) \mid X_0, \Delta_0, \dots, \Delta_{n-1}, X_n = j) \\ \rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty) \text{ with } P_\pi(\cdot \mid X_0 = i, q)\text{-prob. 1} \end{aligned}$$

であるとき、 π は \mathbb{Q}_δ に関して適応型最適政策である。

$q \in \mathbb{Q}_\delta$ に関する学習アルゴリズムを構成するために、更新関数 \tilde{v}_n と適応型政策 $\tilde{\pi}_n$ を以下のように定める:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_0 \equiv 0, \tilde{v}_{n+1}(i) &= (1 - \tilde{\gamma}_n(i))\tilde{v}_n(i) + \\ &\tilde{\gamma}_n(i)(r(i, \Delta_n) + \tilde{v}_n(X_{n+1}) - \delta \sum_{\ell \in S} \tilde{v}_n(\ell)) \\ &\quad (n \geq 0) \quad (19) \end{aligned}$$

$$\tilde{\pi}_0(a|i) > 0 \quad (a \in A, i \in S),$$

$$\tilde{\pi}_{n+1}(a|i) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_n(i)}{K(i) - 1}, & a \neq \tilde{a}_{n+1}(i) \text{ のとき,} \\ 1 - \varepsilon_n(i), & a = \tilde{a}_{n+1}(i) \text{ のとき.} \end{cases} \quad (n \geq 0) \quad (20)$$

ただし、 $\tilde{a}_{n+1}(i)$ は式(19) によって求められた更新関数 \tilde{v}_{n+1} に関する次式の maximizer のひとつ

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{t+1}(i) \in \arg \max_{a \in A} \{r(i, a) + \\ \sum_{j \in S} \tilde{q}_{ij}^n(a) \tilde{v}_{t+1}(j)\} \quad (i \in S) \quad (21) \end{aligned}$$

であり $K(i)$ は状態 i での選択可能な決定の個数を表す。

更新関数の収束と適応型最適政策の存在を示すために次の仮定をするとき、以下の結果が示される。

仮定 2.

- (i) $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_t(i) = 0, \sum_{t=0}^{\infty} \varepsilon_t(i) = \infty,$
(ii) すべての $i \in S$ に対して $\gamma_t(i) \geq 0,$
 $\sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t(i) = \infty, \sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t(i)^2 < \infty.$

補題 8. 仮定 2 の (i) の条件を満たし、 $q \in \mathbb{Q}_\delta$ ($\delta > 0$) であるとする。このとき、

- (i) $j \in S, a \in A$ に対して $\lim_{t \rightarrow \infty} N_t(j|a) = \infty$ with $P_\pi(\cdot \mid X_0 = i, q)$ -prob. 1,
(ii) $i, j \in S, a \in A$ に対して $q_{ij}^t(a) \rightarrow q_{ij}(a)$ ($t \rightarrow \infty$) with $P_\pi(\cdot \mid X_0 = i, q)$ -prob. 1.

定理 6. 仮定 2 の条件 (i), (ii) を満たし、 $q \in \mathbb{Q}_\delta$ ($\delta > 0$) であるとする。このとき、 $\tilde{v}_t(i) \rightarrow h(q)(i)$ ($t \rightarrow \infty$) with $P_\pi(\cdot \mid X_0 = i, q)$ -prob. 1.

4. 学習アルゴリズム

この節では、これまで示した 3 つのモデルのそれぞれについて各期の状態推移を観測しながら適応型政策を得るための学習アルゴリズムをまとめる。

前節で示したように到達可能行列 \mathbb{Q}^* と正規到達可能行列 $\mathbb{Q}^*(i_0)$ に関する学習アルゴリズムでは割引率 $(1 - \tau_k)$ に関してアルゴリズムを実行し $\tau_k \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$) とすることで漸的に最適となる適応型政策 $\tilde{\pi}^k = (\tilde{\pi}_0^k, \tilde{\pi}_1^k, \dots)$ を得ることができる。図 2、図 3 にそれぞれ \mathbb{Q}^* と $\mathbb{Q}^*(i_0)$ のアルゴリズムを示す。どちらの場合も仮定 1 の条件が満たされること、式(14) を満たす狭義単調増関数 ϕ を用いることに注意する。

Step 1. $n = 0$ とせよ。 τ ($0 < \tau < 1$) を一つ選び固定せよ。 $\tilde{v}_0(i) = 0$ ($i \in S$) とせよ。 $\tilde{\pi}_0 \in P(A|S)$ を $\tilde{\pi}_0(a|i) > 0$ ($a \in A, i \in S$) となるように任意に決めよ。 $q_{ij}^0(a)$ を任意に選べ。

Step 2. 現在の状態 $X_n = i$ に応じて決定 $a_i \in A(i)$ を政策 $\tilde{\pi}_n$ から選び次の期の状態 $X_{n+1} = j$ を観測せよ。そして $N_n(i, j|a), N_n(i|a)$ を計算し

$$\tilde{q}_{ij}^n(a) = \begin{cases} \frac{N_n(i, j|a)}{N_n(i|a)} & (N_n(i|a) > 0 \text{ のとき}), \\ q_{ij}^0(a) & (\text{その他のとき}), \end{cases}$$

とおけ。

Step 3. 各状態 $i \in S$ について $\tilde{a}_{n+1}(i)$ を

$$\tilde{a}_{n+1}(i) \in \arg \max_{a \in A} \{r(i, a) + (1 - \tau) \sum_{j \in S} \tilde{q}_{ij}^n(a) \tilde{v}_n(i)\}$$

となるように選べ。

Step 4. $\tilde{a}_i = \tilde{a}_{n+1}(i)$ ($i \in S$) と表す時、次の期の政策 $\tilde{\pi}_{n+1}^\tau(i)$ ($i \in S$) を

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{n+1}^\tau(\alpha|i) &= \phi(\tilde{\pi}_n^\tau(\alpha|i)) \quad (\alpha \neq \tilde{a}_i) \\ \tilde{\pi}_{n+1}^\tau(\tilde{a}_i|i) &= 1 - \sum_{\alpha \neq \tilde{a}_i} \phi(\tilde{\pi}_n^\tau(\alpha|i)) \end{aligned}$$

として更新せよ。

さらに、 $\tilde{v}_{n+1} = U_\tau\{\tilde{q}^n\}\tilde{v}_n$ によって \tilde{v}_n を更新せよ。

Step 5. n を $n + 1$ として Step 2 へ戻れ。

図 2 \mathbb{Q}^* に関する学習アルゴリズム

Step 1. $n = 0$ とせよ. τ ($0 < \tau < 1$) を一つ選び固定せよ. $E_0 = \{i_0\}$, $T_0 = S - E_0$, $\tilde{v}_0(i) = 0$ ($i \in E_0$), $X_0 = i_0$ とせよ. 各決定 $a \in A(i_0)$ に対して $\tilde{\pi}_0^\tau(a|X_0) > 0$ となるように任意に決めよ.

Step 2. 決定 $\Delta_{n+1} = a_{n+1} \in A(X_n)$ を政策 $\tilde{\pi}_n(\cdot|H_n)$ から選べ. 次の期の状態 $X_{n+1} = j$ を観測し,

$$E_{n+1} = \begin{cases} E_n \cup \{X_{n+1}\}, & X_{n+1} \in T_n \text{ のとき,} \\ E_{n+1} = E_n, & X_n \in E_n \text{ のとき} \end{cases}$$

とせよ. $i, j \in E_{n+1}$, $a \in A(i)$ について $N_n(i, j|a)$, $N_n(i|a)$ を計算し,

$$\tilde{q}_{ij}^n(a) = \begin{cases} \frac{N_n(i, j|a)}{N_n(i, a)}, & N_{n+1}(i|a) > 0 \text{ のとき} \\ q_j^0, & \text{その他} \end{cases}$$

とせよ. ただし, $q^0 = (q_j^0 : j \in E_{n+1})$ は E_{n+1} 上の $q_j^0 > 0$ ($i \in E_{n+1}$) であるような任意の確率分布である.

Step 3. 各状態 $i \in E_{n+1}$ について $\tilde{a}_{n+1}(i)$ を

$$\tilde{a}_{n+1}(i) \in \arg \max_{a \in A(i)} \{r(i, a) + (1 - \tau) \sum_{j \in E_{n+1}} \tilde{q}_{ij}^n(a) \tilde{v}_n(j)\}$$

を満たすように選べ.

Step 4. $\tilde{a}_i = \tilde{a}_{n+1}(i)$ と表す時, $\tilde{\pi}_{n+1}^\tau(\alpha|i) = \text{Prob.}(\Delta_{n+1} = \alpha|H_n, \Delta_n, X_{n+1} = i)$ ($\alpha \in A(i)$) を以下のように更新せよ:

$$\tilde{\pi}_{n+1}^\tau(\alpha|i) = \phi(\tilde{\pi}_n^\tau(\alpha|i)) \quad (\alpha \neq \tilde{a}_i)$$

$$\tilde{\pi}_{n+1}^\tau(\tilde{a}_i|i) = 1 - \sum_{\alpha \neq \tilde{a}_i} \phi(\tilde{\pi}_n^\tau(\alpha|i))$$

さらに, E_{n+1} 上で $\tilde{v}_{n+1} = U_\tau\{\tilde{q}^n\}\tilde{v}_n$ によって \tilde{v}_n を更新せよ.

Step 5. n を $n+1$ として Step 2 へ戻れ.

図3 $Q^*(i_0)$ に関する学習アルゴリズム

最後に, 仮定 2 のもとで, マイノリゼーション条件を満たす行列 Q_δ に関するアルゴリズムを示す.

Step 1. $n = 0$, $\tilde{v}_0 \equiv 0$ とし $\tilde{\pi}_0 \in P(A|S)$ を $\tilde{\pi}_0(a|i) > 0$ ($a \in A, i \in S$) となるように任意の一つ決めよ.

Step 2. $\Delta_n = a_n$ を政策 $\tilde{\pi}_n$ に従って一つ選べ. $X_n = i$ と a_n から次の期の状態 $X_{n+1} = j$ を観測せよ. $n+1$ 期において $\tilde{v}_{n+1} \in B(S)$ の値を次の時間差分方程式によって更新せよ:

状態 $i \in S$ に対して,

$$\tilde{v}_{n+1}(i) = (1 - \tilde{\gamma}_n(i))\tilde{v}_n(i) + \tilde{\gamma}_n(i)(r(i, \Delta_n) + \tilde{v}_n(X_{n+1}) - \delta \sum_{\ell \in S} \tilde{v}_n(\ell))$$

ただし, ステップサイズ $\tilde{\gamma}_n$ は事前に与えられた $\{\gamma_n(i)\}$ により

$$\tilde{\gamma}_t(i) = \begin{cases} \gamma_n(i), & X_n = i \text{ のとき,} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

とする.

Step 3. 各状態 $i \in S$ に対して

$$\tilde{a}_{n+1}(i) \in \arg \max_{a \in A} \{r(i, a) + \sum_{j \in S} \tilde{q}_{ij}^n(a) \tilde{v}_{n+1}(j)\}$$

を選び, 政策 $\tilde{\pi}_{n+1}$ を次のように決めよ:

$$\tilde{\pi}_{n+1}(a|i) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_n(i)}{K(i)-1}, & a \neq \tilde{a}_{n+1}(i) \text{ のとき,} \\ 1 - \varepsilon_n(i), & a = \tilde{a}_{n+1}(i) \text{ のとき.} \end{cases}$$

ただし $K(i)$ は状態 $i \in S$ での決定の個数を表す.

Step 4. $n = n+1$ として Step 2 へ戻れ.

図4 Q_δ に関する学習アルゴリズム

5. おわりに

本稿では, 不確実性の下でのマルコフ決定過程における3つの適応型アルゴリズムについて示した. 未知の推移確率行列のモデル構造はそれぞれ異なるが, いずれも動的システムでの意思決定と状態観測に基づき探索(exploration)と知識利用(exploitation)のトレードオフをうまく行いながら次の期の政策改善を逐次行う学習アルゴリズムであり, その手順も簡明である. 理論の詳細や数値例については[11, 12, 27]を参照されたい.

謝辞 本稿をまとめるにあたり, 伊喜哲一郎氏, 蔵野正美氏, 安田正實氏の各氏との共同研究の内容をもとにさせて頂きました. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- [1] J. Abounadi, D. Bertsekas, and V. S. Borkar. Learning algorithms for Markov decision processes with average cost. *SIAM J. Control Optim.*, 40(3):681–698, 2001.
- [2] J. Bather. Optimal decision procedures for finite Markov chains. II. Communicating sys-

- tems. *Advances in Appl. Probability*, 5:521–540, 1973.
- [3] R. Bellman. *Dynamic programming*. Princeton, 1957.
- [4] R. Bellman. A Markovian decision process. *J. Math. Mech.*, 6:679–684, 1957.
- [5] D. P. Bertsekas and J. H. Tsitsiklis. *Neuro-Dynamic Programming*. Athena, 1996.
- [6] V. S. Borkar and S. P. Meyn. The O.D.E. method for convergence of stochastic approximation and reinforcement learning. *SIAM J. Control Optim.*, 38(2):447–469, 2000.
- [7] A. Federgruen and P. J. Schweitzer. Nonstationary Markov decision problems with converging parameters. *J. Optim. Theory Appl.*, 34(2):207–241, 1981.
- [8] O. Hernández-Lerma. *Adaptive Markov control processes*. Springer, 1989.
- [9] R. A. Howard. *Dynamic programming and Markov processes*. M.I.T., 1960.
- [10] T. Iki, M. Horiguchi, and M. Kurano. A structured pattern matrix algorithm for multichain Markov decision processes. *Math. Methods Oper. Res.*, 66:545–555, 2007.
- [11] T. Iki, M. Horiguchi, M. Yasuda, and M. Kurano. A learning algorithm for communicating Markov decision processes with unknown transition matrices. *Bull. Inform. and Cybernet.*, 39:11–24, 2007.
- [12] T. Iki, M. Horiguchi, M. Yasuda, and M. Kurano. Temporal difference-based adaptive policies in neuro-dynamic programming. *Vicenc Torra, Yasuo Narukawa, Yuji Yoshida (Eds.), 4th Int. conf. Proc. MDAI 2007 (CD-ROM Proceedings)*, pages 112–122, 2007.
- [13] V. R. Konda and V. S. Borkar. Actor-critic-type learning algorithms for Markov decision processes. *SIAM J. Control Optim.*, 38(1):94–123, 1999.
- [14] M. Kurano. Discrete-time Markovian decision processes with an unknown parameter. Average return criterion. *J. Oper. Res. Soc. Japan*, 15:67–76, 1972.
- [15] M. Kurano. Learning algorithms for Markov decision processes. *J. Appl. Probab.*, 24(1):270–276, 1987.
- [16] S. Lakshmivarahan. *Learning algorithms*. Springer, 1981.
- [17] P. Mandl. Estimation and control in Markov chains. *Adv. in Appl. Prob.*, 6:40–60, 1974.
- [18] J. J. Martin. *Bayesian decision problems and Markov chains*. John Wiley & Sons Inc., 1967.
- [19] M. R. Meybodi and S. Lakshmivarahan. ϵ -optimality of a general class of learning algorithms. *Inform. Sci.*, 28(1):1–20, 1982.
- [20] G. E. Monahan. A survey of partially observable Markov decision processes: theory, models, and algorithms. *Management Sci.*, 28(1):1–16, 1982.
- [21] E. Nummelin. *General irreducible Markov chains and nonnegative operators*, volume 83 of *Cambridge Tracts in Mathematics*. Cambridge University Press, 1984.
- [22] M. L. Puterman. *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [23] S. M. Ross. *Applied probability models with optimization applications*. Holden-Day, 1970.
- [24] R. S. Sutton and A. G. Barto. *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, 1998.
- [25] K. M. van Hee. *Bayesian control of Markov chains*, volume 95 of *Mathematical Centre Tracts*. Mathematisch Centrum, 1978.
- [26] 伊喜哲一郎, 堀口正之. A modified pattern matrix algorithm for multichain MDPs. RIMS講究録1504「情報決定過程論の展開」, pages 73–86, 2006.
- [27] 伊喜哲一郎, 堀口正之, 蔵野正美, 安田正實. A pattern-matrix learning algorithm for adaptive MDPs: the regularly communicating case. RIMS講究録1589「不確実な状況における意思決定の理論と応用」, pages 110–119, 2008.
- [28] 北川敏男編, 小河原正巳, 坂本武司著. マルコフ過程. 共立出版, 1967.
- [29] 堀口正之, 蔵野正美, 安田正實. マルコフ決定過程におけるTD法による学習アルゴリズムについて. RIMS講究録1559「最適化問題における確率モデルの展開と応用」, pages 34–49, 2006.



建築の空間構成計画学

中井 邦夫*

Compositional Planning Theory of Architecture

Kunio NAKAI*

1. はじめに

日本は戦後から続いた大量生産消費型社会を経て、資源循環型の社会へと価値観が大きく変化しつつある。そうしたなかで建築や都市のあり方についても、高度成長期におけるスクラップ・アンド・ビルド的な開発から、安定成長期における既存ストックの活用再生へと関心が移り変わり、そうした社会状況において建築学が果たす役割も変化しつつある。そのような社会的、学問的背景において、私が研究の大きなテーマとして考えているのは、いわば建築の「空間構成計画学」もいべきものである。ここでは、その構想について総論的に述べてみたい。

2. 研究の背景

一般に建築学には、構造や環境設備、デザインなどの様々な学問領域が含まれる。そのなかで、かつて高度成長期において緊急かつ大量に必要とされた様々な施設の建設を理論的、実践的に支えるものとして、建築計画学と呼ばれる分野が大きく発展した。計画学は、建物の用途や使われ方に基づいて、居住施設や学校、文化施設、商業建築、工場、オフィスなどといった建築種別＝いわゆるビルディング・タイプを定義しモデル化することで、それらの効率的な設計や建設を可能とし、時代の要請に応えた。しかし、近年の建築用途の多様化や、異種用途への転用などにおいては、これまでの用途の括りにおさまらない新たなプログラムや、用途が決まる以前に建物が先に存在しているというような現象が普通におきている。このような現代の社会状況において、従来の建築計

画の考え方だけでは、人々の多様化する生活空間を支えることができなくなっている。つまり、施設ごとにパッケージされた用途種別に基づいて、それらを「いかに計画するべきか」を考える従来のアプローチだけではなく、ある特定の場所や建物を前提とした場合に、そもそもそこに「何を計画するべきか」が問われているように思われる。それは、用途や使い方などを前提とせず、それらを空間のあり方と同時に発想することを要請する。こうした要請に応えるためには、計画の前提ともなる、建築実体や都市空間そのものが有する性質を、実体的かつ具体的に捉える視点が求められる(図1)。

ところで、建築の実体や都市空間そのものに関する研究は、建築史・建築意匠の分野においても盛んに行われてきた。それらの多くは、特定の時代や作家に関する形態論やその思想などを論じるものが中心であったが、この分野で蓄積された建築の具体的な形態や形式についての研究は、現代建築や都市を考察するうえでも活かすべき点が多い。また近年では、いわゆる建築計画学の研究主体と実践的な設計主体との分化が進んでいるが、元来建築計画学は、実践的な設計の理念として、設計実務と並行して構想された研究分野である。たとえば戦後の建築計画学の確立に大きな功績を残した故吉武泰水は、数多くの実作を残した建築家でもあった。つまり計画学の根幹には、彼のような個性が生み出す実践的な空間表現が含まれていたともいえるのである。「表現」というと何やら作家の恣意的なものと捉えられがちであるが、吉武らの試みは、科学的で客観的な観察を踏まえた建築設計の創造的なあり方を目指すものであり、いわば建築の表現に論理(と倫理)をもちこむことであつたともいえるのではないだろうか。上述したような現代の社会状況において、こうした姿勢は再度見直されるべきであるといえる。

*准教授 建築学科
Associate Professor, Dept. of Architecture

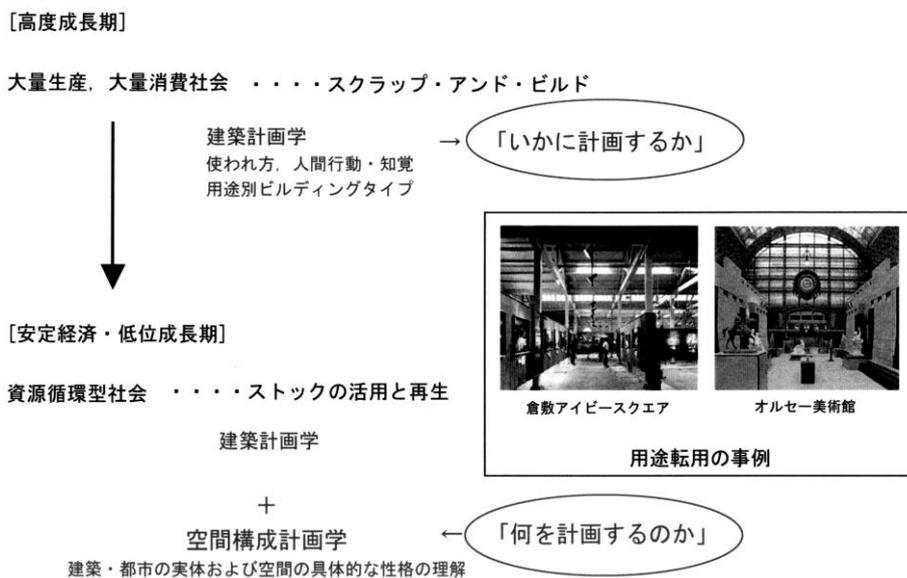


図1 空間構成計画学の背景

3. 建築の空間構成計画学

以上のような社会的、および学問的な背景において、私が考える「空間構成計画学」は、複雑化、多様化する現代の建築や都市を、構成的な形式から捉え直すことにより、新たな計画のあり方を提案するための研究分野となることを目指すものである。そのためには、第一に未だ認識されざる建築や都市の具体的な空間的、物的な構成を明らかにすることが重要であると考えます。

現代都市は、人も物も建物もかつてないほどに集積し高密度化している。そうしたなかで、建物の外形や構成は多様化し、また用途も複合化し、その立地する環境は様々

である。ところが研究者も建築家も、こうした現実をどのように理解すればよいのか、ほとんど手だてがないというのが実情ではないだろうか。そこで本研究では、様々な事物や空間どうしの関係が作り出す構成的な側面に焦点をあてることによって、現代の建築や都市のあり様を少しでも理解する手がかりとなる認識の枠組みを構築したい。そのことを通して、今後の計画や設計における認識的な基礎となる知見を得、さらには、その知見を踏まえた実践的な活動を行うことが可能となるであろう。こうした研究は、従来の計画学と歴史・意匠、および実践的な設計活動の中間に位置するような研究分野となるものと考えます(図2)。

具体的な研究の方法は、これまでのところ以下の大きく3つの方針に基づくものと想定している。

1) 「定性的アプローチ」

これまでの計画学がどちらかというと定量化・指標化を目指すものであったのに対して、研究対象の空間や物的な構成の分析を通して、それら相互の定性的なあり方に注目し、相違点を明確にすること。

2) 「構成的タイポロジー」

定性的な分析に基づいて、空間や実体の構成によって定義されるタイプを見いだす。そうしたタイプを数多くの事例を通して見出していくことにより、空間や実体の構成がさまざまな計画水準との関係において果たす役割

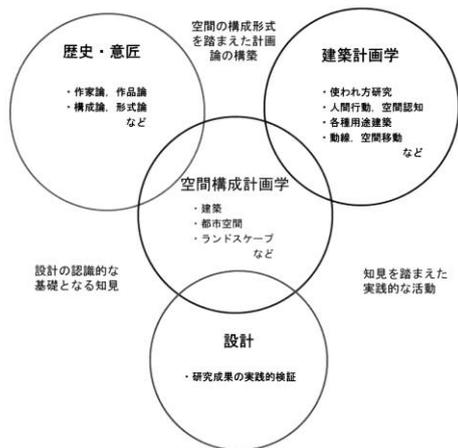


図2 他の研究領域との関係

を見直そうとするものである。

3) 「関係の構造化」

見出したタイプの性格の相違を検討し、それらに関係づけ形式的・体系的に構造化する枠組みを提示することにより、新しいタイプの発見や、それに基づく計画的な構想が可能となる。

以下では、筆者の論文を具体例にして、その具体的な研究内容について述べてみたい。

4. 外形の分節による建築の構成形式^{(1)~(6)}

筆者はこれまでに「現代建築における外形ヴォリュームの分節条件に関する研究」と題していくつかの論文を発表してきている。それは、多様化する現代建築作品の「外形」が、用途や立地環境などの諸条件との関係において、どのような形式性を帯びているのかについて論じたものである(図3)。

4-1. 研究の主旨

建築の外形は、周囲の環境と相まって町並みや風景を

つくりだし、人々が好むと好まざるとに関わらず、多くの人々が目にするものである。これは、実体として建ち現れざるを得ない建築の、いわば宿命的な側面であり、そのようなことから建築の外形は、周囲の環境や、あるいはより広く社会に対するメッセージを定着する媒体のような役割を果たしていると考えられる。

また一般に建築は内部空間を合わせ持っている。建築の外形がもつ固有の性質は、それが内部空間と外部空間の境界をなしており、外形が決定されると必然的かつ同時に内外空間の広がりや形状がほぼ定義されてしまうことである。通常の建築設計では、こうした一方的な関係ではなく、外形の内外双方における問題が同時に検討されつつ、数多くのフィードバックを経ると考えられるが、その結果、建築の外形にはそうした様々な条件の取捨選択やせめぎ合いの結果が表現されることとなる。

以上のようなことから、古今東西の建築家や研究者たちは、建築の外形をどのように決定するべきか、どのような問題の媒体とするべきかについて、様々な議論を続けてきた。その多くは、建築の外形を何らかのかたちで意味づけ、正当化しようとするものであった。古典主義的な建築においては、外形はオーダーやアーチなどで分節され、様式化されることで規範的な存在となり得たし、

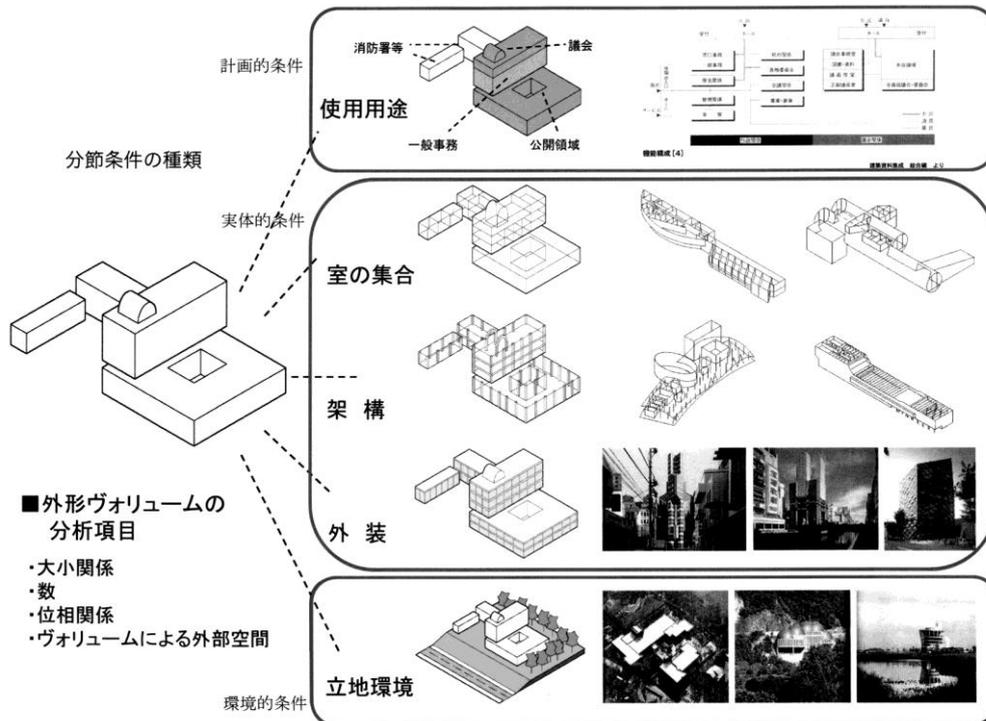


図3 建築の外形ヴォリュームの分節条件

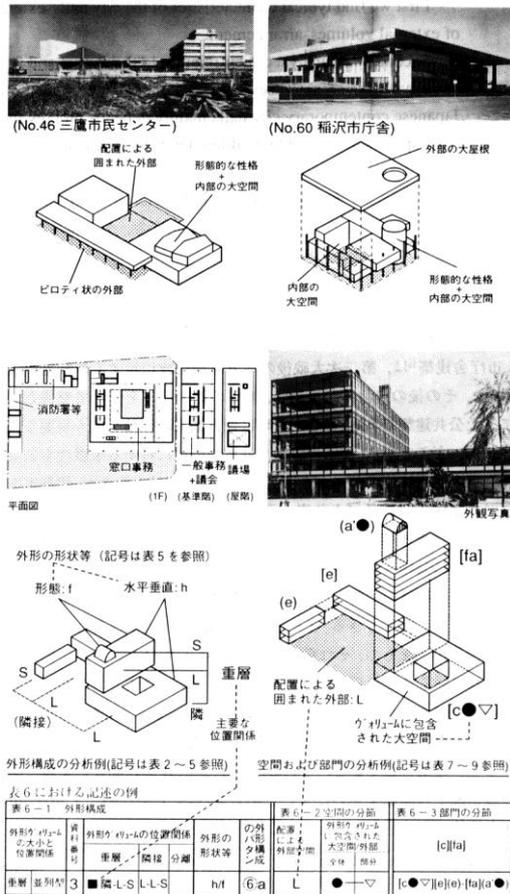
その規範にしたがうことが正当性を表現した。また、近代的な建築運動においては、建築物の外形は内部の空間構成や構造を素直に表現するべきだとする考え方が起こり、外形は内部を表象する断面のようなものとして扱われた。さらには、こうした考え方を一切相対化するように、内部の構成とは無関係な奇抜な外形を、様々な素材を用いて表現するような、彫刻のような建物がみられることもあった。こうした考え方の多くは、各時代において思想上の教義のような響きをもって表明されることが多かったが、実際にはそれらの是非は問題ではなく、むしろ建築の外形が媒体として担い得る意味の多様性を示していると捉えるべきである。

では現代の建築では、それに関わる多種多様な条件との関係において、どのように外形が決定されているのだろうか。またそうした諸条件は、個別の建物や設計者の問題を越えて、より一般的な建築の問題として、どのようなかたちではたらき、外形にどのような形式性を与えているのであろうか。本研究では、多くの現代建築作品を資料として取り上げ、それらの外形と、外形に関わる使用用途、内部の室、架構、外装や外部空間、および立地環境などといった諸条件との関係性を具体的に検討することにより、こうした疑問に対する基礎的な回答と知見を得ることを試みた。

4-2. 建築の外形と用途の関係による定性的分析 - 戦後の市庁舎建築を通して

建築を計画するうえで基本的な問題のひとつに、多様な「使用用途」の取り扱いを挙げることができる。これまでの計画学においては「事務所建築」の一種とみなされることの多かった戦後の市庁舎建築は、実際には一般の事務スペースだけでなく、窓口やホールのような市民への公開部分や議会といった各種の用途が複合した複雑な部門構成をもつと同時に「市庁舎」としての一体性が要求されるという特徴的なビルディング・タイプである。つまりそこでは、人や物の数や密度、行動パターンなどから定義分類されてきた用途の集積である以上に、多様な用途からなる部分をいかにひとつの建築にまとめるかという、いわば建築の全体性を獲得するうえでの構成的な意味づけが重要と考えられる。そこで、とくに周囲へ向けた建物の全体性が表現されやすい外形構成が、使用用途の複合性とどのように関係しているのかについて定性的な検討を行った。

まず、本研究の関心に沿って各建物の外形構成を明確にするため、建物の全体形を単純な「外形ヴォリューム」の配列から捉え(表1上)、該当数の多いいくつかのパタ



部門名	記号	部門の内容	公開領域
公開部分	P	「市民ホール」「展示ロビー」などと呼ばれる一般に公開された部分	公開領域
行政	C	一般市民が利用する手続き等の窓口業務	非公開領域
	F	窓口業務以外の事務的業務	
議会	A	議場、委員会等議会関係の業務(なお議場のみが分節されている場合は「a」として別に表記)	
動線通路	S	階段、廊下、垂直動線等	
公共施設	I	公会堂、市民会館、図書館等	
現業施設その他	E	水道局、消防署等	

表1 戦後の市庁舎建築における外形と用途の関係
外形ヴォリュームの分析例(上)、部門の種類(下)

ンを得た(表2外形構成のパターン)。次にそうした外形ヴォリュームに対して、内部の使用用途=「部門」の違い(表1下)が、どのように対応するのか、内部の大空間や外部の広場といった、特徴的な空間の有無も合わせて検討し、部門の分節におけるいくつかのパターンを得た(表2部門の分節)。各資料を、縦軸を外形構成のパターン、横軸を部門の分節のパターンとするマトリックス(表2)上にプロットすることにより、それらの構成の相違点を相対的に捉えることができる。

表2 戦後の市庁舎建築における外形構成のパターンと内外の空間および部門の分節

表6-1 外形構成				表6-2 空間的分節		表6-3 部門の分節							
外形が「リウム」の大小と位置関係	外形「リウム」の位置関係			外形の形状等	外形構成のパターン 右上の数字は該当資料数を示す	外形が「リウム」に包含された大空間/外部	基本的な部門の一体化		部門ごとの分節				
	重層	隣接	分離				[cfa]	[cf]a 行政-議会 [cf]a 一般事務-議事 [cf]a 公共施設	市庁舎-公共施設	部門ごとの分節がみられない			
単体型	41			a*	①								
	49			a*									
	85			a*									
	73			a*									
	20			c*									
	9												
	25												
	55												
	23	L-S				a	②a						
	39	L-S-S				a							
76	L-S			a									
35	L-S			a									
36	L-S			a									
42	L-S			a									
67	L-S			a									
90	L-S			a									
33	L-S			a									
84	L-S			a									
22	L-S			c*	②b								
45	L-S			c*									
70	L-S	L-S				③							
13	L-S	L-S-S											
52	L-S	L-S											
43	L-S	L-S-S											
78	L-S	L-S-S											
56	L-S	L-S					④						
18	L-S	L-S											
14	L-S	L-S											
40	L-S	L-S	L-S										
89	L-S	L-S	L-S										
57	L-S	L-S	L-S										
2	L-S	L-S	L-S										
80	S-S	S-S	L-隣		⑤								
29	S-S	S-S	L-S-重										
12	S-S	S-S	L-S										
19	S-S	S-S	L-S										
31	S-S	S-S	L-S										
11	S-S	S-S	L-S										
37	S-S	S-S	L-S										
3	L-L-S	L-L-S	L-隣			⑥a							
8	L-L	L-L	L-L										
86	L-L	L-L	L-L										
15	L-L-S	L-L-S	L-L										
16	L-L-S	L-L-S	L-L										
21	L-L-S	L-L-S	L-L										
56	L-分	L-S	L-S		⑥b								
10	L-分	L-S-L	L-S										
48	L-隣	L-S-L	L-S										
54	L-分	L-L-S	L-L-S										
58	L-L	L-L	L-L-S										
75	L-S-L	L-S-L	L-S-重			⑦a							
91	L-S-L	L-S-L	L-S-重										
62	L-S-L	L-S-L	L-S-重										
82	L-S-L	L-S-L	L-S-重										
92	L-S-L	L-S-L	L-S-重										
63	L-L-L	L-L-L	L-L-L		⑦b								
81	L-L-L	L-L-L	L-L-L										
69	L-L-S	L-L-S	L-L-S										
83	S-S	S-S	S-S-重										
38	L-4L	L-4L	L-4L										
30	L-L	L-L	L-L			⑦c							
64	L-L	L-L	L-L										
4	L-L	L-L	L-L										
79	L-L	L-L	L-L										
24	L-L	L-L	L-L										
1	L-L	L-L	L-L										
26	L-S	L-S	L-S										
46	L-L-L	L-L-L	L-L-L										
93	L-S-L	L-S-L	L-S-L										
72	L-S	L-S	L-S										
28	L-L	L-L	L-L										
27	L-L-分	L-L-分	L-L-分		⑧a								
71	L-分	L-分	L-分										
44	L-L	L-L	L-L										
17	L-L-S	L-L-S	L-L-S										
65	L-L	L-L	L-L										
66	L-L	L-L	L-L			⑧b							
34	L-S	L-S	L-S										
61	L-L	L-L	L-L										
47	L-L	L-L	L-L										
77	L-L	L-L	L-L										
32	L-L	L-L	L-L										
5	L-S	L-S	L-S										
87	L-L-分	L-L-分	L-L-分		⑨								
53	L-Lr	L-Lr	L-Lr										
51	L-Lr	L-Lr	L-Lr										

表6-1注・並列型等においては複数の位置関係がみられる場合には、全体の外形構成に主要と思われる位置関係に基づいて検討している。なお主要な位置関係については「■」を付し、他の位置関係を「重」、「隣」、「分」として表内に記す。

表6-2注・[○▼]の表記はひとつの外形「リウム」に包含された大空間/外部を表す。主「p」に対して裏にある外部には「b」を付す。

表6-3注・大小関係における付加的な「リウム」要素は()、7-1要素は[]で表す。それ以外の「リウム」は[]で表す。複数の位置関係をもつ場合における主要な位置関係は「-」で表す。大空間/外部に関わる部門について、例えば大空間を部分にもつ「リウム」要素に含まれる窓口事務の場合には[p▼]として表す。

■市庁舎建築の構成的タイプロジー

その結果、相対的に資料数が多く集中するいくつかのマス目がみられた。そこでこれらを類型として位置づけた。いわばこうした類型全体が本研究で資料とした市庁舎建築の「構成的タイプロジー」をかたちづけているといえる(図4)。たとえば①から④までは「ひとつの外形ヴォリュームに全部門をまとめるタイプ」であり、なかでも①および②aは、外形が対称形をなすなど、「全体性を強調」している。また⑤、⑦cおよび⑧aは、「各部門に対応した外形ヴォリュームの配列によるタイプ」であり、分棟建物が広場を囲むような構成が特徴的である。さらに⑥b、⑦bおよび⑨は、動線や議会などの「特定の用途のみが分節されるタイプ」で、その用途を含む外形ヴォリュームが他の部分を統合する特徴をもつ。さらには外形ヴォリュームに部門との対応がみられない⑥a、⑦bのようなタイプもみられた。このように、本論文を通して明らかになったことのひとつは、それぞれの条件と外形との関係は、いくつかの構成的なタイプとして位置づけられるという点である。これらのタイプが、単に用途あるいは外形といった一面的な視点によるものではなく、両者の関係性のうちに見出されたものであることは、外形ヴォリュームが分節されることによって、その内部の用途をまとめ、全体性へと関係づけるという、建築の実体をもつ、いわば能動的な性質を裏付けるものといえる。

■類型の相互比較による関係の構造化

表2のマトリクスが意味するのは、本論文で市庁舎建築のあり得る構成の可能性として示したタイプロジー全体の枠組みである。それはいわば、化学の元素周期表が、各元素の性格を縦横の軸で構造化していることに似ている。つまり表2の枠組みによって、そこで類型化された各タイプの関係が構造化されているのである。さて、資料の分布がいくつかのマス目に偏っていたことは上でも述べたが、その偏りは構造化された関係のなかで、どのような意味をもつのだろうか。ひとつには、各外形ヴォリュームが、それに「整合」するように様々な用途を分離あるいは組み合わせるなどにより、まとまりをつくり出すということである。事実、資料の分布が少ないマス目をみると、用途と外形ヴォリュームとが対応しない構成が多い。これは一見当たり前のことのようにだが、長い建築の歴史のなかで考えるならば、内容と外形とをどうにか対応させようとする、ある種の合理的な考え方の傾向を直截に示しているものといえる。もう一点は、そのような整合性に沿って、外形ヴォリュームが用途に対応して分節されるタイプ(⑦c、⑧a)ほど、空間的にも外部空間や内部の大空間などを積極的に取り入れた構成をもつ傾向がみられたことである。これと上述した外形ヴォリュームのもつ「能動的な性質」とを考え合わせると、ややうがった見方かもしれないが、そのような空間構成を実現するうえで、用途別に外形ヴォリュームを分節する方法が利用されたとも言い得るのではないだろうか。

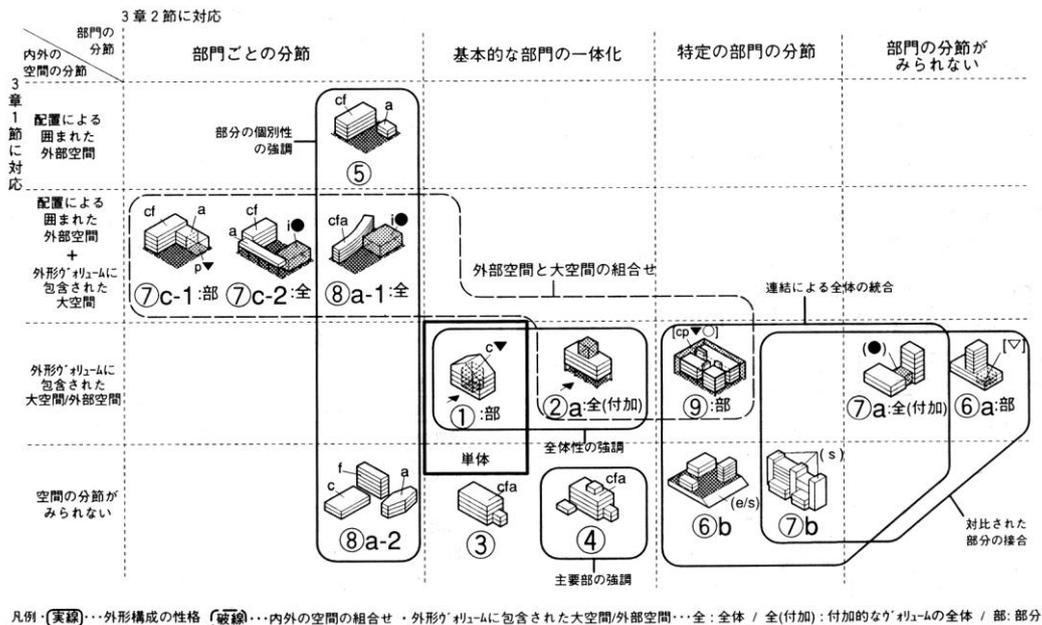


図4 市庁舎建築の外形構成と内外の空間および部門の分節の関係

4-3. まとめ

以上は使用用途についての検討であったが、筆者が本論文で取り扱った、内部の室、構造的に建物を支持する架構体、外装にみられる表現、そして立地環境などといった、様々な条件についても、それぞれに特徴的な構成的タイポロジーが成立し、それらを構造化する枠組みを示すことができた。一般的な見方からすれば、これだけ多種多様な建築の外形が存在し、どのようなかたちでも自由につくることができそうな現代建築であるが、条件ごとに整理すると、そこにははっきりとした傾向がみられるのである。

その多くの事例においては、計画者や設計者が意識する、しないに関わらず、建築の外形を、内外の諸条件との関係において、何らかの整合性をもたせる傾向がみられた。こうした各条件と関連づけられることによって、建築の外形には、様式による規範性や、内外の連続による空間の均質性、素材とマッサによる物質的なモニュメンタリティ、さらには内部の用途を指し示すような表象性、周辺環境との関係を重んじるコンテクスチュアリズムなどといった、社会的、文化的、造形的、環境的な多様な水準における意味や文脈を媒介し正当化する性質が与えられる。さらには、それらが定式化されることによって、いわゆるビルディング・タイプやデザイン・モードなどの形式的なあり方がかたちづくられてきたと考えることができる。

外形に見出せる多様な構成は、それぞれ諸条件と特有の関わり方を示しながら成立している。これは、より敷衍して考えるならば、建築の実体や空間構成が、人々の行動や、用途、構造上の制約などを受動的に示す単なる結果ではなく、より能動的に、諸条件を編成し、あるいは解釈したうえで、現実の空間として出現させる媒体ともいべき役割を担っていることを意味する。本論文は、たいへん限定された問題についての検討ではあるが、建築実体と計画的な問題との関係に対する、新たな視点を導入するきっかけとなるものと考えられる。

5. おわりに：空間構成計画学の実践へ

前章は建築の外形に関するものであったが、構成的タイポロジーとそれを構造化する枠組みに基づく空間構成計画学は、建築にかぎらず、都市空間やランドスケープなど、あらゆる実体的な環境において展開できる可能性をもっている。

また、それは分析的な研究であると同時に、実践的な計画、設計へ向けた認識の基礎を提供するものである。

冒頭で述べた、これからの社会においてより重要になると思われる「何を計画すべきか」という問いにおいては、個別のケースにおいて、建築や都市空間が取り扱うことのできる問題自体を見つけなければならない。ここでは、多種多様な構成を相対的に取り扱うことのできる、本研究が提示するような枠組みが不可欠である。同時に、具体的な実践活動において、その認識の有効性を示すことが、研究を進めるうえでも重要と考える。

そのような認識のもと、筆者は研究活動と同時に、機会に応じてプロジェクトおよび実際に建てられる建物のための設計活動を続けてきている。それは都市に開放された大学キャンパス・モデルの提案⁽⁷⁾や、過密する都市での新たな老人ホーム⁽⁸⁾や小規模集合住宅⁽⁹⁾のモデルの提案、都市公園をより活性化させる仮設劇場⁽¹⁰⁾の提案などであり、それぞれにおいて、これまでにもみられなかった構成的タイポロジーの可能性を試みてきている。

急激に多様化する現代建築の表現について、社会的、文化的、造形的などの様々な水準における意味や文脈を定義することは、多分に各個人や時代的な解釈に基づかざるを得ず、それらの真偽を直接的に実証することはできない。しかし一般論としてはそうであっても、実際の建物を計画・設計するうえで計画者や設計者たちは、建築や都市をつくるかぎりは、その根拠を自らのうちに合理化しているはずであり、それは個々の建物や都市空間の表現に刻みこまれているはずである。現代建築や都市の総体は、そのような個々の計画の総体以上のものではない。本研究の検討と知見を通して、現代の計画者や設計者が、意識的か無意識的に関わらず、否応なく投げ込まれている計画や設計の枠組みを認識することができれば、間接的であれ、多岐にわたる現代建築および都市空間の意味や文脈について、具体的な計画や設計を通して問い直す可能性を与えるきっかけとなるものと、筆者は確信している。

参考文献

- (1) 中井邦夫, “現代建築における外形ヴォリュームの分節条件に関する研究”, 博士論文(東京工業大学), 2007年4月
- (2) 中井邦夫, 根本理恵, 坂本一成, “街路に面した商業建築の外形表現-外形ヴォリュームの分節による建築の構成形式に関する研究(5)”, 日本建築学会計画系論文集, 第622号, pp. 65-70, 2007年12月
- (3) 中井邦夫, 森山ちはる, 坂本一成, “現代日本の博物館建築における立地環境と外形構成-外形ヴォリューム

の分節による建築の構成形式に関する研究(4)”, 日本建築学会計画系論文集, 第 607 号, pp. 33-40, 2006 年 9 月

(4) 中井邦夫, 妹尾慎吾, 坂本一成, “現代建築作品における架構と空間構成- 外形ヴォリュームの分節による建築の構成形式に関する研究 (3)”, 日本建築学会計画系論文集, 第 551 号, pp. 149-155, 2002 年 1 月

(5) 中井邦夫, 大内靖志, 小川次郎, 坂本一成, “現代日本の建築作品における室の集合と外形構成- 外形ヴォリュームの分節による建築の構成形式に関する研究 (2)”, 日本建築学会計画系論文集, 第 528 号, pp. 125-131, 2000 年 2 月

(6) 中井邦夫, 坂本一成, “現代日本の市庁舎建築における空間構成と用途の分節- 外形ヴォリュームの分節による建築の構成形式に関する研究”, 日本建築学会計画系論文集, 第 519 号, pp. 147-153, 1999 年 5 月

(7) 坂本一成 (代表), 藍澤宏, 篠野志郎, 翠川三郎, 宮本文人, 奥山信一, 塚本由晴, 斎尾直子, 足立真, 中井邦夫 (以上分担), “都市共生型- 高機能大学キャンパスの再構築計画に関する研究”, 平成 13 年度~15 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2) 13450243) 研究成果報告書, 2004 年 3 月

(8) 中井邦夫, 小倉亮子, “有料老人ホーム・グリーンヒル”, 日経アーキテクチュア, 日経 BP 社, 2007 年 11 月 26 日号

(9) 坂本一成, 遠藤康一, 岡村航太, 中井邦夫, “egota house A”, 新建築 79 卷 7 号, 新建築社, pp. 58-69 ほか, 2004 年 6 月, 2008 年日本建築学会作品選奨, 2008 年 3 月

(10) 小倉亮子, 中井邦夫, “ベセトシアター”, 新建築 80 卷 3 号, 新建築社, pp. 224-225, 2005 年度グッドデザイン賞, 日本産業デザイン振興会, 2005 年 12 月



日本の X 線天文学の歩み

長瀬 文昭*

Progress of Japanese X-ray Astronomy

Fumiaki NAGASE*

1. はじめに

20 世紀半ばまでは可視光の天体望遠鏡を用いるのが遠方の宇宙・天体を観測する唯一の手段で、人類の遠方の宇宙を見る目は電磁波の中でもごく狭い可視光の領域に限られていた。ところが第 2 次世界大戦後 1950 年代には電波望遠鏡が宇宙の観測に利用されるようになった。そして 1960 年代には赤外線検出器の発達で赤外線望遠鏡により宇宙探査の目が格段と広がった。一方、X 線は地球大気により吸収されるため本格的な X 線観測は地球大気が十分薄くなる高度数 100 km 以上の大気圏外に行う必要があり、人工衛星を科学観測に用いることが可能となった 1970 年代まで待たねばならなかった。現在では光（可視光）、電波、赤外線、X 線の 4 つの電磁波領域が天文観測の基礎となっている。特に X 線観測は高温、高エネルギー、大重力場の極限状態で激しく活動する現象を観測する上で重要な手段となった。そしてこれらの全電磁波領域を駆使した観測を行うことで、冷たい宇宙から熱い宇宙まで、星の誕生から終焉まで、宇宙の進化の全過程を深く理解することができるようになった。

本稿では X 線天文学の幕開け以来、欧米に伍して研究の最前線を走り続ける日本の X 線天文学の開発と研究の跡を追い、日本の X 線天文衛星の成果を概観する。

2. X 線天文学の幕開け

米国マサチューセッツ工科大学のロッシ、ジャッコーニらは 1962 年に X 線検出器を搭載したロケットを打ち上げ、そのロケットの姿勢制御の途上で偶然明るい X 線天体を発見した⁽¹⁾。幸運にもこの X 線源は今でも全天で一番明るい X 線源である“さそり座 X-1”であった。これ

が X 線天文学の幕開けである。

当時 X 線用の集光結像望遠鏡はまだ開発されていなかったもので、日本の小田稔らはすだれコリメーターという特殊な技術を用いて、気球観測によりこの X 線天体の位置の高精度での決定を試みた。しかしその方向には可視光望遠鏡では際立った特徴のない暗く青白い星が見えるのみであった⁽²⁾。この不思議な X 線星の発見は世界の天体物理学者を沸き立たせた。これに刺激された実験家たちは気球やロケットを用いて「白鳥座 X-1」やおうし座の「かに星雲/かにパルサー」など X 線を放射する第 2、第 3 の X 線天体を次々に発見した。一方、理論家たちはこの予想もしなかった強い X 線放射を可能とする天体は中性子星やブラックホールを含む近接連星系（今ではこれを X 線連星という）であることを明らかにした。こうして中性子星やブラックホールという、当時は理論的な可能性としてのみ議論されていた相対論的高密度星の観測的研究が可能となった。

ジャッコーニらはこの X 線源発見の数年前（1957 年）に成功していた人工衛星に注目し、いち早く衛星搭載用 X 線観測器を製作し、これを人工衛星に搭載して全天の X 線天体を探査することを計画した。この計画は 1970 年 12 月にウフル衛星の打ち上げとなって実現した⁽³⁾。そしてウフル衛星はその後数年にわたり全天を隈なく走査し、330 個以上の X 線源を観測し、初めて X 線天体カタログを作成した。ここに X 線による宇宙・天体の観測的研究が天文学の一分野として本格的にスタートした。

3. 日本の X 線天文学

ちょうどこの頃名古屋大学の早川幸男は当時素粒子・宇宙線の理論的な研究の傍ら、新しい電磁波領域で天体物理学の分野を開拓することを模索していた。この頃早川は X 線よりも、宇宙線と銀河面物質との相互作用で生

*教授 物理学教室
Professor, Institute of Physics

成されるガンマ線の方が観測の可能性が高いと考え、当時名古屋大学のグループでは宇宙ガンマ線の気球観測を始めていた。一方当時宇宙線共同研究のためマサチューセッツ工科大学に滞在していた小田稔は、最初のX線天体である「さそり座X-1」の発見の過程をつぶさに見聞していた。もともと研究仲間であった二人はこのX線星の発見が新しい天文学分野を開拓すると予見し、直ちに日本で観測的X線天文学の分野を開拓することを決意した。ちょうどその頃東京大学附置研究所として宇宙航空研究所（後の宇宙科学研究所）が設立されており、小田稔は帰国しその教授に着任し、研究グループを立ち上げると共に、宇宙X線天体の観測に着手した。ここに日本のX線研究グループが宇宙研と名古屋大学において発足した。当時両先生の周辺には、以後の日本のX線天文衛星計画を先導し、その製作・運用を支えた田中靖郎、宮本重徳、榎野文命、小川原嘉明、松岡勝、山下廣順ら、優秀な実験物理学者が参加していた。筆者もこのグループに所属していたが、現在日本のX線天文グループを主導している小山勝二、井上一、牧島一夫、国枝英世、常深博、大橋隆哉らは当時若手研究者、大学院生として実験研究に加わっていた。

日本最初のX線天文衛星「はくちょう」は「ウフル」に遅れること8年余の1979年2月に打ち上げられた⁽⁴⁾。この間はX線天文衛星打ち上げラッシュに沸く欧米を横目に、小グループで衛星開発と並行して気球やロケットの観測で科学的な成果を出して対抗していく苦しい時代が続いた。しかし、「はくちょう」の打ち上げに成功して以降は1983年の「てんま」、1987年の「ぎんが」、1993年の「あすか」、2005年の「すざく」と継続的にX線天文衛星を打ち上げることが出来た。日本のX線天文グループは、「はくちょう」ではすだれコリメーターを用いた中性子星X線連星/X線バスターの研究、「てんま」では蛍光比例計数管によるX線天体からの鉄輝線放射の研究⁽⁵⁾、「ぎんが」では大面積低ノイズ比例計数管による活動銀河核・銀河団の研究⁽⁶⁾、と衛星ごとに特徴のある観測で成果を挙げてきた。そしてX線集光結像鏡を搭載した汎用X線天文台「あすか」により日本のX線天文学はまさに世界の最前線に躍り出た⁽⁷⁾。このように衛星は小型ながらグループが自ら開発した新しい検出器を搭載した、特徴のある衛星を継続的に打ち上げていく日本のX線天文学研究グループの戦略はNASやESAからも称賛を受けた。ことに「ぎんが」、「あすか」衛星が活躍した、1980年代後半から1990年代にかけては、欧米の衛星計画が停滞する中であって、日本の衛星による観測が世界のX線天文学を支えた時期でもあった。

現在は「すざく」が日本の現役X線天文衛星として稼働中である⁽⁸⁾。この「すざく」衛星は2000年に米国NASAのChandra衛星、ヨーロッパESAのXMM-Newtonと競合して打ち上げられ、相補的な特徴で成果を競うはずであったが、ロケットの打ち上げ失敗で5年の遅延を生じた。また、この衛星を特徴づける究極的ともいえるエネルギー分解能を持つX線カロリメーターを冷却系の故障で失ったことは痛手であった。しかし、Chandra、XMM-Newtonという欧米の強力なライバルが稼働している中で、残った検出器（X線CCDカメラと高エネルギーX線検出器）を使って懸命に観測を続け、新たな成果も多数生み続けている。

これら5代にわたる日本のX線天文衛星の構造、特徴、主な成果を概観し、「あすか」、「すざく」など最近の日本の衛星によって得られた目新しい話題を2、3紹介する。

3.1 初代X線天文衛星「はくちょう」

日本の最初の人工衛星「おおすみ」は1970年2月11日に鹿児島県内之浦町の実験場から打ち上げられた。「はくちょう」の前身であるCORSA-aは「しんせい」、「でんば」、「たいよう」に続く第4号科学衛星として1975年に打ち

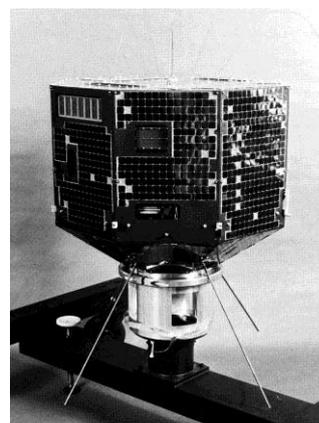


図1 日本初のX線天文衛星「はくちょう」の写真

上げられた。この時の打ち上げ実験はロケット制御に關するトラブルで衛星を軌道に乗せることに失敗した。急きょCORSA-bとして衛星の再製作を行い1979年2月21日に成功裏に打ち上げられ、「はくちょう」と命名された(図1)。これが日本初のX線天文衛星の誕生である⁽⁴⁾。

この衛星は直径82cm、総重量96kgと、日本でも大型化した最近の衛星に比べれば大変小さなものであった。この衛星に搭載された主要検出器は薄膜窓比例計数管の前面にモジュレーションコリメーターを取り付けたものであった。その考案者である小田稔はすだれ越しに庭を眺めていてこのアイデアを思い至ったとのことから、日本では「すだれコリメーター」と愛称した。このすだ

れコリメーターは米国の衛星にも搭載されたが、「はくちょう」打ち上げの翌年1980年に米国NASAが打ち上げた本格的な反射型集光結像系をもつX線望遠鏡に対して、より高エネルギーのX線を広い視野で観測し、良い精度でX線源の位置を決定できることが特徴であった。当時日本ではまだ3軸姿勢制御システムが衛星搭載用としては完成しておらずスピ安定型の衛星であったが、「はくちょう」ではこれを逆に利用して、Rotational modulation Collimatorとして運用し、視野内の複数のX線点源の位置をフーリエ逆変換の手法で一義的に決定できる特異な観測系を構成した。

「はくちょう」はその検出感度の限界から観測対象は主に銀河系内のX線バースターやX線パルサーであった。ことにX線バースター（今では中性子星と低質量の伴星で構成される低質量X線連星に分類される）の観測が精力的に行われ、中性子星の特性とそこへ降着する物質の状態の解明に貢献した。

3.2 2代目衛星「てんま」衛星

「てんま」衛星は「はくちょう」の寿命が尽きる直前を狙って1983年2月20日に打ち上げられた⁽⁵⁾。通常500~600 kmの高度の低い軌道に打ち上げられる天文衛星は5~7年の間に大気摩擦により徐々に高度を下げ、高度が300 km以下になるとその高度は急激に低下し地球大気に突入し、小型の衛星は大気中で燃え尽きる。「てんま」衛星は重量も216 kgと「はくちょう」に比べ倍以上大型となった。形状は対面寸法94 cm、高さ90 cmのほぼ立方体で太陽電池を張ったソーラーパドルを四方に広げる形状であった(図2)。

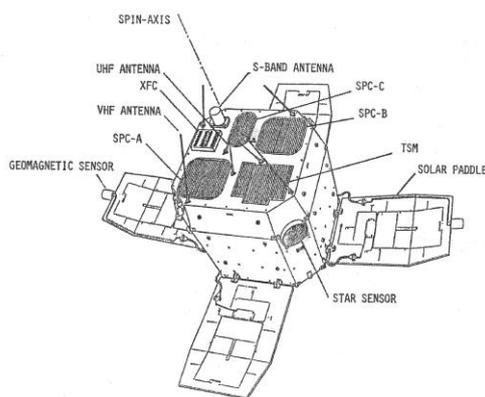


図2 「てんま」衛星の構造モデル

この衛星には、それまでに田中靖郎らが開発し、ロケット実験で成果を挙げていたガス蛍光比例計数管(Gas

Scintillation Proportional Counter: GSPC)が主要検出器として搭載された。このガス蛍光比例計数管はそれ以前に衛星によるX線観測用として使われていた通常の比例計数管に比べ、エネルギー分解能が2倍向上していた。「てんま」以前の衛星による観測からX線のスペクトルには連続成分のほかに鉄の輝線を顕著に放射するX線源があることが分っていた。エネルギー分解能の2倍の改善により、「てんま」GSPCはこの鉄輝線を明確に観測できるばかりでなく、それが中性の鉄が高エネルギーの

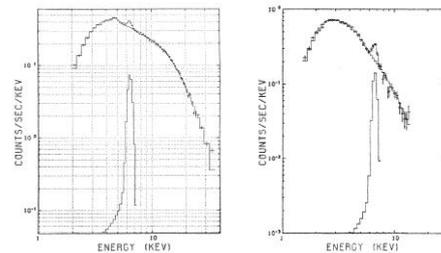


図3 左はX線パルサーVela X-1のスペクトルにみられる6.4 keV鉄輝線⁽⁹⁾。右は銀河中心方向の銀河面で発見された高温プラズマからの6.7 keV鉄輝線を伴うX線放射⁽¹⁰⁾。

X線に照射されて放出する6.4 keVの蛍光鉄輝線なのか、高温プラズマ中でヘリウム様に電離した鉄が放出する6.7 keV鉄輝線かを分離することが可能となった(図3参照)。

「てんま」により、①X線パルサーからの鉄輝線放射は低温ガス中の(つまり中性または低電離の)鉄が放射する6.4 keV蛍光鉄輝線であること⁽⁹⁾、②磁場の弱い中性子星が構成する低質量X線連星からのX線放射は中性子星表面と降着円盤の二つの領域から出ていること⁽¹⁰⁾、③わが銀河系の銀河中心方向では銀河面に沿って数千万度の高温プラズマが存在すること⁽¹¹⁾、などが発見された。このうち②は満田和久が田中靖郎、井上一らの指導を受けて完成した学位論文で、その発表論文 Mitsuda et al.⁽¹⁰⁾は今でも日本天文学会英文誌の中でも屈指の引用率を誇る。また、小山勝二らによる③の発見が契機となり、以後銀河中心のX線観測は小山が中心となって、後続の衛星「ぎんが」、「あすか」、「すざく」で重点的に観測されることとなり、日本の「お家芸」となった。

3.3 3代目衛星「ぎんが」衛星

日本の3代目X線天文衛星Astro-Cは1987年2月5日鹿児島宇宙観測所(内之浦)より打ち上げられ、「ぎんが」と命名された⁽⁶⁾。この衛星の特徴は打ち上げロケットの

性能の向上に伴って、「はくちょう」、「てんま」に比べはるかに大型化された（構造は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$ の直方体、重量は 420kg ）こと（図4）と、日本のX線グループとしては初めて搭載検出器の開発・製作を欧米との共同実験として進めたことである。最初にこの衛星に搭載する検出器の国際協力による開発を提案されたとき、私を含めX線グループ若手研究者の中には逡巡する空気があったが、小田、早川、田中の強力な指導力でこの国際協力が推進された。以後日本の科学衛星の国際共同による製作・運用は常態として定着していった。

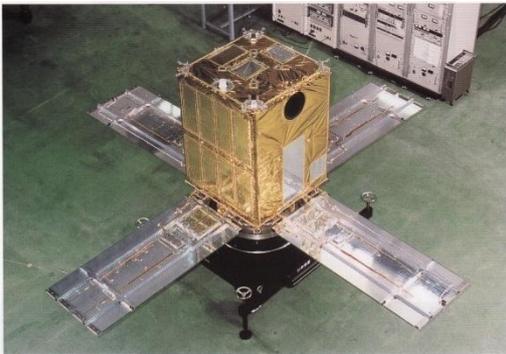


図4 打ち上げ前に太陽パドルを展開した状態で撮影された「ぎんが」衛星。左側面に大面積比例計数管が8台取り付けられた様子がわかる。

「ぎんが」衛星には主検出器として大面積比例計数管（LAC）、2次的検出器として全天ガンマ線バースト検出器（GBD）が搭載されたが、LACは英国レスター大学と、GBDは米国ロスアラモス大学との国際協力によって開発された。このうち大面積比例計数管は1本の有効受光面積が 500cm^2 、8本の合計が 4000cm^2 と、当時のX線天文台としては世界最大のものであった⁽¹²⁾。この大面積比例計数管の開発⁽¹²⁾には英国レスター大学の M. Turner の貢献が大きかった。当時同じようなミッションを打ち上げる計画は米国にもあったが、諸般の事情で米国側の打ち上げは大幅に遅れ、1995年に打ち上げられることになり（RXTE）、はからずもこの種の計器での観測としては「ぎんが」の後を継ぐこととなった。さらにこのLACでは宇宙線などに起因する雑音（計数管のバックグラウンド）を極力軽減して高いS/N比を得る工夫がなされていた。こうして「ぎんが」衛星は大面積、高感度のX線天文台として、観測対象を銀河系内のX線天体から一挙に遠方の活動的銀河核や銀河団にまで広げた。米国NASAが打ち上げたX線ミラーを搭載したアイنشタイン衛星が 2keV 以下超軟X線領域の観測しかできないのに比べ、「ぎんが」は画像の解像度はないものの

30keV の高エネルギーまで広い帯域でX線観測ができるのが特徴であった。

「ぎんが」が打ち上げられた直後にこれを祝うように我が天の川銀河に近い小銀河である大マゼラン星雲において超新星爆発（SN1987A）が起こった。「ぎんが」はドイツのROSAT衛星と共にその観測を精力的に行った。超新星爆発に伴うX線放射をその発生直後から追跡したのはこれが最初であった。「ぎんが」の観測対象は銀河系内で中性子星やブラックホールを構成員とするX線連星、超新星爆発の残骸として広がる衝撃波面、銀河系中心部銀河面や銀河バルジなど銀河系内のX線天体の精密観測にとどまらず、銀河系外遠方の銀河、銀河団やセーフアート銀河、クエーサーなどの活動的銀河核とほぼ宇宙の主要天体全般の観測が可能になった。小山勝二らは銀河中心の銀河面の高温プラズマからのX線放射を精力的に観測した。牧島一夫らはX線パルサースペクトルにみられる吸収線様のサイクロトロン共鳴散乱構造（CRSF）を高精度で観測し、10個以上の中性子星の表面磁場を決定した（図5左）。楨野文命らは多数の活動的銀河核を観測し、そのX線強度の時間変動とスペクトル（図5右）から、その中心に太陽の数千万倍にも及ぶ巨大ブラックホールの存在を明確にし、またその周辺を取り巻くガスの構造や状態を研究した。

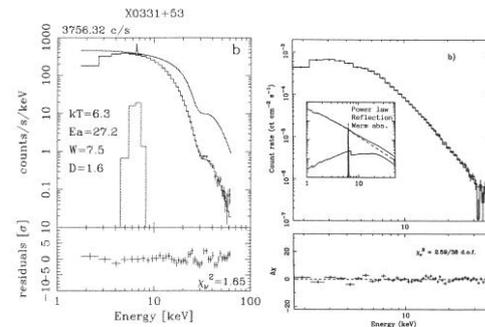


図5 左は「ぎんが」が発見したX線パルサーX0331+53のスペクトル⁽¹³⁾。30 keV付近にCRSF吸収線構造が見られる。右は冪関数型で高エネルギーまで伸びるセーフアート銀河の典型的なスペクトルを示す⁽¹⁴⁾。

3.4 4代目衛星「あすか」衛星

4代目X線天文衛星Astro-Dは1993年2月20日に打ち上げられ、「あすか」と命名された⁽⁷⁾（図6）。「あすか」衛星は、日本では始めて斜入射型のX線望遠鏡を採用した汎用X線天文台である。この衛星では宇宙からのX線の画像を撮ると同時に、その画像中の個々の領域（または点源）のエネルギースペクトルを高い精度で測定する

事が可能であった。特に、世界ではじめて、宇宙の奥深くまでみることを可能にする 10 keV までの高エネルギー領域で宇宙 X 線源を撮像できる能力を実現したのが、「あすか」が従来得られなかった新しい成果を挙げた秘訣でもある。

「あすか」を特徴づけるのは、「多重薄膜鏡による軽量かつ大面積の X 線ミラー」と「高いエネルギー分解能を持つ焦点面検出器」である。「あすか」は 4 台の X 線望遠鏡 (XRT) を搭載し、その焦点面に 2 種類のタイプの異なった検出器、X 線 CCD カメラ (SIS) と撮像型蛍光比例計数管 (GIS) が配置された。これら 2 つの検出器は、X 線分光と撮像を相補的に行う撮像センサである。「あすか」の 4 つの X 線望遠鏡のうち 2 つは SIS と組み合わせられ、他の 2 つは GIS と組み合わせられた。SIS と GIS はいつも同じ方向を向いているので、この二種類の検出器からのデータは組み合わせて使うことができた。

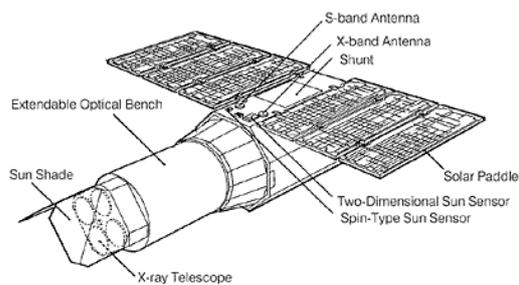


図6 「あすか」衛星の構造モデル。左端に4台のXRTが見られる。検出器は右端内部に収められている。望遠鏡を搭載した光学台は衛星打ち上げ後伸展される。

「あすか」のX線望遠鏡(XRT)は、0.5から12 keVまでの広いエネルギー範囲のX線を効率よく集光する工夫がされていた。これまでのX線天文衛星では、搭載されたX線望遠鏡の撮像能力がほぼ4 keV以下のX線に限られていた。従って、「あすか」では多くの天体から始めて高エネルギー領域のX線像が得られることになった。また、「あすか」によって初めて画像を得ることができるようになった4 keV以上のX線は非常に透過力が強いのが特徴で、これまでは厚いガスに遮られて観測することができなかった天体も、「あすか」を使えば精密に観測することが可能となった。高エネルギーのX線を全反射させるためには鏡面に対してきわめて斜めに(1°以下)X線を入射させなければならないが、その技術的困難を克服してかつ衛星搭載可能な軽量を確保したのがこの「あすか」のX線ミラーの特徴である。「あすか」では非常に薄いアルミニウムの板を特別なめらかに成型しプラスチックのコーティングをした表面に金を蒸着した反

射鏡を沢山集積したものが使用された。この「多重薄板型X線ミラー」は、NASA/GSFCのP. Serlemitsosのグループと名古屋大学の山下廣順、国枝英世らとの共同開発で行われたが、これは画像解像度ではEinsteinやROSAT衛星に劣るものの、特に6.4 keVの鉄輝線領域を含む高エネルギー(~10 keV)まで適用でき、また望遠鏡の大きさに比べ有効面積の割合が大きいことが特徴である⁽¹⁵⁾。

「あすか」の焦点面検出器の1つであるX線CCDカメラは高分解能で撮像観測と分光観測が同時にできる優れた検出器である。このX線CCDカメラを人工衛星に搭載したのは「あすか」が始めてであった。X線CCDカメラを用いることで、SIS検出器は5.9 keVのX線に対して半値幅(FWHM)が約2%という優れたエネルギー分解能(波長分解能)を実現した。この「あすか」の成功によりX線CCDカメラは以後のX線天文衛星では基本検出器として使用されるようになった。

もう一方の焦点面検出器である撮像型蛍光比例計数管(GIS)は、SISに比べて、広い視野を一度にカバーし、かつ高い時間分解能で観測するために搭載されたものである。これは「てんま」衛星に搭載されたガス蛍光比例計数管を位置検出型に改良したもので、銀河団などの広がった天体を観測するのに欠かせない大きな検出面積を持つのが特徴で、特に10 keV以上にわたる高いエネルギー領域でも十分な検出能力を持っていた。このGIS検出器は高い時間分解能をもっており、その周期の下限が数10 msに及ぶ高速回転X線パルサーの観測には欠かせないものであった。このようにX線観測においてGISはSISと相補的な役割を果たした。

3.5 現在稼働中の「すざく」衛星

2005年7月10日に打ち上げられた5代目X線天文衛星Astro-E2は「すざく」と命名され、現在稼働中である⁽⁸⁾。その開発コード名で予想されるように、これは2000年に打ち上げに失敗したAstro-Eの後継機として急遽製作・打ち上げが行われたものである。「すざく」衛星(図7)ではX線望遠鏡システムの基本構造は、「あすか」衛星のシステムを継承している。異なる点は焦点面検出器として撮像型蛍光比例計数管(GIS)の代わりに現在の技術の極限と考えられるエネルギー分解能を得られるX線カロリメーター(XRS)を搭載したこと、X線反射集光鏡では10 keV以上のX線を観測できないので、それを補うために硬X線検出器(HXD)を合わせて搭載したことである。

この2005年7月に打ち上げられた「すざく」衛星は地上からの高度約550 kmの略円軌道を航行している⁽⁸⁾。

その大きさは直径2.1 m全長6.5 m(軌道上で鏡筒伸展後)で、太陽パドルを広げると5.4 mの幅になる。衛星の重量は1.7トンであり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星といえる。そして「すざく」は今日現在も国際的に公募し、採択された天体・研究対象の観測を続けている⁽⁶⁾。

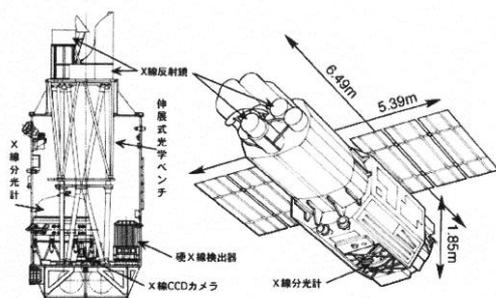


図7 「すざく」衛星の構造モデル。左は打ち上げ時にロケット頭胴部に収められている姿。右は打ち上げ後太陽パドルを展開し、XRTを搭載した光学ベンチを展開した姿を示す。

「すざく」のX線望遠鏡(XRT)は「あすか」のX線望遠鏡の有効面積と、結像性能をどちらも倍近く改善した、新しいX線望遠鏡(口径40 cm, 焦点距離4.5-4.75 m)で伸展式光学台(伸展長1.4 m)に5台搭載している。5台の望遠鏡のうちの1台は高分解能X線分光器(XRS)がその焦点面に備えられ、残りの4台の焦点面にはX線CCDカメラ(XIS)が搭載されました。

4台のX線望遠鏡の焦点面に配置されたX線CCD(XIS)カメラは「あすか」のCCDカメラをさらに改良、発展させたもので、0.5 keVから12 keVのX線領域で、広い視野での撮像を行いながら精度の高い分光観測を連続的に行うことが可能である。4台の望遠鏡を合わせると、6 keV以上の高エネルギー領域のX線に対して、現在も世界最大の有効面積を持つ。

X線望遠鏡でカバーされるX線領域は10 keV以下であるが、それより高いエネルギーを持つ硬X線からガンマ線の領域を観測するため、硬X線検出器(HXD)が搭載されている。これはガドリニウム・シリケート結晶を用いた無機シンチレータ(GSO)とシリコン検出器を組み合わせたものである。このように高いエネルギーまで良い検出感度(S/N比)で観測できる装置が衛星に搭載されるのは日本では初めてである。筒状に伸びた井戸型シンチレータによって周りからの雑音ガンマ線を低減するなど様々な工夫により、このエネルギー領域ではこれまでに例のない高感度の観測を可能とする。

この「すざく」衛星の1台のX線望遠鏡の焦点面には、これまでのX線検出器に比べて一桁もエネルギー分解能の高いX線カロリメーターと呼ばれる高分解能X線分光器(XRS)が搭載された。この検出器の原理は、絶対温度約0.06度の極低温に検出素子を冷し、X線入射に伴う素子の微弱な温度の上昇から入射X線のエネルギーを精度良く決めるものである。まさに1個1個のX線光子(フォトン)の温度を測るX線温度計といえる。このような検出器を衛星に搭載したのは「すざく」が初めてである。動作に必要な極低温を軌道上で実現するため、断熱消磁冷凍機と液体ヘリウム容器(絶対温度1.2度)と固体ネオン容器(絶対温度17度)を組み合わせた宇宙空間で使用可能な3段式冷却システムが新たに開発された。測定は0.5 keVから12 keVの範囲で行われ、エネルギー分解能は6-7 keVの鉄輝線領域で約10 eVとX線CCDカメラの10倍も優れたものである。このX線カロリメーター(XRS)は衛星打ち上げ後初期の試験運用時には、宇宙での運用においても地上試験で得られた所期のエネルギー分解能を達成した。しかし残念ながら、試験運用中に冷却用寒剤が容器から漏れる事故が生じ、実運用での天体観測にこれを供することができなくなり、この究極的な分解能をもつ検出器によるX線天体の観測は次世代の衛星に託すこととなった。

4. 天の川銀河中心からのX線放射

我が銀河系(天の川銀河)は約2千億個の星の集まりで、その中に私たち太陽系がある。この銀河系には他にも星形成の原料となる冷たいガス(暗黒星雲または分子雲と呼ばれる)があり、また私たちの知らない未知の暗黒物質(ダークマター)がこの銀河系を取り巻いていることも知られている。この銀河系の中心には太陽の300万倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが潜んでいることが、最近電波や赤外線を使った銀河中心の観測から明らかになってきた。前章で述べたように小山らは「てんま」によりこの銀河中心方向銀河面に沿って6.7 keVの鉄輝線を放射する高温のプラズマが広がっていることを発見した。「ぎんが」衛星でこの銀河中心から銀河面に沿ったスキャン観測を行った結果、6.7 keV鉄輝線は銀河バルジ領域で特に強く、さらに銀河面に沿って銀経が±60度まで広がっていることを明らかになった(図8参照)。

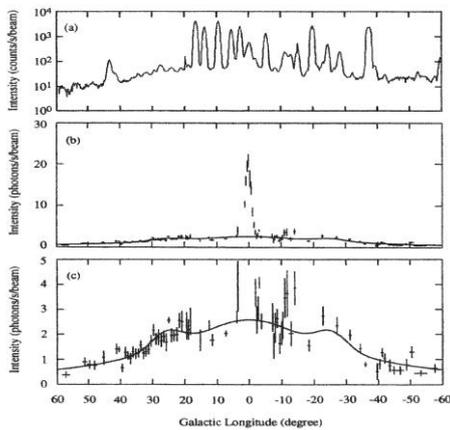


図8 「ぎんが」で観測された銀河面に沿ったX線強度の分布。(a)は連続成分の分布で強いX線点源の影響が顕著である。(b)は6.7 keV 鉄輝線の分布で、銀河中心のバルジ領域で特に強いことがわかる。(c)は(b)の縦軸を拡大したもので、銀系±30度で特に強く、さらに銀系±60度まで広がっていることを示す(Yamauchi & Koyama 1993⁽⁴⁹⁾)。

この銀河中心核付近に広がって見えるX線放射のスペクトルを「あすか」で調べると、電離が大きく進んだシリコン、硫黄、鉄からの輝線が見つかった(図9)。この事実は、中心核の周りが温度が1千万度にも達する希薄な超高温の電離プラズマ雲に覆われていることを示唆する。しかも、このプラズマのエネルギーは超新星爆発に換算すると約1,000発分にも及ぶとてつもなく大きなものだとわかった(その起源は今もって謎に包まれている)。

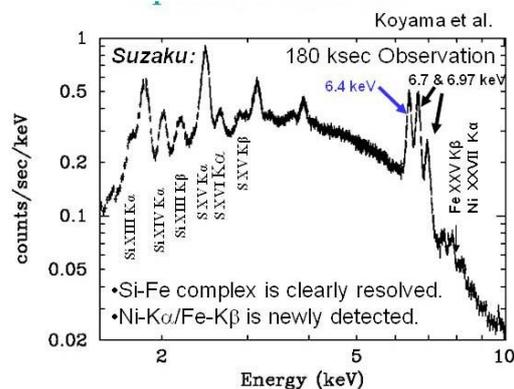


図9 銀河中心方向に広がって存在する高温プラズマからの熱的X線放射(Koyama et al. 2007)⁽⁴⁷⁾。

もう一つ不思議なことに、この銀河中心から300光年ほど離れたところ(Sgr B2領域)からは、電離のほとんど進んでいない低温のガス雲に起因する6.4 keV 蛍光鉄輝線が卓越していることが発見された(図9には両者が同程度の強度で混在する領域のスペクトルを示す)。この蛍光鉄輝線は、低温ガス雲中の鉄原子が強いX線源からの照射を受けてその吸収と特性X線の再放出によるものと結論づけられる。しかし、「あすか」の像からはそのような強い放射場を作る照射X線源はこの蛍光鉄輝線放射領域の近傍には見当たらなかった。

蛍光鉄輝線を放射する低温ガス雲から銀河中心にある巨大ブラックホールまでの距離は約300光年である。一方、超高温プラズマを膨張速度で逆に300年前の過去にさかのぼっていくと、そのときのX線強度は蛍光X線を生成するに足るほど明るくなる。すなわち、ごく最近(300年前)には中心にある巨大ブラックホールに大量のガスが吸い込まれ、重力加速に伴う膨大なエネルギーがX線として放射され、そのなごりが電波で観測されている分子雲領域(Sgr B2領域)に達し、それとの衝突による蛍光鉄輝線再放射を「あすか」が観測した可能性が高いようである。つまり最新の宇宙技術を搭載した「あすか」により、X線の光路差を利用することで、銀河系の中心核ブラックホールの歴史を、300年(つまり江戸時代まで)遡って解くことができた。その後観測が続けられたChandra、XMM-Newton、「すざく」衛星の結果はこの推論を検証すると共に、その6.4 keV 蛍光鉄輝線の強度の中心がその10年間に変動していることを明らかにした。これは被照射体である低温の分子雲(Sgr B2)の形状によるものと思われる。

5. 活動的銀河中心核近傍から放射される鉄輝線

3章で述べたように「ぎんが」衛星は面積検出器を有し、計測X線の統計制度も向上したので、遠方の活動的銀河核からのX線強度が非常に早い変動を示すことを明らかにした。10分間程度にX線強度が2倍も変化する活動銀河核も発見した。このことは、活動銀河核のX線を出している領域は光の速度で走って10分程度以下、つまり、太陽と地球間の距離程度の大きさということになる。X線放射領域がそれより大きければ、たとえば放射源に早い時間変動があっても、各領域のX線が地球に到達するまでの時間差でなまされるので、そのような早い変動は見られなくなる。こんな小さな1AU程度の領域から太陽の100億倍もの強度のエネルギーをX線領域で出さる天体は、巨大ブラックホール以外には考えられないので、その活動的銀河核中心には太陽質量の1億

倍もの超巨大ブラックホールが存在し、これが強烈なエネルギーを放射する源となっていると類推される。

活動銀河核のX線スペクトルは一般に冪関数型の連続関数で表せる形をしている(図5参照)。しかし、「あすか」や「すざく」のような高精度のX線検出器で観測すると、連続スペクトルの上にさまざまな輝線や吸収端が見られる。これらは、中心のブラックホールからのX線が周囲の物質によって散乱吸収されたり、その物質が特性X線を再放出したりする結果生じた、いわば巨大ブラックホールを取り巻く周辺物質による刻印である。例えば宇宙に存在する割合の比較的大きい“鉄”元素の場合、それがあまり高温でなければ、そのX線照射によるK殻電離に伴って6.4 keVの蛍光X線を効率よく放出する。先代のX線天文衛星「ぎんが」は、多くの活動銀河で6.4 keVの輝線を観測し、活動銀河の周りに鉄が分布していることを明らかにしたが、「ぎんが」では輝線の形まで調べることはできなかった。

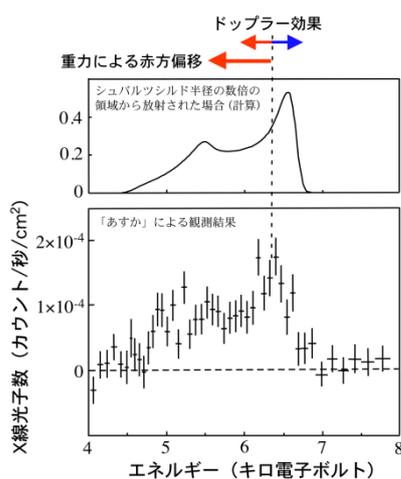


図10 「あすか」が活動銀河MCG-6-30-15のスペクトル解析から発見した低エネルギー側に広がった6.4 keV鉄輝線(下; Tanaka et al. 1995)⁽¹⁸⁾とその解釈モデル図(上)。

輝線の形は、輝線を出している物質の運動についての情報を与える。例えば運動している物質から出される輝線はドップラー効果により、近づいてくる場合には波長が短く(エネルギーが高く)なったように、遠ざかる場合には波長が長く(エネルギーが低く)なったように観測される。前者を青方偏移、後者を赤方偏移といい、波長(エネルギー)の変化は、物質が速く動いているほど大きくなる。田中靖郎、井上一、A. Fabianら⁽¹⁸⁾は「あすか」で観測した活動銀河MCG-6-30-15のスペクトル

ルを解析し、そのX線スペクトルに奇妙な鉄輝線構造を発見した(図10)。この、低エネルギー側に広がった6.4 keV鉄輝線構造の解釈は次のようなものである。高速回転している降着円盤が中心核の光に照らされて鉄輝線が出てくると、降着円盤中のガスの回転運動により青方偏移と赤方偏移をうけた鉄輝線が重なり合い6.4 keVを中心に左右に対照的に広がった鉄輝線分布が見えるはずである。加えて、ブラックホール近傍の強い重力場から出てくる時に光はその重力効果でエネルギーが低い(波長が長い)方にずれることが期待される(重力赤方偏移)。実際にはこれらの効果が重畳した鉄輝線分布が観測されたわけである(図10)。このようなドップラー効果と重力赤方偏移の影響を考慮に入れて鉄輝線の形状をモデル計算して、データと比べることにより、「あすか」は活動銀河核の中心に巨大ブラックホールが存在することを説得力のある形で実証し、その巨大ブラックホールと周辺空間の物理的特性を明らかにした。

「すざく」では他にも多くの銀河がその中心に巨大ブラックホールをもつことを明らかにした。そしてその近傍から放射される6.4 keV鉄輝線の重力赤方偏移の形状には様々な種類があり、今後これを調べることにより中心の巨大ブラックホールが高速で回転しているか否かを判別できると期待されている。

6. 超新星残骸は宇宙線加速工場

銀河系では非常にエネルギーの高い荷電粒子(宇宙線)が生成され、ほとんど光速に近い速さで飛び交っている。その粒子強度はエネルギーの増加とともに冪関数形で減少するが、現在では最高エネルギーが 10^{20} eVの超高エネルギー宇宙線が観測されている。この1次宇宙線の起源、つまりどこでどのように加速されているのかは長年の謎となっていた。ただし理論家の間では宇宙線の起源は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸の外縁部で加速生成されているのではないかと推論があった。しかし宇宙線は、光やX線などの電磁波と異なり、荷電粒子であるため銀河系内を伝搬して地球に到達するまでに銀河系内磁場で曲げられてしまうため、その加速源を観測的に確定することができなかった。この宇宙線起源の謎に答えたのが、意外にもX線天文衛星「あすか」であった。

もともと超新星残骸は電波望遠鏡の観測によって発見されてきた。そして「あすか」以前の衛星(Einstein衛星、ROSAT衛星など)で超新星残骸のX線像が観測されるようになった。そのX線像は大質量星がその進化の終焉で大爆発(これを超新星爆発という)を起こし、その

際莫大なエネルギーをもって放出される高速物質が星間ガスと衝突し、このとき発生する衝撃波で星間ガスが加熱され、超新星爆発残骸の伝搬とともに高温ガスが蓄積され、その希薄高温プラズマからX線が放射されている（これを熱的X線放射という）ものと考えられていた。実際エネルギー分解能の高い「あすか」による観測から、希薄高温プラズマからの熱的X線放射の特徴である高電離した重元素からの輝線が観測され、「あすか」は上記の解釈の妥当性を証明した。

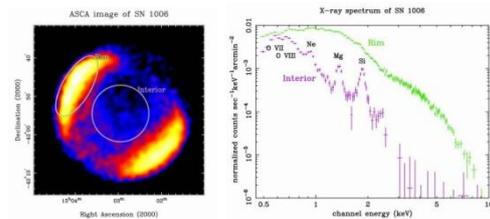


図 11 「あすか」が観測した超新星残骸 SN1006 の X 線画像 (左) と X 線スペクトル (右) . 超新星の中心部からは熱放射, 外縁部 (つまり衝撃波面) では非熱的放射が見られる (Koyama et al. 1995) ⁽¹⁹⁾.

ところが、小山勝二、尾崎正伸らは超新星 SN1006 のスペクトルを解析して、この超新星残骸には他の超新星残骸同様に熱的X線放射を示す場所の他に、輝線を伴わず高いエネルギーまで冪関数型で伸びる、つまり非熱的X線放射のエネルギースペクトルを示す場所があることを発見した⁽¹⁹⁾ (図 11 参照) . この非熱的なX線スペクトルはエネルギーが数兆電子ボルトにも及ぶ高エネルギー電子がシンクロトン放射で放出する電磁波と考えられる。つまりこの超新星残骸は荷電粒子をそのような高エネルギーまで加速する工場であることが証明された。馬場彩らはさらに「あすか」やChandra、「すざく」衛星の超新星の残骸を解析し、①加速源の加速機構の考察とその物理量の推定、②他の超新星残骸からの非熱的X線放射の検証など、研究を進展させている。

内山泰伸らは ROSAT 衛星により軟X線領域で発見された超新星残骸であり、その方向からは1兆電子ボルトに及ぶ超高エネルギーガンマ線放射が観測されている、さそり座にあるX線天体、RX J1713.7-3946 をChandra と「すざく」衛星で数年にわたり精力的に観測した⁽²⁰⁾。その結果、この超新星残骸の「すざく」で観測したスペクトルは確かに非熱的なシンクロトン放射であるが、20 keV あたりに折れ曲がりがあること、X線強度の強い場所が1年程度の時間尺度で変動していることを発見した (図 12) . これらの結果はこの超新星残骸中で宇宙

線が生成されているが、その衝撃波加速に寄与している磁場の強さは従来の予想よりはるかに強いこと、超高エネルギーガンマ線は宇宙線陽子成分による中性 π 中間子の生成とその崩壊によるものであることなどがわかった。

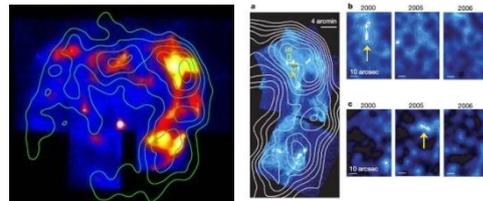


図 12 超新星残骸 RX J1713.7-3946 の「すざく」による撮像画像 (左) とその西側 (図の右側) 外縁中の局所的なホットスポットの年単位の変動 (右) を示す (Uchiyama et al. 2007) ⁽¹⁹⁾.

7. 原始星や惑星状星雲もX線を放射する

星間ガスの濃い場所 (暗黒星雲とか分子雲) で原始星の形成が始まる。この原始星は自己重力で収縮し中心の密度と温度が次第に上昇する。クラス 0, クラス I, クラス II, クラス III 原始星と進化につれて原始星の中心の圧力と温度が上昇し、中心部ではついに水素の核融合反応の臨界温度に達し、水素の核融合でヘリウムを形成する原子核反応 (以後水素燃焼と呼ぶ) が始まる。そこで生成されるエネルギーは星の外部に伝わり、表面から星間空間に放射され、星は明るく輝き始め、主系列星の仲間入りをする。星の質量が太陽程度の場合は水素燃焼を継続しながら、更に重力収縮が進み、ついに中心に溜まったヘリウム芯が核融合反応を始め、このヘリウム燃焼の生成物として、炭素、酸素が星の中心に堆積し始める。水素燃焼が次第に星の外部に移行し、燃料が乏しくなると星の外縁部が大きく膨らみ始め、星は赤色巨星となる。そしてついに星の外縁部のガスはリング状、放射状、網目状等さまざまな形状をなして宇宙空間に広がっていく (惑星状星雲といわれる) . 一方燃えカスとして芯に残ったヘリウム、炭素、酸素は小さく萎縮した、暗い星として残る。これが白色矮星で、親の星の質量によってヘリウムが主成分の白色矮星と炭素、酸素が主成分の白色矮星とがある。

このように太陽程度の質量の星の一生の内、近傍にある主系列星のX線放射はEinstein 衛星、ROSAT 衛星のような高感度の撮像型X線望遠鏡では観測されるようになっていた。しかしまだ冷たいはずのクラス I 原始星や燃え尽きて終焉を迎えた惑星状星雲/白色矮星系からのX線放射は想像し難いことであった。ところが、濃い分子

雲の中で成長中のクラス I 原始星がむしろ高エネルギー (~10 keV) の X 線を放射することを「あすか」が発見した⁽²¹⁾。一方、現在稼働中の米国の X 線天文衛星 Chandra では明るい惑星状星雲約 10 個程度から X 線が放射されていることを突き止めた。このうち可視光で 1 番明るい惑星状星雲、BD +30° 3639 は「すざく」でも観測された。「すざく」ではこの惑星状星雲の中心部からの X 線放射のエネルギースペクトルを 0.5 keV 以下の超軟 X 線領域まで高い検出感度で観測し (図 13)、その X 線エネルギースペクトルに高電離炭素原子に起因する輝線を観測し、その強度が一般の宇宙組成比から推定される強度をはるかに超えることを発見した⁽²²⁾。

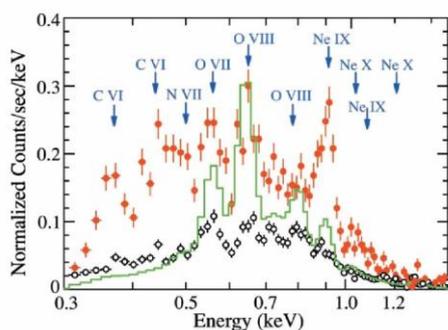


図 13 「すざく」が観測した惑星状星雲 BD +30° 3639 の X 線 CCD によるスペクトル。通常の宇宙組成で期待されるものに比べ非常に強い炭素輝線が見られることが特徴 (Murashima et al. 2006)⁽²²⁾。

この結果は、可視光領域で一番明るくガス温度が比較的低いと思われる惑星状星雲で、どのようにしてこのような強い X 線を放射するのかを問うものである。現在、この系の中心部から高速星風が放出され、それが周りの惑星状星雲に衝突して衝撃波を形成し、そこでガスの温度が X 線放射の可能な高温プラズマにまで加熱され、そこから X 線が放射されるとの仮説が提案されている。この惑星状星雲、BD +30° 3639 の中心部はいずれ白色矮星として残るものと思われるが、「すざく」の観測によりこの惑星上星雲の中心部に炭素元素が豊富に存在することを検証したことは、宇宙における元素合成の理論的仮説を検証する上で大変重要な結果である。

8. 太陽風と地球磁気圏の相互作用で放射される X 線

「すざく」は X 線天文衛星、つまり太陽系外遠方の X 線天体を観測するのが主目的の軌道天文台である。観測対象はブラックホール、超新星残骸、活動銀河核、銀河団などが主流ですが、時には偶然とらえた現象が思

いがけない発見につながることもある。本項では、太陽風を起源とする地球近傍での X 線放射という、「すざく」が他の目的の観測中に偶然とらえた現象を紹介する。そして、この X 線放射が太陽風中の高速粒子が地球周辺の中性元素と衝突する際に起こす「電荷交換」といわれる原子の相互作用に起因することを明かす。

「すざく」は 2005 年 9 月に、銀河系内に広がって存在する数百万度の温度を持つ高温プラズマハーローから放射される銀河系内超軟 X 線放射の観測をするために、望遠鏡視野を黄道北極領域に向けていた。この観測中約 10 時間にわたって X 線強度が起源不明の謎の増光を示した。この増光は特定の点源ではなく検出器の視野全体に広がっており、そのうえ短い時間で変動をしていた。調査の結果この増光の変化の様子は磁気圏観測衛星によって得られた太陽風陽子の強度変化に比例しており、「すざく」が偶然観測した「謎の X 線増光」は太陽風と強く関連していることが判明した⁽²³⁾。

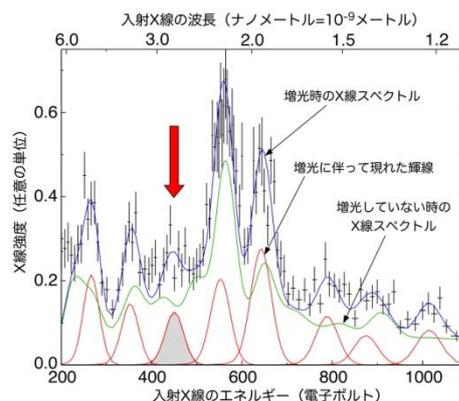


図 14 「すざく」は黄道北極方向の時間変動するはずのない広がった領域の X 線放射を観測中に急激な X 線増光を観測した。それから静穏成分を差し引いたものは高電離したイオンから発せられる輝線群であった (Fujimoto et al. 2007)⁽²³⁾。

この増光時の X 線スペクトルから静穏時のそれを差し引くと X 線の増光分は高電離した炭素、酸素、ネオン、マグネシウム等のイオンが放射する輝線の群であることがわかった (図 14)。しかもその輝線 (特に炭素輝線) の強度は数百万度で熱平衡にある高温プラズマから予想される強度をはるかに超えていた。この強烈な輝線強度を説明するには、高速で飛来した太陽風炭素イオンが磁気圏内で水素原子と衝突して起こす電荷交換と呼ばれる相互作用によるものとする説明できる。つまり水素原子に付随していた束縛電子が衝突時に完全電離炭素イオ

ンに乗り移る。そしてこの電子が炭素原子束縛エネルギーの基底状態まで落ち込む時に 495 eV の超軟X線輝線を放出する。その増光の時間変動の解析からこの電荷交換は地球磁気軸方向で高度が6,000 kmのごく地球近傍で起こっていることが判明した。この電荷交換過程そのものは磁気圏プラズマ観測衛星の研究などでも知られていたが、X線天文衛星でこの電荷交換過程から放射されるX線を捉えたのは「すざく」が初めてである。

9. むすび

日本のX線天文グループは現在「すざく」の運用と観測データ解析、論文の作成を進めるのと並行して、5年ほど前から次の衛星の開発計画を練り、搭載予定機器の基礎開発実験を繰り返している。この次世代X線望遠鏡計画(通称NeXT)は、現在宇宙航空研究開発機構(JAXA)において衛星プロジェクトとして認められるための審査が進んでおり、予定通り進めば2013年の打ち上げを目指して衛星製作が開始される。この衛星の検出器の1つは高分散X線分光系/X線マイクロカロリメータである。これは「すざく」で実観測に供することができなかった観測機器の再挑戦であり、世界中から注目されまた協力の申し出を受けている。他は80 keVまでの硬X線の反射結像を可能とするスーパーミラーとその硬X線領域で高エネルギー分解能での撮像を可能とするCdTe撮像素子を組み合わせた望遠鏡システムである。2010年代中期は世界のX線天文台打ち上げ計画が途絶える時期になるため、このNeXT衛星に対する世界の期待は大きい。

本稿では銀河、銀河団の研究に関するトピックスを取り上げなかったが、もちろんこの分野でも「ぎんが」、「あすか」、「すざく」による観測が多数行われ、多くの研究成果を挙げている。しかし、NeXT衛星ではこの分野、特に宇宙における銀河の大構造分布、宇宙の質量の圧倒的割合を占める未知の暗黒物質(ダークマター)の解明など、宇宙の形成と進化にかかわる重要な研究課題に取り組みと期待される。

参考文献

- (1) R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini & B. B. Rossi, *Phys. Rev. Lett.* 9, 439 (1962).
- (2) K. Ichimura, G. Ishida, J. Jyugaku, M. Oda, K. Osawa & M. Shimizu, *Publ. Astron. Soc. Japan* 18, 469 (1966).
- (3) R. Giacconi, E. Kellogg, P. Gorenstein, H. Gursky, H. Tananbaum, *Astrophys. J. Lett.* 165, L27 (1971).
- (4) I. Kondo, *et al.*, *Space Sci. Instr.* 5, 211 (1981)
- (5) Y. Tanaka, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 641 (1984).
- (6) F. Makino, *et al.*, *Astron. Lett. Commun.* 25, 223 (1987)
- (7) Y. Tanaka, H. Inoue & S. S. Holt, *Publ. Astron. Soc. Japan* 46, L37 (1994).
- (8) K. Mitsuda, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 59, S1 (2007).
- (9) T. Ohashi, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 699 (1984).
- (10) K. Mitsuda, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 741 (1984).
- (11) K. Koyama, K. Makishima, Y. Tanaka & H. Tsunemi, *Publ. Astron. Soc. Japan* 38, 121 (1986).
- (12) M.J.L. Turner, *et al.*, *Pub. Astron. Soc. Japan* 41, 345 (1989).
- (13) K. Makishima, T. Mihara, F. Nagase & Y. Tanaka, *Astrophys. J.* 525, 978 (1999).
- (14) K. Nandra & K.A. Pounds, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 268, 405 (1994).
- (15) P. Serlemitsos, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 47, 105 (1995).
- (16) S. Yamauchi & K. Koyama, *Astrophys. J.* 404, 620 (1993)
- (17) K. Koyama, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 59, S245 (2007).
- (18) Y. Tanaka, *et al.*, *Nature* 375, 659 (1995).
- (19) K. Koyama, *et al.*, *Nature* 378, 255 (1995).
- (20) Y. Uchiyama, F. A. Aharonian, T. Tanaka, T. Takahashi & Y. Maeda, *Nature* 449, 576 (2007).
- (21) Y. Kamata, K. Koyama, Y. Tsuboi & S. Yamauchi, *Publ. Astron. Soc. Japan* 49, 85 (1997).
- (22) M. Murashi, M. Kokubun, K. Makishima, *et al.*, *Astrophys. J.* 647, L131 (2006).
- (23) R. Fujimoto, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59S, 133 (2007).



き裂を有する材料の破壊と応力拡大係数について

伊藤 勝悦*

Stress intensity factors valid for linear elastic fracture mechanics

Shouetsu ITOU*

1. はじめに

筆者は1968年3月に秋田大学鉱山学部機械工学科を卒業して、4月から東北大学工学部機械工学第2学科の弾性及び固体の力学講座(渥美教授研究室)の助手として勤めさせて戴いた。渥美先生は材料力学・設計製図・弾性論の授業科目を担当されていたが、専門は応力解析であり、研究内容は応用数学の範疇に入っていた。恒例によって修士の1年生は、*Wärmspannungen*[1]を教材にして輪講を行っていたが、筆者の参加も快く認めて戴いた。渥美研究室には5年間在籍したが、この頃の助手・博士課程修了者の多くのは、その後、大学教員として就職したが、全員が研究分野を変えないで、応力解析を行ってきた。

材料力学を専門とする多くの国内の研究者は弾性論から離れてしまったように見受けられる。このため、国内の弾性力学の研究者数は今では15名程度になってしまっている。国際学術雑誌には、弾性力学を用いて解いた研究論文が多数掲載されているが、やや、国内の研究者による論文が少なくなってきた。本報告では、筆者がき裂の問題を研究テーマにしていった過程を紹介し、その後、国内の弾性力学の研究者の一人として、これまでにやってきたき裂の応力解析の内容について総論的に述べる。

2. 応力解析

2.1 力とはなにか

例えば、経済学部の学生に、「私の体重は46.8 kgですが、この時のkgは質量ですか重量ですか」と筆者に聞かれた場合、理解してもらえるように説明する事は難しい。「それは力であって、より適切には(?)、 $46.8 \times 9.80 = 458.6 \text{ N}$ [ニュートン]の力で地球が貴方を引いている事を示して

いるのです」と言う事になるが、益々、分からなくなる事は間違いない。

通常、何のためらいもなく、力の言葉を多用している。しかし、力について説明する事は難しい。力とは物体を動かしたり、物体を変形させたり出来るものと、一応、説明する事が多い。お金の単位は1円であるが、1円を250個集めれば、生協でカレーライスが食べられる。1円の能力はこれ程度の価値である。さて、力の単位について説明する。1000ccの牛乳パックを手で持った時、手は地球から引かれる。この時、手が押される力(重さ)が約9.8 [N(ニュートン)]である。水102.0 ccを紙コップに入れて手で持った時、手が押される力が約1.0 Nである。比較する事は無意味であるが、どちらかと言えば1円と同様に1 Nはささやかな大きさの力である。

2.2 応力について

材料の中に、図1に示すように、大きさ ΔA (デルタエイ)の微小面積を考える。この面を、 ΔF の力が通過している場合を考えて、図2に示すように ΔF を面に垂直方向な力

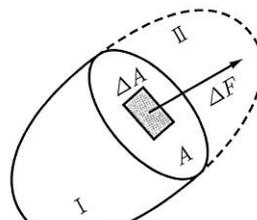
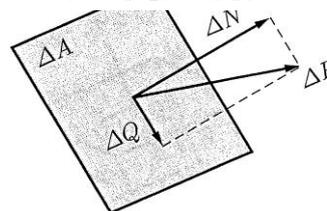


図1 仮想面を通過する力



*教授 機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

図2 仮想面の力の分解

ΔN と面に平行な力 ΔQ に分解する。この時、次式で定義される σ (シグマ) と τ (タウ) をそれぞれ、垂直応力、せん断応力と言う。

$$\sigma = \frac{\Delta N}{\Delta A}, \quad \tau = \frac{\Delta Q}{\Delta A} \quad (1)$$

垂直応力 σ 、せん断応力 τ の他に、合応力 p が定義されているが、ここでは説明を省略する。

材料が壊れるための条件は、5種類程度ある。材料の特性や荷重のかかり方によって材料の破壊の条件は異なる。例として、最も分かりやすい場合を考えてみる。コピー用紙1枚を両手で持って引けば、どこかで破れる。これは、破れた場所の垂直応力 σ が、コピー用紙の引張強さ σ_f に達したので、破れた(壊れた)事になる。この場合の破壊の条件を式で示せば

$$\sigma > \sigma_f \quad (2)$$

となる。引張強さ σ_f は材料が決まれば決まる値であり材料定数である。この値は実験を行う事によって、コピー用紙、鉄、エポキシ樹脂、アルミ合金、セラミックスなど、種々の材料に対して求める事が出来る(既に求められている)。

材料の破壊を防ぐためには、材料の引張強さ σ_f の値を求めておく必要がある。その他に、実際に材料に発生する応力 σ を求めなければならない。この応力 σ を求めるためには、偏微分方程式を数学的に解かなければならないが、この作業を応力解析と言う。

3. モーメント応力理論

材料の中に微小な部分(微小要素と言う)を考えて、力の釣合式を求め、この式から偏微分方程式を導く。ところで、材料に小さな粒や空孔が多数含まれる場合、材料を均質材として取り扱うためには、材料内にとる要素の大きさを微小にする事は出来ない。少なくとも、要素の大きさをこれらの粒子や空孔の直径の10倍程度以上にする必要がある。

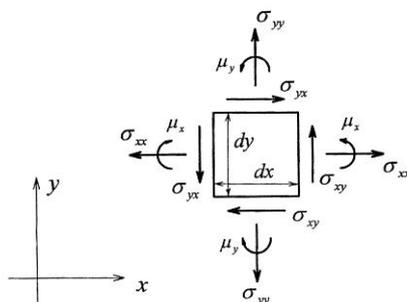


図3 微小要素の応力

要素の大きさを無限小に出来ないため、要素には図3に示すように、垂直応力 σ_{xx}, σ_{yy} 、せん断応力 σ_{xy}, σ_{yx} の他に、モーメント応力 μ_x, μ_y も導入しなければならない[2] (式(1)ではせん断応力の記号に τ を用いたが、ここでは σ を用いている。下付の添え字については、特に説明しない。)。要素にモーメント応力をも考慮する理論をモーメント応力理論と言う。この理論には、材料定数として長さの次元を持つ l が新たに追加される。筆者が研究室の助手として勤めた時、渥美先生は、これまでに解かれた応力解析問題にモーメント応力理論を適用して再吟味する研究を行っていた。

粒状物体にモーメント応力理論を適用するのであれば、新しい材料定数 l の値が既に求められている必要がある。しかし、 l の値はどのような材料に対しても与えられていなかった。このため、 l の値を変えて数値計算を行い、応力・変位の l による依存性を提示していた。筆者もモーメント応力理論を用いて数編の論文を学術雑誌に掲載した。渥美研究室の助手として勤務して直ぐに分かった事がある。それは、渥美研究室では、研究論文を欧米の一流の学術雑誌に載せる事に主眼が置かれていた事である。モーメント応力理論についての研究も、この目的のための延長線上で行われていた可能性がある。

4. 剛体押し付け問題とシュミット法について

修士課程の学生と新任助手の筆者は、しばしば教授室に呼ばれて研究テーマ等について種々指導された(博士課程の院生と先輩助手には研究指導はほとんど行われなかった)。ある日、教授室に呼ばれて渡されたコピーは、図4に示すように、剛体押し付けによる丸軸の接触応力を求めている論文[3]であった。記憶が薄れているので正確ではないが、多分、Spillerの解いた問題にモーメント

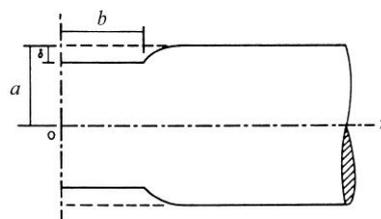


図4 丸軸の剛体帯による押し付け

応力理論を適用するように指示されたと思っている。

第一段階として、Spiller が与えている接触応力を求める必要がある。混合境界条件にフーリエ変換を適用して積分方程式を導き、この積分方程式を解くために接触応力を式(3)に示すようにチビシェフ級数 $T_n(z)$ に級数展開する。

$$\sigma_{rr}^a = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{T_n(z)}{\sqrt{1-z^2}} \quad \text{for } -b < z < b \quad (3)$$

$$= 0 \quad \text{for } b < |z|$$

ここで、 σ_{rr}^a : 接触応力、 a_n : 未定係数、 $2b$: パンチ幅。また、 (r, θ, z) は円柱座標である。式(3)のように級数展開すれば、結局、連立積分方程式は次の形に帰結する。

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n F_n(z) = u(z) \quad \text{for } -b < z < b \quad (4)$$

式(4)は未定係数 a_n についてシュミット法を適用して求める事が出来る[4]。シュミット法のプログラム作成に手間取り、Spiller が与えている接触応力を求めるまで、約半年かかった。この間、渥美先生は、先生の計算の手伝いをさせる訳でもなく、何も言われなかった。シュミット法を使いこなせるようになったので、板の押し付け問題にモーメント応力理論を適用して2, 3の問題を解き、数編の論文を執筆する事が出来た。

5. き裂を有する材料の応力解析

フーリエ変換を用いて応力解析を行っていたが、この時、Professor I. N. Sneddon の Fourier Transforms [5]を常に手元に置いていた。この著書の1節で、き裂を有する材料の応力がフーリエ変換の適用例として解かれていた。材料の破壊に関連してき裂は重要であると説明されていたが、筆者はき裂について特に関心を持たなかった。その後、Sih and Loeber が、調和振動応力波がき裂に入射する時の応力解析を行った[6]。この論文を読んだ時、筆者はき裂の応力解析よりも、積分方程式を用いて解かれたき裂の論文が Q. Appl. Math. に掲載された事の方に興味を引かれた。しかし、この頃は、渥美先生の球かを有す

る異方性弾性体の応力集中問題の解析と数値計算のお手伝いを主として行っていたので、他の研究テーマに取り組む必要は無かった(この研究が ASME J. Appl. Mech. に掲載されていくので十分満足していた)。

どのようにして入手したのか思い出せないが、岡村先生の著書[7]を読む機会があった。この著書には、応力拡大係数と破壊靱性値が詳しく説明されていて、き裂の研究も悪くないと思った。Spiller は接触応力をチビシェフ級数に展開してシュミット法を適用して解いている。き裂の問題でも連立積分方程式を解く事になるのでシュミット法が適用できるのではないかと思った。Eldelyi の公式集[8]から公式を探した結果、き裂面の変位 u_0 を式(5)のようにヤコビ級数に展開すればき裂問題が解ける可能

$$u_0 = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{P_{2n-2}^{(1/2, 1/2)}(x)}{\sqrt{1-x^2}} \quad \text{for } -a < x < a \quad (5)$$

$$= 0 \quad \text{for } a < |x|$$

性があると予想出来た。ここで、 u_0 : き裂面変位、 a_n : 未定係数、 $2a$: き裂長さ。Sih and Loeber が解いたき裂の調和振動問題[6]に適用して解いた処、両者の計算結果が一致する事を確認できた。シュミット法を用いれば比較的簡単にき裂問題が解ける事がわかった。その次の段階として、この手法を用いて何かの問題を解かなければならない。かなり強引な問題であったが、図5に示すように無限に長い有限幅き裂に3次元的に調和振動圧力を働かせて応力拡大係数を求めた。運良く、この論文はアメリカ機械学会論文集の Series E (ASME Journal of Applied Mechanics)に掲載された[9]。この頃から、筆者の研究テーマは、き裂問題の解析に傾斜していった。

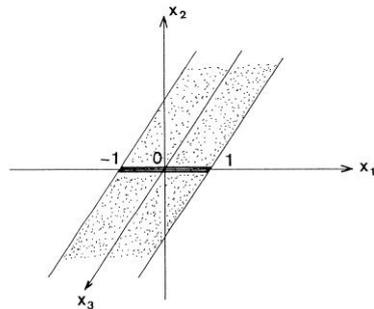


図5 有限幅無限長き裂

6. 応力拡大係数と破壊靱性値

少し専門的になってしまうが、き裂端の応力状態を説明する。図6に示すように、幅 $2a$ のき裂は (x, y) 座標

に対して $y=0$, $-a < x < a$ の位置に存在するものとする。

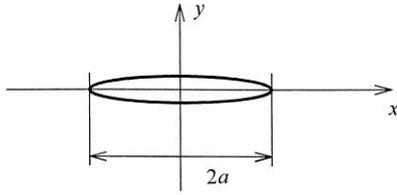


図6 幅 $2a$ のき裂

少し難しくなるが、材料に外力が働く時、き裂先端の垂直応力 σ_{yy} とせん断応力 τ_{xy} は式(6)のように表すことが出来る。

$$\sigma_{yy}(y=0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi a}} \frac{1}{\sqrt{x-a}}, \quad (6)$$

$$\tau_{xy}(y=0) = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi a}} \frac{1}{\sqrt{x-a}}$$

式(6)の K_I と K_{II} は一定値になるが、 K_I (ケーワン)を Mode I の応力拡大係数、 K_{II} (ケーツー)を Mode II の応力拡大係数と言う。この値は、通常、き裂先端の応力から式(7)で求められる。

$$K_I = \lim_{x \rightarrow a^+} \sqrt{2\pi(x-a)} \sigma_{yy}^0, \quad (7)$$

$$K_{II} = \lim_{x \rightarrow a^+} \sqrt{2\pi(x-a)} \tau_{xy}^0$$

ここで上付きの 0 は $y=0$ の値を示す。

次に、図7に示すように、板厚 t の薄い板に存在するき裂の右端が微小距離 da だけ進展した場合を考える。材料が壊れた場合はエネルギー δU が解法(放出)されるが、

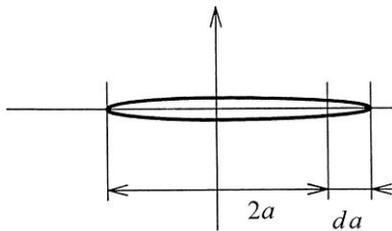


図7 き裂右端の進展

弾性論を用いて計算すれば、平面応力の場合(板が薄い場合と考えて良い)式(8)で与えられる。

$$\delta U = \frac{K_I^2}{2(1+\nu)G} \times (t \delta a) + \frac{K_{II}^2}{2(1+\nu)G} \times (t \delta a) \quad (8)$$

式(8)を面積 $(t \delta a)$ で割った値をエネルギー解法率 g と言う。すなわち、

$$g = g_I + g_{II} = \frac{K_I^2}{2(1+\nu)G} + \frac{K_{II}^2}{2(1+\nu)G} \quad (9)$$

式(8),(9)において ν : ポアソン比, G : 横弾性係数。

破壊の条件式を式(9)の和の形のエネルギー解法率 g を用いて説明する事に(筆者には)多少の戸惑いがあるので、Mode I の場合のみを考えれば、

$$g_I = \frac{K_I^2}{2(1+\nu)G} \quad (10)$$

を得る。Irwin は、式(10)で与えられるエネルギー解法率が、き裂端を切り開いて(単位の面積×2)の面積を作る時に消費されるエネルギー g_c (破壊靱性値と言う)を超える時、材料は破壊すると考えた[10]。すなわち、破壊の条件式を示せば式(11)を得る。

$$g_I > g_c \quad (11)$$

材料の破壊靱性値 g_c は、密度、ヤング率、ポアソン比等と同様に、材料に固有の値を持つ。式(10)より、 g_I と K_I は 1 対 1 に対応しているので、破壊の条件式として、式(11)を用いる替わりに次式を用いても良い。

$$K_I > K_c \quad (12)$$

K_c も破壊靱性値と言われるが、特に g_c と混乱する事もないと思われる。

本節を纏めれば、“き裂先端の応力から定義される応力拡大係数 K_I が材料固有の値である破壊靱性値 K_c に達すれば、材料は前触れも無く突然破壊する”を得る。き裂が検出された場合、そのき裂が安全であるか否かを判定するためには次節で述べるパリス則を適用して検討しなければならない。しかし、安全率 S を用いて式(13)で判定しても良い。

$$K_I < \frac{K_c}{S} \quad (13)$$

安全率 S は、経験等によって決められる値と思われるが、この数値は公表されていないように見受けられる。破壊靱性値 K_c は各種の材料に対して実験を行えば比較的簡単に求められる。他方、応力拡大係数 K_I の値は簡単に求める事が出来ない場合が多い。

7. パリス則

き裂を有する材料に繰返しの荷重が働けば、き裂端に発生する応力拡大係数は変動して、最大値 K_I^{\max} から最小値 K_I^{\min} の間で変化する。この時、(14)式で与えられる ΔK_I を応力拡大係数範囲と言う。

$$\Delta K_I = K_I^{\max} - K_I^{\min} \tag{14}$$

Paris らは金属材料に対しては材料に加えらる繰返しの回数 N の増分 dN に対するき裂端の進展長さの増分 da は式(15)で与えられる事を示した[11]。

$$\frac{da}{dN} = C \times (\Delta K_I)^m \tag{15}$$

ここで、 C 、 m は材料定数。式(15)は実験結果から見出した式であり、理論的に求められた式ではない (da/dN を疲労き裂伝ば速度と言う)。き裂の進展率(成長率)が式(15)で与えられる事をパリス則と言う。実際には、Paris らは式(15)とは異なる関係式を与えているが、本質的に式(15)と同じになるので、式(15)をパリス則と言っている。

き裂を検出した時のき裂長さを $2a_0$ とする。材料の破壊靱性値 K_{Ic} は与えられているので、破壊する時のき裂長さ $2a_f$ は分かる。そこで、式(15)を用いて、今から何回繰返しの荷重を加えたら材料は壊れるか計算出来る。仮に今から N_f 回の荷重を加えたら材料は壊れるとすれば、式(15)より式(16)を得る。

$$dN = \frac{1}{C \times (\Delta K_I)^m} da, \tag{16}$$

$$\therefore N_f = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{(\Delta K_I)^m} da$$

き裂の形状によって ΔK_I の表示式は複雑になる。多くの場合は、 ΔK_I は計算式では与えられずグラフ上のデータで与えられる。しかし、この場合でも数値積分すれば、式(16)より N_f を求める事は可能となる。

式(16)を用いて、破壊までの荷重の繰返し数を計算する事が可能となる。しかし、応力拡大係数の解析を専門としている研究者にとっても、 N_f を求める事は、そんなに簡単ではないと思われる。式(13)、(16)を用いて、き裂の健全性を判定するためには豊富な経験を有する機械技術者が必要とされる。

(パリス則についての論文は、当時の学術雑誌には掲載されなかった。掲載否になった回数は分からないが、どこからも断られたために、結局、ワシントン大学の学内誌である The Trend in Engineering に載せた。)

8. 応力拡大係数の計算例

本節では、筆者がこれまでに行ってきたき裂についての解析を紹介する。静荷重がき裂を有する材料に働く場合の解は既存の解法を用いても比較的容易に求める事が出来る。これに対して、動的荷重が材料に働く場合、既存の解法を適用する事は難しい場合がある。場合によっては簡単なき裂形状に対しても解が与えられない。しかし、き裂面変位を級数展開してシュミット法を適用した場合は、静的問題、動的問題、熱弾性問題、電磁弾性問題、不均質弾性問題、異方性弾性問題等、どのような問題も比較的容易に解析できる。き裂面あるいはき裂面の変位の差の形は、本質的に1種類のみであり、任意の関数で級数展開する事は許されない。

8.1 長方形き裂

無限に長い有限幅き裂の3次元動弾性問題の解析に成功したので[9]、この問題の拡張を考えた。き裂面の変位を2重無限級数に展開すれば図8に示すような長方形き裂の応力解析が出来るのではないかと考えた。この解析

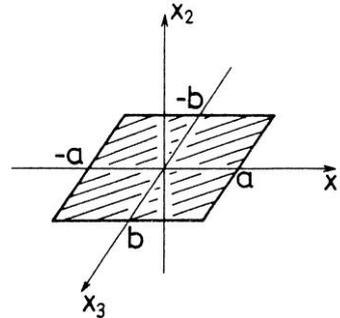


図8 長方形き裂

では、2重無限積分を数値的に求める必要があり、さらに、これらの値を用いて、有限領域で2重積分を数値的に求め、行列式を計算してシュミット法を適用しなければならぬ。解析は出来ても、数値計算が出来ない可能性があった。しかし、出来る可能性もあるので、このテーマに取り組んだ。2重無限積分の数値積分に苦労したがどうにか計算出来た。幸い、円振動数をゼロに漸近させた時、Weaverの静的解[12]に一致する事を確認出来た(Weaverは境界要素法を用いて長方形き裂の静的応力拡大係数を求めた)。ドイツの雑誌ZAMMに投稿したところ、運良く掲載された。調和振動問題が出来れば、衝撃応答問題は必ず出来る(逆は必ずしも成立しない)。

Professor M. K. Kassirも同様の考えの下に長方形き裂

の問題に対して理論解を与えたが、静的解析であった。筆者と Kassir の研究論文を以下に並べてみる。

長方形き裂の調和振動問題(圧縮波)

[13] (S. Itou, ZAMM, 1980)

長方形き裂の衝撃応答問題(圧縮波)

[14] (S. Itou, ASME J. Appl. Mech., 1980)

長方形き裂の静的問題(引張問題)

[15] (M. K. Kassir, ASME J. Appl. Mech., 1981)

長方形き裂の静的問題(せん断問題)

[16] (M. K. Kassir, Int. J. Solids and Structures, 1982)

長方形き裂の衝撃応答問題(せん断波)

[17] (S. Itou, Eng. Frac. Mech., 1991)

動的問題は静的問題に比較して解析が難しくなるが、シュミット法を適用する場合は、動的問題であっても解析が多少面倒になる程度である。雑誌には impact factor が与えられているが、材料力学の分野では個々の研究者はその値とは別のランキングで雑誌を評価している事は、上記の筆者と Kassir の論文の並びを見ても推測されると思われる。

8.2 2個のき裂周囲の応力拡大係数

材料を硬いもので押した場合の応力は弾性体の剛体押し付け問題を解析すればある程度推測出来る。2個の剛体パンチによる帯板の押し付け問題を解くためには、接触面の接触応力を適当な関数で級数展開する必要がある。Erdelyi の積分公式集[8]から適当となる関数を探して解析を試みた。連立積分方程式を無限級数の形にして、シュミット法を用いて未定係数を求めれば良いだけであり解析は簡単に終わった。しかし、解析に生ずる無限積分の被積分関数の収束が良好とならず、数値積分の精度に問題が残った。被積分関数を収束させる目的で全体を不定積分していたが、その時、元の関数を積分した形はき裂問題に適用できる可能性があるとして着想し、次の公式を得た。

$$\int_0^{\infty} g(x) \cos(\xi x) dx \quad (17)$$

$$= \frac{\pi}{2\xi} \sin\left\{\frac{(a+b)\xi}{2} - \frac{n\pi}{2}\right\} J_n\left\{\frac{(b-a)\xi}{2}\right\}$$

ここで

$$g(x) = \frac{1}{2n} \sin\left\{n \sin^{-1}\left(\frac{a+b-2x}{b-a}\right) - \frac{n\pi}{2}\right\} \quad (18)$$

$$= 0 \quad \text{for } a < x < b$$

$$\text{for } 0 \leq x < a, \quad b < x < \infty$$

式(17)で $J_n(\xi)$ はベッセル関数。2個のき裂のき裂面の変位を式(18)で級数展開すれば、2個のき裂周囲の応力拡大係数が求められる事が期待された。既に、2個のき裂の調和振動問題が Jain and Kanwal によって解かれていたが[18]、彼らの研究では低振動数を

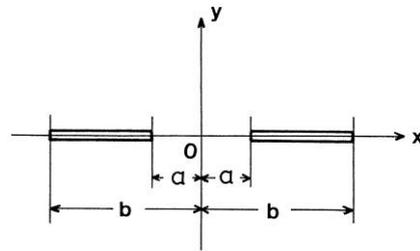


図9 2個のき裂

仮定して積分方程式を解いていたため、応力拡大係数の最大値が求められていなかった。このため、計算結果は工学的・破壊力学的には有用であるとは言えなかった。式(17), (18)を用いて図9に示すような2個のき裂に対して調和振動問題を解いたところ、応力拡大係数の最大値を求める事が出来た[19], [20]。

衝撃応答問題はラプラス変換を適用して解く事になる。今、ラプラス変換の積分核を $\exp(-st)$ とすれば、時間要素 $\exp(i\omega t)$ を有する調和振動問題で、 $\omega \rightarrow (is)$ の置き換えを行えば、全ての式はラプラス像空間で成立してしまう。すなわち、調和振動問題を解けば、自動的に衝撃応答問題も解けてしまう。ただし、ラプラス像空間での応力拡大係数は閉じた形で与えられないので、ラプラス逆変換は、例えば Miller and Guy の手法[21]を用いて数値的に逆変換して物理空間に戻す必要がある。1980年代は文献[13], [14], [19], [20]を組合わせて各種の問題を設定し、多くの計算を行った。

8.3 板の平面境界に垂直に存在するき裂の衝撃応答問題

図10に示すようにき裂が平面境界に垂直に存在する場合、解析はかなり複雑になる。変位ポテンシャル関数を2種類の無限積分形の和で与えて、最初、板の平面での応力自由の境界条件をフーリエ変換を適用して満足させる。その後、き裂についての境界条件を連立積分方程

式に導いて、シュミット法を適用して解く。この種の問

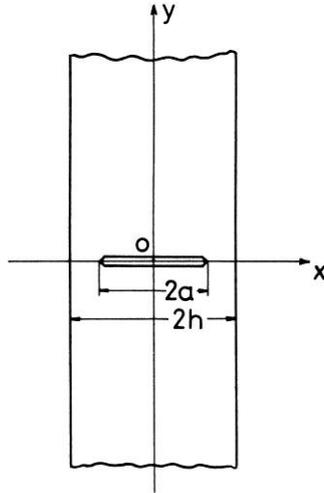


図10 き裂を有する帯板

題は衝撃応答問題については解く事が出来るが[22], [23], 調和振動問題に対しては、解析は出来ても数値計算には成功していない。

論文[22], [23]の衝撃応答問題を長方形き裂の場合に拡張した場合、解析には無限積分が直列的に6個並び、さらにその計算値を用いて2重積分を行ってシュミット法を適用する事になる。図11に示すように、1個の長方形き裂を有する半無限体の解析はさすがに無謀と思われた

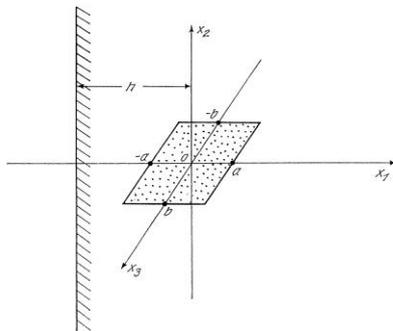


図11 長方形き裂を有する半無限体

が、躊躇しては研究が進まないので取り掛かった。フーリエ変換の魔術としか言えないのだが、6重無限積分が3重無限積分まで落ちたため、どうにか数値計算する事が出来た。数値計算が重かったため、き裂が応力自由平面に接近している場合の計算は出来なかったが、き

裂が少し応力自由平面から離れている場合は精度良く数値計算出来た[24], [25].

8.4 き裂を有する材料の熱弾性問題

き裂を有する材料の熱弾性問題に関しては、無限弾性体に1個のき裂が存在する場合の定常熱流問題が解かれている程度と思われた[26]. 図12に示すように有限幅の板にき裂が存在する場合の方が工学的・破壊力学的にはより現実的になると思って文献を探してみたが見あたらなかった。

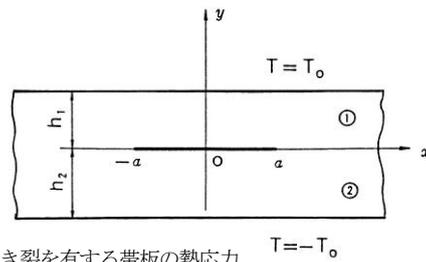


図12 き裂を有する帯板の熱応力 $T = -T_0$

どうせ解くなら動的な解析が良いと思って、図12に示すように、板の上下の面にステップ関数上に温度を与えて慣性項も考慮した。解析は比較的簡単に出来たが、実際に数値計算する場合、慣性項が邪魔をして数値ラプラス逆変換が出来なかった。材料に荷重が衝撃的に与えられる場合は慣性項が効くが、材料に熱衝撃が与えられる場合は、熱が即座に伝わってしまっ慣性の影響が出ないように思われた。この段階でこのテーマから離れるのが普通であるが、投入した時間と労力は無視出来なかった。このため、ラプラス変換の極限值の一致の法則を用いて静的解を求める事にした。板の幅を大きくした場合(図12で $h_1/a, h_2/a$ の値を増大した場合)、結果は文献[26]の Sih の解に漸近する必要がある。しかし、この条件がどうしても満たされなかった。

筆者の解析を何度見直しても間違っているとは思えなかった。本来であれば、ここで研究を中止すべきであった。しかし、 Sih の解[26]に疑問を持ったので、丁寧に見直した結果、 Sih の解析に誤りがある事を発見した(論文1編を読破する事は比較的難しく、この作業は楽ではなかった)。 Sih の解を訂正して、筆者の解と比較した処、今度は板幅を増大させた時、 Sih の訂正解に一致する事を確認出来た。この論文は日本機械学会論文集に掲載された [27].

8.5 その他の問題と今後の研究テーマ

1990年代以降は異方性材料のき裂問題、複合材料のき裂問題などを行った。神奈川大学では Thomson Reuters

の ISI Web of Knowledge へのアクセス権を導入しているが、ここに、stress intensity factor のキーワードを入力すると、4500 件程度の論文が提示される。最近の研究をチェックすれば、き裂を有する不均質体の応力解析が多く解かれている事が分かる。現在、筆者も不均質材のき裂問題を解いているが、この分野のブームはもう暫く続くように見受けられる。

9. 終わりに

本稿ではき裂周囲の応力から定義される応力拡大係数と破壊靱性値、パリズ則について分かりやすく解説した。その後、筆者が行ってきたき裂に関連する研究を紹介した。神奈川大学の公式ホームページから教員プロフィールに入り、さらに機械工学科に入って、“伊藤勝悦”をクリックすれば、これまでに筆者が行ってきた研究等の全てが紹介されている。

論文が ISI の認定雑誌の論文に引用された場合は引用回数分かる。しかし、例えば、航空機製造企業のエンジニアや地熱エネルギー開発のエンジニアによって筆者の論文が参照された回数は分からない。筆者が与えた応力拡大係数の値が企業のエンジニアによって参照されて、材料の破壊防止や地盤の崩壊防止に少しでも役立っているのであれば弾性力学の研究者として嬉しい限りです。

文献

- [1] E. Melan und H. Parkus, *Wärmespannungen*, Springer-Verlag, Wien, 1953.
- [2] R. D. Mindlin, Influence of couple-stresses on stress concentrations, *Exp. Mech.*, Vol. 3, pp. 1-7, 1963.
- [3] W. R. Spiller, A shrink fit problem, *J. Math. Phys.*, Vol. 43, pp. 65-71, 1964.
- [4] 渡辺一実・芦田文博・上田 整(共同編集), 弾性数理解析とその応用[第 4 章シュミット法によるき裂問題の解法(伊藤勝悦執筆)], 養賢堂, 2007 年.
- [5] I. N. Sneddon, *Fourier Transforms*, McGraw-Hill, New York, 1951.
- [6] G. C. Sih und J. F. Loeber, Wave propagation in an elastic solid with a line of discontinuity or finite crack, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 27, 1969, pp. 193-213.
- [7] 岡村弘之著, 線形破壊力学入門, 培風館, 1976 年.
- [8] A. Erdelyi (Editor), *Tables of Integral Transforms*, Vol. 1, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [9] S. Itou, Three-dimensional wave propagation in a cracked elastic solid, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, 1978, pp. 807-811.
- [10] G. R. Irwin, Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys, *Sagamore Research Conference Proceedings*, Vol. 2, 1956, pp. 289-305.
- [11] P. C. Paris, M. P. Gomez und W. E. Anderson, A rational analytic theory of fatigue, *The Trend in Engineering*, Vol. 13, 1961, pp. 9-14.
- [12] J. Weaver, Three-dimensional crack analysis, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 13, 1977, pp.321-330.
- [13] S. Itou, Dynamic stress concentration around a rectangular crack in an infinite elastic medium, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Heft 60, 1980, 317-322.
- [14] S. Itou, Transient analysis of stress waves around a rectangular crack under impact load, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp. 958-959.
- [15] M. K. Kassir, Stress-intensity factor for a three-dimensional rectangular crack, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 48, 1981, pp. 309-312.
- [16] M. K. Kassir, A three-dimensional rectangular crack subjected to shear loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 18, 1982, pp. 1075-1082.
- [17] S. Itou, Transient dynamic stresses around a rectangular crack under an impact shear load, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 39, 1991, pp. 487-492.
- [18] D. L. Jain und R. P. Kanwal, Diffraction of elastic waves by two coplanar Griffith cracks in an infinite elastic medium, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 8, 1972, pp. 961-975.
- [19] S. Itou, Dynamic stress concentration around two coplanar Griffith cracks in an infinite elastic medium, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, 1978, pp. 803-806.
- [20] S. Itou, Diffraction of an antiplane shear wave by two coplanar Griffith cracks in an infinite elastic medium, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 16, 1980, pp. 1147-1153.
- [21] M. Miller und T. Guy, Numerical inversion of the Laplace transform by use of Jacobi polynomials, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 3, 1966, pp. 624-635.
- [22] S. Itou, Transient response of a finite crack in a strip with stress-free edges, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp. 801-805.
- [23] S. Itou, Transient response of a finite crack in a half plane under impact load, *ASME Journal of Applied Mechanics*,

- Vol. 48, 1981, pp. 534-538.
- [24] S. Itou, Dynamic stress intensity factors around a rectangular crack in a half-space under impact load, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Heft 62, 1982, 301-311.
- [25] S. Itou, Dynamic stress intensity factors around a rectangular crack in an infinite plate under impact load, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, 1983, pp. 145-153.
- [26] G. C. Sih, On the singular character of thermal stresses near a crack, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 29, 1962, pp. 587-589.
- [27] 伊藤勝悦, き裂を有する帯板の定常熱応力について, *日本機械学会論文集*, A編, 57巻, 1991, pp. 1752-1758



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、丹沢山塊には枯木のオブジェと化したブナ林の見られる地域も出現した。一方で、その山の裏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。森林衰退の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ばこのよう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、その原因解明はなされておらず、適切な改善策も得られていない。森林衰退の原因は様々に言われている。酸性雨とオゾン濃度の増大、鹿やブナ葉バチの食害、等である。このうち、鹿の食害は下草や幼木には影響すると思われるが、成木の樹皮は食害にあっていないため、原因とはならない。ブナ葉バチについては、一回葉を食べ尽くされても正常なブナはそのまま枯死することはないし、食害を受けるブナは点在しても一面に食べ尽くされることはない。オゾンの影響は、成長抑制要因として働くが、現状の高濃度オゾンレベルでの枯死は報告されていない。また、オゾンはガスなので濃度は一様であり、丹沢山で衰退は西側斜面に限られるといった

尾根の両側での極端な衰退度合いの違いを説明することはできない。酸性雨にも同様なことがあり、かつまたブナを枯らすほどの極端な酸性雨は降っていない。そこで考えられるのは窒素酸化物が原因となって生じた硝酸ガスで酸性化した霧の影響である。霧の酸性度は雨よりも高く、かつ風に乗って、樹冠に衝突してはじめて被害を及ぼすことから風向きへの依存性が高く、被害の斜面方位依存性は大きい。

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年近く続けているが、さらに最近はこれまで行ってきたモミだけでなくブナへの霧の影響についても研究を始めている。その結果、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原因をより鮮明にするとともに、どのような地域で森林衰退が起こっておりまた今後起こり得るのか、これを止めるにはどうすればいいのかを解明することは極めて重要な課題であるため、この研究を工学研究所の共同研究として開始した。平成19年度の研究計画は、1. 酸性霧の成分分析と濃度支配要因の解明、2. 丹沢大山の林内雨と樹幹流の分析、3. 実験室における疑似酸性霧暴露実験、である。

この研究の遂行による到達点として、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、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、その山岳地形依存性はどうか、丹沢山塊への汚染物質蓄積量の土壌や沢水の分析による解明、である。将来的には、丹沢にはこれまでにどれだけ汚染物質が沈着し生態系はこのままでは今後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についても明らかにし

*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

ていきたい。

2. 実験

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 1252m)の中腹に位置する大山阿夫利神社下社(標高 680m)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 $0.2\mu\text{m}$ メンブランフィルター)した後、電気伝導度、pH を測定した。主要無機イオン濃度についてはイオンクロマトグラフを用いて測定した。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 400m~1252m (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。680m 地点では沢水を約 1 週間毎に採取した。試料は吸引ろ過後、pH、電気伝導度、主要溶存イオン濃度、溶存有機炭素濃度、Si 濃度(沢水のみ)を常法により測定した。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。

暴露実験については2004年7月中旬より生育を開始した7年生ブナ(*Fagus crenata*)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パー(1.8m×1.5m×1.6m高さ)内で週2回、2時間噴霧した。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。2004年7月中旬より生育を開始した9年生モミ(*Abies firma*)苗木に対し2007年5~11月(8月を除く)まで、硝酸でpH調整した溶液を大型チャンパー(2.4m×2.4m×1.8m高さ)内で週2回、2時間噴霧した。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、*Cryptomeria japonica*)についても同様な処理を行った。酸性霧処理した生葉は、マイクロームにより断面厚 $50\mu\text{m}$ 程度にカットし、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¹⁾。また、tCaについては湿式分解法により測定した²⁾。細胞壁内成分に対する影響を調査するために、10年生ブナ苗木および15年生モミ苗木から採取し

た枝葉に対して、硝酸でpH調整した溶液を小型チャンパー(0.6m×0.6m×0.9m高さ)内で噴霧した。酸性霧処理した葉の細胞壁内のホウ素存在形態を石井らの方法に従い示差屈折率計を接続したサイズ排除クロマトグラフ(SEC/RI)により測定した³⁾。

3. 結果と考察

3.1 酸性霧の成分分析と濃度支配要因

酸性雨による森林衰退、土壌や湖沼の酸性化、建造物の腐食などが欧米を中心に報告されてきたが、雨と同じ湿性沈着物である霧は雨に比べて大気中水分量が少なく、地表近くに発生して長時間大気中に滞留するため汚染物質を効率良く吸収し、高い酸性度を有することが多い。そのため森林衰退の原因の1つとして雨よりも強く影響していると考えられている。都市近郊山間部における酸性霧の発生は欧米で多く報告されているが、日本では丹沢大山、赤城山、筑波山などの報告がある⁴⁾。当研究室では1988年より丹沢大山で発生する霧水について観測を続けてきた^{5,6)}。標高とともに霧の発生頻度は上昇し、山頂付近では一年の40%以上が霧で覆われている。霧は雨と同様に主要な降水現象であり、酸性霧の影響は各地で報告されている。しかし、霧の化学組成に関する研究は雨に比べてかなり少なく、これは、霧の発生場所が山間部や沿岸部など特殊な場所に限られていること、採取装置が雨のように簡便でなく採取が困難であることなどによる。本研究のフィールドである関東平野南西部に位置する丹沢大山でも、モミ原生林の立ち枯れが顕著に見られ、酸性度の高い霧が頻繁に発生している。酸性霧の影響は大きいと予想されるが、霧水組成の支配要因には未解明の点が多い。

図1に1988年から2007年までに自動霧水採取装置で採取された霧水の化学組成、および採取時の大山中腹と伊勢原(麓)の大気汚染物質濃度の経年変化を示した。1990年以前は霧の多い時期だけ試料を採取していたので1991年以降について検討すると、1999年まではLWC(大気中の霧液滴体積)が大きく、霧水中の成分濃度も低かった。しかし、2000年を境にLWCは減少し、成分濃度は増加した。その原因の1つに霧生成時に凝結核となるSPMの濃度が伊勢原において年々減少していることが考えられる。発生頻度に大きな変動がないことから、霧水量の多い濃い霧が発生しにくくなり、薄い霧が多くなったといえる。大山と伊勢原の大気汚染物質濃度はほとんどが減少傾向にあるが、霧水のpHは4以下のことが多く、 $[\text{NO}_3^-]/[\text{Inss-SO}_4^{2-}]$ はおおよそ1.5程度であり、硝酸の寄与が大きい。

図2に2007年に自動霧水採取装置で採取された霧水の化学組成、および採取時の伊勢原の大気汚染物質濃度を pH 毎に示した。霧水試料の pH は 2.47 から 7.36 と幅広く、発生頻度は pH3-4 が最も高くなった。光化学反応で生成される NO_x および Ox は濃度の時間変動が大きいいためばらつきが見られるが、低 pH の霧採取時の伊勢原の大気汚染物質濃度は高くなる傾向が見られた。

霧は空間的不均一性のため、液滴径の違いが化学組成に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、霧液滴の個数濃度粒径分布とその化学組成との関係について検討した。霧が発生していないときの大気中の粒子数は粒径が小さいものほど多く、粒径が大きくなるにしたがって減少する。一方、霧が発生すると粒径 3-30 μm の粒子数が増加し、特に粒径 10-20 μm の粒子数が大幅に増加し、発生した霧液滴の粒径がこの範囲にあったといえる。なお霧発生時は湿度がほぼ 100%、風向もほとんどが谷風(東~南風)だった。次に、粒子数が大幅に増加した粒径 10-20 μm の粒子に着目し、その個数濃度が高いとき(14

サンプル)と低いとき(26 サンプル)の霧水の化学組成を検討した。その結果、成分割合はほぼ同じだったが成分濃度は粒子数の多いときに若干高くなった。粒径 10-20 μm の液滴が多いときは液滴成長が遅く、LWC が低くなったことが影響していると考えられる。

自動霧水採取装置で採取された霧水濃度とパッシブ霧水採取装置で採取された霧水濃度を比較したところ、表 1 に示すように粗大粒子に多い Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} および Ca^{2+} 濃度は AF、PF ともにほぼ同じだったが、微小粒子に多い NH_4^+ 、 NO_3^- および SO_4^{2-} 濃度は PF で極端に低くなった。このことから、風を利用して採取する PF では微小粒子が凝結核となった小さな液滴の採取が困難であることが示唆される。しかし PF は山奥など電源のない地域での使用も可能であり、このため広く用いられている。そこで、PF による霧水採取量の支配要因を検討した。PF による霧水採取量は標高が高くなると増加したが、これは霧の発生頻度、霧の濃さおよび風速が影響していると考えられる。しかし、風速と採取量の関係にはばらつきがあった。そこで、採取量に関与する因子を風速と LWC として重回帰を行い、得られた式より算出した予測値と実測値の関係を求めたところ、高い相関関係が得られた。したがってこれらの因子によって PF による霧水採取量が予測できると考えられる。

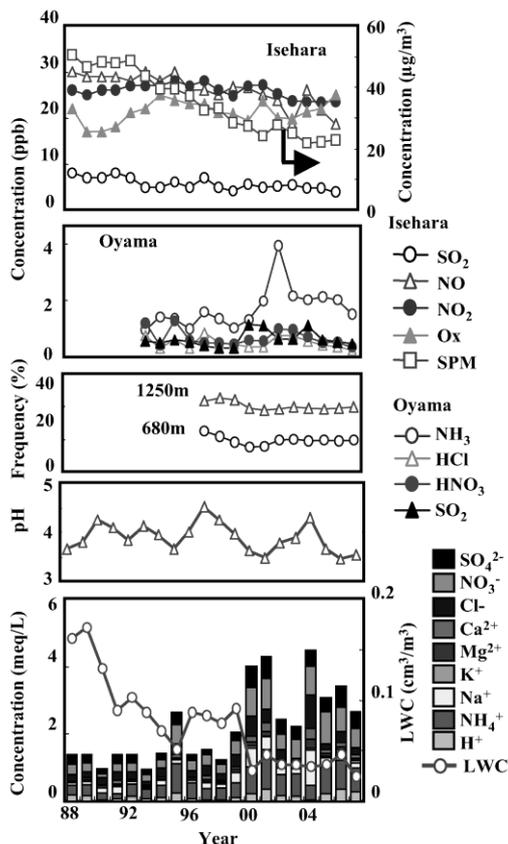


Fig. 1 Air pollutants concentrations, fog event frequency, LWC and chemical characteristics of fogwater from 1988 to 2007.

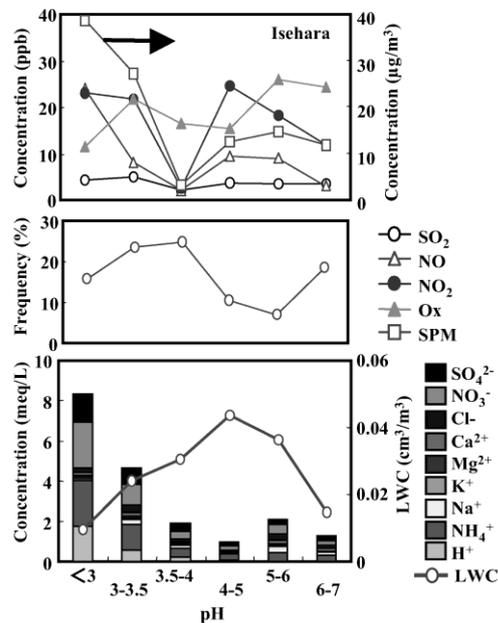


Fig. 2 Comparison of air pollutants concentrations, fog event frequency, LWC and chemical characteristics of fogwater with fogwater pH in 2007.

Table 1. Chemical composition offogwater collected with active and passive samplers.

	Concentration (meq/L)									
	pH	H ⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Activesampler	3.53	0.29	0.70	0.17	0.04	0.06	0.12	0.21	0.56	0.48
Passive sampler	4.93	0.01	0.04	0.17	0.03	0.06	0.13	0.15	0.12	0.11

3.2 丹沢大山の林内雨と樹幹流の分析

神奈川県西部に位置する丹沢大山ではモミ原生林の立ち枯れがみられ、その原因の一つとして酸性沈着物の影響が考えられる。本研究では、大山の各標高にて採取した降水、霧、ガスの分析および風向風速、降雨強度等の気象観測結果より、大気汚染物質の山岳地域における沈着挙動について検討した。

図3に標高890m地点で行ったモミ林内雨沈着量の方角依存性を示す。降水量は山側に位置する北が少なく、谷側に位置する南で多かった。北で少ない要因は、谷側から昇る滑昇霧の影響を受けにくいためである。林外雨と林内雨の沈着量を比較すると、林内雨は5~7倍も大きい。これは霧や大気汚染物質の樹冠への沈着などの影響と考えられる。3カ所の林内雨沈着量を比較すると、谷風の影響を最も受ける南が多かった。次に、標高による中和の影響を検討するために酸性物質由来のNO₃⁻とSO₄²⁻の濃度の和と中和物質由来のCa²⁺濃度との相関を取ったところ、林外雨では酸性物質濃度とCa²⁺濃度の相関が低い。モミ林内雨では標高の増加に伴い酸性物質濃度が増加し、Ca²⁺濃度も増加し相関も高くなった。同様の傾向はスギ林内雨でも認められたが、標高が高くなるほど葉に多くの酸性物質が霧により付着し、Ca²⁺が溶脱することによるものと考えられる。なお、林内雨や霧のNH₄⁺濃度には標高による違いがほとんどないことが確認されており、標高が高い地点での酸性成分の負荷に対応するNH₄⁺による中和の影響は小さいといえる。

3.3 酸性霧に対する苗木の生理学的応答

丹沢山地の標高800m以上に生育するブナ林は、衰退が依然として進行している。丹沢山地には、大気汚染物質が首都圏から移流し、特にO₃は樹木への影響が考えられる濃度である40ppbをはるかに超える高濃度で出現していることから、衰退の原因として見なされている。また、ブナ苗木へのO₃の人工的な曝露実験では、O₃が乾物生長量やクロロフィル合成量を低下させることが示されている。しかしながら、O₃は植物の生長を抑制するものの、森林衰退との因果関係には不確かな点が多い。本研究では、酸性霧とブナ林衰退との関連性について検討す

るため、2004年9月より大型チャンバーを使用して疑似酸性霧(SAF)のブナ苗木への噴霧を開始し、その影響について様々な角度から調査した。

pH3処理区の一部には、葉密度の低下や葉の変形といった兆候が見られ、かつ2本の苗木が枯死した。そこで、各処理区の1個体当たりの葉数を測定したところ、pH3処理区で有意に減少していた。これより、葉数の減少は酸性霧処理による生長点の壊死が原因と考えられる。また、pH3処理区のブナ苗木は、9月頃から落葉が加速し始めており、その時点の落葉速度は3.04 day⁻¹と対照区に比べ約2倍高く、葉数は7月当初の8割程度となった。さらに、同じく8割となった時期を比べると、pH3処理区で落葉は約1.5ヶ月早まっていた。

植物葉は霧水中に多く存在するプロトンが付着すると、イオン交換作用によりCaを葉表面に分泌する、いわゆる

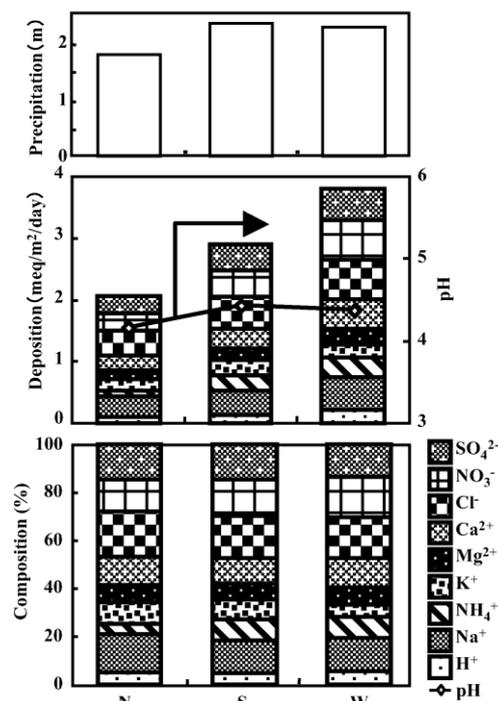


Fig. 3 Effect of the direction of a canopy on the deposition.

バッファー化を起こすことが知られており、このような溶脱は生理学上重要である。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。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キレーターである。図 4A と B の写真の大きな違いは、CTC 蛍光強度が SAF 処理により大きく減少することを示している。なお、併せて表示したダイアグラムから、正常な葉肉細胞の細胞膜上で蛍光は強くなることが判る。2007 年 7 月から 11 月までの SAF 処理したモミおよびスギ針葉の当年生あるいは 1 年生針葉の葉肉細胞中 mCa レベルの季節変化と、湿式分解法で測定した tCa についても測定した。当年生モミ針葉中の mCa レベルは、対照区に比べ pH 3 処理区で減少しており、9 月以降その差は著しく大きくなった。一方、スギ針葉中の mCa レベルは酸性霧処理の有無に関わらずほぼ一定という興味深い結果が得られたが、mCa と tCa との相関関係はモミ、スギ共に確認されなかった。Jiang らは米国メイン州で赤トウヒ (*Picea rubens* Sang.) を対象に酸性霧を噴霧し、霧水酸性度の低下に伴う mCa の減少を報告したが⁷⁾、今回モミで得られた測定結果はこれと一致する。以上より、酸性霧に対する応答が樹種によって大きく異なることが明らかとなった。

膜からの Ca の溶脱は、次のような過程を経て起こって

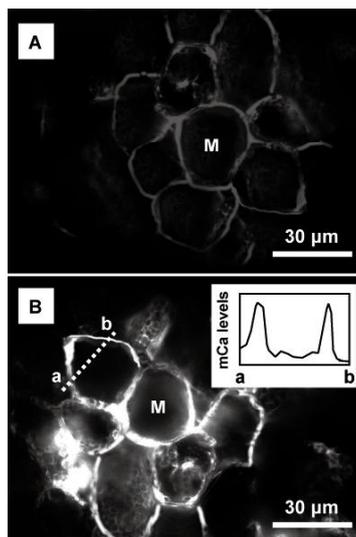


Fig. 4 Digitally acquired images showing treatment effects on mCa (Ca^{2+} -CTC fluorescence intensity) in current-year fir needles sampled on November 2007. (A) pH 3; (B) pH 5 as control.

いると考えられる。

葉への酸性霧の沈着⇒葉表面ワックスの流亡⇒mCaの溶脱⇒ストレス障害の増加

この過程で重要なのは、葉表面ワックスの流亡である。葉面は通常、エピクチクラワックスで覆われており、水分、イオン、ガスなどが失われるのを防ぐ重要な働きを担っている。そこで、表面ワックスの層厚が酸性霧によりどの程度減少するかを調査するために、針葉断面切片 ($50\ \mu\text{m}$) を 10% ホルマリン溶液で化学固定し、次いで Sudan III 溶液に浸漬させることによりワックス存在部位を橙に染色した。また、エピクチクラワックス量の測定はクロロホルム抽出-重量測定法により行った⁸⁾。その結果、モミ針葉中のワックスの層厚に変化は見られない

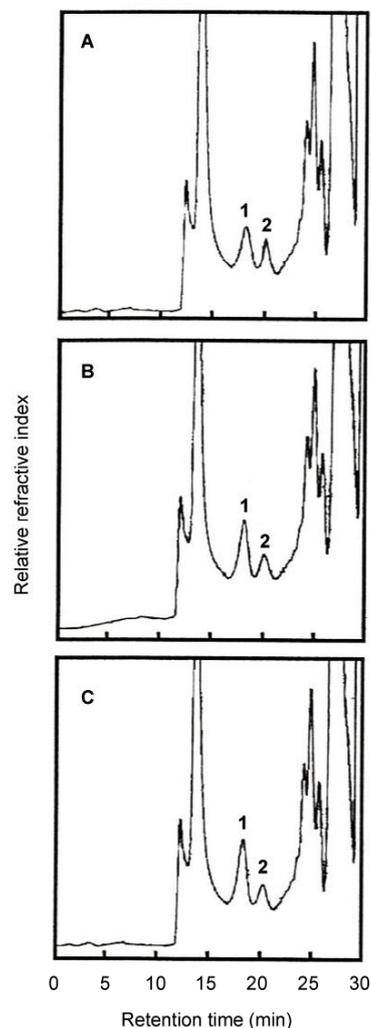


Fig. 5 SEC chromatogram of the material solubilized by EPG treatment in the AIR from the fir leaves. A; pH 2 SAF treatment, B; pH 3 SAF treatment, (C); control.

ものの、その質量は対照区に比べ pH 3 処理区で有意に減少していた ($P < 0.05$)。このことは、ワックス成分のうち特に低分子量領域の物質が特異的に流亡したことを示している。

これまでの研究で、SAF の室内曝露実験により植物葉からホウ素 (B) が溶脱することは確認されていたが⁹⁾、細胞壁成分がどのような影響を受けているかは確認していない。ホウ素はペクチン質多糖であるラムノガラクトナン II (RG-II) に会合して細胞壁に存在し、生理学上重要な機能を持っている。これらの成分についても、酸性沈着物に含まれる H⁺ とのイオン交換反応により樹冠から溶脱することが考えられる。そこで、6 時間 SAF 処理した後のモミ葉から細胞壁をアルコール不溶性画分 (AIR, alcohol-insoluble residue) として分離し、次いでペクチン分解酵素 (EPG, endo-poly-galacturonase) で処理することにより RG-II を可溶化させた。図 5 に SEC/RI による RG-II のクロマトグラムを示す。いずれの条件下でも dRG-II-B (二量体、約 12 kDa) と mRG-II (単量体、約 6.2 kDa) のピークが 18.5、20.5 min にそれぞれ検出された。しかしながら、全 RG-II に占める dRG-II-B の割合は、対照区で 82% であるのに対し pH 2、3 処理区ではそれぞれ 80、76% と霧水 pH の低下と共に減少し、逆に mRG-II の割合が増加した。このことは、dRG-II-B から B が取り除かれ構造が不安定となり、mRG-II に構造変化したことを示しており、実際に分子量も半分程度に低下していた。また、SEC/RID を通過した溶離液を一定体積毎に分画採取し、イオンクロマトグラフ (IC) により Ca を測定したところ、Ca のピークは dRG-II-B の溶出位置とほぼ一致し

た。dRG-II-B 溶出時における Ca 含有量を調べたところ、霧水 pH の低下に伴い Ca 含有量は減少傾向を示し、この減少が dRG-II-B の割合を低下させていると推測される。

以上、2007 年度の研究成果についてまとめて示した。引き続き、2008 年度にも同趣旨の共同研究が実施されているので、継続した結果のまとめは次年度以降に述べる。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 2007 年度の小倉一晃君の修士論文、伊藤 肇君の卒業論文、鳴原亜土君の博士論文 (中間発表) によっている。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。

【参考文献】

- (1) C.H. Borer, D.H. DeHayes, *Tree*, 12, 21-26 (1997).
- (2) M. Igawa et al., *Environ. Pollut.*, 119, 375-382 (2002).
- (3) T. Ishii et al., *Plant Physiol.*, 126, 1698-1705 (2001).
- (4) S. Ohta, T. Okita, C. Kato, *J. Meteor. Soc. Japan.*, 59, 892-901 (1981)
- (5) M. Igawa, Y. Tsutsumi, T. Mori, H. Okochi, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 1566-1572 (1998).
- (6) M. Igawa, K. Matsumura, H. Okochi, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 1-6 (2002).
- (7) M. Jiang R. Jagels, *Tree physiol.*, 19, 906-916 (1999).
- (8) T. Takamatsu, H. Sase, J. Takada, *Can. J. For. Res.*, 31, 663-672 (2001).
- (9) M. Igawa et al., *J. Forest Res.*, 7, 213-215 (2002).



統合ファサードシステム

岩田 衛* 大熊 武司* 岩本 静男**

Integrated Façade System

Mamoru IWATA* Takeshi OHKUMA* Shizuo IWAMOTO**

1. はじめに

大都市への一極集中により、都市景観問題、防災・耐震問題、環境エネルギー問題が顕在化している。ここでは、これらの問題を効果的に改善するために、新たに技術開発する統合ファサードを活用することで、都市の大部分を構成する既存建物の改修に利用できる問題解決手法を提示する。

建物の外壁面を構成するファサードは、都市景観を形成する重要な要素の一つであるとともに、建物内部を外的環境から保護し、建築物の消費エネルギー効率に影響を与える。これに耐震性能の要素を加え、ファサードに関するエンジニアリングを統合することにより、都市が抱える問題を解決する一つの具体的な方策が可能となる(図1)。

ファサードエンジニアリングはヨーロッパを中心に近年発達してきたが、気候が異なり、かつ地震国である我国に適用する上では、コンセプトの改良と変更が必要である。また、ファサードエンジニアリングは意匠・構造・環境の各分野で個々に行われてきているが、専門分野を横断する総合的な取り組みが求められる。

技術開発にあたっては、まず、意匠・構造・環境の3軸をファサードの評価軸として、統合ファサードシステムの条件を探り、具体的な構法を着想し、その性能を解析した後、試作実験を通じて実現性を考察する。更に、プロトタイプの実現を通じて検証を行い、総合的評価から得られた性能評価をもとに、統合ファサードシステムの構築を図る(図2)。

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture and Building Eng.

**准教授 建築学科

Associate Professor, Dept. of Architecture and Building Eng.

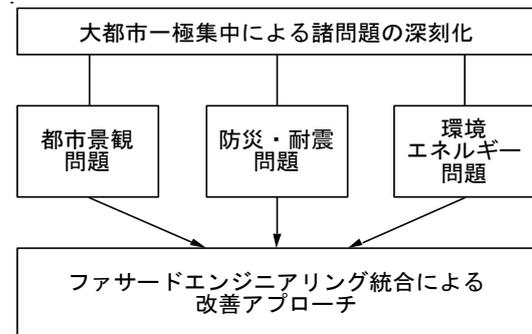


図1 ファサードエンジニアリングの統合

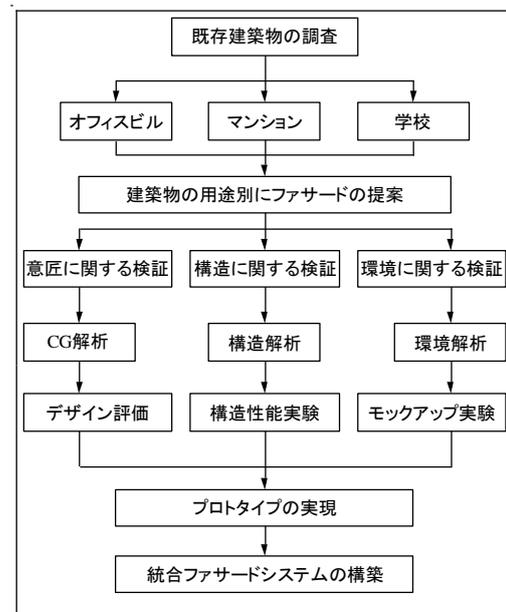


図2 技術開発フロー

1.1 技術開発の計画

技術開発の項目を次に示す。

- (1) 既存不適格建物のファサード調査
- (2) 統合ファサードの具体例・発案
- (3) CG解析による意匠・景観の評価
- (4) 構造解析による構造性能の評価
- (5) 環境解析による環境性能の評価
- (6) 構造実験による耐震・制振性能・安全性の評価
- (7) モックアップ実験による施工性・環境性能の評価
- (8) プロトタイプ設計・施工による実用性の評価
- (9) 統合ファサードシステムの構築

1.2 技術開発を実施する構成員

代表者(岩田)のテクノロジーマネジメントのもとに、次の7つの構成員が共同開発する(図3)。

- (1) 神奈川大学工学部建築学科(岩田研究室、大熊研究室、岩本研究室)
- (2) Arup Japan
- (3) 株式会社三菱地所設計
- (4) 株式会社久米設計
- (5) 株式会社巴コーポレーション
- (6) YKK AP 株式会社
- (7) トステム株式会社

統合ファサードを用いることにより、都市景観、防災・耐震、環境エネルギー負荷の全ての性能を向上させることができる。既存建物の改修に際しても、既存外壁を内壁として利用し、新たなファサードを付加するだけなので、居ながら改修に容易に対応できる。従来のファサードにおける耐震性とは、地震時に生じる変形に追随し、機能を維持するのみの受動的なものであったが、統合ファサードでは、自らを耐震要素として、地震力を負担・吸収する役割を担う。

2.2 技術開発の実現可能性

意匠と環境の2つの専門分野を統合したファサードエンジニアリングはヨーロッパを中心に近年活発に行われている。構成員である Arup Japan の親会社 Arup (本社 London) はそのリーダー的存在であり、Arup Japan 自身もファサードエンジニアリングの専門部門を有している。構成員である YKK AP とトステムはメーカーとして従来型ファサードについて既に多くの実績をあげている。また、耐震・制振技術に関しては、代表者(岩田)は損傷制御構造の技術開発で2003年に日本建築学会賞(技術)を、和田章博士(東京工業大学教授)と川合廣樹博士(RSI代表、当時日建設計室長)と共に取得し、この分野を専門としている。巴コーポレーションは耐震補強・制振技術に関する専門部門を有している。このような専門技術集団がまとまれば、統合ファサードシステムの実現可能性は極めて高いものとなる。

2.3 実用化・市場化の見通し

構成員である三菱地所設計と久米設計は日本有数の総合建築設計事務所であり、多くの建築主に対して本技術開発成果をアピールする機会があり、建築主のニーズにあわせてプロジェクトへ適用できる。ファサードエンジニアリング部門を有する Arup Japan は建築主だけでなく建築家に対しても本成果を積極的に提案し、実用化できる。また、メーカーである YKK AP とトステムには従来型ファサードのプロジェクトが、巴コーポレーションには耐震補強・制振技術のプロジェクトがよく持ちかけられている。これらのプロジェクトに対して、統合ファサードの適用を図ることができる。これら幾つかのプロジェクトの設計・施工を通じて実用性の評価を行い、プロトタイプモデルを設定する。さらに、プロトタイプを検証し、統合ファサードシステムの構築を図る。将来、統合ファサードシステムの技術を、他の設計事務所やメーカーに提供し、幅広く普及させることも考えられる。

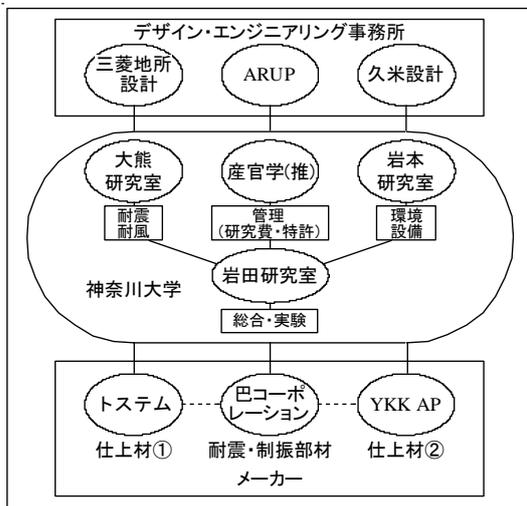


図3 構成員

2. 技術開発のポイント

2.1 技術革新性

意匠・構造・環境の3つの専門分野を横断する総合技術となる「統合ファサードシステム」を技術開発する。

3. デザイングループの展開

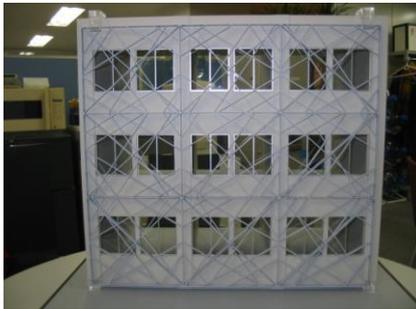
3つ（A, B, C）のデザイングループの、1年目の成果および今後の展開を羅列する。メーカーは各グループに共通して関与している。

3.1 グループA

グループAは、統合ファサードに関して考慮すべき、次の7つの指標をまとめた。

(1) 安全性、(2) 光環境、(3) 温熱環境、(4) エコフレンドリー、(5) 経済性、(6) 意匠性、(7) 施工性・メンテナンス性

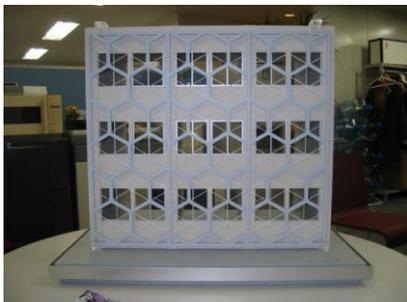
更に、提案する統合ファサードの構成において、魅力的な形状であり、かつ外観と兼用できる構造システム案が提案された（図4）。



a) バウンド案



b) アーガイル案



c) ハニカム案

図4 構造システム案

現在は、上記に示す構造システム案を基に、模型および解析スタディ結果を反映した統合ファサードの模型の製作を行い、7つの指標を反映した「統合ファサード評価方法の構築」に向けて検討を行っている。

3.2 グループB

グループBは、想定した新築建物と既存建物改修の両方に適応できる、耐震・環境負荷低減を考慮したファサードを検討している。

新築建物については、全体模型と部分詳細模型を製作し、構造検討を行っている。

既存建物改修については、統合ファサードを用いた耐震補強計画をつくり、補強イメージパースに基づいて補強計画の妥当性について確認を行っている（図5）。

また、統合ファサードに組み込む、超軽量の制振ブレースの検討を行い、実大実験による構造性能の確認を行う。



a) 補強前



b) 補強後

図5 学校の耐震補強イメージ

3.3 グループC

グループCは、提案する統合ファサードの構造システムとして、できる限り目立たず、構造を感じさせないものを検討している。構造システム、特に接合部の意匠に関して、CG解析による評価を踏まえ、モックアップを製作した(図6)。また、提案する統合ファサード全体の環境負荷の検討も行っている。



a) 外観CG



b) 内観CG



c) モックアップ

図6 提案ファサードの例

4. モックアップ実験

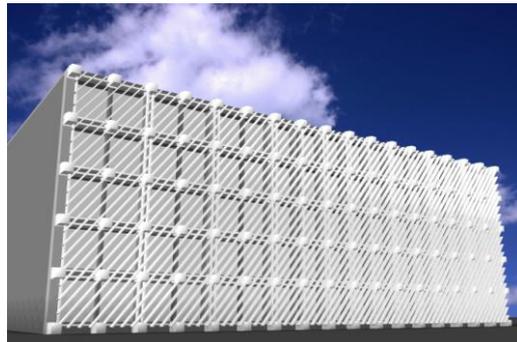
RC造建物(神奈川大学8号館)の1スパンを取り出し、その寸法を基に、統合ファサードのモックアップ実験を行った。

4.1 実験計画

統合ファサードとして、建物東西面の環境性能向上に効果が期待できる斜行配置とした、RタイプとCタイプの2種類を考える。Rタイプは断面が長方形で、ルーバーの平面が正面を向いている(図7a))。Cタイプは断面が正方形で、ルーバーの角部が正面を向いている(図7b))。

モックアップの模式図を図8に、RタイプとCタイプの外観を図9に示す。建物のペリメータ空間を想定し、試験体の背後に幅4500mm×奥行5400mmの内部空間(暗室)を設置する。

モックアップに対して、照度計、魚眼レンズによる昼光率の測定を行う。測定点は机上面850mmで、窓際から900mm、2700mm、4500mmの3点とし、ルーバーなし、Rタイプ、Cタイプの3種類の状態について測定する。



a) Rタイプ



b) Cタイプ

図7 斜行配置ファサード

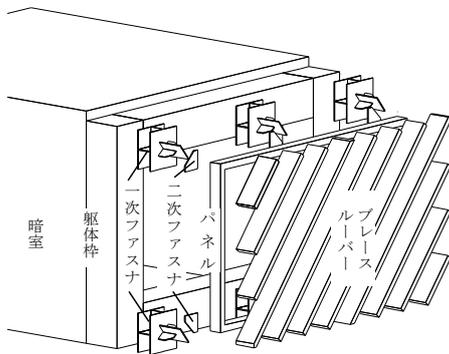


図8 モックアップ模式図

4.2 実験結果

昼光率の測定結果を図10に示す。窓際から900mmでは、両タイプはルーバーなしに比べて、低くなっているが、窓際から4500mmでは、両タイプともにルーバーなしよりも昼光率は高く、特にCタイプとルーバーなしの比較では、1%近くの差がある。

既存建物に新たにルーバーを設置する場合、ルーバーによって室内が暗くなる印象がある。しかし、今回の結果によると、窓際に近いとルーバーの遮蔽効果で昼光率は低くなるが、窓際から離れるにつれルーバーが光を反射し、拡散させて室内の奥まで明るくしている。ペリメータ空間における光環境のパッシブデザインの可能性を広げることができると思う。

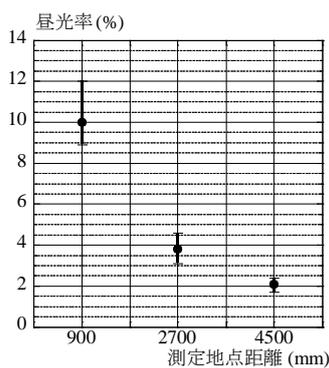


a) Rタイプ

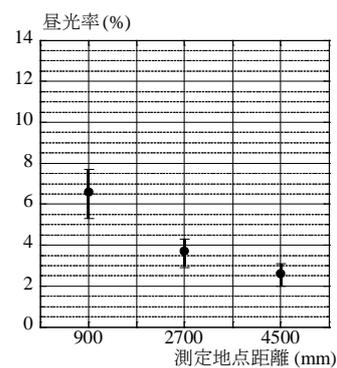


b) Cタイプ

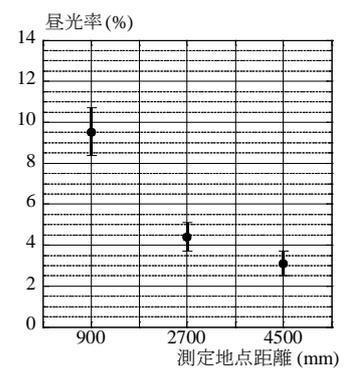
図9 実験用モックアップ



a) ルーバーなし



b) Rタイプ



c) Cタイプ

図10 昼光率の測定結果

5. 斜行配置座屈拘束ブレースによる耐震補強

斜行配置ファサードをRC造建物（神奈川県8号館）の耐震補強工法として適用した場合について検討した。

5.1 構造システム

構造要素として引張力と圧縮力で同等の性能を有する座屈拘束ブレースを用いる。ルーバーでカバーをした座屈拘束ブレースは、必要な場所に適宜、1本置き、あるいは2本置きに斜行配置させる（図11）。このことによって、構造要素を意識せず、従来の耐震補強工法にない意匠的に新しい耐震補強が可能となる。構造システムは、H形鋼柱間に曲げ剛性と振れ剛性の高い角型鋼管梁を架け渡し、外面に斜行配置座屈拘束ブレースを偏心させて角型鋼管梁に取り付けたものである。

斜行配置座屈拘束ブレースを耐震補強工法とする場合は、外付け枠付ブレース補強工法となる。この補強工法を採用する場合、既存建物の主架構に振れや撓み変形を生じさせにくい接合部を採用する必要があり、補強部分においても偏心させて連続斜行配置する座屈拘束ブレースを健全に機能させなければならない。

図12に示すような接合部とすることで、偏心して接合する座屈拘束ブレースの荷重により外付け枠に振れや撓み変形が生じて、既存建物の主架構に生じる振れや撓み変形を小さくできると考える。

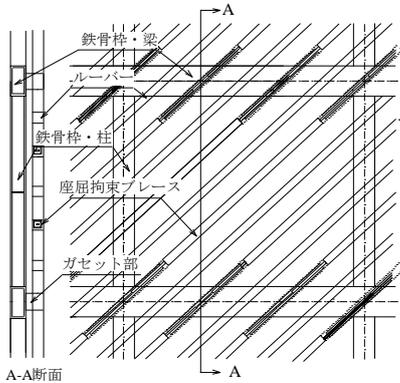


図11 構造システム

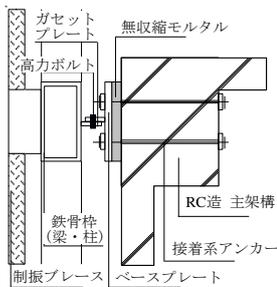


図12 接合部

5.2 実験と解析結果

偏心させて連続斜行配置した座屈拘束ブレースが、外付け枠に与える影響について、構造実験と解析により確認する。

図13に建物の補強前と補強後を示す。図13b)に示す補強後の建物の2階部分を1層1スパン抜き出し1/2.5に縮小したものを試験体とする。試験体のセットアップと座屈拘束ブレース番号を図14に示し、試験体詳細を表1に示す。

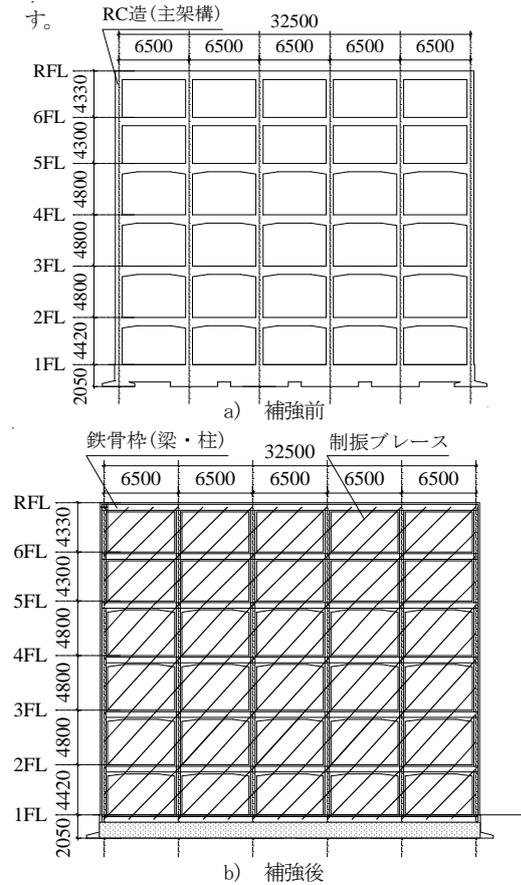


図13 想定建物

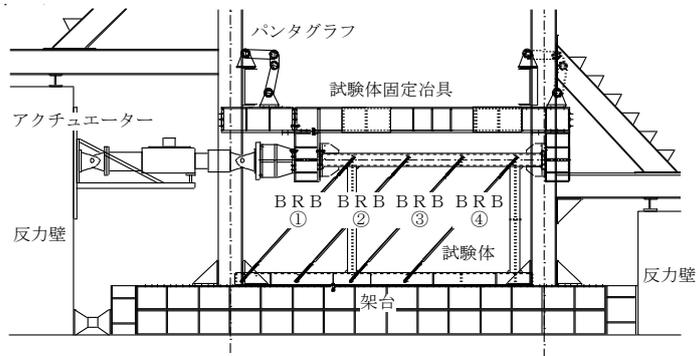


図14 試験体セットアップ

表1 試験体詳細

試験体名	部材	部材パラメータ	I_x	J_T	パラメータ詳細
			(cm^4)	(cm^4)	
Rtype1試験体	梁	□-200×100×12×12	3316	2380	図13に示す想定建物の2階部分を1層1スパン抜き出し 1/2.5に縮小した試験体
	柱	H-100×150×6×12	-	-	
Rtype2試験体	梁	□-200×50×9×9	1786	476	Rtype1の角型鋼管梁の断面2次モーメント I_x の約1/2となる 断面2次モーメントをもつ角型鋼管梁断面を設定した試験体
	柱	H-50×150×6×12	-	-	
Htype1試験体	梁	H-200×100×16×16	3443	50	Rtype1とほぼ同等な断面2次モーメント I_x となる 断面2次モーメントをもつH形鋼梁断面を設定
	柱	H-100×100×9×16	-	-	

※ I_x :断面2次モーメント J_T :振り定数

試験体の中でRtype1とRtype2は、梁に角型鋼管を用いており、柱に用いるH形鋼は荷重方向に弱軸配置とする。Rtype1に比べてRtype2の断面性能は低い。Htype1は、梁にH形鋼を用いており、柱に用いるH形鋼は荷重方向に強軸配置とする。柱の設定にあたっては、各試験体の耐力がほぼ一致する断面を用いている。座屈拘束ブレースは、すべて梁に偏心させて接合している。各試験体の実験結果を図15に示す。各試験体とも急激な耐力低下せず、安定した履歴特性を示した。

実験結果を踏まえて解析モデルを設定し、履歴曲線を確認した。Rtype1とRtype2ともに、設計時に期待したような健全な挙動が確認できた。しかし、Htype1試験体では、座屈拘束ブレース(BRB)②、③が層間変形角1/150以降で降伏していることが分かった(図16)。これは、振り剛性や曲げ剛性の低い梁に対し、座屈拘束ブレース(BRB)②、③により生じる鉛直成分の荷重によって梁に大きな振れや撓み変形を起こしたことが原因である。H形鋼を外付け枠の梁として採用すると、RC造建物を炭素繊維等で補強して柱を曲げ崩壊型(許容変形角1/150)にしたとしても、目標とする補強耐力に達する前に、柱に損傷を与えてしまう可能性があると考えられる。

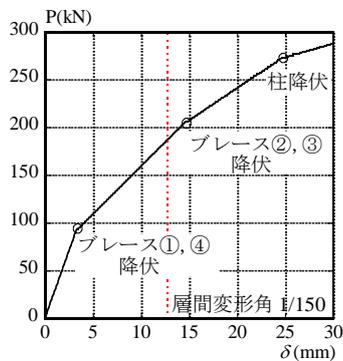
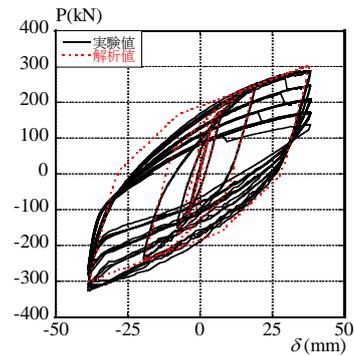
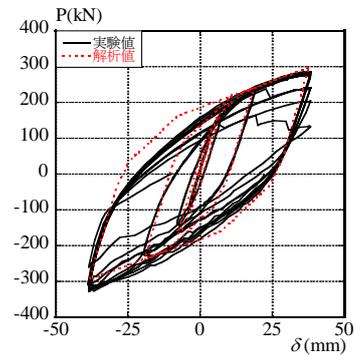


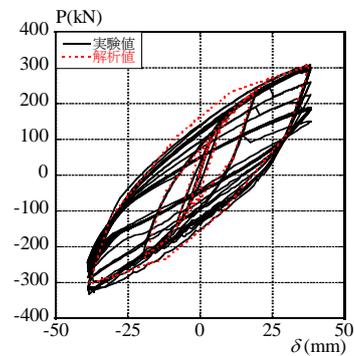
図16 荷重-変位関係



a) Rtype1 試験体



b) Rtype2 試験体



c) Htype1 試験体

図15 実験と解析の結果

6. RC 躯体と鉄骨の接合部実験

耐震補強を想定する RC 造建物との接合部を模した実験を行った。

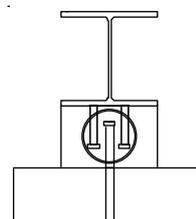
6.1 実験計画

RC 造建物を統合ファサードで耐震補強する際、RC 躯体と鉄骨をつなげる接合部は、大切な要素の一つである。RC 躯体と鉄骨の接合部は、一般的には強度型の設計であるため、最大耐力を対象としたものが大半である。座屈拘束ブレースを補強材として用いる場合も、多くは耐震ブレースとして利用されている。しかし、座屈拘束ブレースを制振部材として用いて耐震補強する場合、RC 躯体と座屈拘束ブレースの接合部は、多くの繰り返し荷重を受けても劣化しないことが重要である。

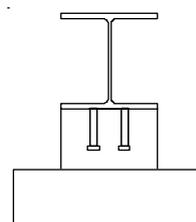
本実験では、補強を想定する RC 造建物と座屈拘束ブレースの枠材との接合部を模したものを試験体として製作し、これに繰り返し荷重を与えた場合にどのような履歴特性が得られるのかを確認する。試験体の概要を表 2 に、形状を図 17 に示す。実験状況を図 18 に示す。



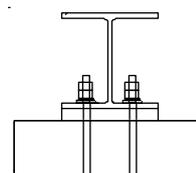
図 18 実験状況



a) No1 試験体



b) No2 試験体



c) No3 試験体

図 17 試験体形状

表 2 試験体概要

試験体名	試験体概要
No1 試験体	鉄骨枠材を用いた耐震補強に使用する標準的接合ディテールを有する試験体
No2 試験体	グラウトの強度破壊挙動を確認するため、No1 試験体からアンカーボルト、スパイラル筋を除去した試験体
No3 試験体	No1 試験体、No2 試験体とは異なる接合部で、躯体に埋め込んだアンカーボルトに直接鉄骨を取り付けた試験体

6.2 実験結果

実験から得られた各試験体の荷重-変形関係を図19に示す。

No1 試験体は、グラウトにせん断ひび割れが生じる前まで、安定した履歴特性を示した。せん断ひび割れが生じた後は、微少に変形が進行したものの急激な耐力低下はなく、 $\pm 1.4\text{mm}$ の変形まで耐力低下しなかった。 $\pm 1.6\text{mm}$ 以降から徐々に耐力低下を始め、 $\pm 2.2\text{mm}$ の変形時には、ほとんど耐力が上昇することなく、実験を終了した。

No2 試験体は、No1 試験体と同様なグラウトにせん断ひび割れが生じる前に、グラウトとコンクリートの接合面が剥離したことで、 0.1mm に満たない変形量で急激な耐力低下を示したため、実験を終了した。

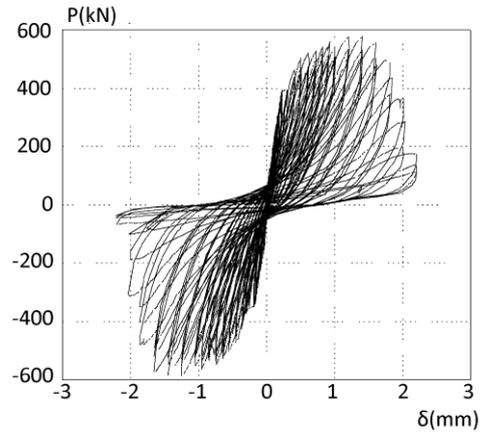
No3 試験体は、小振幅から剛性が低下し始めたため、グラウトのせん断ひび割れ時の荷重が明確に現れなかったが、 $\pm 2.0\text{mm}$ まで急激な耐力低下はなく、荷重はピーク値にまで達した。 $\pm 4.0\text{mm}$ で、耐力低下したものの、繰り返しによる変位が $\pm 10.0\text{mm}$ に達しても一定の耐力を維持したままであった。さらに荷重を続け $\pm 12.0\text{mm}$ で、耐力低下したため、実験を終了した。

No1 試験体とNo3 試験体は、繰り返し荷重を与えても、急激な耐力低下はなく、最大耐力まで達した。最大耐力到達後は、No3 試験体のほうが、大きな変形量を与えても一定の耐力を維持する結果となった。これは、グラウト内のアンカーの接合方法が異なったことによるものと考えられる。

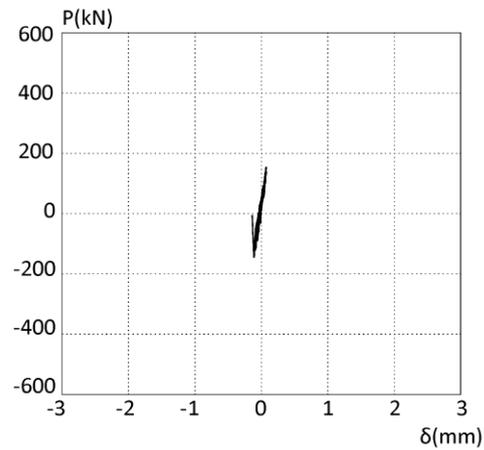
No2 試験体では、変位急増した直後に大きく変形した。これは、グラウトとコンクリートの接合部にアンカーがなかったため、グラウトとコンクリートの接合面にひび割れが生じた際、抵抗するアンカーがなかったことで、急激な変形が生じたと考える。

7. おわりに

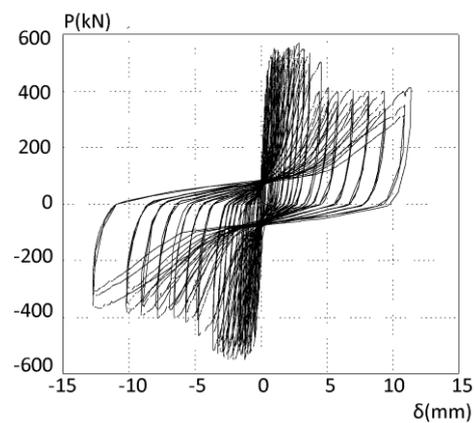
以上、2007年度の成果をまとめた。2008年度と2009年度は、各デザイングループが具体化する統合ファサード案をCG・構造・環境解析で評価した後、実際の設計として可能なものを幾つか選択し、モックアップによる検討、また、実大構造実験や施工実験を行う。更に、統合ファサードのプロトタイプを設計・施工し、種々の検証を行い、統合ファサードシステムの構築を図る。



a) No1 試験体



b) No2 試験体



c) No3 試験体

図19 荷重-変形関係



町づくり研究所の報告

西 和夫*

Laboratory of town planning

Kazuo NISHI*

1. はじめに

平成18年度に工学研究所で「町づくり研究所」の活動が承認され、研究所設置が大学当局から実際に許可されたのは翌平成19年9月であった。以後、今年度にかけて活動を進めてきた。以上にその報告をする。

2. 平成19・20年度の活動

平成19・20年度の活動を整理し、まとめると以下の通りである。

平成19年度

○平成19年9月

大学より研究所設置が許可された。

○平成19年10月1日

神奈川大学工学研究所西和夫と、松代の「NPO法人夢空間松代のまちと心を育てる会」理事長山本和男、および長井の「指定非常利活動法人長井まちづくりNPOセンター」代表理事小幡和之、との間にそれぞれ「町づくり研究所に関する覚書」を取り交わした。ふたつのNPOの住所等は次の通りである。

NPO法人夢空間松代のまちと心を育てる会

長野市松代町伊勢町548-1

指定非常利活動法人長井まちづくりNPOセンター

長野市十日町1-10-23

○平成19年11月24日

長野市松代町石切町松真館において松代の町づくり研究所の開所式が行われた。西和夫および西研究室の院生・学生が出席。

○平成19年11月24日

松代町町並み調査。西和夫の他、院生・学生9人参加。

○平成19年12月9日

長野市大町小桜館において長井の町づくり研究所の開所式が行われた。西和夫および西研究室の院生・学生が出席。

○平成19年12月18日

神奈川大学長に宛てて、松代町と長井市でそれぞれ開所式が行われたことを報告する「工学研究所プロジェクト研究『町づくり研究所』開設の御報告」を提出した。

○平成19年12月19日・20日

長野市町並み調査。西和夫の他、院生・学生6人参加。

○平成20年2月8日

長野市松代町サンホール・マツシロ2階ホールにおいて、研究所開設記念シンポジウム「地域の歴史遺産を活かしたまちづくり」が開催された。コーディネーターを西和夫が務め、企画と出演者の人選・交渉を行った。参加者170名。市民だけでなく、周辺自治体からの参加が多かった。また、終了後、地元NPOと神奈川大学教員・学生との意見交換会が開かれ、今後の事業等についての相談を行った。

○平成20年3月16日

長野市タスパークホテルコンベンションホールにて、研究所開設記念シンポジウム「歴史を活かした長井のまちづくり」が開催された。コーディネーターを西和夫が務め、企画と出演者の人選・交渉を行った。参加者200名。市民だけでなく、長野市役所、商工会議所、等の参加が多かった。なおこのシンポジウムにお

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

いて、参加資料として『長井の歴史と魅力、歴史を生かした町づくりを目指して』（B6版32頁、オールカラー版。）を作成し、配布した。また、終了後、地元NPO、商工会議所、市役所と神奈川大学教員・学生との意見交換会が開かれ、今後の事業等について相談を行った。

○平成20年3月17日

長井町並み調査。西和夫の他、山家京子教授および院生・学生8人参加。

平成21年度

○平成20年5月29日

長崎県諫早市で開催された登録文化財を考える会で、町づくりの考え方について西が神奈川大学の町づくり研究所の活動について報告した。

○平成20年6月1日

愛知県犬山市で開催された講演会で神奈川大学町づくり研究所の活動について西が報告した。

○平成20年6月13日～15日

長井市において、文化財建造物調査を地元NPOと共同で実施。神奈川大学から西のほか院生2人、学生5人が参加した。

○平成20年6月4日～6日

長井市の町づくり研究所の成果を知って実際の調査の様子を具体的に知りたいとの依頼を受け、宮城県丸森町において歴史的建造物の調査を実施。町長、教育委員会等に神奈川大学町づくり研究所の活動を西が報告。

○平成20年7月15日～17日

神奈川大学の町づくり研究所の活動を知って実際の調査の様子を具体的に知りたいとの依頼を受け、石川県七尾市一本杉地区で歴史的建造物の調査を実施。地元町づくり団体等に神奈川大学の町づくり研究所の活動について報告。西ほか院生1人、学生1人が参加。

○平成20年7月31日

長野市松代町の教育委員会文化財課主催の文化財保存の会議で神奈川大学の町づくり研究所の活動について報告。引き続き地元NPOと神奈川大学町づくり研究所の会議で今年度の活動について相談。

○平成20年8月14日～16日

長野市松代町において町づくりのための文化財建造物調査を実施。院生1人、学生2人参加。

○平成20年9月6日～8日

長井市・長野市松代町の町づくり研究所の活動を

知って実際の調査の様子を知りたいとの依頼を受け、宮城県丸森町において歴史的建造物調査を実施。町長、副町長、教育委員会等に神奈川大学町づくり研究所の活動について西が報告。院生2人、学生2人が参加。

○平成20年9月19日

広島大学で開催された日本建築学会の建築史・意匠分野の会合において、西が神奈川大学町づくり研究所の活動について建築史研究者たちに報告。

3. 発表論文

町づくり研究所の活動に関する成果として西ほか大学院生・卒論学生が次の論文を発表した。

○西和夫『長井の歴史と魅力—「歴史を生かした町づくり」を目指して—』2008年3月、神奈川大学町づくり研究所

○大川井寛子『山形県長井市における歴史的建造物の調査検討—歴史を生かした町づくりを目指して—』2007年度神奈川大学大学院修士論文

○宇野洋平『長野市松代町における歴史的建造物の調査検討—調査検討と金箱力家住宅の利活用提案—』2007年度神奈川大学卒業論文

○新美琢也『木造駅舎についての調査検討—西大塚駅・長井駅・羽前成田駅・松代駅を中心に—』2007年度神奈川大学卒業論文

4. 長井市および長野市松代町と神奈川大学の町づくり研究所に関する新聞記事

長井市および長野市松代町のそれぞれの地域NPOと神奈川大学とが協力しての町づくり研究所について、新聞報道がさまざまに行われた。記事のタイトルだけを次にあげておく。

○松代に「町づくり研究所」、神奈川大学と長野のNPO二十四日開設、古い建造物、大学の調査活動——信濃毎日新聞、二〇〇七年十一月十日。

○松代に神奈川大研究所、長野 町並み保存、協力・交流——信濃毎日新聞、二〇〇七年十一月二十五日。

○松代町づくり研 開設、調査報告や講演など計画、夢空間と神奈川大タッグ——長野市民新聞、二〇〇七年十一月二十七日。

○長井に「町づくり研」、あす開設、地元NPOと神奈川大共同、歴史的建造物を生かし「活性化の拠点」担う——山形新聞、二〇〇七年十二月八日。

○地域活動の拠点に、「町づくり研」開所式——山形新聞、二〇〇七年十二月十一日。

○街並み生かし活性化、神奈川大、研究拠点を開設、歴史遺産残る長野・山形に——神奈川新聞、二〇〇八年一月一三日。

5. 町づくり研究の背景

町づくり研究所をつくるに至った背景をここで述べておこう。

私の研究室には卒業生の同窓会があり、人数は300人ほどになった。2年に1回、今は毎年、秋に集まる。建築史の研究室だから皆、建築史を学んで卒業したわけだが、建築史を職業としている人は少ない。設計事務所、ゼネコン、行政など仕事はさまざまで、建築から離れた人も多い。その人たちが全国各地から集まってくる。出席できなくても、手紙・メール・電話で近況を伝えてくる。

そのなかに、歴史的な建物を大事にしたいと考える人がいる。仕事とは無関係に時間を見つけては建物を見て歩く。歴史を感じるものに会おうとうれしくなる、そんな人たちだ。その人たちはまた、建物が次々に壊される事態に直面する。最初は単に残念だ、もったいない、残せばいいのに、と思っていたが、そのうちなんとか残せないものか、と考えるようになる。専門家でもないし、文化財担当者に知り合いもない。自分の仕事が忙しいから、いわゆる保存運動に首を突っ込む余裕もない。いや、有名建築ではないから、保存運動などない。

年1回研究室同窓会に出て、同じような事情の人がほかにもいることを知る。彼らは、「なんとかできませんかね」と私に言う。私もなんとかしたいとは思っけど、すぐになんとかする能力はない。「よし、一度見に行こうか」、こう答えるのがやっとだ。

そして現地を見に行く。同窓生が案内してくれる。たったひとりでなんとかしたいと苦労している人の悩みがひしひしと伝わってくる。悲鳴が耳もとで聞こえる。そこで、どんな建物が、どこに、どのくらいあるか調べてみようか、ということになる。私ひとりだけではとても調べきれない。学生・大学院生の若さとエネルギー、これに頼ることになる。

自分でやるしかない

こんなこともあった。ある市で建物の復原事業が始まり、行政が委員会をつくった。私も呼ばれてそこへ通う。通っているうち、あることに気づいた。行くたびに町の建物がひとつ、またひとつと壊され、空地になっている。町並みが歯抜け状態になる。せっかく歴史的雰囲気があるのに、残念だ。そう思って行政の担当者になんとかしませんかと提案した。返ってきた答えはこうだ。予算がない、人手が

ない、専門家もいない。そしてこう付け加える。うちの町に古い建物なんかありませんよ。

次の委員会にまた行く。またまた空地が増え、駐車場だらけの町になっている。私はまた同じことを言う。返ってくる返事はやはり同じ。そのうちにひとつ、またひとつ建物が消える。

研究室に帰ってきたとき、私はぶりぶり怒っていたらしい。そのとき一人の大学院生にこう言われた。怒っていないで、私たちでやりましょうよ。ハッと私は気づく。そう、怒っていてもことは進まない。自分でやるしかない。誰かがやってくれると思うのが間違いなのだ。言われて気づくなんて、お恥ずかしい。私はその大学院生（今は大学の先生だ）に今も頭が上がらない。

こうして調査が始まる。まず学生たちのトレーニングだ。調査方法を身につける。礼儀作法、これも大事。調査対象の持ち主は高齢者が多い。若者の服装や行動に違和感を持つ人もいだろう。そうなると調査どころではない。でも、こういうことは教育のひとつだから、まあなんとかかなる。なんとかならないのが費用と、さまざまな制約だ。まず第一は調査費の問題だ。どうやって調達するか。もともと研究費は少ないし、学生の旅費に使う事は許されない。そして、学生を連れ出して事故でも起こったらどうするか、これも難しい問題だ。研究費は学生の旅費に使うことは許されない。いくつかの研究助成金にも応募した。しかし今どき建物が消えつつあるところなんて全国にいくらでもあ。珍しくもないからか、助成金は取れない。そうしているうちにも建物は壊される。早く調査し、対策を練らなければならない。時間との勝負だ。こうなったらやるしかない。

町並み調査と町づくり

という具合で、建物の調査が始まる。実測をし、聞き取りをする。最初は胡散臭げに遠くから眺めていた町の人たちが、何してるの、と学生に問いかけてくるようになる。夏、かんかん照りのなかで学生が黙々と実測する。ちよつと店の中にお入りよ。クーラーで涼んでいきなさい。ありがたくお店に入れていただく。お店の人と話をする。ふーん、君たち建物の調査をしているのか。それだったら何々さんの家を紹介してあげるよ。あそこも古いよ。

何回かその町に通ううち、あつ、また来てくれたんですね、と町の人たちが笑顔で迎えてくれるようになる。こうなると調査も進む。歴史的な建物の存在がわかってくると、町の人はこう言う。これを残していくにはどうすればいいですか。歴史的な建物を町の中に生かす検討が始まる。その検討がいつの間にか町づくりになる。歴史を生かした町

づくりだ。

卒業生と力を合わせて町並み調査と町づくりをしたのは、平戸市（長崎県）・壱岐市勝本浦（長崎県）・江津市本町（島根県）・長野市松代町（長野県）・旧中山道鶴沼宿（岐阜県各務原市）・長井市（山形県）である。ほぼ終って、今後の動きを見守っているところ、まだ調査中のところ、地元の人たちが積極的に動き出したところ、まだまだ問題だらけのところ、さまざまだ。調査費用は、自分たちの負担、行政が一部出してくれたところ、助成金がとれたところ、これもいろいろだ。

われわれの行動主体は大学院生・学生だ。そして調査の手法、知的行動の裏づけ、それは「建築史」である。建築史を生かして調査し、町づくりをする。

学生よ、町へ出よう

調査は何のためにするか。言わずもがなだが地元のためにする。建物が保全され町が元気になるために、地元の人たちと一緒に町づくりをする。社会貢献という言葉を使うのは少々大げさな気もするが、建築史の社会貢献である。

町並み調査と町づくりは、建築史教育の一環でもある。学生と一緒に私も町へ出る。町で行動する。私はいつも、「学生よ、町へ出よう」とけしかける。町に出なくても研究をしっかりとやればそれ自体が社会貢献だ、と言う人もいる。それはそうだが、歴史的な建物が次々に姿を消している現在、学生と町へ出る活動を続けていきたい、そう思って今日もあちこち飛び回り、町づくり実行の具体的な試みとして町づくり研究所を長野市と長井市につくったのである。



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

2007年度の警察庁統計によれば、全国で年間83万件の交通事故が発生、104万人が負傷、5744人が死亡、ここ数年いづれも減少傾向にあるが、依然深刻な状況に変わりはない。出会い頭事故と追突事故は1/4ずつで、両者で全体の半分を占める構造にも大きな変化はない(図1)。

なぜ、こうなるのか。また、何とかならないのか。等しく、誰もが抱く疑問である。頻発する無信号交差点での出会い頭事故の発生過程に関する現場に密着した緻密なフィールド研究から解は自ずと見えて来た。交差点交通視環境を構成するカーブミラー視認性を運転者視点で見直す事で、問題解決に貢献する事が判った。本稿は工学研究所が研究意義を理解し、助成して頂いた共同研究の中間報告である。

出会い頭事故の多発理由は、事故現場を管轄する交通管理者および道路管理者等の行政当局の公式見解では、専ら「運転者の安全不確認」とされ決定的防止策はなく、交通管理者は運転者の一時停止、肉眼による左右確認励行を強調する教育優先策に終始している。

*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

***東京大学大学院新領域創成科学研究科(前:(財)日本自動車研究所)
Graduate School of Frontier Sciences, The University of
Tokyo (former: Japan Automobile Research
Institute)

****(財)日本自動車研究所
Japan Automobile Research Institute

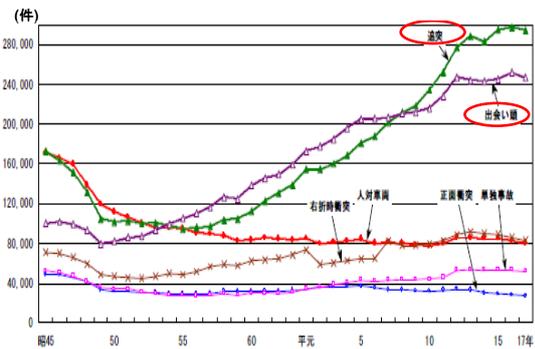


図1 事故類型別交通事故発生件数の推移(警察庁)

筆者らは一灯式減信号機を設置し、或いは「危険交差点」と運転者に注意喚起を呼びかける立て看板設置など、必死で対策を講じたが効果なしと苦悩していた神奈川県警からの要請で、横浜市鶴見区芦穂崎の事故多発交差点に着目、人間工学視点で運転者が交差点で一時停止しない理由を科学的に分析することから研究に着手した。

早朝から夜遅くまでのビデオ観察記録によるフィールド調査中、当交差点でタクシーとバイクの出会い頭事故全過程をビデオ記録する機会に恵まれた。筆者堀野が直接、双方運転者にインタビューし、事故直前および事故時のメンタルモデルに大きなギャップが存することが明らかになった。このメンタルモデル分析から、交差点コーナーに設置されたカーブミラー像の電柱死角がバイクを隠し、衝突直前までタクシーから全く見えない事故過程が判明、カーブミラーの視認性劣悪という機能不全が事故の直接原因である事を突き止めた⁽¹⁾⁽²⁾。

神奈川県警と連携し更に調査を進め、横浜市港北区新吉

田地区を加えた市内 2 地区合計 100 枚のカーブミラーの 70%が視認性 5 段階評価の低位評価で、構造的に運転者の安全不確認を誘発する環境側の要因を確認した。

要するに、「見えない交差点視環境」が主因で「見えるように環境側で運転者をサポート」する環境改善が対策の要であることが判明、カーブミラー人間工学 3 原則および改善策を神奈川県警に提案した。この因果関係は正にコンプスの卵とも言える新発見であった。

筆者提案のカーブミラー視認性人間工学 3 原則とは、①ミラー中央に道路が映る、②ミラー像に死角がない、③距離感を支援する路面マークが映るであり、特に①、②が重要である(図 2) ⁽¹⁾。現実のカーブミラーがどの程度の視認性なのか、その評価結果と県警から提供を受けた事故統計でカーブミラー設置交差点の事故件数との相関を調べたところ、相関が高い事、特にミラー像に死角があると事故件数が多くなる事が判った。事故原因として現行の道路反射鏡設置基準(1980) ⁽³⁾ が土木工学優先で、人間工学視点が欠落しており、工事現場作業者が頼れる具体的な設置指針が不十分であることを国・県・市レベルの交通管理・道路管理の行政責任者と共に確かめ、全国規模のミラー総点検が急務であるとの結論に達した。

2. 研究目的

本研究は、視認性に問題ある全国に分布する 219 万本(国民 55 人に 1 本)カーブミラーの 70% (153 万本) の総点検と改修工事に際して、標準化・簡易化した現場での設置・調整方法を開発し、道路管理者に提案する事を目的とする。当初、筆者等は、直線性が強いレーザービームを活用し短時間に角度調整出来るカーブミラー位置決め装置の開発を構想した。しかし、使用予定の業務用ハイパワーレーザー光線はフィールド運用中のリスクが払拭しきれないとの理由で、本構想から、LED 光源などより安全なメディアを活用した他の方法開発へ方針を転換した。

第 1 段階として、つくば市にある(財)日本自動車研究所(JARI)の模擬市街地を活用したフィールド実験で、行政責任トップに位置する国交省道路局関係者と連携し、実際に工事を担当する国交省外郭組織である道路標識表示業協会関係者および工事請負企業関係者の協力を得て実証実験を実施した。更に、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実験手法を用いて、交差点でのカーブミラーの視認実態を再現できるかどうかを試行した。

その結果、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が土木工学の産官学

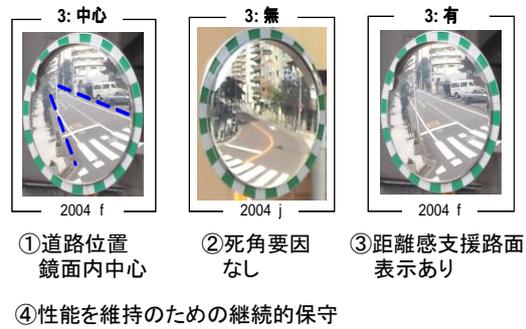


図 2 カーブミラーの人間工学設置基準

の何れにも充分整備されていないこと、ミラーの有効な調整範囲が意外と狭いという重大な事実が判った。現場は経験と勘に多く依存していること、カーブミラー設置・調整方法の計測基礎が欠如し、人間工学で補う必要があることも明確になった。この様に、まだ誰も手がけていないミラー設置条件の基礎部分の技術的明確化が先決と判断し、目的的に柔軟に研究内容をシフトすることにした。

したがって、ミラーの角度測定・調整方法の考案までを当面の目標とした。あわせて、交差点カーブミラー設置、保守管理の基礎的規範となっている「道路反射鏡設置指針」(1980)の改善提案を行い、再設計・施工用マニュアルの開発により、ミラー視認性不全が原因で発生する出会い頭事故を削減できる見通しを得た。

3. 研究方法

視認性人間工学 3 原則を満たすカーブミラーの設置位置や角度(水平角・俯角)を迅速・正確に実際の交差点で補修工事をする際、最小限の交通阻害で達成する調整法を、フィールド実験と 3 次元 CG ソフト[Shade9]を併用し開発する。実験結果とシミュレーション結果が一致すれば、ローコストで点検補修を 3 次元 CG で代替出来る。

当面の研究課題、ステップとして、交差点でカーブミラーを新規又は補修工事の工期短縮を目指した視認性評価方法・基準の提案、カーブミラー調整マニュアル開発を優先し、実証研究を重ねた。必要に応じて、国交省、横浜市、(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協力を得た。

3.1 カーブミラー視認性フィールド実証実験

日本自動車研究所(JARI) 模擬市街路実験施設でカーブミラーの設置位置・角度と視認距離の関係を測定する視認性実験を行った(図 3)。

(1) 乗用車・原付バイク走行中のカーブミラー視認距離測定(2007-8) : 高齢者3名・非高齢者3名を被験者とした視認距離実測に基づき、カーブミラーの直径・曲率・視界の妥当性を検証する。

(2) カーブミラー設置位置・角度条件(許容範囲)の測定・評価(2007-8) : 乗用車/小型トラック運転者視点から、カーブミラーで視認できる車両視距離かつ衝突回避可能な安全視距離を満たす条件を測定、体系的に整理する。最終的に、直接視界/カーブミラー間接視界の連続性確保(隅切り・妨害物効果)を切り口に、カーブ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・評価(2007-12) : JARI 城里屋外実験場で、カーブミラー設置条件を道路における設置位置、設置角度(水平角・俯角)条件で表すこととし、設置角度の測定法を開発、精度・効率を実験的に評価する。カーブミラー位置決め・調整時の視界確認方法として、視境界となる遠・近距離2点特定のため、カーブミラー反射で視認可能な高輝度光源を使用する手法を開発、視認性・実用性を実験的に評価する。

3.2 3次元CGソフトウェアによる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たシミュレーション手法を開発する。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カーブミラー設置位置・角度条件をシミュレーションし、カーブミラー視認性評価、調整手順の標準化に活かす。

3.3 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として、典型的な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)を体系的に整理・基準化する。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検討し、マニュアルの骨子を作成する。

4. 研究経過と成果

4.1 第1回実験 JARI つくば模擬市街路(2007-8)

本実験は、実際の交差点環境を模擬した実験路において、以下の項目を確認・観察することを目的とした。

(1) 接近車両の視認性・被視認性

カーブミラー設置位置・角度と視認距離の関係



図3 カーブミラー視認性実証実験(乗用車とバイクの視認距離測定) (JARI 模擬市街路実験施設)

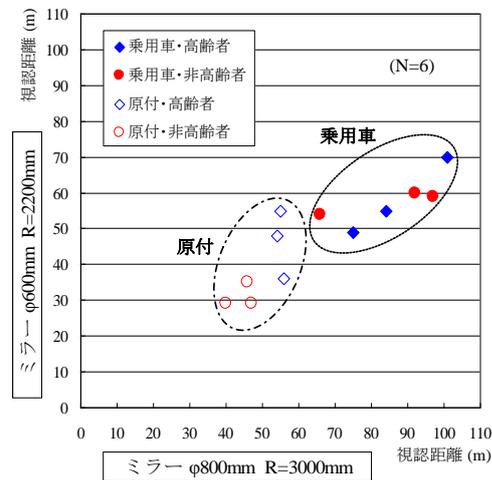


図4 カーブミラー視認距離分布(被験者: 高齢者, 非高齢者, サイズ: 600mm ϕ , 800mm ϕ , 対象: 乗用車, バイク)(JARI 模擬市街路実験施設, 2007-8)

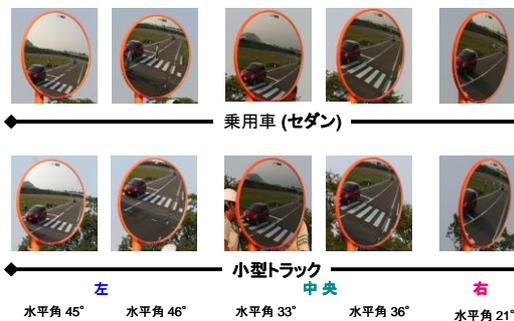


図5 カーブミラーの視認性比較(乗用車とトラック運転者視点の比較)

測定する実車走行実験を行い、被験者6名(非高齢、高齢各3名)対象に、交差点境界線を起点に160mから0m地点まで車とバイクを低速走行させ600mm ϕ (曲率半径2200mm ステンレス製)、800mm ϕ (曲率半径3000mm, ガラス製)の2種類のカーブミラーの見え方と視認距離の関係を測定した(図4)。

乗用車が対象の場合、大型ミラー(800mm ϕ)での視認距離は平均86m、レンジ(66, 101m)で、小型ミラー(600mm ϕ)は、58m(49, 70m)と縮小した。いずれも時速50km/hの場合の安全視距離55mを確認できる。

原付バイクの場合、大型ミラーでの視認距離は50m(40, 56m)で、時速40km/hの安全視距離44m、小型ミラーでの視認距離は39m(30, 55m)で、時速30km/hの安全視距離33mを確認できた。いずれも視認距離が短く(鏡像が小さい分近くに接近しない限り見えない)、大小ミラーの差が小さい。小型ミラーでは、時速30km/hで走行しても、安全視距離(33m)が確保できない可能性があると思った。交差点でカーブミラーを介してバイクを安全に発見するためには、大型ミラーが有効であると解釈できる。

尚、カーブミラーの主要な素材はガラスとステンレスで反射光の吸収率が異なる。ガラスの方がステンレスより反射率が高い分、遠距離までよく見えると推測できる。今後のカーブミラー視認距離実験では、同質素材でサイズの違いを比較するのが正確である。

(2) カーブミラー設置位置・角度条件(許容範囲)の測定・評価

交差点の左・中央・右3箇所に設置したカーブミラーで、右方の遠点(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、カーブミラー像を写真記録した。その結果、最適範囲は左では水平角43-46 $^{\circ}$ 、俯角4-9 $^{\circ}$ 、中央で水平角33-36 $^{\circ}$ 、俯角6-9 $^{\circ}$ 、右で水平角21 $^{\circ}$ 、俯角10 $^{\circ}$ と狭かった(図5)。

4.2 第2回実験 JARI 城里屋外実験場(2007-12)

本実験は、工事現場を想定して工事中の交通阻害を最少化する意図で、なおかつカーブ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することなく、高輝度光源で道路上交差車両を代替する実験である。当実験では1回目の実験結果から大きいサイズ(800mm ϕ)のカーブミラーのみを対象とした。

実験で判明した主な結果は、次の通りである。

- (1) カーブミラー設置検討用のマーカーランプの種類による視認性の違い

表1 カーブミラー設置検討用マーカー光源の輝度測定結果(直接、ガラス製800mm ϕ ミラー反射、ステンレス製600mm ϕ ミラー反射)

光源種類	直接測定輝度	800mm ϕ (曲率3000mm, ガラス)		600mm ϕ (曲率2200mm, ステンレス)	
	平均(cd/cm 2)	間接測定平均輝度	輝度反射率	間接測定平均輝度	輝度反射率
B $_1$ ハロゲン 白色	61183	7658	13	4202	7
Dw $_1$ LED 白色(点灯)	9883	1679	17	725	7
Dg $_1$ LED 緑色(点灯)	8073	1390	17	1000	12
Dy $_1$ LED 黄色(点灯)	7263	1210	17	587	8
D $_1$ LED 赤色(点灯)	6299	680	11	418	7
Dw $_2$ LED 白色(点滅)	6018	1004	17	573	10
D $_2$ LED 赤色(点滅)	4396	370	8	344	8
Dy $_2$ LED 黄色(点滅)	4329	626	14	427	10
Dg $_2$ LED 緑色(点滅)	3670	620	17	502	14
A $_2$ ネスコ LED 白色	1153	218	19	116	10
A $_1$ ネスコ LED 黄色	665	124	19	68	10
C1バトライト 黄色	70	31	45	36	51
C2バトライト 青色	35	26	73	17	47

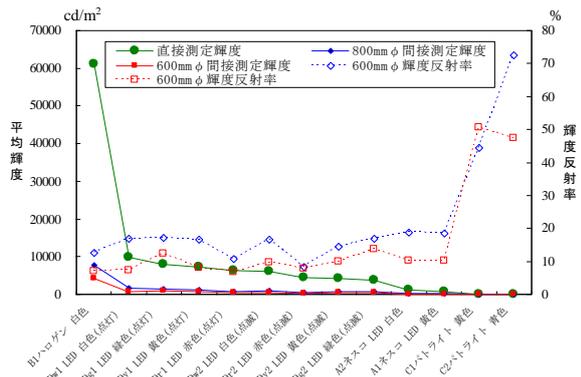


図6 カーブミラー設置検討用マーカー光源の輝度分布(直接、ガラス製800mm ϕ ミラー反射、ステンレス製600mm ϕ ミラー反射)



横浜市道路局一斉点検
鶴見区芦穂崎地区 死角ゼロに
人間工学3基準適応

事故削減効果
2004-2005 11件
2006 2件

図7 カーブミラー視認性の改善と効果(芦穂崎地区の一例)

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、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、各ランプがどの程度遠方から直接目視およびカーブミラー鏡像内で確認できるかを評価した。尚、各ランプマーカーは連続光、点滅光の2モードで実験した。

その結果、視認距離が最長だった光源はパトライト(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。他の光源は最短でも120mまで全員が見えた。白熱灯(ハロゲンランプ)はAC電源延長コードの限界で90mまでしか測定ができなかったが、全ての光源で90m以上視認可能で、実用上問題はなかった。電源準備などの使いやすさ、コスト面を考慮すると、反射鏡つき3LED直列型が最適である。

(2) 実験用携帯・組立式カーブミラーの機能評価
乗用車で簡易に搬送・組立ができ、実際のカーブミラー(800mm ϕ および600mm ϕ)を設置できる実験用携帯・組立式カーブミラーを、市販の伸縮式脚立を活用して製作した。組立作業を行ったところ、最低限、学生4人程度で組み立て、分解出来ることが分かった。また、これにより実際のカーブ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が確認できた。いつ、どこでも簡便にカーブミラーの実証実験を実施する手法を整えた。

4.3 第3回実験 神奈川大学体育館(2008-2)

本実験は、以下の項目の確認・観察を目的とした。

(1) カーブミラー設置検討用のマーカーランプ候補の輝度測定および視認性確認

上記第2回実験で視認性の高かったマーカーランプである回転灯、反射鏡つきLEDランプ、100V用白熱灯(ハロゲンランプ)について、70mの距離から直接およびカーブミラー(600mm ϕ 、800mm ϕ)鏡像内における輝度を測定した。(表1、図6)。

輝度については、カーブミラーで反射されることにより、おおむね10-20%に減衰し、ガラス製の800mm ϕ では平均22%、レンジ(8%, 73%)、ステンレス製の600mm ϕ では平均15%、レンジ(7%, 51%)に減衰することが判った。光源の種類によって減衰の程度はば



電柱:死角あるも
道路隠さず

図8 カーブミラー視認性の改善
(芦穂崎交差点, 2007-7補修)

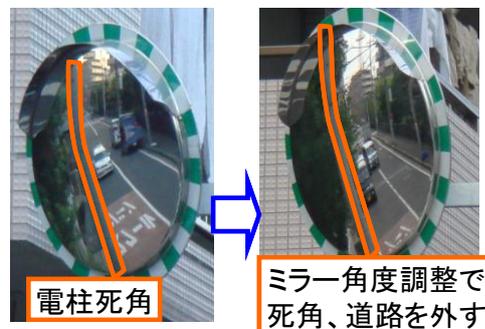


図9 カーブミラー視認性の改善
(芦穂崎交差点, 2007-7補修)
死角は残るが、道路を遮蔽せず

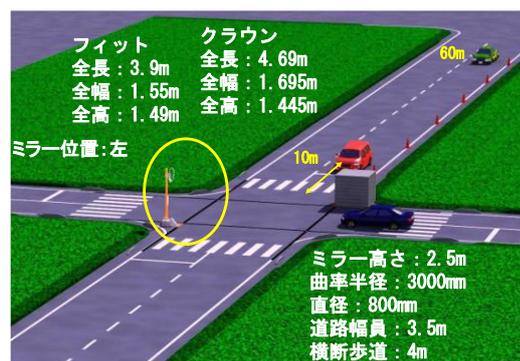


図10 3次元CGシミュレーション
(カーブミラー視認性実証実験再現)

らつきがあり、実際の交差点のカーブミラーに当てはめて考察すると、接近する対象車両が発する光の種類で視認距離、視認性が左右される。素材がステンレスの小型ミラーは視認性でかなり不都合であることが判る。

4.4 第4回実験 JARI 城里屋外実験場(2008-3)

本実験は、以下の項目の確認・観察を目的とした。

(1) カーブミラー鏡面曲率の測定

カーブミラーの曲率については、国土交通省による規定が存在するが⁽⁴⁾、実際に使われているミラーについて曲率を測定したところ、許容範囲内ではあったが、標準値よりはかなりのずれがあることが判った。

(2) 水平角調整式実験用携帯・組立式カーブミラーの組立評価

第2回実験で使用した実験用携帯・組立式カーブミラーに続いて、カーブミラーの水平角を容易に変化させることができる実験用カーブミラーを製作した。アルミ製の筒状ポールを摺り合わせ式に組み立て水平角1度刻みの目盛りを付けて、一方向に微調整が出来る構造を実現した。本カーブミラーの組立を実験路で行ったところ、構想どおりに容易に組み立てられ、角度変化も容易に行うことができることを確認した。

(3) カーブミラーの設置角度(水平角および俯角)の簡便・正確な測定法

カーブミラーの設置角度は、設置されたカーブミラーの光軸(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こと、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る。今後は、求められた光軸の角度を簡便に測定する方法を検討する。

(4) カーブミラー設置角度の変化による鏡像範囲変化

カーブミラー鏡面に映し出されるべき路面領域は、カーブミラー設置角度(水平角・俯角)のわずかな変化で大きく変化する。このため、カーブ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分かった。



図11 3次元CGシミュレーション結果 1
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。



図12 3次元CGシミュレーション結果 2
カーブミラー設置検討用マーカー光源実験の再現
左：実際、右：シミュレーション
光源の位置が一致している。

4.5 フィールド調査 鶴見区芦穂崎交差点(2008-3)

本項目は、人間工学研究室が横浜市鶴見区芦穂崎地区で、2004年よりカーブミラー改善提案の実施状況及び効果を観察・検討してきた調査(図7)⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾の継続調査である。芦穂崎交差点では、鶴見土木事務所が、電柱が道路を遮蔽しないようにポールからアームを長くしてカーブミラーの取り付け方を微調整し死角をなくす様に改善(2007-7, 図8, 9)、その改善効果を確認した。

4.6 3次元CGシミュレーション

本作業項目では、模擬市街路、芦穂崎交差点を対象に3次元CGアプリケーションを用いてシミュレーション技術(モデリング、レンダリング方法、等)およびシミュレーション遂行手順を開発、交差点に設置されたカーブミラーの反射像を実際の状況に合わせて再現できるようなシミュレーションシステムを構築しようと試みた。レンダリング手法が多様で正確かつ効率的、比較的安価であることから Shade 9を選定した。

3次元CGシミュレーションの第1段階として、

(財)日本自動車研究所の模擬市街路で実施した、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。カーブミラー視認性評価実験の再現を課題に、開発したシミュレーション環境の有効性、実用性を検証した。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)を入力し、実データの再現性を検証した。

シミュレーションの結果、これらの条件をほぼ正確に再現することができ(図10, 図11)、シミュレーションとして実用性があることが判った。

図11は、交差点左に設置し、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)と各々シミュレーションしたカーブミラー視界(右)で、これらを比較すると、道路・路面表示・車両等の位置・距離は、どの条件でもほぼ一致した。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、カーブミラーシミュレーションとして実用できるものと考えられる(図12)。今後、種々の条件を入力し、本ツールの再現性をさらに検討する。

このシミュレーションを用いることで、実験結果とシミュレーション結果が一致すれば点検補修をローコストに3次元CGで代替出来るし、更にカーブミラー未設置交差点での設置後の鏡像の状況を模擬および適否検討することが可能となる。

5. まとめ

本研究では、カーブミラー総点検の簡便法を提案するために、点検に必要な高輝度光源の必要条件を確認すると共に、実験用携帯・組立式カーブミラー装置を制作した。また、交差点直接/間接視界として安全性を担保する条件整理の第1段階として、カーブミラー視認性実験を行い、3次元CGソフトによるカーブミラー視認性シミュレーション手法を実践的に開発し、実際のカーブミラー鏡像のシミュレーションをした結果、交差点視環境の再現性、実用性を確認できた。今後、カーブミラー視認性シミュレーションを系統的に実施する予定である。交差点の間接視界安全性を担保する条件を抽出する第1段階として方法論が整備できた。

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、小野雅史各氏にフィールド調査など熱心な協力を得た。更に、行政として国土交通省道路局地方道・環境課道路交通安全対策室、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、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の助言や協力を得た。心からの謝意を表すものである。

参考文献

- (1) S. Horino, M. Mori, S. Kitajima, and M. Ueyama, "Ergonomic low-cost avoidance of intersection collisions by improvement for legibility of traffic-convex-mirrors", Proceedings of the 16th World Congress of the International Ergonomics Association, CD-ROM (2006-7).
- (2) M. Mori, S. Horino, S. Kitajima, and M. Ueyama, "Ergonomic assessment of the intersection visual environment in relation to collision avoidance", Proceedings of the 16th World Congress of the International Ergonomics Association, CD-ROM. (2006-7)
- (3) (社)日本道路協会, "道路反射鏡設置指針", 丸善出版, (1980).
- (4) 国土交通省道路局監修, (社)全国道路標識表示業協会編, "道路反射鏡ハンドブック", (社)全国道路標識表示業協会, (2001).
- (5) M. Mori, S. Horino, Y. Inomata, H. Sasayama and 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).
- (6) 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—横浜市内生活道路広域交差点でのフィールド調査—" 日本人間工学会誌第43巻特別号, (2007-6), pp. 62-63.
- (7) 森みどり, 堀野定雄, 鬼木建臣, 清水康隆, "生活道路交差点視環境と出会い頭事故対策—直接/間接視界の評価と改善—", 日本人間工学会誌第43巻特別号, (2007-6), pp. 64-65.
- (8) M. Mori and S. Horino, "Ergonomic improvement of visibility at urban intersections for preventing frequent crossing collisions", Proceedings of the Eighth Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics, CD-ROM, (2007-10).



フィンランドの学位論文公聴会

浦田 暎三*

Lecture for Dr. Theses in Finland

Eizo URATA*

1. はしがき

昨年末にフィンランドのタンペレ工科大学から、学位の審査員を依頼され、今年 1 月には公聴会に出席した。とても珍しい体験をしたので、記録をしておいた。それをここで紹介しようと思う。また、フィンランドは日本から最短距離のヨーロッパであり、いろいろ特徴のある国でもあるから、それらについても併せて紹介したい。

2. パブリックディフェンス (public defense)

フィンランドの学位審査は、他のヨーロッパ諸国や、アメリカ、日本などのそれは非常に異なっている。今回、学位の審査員に指名され、その方式をつぶさに体験することができた。

全体の日程は次のようになる。

- 指導教授から、審査官をやるかどうかの打診
- 審査官を受ける旨の返事
- 志願者から論文草稿の発送
- 審査官予定者から修正事項、追記事項の通知。
- 修正した原稿を、学部教授会に提出
- これに基づき、学部教授会が論文の審査員を指名。
- 審査員は修正済み原稿に対して、内容を審査し、報告書を作成し学部長に提出。
- 学部教授会は、報告書に基づき、論文の印刷許可、公聴会 (パブリックディフェンス) 開催許可を与え、公聴会審査官を指名。
- 公聴会の開催。
- 公聴会後にプレス発表。
- 学部教授会は公聴会の結果に基づき、学位授与を決定。

手続的には学位を取得しようとする者が、大学に常設してある学位審査委員会に博士の学位を申請するところからスタートする。現実には指導教授がこれで学位論文になると判断してゴーサインを出したところが初動点である。博士論文の提出者は、修士に相当するマスターオブアーツの学位を有するものでなければならない、と規定してあるが、これはみな承知の上で活動が開始される。

学位審査委員会では、その申請に基づき、主査と、1 名ないし 2 名の試験官を任命する。主査はこの大学の教授、要するに指導教授が任命される。試験官は、申請者及び主査の属する大学に所属する者であってはならない。通常は国内の他大学の教授が試験官となるが、外国の大学の教授が試験官となる場合もある。指導教授の推薦に基づいて、学位審査の申請を受けた学位審査委員会のある学部長の名で、予備審査の試験官を任命する。今回の私の場合は、外国人が審査員となった例である。

学位の申請者は、学位請求論文の草稿を大学に提出するのであるが、これは試験官に送付される。試験官は草稿を調べて、必要な改訂、書き直しなどを要求することができる。こうして修正の済んだ原稿に対して、試験官は評価を行い、評価報告書を学位審査委員会に提出する。論文は、当該の学問の分野で広く使用されている言語であれば、フィンランド語である必要はない。工学部であれば、もちろん英語で差し支えない。このため、英語で書かれた学位審査規定がある。この評価は、(英語では) **preliminary examination** といい、評価報告書を **preliminary examination report** という。

評価報告書の書式は決まっていて、その締めくくりの文言が、学位論文としての内容があり、印刷発行して良いと宣言している場合に限り、次の段階に進むことができる。

*教授 機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

次の段階は、論文の印刷発行の許可と、本試験の試験官の指名である。これらの許可と試験官選定は教授会において、正式指名を行い、学部長が任命する。通常は予備試験官がそのまま本試験の試験官になる。この本審査の試験官をオポナント (opponent) という。主査はカストス (kustos) という。

学位論文公聴会に相当するのが、Public defense である。口頭試問を公衆の面前で行うものということができる。階段教室の教壇上に学位申請者、その右端に指導教授の席を設け、左袖に試験官の席を設ける。指導教授はパブリックディフェンスの開始と終了を宣言するだけで、それ以外の発言をすることはできない。

試験会場には、あらかじめ聴衆が集合している。集合時刻の15分後に、申請者、指導教授、試験官の順に入場する。

学位申請者は演壇の中央、指導教授は演壇の右端、試験官は左端に席が設定されている。それぞれが席に就いたところで、指導教授は開会を宣言する。これに続いて学位申請者が研究内容の概要を20分ほどで説明する。次に試験官が起立して、その一人がこの研究の位置づけ、意味、価値などを10分程度で説明する。これが終ると、試験官は研究内容に関する質問を行い、申請者がそれに答える。一人の試験官が4時間以上を使ってはならないし、公聴会は6時間を越えてはならないと規定されていて、質疑討論時間は通常90分から120分である。この試験官による質問が終了すると、聴衆に対して、申請者が他の質問がないかたずねる。申請者が聴衆からの質問に答え終わったところで、試験官が起立し、学位請求者の学識、論文内容が、博士の学位に相当すると評価し、博士に推薦すると宣言する。この宣言文の締めくくりは、学部所定の形式に従って述べられなければならない。これが終ると、指導教授が「これにてパブリックディフェンスを終了する」と宣言する。聴衆は、誰でもこの公聴会において意見を述べることができる。また、一定期以内に学部に対して文書で意見を提出することができる。

使用言語は、最初の申請者による発表はフィンランド語とし、それ以外の試験官の宣言、口頭試問に使う言語は、他の一言語で良い。たとえば、最初の申請者による発表以後はすべて英語でさしつかえない。私はフィンランド語は「ありがとう」、「こんにちは」ぐらいしか知らないから、英語での質疑応答である。試験官の質問は申請者には伏せてあり、事前に質問を知らせておくわけではない。

3. ドレスコード (服装規定)

大学及び学部から送られてきた書類には、服装規定があった。それによると、

- パブリックディフェンスにおける、カストス、志願者、オポナントは同じ服装とする。
- カストスとオポナントであるものは、ドクターハットを必ず持参し、手に持って入場する。外国人はドクターハットに相当するものを持参する。
- クラシックな燕尾服と、黒のチョッキを着用し、靴はクラシックシューズとする。
- 例外として、軍の制服着用を認めるが、この場合装飾のないものとする。
- 女性の場合は、黒のモーニングドレスとする。
- 以上が原則であるが、燕尾服に変えて、ダークスーツとしてもよい。どちらにするかは志願者が決定する。
- ドクターカロンカ (当日夜に行う、学位申請者が招待する祝宴) では、チョッキを白に換え、靴は光沢のあるクラシックシューズとする。

とある。

まさか燕尾服はあるまい。まあ、モーニングがせいぜいと高をくくっていたら、志願者から、燕尾服着用の連絡を受けたので、びっくりした。燕尾服など持っていない。仮に持っていたとしても、飛行機で運ぶのは憂鬱な大荷物である。ところが良くしたもので、これに対応する貸し衣装屋があり、そこで借りることになる。外国人がオポナントを勤める場合の貸衣装代金は学部が支払う、と規定してある。そういうわけで、衣服も靴も借り物である。実はカストスも、もう一人のオポナントもすでに何度もこうした経験のある教授だから、当然自分の燕尾服を持っている。貸衣装は志願者と私だけである。

試験官に日本人を指名するとすると、旅費と滞在費のほかに、こういう費用もかかる。それに大学から Preexamination と Public defence の両方について謝礼まで出る。なかなか大変な出費である。

ドクターハットというのがまた、フィンランド独特である。これはシルクハットに徽章がついたもので、帽子はどの大学でも共通であるが、徽章が大学ごとに違う。博士になると、学位記と同時にこの帽子が授与されるのである。昔の大学教授の絵に角帽をかぶったものを見るが、あれの親類であろう。日本にはそういうものはないから、私の場合はなしで良い。

パブリックディフェンスを挙行了ことは、公式にプレス発表することも規定されている。日本に日曜に戻ったのであるが、月曜にグーグルで検索すると、掲示が

あった。

4. 余話

今回の公聴会を主催したのは、タンペレ工科大学工学部の流体動力・自動制御研究所 (Institute of Hydraulics and Automation: IHA) で、その所長は Prof. M. Vilenius である。学位指導を行ったカストスは、Prof. K. Koskinen で、この人の専門は水圧駆動である。Koskinen 教授は 1995 年に最初に IHA を私が訪問したときは、Vilenius 教授の助手を勤めていたが、そのすぐ後に水圧駆動の研究で学位を取得し、現在は教授になっている。二名のオポネントは私とヘルシンキ工科大学の M. Pietola 教授である。

今回のパブリックディフェンスでは、学位請求論文周辺の科学技術の概要と、論文の位置づけに関する紹介を私が、ピエトラ教授が、学位認定の宣言を行う手はずとした。志願者は約 90 分にわたり、私とピエトラ教授の質問に、あまり詰まらずに答えることができ、こちらにもホッとした。実際、壇上で答えられずに立ち往生すると、たとえ論文のできが良くとも、不合格となってしまう。もちろん現実にそうした例はこの研究所ではかつてない。そうは言っても、志願者は緊張し、あがってしまう場合は大変である。

これは、パブリックディフェンスの前日に、コスキネン教授の招待で、私と研究所所長のピレニウス教授と会食をした。そのときに、ピレニウス教授が昔あった話として、聞かせてくれた話にそういう例があったという。それはカストスであったピレニウス教授がバケイ先生をドイツからオポネントに依頼した時のことである。バケイ先生は、今は退官して 10 年経つが、流体駆動の分野では、掛け値なしに最も著名な教授である。バケイ先生がテキストの中にある記号 η を、この記号は何を表しているかを尋ねた。それは記号定義表に脱落していたのか、どうか分からないが、とにかく流体の粘度を表している記号にすぎない。しかし、志願者は質問を受けそこねたのか、壇上で顔面蒼白となり、次に真っ赤になって、声が出ない。志願者の父親はすでに亡く、母親が最前席に居た。ピレニウス教授はその母親が心臓病であることを知っていたので、この事態で母親がどうかならないか心配したという。まあ、その場はバケイ先生がうまく流してくれて、ことなきを得たそうである。

実は、フィンランドの学位公聴会がとてもユニークである、という話は、バケイ先生に昔うかがったことがあった。それはバケイ先生が現役時代のことだから、もちろん 10 年以上は昔である。今回私自身が依頼を受ける

まで、そのような役を自分が担う日が来るとは、考えたこともなかった。水圧駆動装置のコンタミネーションコントロールという研究は、このフィンランドの流体駆動・自動制御研究所以外では、私くらいしかやっていないというのが、選任の理由だったのであろう。

ドクターカロンカは、たとえて言えば、日本で結婚式の後でやる披露宴のようなものである。学位申請者が、学部長、研究所長、指導教授、審査員のほか、研究仲間、家族と友人などを招待して行う晩餐会である。市内のレストランに、40 名位の人が集まってきた。奥さんとその友人などが歌を歌ったりして、ああ、これはお披露目なんだと理解した。それほど大変なことであるということも解った。

ドイツなどはこれに比べるとずっとあっさりしている。公聴会が終わると、研究所のどこかの部屋に仲間が集まり、学位取得者がビールを 2 ケースぐらい用意して、乾杯しておしまい。日本の課程博士が学部との卒業式と一緒に終わると同程度である。ただし、日本では論文博士となると、いろいろである。

5. 流体動力・自動制御研究所

IHA の大きさは、次のとおり。所長を含め、教授の数が 6、10 名程度の博士研究者、40 名程度の助手、技術員などがスタッフ。修士修了者は毎年 15 名前後、博士を取得するのは 1 年に 2-3 名とのことである。人数に対する研究所の占有面積は、北欧のことであるから、非常に広い。この研究所一つで、わが機械科全部くらいになりそうである。設備も良く整っている。ただ、企業との共同研究が多く、面積にせよ、設備にせよ、どこからが占有でどこからが別の組織に所属なのか、外から見ただけではわからないところもある。

企業との共同研究は日本のそれとは大分異なり、即実用のものが主力である。ここでは、短期に実用、製品に実施することを重視する。研究していた修士の学生が、修了と同時に仕事 (= 研究) ぐるみで企業に移動する。

機械の運動とか、制御を専門にする研究所は、ヨーロッパのほかの大学でも、企業との共同研究を主力にするという状況は同じである。昨今は適用範囲の広い基礎研究などという、スポンサーが無くなるので、どこでもあまりやらなくなった。そういう背景もあって、新興のフィンランドの大学と、ドイツの老舗の工科大学との格差はほとんど無くなったと思う。

タンペレ工科大学は、ヘルシンキ工科大学より後発であるが、現在では両者ほぼ同じ規模になるまでに急成長した。ここでは、1987 年を第 1 回とするスカンジナビ

ア国際流体動力会議という国際会議が開催されていて、それに出席する関係で、何回か訪問しているのである。

この国際会議も以前は冬とか秋にも開かれていたが、最近では5月末から6月初めの、北欧としては最も良い天候の季節に開くようになっている。このシーズンならば、我々にも快適である。

タンペレ市は、首都ヘルシンキから、内陸に160 kmほどのところにある、フィンランドでは第3番目に大きな都市である。と言っても人口は約20万人であるから、日本の感覚では、地方の小都市である。この町そのものは、フィンランドという国よりもずっと昔からあった。ここへ行くには飛行機（小さいが空港もある）、鉄道、バス、車のどれかである。車以外はすべて試したことがあるが、鉄道が最も便利である。飛行機は待ち時間が多いので、到着までの時間が長くなる。バスも同様である。鉄道は1時間待つことは無い。今回は研究所から車で迎えに来てくれたので、さらに楽であった。移動の実時間は、飛行機以外はどれも同じ程度の2時間前後である。

冬に訪問するのは今回が初めてであった。冬のタンペレは、日が短い。明るくなるのは9時、暗くなるのは3時半。一日中雲が垂れ込めていて、3日間で太陽は一度も見なかった。こういう天気は3ヶ月も続くという。今年では平年よりも20°以上温度が高く、昼の温度は摂氏0°である。夏になれば、夜がほとんどなくなるが、冬は夜ばかりである。渡り鳥が他所に移動するわけである。人は鳥のようなわけにはいかない。森と湖というのが、この国のシンボルのように言われるが、まともに冬になれば、氷と雪に閉ざされる。でも、今回は雪も氷もほとんど見なかった。地形は平坦であるが、岩などがむき出しである。ところどころに岩が残ったままの畑が多い。岩がいつまでも残っているのは、風化を促進する微生物が少ないことによるのではないか。ドイツあたりまでなら、雪のないところは冬でも芝生におおわれているのであるが、フィンランドでは、雪も氷もなければ、土と岩が素肌をさらしている。薄い土の層の下にすぐ岩盤がある。これは都市で見られる工事現場を見るとわかる。東京では、地下鉄工事で道路を掘り下げても土がほとんどであるが、ヘルシンキではすぐ岩があって、その間を少しの土が埋めているという状態である。

6. 教育制度とフィンランドの大学

フィンランドの基礎教育は9年で、ちょうど日本の小学校と中学校を合算したのと同じである。フィンランドの教育というと、OECD(Organisation for Economic Cooperation and Development)でやっている先頃の

PISA (Program for International Student Assessment) で一番の成績ということが話題になる。ところが、皮肉なことにフィンランドの初等教育には試験の点を取る競争などというものが無い。この基礎教育は、教材、給食、スクールバスに至るまで、すべて無料である。次が高校に相当する中等教育の3年間である。これは基礎教育卒業者の9割以上が進学する。進学の審査は全国统一基準による。全国统一基準の試験があるが、同一問題全国同時試験などという無理なことはしていない。高校の次は大学であるが、UniversityとPolytechnicがある。ポリテクニックというのは3.5~4.5年が就学年数で、卒業したらすぐ就職する。年令的には日本の大学に相当するけれども、高等教育であるが、専門学校であって、こちらは学費を取らない。

Universityは5年であるが、学費がかかる。始めの3年修了で学士(Bachelor)、残り2年修了で修士(Master of arts)となる。Universityは最近の日本で言えば、大学院大学に相当する。Universityと政府が規定しているのは20、この中には、3つの工科大学と、3つの経済・ビジネス大学も含まれる。工科大学では、ドイツなどと同じで修士終了後、研究所に残って助手を勤めながら研究を進めて、博士の学位にチャレンジすることができる。もちろん大部分の人は、修士修了により就職していくのである。博士となるまでの年数は、分野により人により異なるが、アメリカや日本のような3年でなれる博士課程はない。ドイツの工科大学では、Diplomが修士に相当し、その後助手をしながら博士学位取得を目指して研究活動を送るが、だいたいこの期間が5年以上、10年以内である。これとフィンランドのUniversityは良く似ている。多分ドイツを手本にして作った制度であろう。高等教育の志願者選抜は、高校までの成績と入学試験の併用である。

このような高等教育への進学制度も、大学の組織も変革の時期に来ているそうである。それに伴い、研究所組織も変更される。流体駆動自動制御研究所(Institute of Hydraulics and Automation, 略称IHA)は、2008年4月から知能的流体動力・自動制御学科(Department of Intelligent Hydraulics and Automation, 略称IHA)と衣替えするという。

まだいろいろ話はあるが、残念ながら紙面が尽きたのでこれで終としよう。ここに書いたことは、私見の間、間違いがあれば、ご叱正を請いたいと思う。



私は学生に鍛えられて成長できました

丹下 敏*

I was brushed up by companionship with students for many years

Satoshi TANGE*

1. 私の学生との付き合い方

今、私は「曙光」なるタイトルを冠した分厚い書籍を手にしています。これは平成元年（1989）に経営工学科設立 50 周年を記念して発刊されました。この中に私と学生(卒研生)との付き合い方について「卒業研究指導システム」という体裁でわかりやすく説明している部分があります(pp.448-550：研究室紹介「丹下研究室」)。

このシステムは現在でも健在であり、毎年4月の卒研指導スタート時のガイダンスで学生に説明しています。このシステム記述モデルには、私の学生との付き合い方の基本姿勢が的確に記述されていますので、以下にこの部分をそのまま抜粋して示します。

<卒業研究指導システム>

① システム機能

卒業研究指導の基本コンセプトは“シゴキ”である。このシゴキが私の指導の理念であり、原則であり、ルールであり、すべてであります。私は学生諸君から年間一人当たり 120 万円以上の指導料をもらっているのです。学生諸君のオヤジさんの身になって考えると、いい加減で中途半端な指導をしていては 120 万円に相当する価値を付与できないと考えます。しかる理由から学生をシゴキまくることにしました。

この機能のレベルを一段階展開して“シゴキの直接の目的はなにか？”または“何のためにシゴキのか？”という質問をしてみます。その答は“サービス”です。学生諸君には濃密なサービスを提供しなければなりません。つまり“シゴキ”は濃密サービス機能を担っている手段であります。

*准教授 経営工学科
Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering & Management

② システム入力

ここでいう入力とはシゴキの対象となる学生、つまり私が卒業研究を指導することになる皆さんのことです。皆さんの特性(入力特性)はおおむね以下のように考えています。

- a. 学力水準：中または中の上
- b. 学習意欲：自分のやりたいテーマを用意してくる学生はゼロ、やりたいことに問題意識をもっている学生は約 20%
- c. 可能性（潜在能力）：大いにあり
(これが故にシゴキ甲斐あり)
- d. 指示持ち人間が多い(指示すればちゃんとやる/コツコツ努力する/自己主張をしない)
- e. まれに自己主張する学生もいるが、この主張たるやピントがズレたガキっぽい内容が多い
- f. 仲間同志でケンカしない(我関せず/知らんぶり/コミュニケーション能力不足/社会性の欠落)

③ システム出力

出力とは卒業研究を完成させた学生と卒業研究の内容を意味します。出力とは別の表現をすると、私の指導目標でもあるし、卒業研究成果の評価尺度としても使えます。出力特性を以下に要約します。

- a. 一年間の卒業研究を通して“自分もやったらできた”という確信とそれに裏付けられた自信をもてた学生
- b. 120万円の元を取った学生。
- c. 社会が納得する水準の研究内容（どこの大学で発表しても通用する水準）

④ 変換過程(入力→出力)

以下の手順に沿って卒業研究を指導します。

#1. テーマの決定

- * 自分がやりたいテーマを私に提示してください。
(やりたい事とできる事の判断は私が行う)

- * 工場実習が多い
- * 自分でテーマを決められない学生もかなりいる
- * 5月の連休明けまでに決定

#2. 文献学習/実習工場決定/実習準備学習

- * 卒業研究優先
 - ・アルバイトは原則として禁止
 - ・就職内定でも卒論が合格しないと卒業できない

#3. 卒研の本格的展開 (実習/調査/データ収集など)

- * 夏期休暇か稼ぎ時
- * 夏期休暇の中間時期に合宿あり
(前半のチェックと後半の計画)

#4. 最後の追い込み (10月から12月)

- * 年内卒論下書き完成
- * しつこいチェックが延々と続く

⑤ システム能力 (指導者: 丹下)

- * シゴキにかけては天下一品
- * “オニの丹下”の異名が流布しているようだ
(本人は“ホトケの丹下”のつもり)
(世の中はややくして面白い)
- * “いい加減さ”の徹底撲滅者
- * 濃密なサービス提供者
- * 学生諸君の要望に対応できる十分なキャパあり

⑥ システム環境

- * 躰(しつけ)の場(社会性の涵養)
- * 厳しさと優しさ、怒号と談笑が飛び交う複雑系
- * 居心地の良い研究室環境(人間関係)にしたい

⑦ システム運用

システムは運用されてはじめて意味をもちます。いくら素晴らしい、ユニークなシステムが構築されても、そのシステムが運用されて機能が十分に発揮されなければ無意味です。

システム能力要素である人間(丹下)が入・出力要素となる人間(学生)に働きかけるサービス機能を有するシステムでは、とくにシステムの運用が重要になる。私はシステムの設計者であり、システム要素(人的能力)であり、システム運用者である。一人三役の責任の大きさと重さに押し潰されないように頑張りますのでよろしく。

2. 学生に鍛えられて得られた成果(学生からの贈り物)

私は卒業研究指導ないしは授業のシステムを自分で作り、運用し、指導・実施してきたわけです。まさにエンジニアリング、マネジメント、オペレーションの三役を一人でこなしてきたわけです。このようにあらためて考えてみると、すごいことをやってきた自分に気づかされ

ます。これは私と付き合ってくれた(闘ってきた)学生(敵)が自分を鍛えてくれたお陰だと考えます。学生に感謝しなければなりません。

以下に学生との付き合いのお陰で得ることができた私への貴重な贈り物、つまり学生が鍛えてくれて得られた3つの事柄について述べます。

1) 教師の“心構え”を教えてください

学生は私の言動を想像以上に鋭く観察し、判断し、反応していることに気付かされました。私の見るところ、約3分の1の学生は私の批判者であったように思っています。講義中に説教調で格好つけていくら立派なことを言っても、このことと日常的な言動が一致しなかったり、後日このことと矛盾した内容を話したりした場合には、強烈的な拒絶反応を起こす学生にしばしば遭遇しました。学生は教師の“いかさまぶり”を瞬時に見分ける本能的な能力を有しています。これは恐ろしいことです。批判者としての学生の存在こそが私を成長させてくれたと思っています。

学生に鍛えられた結果、私は知的サービスを学生に提供するプロであると豪語できるまでに成長させてもらったと確信しています。プロの卒研指導のコンセプトを以下にまとめておきます。

<卒研指導の基本コンセプト>

★潜在能力の顕在化

- ・チンタラ過ごした3年間でだらけた気持ちを元に戻す/錆び付いた頭を滑らかにする
- ・“やればできる”という犬の遠吠えレベルから“やったらできた”という確信レベルに到達させる
- ・自信のなさ/自分のなさ/目標喪失の世界から脱出させる

★120万円と対価の知的サービス提供

- ・親父さんの身になって考える
- ・もとを取れない学生にはもう1年の追加サービスを保証する

★知的作業の厳しさと楽しさの実体験

- ・エンジニアリングのプロセスを実体験する
- ・“いい加減”では済まされない世界の認識
- ・本物のよさを知ってもらう

★ガキの世界からの脱却～躰(しつけ)～

- ・世の中は甘くない/世の中は広い
- ・教養を身につける
- ・ガキの習慣から脱する

次にプロの指導サービスを施すに際しての行動原理をかなりの年月をかけて探求しました。その成果として、

学生への真のサービスには“シゴキ”なる行動原理が最もふさわしいと考えるに至りました。

以下に私が導出しました“シゴキ”の7原則を示します。

<“シゴキ”の7原則>

1. 濃厚サービスの原則
2. 指示待ち人間抹殺の原則
3. いい加減学生との徹底抗戦の原則
4. “じっくり腰”の原則
5. 惚れ込みエネルギー保存の原則
6. “ガキよさらば”の原則
7. “ひと皮剥き”の原則

2) 体力が必要だと教えてくれました

私は55才から突然走り始めました。なぜ? なぜ? なぜ? ……。周りの者は驚いたようです。私自身も正直言って“なぜ?”でした。今にして思えば、学生との付き合いをあと15年続けていくために必要な体力に衰えを感じた自己の生存本能のなせる技であったと思っています。とにかく55才までスポーツに全く関与したことのなかった自分が早朝ランニングを始めたのです。

学生との付き合いの中で、濃密な教育サービスを提供し続けるには“体力が必要だ”ということを私に気づかせてくれたのです。私がサービス濃度を薄めることなく70才まで教育活動を続けられたのはランニングのお陰であり、これは学生からの贈り物であったのです。

高齢化してくるといくら気力はあっても体力がなければその気力を行動に移せなくなります。濃厚サービス提供者を自認・自負している私にとって、体力の衰えによって気力をなくしてしまった私と学生との付き合いは想像すらできないことです。

とにかく走り始めて1年後にはフルマラソン大会に参加しました。途中30km付近で両足のふくらはぎが時間差でもって痙攣(こむら返り)しましたが、4時間30分台のタイムで完走できました。ここまで来ると継続欲がいやがうえにも湧出してきます。早朝ランニングも完全に習慣化してきました。この習慣は今日まで15年間続けられています(ほぼ週3日、1日10kmの早朝ランニング)。年3~5回のフルマラソン大会に参加して走っています(タイムは3時間50分台~5時間)。最近では5時間を少々オーバーするようになってきました。

ランニング生活の中に年に何回かのフルマラソン大会に参加することの意味は人間には目標が必要であることに帰結します。目標もなくただ漫然と走るという行動は人間には不向きです。この身をもつての目標の重要性を認識できたことは、学生の卒研指導、自らの研究活動

にもプラス影響を与えてくれました。

現在までに最も印象深いマラソンは1997年秋田100kmマラソンです。正式名称は「北緯40°秋田内陸リゾートカップ100kmマラソン」(角館→大館)です。完走制限時間13時間のところをギリギリの12時間54分25秒で完走できました。60歳で100kmを完走できたのはこの大会で完走することを目標にしてコツコツと積み上げてきた日ごろの走りこみにあると思います。走行中に計測していたラップタイムを見ると、最初の10kmの時間:1時間14分55秒と最後の10km(90km~ゴール地点)の時間:1時間14分28秒がほぼ同じでした。これは最後まで制限時間内で完走するという目標への執着心によるものです。目標はそれを達成して始めて意味を持ってきます。やったらできたという達成感は自信につながります。“やればできらあー”は単なる犬の遠吠えに過ぎず、タラ・レバの世界です。努力して苦勞して“やったらできた”という実績こそが自信につながり、成長を促します。学生との付き合いを通して教わった体力の必要性から始まったランニングによって得られた私の哲学は、再び学生にフィードバックされて学生の指導原理になったようです。



3) 私の研究意欲を刺激してくれました

私は当初65歳で退職するつもりでいました。その理由は大学人としての研究・教育への意欲は65歳を過ぎると維持困難になるのではないかと懸念でした。しかしこの懸念は阪神大震災によって見事に吹っ飛んでしまいました。私の実家は神戸にあり、退職後の住み家となる家屋が倒壊してしまいました。家屋再建のために銀行から融資を受けた際、完済時点を70才にされてしまったのです。銀行から70才まで働いて返済しなさいと言われたのも同然です。

体力的には自信は持てましたが、問題は気力、つまり研究と教育への意欲でありました。講義中とか卒研指導中に過激サービス精神で辛辣なシゴキをしてきた私が意

欲をなくしてしまっただけで、私の美学が成り立たなくなってしまう。ここで私の意欲を支えてくれたのは講義と卒研指導で私と付き合ってくれていた学生諸君でした。私のシゴキに耐えてがんばってきた卒研生の素晴らしい研究成果を目の当たりにして、私の研究意欲は大いに刺激されました。そして65歳以降も意欲減退の兆しを全く感じることなく、今日に至っています。65歳から70歳までの私の研究実績がこのことを証明してくれます。最近5カ年の研究業績を以下に示します。

- 1) A study on decision support tool for system change. (Proceedings of the 16th ICPR, フィンランド、2003)
- 2) システムコストをターゲットとしたシステム変更意思決定支援、(日本ロジスティクス学会誌、Vol. 3 No. 2, 2004)
- 3) A research of flexibility index for SCM design (Proceedings of IMC 21, アイルランド、2004)
- 4) Business process innovation in competitive environment (Proceedings of 2nd Euro Conf. of MOT イギリス、2006)
- 5) Total logistics taking into account of product life cycle (Proceedings of ICLS, 東京、2007)
- 6) The role of IE in competitive business environment (Proceedings of 37th International Conf. on computer and IE, エジプト、2007)
- 7) 経営革新とインダストリアルエンジニアリング、神奈川大学工学研究所報 (30号)、2007・11月
- 8) 製品ライフサイクルを考慮したトータルロジスティクス、日本ロジスティクスシステム学会誌 vol.No. 2
- 9) Light vehicle lease business based on product lifecycle logistics (ICLS 2008, Bangkok, Paper already accepted, 2008 11月発表予定)

現在、最後の卒業研究の一環として、このままでは“地球がヤバイ”という問題意識を共有できた数名の学生とともに、地球環境問題と真正面から取り組んだ研究プロジェクトを展開しています。今年度は自動車産業における生産と消費のパラダイムを大胆にシフトするべく、「軽自動車リースビジネス開発」を狙っています。

3. 結び ～現状認識からの大胆な提言～

本随想のタイトルをみて“学生を教育する人間が学生に教えてもらいました”とは何事かとお叱りを受けるかも知れません。しかし私は長年にわたっての学生諸君との付き合いを通して鍛えられてきたのは確かです。人間は鍛えられれば必ず成長するものです。この意味から学生との付き合いから、私は教育者としての考え方、教育方法に大なる影響を受けました。

とにかく教師がその社会的権威をもって生徒、学生に対応する時代ではなくなりました。(世間には未だに権威を振りかざして学生から軽くあしらわれている教師もいるようですが・・・)今日の日本における教育問題の荒廃と混乱の原因の1つに権威に代わる教師の確たる存立基盤が見失われている点にあると考えます。

そこで最後に長・中期的観点からの大胆な教育ビジョンの一端を提言させていただきます。

提言1：初等、中等教育について

- ① 人間大好き先生が生徒を教える
 - ・生徒から尊敬される先生でないとい生徒はついてきません。
 - ・尊敬できる先生の最も重要視される資質は“人間が好きなこと/子供への愛情”です。
 - ・このような先生の採用問題が重要です。
- ② 先生の給与を2倍にする
 - ・人間大好き先生は貴重な存在です(サラリーマン根性ではダメ/生徒への愛情が重要)
 - ・敬意の念で社会から認められるエグゼクティブ(プロフェッショナル)としての処遇
 - ・結果として母親が尊敬する→子供も尊敬する

提言2：大学の専門教育について

- ① マスプロ教育の解体→“塾”方式の集合体とする
 - ・システムへの入力を絞り込む(動機、目的、学力、問題意識などで入学者を絞り込む)
 - ・とくに工学部では研究室=塾として、研究室ごとに特徴ある教育・研究内容、教員を確保する
 - ・“ゼミの神大”を言葉ではなく、形で具現化する
- ② ところてん押し方式の解体
 - ・教育にはお金がかかることを前提とする
 - ・システム出力(卒業生)水準を高くする
 - ・社会から評価される卒業生を出力する

以上



学生たちと建築史に浸る

—歳老いたカウボーイの感慨—

西 和夫*

Practice in History of Architecture

Kazuo NISHI*

建築史フィールドワーク

建築学科のカリキュラムに「建築史フィールドワーク」という科目がある。シラバスには、「建築・町並み・集落・都市の見学、調査などが内容」だと書かれており、通常の授業と重ならない時間を選び、集中授業の形式で実施される。歴史的建造物や解体修理工事現場の見学など、現地に出向いて実施する科目である。

たとえば冬の寒い日、ちらちら舞う雪の中を学生たちと京都や奈良を歩く。——というといかにも風流だが、実情はいささか違う。

40人の学生と歩く

まず、同行する学生たち40人を想像していただきたい。すでにそれだけで、風流とは遠いことが御理解いただけるだろう。しかもこれは授業の一環であって、私の好きなところを勝手に歩くことは許されない。

単位不足を補うため、歴史に興味をもたない学生も参加する。当然のことながら彼等は、選択科目の建築史は受講していない。

しかし、実は、かような諸君と京都・奈良を歩くのもなかなか面白いのである。数日、ただひたすら建築史に浸っていると、最初は興味を示さなかった学生たちが次第に目を輝かせてくる。

見ることの大切さ

「やっぱり来てよかった」などとは、彼等はなかなか言わない。彼等が信奉するのはデザインの最先端に行く現代建築であり、コンピュータを駆使した構造理論であ

り、あるいは最新式的环境設備である。寺も神社もそして民家も、すべて古くさい過去の遺物にすぎないと彼等は考える。そんなものを見ても、建築の進歩発展には少しも役に立たないと信じている。だがしかし、そんな彼等にも、長い年月の試練に耐えた建築の良さは自然に伝わるらしい。

平城宮跡へ行くと、古代人のスケール感覚が実に雄大であったことをいやというほど思い知らされる。都市を作ることの大変さと、奈良時代の人々がその大変さにぶつけたエネルギーとが、現代都市にしか興味を感じなかった学生にも何となく伝わってくる。

学生たちは発見する

新薬師寺の化粧屋根裏や柱・梁の構造を見ると、素朴な中に力強い構造美があることを、構造設計に興味をもつ学生が発見する。

法隆寺夢殿や伝法堂を説明した後で、この奥に中宮寺の弥勒菩薩があるよ、と言付け加える。どれどれと野次馬根性で見に行った学生がうれしそうな顔をして帰ってくる。京都広隆寺の弥勒の話すれば、「よし、帰りに京都へ寄ってぜひ見てこよう」と張り切る。現代デザインしか興味のなかった学生が、である。しかも「人間て、本当にどこにでも住んでいるんだな」とか、「神社は、そのあたりで一番景色の良い所にあるぞ」などと、彼等が発見するのだ。

風流とはほど遠い

もちろん全員がこういう具合だとは限らない。何もつかめず、風邪だけひいて帰る者、すてきな美人に出会ったことを胸に大切にしまつて帰る者など、色々である。だが、こういう学生も、何年か経って、皆と歩いた風景を

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

ふと思い出すに違いない、そう私は思う。

こんな具合に、毎年、建築史の世界にどっぷり浸りに行く。実情を知らぬ人にうらやましがられると、「いやとんでもない。何のことはない。カウボーイですよ」と答える。元気でエネルギッシュで、好奇心旺盛で、と同時に厚かましくて、ちょっと非常識な学生たちとの付き合いは、体力が勝負なのだ。

こうしてカウボーイを継続して30年、相変わらず学生たちと歴史的な町や建物を見学して歩く。何年たっても見学の様相は変わらないが、ひとつ、大きく変わったことがある。それは、年ごとにカウボーイが歳老いたことだ。

建築は現地に行くしかない

改めて言うまでもないが、建築は見学したければ現地へ行くしかない。絵画や彫刻は時どき美術館や博物館で見ることができるが、建築はそうはいかない。しかも3

次元の存在だから、内部空間は実際に中に入って体験するしかない。写真を見ても説明文を読んでも限界がある。だからこそ、カリキュラムに現地見学が組み込まれているのだ。

歳老いたカウボーイ

見ること、体験することが大切なのは建築史の研究一般に当てはまる。私の研究室は、長年にわたって町並み調査と町づくりを実施してきた。「学生よ、町へ出よう」と学生たちに呼びかけるのも、同じ理由だ。建物を調査し、その成果を生かし、町の人たちと力を合わせて町づくりに取り組む。そのとき、学生の行動の基礎になるのは、歴史的な眼をもち、その眼で対象をしっかりと見ること、これである。

授業の一環として建築や都市を見て歩いた経験が、学生たちが今後生きていく上に、きっと役立つに違いない。歳老いたカウボーイは、そう確信している。



「贅沢で我が儘な時間」

室伏次郎*

Willful and luxurious life

Jiroh MUROFUSHI*

大学教員という、そうなるまで想いもよらなかったことに奉職して、14年となりました。本年度を持って退職させて頂くこととなり、様々な場で沢山の方の助けを頂いたことが先ず思い出されて、有り難く、心より御礼申し上げます。

多くの諸先輩の方々には比べるべくもない短い期間でしたが、'86年に非常勤講師として建築デザインを担当させて頂いたことを皮切りに建築学科にお世話になること20年余となり私自身には永くもあり、あつという間で短くも有るといふ実感です。そしてそこでの生活とは、大変我が儘で贅沢な時間を過ごさせて頂いたという想いがあります。つまり自身には得難い勉強の時間でありました。一方、研究者たるべき大学人らしくはなにも出来ないままに過ごしてしまつて・・・という想いがあります。建築学科という場所の特質として、学研ならぬ建築デザイン実務者の立場からもの言うことが、また建築の現場からの生の声が、ものづくりの原点を学ぶ学生さんの将来にむけて必要とされる、其の一点についてのみ建築デザインの現場でその時点までに30年間を過ごしていた私の多少の存在理由があるかと考えたことでした。非常勤時代から、日頃「建築は教えられないことだ。自ら学び取るのだ！建築を学ぶとは自らを表現するプレゼンテーションを身につけることだ」といつて来ただけに正面切って教える事と向き合つて、さあどうしよう、と冷や汗をかきながら最初の講義に臨んだものでした。それは学部1年生の「建築のデザイン」という建築のすべてにわたり何を語つても良い授業でした。しかも最初から毎週ではなく半分は複数担当で・・・と教職未経験のア

マチュア教師の私を気遣つて軽減して頂いたことでした。そして、何も考えずに自信を持ってしゃべれる唯一のこと、建築家とは何か、建築とは何か、文字通りの自らの職業意識、日常を一気にしゃべつたことを、またこの開き直りの最初の講義で90分間しゃべり通すことが苦ではないと実感し、ほつとした気分であつたことを、いまでも懐かしく鮮やかに思い出すことができます。

建築をデザインするとは、設計には正解がないということを実感しつづ思想をモノの在り方に変換し、これが最も正解に近いと判断されるとしてプレゼンテーションし、世に問うということだとおもいます。これを「教える＝正解を示す」となると押しつけでなければ傲慢ということになるでしょう。

そこで、「私はこのようにやつてきているがどうだろうか？」という具合に、我が方こそ全ての授業がこれすなわち「教える事こそプレゼンテーションだ」ということになり、教えるとは言いながら当方が日々評価されるという学生と教師の立場が逆転しているような生活でありました。

一方、事務所に於いて仕事としてデザインすることとは、コミュニケーションのなかで多くのアイデアを検証しつづ、限られた時間のなかで「決める」という行為の結果であり「建築を教える」こととの決定的な違いです。

このように大学生活自体が私にとって貴重な勉強の機会であつたとする所以であり、また、学生さんに「実務設計におけるデザインとは決める仕事、すなわち価値観を提示して責任を引き受ける仕事、建築家は決めることが出来る人」と説明してきた所以でもあります。

このような観点から大学院生との協働作業で実施コンペティションへの応募がきわめて意義深い教育機会であり、私にとって忘れ難いものとなっています。

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

14年間で総勢100名を超える当研究室院生との生活の記憶は、この研究室チームによるコンペティション応募に凝縮されます。

制約された時間のなかで可能な限りの多様なアイデアを検証し、最後のスリリングな「決めること」を経てプレゼンテーションに向かう。作業工程の立案、多人数デザイン・ディスカッションの運営と進行、プレゼンテーション仕方の立案、それら全てが院生の自主運営です。私は横にいて時々質問を發します。実務同様のデザイン・キャリアであり院生も自主的にならざるを得ない自分にエキサイトしていることが良くわかります。そして結果を待つ・・・。

当然と言うべきか、累々と連戦連敗14年の歴史パネルが壁にかかっています。

20あまりのチャレンジのうち最優秀賞、優秀賞それぞれ1回が有ります。無論それは誇り高い記憶ですが、敗戦の経験が大切だとおもっています。なぜなら実際の仕

事は意のままにならないクライアントの存在と格闘し、場合に依っては頑迷な所長の存在という枷を乗り越えて考えることで、敗戦ではないまでも小さな挫折の繰り返しを経験し、終わりのないそれに耐えて考え抜くことではじめて「正解に近いと判断される」プレゼンテーションに成功することができるものだからです。そしてこれらの全ては、経験という裏打ちに根ざすプロフェッショナルリズムの大組織の指向と異なり、建築デザイン・アトリエでの手づくりのデザイン・プロセスと同様であり、アマチュアリズムの「自由と創造」の意識を根幹としていることです。

粘り強く、在らまほしきものを追求しながら、オリジナリティーを求めて、自信を持ってなお畏れをもって結果を世に問う。学部生、院生とともに自由にそういう生活を過すという、贅沢で我が儘な時間を許して頂いた14年間に心から感謝しています。 室伏次郎



楽しい大学生活でした

大熊 武司*

It was satisfactory life with the university

Takeshi Ohkuma*

はじめに

2009年3月末日をもって退職させて頂くことにしました。1971年4月に専任講師として教員生活をスタートして38年、良好な給与と研究条件、リベラルな大学、建築学科の雰囲気そして頑張りや揃いの研究室OBに支えられて「楽しくまた満足できる研究生活、教員生活」を送らせて頂きました。以下にその一端を披露させて頂きますので、ご覧下さい。

面接試験・大衆団交

昨年度から建築学科の就職委員を務めているということもあって、機会あるごとに、学生に面接試験の意味とか大切さを説明していますが、学生から「先生も面接試験を受けたのですか」という質問を受けることがあります。「経験あるよ」と応えたところ、「その頃も抑圧的面接ということがあったのですか」と聞かれた。「何だ、その心理学の面接みたいのは」と聞くと、「私は体験していませんが、高圧的あるいはいじめめ態度・もの言いで面接されることのように」と説明してくれた。「ああそれならば、私も経験あるよ」と応えました。

私は71年3月に母校の博士課程を修了し、4月から専任講師として本学勤務のスタートを切りましたが、公募に対し当時としては異例の複数応募となり面接試験を受けることになりました。そして、ある教員から「我々が望んでいる振動ができる教員というのは、地震がわかる教員のこと、君のは風だ。無理じゃないか」と言われた。一瞬どきどきしましたが、そんなことを言われて静かに自己弁護するようでは世の中やっつけられないし、何よりも「私は母校から推薦状をもらっているのだ」という変な自信に支え

られて、思い切り反論しました。

当時は本学も大学紛争の真っ最中で、連日大衆団交にかり出された(当時の学内状況については、高木先生(名誉教授)の「建築学科草創記」、所報No.30を参照されたい)。私は、本学勤務になる直前まで母校の院生連絡会議の建築代表を務めていましたので、「ノンポリ」とはいえ学生気分が残っていて、団交が進むにつれあるいは団交のたびに窮地に追い込まれました。そんな窮状や会場から「救出」してくれたのが、この3月に退職された前電気電子情報工学科教授の辻野先生(名誉教授)です。

この縁で、辻野先生とは「簡単には断れない長い付き合い」をさせて頂くことになりました。もっとも、メインは「暗くなると掛かってくる招集電話」で、居留守を使う先生も結構いましたが、辛先生(名誉教授)、西久保先生、許先生、それに私などはよく集まり、高級ウイスキーと安いつまみで、大学、工学部、学科のこと等々についてあること無いことをケンケンゴウゴウ、時にカンカンガクガクと忙中閑有り(?)の一時を楽しんできました。

大学では何が学べるの?

高校時代を母校の付属工業高校で過ごしました。大学への優先入学はありませんし、もっぱら、就職することを前提としていました。しかし、勉学が進むにつれて「もの足りなさ」を感じるようになりました。その頃、母校の教員が講義をする「化学」の授業に出会い、それまでの授業にない充実感を味わいました。そこで思い切って先生に「大学では何が学べるのですか」と質問しました。先生からは「知識の習得は当然だけれど、何故を問う体質、問える力を身につけることができる。もっとも、本人次第だが」という答えが返ってきました。親を説得して大学へ進みました。大学の授業の多くは期待に応えてくれましたが、知識の切り売り(カタログ授業)や教科書通りの授業も結構あ

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

りました。幸いにも、当時は「出欠をとる」ということがほとんど無かったので、「時間の有効利用」ということで、期待はずれの授業にはほとんど出席しませんでした。時代がそうさせているのかわかりませんが、「出席を強要し、成績に反映させる」という最近の考え方にはなかなか同調できません。勉強したい者、努力しなければと思う者が出席すればよいのであって、授業法に問題があるのであればそれを改善すればよいと考えるからです。「努力する者に出来るだけの支援をすること」が最も大切なことだと思います。FDの一環として実施されている「授業評価」、「研究授業」が良い方向に展開されることを期待します。

このような経験、認識が私の「教育方針の基礎」を形作っています。特に、研究室での学生指導にあたっては「自分で考え、動く体質の育成」、「Why、What、Howの明確な仕分けと把握」に重点を置き、「技術者としての背骨を持つように」と言う言葉で送り出します。社会経験を踏んで30才位になった卒業生から感謝の言葉をもらえることが多く、「子育て」と同じだなと自画自賛しています。

卒業研究や修士論文の作成・発表の充実という点では、学科としても創設後まもなくの頃から改善の努力をしています。第1歩が「卒業研究・修士論文梗概集」の作成です。私の提案によるもので、日本建築学会大会学術講演梗概集の作成要領をひな型とし、1980年度発表会からスタートしました。その後、デザイン系では「勉学のモチベーションアップを計る」ということで、白浜先生（名誉教授）の提案により修士論文優秀賞、卒業研究優秀賞が設けられました。構造系、環境系では、研究室のテーマ等に強く依存することで導入を見送ってききましたが、2005年の「カリキュラムを独立させての正式なコース制」の導入を契機に、両系も2006年度発表会より、「プレゼンテーションの出来栄え、質疑応答の出来栄えに重点をおいた系教員全員による評価」に「指導教員による普段の研究態度の評価」を加えるという審査方法を前提として、同賞を導入しました。因みに、受賞成果の概要を学科HPで公開しています。

改善は入試方法にも及びました。デザイン系の入試方法ということ強く意識した1987年度からの「B方式」の導入です。私はデザイン系の白浜先生の部屋にお邪魔するのが好きで、何かと雑談をするのですが、その中から飛び出したのがこのB方式のアイデアです。私が主任のときで、建築学科としては全員賛成で問題は無かったのですが、「外国語、経済学部の数学と同様の数学、小論文」を試験科目としたために、「工学部としてはまずいのではないか」をはじめ、教授会では厳しいチェックが入りました。何とかクリアしましたが、小論文を「論文を読ませ、その主旨を絵で表現する」という内容としたので、画期的な方式

としてNHKが取り上げ、「テレビ初出演」という榮譽(?)に浴しました。

このB方式はその後、時の流れの支援を得て、皆様ご承知の通りのプレゼンテーション重視という原点にたった公募制推薦入試方式に姿を変えました。なお、この方式はそのまま、今年度スタートのAO入試に引き継がれました。

何かと議論をする建築学科ですが、サッパリして後を引くことがなく、遠心力と求心力の絶妙な(?)バランスで坂を登っていくこの学科は好きですね。

学者としてやっていけるか?

大学の教員になることを決めたのは修士1年の時でした。とは言え、決断までには相当迷い、指導教授はじめ何人かの教授に質問しました。「私はやっていけるでしょうか」と。明らかに愚問ですが、「研究が好きならば」という答えの他に、ある教授から、「推進力は、研究欲か金銭欲か名誉欲」といった禅問答のような答えを頂いた。善し悪しは別にして後二者の「欲の目的」は明解で、それだけに「研究欲の目的」については解釈ができませんでした。当時の大小様々の団交でも良く取り上げられた「研究のマスターベーション」を皮肉っただけの言葉とは思えず、今日まで引きずっています。

母校の卒業研究、修士・博士課程は藤本盛久先生（元本学学長、理事長）のご指導のもとに過ごし、修士課程までは鉄骨構造に関する研究を進めました。しかし、学者になることを決めた時点で研究分野を替えました。理由は3点セットで、第1が鉄骨構造のおもしろさは「製品開発」に有り、私の性分にあわないという判断、第2が「これからは長大・超高の構造物が増え、耐震問題だけでなく耐震問題も重要となる」という恩師の言葉、そして第3が耐震問題は構造工学だけでなく気象学、流体力学、振動工学、確率統計学等幅広い分野に関わり、「解析が好き」な私の性分にも合い、また世界的に見ても研究者が少ない、という3点です。

専任教員としての研究は母校との共同研究で始まりましました。すぐに電電公社（当時）の高層局舎の耐風設計という実プロジェクトに参加でき、風洞実験を日本板硝子の風洞で行いました。具体例を通しての実験法の勉強、海外からボールベアリングを輸入しての空力振動実験模型の開発という幸運に恵まれました。1973年のことです。これを契機に共同研究の相手も増え始めましたが、自前の研究は、環境系が以前使っていた12号館ドライピットに設置された風洞を使うしかないので、思うようには進みませんでした。そこで、卒業研究の一環として新風洞を作ることにしました。場所は同じですが、送風機は当時の一級品を購

入し、あとは、設計から制作まで、私と金谷助手（当時）と卒業研究生だけで行いました。1979年のことです（図1参照）。今日の規模からすると自慢できるものではありませんし、設置環境も良くありませんが、性能は良く、国際会議の折に訪ねてくれたアメリカ風工学会会長（当時）のKareem教授（ノートルダム大学）からは「大学らしいいい風洞だ」と褒めて頂いた。ウィンクもしていましたが、「設置環境が悪いため」だろうと解釈しています。

この間の1975年、八丈島が最大瞬間風速67.8m/sという強力な台風13号の直撃を受け、多くの金属製屋根が大きな被害を受けました。このために、建設省から業界団体に設計指針を策定せよとの要請があり、建築研究所と私の研究室が共同で折板屋根関係の構造実験を組織的にを行い、1977年の鋼板製屋根構法標準の刊行と成りました。このとき、せっせと働いてくれたのが、卒業生で建築研究振興協会の職員であった丸川比佐夫君です。彼はその後風工学研究所に移りますが、私が体調を崩した時に助手として戻ってきてくれました。彼は1994年に泉創建エンジニアリングに移り、程なく実務用大型風洞をベースにした都市環境技術研究所を立ち上げたので、それ以降、風洞実験を要する研究は大学の風洞、都市研の大型風洞を使い分けながら、彼と二人三脚の体制で展開させています。

1979年の第20号台風は首都圏を直撃し、高層ビルは不快・不安を感じる者が出るほど揺れました。我が国における「風揺れ問題」の誕生です。これを切っ掛けに、「長周期の振動に対する居住者の反応」に対する関心も高まり、私も母校と共同でこのテーマに挑みました。その成果と1970年来の高層建築物の風応答についての解析的研究、実測による研究の成果を纏めた「高層建築物の風応答予測と振動の限度度」は「1991年日本建築学会・学会賞（論文）」を受賞することができました。この賞は「長年にわたる一連の研究成果」が評価対象になりますので、うれしい限りでした。「風揺れ問題」は極めて現実的な問題であるだけに世界的にも関心の高いテーマであり、私も日本の実情についてデータベースを作成して国際高層建築物協議会とアメリカ土木学会構造減衰小委員会で報告させて頂いた（1996

年）。この縁で、シカゴの高層建築物群の実測をベースとしたシカゴ実測プロジェクト（ノートルダム大学、西オントリオ大学、SOM設計事務所、サムスン建設の共同研究）に準備段階からアドバイザーとして参加することになりました。

このような研究活動を背景に生きた教育をしてきたと自負していますが、残念なことが一点あります。修士課程から進学しての所謂課程博士を誕生させられなかったことですが、社会人の課程博士1名、論文博士4名（現時点）を誕生させたことで了としたいと言いつけています。

楽しい学事もありました

学生にきちんとした教育をするために（授業の場以外で）求められる学事については協力しなければいけないのは当然だと思うのですが、それ以外のことについては、苦手なこと、不必要（？）なことは可能な限り避けるという姿勢でやってきました。それでも、中には楽しいものもありました。

一つは、文部省（当時）学術フロンティア・横浜市産学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御低減研究：神奈川大学TEDCOMプロジェクト」の推進です。このプロジェクトは、横浜キャンパス再開発事業の完了にあわせて当局より「この機会に、横浜市産学共同研究センターならびに文部省学術フロンティア推進拠点に申請できるような、より大きなプロジェクトを計画せよ」との予想外の回答を頂いてスタートしたプロジェクトです（詳細は、神奈川大学工学部報告、No.39、44、建築学科HPを参照されたい）。岩田、荻本、島崎の3教授と代表役の私の4人がテーマを分担して推進し、岩田教授主導の本学発ベンチャー第1号の誕生はじめ既に実務に反映されている多くの成果を挙げています。私自身の主な成果は、社会人博士の養成、現在、日本免震構造協会で策定中の「仮称：免震建築物の耐風設計指針」（委員長：筆者）への貢献です。

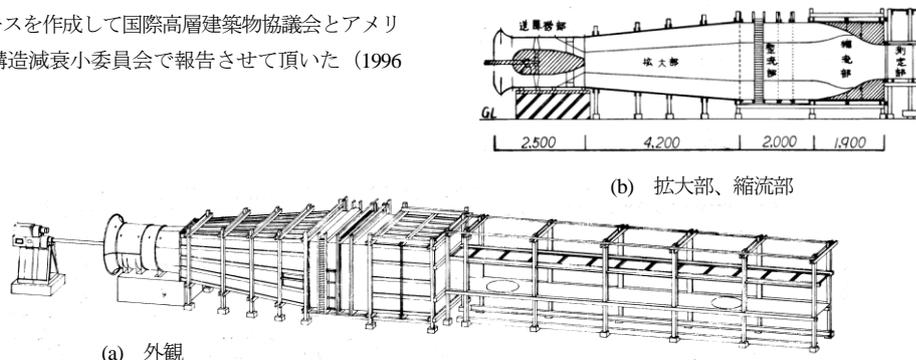


図1 研究室自作の境界層型風洞（1979年）

余勢をかって 2006 年度の 120 周年記念建築学会大会の招致にチャレンジしました。登録参加者数約 9600 名という我が国有数の大規模大会を再開されたキャンパスで 3 日間にわたって開催でき、充実したメディア施設ともども本学の良さを多くの方々に知って頂けたと思っています。学生を含めて、建築学科の heavy な一体感を味わえたことも忘れ得ないものになりました。

今一つの楽しかった学事は 1987 年 10 月の約 2 週間にわたる武漢理工大学への出張です。国際交流協定に基づくもので、この 2 年前に同大学から松村先生（名誉教授）のもとへ熊丹安先生が来られていた。熊先生とは名前が近い（？）こともあってよく飲み会をやりました。このため、「大熊先生は大酒飲みだ」というデマが広がっており、出張中は連日大歓迎されてしまいました。帰国後、数回通院することになってしまいましたが、楽しい一時でした。

帰途、北京と大連に立ち寄らせて頂きましたが、北京では北京市建築局が講演会を主催してくれました。その折、建設現場を訪ねることにしていた大連タワー（岩田教授（当時、新日鐵）が開発した NS トラスを使ったタワーで、大連市郊外の山上に建つ）の耐風設計についても紹介させて頂いたのだが、大変な関心呼び、別の意味でのうれしさを覚えました。

研究成果は実務に生かす

研究目標を「合理的耐風設計法の確立」においていましたので、傲慢にも、「自分の研究成果を社会の共有物にさせたい、いな、そうしなければ意味がない」と考え、学会の委員会活動に参加できることを願っていました。幸い、1976 年度から、荷重運営委員会（当時、荷重分科会）傘下の風荷重小委員会の幹事の一人として選ばれ、当初の希望は早々に実現しました。早速、「日本の耐風設計体系・技術の確立」を基本方針とした風荷重小委員会の活動が始まりました。この風を受けて、私は基礎研究と実用研究のバランスをとりつつ、企業との共同研究あるいは奨励寄付金も受けながら、研究を展開してきました。お陰様で、建築学会において幾つかの指針の作成・取り纏めの仕事を、また、電力関係においても送電設備の耐風設計指針作成の取り纏め役をさせて頂いた。特に、私が委員長を務めさせて頂いた建築物荷重指針 1993 年版の風荷重規定が、2000 年の建築基準法改正にあわせて抜本的に改正された風圧力規定のひな型になり、荷重運営委員会会員の「同じ考え方のもと、法律は最低基準を提供し、学会指針は推奨基準を提供する」という概念の一部が実現されました。これら一連の社会的活動が「平成 16 年度日本風工学会学会賞（功績）」として認められたのは、当初の研究目標に照らしてうれしい限り



写真 1 中銀大厦（2000 年 上海）

でした（詳細は、工学部報告、No.44 を参照されたい）。

なお、この間に刊行した「建築物の耐風設計」（学術書：鹿島出版会）が韓国語訳されて頑張っている、「実務者のための風洞実験法ガイドブック」（日本建築センター）が中国語訳されて頑張っているという想定外の喜びにも恵まれました。

設計法を研究している者として、実建築物の耐風設計に関われるのはこの上ない喜びです。幸い、横浜のランドマークタワー他何本かの高層建築物・タワーの技術指導に参加できましたが、中国においても 2 本の高層建築物に関与できました。北京の京廣中心と上海の中銀大厦です（写真 1 参照）。特に、後者については、構造設計担当の日建設計北村さん（現、東京理科大学教授）から「風洞実験は現地の大学に委託するのでその指導もお願いしたい」といわれ、一層楽しくなりました。上海といえば先ず同済大学が思い浮かぶのですが、当時（1995 年）はまだ建築用大型風洞が設備されていなかったため、風力実験を南京航空航天大学に、風圧実験を復旦大学（理学部）にお願いした。両大学とも建築関係の実験は初めてなので実験方法や変動風力・風圧の所要振動数範囲の違いに戸惑ったようでしたが、すぐにクリアしてくれました。後日、構造設計の妥当性検証のために中国の審査会に出席しましたが、日本建築センターの審査員を務める者として貴重な体験でした。

終わりに

何故か私はほぼ 10 年毎に入院あるいは体調不良を繰り返していますが、学内外の皆様のご支援で今日まで過ごすことができました。しかしこの度は、「学事からの解放」を選択しました。今後は、マイペースの教育・研究生生活を楽しめたら、と思っています。

いろいろ有り難うございました。改めて、心よりお礼申し上げます。



ICT2007 に参加して

米田 征司*

A Report on ICT2007

Seiji YONEDA*

第26回熱電国際会議 (The 26th International Conference on Thermoelectrics, ICT2007)が2007年6月3日(日)～7日(木)の間, "The Harmony between Heat and Electricity"をテーマに掲げて, 韓国の済州島で開催された。熱電国際会議は, 熱を電気にもしくは電気を熱に直接変換する材料およびその応用システムに関する国際会議である。毎年開催され, アメリカ, ヨーロッパ, アジアの順番で開催地が決定されている。済州島は2007年6月27日に世界自然遺産として登録されており, 豊かな自然環境に囲まれた中での開催となった。

発表の総件数は269件であった。その内訳は日本81件, 韓国40件, アメリカ32件, 中国31件, ロシア16件, ドイツ11件, その他の国としてフランス, オーストリア, カナダ, モロッコ, 台湾, タイ, イスラエル, デンマーク, ウズベキスタン, オーストラリア, シンガポールであった。日本からの発表件数が最も多いことが印象的であった。済州島は日本から飛行機で約2時間30分程度と近いこともあると思われるが, 日本における熱電変換の研究が活発であるとも言える。

講演は4日(月)から始まり, まずカーディフ大学のRowe先生と名古屋大学の河本先生によるPlenary Lectureが行われた。その後, ナノ構造材料とテルライド系化合物の2つのセッションに分かれて同時に進行された。17時30分からは1時間ポスター発表(前半)が行われた。筆者らもこのセッションで発表を行った。発表者の大学院生は英語による発表が初めての経験であった。開始直後非常に緊張していたが, 一生懸命丁寧に説明を重ねていくことで, 慣れて行った様子であった。多くの研究者

が本発表に訪れた。熱電材料をモジュール化して行くプロセスで重要となるデータの提示が, その要因になったものと推察する。



写真1 講演会場の様子

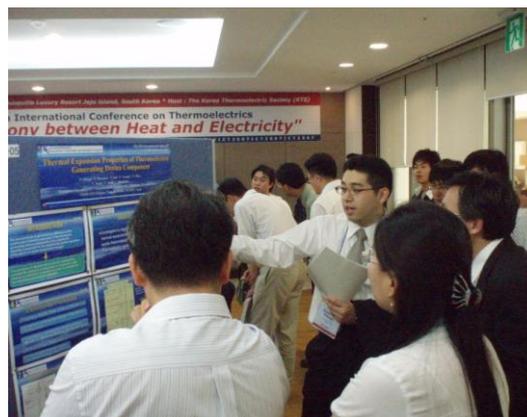


写真2 ポスター発表の様子

*助教 電子情報フロンティア学科

Assistant instructor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers



写真3 展示会の様子



写真4 バンケットの様子

講演と並行して展示会も開催された。6 企業の展示があり、アルバックやフェローテックなど日本からの出展もあった。

5 日（火）は熱電冷却と熱電発電のセッションと酸化物のセッションが同時に開催された。Plenary Lecture は4 件の発表があった。中でも韓国産業資源部の Ki-Jun Kim 氏と東京工業大学の柏木先生が、それぞれ韓国と日本のエネルギー政策について講演された。また、前日同様17 時30 分からポスター発表（後半）が行われた。19 時からバンケットが行われ、カヤグムなどの伝統的な楽器による演奏が行われ、その音色の美しさにとても感動した。

6 日（水）は熱電の理論と現象に関するセッションとスクッテルダイト系化合物のセッションが同時に行われた。午後は Tour & Dinner でバスに乗って済州島を見学した。溶岩洞窟、風力発電施設、海女博物館を訪れたが、とくに溶岩洞窟は非常に幻想的で印象に深く残った。最後に韓国ドラマの撮影に使用された済州民俗村で、バーベキューが行われた。そこでは、筆者らと共同研究を行っている物質・材料研究機構が国際連携を行っている韓国の KONGJU NATIONAL UNIVERSITY の Soon-Jik Hong 教授グループとも親交を深めることができた。今後の研究の発展を目指して行きたい。

最終日となった7 日（木）は午前中にクラスレート材



写真5 Soon-Jik Hong 教授らとの写真撮影

料とその他の材料および新規材料の2つのセッションが行われた。招待講演として湘南工科大学学長の梶川先生による日本の NEDO 熱電プロジェクトの研究成果報告が行われた。講演会場には多数の出席者が集まり、注目を集めていた。また、NASA の研究機関である JPL の Caillat 氏は、宇宙探査機用電源材料について講演された。午前ですべての講演は終了し、ICT2007 は閉会した。

この会議に出席して、筆者と同年代の大学の先生方と研究をはじめとして様々な話題について話し合う機会を得ることができた。このような貴重な経験を糧に、今後も海外でも活躍できるよう、努力して行きたい。



第 21 回先端技術見本市テクノトランスファー

in かわさき 2008 に参加して

-超伝導電子デバイスの磁界特性-

中山明芳* 阿部晋** 渡邊騎道***

Magnetic Characteristics of Superconducting Electronic Devices
Presented in 21st TECHNO TRANSFER in KAWASAKI 2008

Akiyoshi NAKAYAMA* Susumu ABE** Norimichi WATANABE***

テクノトランスファーin かわさき 2008 は 7 月 9 日から 11 日までの 3 日間、川崎市高津区のかながわサイエンスパークでおこなわれました(図 1)。神奈川大学からは、中山研究室の他に、同じ学科の島健研究室からの「アナログ CMOS 集積回路」の発表と、工学研究所での共同研究・プロジェクト研究及び研究用大型装置紹介がありました。島健教授らによる技術シーズ提供セミナーも同じ会場でおこなわれました。今回の先端技術の見本市全体は 5 部門にわかれています。大学からの技術シーズの紹介をおこなう「産学連携部門」では、主に神奈川県下の 16 大学から、鉄材料による二酸化炭素の固定、彫刻刀作業のヴァーチャルリアリティ等の研究発表がありました(図 2)。さらに「オフィスビジネスユース部門」「産業機器関連部門」「環境・福祉・防災部門」「企業ネットワーク部門」の 4 カテゴリーでの 100 を超える会社・団体による新技術・新製品の紹介実演展示がおこなわれました。「環境・福祉・防災部門」での水浄化装置、木造家屋崩壊を防ぐ室外補助柱、「産業機器関連部門」での 50nm 単位で調整可能な精密移動機構、等が印象に残りました。

この先端技術見本市で、我々の研究室からは「超伝導電子デバイスの磁界特性」の研究テーマで、ポスター形式の発表をしました(図 3)。今回報告の超伝導デバイスは超伝導体/酸化膜/超伝導体のサンドイッチ構造を基本デバイスとしたもので、その高感度磁界特性から、心臓

や脳の発生する心磁界や脳磁界の計測が可能です。発表の第一のテーマは、サンドイッチ構造の接合面に平行な 2 方向の磁界 (H_x と H_y 磁界と呼ぶ) を外部から加えたときの、このサンドイッチ構造を流れる超伝導電流の磁界特性が、長方形、三角形、六角形それぞれの接合形状に大きく依存することです。この超伝導電流の磁界変調現象は、スリットを通った光の回折との類推も成り立ちます。第二のテーマは、接合面に垂直な第 3 番目の向き H_z 磁界に対する超伝導電流の磁界変調特性です。面に垂直な H_z 磁界に対する特性は履歴現象もあり、大変複雑であることを見つけました。超伝導体/酸化膜/超伝導体のサンドイッチ構造を、高感度の磁束計やデジタル情報処理装置へ応用するとき、これらの磁界特性はとても大切な基礎特性となります。

本テクノトランスファーでの研究発表のお世話をさせて頂いた神奈川大学産官学連携推進室田口澄也室長に感謝します。

*教授、電子情報フロンティア学科、ハイテクリサーチセンター
Professor, Department of Electronics and Informatics
Frontiers, HAITECH Research Center

**准教授、電子情報フロンティア学科
Associate Professor, Department of Electronics and
Informatics Frontiers

***PD, ハイテクリサーチセンター、電子情報フロンティア学科
Post doctor, HAITECH Research Center, Department of
Electronics and Informatics Frontiers



図1 テクノトランスファーin かわさき 2008(入り口)



図2 産学連携部門の発表会場

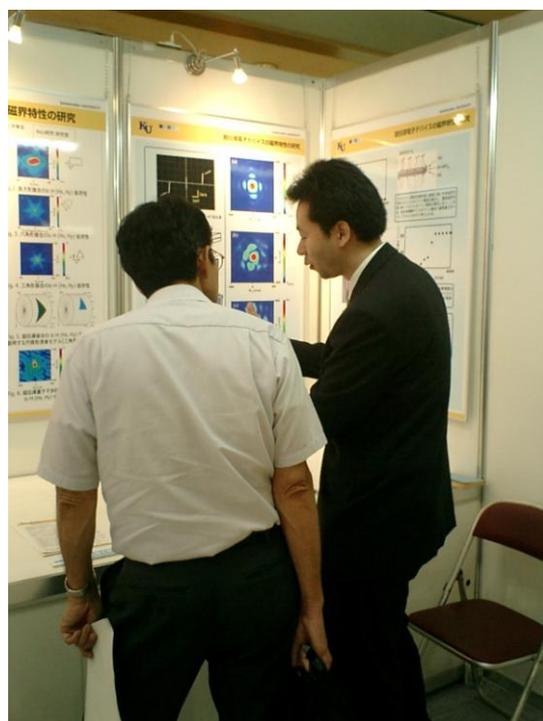


図3 発表会場での説明風景

2007年度（平成19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	室伏 次郎 教 授
物理学教室	三田 一郎 教 授
物質生命化学学科	山村 博 教 授（所長指名）

2) 研究所客員研究員

藤田 正則（2006.11～2010.3）

武田 重喜（2007.10～2009.9）

3) 研究所特別研究員

小川 隆博（2007.10～2009.9）

4) 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19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	2,876	2,866
大型共同設備管理運営	5,051	4,958
工学研究所共同研究*	13,000	12,973
(特)町づくり研究所	2,000	2,002
合 計	22,927	22,799

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者 予算額（千円）

岩田 教 授	4,400
井川 教 授	3,900
堀野 准教授	3,100
西 教 授	1,600
計	13,000

3. 共同研究

平成19年度の工学研究所共同研究を表-2に示す。

表-2

研究題目	研究代表者	共同研究者
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 学(物質生命)	松本 潔(物質生命) 学外者3名
統合ファサードシステムに関する研究	岩田 衛(建築)	大熊 武司(建築) 岩本 静男(建築) 村井 正敏(建築)
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 和夫(建築)	学外者3名
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(情報システム)	森 みどり (情報システム) 学外者2名

4. 講演会

テクノサイエンス連続講演会 (工学研究所・大学院工学研究科共催)

1) 「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

地震と地域・すまい-地震防災を身近に考えるための基礎知識-

第1回 2008年1月15日(火)

地震の揺れと地盤の基礎知識-身近な地震防災の心構え-

神奈川大学大学院工学研究科建築学専攻 荻本孝久

第2回 2008年1月22日(火)

過去の震災に学ぶ-関東大地震の被害と震度分布-

鹿島建設小堀研究所研究部長 武村雅之 先生

第3回 2008年1月29日(火)

来るべき地震災害の様相-地域の震災イメージ-

首都大学東京大学院都市科学研究科 中林一樹 先生

第4回 2008年2月05日(火)

建物被害のリスク軽減策-地域とすまいの防災対策-

大成建設技術センター所長 河村壮一 先生

2) 「科学と工学の最前線」連続講演会

基本テーマ：環境問題の最前線

第1回 11月17日(土)

茨城大学 三村信男 先生「温暖化の環境影響、海岸線浸食」

国立環境研究所 大原利真 先生「越境汚染および黄砂被害」

東京農工大学 高田秀重 先生「環境ホルモン」

第2回 12月15日(土)

明治大学 北野大先生「化学物質の安全管理とリスク評価」

産業総合研究所 山辺正顕 先生「オゾン層破壊とフロンガスの国際規制」

神奈川大学 井川 学「丹沢ブナ林の枯死と大気汚染」

5. 工学研究所公開 -テクノフェスタ in 神大-

日時：2007年10月20日(土) 13時より

内容：

共同研究／プロジェクト研究発表会 4 件 (23 号館 203 号室)
 研究成果ポスター発表・実演展示 47 件 (23 号館 1 階ロビー)
 精密測定室大型装置 (TEM SEM MS XRD XPS ICP 他) の公開 (23-B113)
 招待講演 (23 号館 203 号室)
 日本産業を支える新材料技術 ―トウモロコシから産業部品へ―
 (株富士通研究所 環境技術研究部 部長 西井 耕太 氏
 懇親会 (ラックスホール)

6. 大型装置使用実績

平成 18 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	8	6	152	0	0	0
工藤研究室	8	1	152			
竹村研究室		5				
電気工学科	0	434	4.5	2	0	0
大野研究室		3	4.5	2		
中山研究室		2				
平手研究室		314.5				
山口研究室		114.5				
応用化学科	276.5	354	453	218	280	350
井川研究室		57.5			189	
池原研究室	40		85			
岡本研究室						200
小出研究室		112.5		4.5		90
佐藤(憲)研究室						60
佐藤(祐)研究室		131.5	89.5	47	35	
内藤研究室	201.5		128	125		
引地研究室	10		5		28	
横澤研究室	25	52.5	145.5			
山村研究室				41.5	28	
共通教室	150	83	153	61	0	50
亀山研究室		33.5				50
田島研究室	150	49.5	153	61		
理学部	0	0	43.5	32	0	20
大石研究室				6.5		
森研究室			43.5			20
山口研究室				25.5		
合計時間	434.5	877	806	313	280	420
機械工学科 (%)	1.8	0.7	18.9	0.0	0.0	0.0
電気工学科 (%)	0.0	49.5	0.6	0.6	0.0	0.0
応用化学科 (%)	63.6	40.4	56.2	69.6	100.0	83.3
共通教室 (%)	34.5	9.5	19.0	19.5	0.0	11.9
理学部 (%)	0.0	0.0	5.4	10.2	0.0	4.8

工学研究所だより発刊の2年目に当たって

所長 許 瑞邦

昨年度より始めました年間4回発行の工学研究所だより 昨年度はお陰様で予定どおり発刊することが出来ました。工学研究所と所員各位との意志疎通にささやかですがお役に立ったのではないかと考えております。今年度も 工学研究所だよりで工学研究所の活動状況、運営委員会での承認事項および折々での工学研究所のニュース・依頼事項等をご連絡したいと考えております。ところで 昨年度は 工学研究所所報の発行、共同研究、大型装置の維持管理に加えて所員のみならず社会にお役に立つ研究所・社会に開かれた研究所を実現すべく以下の企画を具体化致しました。

1. 「プロジェクト研究ABC」の提案・承認・募集
2. 工学研究所の公開と公開講演会の企画と実現
3. 工学部オープンキャンパスへの積極的な参加
4. 工学研究所所報の電子出版化の実現
5. 客員研究員 藤田正則氏の招請(第1号)
6. 特別研究員資格の明確化
7. 所長経験者の懇談会(渡部・小嶋・岩田元前所長)

これらの企画の内 取りあえず始めたとの色彩が強い項目もあり、今後これらの企画を実り多い物にすべく所長以下運営委員会で努力致しますので、所員/教員各位のご理解とご協力を強くお願いする次第です。

また 共同研究とプロジェクト研究の応募課題の審査のため 従来運営委員会の下で審査委員会をその都度構成しましたが、今後 継続して応募課題の審査及び成果報告書の吟味の必要性が運営委員会で指摘され従来の審査委員会に替えて工学研究所運営委員会の下で年間を通して活動する研究推進専門部会を立ち上げることに致しました。既に 今年度の研究推進専門部会の専門部会委員として 昨年度各種審査に携わって頂いた所員各位に委員を委嘱致しました。

更に 昨年度末に産官学連携推進室より提案された各種イベントへの出展依頼に関しては 「工学部/工学研究所の両組織が連携して当たる」ことと工学部教授会および工学研究所運営委員会です承しました。現在 工学研究科 研究委員会と連携して長期的な戦略でのイベントへの出展を企画しています。

2007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人の運営委員と本年度から新設された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

委員長：許 瑞邦(所長)

委員：

伊藤 勝悦(機械：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(物質生命化学：研究支援専門部会幹事、工学研究所だより、学内イベント担当)

瀬古沢照治(情報システム創成：

学外への情報発信(メルマガ)企画担当)

鎌田 元康(建築：研究専門部会の検討担当)

三田 一郎(教室系：講演会担当)

山村 博(所長指名：運営委員会幹事、

工学研究所の一般公開担当)

事務局：萩原健司、八高優勝

研究支援専門部会

委員長：田嶋 和夫 副委員長：青木 勇

委員：大野 吉弘 大熊 武司

北岡 正敏 大成 逸夫

幹事：池原 飛之

大型装置管理委員会

委員長：内藤 周次

委員：井川 学 岡本 専太郎 平手 孝士

山村 博 横澤 勉

幹事：山口 栄雄

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。

2006年度(終了)共同研究

- ・ 05-A3 放射線医療・被曝そして宇宙ガンマ線観測にも有効なダイヤモンド・リコイル・テレスコープ(DCRT)の開発 (柏木：情報シ 290万円)
- ・ 06-B1 流体フィルタの性能測定及び評価に関する研究 (浦田：機械 330万円)
- ・ 06-B2 新規貴金属微粒子を用いた導電性インク、導電性ペースト、導電性薄膜の製作 (高山：物生 300万円)
- ・ 06-B3 2足歩行恐竜型ロボットの製作とその歩行理論 (宇佐見：物理 380万円)
- ・ 06-B4 地球惑星科学における濃厚粉流体力学シミュレーション (轟木：物理 100万円)

2007年度（開始）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 390万円)
- ・ **07-A2** 統合ファサードシステムに関する研究
(岩田：建築 440万円)
- ・ **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 160万円)
- ・ **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：情報シ 310万円)

2. プロジェクト研究について

昨年度新設し、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。

- ・ **07-B1** 建築鋼構造のリユースシステムに関する研究
(岩田：建築 3年)
- ・ **07-C1** 町づくり研究所 (西：建築 2年)
- ・ **07-C2** 大気環境化学研究所 (井川：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。

2006年度 第12回（2月28日開催）

- ・ 工学研究所規則の一部改定（学長依頼）について
- ・ 産官学連携関係の外部イベントについて
- ・ 大型装置管理委員会の報告
- ・ 来年度の企画について

2007年度 第1回（4月18日開催）

- ・ 所長指名の運営委員について
- ・ 平成19年度予算について
- ・ ASIXの廃棄について
- ・ TEM, XPSの移管依頼について
- ・ 質量分析室の鍵の管理について
- ・ プロジェクト研究の募集について

2. 所員会議報告

2月14日開催の第2回、3月5日開催の第3回所員会議にて「工学研究所規則の一部改定」をお認めいただきました。内容については以下の通りです。

1) 職名の変更

助教授、専任講師を准教授、助教に変更

2) 特別研究員の内容変更

- ・ 設置の目的を「研究者育成」から「事業を推進するため」に変更
- ・ 該当者を神奈川大学大学院卒以外を認める
- ・ 博士後期過程修了と同等と認められるものを加える

3) 所長指名による運営委員を追加

任期1年、定員は若干名の所長指名の運営委員を増員

3. 2007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	13,000,000円
大型共同設備運用	4,700,000円
研究所運営	2,837,000円

4. 工学研究所所報原稿の募集

所報30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19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4月27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 6月1日（金）

ヒアリング予定 6月19日（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3回にわたる委員会での議題は以下の通りです。

2006年度 第9回（2月21日開催）議題

- 1) 客員教授制度について（検討）
- 2) プロジェクト研究所について（検討）
- 3) 研究費の不正使用防止について（検討）
- 4) 共同研究奨励助成金及び学術褒章について（報告）

2006年度 第10回（3月14日開催）議題

- 1) 客員教授制度について（承認）
- 2) プロジェクト研究所について（承認）
- 3) 神奈川大学研究倫理綱領について（承認）
- 4) 2007年度文部科学省補助金（大型機器等）の予算について（報告）
- 5) 日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金について（報告）

2007年度 第1回（4月18日開催）

- 1) 昨年度の活動総括
- 2) 本年度の活動予定
- 3) 国内研究員受入れに関する規程の問題点と改正案について
- 4) 競争的研究資金に係る間接経費の取扱について

7. 競争的資金の獲得の報告

プロジェクト研究B(外部研究資金を獲得して実行する研究)を実行中の建築学科の岩田教授及び藤田客員研究員が申請した科研費基盤B(3年間1330万円)が認可されましたのでお知らせ致します。



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

2007年8月7日 発行 2007-No. 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

共同研究とプロジェクト研究について

工学研究所では所員から共同研究とプロジェクト研究を募集しています。既にご承知の所員も多いとは思いますが、本稿では改めてこれらについて紹介します。

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)の研究期間は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。それに対して(B)の研究期間は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、工学研究所運営委員が各学科・教室の希望を取りまとめて11月初頭までに運営委員会に報告します。その後12月初旬までに研究テーマと採択件数、助成額を決定することになります。採択にあたっては(A)を共同研究(B)よりも優遇し、1つの研究に重点配分することも厭わないことになっています。

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)は「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)は「外部研究資金を獲得して実行する研究」です。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)は「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月末と11月末)受け、審査委員会のヒアリングの上採択を決定します。

共同研究とプロジェクト研究に関して、ここでは説明しきれなかった点も多くあります。

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。

「工学研究所公開」 ～テクノフェスタ in 神大～

先日の所員会議でもご報告いたしました、工学研究所の研究成果・ポテンシャルを広くアピールすることにより、新たな企業との共同研究の芽をそだてる一助とするために、オープンキャンパスや神大フェスタとは別に工学研究所を公開いたします。日程、内容等は以下の通りです。所員の皆様にご協力頂きますようお願い申し上げます。

開催月日：2007年10月20日(土)

場 所：横浜キャンパス23号館内

プログラム：

- 工学研究所プロジェクト研究・共同研究発表会
- 招待講演 講師：西井耕太氏 (株)富士通研究所
仮題「とうもろこしからノートパソコンの筐体へ」
- 精密測定室の公開
- 研究成果展示

レーザーイオン化飛行時間型(MALDI-TOF)質量分析装置

これまでの質量分析装置は分子蒸気が高エネルギーの電子流を当て、電子衝撃の結果を質量/電荷(m/z)に基づいて分離された正イオンのスペクトルとして記録していた。しかし、このイオン化法では低分子はばらばらに分解し、測定化合物の分子イオンピーク(化合物の分子量に相当するピーク)は小さいか、またはほとんど測定できないことが多い。まして分子量の大きいタンパク質のような生体高分子や合成高分子の分子量を測定することは不可能であった。そこで種々のイオン化法が開発され、その中でもレーザーイオン化はイオン化が極めてソフトであり、分子量が10万を超えるタンパク質のような試料でも分子を分解させずにイオン化できる。この装置の開発によって島津製作所の田中耕一博士が2002年ノーベル化学賞を受賞されています。

本学では新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の1996年の独創的産業技術開発促進事業プロジェクト(西久保、中村、横澤)の機器設備としてMALDI-TOF質量分析装置が導入された。まだ日本でも数台しか導入されていない時期であり、ノーベル賞を受賞する前の田中博士が装置の説明に本学に来ている。この約10年間、合成高分子の絶対分子量の測定、高分子末端の同定、および環状ポリマーの同定に威力を発揮してきたばかりでなく、測定が簡便なことから低分子化合物の分子量測定にも広く使われてきた。しかしながら、老朽化が進んで高額な修理の回数が増え、また測定感度も低下して以前測定できた高分子の分子量ピークが現れない場合も増えた。

これに対して平成18年度私立大学大型研究装置助成によって島津製作所製 レーザーイオン化飛行時間型質量分析装置 AXIMA-CFR plus 型(図1)が導入された。この10年間に本装置も改良が進んでいる。具体的には分析管の飛行距離の伸長、



図1 AXIMA-CFR plusの概観

グリッドレス化によるイオン損失の減少、ディジタイザーの高速化、排気系の改善が進み、本機種では分解能は以前の機種の約10倍である。また、感度も向上し、5 fmolの試料を測定できる。測定分子量範囲はたんぱく質の場合、分子量50万まで可能である。このように分解能が向上したことによってこれまで分子量差が2以下の2種の化合物を識別できなかったことが可能になり、さらに多くの種類の化合物の分析ができるようになった。また、

本機種の AXIMA-CFR シリーズは既に 100 台近くの納入実績があり、信頼できる機種と言える。実際に本装置を用いた研究例として、多分岐ポリアミドの分子量測定を以下に紹介する。私たちの研究室では分子量分布の狭い縮合系高分子を、分子量を制御して合成する手法を開発している。これまで反応点が 2 つある AB 型モノマーが、まず開始剤と反応してさらに成長末端に順次反応して重合が進行し（連鎖重合という）、分子量分布の狭いポリマーを与えることを見出している。この重合反応を多分岐構造ポリマーを与える AB 2 型モノマーに応用した結果、ゲルろ過クロマトグラフィーでは分子量分布の狭いポリマーが生成していることが確認できた。次に重合機構を検討した。AB 型モノマーと同様な重合が進行していれば、すべてのポリマー末端に開始剤部位が結合しているはずである。MALDI-TOF 質量分析装置ではポリマー 1 本ずつの分子量が測定できるので、得られたピークの分子量が（モノマーの繰り返し単位）× 重合度 + （開始剤部位）の分子量と一致するかを見た。図 2 にそのスペクトルを示す。期待したとおりピーク間隔はモノマーの繰り返し単位の分子量であり、それぞれのピークの分子量は開始剤部位の結合したポリマーの分子量と良い一致を示した。これによって AB 2 型モノマーも開始剤から連鎖重合が進行していることを明らかにできた。

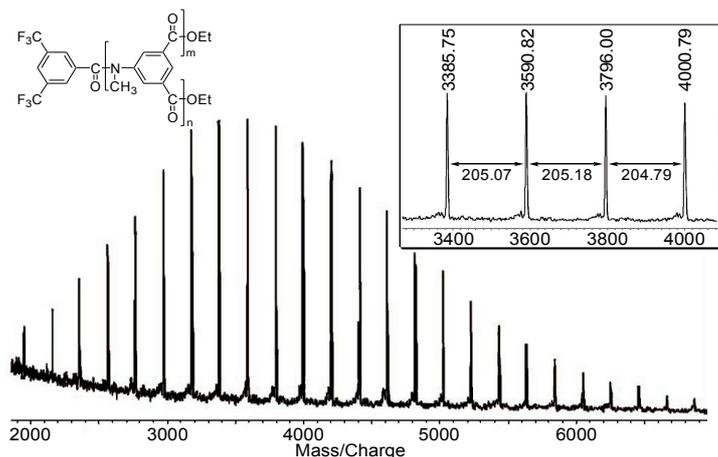


図 2 多分岐ポリアミドの質量分析スペクトル

このように本装置は高分子の絶対分子量を測定できるばかりではなく、これまであまり明確にできなかった高分子末端の構造や環状高分子の同定が行なえる。今後、ますます本学工学部の研究に貢献すると期待される。（文責：横澤）

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。

第 2 回（6 月 6 日開催）

- ・所報 30 号について
- ・講演会について
- ・プロジェクト研究の応募の状況について
- ・客員研究員、特別研究員の申請について
- ・産官学関連外部イベントについて

第 3 回（6 月 27 日開催）

- ・プロジェクト研究審査結果について
- ・工学研究所公開について
- ・共同研究の募集について

- ・テクノトランスファー川崎について
- ・質量分析室の管理について
- ・大気科学研究所からのデスクスペースの要望について
- ・所員会議の議題について

第 4 回（7 月 30 日）

- ・所報 30 号の執筆予定者について
- ・外部イベントの報告について
- ・工学研究所の公開について
- ・大学創立 80 周年記念関連の講演会について
- ・プロジェクト研究（後期）募集について
- ・客員教授規程の運用について

2. 所員会議報告

7 月 11 日開催の第 1 回所員会議にて客員研究員、特別研究員各 1 名、及び工学研究所公開をお認めいただきました。

3. 2008 年度工学研究所共同研究の募集について

2007 年度後期 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。共同研究の詳細については 7 月 26 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。

4. 2007 年度後期工学研究所プロジェクト研究の募集

2007 年度後期 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。詳細については後日ご案内いたします。

5. 産官学関連外部イベントの報告

1) 7 月 11 日（水）から 7 月 13 日（金）に、かながわサイエンスパーク（KSP）にて「テクノトランスファー in かわさき」が開催され、山崎先生（機械）、岡本先生（物生）がご出展いただき、工学研究所も研究所として初めてこのような技術見本市に出展いたしました。山崎先生は「機械部品の価値を高める技術」として 2 日目の技術提供セミナーもご担当いただきました。

2) 9 月 12 日（水）から 14 日（金）、東京国際フォーラム（有楽町）にて開催予定の「イノベーション・ジャパン 2007」に小野先生（物生）が出展することが決定しました。

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。

第 2 回（6 月 20 日開催）議題

- 1) 2008 年度日本私立学校振興・共催事業団学術振興資金の公募について
- 2) 2008 年度文部科学省補助金に係る構想調査・計画調査等の（仮）作成・提出について
- 3) 2008 年度国際交流（学術研究）事業の公募について
- 4) 「不正行為防止体制検討」ワーキング・グループの報告について
- 5) 2007 年度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

第 3 回（7 月 18 日開催）議題

- 1) 各種補助金の周知について
- 2) 「不正行為防止体制検討」ワーキング・グループの報告について

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

2007年10月3日 発行 2007-No. 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

科学研究補助金の現況と申請のお勧め

工学研究科 研究委員会
委員長 青木 勇

申請時期を間近に控え、標記題目の記事を依頼されました。改めて申し上げるまでもなく、様々な研究費のうち、科学研究費補助金は、我が国の研究基盤形成の基幹的経費とされ、国の科学技術振興費の約14.2%、競争的資金の約40.3%を占めています*。平成19年度においては、我が国全体で約11万9千件の研究課題のうち、約4万9千件が採択され、総額約1,478億2千万円（直接経費）が交付されています。新規採択課題については、約9万件の応募に対し、約2万件（採択率22.5%）が採択され、総額約584億7千万円（直接経費）が交付されています**。本学全体では、124件の申請に対し、75件、うち新規は28件（22.6%）が採択され、これを工学部に限ってみると、73件の申請に対し、44件、うち新規は18件（24.7%）が採択されています。本研究費の性格から、その申請・採択状況は、大学の研究活動の状況を示す一指標とされています。本学の採択状況を全国大学の中で見ると、次のようになりに高い水準にあることがわかります。

- (1) 採択件数順位：全国私立大学（除く短大・高専・研究所等）508大学中33位、全国大学（除く短大・高専・研究所等）669大学中109位。
- (2) 採択補助金額順位：全国私立大学（医薬学系を除く）24位、全国大学（国公立大学、国公立研究所、医・薬学系私立大学含む）152位。

平成19年度の工学部教員の申請率は、61.3%（全学32.0%）と他学部 비해最も高く、採択率も上記のように高水準にあります。近年、間接経費が多く研究種目で手当されるようになり、大学総体への寄与も、より大きなものになっています。このような事情で、研究委員会において、採択率向上に役立つ資料を作成してはということになりました。幸い、工学部・工学研究科には、本件に造詣の深い先生方が多数おられます。この先生方にご協力頂き、少し大げさに言えば、採択されるためのコツの如きを1頁にまとめ、関連資料を添え、過日皆様に配布いたしました。釈迦に説法となる先生方が多いことは十分承知しておりますが、平成20年度申請に際し、若手の先生方に幾分かでも参考にして頂ければとの思いであります。

研究活動は教育活動の源泉の一部ともなっており、次年度以降、申請率と採択率の一層の向上が期待されます。

注：* 文部科学省編：平成18年度文部科学白書。

** 平成19年度科学研究費補助金の配分について（速報値）、平成19年4月26日、文部科学省ホームページ。

科学研究補助金 参考資料：科研費採択数の推移

工学研究所運営委員会
工学研究所だより担当 池原 飛之

文部科学省のwebに公開されている資料を用い、学長室にも協力していただき、2003年度から2007年度までの本学の科研費採択件数（継続と新規の合計）の推移を図1にまとめた。2006年度までは60件前後で推移していたが、2007年度には72件に増加したことは特筆すべきである。

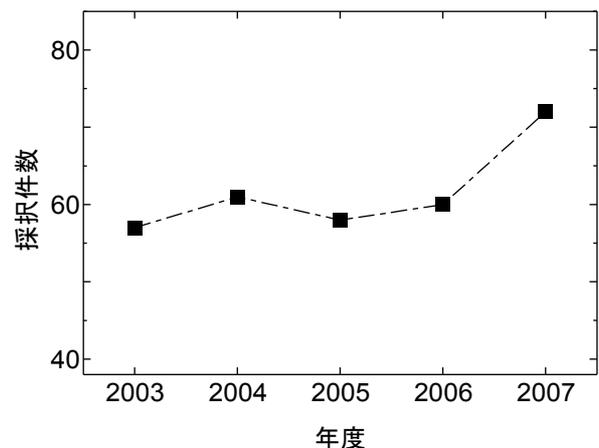


図1：本学の科研費採択件数（継続と新規の合計）の推移
図2には過去5年間にわたる科研費採択件数の、全ての国公立大学における順位と、私立大学の中での順位を掲載している。いずれも短大、高専、その他の研究機関は除いた順位である。2006年度までは全大学で120位程度、全私大では40位程度で推移していたが、2007年度には採択数増加を反映して全大学で109位、私大のみで33位と大きく順位が上がった。

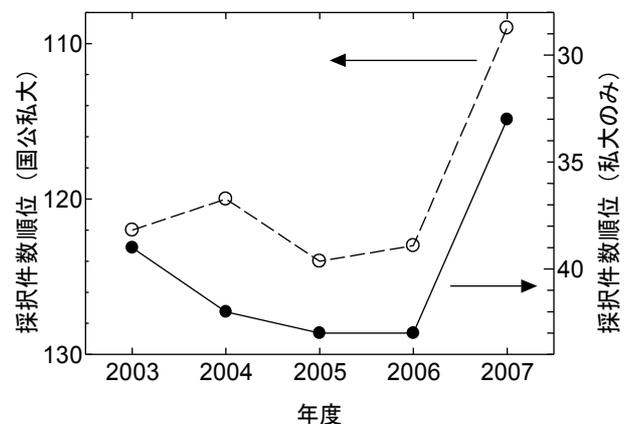


図2：本学の科研費採択数順位の推移

採択件数が上位の大学には医薬系の学部を持つ大学が多く含まれていること、および大学全体の規模が全く異なることから単純比較はできないが、2007年度における

近隣主要私立大学の採択数と順位は以下の通りである。

慶応慶応義塾大学 658 件 (1 位)

日本大学 373 件 (3 位)

東海大学 232 件 (5 位)

神奈川大学 72 件 (33 位)

関東学院大学 16 件 (129 位)

工学系では

芝浦工業大学 44 件 (60 位)

神奈川大学工学部 44 件

武蔵工業大学 41 件 (62 位)

神奈川工科大学 23 件 (100 位)

東京工芸大学 15 件 (141 位)

湘南工科大学 7 件 (229 位)

TEM SEM MS XRD XPS ICP 他

13:00-16:30 研究成果ポスター展示 (23 号館 1 階ロビー)

14:00-16:20 共同研究/プロジェクト研究発表会

(23 号館 203 号室)

16:30-17:30 招待講演 (23 号館 203 号室)

日本産業を支える新材料技術

—トウモロコシから産業部品へ—

(株)富士通研究所 環境技術研究部 部長 西井 耕太 氏

17:40-19:30 懇親会 (会費制、ラックスホールにて)

※詳細については後日パンフレットを配布いたします。

2. 2008 年度工学研究所共同研究の募集について

2008 年度工学研究所共同研究のテーマを募集しております。共同研究の詳細については 7 月 26 日にメール配信した共同研究の募集の案内をご覧ください。

応募の締切は 10 月 12 日 (金) となっております。

審査委員会は 11 月 7 日 (水) を予定しております。

※共同研究継続の場合も継続申請書をご提出ください。

3. 2007 年度後期工学研究所プロジェクト研究の募集

2007 年度後期 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。プロジェクト研究の詳細については後 9 月 12 日にメール配信したプロジェクト研究の募集の案内をご覧ください。

応募の締切は 11 月 24 日 (土) となっております。

審査委員会は 11 月 28 日 (水) を予定しております。

4. 産官学関連外部イベントの報告

9 月 12 日 (水) から 14 日 (金)、東京国際フォーラム (有楽町) にて開催の「イノベーション・ジャパン 2007」に物質生命化学科の小野先生がご出展くださいました。

5. プロジェクト研究 C「町づくり研究所」立ち上げ費用の一部補助

プロジェクト研究の方針を基に「町づくり研究所」の立ち上げ費用の一部を大学に補助していただくように、学長宛てに申請いたしました。この度、学長のご尽力と理事会にご理解いただき、立ち上げ費用の一部の補助が認められましたのでお知らせいたします。

6. 総合学術研究推進委員会「研究委員会」報告

第 4 回 (9 月 19 日開催) 議題

1) 学術研究振興資金について

2) 学術研究振興資金 (若手研究者奨励金) (新規) について

3) 文部科学省の動向 (「研究機関における公的研究費の管理・監査に関する検討会」) について

4) 「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 (実施基準)」必須事項以外の項目について

7. 神奈川大学研究所客員教授規程および神奈川大学プロジェクト研究所規程の施行

神奈川大学研究所客員教授規程および神奈川大学プロジェクト研究所規程が 8 月 2 日より、施行されましたのでお知らせいたします。

1. 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 5 日 (金)** 12:00-13:00 に 1 号館 3 階 308 会議室にて開催されます。
2. 計画調書提出の期限は **11 月 5 日 (月)** 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。
3. 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 年度)**」がございますので、ご活用ください。

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。

第 5 回 (8 月 28 日開催)

- ・工学研究所公開について
- ・客員教授規定の運用について
- ・共同研究/プロジェクト研究の経過について
- ・「暮らしの中のサイエンス」講演の学術フロンティアとの共催の申し込みについて
- ・今年度の講演会の状況について
- ・客員研究員旅費の対応について
- ・工学研究所だよりの内容について
- ・来年度の企画と予算について

第 6 回 (9 月 26 日開催)

- ・今年度の工学研究所の公開の実行について
- ・ICP 発光分光分析装置の更新について
- ・プロジェクト研究 C「町づくり研究所」の立ち上げ経費について
- ・工学研究所だよりについて
- ・テクニカルショウヨコハマの出展者について
- ・自己点検・評価委員について
- ・来年度の企画と来年度新規予算について
- ・長期計画委員会 (時限) の設置について

2. 工学研究所公開

—テクノフェスタ in 神大— のご案内

日時: 2007 年 10 月 20 日 (土) 13 時より

13:00-16:30 精密測定室大型装置の公開 (23-B113)

「テクニカルショウヨコハマ」の紹介

産官学連携推進室

1. 期待されている大学の社会貢献

産官学連携の推進は、科学技術基本法が制定されて、知的財産立国に向けた産官学の行動で本格的にスタートした。大学の役割は教育と研究に加えて大学で培われた「知」を社会のために役立てるといふ社会貢献が、学術会議でも合意形成され、平成18年12月には教育基本法も改正されて大学の社会貢献が明確な役割となった。もちろん「産」の側もキャッチアップ型開発からフロントランナー型開発にシフトするために産学の連携が重要であることを認識するようになった。そして「官」の方もグローバル化した産業の再生と地域経済の活性化、更には21世紀型科学技術と産業の融合を図るためには、産学連携の推進を後押しする施策が必要という考えから「TLO法」や「産業技術協力化法」「大学発ベンチャー1000社計画」「国立大学法人法」によって独法化を進めるなど、矢継ぎ早の政策を打ち出した。地方自治体も例外ではなく、産学連携のリエゾン機能の創設やインキュベーション機能を有した産学共同研究センターの開設、開発補助金の充実など県、市、産業振興の財団、公設試験研究機関などが産学連携の諸施策を積極的に展開し始めることになった。本学も平成12年4月には法人組織の中に「産官学連携推進室」を開設して今日まで研究者の特許取得支援や受託・共同研究契約の支援、産業界とのリエゾン活動に不十分ながらも実績を上げつつある。

2. 拡大する産学連携コーナー

リエゾン活動の一つに大学の研究成果を発表する場があり、「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9回参加することになる。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る。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た。その後、横浜市内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る。昨年のテクニカルショウヨコハマ2007では出展者数308社・団体、出展小間数375小間で、そのうち、産学連携コーナーは22小間となっている。本学は昨年までに延べ31名の研究者が参加しており、最近では大学の中では3小間ともっとも大きな小間となっている。来場者数は3日間で31,085人であり、来場者の内訳を見ると製造業の方が53%で経営者と営業関係、技術関係で65%となっており、かつ、機器の購入に決定権を持っているか決定に関与している方の来場が73%と多く、何か新しいビジネスチャンスを狙ってきている方が多いことが分かる。事実、出展者の81%に引き合いがあったということであり、出展の成果があったという声が多い。また最近では新潟、長野、石川、広島といった県外からの出展も増える傾向にあり、工業技術見本市としては年々充実してきているといえよう。展示以外にも講演会や出展者セミナー、商談会などがあり、産学連携コーナーでもワークショップが17回開催され、本学も毎回参加している。昨年8月に誕生した大学発ベンチャー企業である工学部田嶋教授の「未来環境テクノロジー株式会社」の「三相乳化法」という基本技術は、平成16年のショウで発表したことがきっかけである。

3. 重要さが増している地域産業との産学連携

横浜市に本部キャンパスがあり、県内平塚市に湘南ひらつかキャンパスを持つ本学としては、従来数多くあった大企業との共同研究や受託研究に加え、京浜工業地帯を目の前にし、経済産業省の京浜産業クラスターの中にある大学としては、地域産業との連携は無視できない。というより、わが国を代表する産業の集積地帯の中にある優位性を、今後も生かして社会貢献を行なうとともに返す刀で、教育と研究の充実を図って存在感のある大学に成長することがいま求められていると思う。

4. テクニカルショウ ヨコハマ 2008 のご案内

日時：2月13日(水)から15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：点接触型電子冷却加熱素子の開発 山口教授/チタン合金の熱処理による制振性能向上と金属材料評価 万谷助教/次々世代超高速半導体素子技術 水野教授/大学発ベンチャー未来環境テクノロジー(株)の事業展示及びワークショップ講演「人と環境にやさしい新技術”三相乳化法”」田嶋教授

※本原稿は工学研究所の依頼により執筆されたものです。

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。

第7回(11月8日開催)

- ・2008年度共同研究応募状況
- ・ノーベル賞受賞者小柴先生講演会実施のための準備委員会の提案
- ・工学研究所公開の実施報告
- ・神大テクノフェスタ2008準備企画委員会の構成案および



- び特別予算申請について
- ・2008年度連続講演会特別予算申請について
- ・研究所客員教授規定の運用及び関連者類について
- ・次期所長選挙について
 - 第8回（12月5日開催）
 - ・2008年度共同研究審査結果
 - ・2008年度プロジェクト研究審査結果
 - ・研究所客員教授の運用内規について
 - ・所員会議の開催と議題について
 - ・2008年度工学研究所予算について
 - ・神大テクノフェスタ2008準備企画委員会の報告
 - ・自己点検自己評価について
 - ・次期所長選出・選挙管理委員会の構成について
 - 第9回（1月9日開催）
 - ・所長選挙について
 - ・客員教授の応募の状況について
 - ・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
 - ・自己点検自己評価について
 - ・工学研究だより（07-4号）について
 - ・本年度予算の消化状況

2. 工学研究所公開 -テクノフェスタ in 神大-の報告

- 日時：2007年10月20日（土）
- ◎共同研究／プロジェクト研究発表会（23号館203号室）
 - ◎研究成果ポスター展示（23号館1階ロビー）
 - ◎バーチャル地球史博物館（3号館3階）
 - ◎精密測定室大型装置の公開（23-B113）
 - ◎招待講演『日本産業を支える新材料技術』
—トウモロコシから産業部品へ—（23号館203号室）
（株）富士通研究所 環境技術研究部 部長 西井 耕太氏
 - ◎懇親会（ラックスホール）
- 参加登録者数：学外33名 学内67名

3. 次年度共同研究／プロジェクト研究のテーマ決定

2008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、2007年11月7日（水）に3件、11月28日（水）に1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 2008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)	1,850
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)	5,000
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 学 (物生)	4,500
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 (創成)	1,600
	合計	12,950

2007年度工学研究所プロジェクト研究は2件（プロジェクト研究A：2件）の申請があった。共同研究と同様に審査委員会を結成し、2006年11月28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2件のテーマの採択を決定した。

表2 2008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
A1	熱電発電システム構成のための基礎研究	大野吉弘 (電情)
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	佐藤祐一 (物生)

4. 第2回所員会議報告及び第3回所員会議開催予定

2007年12月12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。

- ◎神奈川大学研究所客員教授規程の運用内規について
- ◎工学研究所客員研究員（6名）の申請について
- また、2月13日の教授会終了後に第3回所員会議を開催いたします。予定議題は以下のとおりです。
- ◎研究所客員教授について
- ◎工学研究所所長選挙

詳細につきましては後日、別途ご案内申し上げます。

5. 小柴昌俊先生講演会準備実行委員会の構成

開催予定日時：2008年7月29日（火）

- | | |
|-------------|-------------|
| 委員長 三田一郎 教授 | 顧問 渡邊靖志 教授 |
| 幹事 大成逸夫 教授 | 委員 日比野欣也准教授 |
| 委員 田村忠久 准教授 | 委員 田沼慶忠 助教 |
| 委員 轟木義一 助手 | |

6. 神大テクノフェスタ2008準備企画委員会の構成

開催予定日時：2008年10月17日（金）

- | | |
|-------------|--------------|
| 委員長 山村 博 教授 | 副委員長 原村嘉彦 教授 |
| 委員 山口栄雄 教授 | 委員 池原飛之准教授 |
| 委員 杉本 剛 教授 | 委員 島崎和司 教授 |
| 委員 三田一郎 教授 | 委員 田口澄也 室長 |
| 委員 花嶋とみ子部長 | |

7. 総合学術研究推進委員会「研究委員会」報告

第5回（10月17日開催）議題

- 1) 学術研究振興資金の提出について
- 2) 本学専任教員以外の研究者にかかる科学研究費補助金の申請について（改訂案）
- 3) 文部科学省の動向（「研究機関における公的研究費の管理・監査に関する検討会」）について
- 4) 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（実施基準）必須事項の文部科学省報告案について

第6回（11月21日開催）議題

- 1) 文部科学省の動向（研究機関における公的研究費の管理・監査に関する検討会）について
- 2) 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（実施基準）必須事項の文部科学省報告案について
- 3) 平成19年度研究設備及び情報処理関係設備に係る緊急募集への対処について
- 4) 2007年度国際交流（学術研究）事業の審査について

第7回（12月19日開催）議題

- 1) 「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」に基づく体制整備の実施状況について
- 2) 不正行為に係る予備調査及び本調査規程について
- 3) 2008年文部省補助金（大型装置・設備等）申請に係る審査について

第8回（1月23日開催）議題

- 1) 不正行為に係る予備調査及び本調査規程について
- 2) グローバルCOEの申請について
- 3) 文部省補助金（大型装置・設備等）申請に係る学内順位について



2007年度 工学研究所・工学研究科共催 連続講演会 実施報告

神奈川大学工学研究所は、平成19年度より大学院工学研究科と共催し、広報事業課と協力して、サイエンスとテクノロジーの魅力を港ヨコハマから発信することを目的として、学会主催の講演会と違った幅広い分野にまたがるテーマの講演会を始めました。具体的には、次の2種類の講演会を行うものですが、いずれも科学技術の知識を広く啓蒙することを目的としています。すなわち、多くの人が関心を持ち一般の人の実生活にすぐ役に立つ講演会としての「暮らしの中のサイエンス」連続講演会と、専門的であるが、分かりやすい講演会としての「科学と工学の最前線」連続講演会です。以下に、平成19年度に実施した講演会の概要を記します。

1. 連続講演会 暮らしの中のサイエンス「地震と地域・すまい」

日時 11月27日～1月29日(火) 14:00～16:00

全4回

会場 神奈川大学みなとみらいエクステンションセンター<KUポートスクエア>

受講料 3,000円 定員 50名 受講者数 44名

内容

第1回 11月27日(火)

・テーマ 地震の揺れと地盤の基礎知識―身近な地震防災の心構え―

講師 荻本孝久 神奈川大学大学院工学研究科教授

第2回 12月4日(火)

・テーマ すまいと地域を地震から守る

講師 河村壮一 大成建設株式会社常務技術センター長兼原子力本部長

第3回 1月22日(火)

・テーマ 今、神奈川で語るべき「関東大震災」

講師 武村雅之 株式会社小堀鐸二研究所副所長

第4回 1月29日(火)

・テーマ 来るべき地震災害の様相―首都の震災イメージ―

講師 中林一樹 首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授

2. 連続講演会 科学と工学の最前線「環境問題の最前線」

日時 11月17日・12月15日(土) 13:00～17:00

全2回

会場 横浜キャンパス 第1回 16号館地下1階 視聴覚ホールB 第2回 16号館2階 セレストホール

受講料 各回1,000円 定員 各回100名 受講者数 各回ともに約80名

内容

第1回 11月17日(土)

・テーマ 地球温暖化の影響予測と対策

講師 三村信男 茨城大学教授 地球変動適応科学研究機関長

・テーマ 東アジアにおける大気汚染・越境汚染の現状と将来

講師 大原利眞 独立行政法人国立環境研究所アジア自然共生研究グループ広域大気モデリング研究室長

・テーマ 環境ホルモン・医薬品による水環境の汚染

講師 高田秀重 東京農工大学大学院共生科学技術研究院環境資源共生科学部門准教授

第2回 12月15日(土)

・テーマ 化学物質の安全性管理

講師 北野 大 明治大学理工学部応用化学科教授

・テーマ オゾン層破壊とフロン化合物の国際規制

講師 山辺正顕 独立行政法人産業技術総合研究所研究コーディネータ

・テーマ 丹沢大山の森林衰退と大気汚染

講師 井川 学 神奈川大学工学部教授

[実施：広報部広報事業課]

2007年度 工学研究所・工学研究科共催 連続講演会 実施報告

神奈川大学工学研究所は、平成19年度より大学院工学研究科と共催し、広報部と協力して、サイエンスとテクノロジーの魅力を活かして港ヨコハマから発信することを目的として、学会主催の講演会と違った幅広い分野にまたがるテーマの講演会を始めました。具体的には、次の2種類の講演会を行うものですが、いずれも科学技術の知識を広く啓蒙することを目的としています。すなわち、多くの人が関心を持ち一般の人の実生活にすぐ役に立つ講演会としての「暮らしの中のサイエンス」連続講演会と、専門的であるが、分かりやすい講演会としての「科学と工学の最前線」連続講演会です。以下に、平成19年度に実施した講演会の概要を記します。

1. 連続講演会 暮らしの中のサイエンス「地震と地域・すまい」

日時 11月27日～1月29日(火) 14:00～16:00 全4回

会場 神奈川大学みなとみらいエクステンションセンター<KUポートスクエア>

受講料 3,000円 定員 50名 受講者数 44名

内容

- 第1回 11月27日(火) テーマ 地震の揺れと地盤の基礎知識―身近な地震防災の心構え―
講師 荻本孝久 神奈川大学大学院工学研究科教授
- 第2回 12月4日(火) テーマ すまいと地域を地震から守る
講師 河村壮一 大成建設株式会社常務技術センター長兼原子力本部長
- 第3回 1月22日(火) テーマ 今、神奈川で語るべき「関東大震災」
講師 武村雅之 株式会社小堀鐸二研究所副所長
- 第4回 1月29日(火) テーマ 来るべき地震災害の様相―首都の震災イメージ―
講師 中林一樹 首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授

2. 連続講演会 科学と工学の最前線「環境問題の最前線」

日時 11月17日・12月15日(土) 13:00～17:00 全2回

会場 横浜キャンパス 第1回 16号館地下1階 視聴覚ホールB 第2回 16号館2階 セレストホール

受講料 各回1,000円 定員 各回100名 受講者数 各回ともに約80名

内容

第1回 11月17日(土)

- ・テーマ 地球温暖化の影響予測と対策

講師 三村信男 茨城大学教授 地球変動適応科学研究機関長

- ・テーマ 東アジアにおける大気汚染・越境汚染の現状と将来

講師 大原利眞 独立行政法人国立環境研究所アジア自然共生研究グループ広域大気モデリング研究室長

- ・テーマ 環境ホルモン・医薬品による水環境の汚染

講師 高田秀重 東京農工大学大学院共生科学技術研究院環境資源共生科学部門准教授

第2回 12月15日(土)

- ・テーマ 化学物質の安全性管理

講師 北野 大 明治大学理工学部応用化学科教授

- ・テーマ オゾン層破壊とフロン化合物の国際規制

講師 山辺正顕 独立行政法人産業技術総合研究所研究コーディネータ

- ・テーマ 丹沢大山の森林衰退と大気汚染

講師 井川 学 神奈川大学工学部教授

[実施：広報部広報事業課]

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頼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、専門家に依頼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

編集委員の先生方および事務局職員のご協力・ご尽力を頂き、工学研究所所報第 31 号を無事刊行する事が出来ました。お忙しいところ、原稿をお寄せ戴きました先生方には厚くお礼申し上げます。研究論文を雑誌に投稿する場合、以前は航空便で送っていましたが、原稿受け取りの連絡・審査員からのコメントと論文の修正・採否の決定などにも航空便が用いられていたため、無駄時間がかかっていました。現在は、インターネットを介して投稿するため、この辺りの事務連絡が瞬時に送受信されてしまいます。場合によっては、投稿日の翌日には論文審査員に原稿が送付されてしまう可能性もあります。このような事情を考えれば、速報性を重視して、論文等を学内の雑誌に掲載する必要性は無くなったように思われます。しかし、産官学と連携して研究活動を行う場合は、教員の研究内容を地域の企業等に紹介する必要があります。この場合、工学研究所所報に研究論文等を発表する事は有用となります。工学研究所所報が中継ぎとなって産学協同研究がスタートするならば、幸いと思っています。

(機械工学科 伊藤勝悦)

工学研究所 所報 (No.31)

工学研究所所長 許 瑞邦

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 伊藤 勝悦 (機械工学科)
委員 山口 栄雄 (電子情報フロンティア学科)
池原 飛之 (物質生命化学科)
山村 博 (物質生命化学科)
瀬古沢照治 (情報システム創成学科)
鎌田 元康 (建築学科)
大成 逸夫 (物理学教室)

SCIENCE REPORTS (No. 31)
of
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Zuihou KYO

Chief Editor Shouetsu ITOU (Dept. of Mechanical Engineering)
Editor Shigeo YAMAGUCHI (Dept. of Electronics and Informatics
Frontiers)
Takayuki IKEHARA (Dept. of Material and Life Chemistry)
Hiroshi YAMAMURA (Dept. of Material and Life Chemistry)
Teruji SEKOZAWA (Dept. of Information Systems Creation)
Motoyasu KAMATA (Dept. of Architecture)
Itsuo OONARI (Dept. of Physics)

神奈川大学工学研究所所報第31号

2008年11月25日 印刷

2008年11月28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

