

工学研究所所報第33号目次

巻 頭 言

技術の進歩、その陽と陰…………… 山村 博… 1

総 説

金属間化合物を用いた固体高分子形燃料電池用電極触媒の開発…………… 松本 太… 2
JIT 生産システムの理論…………… 中島 健一、方 蘇春… 12
有機導体におけるバンド構造と強相関効果…………… 相澤 啓仁… 19
局所地形の影響を考慮した強風マップの作成
…………… 大熊武司、岡田 創、片桐純治、丸川比佐夫、野田 博… 29

共 同 研 究

構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の高性能化に関する研究
…………… 米田征司、山口栄雄、大杉 功、Ravhi S. Kumar… 49
計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発
…………… 山家京子、荏本孝久、曾我部昌史、山本俊雄、佐々木一晋、飯澤清典… 54
超伝導量子干渉計のオンチップ・アレイ化による高感度磁束計の製作
…………… 中山明芳、阿部 晋、穴田哲夫… 64
人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築
—カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善—…………… 堀野定雄… 72

トピックス

植物も週末はお休み—環境に及ぼす人間活動の影響—…………… 白井達也… 81

随 想

神奈川大学とともに過ごした日々…………… 寺尾道仁… 84
人間工学一筋に…………… 堀野定雄… 88
—安心・安全・快適・効率の整合を目指す変革の最前線で—

年 次 報 告…………… 91

神奈川大学工学研究所所報執筆規定…………… 105

編集後記…………… 107

CONTENTS

Preface

Merits and Demerits of New Technology	Hiroshi YAMAMURA	1
---	------------------------	---

Review

Development of Electrocatalysts with Ordered Intermetallic Phases for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells	Futoshi MATSUMOTO	2
Theory of A JIT Production System	Kenichi NAKASHIMA Suchun FANG	12
Band Structure and Strong Correlated Effect in Organic Conductors	Hirohito AIZAWA	19
Design wind speed map considering with effect of topography Takeshi OHKUMA Hajime OKADA Junji KATAGIRI	Hisao MARUKAWA Hiroshi NODA	29

Joint Research

Possibility of Improving Thermoelectric Performance of Chalcogen Compounds by Structural Phase Transition	Seiji YONEDA Shigeo YAMAGUCHI Isao J. OHSUGI Ravhi S. KUMAR	49
Spatial Information Visualization System with for Planning Support Kyoko YAMAGA Takahisa ENOMOTO Masashi SOGABE	Toshio YAMAMOTO Isshin SASAKI Kiyonori IISAWA	54
Fabrication of High-sensitivity Magnetometer by On-chip Arraying of Superconducting Quantum Interference Devices	Akiyoshi NAKAYAMA Susumu ABE Tetsuo ANADA	64
Ergonomics study on the safe and smooth road traffic system at uncontrolled intersections - Improvement of the visual environment at intersections based on installing traffic convex mirrors with enhanced visibility -	Sadao HORINO	72

Topic

Plants also stop Product Activities over the Weekend like Human — The Influence of Human Activities to the Environment —	Tatsuya SHIRAI	81
---	----------------------	----

Essay

On the days I spent with Kanagawa university	Michihito TERAO	84
Well-filled years of my life thorough ergonomics study - At the front of challenge harmonizing risk-free, well-informed, comfort and efficient society	Sadao HORINO	88

Annual Reports of the Institute	91
--	----

Manuscript Submission Instruction	105
--	-----

Letters from the Editors	107
---------------------------------------	-----

巻頭言

技術の進歩、その陽と陰

山村 博*

Merits and Demerits of New Technology

Hiroshi YAMAMURA*

科学とは、生活の役に立つ、立たないとは無関係に自然法則の探索・究明であり、人間が本来持っている根源的な欲望から生まれるもので、時代や環境に左右されない不変的なものであります。これに対して、技術とは、科学をベースとして現在の生活に便利な手段・道具の開発することと理解されます。もちろん、技術が科学の進歩を促すこともあり、両者は切っても切れない関係にあるといえます。20世紀の様々な科学の発見をベースに種々の技術が生まれ、産業が発展してきました。その中で、新しい技術は陳腐な技術を容赦なく蹴散らす宿命を持っており、そのため、消えていった技術もまた数多く挙げられます。特に、磁気テープから、フロッピーディスク、MOディスク、光ディスク、DVDなどの記録媒体の進歩などを見るとその宿命を痛切に感じます。消えていった技術を何とか保護できないものかと考えてしまいます。

一方、技術の進歩に伴い、環境汚染や温暖化の問題が無視できなくなってきました。このように技術には生活に役に立つ陽の部分がとかく強調される反面、弊害をもたらす陰の部分が必ず存在することになります。まさに、薬の効果とその副作用のように。例えば、身近な例としてワープロによる文章作成がその典型的な例として挙げられよう。ワープロで作成した文章は誰にでも読みやすく、文章の推敲を容易にできるという便利さは誰もが認めることです。一方、ワープロのせいかなどありませんが、漢字が読めても、漢字の書き方を忘れ唾然としたことはどなたでも経験したことがあるのではないのでしょうか。その一方で、国際化という名の下で英語の勉強を小学生から始めようなどの意見を聞くと、日本語はどこに行くのかと心配になります。

だからという訳ではありませんが、私どもの研究室では、2～3年前から正月に研究室全員による書き初めを行い、その年の決意を毛筆に託しております。字がうまい、下手には関係なく、ワープロでは味わえない個々の性格と特徴が字体に表れたすばらしい作品を見ると、いたく感銘を受けるとともに、肉筆のすばらしさを再認識しております。

最近の大画面でうつつくしいカラー液晶テレビを見ていると、所詮茶の間の脇役にすぎなかった道具が主役の座にとって代わったあげく、我々の思考過程を左右するのみならず、停止させられるのではという恐怖を感じます。以前話題になったように、納豆が健康に良いということがテレビで放映されると、次の日には納豆が売れきれたなどという話を聞くとその印象はますます強くなります。ヘッドフォンの音楽に身をゆだね、携帯電話でメール交換にいそむ生活は、一人になって深く思索する時間を放棄していることになり、人間としての成長が妨げられることが危惧されます。また、最近のリアルなゲーム映像などを見るにつけ、現実とゲームの世界の区別ができなくなるのではと心配です。そのうち我々がロボットに使われる日も近いのでは、とってしまう。

麻薬類は健康に害をおよぼすからと法律で禁止されている一方、技術については野放しに近い状況のように思えます。携帯電話がらみの犯罪もよく耳にします。一部医学の分野における進歩は命という倫理の問題に深く関わってきております。さらに瞬時に膨大な情報量を処理できるコンピュータやメモリ機能の進歩は個人情報取り扱いなどに神経質にならざるを得ない状況です。

大学でもこういった技術の進歩が地球に、社会に、家庭に、あるいは人間の成長にどのような影響を及ぼすのかを負の部分も含めて真剣に検討する時代にきているのではないかと考える今日このころです。

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



金属間化合物を用いた固体高分子形燃料電池用 電極触媒の開発

松本 太

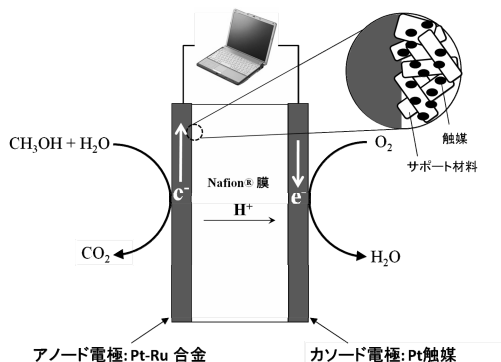
Development of Electrocatalysts with Ordered Intermetallic Phases for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells

Futoshi MATSUMOTO

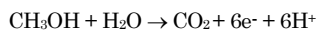
1. 緒言

近年、化石燃料の枯渇、燃料を燃やすことによって引き起こされる大気汚染などのエネルギー・環境問題が注目されるようになり、様々な分野で低炭素社会への移行を目指した技術開発が盛んに行われている^{1,2)}。新しいエネルギー源の開発、エネルギー変換、貯蔵における高効率化が現代の科学者に与えられた大きな課題となっている³⁾。燃料電池の利用は、エネルギーの効率的利用において最も期待できるものの一つと考えることができる。燃料電池は、直接化学エネルギーを電気エネルギーに変える発電機と考えることができ、そのエネルギー変換効

率は90%に近い⁴⁾。火力発電所におけるエネルギー変換効率が40%程度であることを考えると、燃料電池が次世代のエネルギーデバイスとして期待されている理由が理解できる。最も簡単な燃料電池は水素と酸素を用いて発電を行うものであり、水素が燃料として、酸素が酸化剤として働く。つまり、アノードにおいて燃料の酸化反応によって電子が外部回路に流れ、その電子がカソードにおいて酸素と結び付くことにより、電気と水を生み出す⁵⁾。しかし、現在の技術では、純度が高い水素を使用しなければならず、そのため高価で、大きな体積、重量を有する装置を燃料電池システムに付けなければならない問題がある。一方、近年、メタノール、エタノール、ギ酸などの低分子量を有する有機分子（以後、有機低分子と呼ぶ）を燃料とし、電解質部分を固体高分子電解質としたダイレクト固体高分子形燃料電池（図1）が注目を集めている。このタイプの燃料電池では、改質によりメタノールなどから水素を生成させ、その水素を燃料とするのではなく、有機低分子を直接酸化する反応を用いている。これらの液体燃料は、貯蔵・持ち運びが容易なだけでなく、大きな重量および体積エネルギー密度を有している点から考えても、ダイレクト固体高分子形燃料電池は魅力ある次世代電池である^{6,8)}。しかし、経済的および環境的な観点の両方を満足するダイレクト固体高分子形燃料電池の開発のためには、アノードおよびカソード反応（有機低分子の酸化反応および酸素の還元反応）を効率的に進める新たな触媒を見出さなければならない^{9,10)}。本報では、金属間化合物を用いた固体高分子形燃料電池用アノード電極触媒の開発について検討を行った結果について紹介する。電極触媒のナノ粒子化、ナノ粒



アノード反応：



カソード反応：

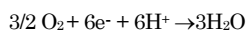


図1 固体高分子型燃料電池の構成図

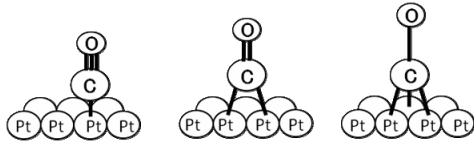


図2 白金電極上へのCOの吸着

電子における有機低分子の電極触媒酸化能、被毒耐性、電子伝導性金属酸化物への電極触媒の担持について検討した結果を示し、従来の電極触媒の結果と比較することにより、金属間化合物の有効性を紹介する。

2. 電極触媒と金属間化合物

燃料電池におけるエネルギーの損失の一つの理由は、有機低分子の酸化反応が非常に遅いため、電極反応に大きな過電圧を要することが挙げられる。様々な金属、化合物の中で、白金(Pt)が小さい過電圧を示す電極触媒として知られている。しかし、Ptでは、有機低分子の酸化反応において中間体として生成する一酸化炭素(CO)によって、その表面が被毒され、触媒能が急激に低下する現象が起こる。この被毒が燃料電池の実用化において改善しなければならぬ重要な問題となっている。被毒はCOがPt表面に強吸着することによって起こる現象であり、Ptをそのまま触媒として用いている場合におおげられない現象である(図2)¹³⁾。これまでに、このCO被毒を軽減する方法としてPt-Ru合金を用いることが提案されている^{12,14)}。Pt-Ru合金においてはPt上に吸着したCOがRu上に生成される触媒種OHにより、低い電位で酸化されることで、Pt上から除去され、被毒が軽減されると考えられている^{15,17)}。しかし、Pt-Ru合金の表面では、Pt原子が集まった領域とRu原子が集まった領域が分

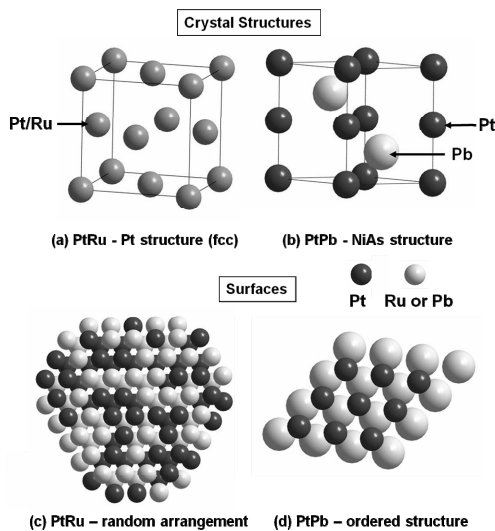


図3 Pt-Ru合金とPtPb金属間化合物の結晶構造と表面構造

散しており、効率的にCOの触媒酸化反応が起こるように原子レベルでの分散が達成できていない(図3(a), (c))。また、酸化反応中に徐々にRu原子が合金内部に移動し、長期間の使用においては、触媒表面にPtがより多く露出した状態に変化して、被毒され易い表面になってしまうことで、触媒能が低下してしまうという問題が挙げられている。

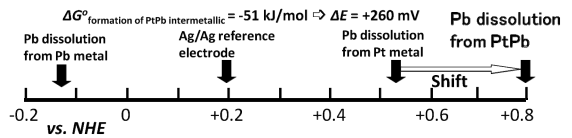


図4 Pbの溶解電位

金属間化合物は、結晶格子中において、2あるいは3種類の元素が規則正しく配列しており(図3)、規則正しく配列することにより、大きな安定化エネルギーが生じる。金属間化合物は、特定の元素の組み合わせで形成する。例えば、白金鉛(PtPb)の場合の例を図3(b)および(d)に示す。PtPb金属間化合物では、Pt原子間の距離はPb原子が格子間に挿入されるために増加する。その結果、Pt原子間にまたがって吸着するタイプのCO吸着(図2)は起こりづらく、CO被毒が軽減されると考えることができる。また、結晶構造が金属間化合物を形成することによって安定化しているため、長時間の使用によって結晶構造が変化する問題もほとんどない。電気化学的な観点から見てみると、

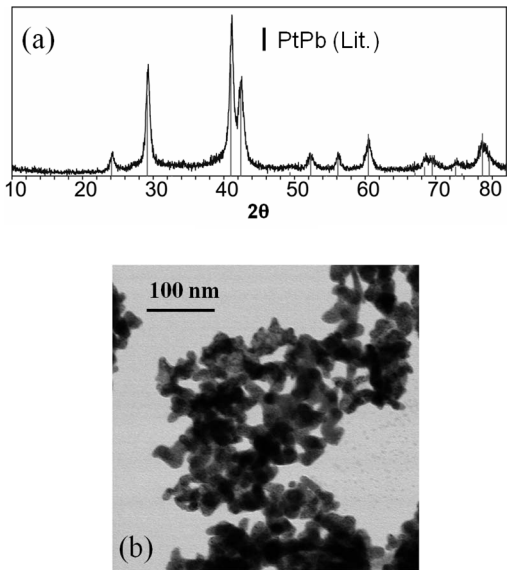
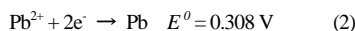
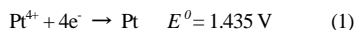


図5 NaBH₄還元剤で合成されたPtPb金属間化合物のXRDスペクトル(a)およびTEM像(b)

Pb は還元性溶液中において、電気化学的に溶解しやすい金属であり、これまで Pb を用いた化合物が触媒として考慮されてこなかったのは、この理由のためである。しかし、金属間化合物の生成による安定化の効果により、Pb が電気化学的に溶出する電位が大きく正電位側にシフトし、有機低分子の酸化反応が起こる電位範囲においても PtPb 触媒として安定に働くことができる。この点が金属間化合物を利用する利点として強く主張される点である (図 4)。Pb は還元性溶液中において、 -0.13 V (vs. *NHE*) 付近で溶解する。一方、Pt 上に散りばめられた Pb 原子 (アドアトム Pb) の場合は Pt と強く相互作用するので、安定化し、溶解電位が正電位側にシフトすることで、その値は約 0.53 V である。さらに金属間化合物の形成による自由エネルギー変化は、約 -51 kJmol^{-1} であり、この安定化は $+0.26\text{ V}$ の溶解電位のシフトに相当する。つまり金属間化合物中の Pb は約 0.8 V 付近まで溶解することがない。

3. 金属間化合物ナノ粒子の合成とキャラクタリゼーション

金属間化合物ナノ粒子の合成には、化合物を構成する金属の塩を還元剤によって金属化する方法を用いた。例えば PtPb 金属間化合物の場合、 H_2PtCl_6 と $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ を NaBH_4 によって還元した。Pt と Pb の酸化還元電位を考えてみると、以下のような値になる。



この二つの金属イオンの大きな酸化還元電位の差は、 Pt^{4+} イオンが容易に還元されやすいことを示しており、通常、Pt と Pb が 1 対 1 に反応することはなく、Pt の比率が非常に大きい化合物が生成してしまう。Pt と Pb が 1 対 1 の金属間化合物を作るためには、2 つのイオン濃度を同

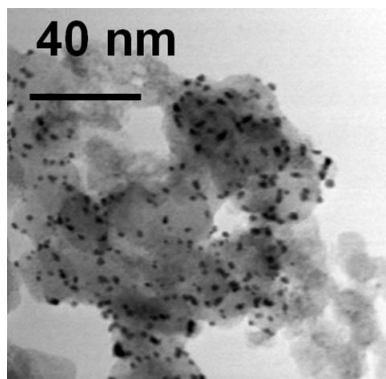


図 6 高表面積カーボン(Vulcan)上に固定された PtPb 金属間化合物の TEM 像

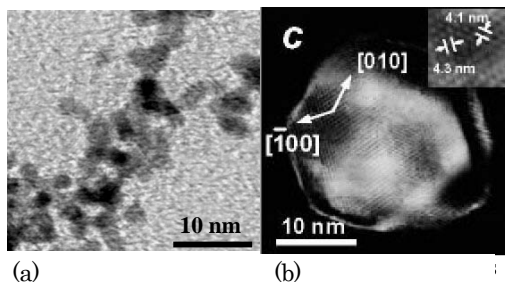


図 7 Pt_3Ti 合金 (a) および Pt_3Ti 金属間化合物 (b) の TEM 像

じとし、強力な還元剤を用いて反応がイオンの拡散によってのみ支配される状況を作らなければならない。そこで本合成においては、還元能力が強い NaBH_4 などの還元剤を用いて二つのイオンを還元する方法を検討した¹⁸⁻²¹⁾。

NaBH_4 によって H_2PtCl_6 と $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ を還元することによって生成した PtPb 金属間化合物は、平均粒子径 12 nm 、表面積 $15\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ のナノ粒子であった。XRD から結晶構造、EDX から元素比を調べることにより、目的とした PtPb 金属間化合物が生成していることを確認した(図 5)。さらに、 NaBH_4 還元剤を用いる方法による

表 1 様々な合成法で調製した PtPb および PtBi 金属間化合物の電極触媒能の比較. 溶液: 0.5 M ギ酸 + 0.1 M H_2SO_4 (窒素雰囲気下), 電位掃引速度: 10 mVs^{-1} , 電極回転速度: 2000 rpm .¹⁸⁻²¹⁾

Nanoparticle	Metal precursors and reducing agent	Surface area (m^2/g) and Domain (nm)	Onset potential (V)	Activity at 0.2 V ($\text{mA}/\mu\text{g}$) and (mA/cm^2)
PtPb	$\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15	-0.2	0.44
	$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}, \text{NaBH}_4$	12		
PtPb	Dimethyl(1,5-cyclooctadiene) Pt, Pb(II)-ethylhexanoate, sodium naphthalide	17.5	-0.2	0.35
		14		
PtPb	$\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{Pb}(\text{MOEAA})_2, \text{NaBH}_4$	2.4	-0.2	0.132
		10.6		
PtBi	$\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{Bi}(\text{MOEAA})_3, \text{NaBH}_4$	8.6	-0.2	0.048
		13		
PtBi	$\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O} (\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ Ethylene glycol	2.1	-0.16	0.0069
		19		
Pd (Aldrich)	-	50	-0.2	0.75 1.5
Pt (HSPEC TM 1000)	-	27	+0.1	0.0016 0.05
Pt-Ru(E-TEK)	-	107	+0.15	0.0057 0.003

PtBi 金属間化合物の合成, ポリオールを還元剤と溶媒の両方の役割として用いる方法による PtBi 金属間化合物の合成などの検討も行っている^{18,21)}。いずれの場合も非常に強い還元剤を使用することにより, 金属の比率が 1 対 1 の金属間化合物が合成できていることを確認している。また, 燃料電池の触媒は, 白金の利用効率を上げるため, 数ナノメートル径の粒子を比表面積が大きなカーボン材料に固定し, Pt 粒子の凝集を防ぐ方法を通常用いている。PtPb 金属間化合物においても比表面積が大きなカーボン材料である Vulcan 上に平均粒子径が 10 nm 以下のナノ粒子を固定できることを確認している (図 6)。

Pt₃Ti は金属間化合物の中で安定化エネルギーが大きな物質の一つである。しかし, Ti は酸素との親和性が強いいため完全な Pt₃Ti 金属間化合物のナノ粒子の合成は困難とされてきた。我々は, 十分に水分, 酸素を除去した反応条件においてナトリウムナフタライドの非常に強い還元性を用いることにより, Pt₃Ti 金属間化合物のナノ粒子合成に成功した。図 7 に合成した Pt₃Ti 合金と Pt₃Ti 金属間化合物の TEM 像を示す。数ナノメートル径を有する Pt₃Ti 合金 (a) を 500°C で熱処理することによって金属間化合物 (b) を得ることができた。熱処理によって粒子径が大きくなっているが, Pt と Ti の元素比が 3:1 である金属間化合物が合成できていることを XRD, XPS などにおいて確認できている²²⁾。

4. 金属間化合物の電極触媒能

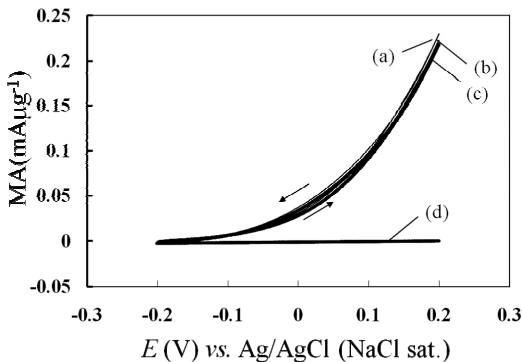


図 8 PtPb 金属間化合物ナノ粒子修飾グラシーカーボン(GC)電極におけるギ酸の酸化反応の検討。(a) 1st サイクル, (b) 2nd サイクル, (c) 3rd サイクル, (d) ギ酸が入っていない溶液中で測定した結果。溶液: 0.5 M ギ酸 + 0.1 M H₂SO₄(窒素雰囲気下), 電位掃引速度: 10 mVs⁻¹, 電極回転速度: 2000 rpm。²³⁾

高価な電極触媒の利用効率を向上させるために, 従来 Pt 系触媒などでも行われているナノ粒子の合成法を金属間化合物においても検討した。表 1 に様々な金属イオン錯体, 還元剤, 溶媒を用いて合成した金属間化合物ナ

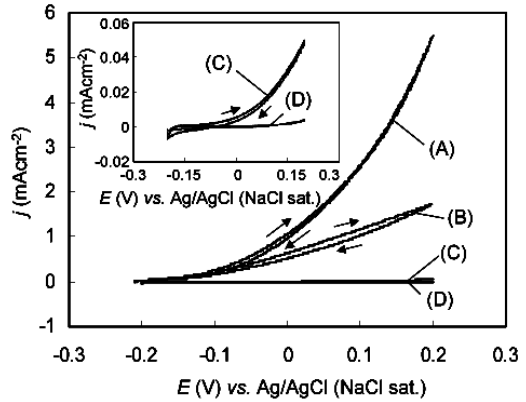


図 9 PtPb 金属間化合物(A), Pd(B), Pt-Ru 合金(C)および Pt(D) ナノ粒子修飾 GC 電極におけるギ酸の酸化反応の検討。溶液: 0.5 M ギ酸 + 0.1 M H₂SO₄(窒素雰囲気下), 電位掃引速度: 10 mVs⁻¹, 電極回転速度: 2000 rpm (電流密度は, BET 表面積測定による触媒粒子表面を用いて計算した)。²³⁾

ノ粒子の電気化学測定結果を示す(ここで mA μg⁻¹ は, PtPb 触媒 1 μg⁻¹ を用いて得られた電流値を意味する)。ギ酸の酸化反応において, PtBi, PtPb の電極触媒は, 従来の Pt, Pt-Ru 触媒に比べて大きな触媒活性を示していることが分かる。触媒性能は観察される電流値の大きさだけでなく, 酸化電流が観察され始める電位 (Onset Potential) が性能の指標として良く使われる (Onset Potential がより負にあることにより, 燃料電池のセル電圧はより大きくなる)。PtPb の Onset Potential は -0.2 V であり, Pt, Pt-Ru に比べて約 0.3 V 負側に位置している。PtPb は, ギ酸の酸化反応において最も良い電極触媒と言われている Pd に比べても, 大きな触媒活性を示していることが分かる。また, 金属イオン錯体, 還元剤の選択においては, H₂PtCl₆, Pb(C₂H₃O₂)₂, NaBH₄ の組み合わせが最も大きな酸化電流を示すことが明らかになった²³⁾。図 8 は, PtPb 金属間化合物ナノ粒子を用いてギ酸の酸化反応の検討を行ったサイクリックボルタモグラムである。このボルタモグラムから PtPb 金属間化合物上でのギ酸の酸化による電流はサイクルを繰り返してもほとんど変化しないことが観察され, 電極触媒能が保持されていることが分かる。ギ酸を加えていない溶液中で得

られたサイクリックボルタモグラムは検討を行った電位範囲において酸化・還元電流を示していないことから、PtPb ナノ粒子自体が酸化・還元電流を与えないことを示しており、例えば、図8の(a)と(d)の差がギ酸の酸化電流に相当する。故に、ナノ粒子を用いて観察された電流値が、そのままギ酸の酸化反応に関する電流値と考えることができる。図9は、PtPb 金属間化合物(A), Pd(B), Pt-Ru 合金(C), Pt(D)ナノ粒子におけるギ酸の酸化反応に関するサイクリックボルタモグラムをまとめたものである。上述したように、従来、Pd がギ酸の酸化反応において最も性能の高い電極触媒であることが知られている。このPd に比べて PtPb 金属間化合物は2倍以上の酸化電流を示している。正電位方向への電位掃引において得られたボルタモグラムと負電位方向への電位掃引でのボルタモグラムにヒステリシスが PtPb において観察されないことは、この酸化反応中に触媒表面が被毒されていないことを示している。Pd の場合にはヒステリシスがみられ、被毒により触媒能が低下していることが読

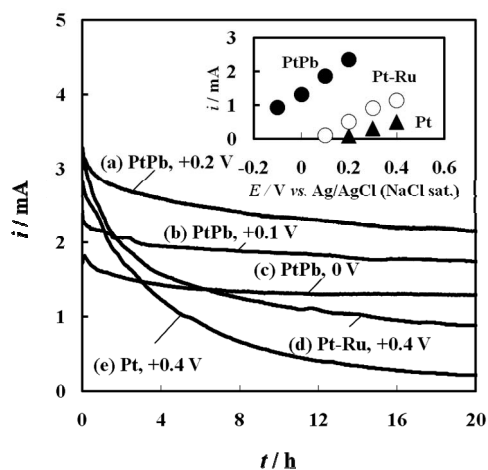


図10 PtPb 金属間化合物(a-c), Pt-Ru 合金(d), Pt(e) ナノ粒子におけるギ酸の定電位酸化における電流の時間変化。挿入図：定電位酸化と20時間後の酸化電流値の関係。溶液：0.5 M ギ酸 + 0.1 M H_2SO_4 (窒素雰囲気下), 電位掃引速度：10 mVs^{-1} , 電極回転速度：2000 rpm。

み取れる。長時間の使用による触媒活性の保持能力は触媒の持つべき重要な因子である。そこで、各触媒においてギ酸の酸化電流値の時間変化を長時間観察した(図10)。Pt, Pt-Ru 合金などの従来の触媒は、定電位酸化において急激に電流値の減少が起こり、20時間後におい

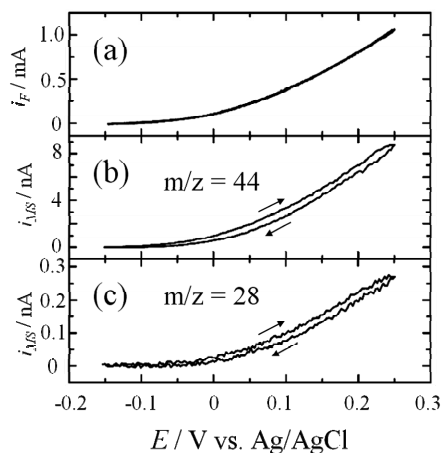


図11 PtPb 金属間化合物ナノ粒子修飾GC電極におけるギ酸の酸化に伴う生成物質の質量分析測定結果。(a)ギ酸のサイクリックボルタモグラム, (b) CO_2 の検出, (c) CO の検出。溶液：0.5 M ギ酸 + 0.1 M H_2SO_4 (窒素雰囲気下), 電位掃引速度：10 mVs^{-1} 。

ては初期電流の1/3以下に低下してしまっている。これらの減少は、ギ酸の酸化反応において中間体として生成するCOが触媒表面に吸着し、触媒の活性点がブロックされることによる。一方、PtPb 金属間化合物においては、電流値の減少がPt, Pt-Ru に比べて明らかに小さいことが分かる。これは反応中間体としてCOが生成していないか、あるいは生成しても触媒表面に強く吸着することがない(触媒反応を阻害することがない)ことによると考えることができる。これらの反応機構を検討するために電気化学質量分析測定を行った(図11)。この方法は、電気化学測定を行いながら、同時に電気化学反応で生成してきた物質を質量分析装置に導入することによって、電極反応生成物質を“その場”測定することができる²⁴⁻²⁵⁾。本研究においてはギ酸の酸化電流と同時に二酸化炭素(CO_2)とCOの検出を行った。ギ酸の酸化電流値が観察され始めるに従って(a), CO_2 (b) およびCO (c) の検出電流値も観察され始める。しかし、検出電流値を比較すると CO_2 の検出電流が20倍以上大きいことが分かる。この結果は、ギ酸の酸化反応の生成物が CO_2 であり、中間生成物質としてCOがほとんど生成していないことを示している。ギ酸が CO_2 に直接酸化されることからCOの強吸着による反応の阻害が起こらない(図12)ため、図10において見られるような長時間のギ酸の酸化反応における酸化電流の減少がPt, Pt-Ru に比べて小さい結果が得られたと考えることができる。なぜPtPb

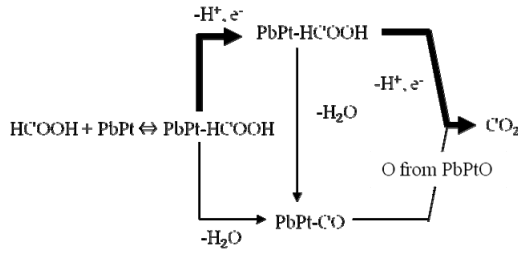


図 12 PtPb 金属間化合物ナノ粒子におけるギ酸の酸化反応機構

金属間化合物において反応経路が変わるのかについては、今後の検討が必要である。

Pt₃Ti は、金属間化合物相の形成において極めて大きな安定化を示すことからPtPb, PtBi に比べて安定表面構造が持続できる。このことは、長時間の使用においてもナノ粒子表面の金属間化合物構造が変化せず、高い活性を長時間保つことが期待できる。このナノ粒子の調製においては、Pt₃Ti の合金粒子の合成後に金属間化合物相を形成させるためアニール工程を要した。これにより平均粒子径 25 nm の金属間化合物粒子を得た²²⁾。この二つのPt₃Ti, つまりアニール処理前の合金とアニール処理後の金属間化合物相を利用することにより、ギ酸の電極

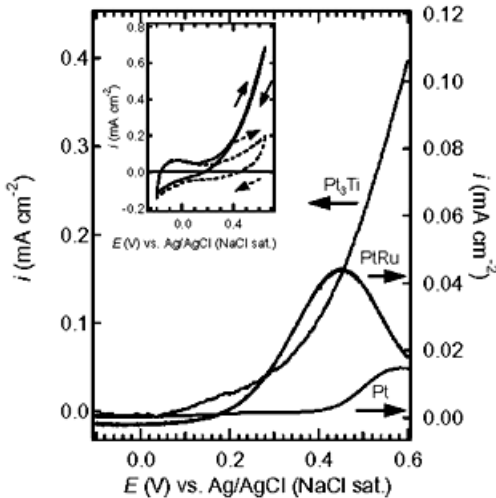


図 13 Pt₃Ti 金属間化合物, Pt-Ru 合金および Pt ナノ粒子修飾 GC 電極におけるメタノールの酸化反応. 溶液: 0.5 M メタノール + 0.1 M H₂SO₄(窒素雰囲気下), 電位掃引速度: 10 mVs⁻¹, 電極回転速度: 2000 rpm.

触媒酸化反応の検討を行い、金属間化合物の有効性について考察した。Pt₃Ti ナノ粒子において、原子が規則正しく配列していない合金相に比べ、金属間化合物相を有するナノ粒子の方が 10 倍程度高い触媒能を示すことが観察された。この結果は、ギ酸の電極触媒酸化反応における金属間化合物表面相の有効性を示している。同様の結果がメタノールの酸化反応においても確認されている²²⁾。従来、メタノールの酸化反応は、Pt-Ru 合金が最も高い活性を示すことが知られている。合成された Pt₃Ti 金属間化合物ナノ粒子は、電流値の立ち上がりの電位は多少正側にシフトしているものの、電流値は従来のものより 10 倍近い大きな酸化電流値を示している(図 13)²²⁾。ギ酸、メタノールなどの有機低分子の酸化反応を触媒する物質は、これまで酸化反応の中間生成物である CO の触媒表面への強吸着により、触媒活性が急激に減少するこ

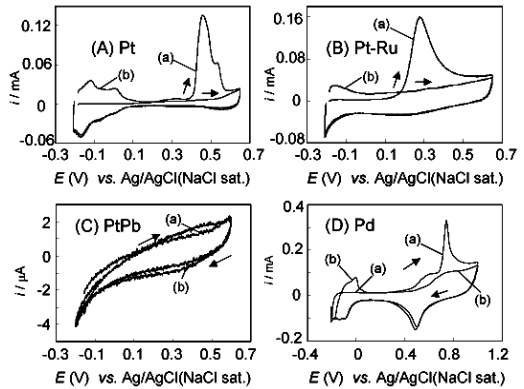


図 14 Pt(A), Pt-Ru(B), PtPb 金属間化合物(C), Pd ナノ粒子における CO のストリッピングボルタモグラム. (a) CO 飽和 H₂SO₄ 溶液にナノ粒子を曝した後, (b) CO 飽和 H₂SO₄ 溶液にナノ粒子を曝す前. 溶液: 0.1 M H₂SO₄(窒素雰囲気下), 電位掃引速度: 10 mVs⁻¹.²³⁾

とが問題であったが、Pt₃Ti は、CO が吸着しない表面であることを CO の吸着・脱着実験によって確認している²²⁾。以上の結果から、Pt₃Ti 金属間化合物が電極触媒酸化反応における三つの要件、高活性・活性の持続性・被毒に対する耐性を有していることを確認した。

5. 金属間化合物電極触媒の耐性

従来、固体高分子形燃料電池用アノード触媒は燃料を酸化する際に反応中間体として生成する CO, 燃料中に含まれる硫黄化合物, 塩化物イオンなどによって被毒され、触媒能が急激に低下する。これらの挙動が燃料電池の実

用化の大きな障壁となっている。故に、開発される新しい触媒には、燃料を高効率で酸化する電極触媒能と同時に、これらの被毒物質に対する耐性を有することが非常に重要である。図14はPt, Pd, Pt-Ru合金およびPtPb金属間化合物ナノ粒子のCO被毒耐性を検討した結果である。図中(a)のボルタモグラムは、CO飽和H₂SO₄水溶液にナノ粒子を曝した後、ボルタモグラムを測定したものである。(b)のボルタモグラムは、ナノ粒子表面をCO飽和溶液に暴露しない場合のボルタモグラムである。ボルタモグラム(a)と(b)の違いが触媒表面に吸着しているCOの酸化を示す電流に相当する。つまり、もし触媒表面にCOが吸着する場合、吸着したCOが酸化されることによるストリッピングピークが観察される。Pt, Pt-Ru, Pd

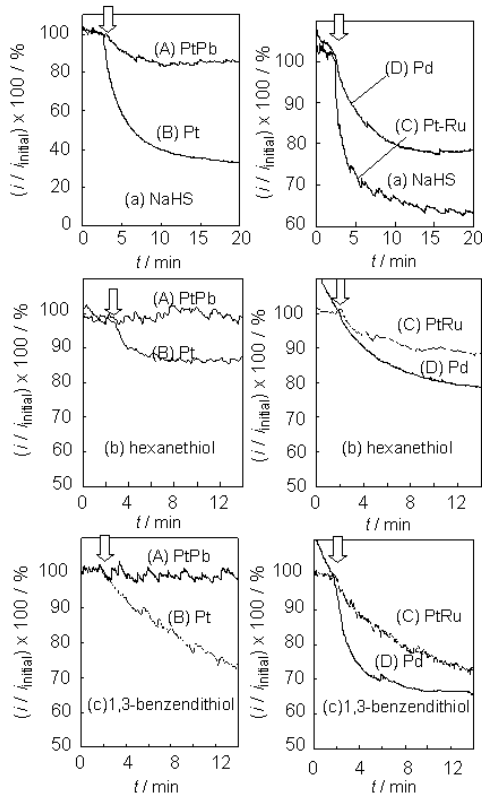


図15 PtPb金属間化合物(A), Pt(B), Pt-Ru合金(C)およびPd(D)ナノ粒子における硫黄化合物被毒耐性試験結果。ギ酸の酸化反応中に矢印の時点において硫黄化合物をギ酸溶液中に注入した。溶液：NaHS (2 ppm), Hexanethiol (20 ppm), 1,3-benzendithiol (6 ppm), 0.5 M ギ酸 + 0.1 M H₂SO₄ (窒素雰囲気下), 電解電位 0.4 (B), 0.2 (C), 0 V (A, D), 電極回転速度：2000 rpm。

ナノ粒子の場合、明確なCOのストリッピングピークが観察されており、COがこれらの触媒表面に吸着することが分かる。ストリッピングピークが観察される電位を比較すると、Pt-Ru合金は低い電位でCOが酸化されており、Pdは最も高い酸化電位を示している。これは、Pd表面に最も強くCOが吸着していることを示している。一方、PtPb金属間化合物ナノ粒子においては、ボルタモグラム(a)と(b)の差がほとんど観察できないことから、COがこの表面に吸着しないことがわかる²⁹。図11(c)に示されたようにPtPb金属間化合物においても反応中間体として微量のCOが生成しているが、これらのCOはPtPb金属間化合物に吸着することがない。この効果が長時間のギ酸の酸化反応における触媒活性の保持に寄与していると考えられる。

触媒表面の硫黄化合物に対する耐性試験では、ギ酸の酸化反応を行いながら、試験溶液中に硫黄化合物を注入し、注入後の酸化電流の変化から触媒表面の被毒耐性を評価した(図15)。硫黄化合物としてNaHS, Hexanethiol, 1,3-benzendithiolを用いて被毒耐性を検討した。Pt, Pd, Pt-Ru合金の場合は、すべての硫黄化合物において硫黄化合物を注入した後、酸化電流が急激に減少している。このことから、これらの触媒表面は、硫黄化合物によって被毒され易いことが分かる。一方、PtPb金属間化合物は、Pt, Pd, Pt-Ruと比べると硫黄化合物の注入後の酸化電流の減少が明らかに小さい。Hexanethiol, 1,3-benzendithiolの場合においては、PtPb金属間化合物の酸化電流値はほとんど減少していない²⁹。同様の挙動が塩化物イオンの被毒耐性試験においても観察することで、PtPb金属間化合物が塩化物イオンに対する被毒耐性も有していることが明らかとなっている。以上の結果から、金属間化合物PtPbが電極触媒酸化反応における高活性・活性の持続性だけでなく、被毒に対する耐性を

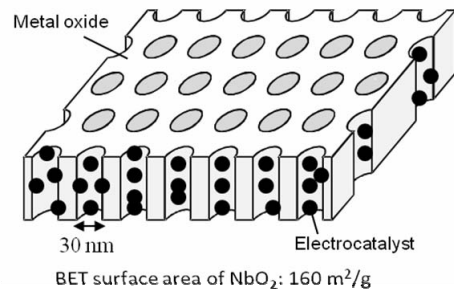


図16 ナノ細孔を有する導電性金属酸化物に触媒を担持したナノ構造材料の模式図

有していることを確認した。

6. ポーラス金属酸化物上に固定されたナノ粒子の調製

従来、触媒粒子を担持する材料として比表面積が大きなカーボン材料が用いられている²⁶⁻²⁸⁾。しかし、長時間の使用において、カーボン表面の酸化による担持体の分解のため、触媒粒子の担持体表面からの脱落による触媒

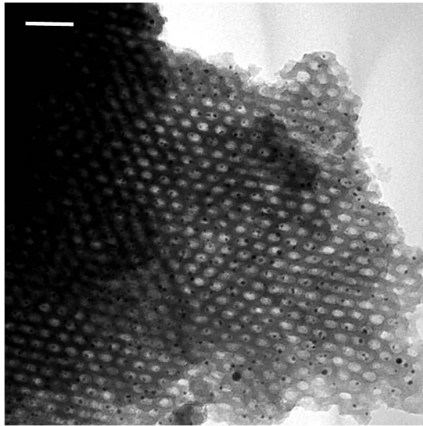


図 17 ナノ細孔を有する導電性金属酸化物 Nb₂O₅/Carbon に担持された PtPb 電極触媒の TEM 像. 図中の白のスケールバー : 100 nm

活性の低下が起こることが問題となっている。近年、導電性を有する金属酸化物を担持材料として用いることが注目されている。金属酸化物は、強酸性溶液、酸化条件下においても安定に存在することができる大きな利点である²⁹⁻³¹⁾。担持材料は、数ナノメートル径を持つ粒子を分散させて固定するため、非常に大きな表面積を持つ必要がある。導電性金属酸化物においても高い表面積を有する担持材料の合成方法の開発が求められている。

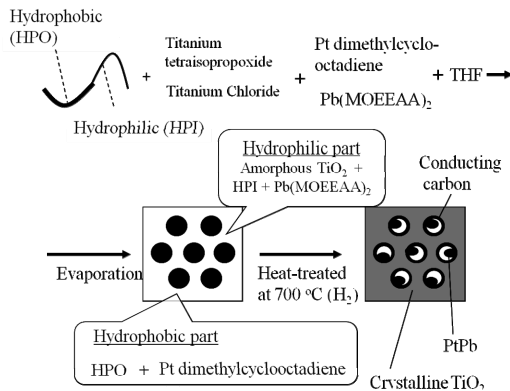


図 18 ナノ細孔を有する導電性金属酸化物 /Carbon に担持された電極触媒の合成スキーム

本研究では、ブロックコポリマーが作る三次元ドメイン構造を利用し、20–30 nm 径の穴が規則的に配列した大きな比表面積を有する導電性金属酸化物のメソポーラス構造を作製することにより、その穴の中に触媒粒子を担持した構造 (図 16) を作製した³²⁾。図 17 に典型的な金属酸化物担持 PtPb ナノ粒子の TEM 像を示す。無数に開いたナノホール内にナノ粒子 (黒点) が高分散していることがわかる。本法は、ポーラス金属酸化物担持ナノ粒子を One-pot で調製できるという特徴を有する。用いたブロックコポリマーは親水性部分と疎水性部分を有し、疎水性部分と親水性部分の割合により、様々なナノ周期構造を形成する³³⁻³⁵⁾。本法では、疎水性部分が円筒形を形成し、規則正しく配列している周期構造を形成するブロックコポリマーを用いた。図 18 は TiO₂ を担持体とした場合の PtPb/TiO₂/carbon の合成例を示している。触媒の原料となる Pt⁴⁺ と Pb²⁺ 錯体は、それぞれ疎水性および親水性とすることにより、ブロックコポリマーが形成する疎水性、親水性部分に溶存させることができる。また、TiO₂ の原料も親水性であることから、ブロックコポリマーの親水性部分に位置する。十分に混合した後、溶媒をゆっくり蒸発させることにより、ナノ周期構造が形成でき、さらに、高温、還元雰囲気下で処理することにより、ナノ細孔を有する TiO₂ の担持体に PtPb が担持する構造ができる。PtPb 触媒は、親水/疎水性界面に相当する細孔の内壁付近に形成される。これは Pt⁴⁺ と Pb²⁺ イオンは還元雰囲気下において金属となるが、Pb の場合、処理温度の 700°C では融解する。そのため親水/疎水性界面まで移動することが可能となり、その界面で金属間化合物が形成すると考えることができる。そのため触媒粒子は、ポーラス金属酸化物に担持された状態となる。ブロックコポリマーの疎水性部分は、熱処理において導電性のカーボンとして細孔の内壁に残ることが確認されている。このカーボン材料が金属酸化物の電子伝導性の不足を補っていると考えている。

表 2 にこの方法を用いて合成した触媒/金属酸化物 /Carbon および触媒/ポーラスカーボンにおけるギ酸の酸化反応を検討した結果を示す。ここで触媒/ポーラスカーボンは、本法を用いて導電性金属酸化物の材料の代わりに、導電性カーボン (ポーラスカーボン) の材料となる物質とブロックコポリマーを用いてナノ周期構造体を作製したものである。金属酸化物と同様にカーボン材料でナノホール構造体の形成が可能である。従来の大きな表面積を有するカーボン材料である Vulcan 上に PtPb を担持した材料は 0.2 V において 1.65 mA μg⁻¹ の電流値を示している。ポーラスカーボン、TiO₂、WO₃ などの担持体

を用いた場合には、Vulcan の場合と比べて小さな電流値を示しており、期待された Vulcan と同様あるいは、より大きな電流値を観察することができなかった。しかし、 Nb_2O_5 の場合には、 $3.3 \text{ mA } \mu\text{g}^{-1}$ となり、Vulcan の場合の 2 倍の電流値を示した。このことから単に高い表面積を有する金属酸化物上に PtPb を担持させただけでは高い触媒能が得られないことが分かる。一方、 Nb_2O_5 の場合には、電流値が非常に小さな値になった。 Nb 酸化物に担持された PtPb 触媒の合成においては、はじめに PtPb/ Nb_2O_5 /carbon を合成し、その後、 Nb_2O_5 を還元することで PtPb/ Nb_2O_5 /carbon を得ている。このことは、PtPb/ Nb_2O_5 /carbon と PtPb/ Nb_2O_5 /carbon は担持されている触媒粒子のサイズや分散度合いがほとんど変化せず、担持体の物質だけが Nb_2O_5 から NbO_2 に変化することによって酸化電流値が大きく変化していることを示しており、 NbO_2 上に触媒を担持させることで、二次的な触媒作用の効果が発現したのではないかと考えている。今後、担持体の種類による触媒能の変化について詳しく調べることにより、この原因を明らかにしていく予定である。

7. 結言

本研究では、安定な結晶構造を形成する金属間化合物を固体高分子形燃料電池のアノード触媒として用いることを提案し、PtPb, Pt_3Ti 金属間化合物においては、電極触媒が持つべき三つの要件、高活性・活性の持続性・被毒に対する耐性を有していることを明らかにした。特に PtPb はギ酸の酸化反応、 Pt_3Ti はメタノールの酸化反応において従来の電極触媒に比べて、非常に大きな酸化電

表 2 ブロックコポリマーの構造から合成された触媒/金属酸化物/Carbon および触媒/ポラスカーボンのギ酸の酸化に関する電極触媒能の比較。溶液：0.5 M ギ酸 + 0.1 M H_2SO_4 (窒素雰囲気下)、電位掃引速度：10 mVs^{-1} 、電極回転速度：2000 rpm。

	Loading	Onset potential / V vs. Ag/AgCl	Mass activity at 0.2 V / $\text{mA } \mu\text{g}^{-1}$
PtPb	70 $\mu\text{g-PtPb}/\text{cm}^2$ (34 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.2	0.25-0.5
Pd black (Aldrich)	70 $\mu\text{g-Pd}/\text{cm}^2$	-0.2	0.88
PtPb on Vulcan	28 $\mu\text{g-PtPb}/\text{cm}^2$ (13.6 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.2	0.85-1.65 (1.75-3.4 $\text{mA}/\mu\text{g-Pt}$)
PtPb on porous carbon	7 $\mu\text{g-PtPb}/\text{cm}^2$ (3.4 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.2	0.29
PtPb on porous TiO_2/C	7 $\mu\text{g-PtPb}/\text{cm}^2$ (3.4 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.2	0.53
PtPb on porous WO_3/C	7 $\mu\text{g-PtPb}/\text{cm}^2$ (3.4 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.2	0.64
PtPb on porous $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{C}$	7 $\mu\text{g-Pt}_3\text{Pb}/\text{cm}^2$ (5.1 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.25	3.3 (4.47 $\text{mA}/\mu\text{g-Pt}$)
Pt_3Ti on porous $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{C}$	7 $\mu\text{g-Pt}_3\text{Ti}/\text{cm}^2$ (5.1 $\mu\text{g-Pt}/\text{cm}^2$)	-0.22	0.35

流とその酸化電流が長時間安定であることを確認している。これらの実験は、ナノ粒子の合成を行う前に多くの金属間化合物のバルク材料によって、ギ酸、メタノール、エタノールの酸化反応において効果的な金属間化合物を見出すためのスクリーニングを行った結果に基づくものである。ここでは、30 種類の金属間化合物バルク材料の検討を行い、可能性のある金属間化合物として、PtPb, PtBi, Pt_3Ti を選定し、ナノ粒子の合成を行った³⁶⁻³⁷⁾。なぜ PtPb, Pt_3Ti 金属間化合物が良好な触媒作用を示すかについては、まだ明らかになっておらず、今後の検討が必要である。電極触媒として Pt を用いた化合物が高い触媒活性を示すことが多く報告されているが、燃料電池の普及のためには、如何に Pt を減らすか、あるいは Pt を用いない電極触媒の開発が必要である。しかし、Pt 系以外のほとんどの金属は強酸性の水溶液中では電気化学的に溶解してしまう性質を持ち、強酸性溶液で電極触媒として使用できる化合物は限られてくる。金属間化合物の形成による安定化の効果によって電気化学的な溶解反応を防ぐことができれば、触媒として検討できる物質がより多くなり、その中から新たな触媒作用を示す物質が見出されるのではないかと期待できる³⁸⁻⁴²⁾。

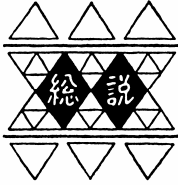
謝辞

これらの研究成果は、Cornell 大学 Cornell Fuel Cell Institute において研究を行った結果である。共同研究者に深く感謝致します。

参考文献

- (1) M. Z. Jacobson, W. G. Colella, D. M. Golden, *Science*, **308**, 1901-1905 (2005).
- (2) J. Chen and F. Cheng, *Acc. Chem. Res.*, **42**, 713-723 (2009).
- (3) M. Granovskii, I. Dincer, and M. A. Rosen, *J. Power Sources*, **157**, 411-421 (2006).
- (4) K. Sopian, W. R. W. Daud, *Renew. Energy*, **31**, 719-727 (2006).
- (5) M. Winter, R. J. Brodd, *Chem. Rev.*, **104**, 4245-4269 (2004).
- (6) A. S. Arico, S. Srinivasan, V. Antonucci, *Fuel Cells*, **1**, 133-161 (2001).
- (7) H. S. Liu, C. J. Song, L. Zhang, J. J. Zhang, H. J. Wang, D. P. Wilkinson, *J. Power Sources*, **155**, 95-110 (2006).
- (8) W. M. Qian, D. P. Wilkinson, J. Shen, H. J. Wang, J. Zhang, *J. Power Sources*, **154**, 202-213 (2006).

- (9) L. Carrette, K. A. Friendrich and U. Stimming, *Fuel Cells*, **1**, 5-39 (2001).
- (10) V. Stamenkovic, B. S. Mun, K. J. J. Mayrhofer, P. N. Ross, N. M. Markovic, J. Rossmeisl, J. Greeley, and J. K. Nørskov, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, 2897-2901 (2006).
- (11) M. Arenz, K. J. J. Mayrhofer, V. Stamenkovic, B. B. Bliznac, T. Tada, P. N. Ross, and N. M. Markovic, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 6819-6829 (2005).
- (12) L. W. Niedrach, D. W. McKee, J. Paynter, and I. F. Danzig, *Electrochem. Technol.*, **5**, 318-323 (1967).
- (13) U.A. Paulus, U. Endruschat, G.J. Feldmeyer, T.J. Schmidt, H. Bonnemann, and R.J. Bhém, *J. Catal.*, **51**, 754-759 (2005).
- (14) J. Prabhuram, T.S. Zhao, Z.K. Tang, R. Chen, and Z.X. Liang, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 5245-5252 (2006).
- (15) M. Watanabe and S. Motoo, *J. Electroanal. Chem.*, **60**, 275-283 (1975).
- (16) J.B. Goodenough, A. Hamnett, B.J. Kennedy, R. Manoharan, and S. A. Weeks, *J. Electroanal. Chem.*, **240**, 133-145 (1988).
- (17) F. Maillard, G.-Q. Lu, A. Wieckowski, and U. Stimming, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 16230-19243 (2005).
- (18) C. Roychowdhury, F. Matsumoto, P. F. Mutolo, H.D. Abruña, and F. J. DiSalvo, *Chem. Mater.*, **17**, 5871-5876 (2005).
- (19) C. Roychowdhury, F. Matsumoto, V. B. Zeldovich, P. F. Mutolo, M. J. Ballesteros, H. D. Abruña, and F.J. DiSalvo, *Chem. Mater.*, **18**, 3365-3372 (2006).
- (20) L. R. Alden, C. Roychowdhury, F. Matsumoto, D. K. Han, V. B. Zeldovich, H. D. Abruña, and F. J. DiSalvo, *Langmuir*, **22**, 10465-10471 (2006).
- (21) L. R. Alden, D. K. Han, F. Matsumoto, H. D. Abruña, and F. J. DiSalvo, *Chem. Mater.*, **18**, 5591-5596 (2006).
- (22) H. Abe, F. Matsumoto, L. R. Alden, S. C. Warren, H. D. Abruña, and F. J. DiSalvo, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 5452-5458 (2008).
- (23) F. Matsumoto, C. Roychowdhury, F. J. DiSalvo, and H. D. Abruña, *J. Electrochem. Soc.*, **155**, B148-B154 (2008).
- (24) H. Wang, L. R. Alden, F. J. DiSalvo, and H. D. Abruña, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **10**, 3739-3751 (2008).
- (25) H. Wang, L. R. Alden, F. J. DiSalvo, and H. D. Abruña, *Langmuir*, **25**, 7725-7735 (2009).
- (26) J. Prabhuram, T. S. Zhao, Z. K. Tang, R. Chen, and Z. X. Liang, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 5245-5252 (2006).
- (27) Y. Li, X. Tong, Y. He, and X. Wang, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 2220-2221 (2006).
- (28) G. S. Chai, S. B. Yoon, J. S. Yu, J. H. Choi, and Y. E. Sung, *J. Phys. Chem. B*, **108**, 7074-7079 (2004).
- (29) N. Zheng and G. D. Stucky, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 14278-14280 (2006).
- (30) K. -W. Park, K. -S. Seol, *Electrochem. Commun.*, **9**, 2256-2260 (2007).
- (31) L. G. S. Pereira, F. R. dos Santos, M. E. Pereira, V. A. Paganin, E. A. Ticianelli, *Electrochim. Acta*, **51**, 4061-4066 (2006).
- (32) M. C. Orilall, F. Matsumoto, Q. Zhou, H. Sai, H. D. Abruña, F. J. DiSalvo, and U. Wiesner, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 9389-9395 (2009).
- (33) B. K. Cho, A. Jain, S. M. Gruner, U. Wiesner, *Science*, **305**, 1598-1601 (2004).
- (34) J. Lee, M. C. Orilall, S. C. Warren, M. Kamperman, F. J. DiSalvo, U. Wiesner, *Nat. Mater.*, **7**, 222-228 (2008).
- (35) I. W. Hamley, *The Physics of Block Copolymers*; Oxford University Press: New York, 1998.
- (36) E. Casado-Rivera, Z. Gal, A. C. Angelo, C. Lind, F. J. DiSalvo, H. D. Abruña, *Chem. Phys. Chem.* **4**, 193-199 (2003).
- (37) E. Casado-Rivera, D. J. Volpe, L. Alden, C. Lind, C. Downie, T. Vazquez-Alvarez, A. C. Angelo, F. J. DiSalvo, and H. D. Abruña, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 4043-4049 (2004).
- (38) T. Ghosh, B. M. Leonard, Q. Zhou, and F. J. DiSalvo, *Chem. Mater.*, **22**, 2190-2202 (2010).
- (39) A. Miura, H. Wang, B. M. Leonard, H.D. Abruña, and F.J. DiSalvo, *Chem. Mater.*, **21**, 2601-2607 (2009).
- (40) T. Ghosh, Q. Zhou, J. M. Gregoire, R. B. van Dover, and F. J. DiSalvo, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 12545-12553 (2010).
- (41) T. Ghosh, M. B. Vukmirovic, F. J. DiSalvo, and R. R. Adzic, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 906-907 (2010).
- (42) X. Ji, K. T. Lee, R. Holden, L. Zhang, J. Zhang, G. A. Botton, M. Couillard, and L. F. Nazar, *Nat. Chem.*, **2**, 286-293 (2010).



JIT 生産システムの理論

中島 健一* 方 蘇春**

Theory of A JIT Production System

Kenichi NAKASHIMA* Suchun FANG**

1. 緒言

産業革命以来、企業体における生産活動は、生産者主導型で進められ、競合他社よりも、効率的であること、より低いコストであることが求められてきた。この結果、社会システムは、大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済社会システムとなった。この社会システムは、化石燃料など、有限の資源を大量に使い地球環境に負荷を与えながら工業生産を拡大させてきた。

18世紀のワット (Watt J., 1736~1819) による蒸気機関の発明により、イギリスにおいて産業革命が始まり、人々の生活は変革した。工業化社会の発展は、製造技術分野のみだけではなく、システムの管理活動に対しても注目を集めることとなった。

テーラー(F. W. Taylor, 1856~1915)の科学的管理法、ないしテーラー・システムを近代的な工場管理の出発点として、工業的な生産活動を効率的に行うため、様々な生産管理技術が開発されてきた。テーラーとその門下生によって確立された科学的管理法は、一日の公平な作業(課業)を決定してこれを管理することをはじめ、仕事において初めて科学的なアプローチを導入した画期的な業績といえる。

20世紀初期、フォード(H. Ford 1863~1947)によって開発されたベルトコンベヤによる流れ作業方式(フォードシステム)は、「標準化(Standardization)」、「単純化(Simplification)」、「専門化(Specialization)」の3sを志向し、1車種大量生産方式を確立した。これにより、少品種大量生産が可能となり、高品質で安価な工業製品が大量に市場へ供給されるようになった。

ゼネラル・モーターズ社(GM)中興の祖と呼ばれる、ス

ローン(A. P. Sloan Jr. 1875~1966)は、部品の共通化と設計技術を開発し、連続同期化を徹底した多車種大量生産方式を確立した。

しかしそれ以後、市場の成熟化に伴い、顧客のニーズは多様化し、生産システムは多品種少量生産を要求されることになる。このため少品種大量生産ゆえに可能であった、製品の低コスト、高流動生産の両立が困難となり、多くの企業は、大ロット生産による低コスト化のみを志向することになる。

ジャストインタイム (Just-In-Time: JIT) 生産システムは、この多品種少量生産の条件のもとで、徹底的な無駄の排除によるコスト低減と高流動生産を実現した画期的な生産システムであり、トヨタ生産方式の同義語としてあるいは Kanban system として日本のみならず世界中で注目を集めてきた。

今日、我が国では従来のガソリン車に対して、いわゆるエコカーを「次世代車」あるいは「環境対応車」と呼んで、経済産業省では次のエコカーを「次世代車」と定義している。すなわち、ハイブリッド車 (HV)、プラグインハイブリッド車 (PHV)、電気自動車 (EV)、燃料電池車 (ECV)、低公害ディーゼル車 (CDV) などである。また、「環境対応車」は次世代車+先進環境技術従来車としている。さらに、政府は表1に示すように2020年と2030年までのエコカー普及目標を設定している。我が国の石油資源が乏しいことや政府のバックアップもあり、日本自動車メーカーは早くからエコカーの開発に着手しており、その技術は世界をリードしている。しかしながら、これまでにも太陽電池など、優れた技術を持ちながら中国、米国に対して国際的な競争では後れをとることとなっており、今後は国際競争力の強化に向けた取り組みが求められている。

本稿では、我が国において開発・実践され、今後モノ

*教授 情報システム創成学科

Professor, Dept. of Information systems creation

**教授 聖泉大学

Professor, Seisen University

づくり分野での国際競争力にも貢献が期待される, JIT 生産システムについてその概念, および理論的な特性について示す. 第2章において JIT 生産システムの考え方とそれを支える基本的仕組みについて概説し, 第3章でシステムの基礎的運用手段であるかんばん方式の概要を説明する. 第4章においては, 外注かんばんと生産指示かんばんを用いた単一工程 JIT 生産システムのモデル化とシステムの安定条件を述べる. 第5章では, 確率モデルを解析する際に有効な手法となる確率順序および凸順序についての定義, およびその基本的性質を示し, 第6章において, JIT 生産システムの特性を理論的に説明し, 今後の展望について考察する.

表1. 次世代自動車の普及目標 (経済産業省資料抜粋)

	2020年(%)	2030年(%)
従来車	50~80	30~50
HV	20~30	30~40
EV・PHV	15~25	20~30
ECV	~1	~3
CDV	~5	5~10

2. JIT 生産システムの基礎概念

JIT 生産システムは, 近年海外において, トヨタ生産方式の同義語として, あるいはその中核をなす JIT を実現するためのかんばん方式として広く使われている. トヨタ生産方式は, 徹底的なムダの排除によるコスト低減をめざした生産システムであり, その基本理念は平準化を基礎とする JIT と自動化である.

JIT とは, 必要な物を, 必要な時に, 必要なだけ生産するという理念であり, この理念のもとで, 大野耐一(1978)は, 「後工程引き取り, 後補充生産方式」を創造し, 工程内, 工程間で必要な情報を必要なときに伝える手段として「かんばん」を創案した. すなわち, いつ, 何が, どれだけ必要かが最も早く, 正確にわかる後工程が, 使った分だけを前工程に引き取りに行き, 前工程は引き取られた分だけを生産し, 補充するという生産方式である. この時, 後工程が自工程の都合だけで一度にまとめて引き取れば, 前工程はそのための在庫, あるいは生産能力を増やして対応しなければならず, 負担を強いられることになる. したがって, 後工程は前工程から引き取る部品の種類, 量が平均化するよう生産しなければならない. これを生産の平準化と呼んでいる. この平準化の利点をまとめれば, 以下ようになる.

1. 前工程の部品使用量が安定化し, その労働力, 設備

が効率的に運用できる.

2. 小ロットないし, 1 個流しの生産と運搬により工程間在庫が低減する.
3. 生産リードタイムが短縮し, 市場の需要変動に柔軟に対応できる.

しかし, 平準化の利点を有効にするためにはその前提として, 段取り時間の短縮が不可欠であり, 異なる製品の作業に対する事前の訓練, 治工具等の準備が必要となる.

自動化とは, 機械に人間の知恵を付与することであり, 良品のみを生産する理念である. すなわち, 異常を自動的に検知して停止する自動機械, さらには不具合が発生すれば作業者がラインを停止させ, 再発防止の手を打つ生産ラインを生み出している. さらに, JIT 生産システムを支える理念として, 需要変動に応じて作業者を柔軟に変化させる少人数化, 作業者自らの提案により継続的な改善活動を進める創意工夫等がある.

JIT 生産システムで排除の対象となるムダとして, 以下の7つのムダが挙げられている(大野 1978).

1. つくりすぎのムダ
2. 手待ちのムダ
3. 運搬のムダ
4. 加工そのもののムダ
5. 在庫のムダ
6. 動作のムダ
7. 不良をつくるムダ

また JIT 生産システムの特徴をまとめれば, 次のようになる.

- 1) 多種少量生産システムに適合した後工程引き取り, 後補充生産方式
(引き取りを訳してプル (pull) 方式ともよばれている)
- 2) 自律分散型生産システム
- 3) 改善による「徹底的なムダの排除」の「仕組み」と改善活動
- 4) 多能工とU字生産ライン

JIT 生産システムないしトヨタ生産方式は, 多種少量生産に適合した生産システムである. その革新性, 卓越性は 1973 年のオイルショック時に実証されており, 自動車産業における日本企業の優位性にも反映されている. そしてその中核をなす JIT を実現するかんばん方式 (Kanban system) として全世界へ普及している. 実際, 製造業の復権をめざした米国を中心に 80 年代後半から活発な理論的研究が行われ, 1990 年にマサチューセッツ工科大学から提唱されたリーン生産システム(Ross *et al.* 1990)のモデルともなっている.

3. かんばん方式

かんばん方式は、需要変動、設備故障、出勤状況の変化等の製造現場のもつ様々な不確実性のもとで、JIT 生産を実現するために考案された「後工程引き取り、後補充生産方式」における情報伝達・制御手段である。実際、各工程で使われるかんばん枚数が決められると、その工程はかんばんの運用ルールに従い、自律分散的に生産活動を継続する(門田 1991)。

部品あるいは製品の収容箱には1枚のかんばんが付けられ、工程内あるいは工程間を循環し、各工程における生産量や前工程からの部品の引取量を制御する。かんばんには大別して、生産指示かんばん(仕掛けかんばんとも呼ばれる)と引き取りかんばんの2種類がある(小谷 1987)。

引き取りかんばんは、前工程が外注工場の場合、特に外注かんばんと呼ばれている。外注かんばんの場合、引き取りに行くのではなく、外注工場が定められた納入間隔で定期的に納入し、同時に発注をうける方式を採用している。したがって、この引き取り方式は、本質的に定期発注方式であり、発注から納入までの納入リードタイムは、自社内に比べて相対的に長くなる。

かんばんを運用するルールは、

1. 後工程は、前工程へはずれた引き取りかんばん分だけ引き取りに行く。
2. 前工程は、生産指示ポスト内のかんばん分だけ、その順番に生産する。
3. 良品だけを生産し、後工程へ不良品を送らない。
4. かんばんは必ず現物に付けておき、実数と収容数が合わなければならない。

5. かんばんのない時は運ばない、作らない。

6. かんばんの枚数を減らしていく

(問題を顕在化させる)。

である。

かんばんの運用ルールから、各工程は与えられたかんばんのもとで、運用ルールに従い自律分散的に生産活動を継続することができる。そして、生産指示かんばんの枚数がその工程の製品の収容箱単位の最大在庫量になり、引き取りかんばんの枚数が前工程からの部品の収容箱単位の最大在庫量に対応する。もしかんばん枚数を多くすれば、工程は過剰在庫を抱えることになり、逆に少なくすれば材料・製品切れを引き起こすことになる(大野他 2002)。

トヨタ自動車におけるかんばん枚数の計算式(小谷 1987)は、生産指示かんばんの場合、

$$M = \lceil (DL_p + I_s) / u \rceil$$

ここで、 $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数であり、 M は生産指示かんばん枚数、 D は平均需要量、 L_p は引き取りによりかんばんがはずされてから生産が完了し、所定の位置におかれるまでのリードタイム、 I_s は安全在庫量(安全係数)、 u は収容数である。定量引き取り方式の場合、

$$N = \lceil (DL_w + I_s) / u \rceil$$

である。ここで、 N は引き取りかんばん枚数、 L_w はかんばんが外されてから引き取りが完了するまでのリードタイムである。

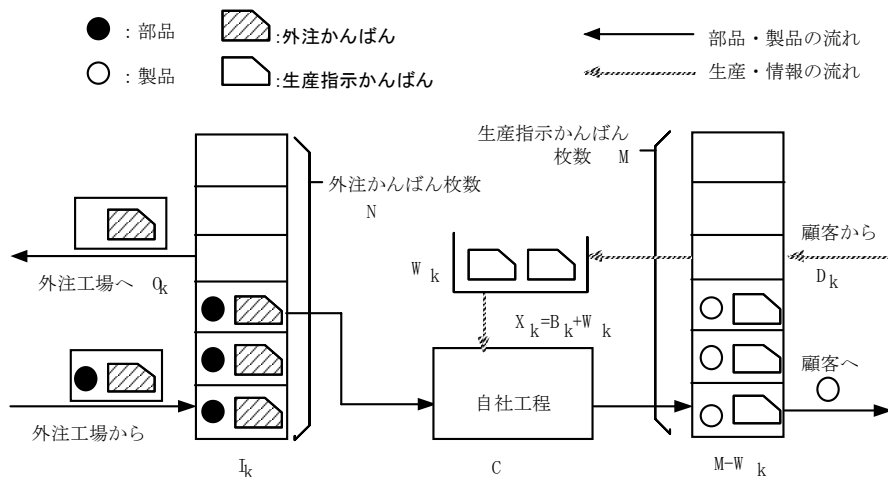


図1：生産指示・外注かんばんシステム

また、定期引き取り方式の場合、

$$N = \{[D(R+L) + I_s]/u\}$$

である。ここで、 R は引き取り周期、 L は引き取りを開始してから完了するまでのリードタイムである。

特に外注かんばんの場合、

$$N = \{[Da(1+c)b + I_s]/u\}$$

で与えられる。ここで a - b - c は納入サイクルを表す定数であり、 a 日間に b 回納入し、受注後 c 回目に納入されることを意味する。すなわち、納入間隔(周期)は a/b であり、納入リードタイムは、 ac/b で与えられる。

4. JIT 生産システムの安定性と最適性

外注工場からの部品を用いて製品を完成させる生産指示・外注かんばんシステムを考える(図1)。生産指示かんばん枚数を M 、外注かんばん枚数を N とおく。さらに、部品あるいは製品の収容箱の収容数は1とするが、この条件が成立しない場合も以下と同様な議論が可能である。自社工程は単一品種製造工程であり、単位時間当たり生産能力を C とおく。単位時間当たりの需要は、平均 D をもつ独立かつ同一の分布に従うものとし、第 k 期の需要を D_k とする。また満たされなかった需要は繰り越されるものとする。以下、引き取り周期を1とし、納入リードタイムを L で表す。生産指示・外注かんばん方式では第 k 期首の発注が第 $(k+L)$ 期首に納入される。すなわち外注かんばん方式では、かんばんの回収(発注)と同時に L 期前に発注された部品の納入が行われる。

第 k 期の部品在庫量を I_k 、生産指示かんばんポスト内のかんばん枚数を W_k 、繰り越し需要量を B_k とする。このとき第 k 期における総生産指示量は X_k となる。この生産指示・外注かんばんを考慮した JIT 生産システムに対して、待ち行列理論を用いて、以下の安定条件が導かれている(Ohno et al. 1995)。

$$\text{安定条件} : \min\{C, M, N/(L+1)\} > D. \quad (1)$$

ここで、JIT 生産システムが安定であるとは、第 k 期の総生産指示量 X_k にたいして、 $k \rightarrow \infty$ のとき X_k が極限分布をもつことを意味する。この極限分布に従う確率変数を X_∞ とする。上式は $L+1$ 期間の平均需要量 $(L+1)D$ がその期間の生産能力 $(L+1)C$ 、最大生産指示量 $(L+1)M$ または外注かんばん枚数 N 未満であることがシステムの安定条件であることを示している。この条件のもとで、 W_k 、 B_k も極限分布に収束し、確率変数 W_∞ 、 B_∞ をもつ。したがって、単位時間当たり平均費用は以下の式で表される。

$$A(N, M) = A_i(N - (L + \frac{1}{2}D)) + B_i(M - E(W_\infty)) + A_B E(B_\infty) + C_B Pr\{B_\infty > 0\} \quad (2)$$

ここで、

A_i : 単位時間、1個当りの部品在庫費用

B_i : 単位時間、1個当りの製品在庫費用

A_B : 単位時間、1個当りの製品繰り越し費用

C_B : 1回当たりの製品繰り越し発生費用

である。

JIT 生産システムでは、かんばんを運用することにより、過剰な在庫の保有を抑え、金利などの資本コスト、在庫管理費、陳腐化、品質低下などによる多額の損失の発生を抑制している(伊藤 2001)。上述の平均費用構成からもわかるように、かんばん枚数の決定は費用計算において非常に重要な要因となっている。

さらに、引き取り周期を考慮して、外注かんばんのみを用いる JIT 生産システムを考えた場合、生産指示・外注かんばんシステム同様、安定条件が導かれ、その条件のもとで、次の理論的性質が示される(中島、大野 1996)。

- 1) かんばん枚数あるいは生産能力の増加に伴い、品切れ費用が減少する。
- 2) 平準化生産により需要変動をおさえることにより品切れ費用が減少する。

一方、マルコフ決定過程(Puterman, 1994)を用いることにより、同一条件の生産システムにおいて、外注かんばんを用いず、部品の最適発注量を定めることが可能となる。この時得られた最適発注政策と、最適外注かんばん枚数を用いた発注政策を数値的に比較した場合、需要分散が増加するにつれ両政策間の差は広がっており、平準化生産の重要性が裏付けられている。また、引き取り周期が大きくなるにつれ、両政策間に差が生じており、引き取り周期の大きさも外注かんばん方式の最適性に影響を与えていることがわかる。

次章以降において、需要の確率的変動を考慮した上で、生産指示および外注かんばん枚数、生産能力の変化が平均費用に与える影響を理論的に示す。

5. 確率順序と凸順序

不確実性の影響を考慮した確率モデルにおいては、確率変数あるいは分布間の半順序による解析が有効な手法として知られている。以下では、そのうちの代表的なものとして確率順序及び凸順序を定義し、それらの基本的性質について述べ、JIT 生産システムの費用特性を示す

(Stoyan 1983).

定義 1

1) 確率変数 Z, Z' にたいして、任意の実数 x で $F_z(x) = Pr\{Z \leq x\} \leq Pr\{Z' \leq x\} = F_{z'}(x)$ が成り立てば、 $F_z \leq_d F_{z'}$ あるいは $Z \leq_d Z'$ と記し、 \leq_d を確率順序とよぶ。

2) 任意の実数 x にたいして $E[Z \cdot x]^+ \leq E[Z' \cdot x]^+$ のとき $F_z \leq_c F_{z'}$ あるいは $Z \leq_c Z'$ と記し、 \leq_c を凸順序とよぶ。ここで E は平均、 $[x]^+ = \max(0, x)$ である。

確率順序及び凸順序について、以下の補題が成立する (Stoyan 1983).

補題 1 $F_z \leq_d F_{z'} (F_z \leq_c F_{z'})$ のとき分布 θ に対して $F_z * \theta \leq_d F_{z'} * \theta (F_z * \theta \leq_c F_{z'} * \theta)$ が成り立つ。ここで $F_z * \theta$ は分布 F_z と θ のたたみこみを表す。

補題 2 $Z \leq_d Z' (Z \leq_c Z')$ であるための必要十分条件は、すべての非減少 (非減少で凸) な関数 Φ にたいして $E \Phi(Z) \leq E \Phi(Z')$ が成立することである。

補題 2 より、多次元の確率変数に対する確率順序及び凸順序を以下のように定義する。

定義 2

N 次元確率ベクトル $X=(X_1, \dots, X_N), X'=(X'_1, \dots, X'_N)$ とすべての非減少 (非減少で凸) な N 変数関数 Φ にたいして、 $E[\Phi(X_1, X_2, \dots, X_N)] \leq E[\Phi(X'_1, X'_2, \dots, X'_N)]$ を満たすとき $X \leq_d (\leq_c) X'$ と定義する。

補題 3 確率変数 Z, Z' が、確率ベクトル $(X'_1, \dots, X'_m, X_{m+1}, \dots, X_N), (X''_1, \dots, X''_m, X_{m+1}, \dots, X_N)$ と N 変数関数 Φ を用いて次式で与えられている。

$$Z' = \Phi(X'_1, \dots, X'_m, X_{m+1}, \dots, X_N), Z'' = \Phi(X''_1, \dots, X''_m, X_{m+1}, \dots, X_N).$$

確率ベクトル (X'_1, \dots, X'_m) と (X''_1, \dots, X''_m) が (X_{m+1}, \dots, X_N) と独立であるとする。この時、

1) Φ が非減少関数であり、 $(X'_1, \dots, X'_m) \leq_d (X''_1, \dots, X''_m)$ ならば、

$$Z' \leq_d Z'' \text{ が成り立つ。}$$

2) Φ が非減少かつ凸関数であり、 $(X'_1, \dots, X'_m) \leq_c (X''_1, \dots, X''_m)$ ならば、

$$Z' \leq_c Z'' \text{ が成り立つ。}$$

確率ベクトル列 $\{X_n\}$ にたいし、確率変数 $Z_{n+1} (n=1, 2, \dots)$ が、 Z_n と X_n の関数 Φ_n によって次式で与えられているものとする。

$$Z_{n+1} = \Phi_n(Z_n, X_n) \tag{3}$$

補題 4 式(3)と同様に Φ_n と $\{X'_n\}, \{X''_n\}$ で定義される確率変数を $\{Z_{n+1}'\}, \{Z_{n+1}''\}$ で表すものとする。すべての n で Φ_n が非減少(非減少かつ凸)で、 $X'_n \leq_d X''_n (X'_n \leq_c X''_n)$ であり、 $Z'_1 \leq_d Z''_1 (Z'_1 \leq_c Z''_1)$ ならば $Z_{n+1}' \leq_d Z_{n+1}'' (Z_{n+1}' \leq_c Z_{n+1}'')$ であ

る。

補題 5 式(3)において、独立で同一の分布に従う確率ベクトル列 $\{X_n\}$ とすべての n で $\Phi_n = \Phi$ である関数 Φ とで与えられる確率変数を Z_{n+1} とおく。 Φ が非減少(非減少かつ凸)で、 $Z_1 \leq_d Z_2 (Z_1 \leq_c Z_2)$ ならば、すべての $n(n=1, 2, \dots)$ に対して $Z_n \leq_d Z_{n+1} (Z_n \leq_c Z_{n+1})$ である。

補題 6 確率変数列 Z_n, Z'_n が Z, Z' へ法則収束し、 $EZ < \infty, EZ' < \infty, E[Z_n]^+ = E[Z]^+, E[Z'_n]^+ = E[Z']^+$ であるとする。このとき $Z_n \leq_d Z'_n (Z_n \leq_c Z'_n)$ ならば $Z \leq_d Z' (Z \leq_c Z')$ である。

6. JIT 生産システムの確率的性質

第 4 章の安定条件のもとで、需要分布、かんぱん枚数、生産能力等が変化するとき、繰り越し需要量がどのように変化するかを調べる。すなわち、生産指示かんぱんと外注かんぱんを用いた JIT 生産方式の性質を示す。まず、需要分布が ϕ から ϕ' へ変化する場合を考える。第 4 章の生産指示・外注かんぱんモデル (図 1) において、第 n 期の需要量 D_n の分布を $\phi(d) = Pr\{D_n=d\}$ 、 D'_n の分布を $\phi'(d) = Pr\{D'_n=d\}$ とおく。以下 $\phi \leq_c \phi'$ であり、 $E[D_n] = E[D'_n] = D$ を仮定する。このとき、分散 $Var(D_n) \leq Var(D'_n)$ である。また $M' = \min\{M, C\}$ とおき、需要 D_n に対する繰り越し需要量等を

$$Y_n = X_{n(L+1)+1} \tag{4}$$

$$U_n = \max\{D_{n(L+1)}, D_{n(L+1)} + D_{n(L+1)+1} - M', \dots, \sum_{i=1}^{L+1} D_{(n-1)(L+1)+i} - LM'\} \tag{5}$$

$$V_n = \sum_{i=1}^{L+1} D_{(n-1)(L+1)+i} - \min\{(L+1)M', N\} \tag{6}$$

$$Y_n = \max\{U_n, Y_{n-1} + V_n\} \tag{7}$$

とする。同様に、需要 D'_n に対する繰り越し需要量等を $X'_{n(L+1)+1}, U'_n, V'_n, Y'_n$ 等で表せば、第 5 章における補題 1 と仮定から任意の n で $V_n \leq_c V'_n$ である。また、

$$\begin{aligned} & \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_{L+1}) \\ &= \max\{x_1, x_1 + x_2 - M', \dots, x_1 + \dots + x_{L+1} - LM'\} \\ &= x_1 + \max\{0, x_2 - M', \dots, (x_2 - M') + \dots + (x_{L+1} - M')\} \end{aligned}$$

とおけば ϕ_1 は $(x_1, x_2, \dots, x_{L+1})$ に関して非減少となり、 $\phi_1(\lambda x_1 + (1-\lambda)x'_1, \dots, \lambda x_{L+1} + (1-\lambda)x'_{L+1}) = \lambda(x_1 - M') + (1-\lambda)(x'_1 - M') + \max\{0, \lambda(x_2 - M') + (1-\lambda)(x'_2 - M'), \dots, \lambda\{(x_2 - M') + \dots + (x_{L+1} - M')\} + (1-\lambda)\{(x'_2 - M') + \dots + (x'_{L+1} - M')\}\}$ であり、

$$\begin{aligned} & \max\{0, \lambda(x_2-M')+(1-\lambda)(x_2'-M')\} \leq \lambda \max\{0, x_2-M'\} \\ & + (1-\lambda) \max\{0, x_2'-M'\}, \quad \max\{0, \lambda(x_2-M')+(1-\lambda)(x_2'-M')\} \\ & \lambda(x_2-M')+(1-\lambda)(x_2'-M') + \lambda(x_3-M')+(1-\lambda)(x_3'-M') \\ & \leq \lambda \max\{0, x_2-M', x_2-M'+x_3-M'\}+(1-\lambda) \max\{0, x_2'-M', \\ & x_2'-M'+x_3-M'\} \end{aligned}$$

より

$$\begin{aligned} & \phi_f(\lambda x_1+(1-\lambda)x_1', \dots, \lambda x_{L+1}+(1-\lambda)x_{L+1}') \\ & \leq \lambda \phi_f(x_1, x_2, \dots, x_{L+1})+(1-\lambda) \phi_f(x_1', x_2', \dots, x_{L+1}') \end{aligned}$$

が成り立ち ϕ_f は $(x_1, x_2, \dots, x_{L+1})$ に関して凸である。

従って、補題3より条件

$$\{D_{n(L+1)}, D_{(n-1)(L+1)}, \dots, D_{(n-1)(L+1)+1}\} \leq_c \{D_{n(L+1)'}, D_{(n-1)(L+1)'}, \dots, D_{(n-1)(L+1)+1}'\}$$

が成り立つので、 $U_n \leq U_n'$ をうる。

$\phi_2(x, y_1, y_2) = \max\{y_1, x+y_2\}$ とおけば ϕ_2 は (x, y_1, y_2) に関して非減少であり、

$$\begin{aligned} & \phi_2(\lambda x+(1-\lambda)x', \lambda y_1+(1-\lambda)y_1', \lambda y_2+(1-\lambda)y_2') \\ & = \max\{\lambda y_1+(1-\lambda)y_1', \lambda x+(1-\lambda)x'+\lambda y_2+(1-\lambda)y_2'\} \\ & = \max\{\lambda y_1+(1-\lambda)y_1', \lambda(x+y_2)+(1-\lambda)(x'+y_2')\} \\ & \leq \lambda \max\{y_1, x+y_2\}+(1-\lambda) \max\{y_1', x'+y_2'\} \end{aligned}$$

より (x, y_1, y_2) に関して凸である。したがって、式(4)と補題4より $X_1 \leq_c X_1'$ のとき、すべての n で

$$X_{n(L+1)+1} \leq_c X_{n(L+1)+1}' \quad (8)$$

となる。また、 $X_1=0$ とおけば $X_1 \leq_c X_{L+2} = \max\{U_1, V_1\}$ が成り立ち補題5より、

$$X_{(n-1)(L+1)+1} \leq_c X_{n(L+1)+1} \quad (9)$$

を得る。以上より、 $D_n \leq_c D_n'$ のとき(8)式が成立し補題6より、

$$X_\infty \leq_c X_\infty' \quad (10)$$

ゆえに任意の非減少凸関数 f に対して $E[f(X_\infty)] \leq E[f(X_\infty)']$ となり、 $r \geq 1$ に対して、 $E[X_\infty^r] \leq E[(X_\infty')^r]$ である。 $B_\infty = [X_\infty - M]^+$ であるため、 $B_\infty = [X_\infty - M]^+ \leq_c [X_\infty' - M]^+ = B_\infty'$ となる。したがって $E[f(B_\infty)] \leq E[f(B_\infty)']$ を満たし、 $r \geq 1$ に対して、 $E[B_\infty^r] \leq E[(B_\infty')^r]$ となる。すなわち需要分散が増加するにつれ繰り越し需要量の r 次のモーメントが増加することが示されている。

次に、かんばん枚数、生産能力が M, N, C から $\bar{M}, \bar{N}, \bar{C}$ へ変化する場合を考える。それぞれに対する繰り越し需要量等を X_n, B_n および \bar{X}_n, \bar{B}_n で表す。式

$$(5), (6), (7) \text{より}, M' = \min\{M, C\} \leq \bar{M}' = \min\{\bar{M}, \bar{C}\},$$

$N \leq \bar{N}$ のとき $\bar{U}_n \leq U_n, \bar{V}_n \leq V_n$ となり、補題4より

$$\bar{X}_1 \leq_c X_1 \text{ のときすべての } n \text{ で } \bar{X}_{n(L+1)+1} \leq_c X_{n(L+1)+1}$$

したがって、補題5、補題6より、 $\bar{X}_\infty \leq_c X_\infty, \bar{B}_\infty \leq_c B_\infty$ となり任意の非減少関数 f に対して $E[f(\bar{X}_\infty)] \leq E[f(X_\infty)], E[f(\bar{B}_\infty)] \leq E[f(B_\infty)]$ となり、 $r \geq 0$ に対して、 $E[\bar{X}_\infty^r] \leq E[X_\infty^r], E[\bar{B}_\infty^r] \leq E[B_\infty^r]$ である。したがって、生産能力あるいはかんばん枚数が増加するにしたがい、繰り越し需要量の r 次のモーメントは減少することが示された。

上記関数 f は、製品繰り越し需要量にたいする一般的な品切れ費用関数と考えることができる。この時、外注かんばん枚数あるいは生産能力が増加するにつれ、平均品切れ費用が減少することを示している。実際 Ohno *et al.*(1995)では、かんばん枚数あるいは生産能力の増加に伴い、品切れ費用が減少することや、生産能力が増加するにつれ、最適かんばん枚数が増加することを数値的に示している。同様に、需要分布が凸順序の意味で減少すれば、製品繰り越し需要量の平均品切れ費用が減少することを示している。特に平均需要量が変化しない場合、凸順序の意味での減少は、需要分散の減少を意味しており、平準化生産により需要変動をおさえることの重要性を裏付けている。

7. 結言

本稿では、JIT 生産システムの考え方とその基礎的運用手段であるかんばん方式を概説し、外注かんばんおよび生産指示かんばんを用いた単一工程 JIT 生産システムのモデル化と安定条件を示した。さらに確率順序および凸順序により、一般的な費用関数に対する次の2つの理論的な費用特性を示した。

- (1)かんばん枚数あるいは生産能力の増加に伴い、品切れ費用が減少する。
- (2)平準化生産によって需要変動をおさえることにより品切れ費用が減少する。

JIT 生産システムでは、2種類のかんばんを用いたかんばん方式の運用により在庫のムダ、作りすぎのムダといったムダの排除を行う仕組みが組み込まれており、効率的な生産システムといえる。しかしながらその運用に際しては、平均費用に影響を与える生産の平準化、かんばん枚数や生産能力の決定法についての注意が必要であり、今後はさらに環境面にも配慮したシステムの評価と継続的改善が求められる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費基盤研究(C) 22510163 の補助を受けて行われたことを付記する。

参考・引用文献

- (1) 伊藤嘉博, コストマネジメント入門, 日本経済新聞社(2001).
- (2) 大野勝久, 田村隆善, 森健一, 中島健一, 生産管理システム, 朝倉書店(2002).
- (3) 大野耐一, トヨタ生産方式-脱規模の経営をめざして, ダイヤモンド社(1978).
- (4) 小谷重徳, かんぱん方式の数理, オペレーションズ・リサーチ, Vol.32, pp.730-738(1987).
- (5) 中島健一, 経営管理とビジネスモデル, オフィス・オートメーション, Vol. 22, pp.52-56(2001).
- (6) 中島健一, 大野勝久, 外注かんぱん方式の確率的性質と最適性, 日本経営工学会誌, Vol.47, No.2, pp.100-106(1996)
- (7) 門田安弘, 新トヨタシステム, 講談社(1991).
- (8) Taylor, F. W.(上野陽一訳), 科学的管理法, 産能大学出版部(1969).
- (9) Ohno K., K. Nakashima and M. Kojima, "Optimal numbers of two kinds of kanbans in a JIT production system," *International Journal of Production Research*, Vol. 33, pp.1387-1401(1995).
- (10) Puterman, M. L. Markov Decision Processes. New York (John Wiley & Sons): Discrete Stochastic Dynamic Programming (1994).
- (11) Ross, D., Wormack, J.P. and Johns, D.T., *The Machine That Changed The World*, Macmillan Pub. Comp(1990).
- (12) Stoyan, D., *Comparison methods for queues and other stochastic models*, Akademie-Verlag Berlin: John Wiley & Sons.(1983)



有機導体におけるバンド構造と強相関効果

相澤 啓仁*

Band Structure and Strong Correlated Effect in Organic Conductors

Hirohito AIZAWA*

1. はじめに

通常、有機物は電気を通しにくい絶縁体としてよく知られている。この様な絶縁性を抑え、金属的な電気伝導を持つ有機物の合成は、化学者の長年の夢であった。さらに、その電気伝導や電子状態の性質等の探索と解明は物理学者の興味を引きつけるものであった。これらの研究は精力的に行われ、近年では多様なタイプの有機導体の合成がなされると共に、磁性や超伝導といった豊かな物性が報告されている[1, 2]。本稿では、有機導体に関する研究を振り返った後、最近の研究の一部を紹介する。

2. 有機導体とは

有機物とは通常、絶縁体としてよく知られている。ではなぜ絶縁体になるのだろうか。ここでは、有機物が絶縁体となる理由を眺めることで、電気伝導体へとする方法とその発展を簡単に紹介する。

2. 1 有機物はなぜ絶縁体か

有機物が絶縁体としての性質を持つ理由は、主に2つ挙げられる。一点目は、有機分子の電子配置が対電子を1つも持たない閉殻構造をとることに起因して、最高被占軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) と最低空軌道 (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) の間のエネルギーギャップが大きくなることに起因している。これによる絶縁体状態の概念図を図1に示す。ある閉殻構造を持つ分子を例に考えると、単分子

の HOMO と LUMO のエネルギーギャップが大きい場合、この分子1個から構成される物質でも HOMO-LUMO ギャップは大きくなる。さらに、その分子が結晶を構成する程に十分多く集まった場合では、電子が占有した各軌道や非占有の各軌道はほぼ連続と見なせるようになる。これにより、電子の占有軌道は価電子帯を構成し、非占有軌道は伝導帯を構成する。この時、HOMO と LUMO のエネルギー差が大きく、さらに分子が閉殻構造を持つことから、電子占有軌道と非占有軌道の境界のエネルギー準位であるフェルミ (Fermi) 準位は、価電子帯と伝導帯の間 (禁制帯) に存在することになる。この図から絶縁

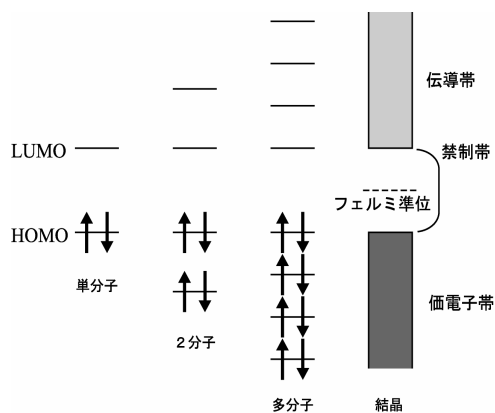


図1. 分子軌道とバンド構造形成の概念図。横方向の実線は各軌道からなるエネルギー準位、矢印は軌道を占有した電子のスピンの向きを表す。単分子の HOMO と LUMO を基本として、多分子さらに結晶を構成することで価電子帯と伝導帯を形成する。フェルミ準位が禁制帯にあることから、絶縁体となることがわかる。

*特別助手 物理学教室

Research associate, Institute of Physics

体となりそうであることがわかるが、半導体との違いに
触れておく。価電子帯は電子が占有したバンド、伝導帯
はホールが占有したバンドとして独立のバンドとなる。
しかし、そのバンド間のエネルギーギャップは HOMO
と LUMO のエネルギーギャップを反映して大きく開い
ている。このため、通常の有機物は絶縁体となる。

二点目は、有機分子の HOMO が分子内の結合により
強く局在化するため、分子間での分子軌道の重なりが非
常に小さくなる事に起因している。ここでも図 1 の概念
図を用いて考えてみる。分子内結合が強い場合、HOMO
を含む各分子軌道が分子内に局在し、隣接した他の分子
との間での軌道の重なりが生じにくくなる。これはその
軌道から構成されるエネルギーバンドの幅が狭くなる事
を意味しており、図 1 との関係では、HOMO 以下の分子
軌道のエネルギー準位間隔が狭くなる状況と言える。
HOMO も分子内に局在化していることから隣接分子間
での軌道の重なりは小さくなり、LUMO とのエネルギー
ギャップが小さくなる事はない。これにより、図 1 に示
す様に、多数の分子が結晶を構成しても、価電子帯と伝
導帯の間で重なりが生じず、禁制帯が残ることから絶縁
体となる。

2. 2 有機半導体から有機超伝導体へ

この様な有機物が絶縁体となる理由を解決することが、
電気伝導性を持つ有機半導体の合成の条件となる。ここ
では、1973 年に安定な有機半導体として合成された TTF-
TCNQ (tetrathiafulvalene-tetracyanoquinodimethane) という
物質を例にとる[3]。TTF-TCNQ では TTF 分子がドナー
分子、TCNQ 分子がアクセプター分子となる。TTF 分子
は、分子平面から垂直に伸びる π 軌道を持つ。この分子
から酸化により電子を取り除くことで、HOMO は開殻な
電子状態となる。これは価電子帯にホールが生じたこと
になり、伝導を担うキャリアが生じることに対応する。
一方の TCNQ 分子もまた広がりのある π 軌道を持つ。こ
の分子に対して還元することで負電荷を生じさせ、
アクセプター分子としての役割を担わせる。これにより、
エネルギーバンドに空きのある有機結晶を構築したこと
になる。さらに、TTF 分子や TCNQ 分子は π 軌道を持
っていることから、HOMO や LUMO が分子面から垂直に
伸びている。これらの分子を積層状に配置することで、
 π 軌道の重なりが大きくなり、分子間の電子の移動エ
ネルギーを大きくすることが可能、すなわち、電気伝導性
が生じることになる。この TTF-TCNQ の電気伝導性をき
っかけに、図 2 に示す様な多くの TTF 系分子や関係の深

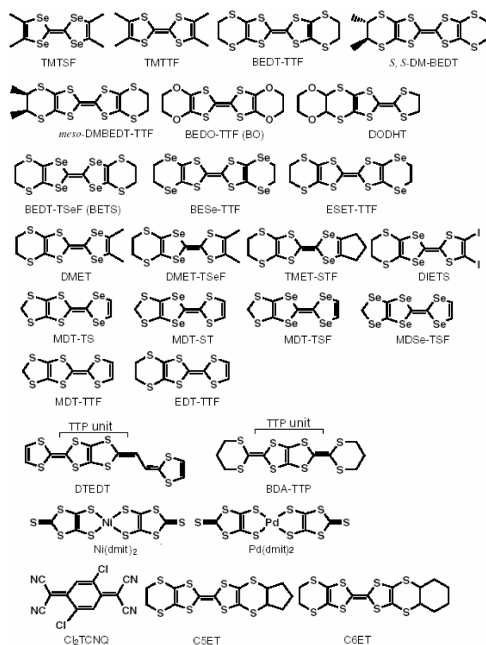


図 2. ドナー分子やアクセプター分子の一例

い分子が合成された[4]。さらに安定な金属伝導と分子性
結晶の合成をするためには、ドナー分子と閉殻状態の関
係から、ドナー分子 1 つあたりアクセプター分子 2 つ、
すなわち 1 つのドナー分子あたりに 0.5 の電子を持つ
構造が安定となる。これを背景に D_2A 型の構造を持った
有機半導体が多く合成された。

現在も続く活発な有機半導体の合成と研究の原動力とし
て欠かせない理由として、有機超伝導体の存在がある。
超伝導は、1911 年のカマリン・オンネス (Kamerlingh
Onnes) による水銀の冷却により発見された現象[5]で、
その後、金属を中心に多くの物質でも超伝導が見つかつ
た。超伝導発現機構の解明は、1957 年のバーディーン
(Bardeen) とクーパー (Cooper)、シュリーフアー
(Schrieffer) が提出した BCS 理論により、電子状態に関
する微視的観点から説明がなされた[6]。

有機物の分野においても、有機半導体の合成が成功した
後、有機超伝導体の合成が新たな目標となった。これは、
1980 年に世界初の有機超伝導体である $(TMTSF)_2PF_6$ (T
 $MTSF$ =tetramethyl-tetraselenafulvalene) の合成により達成
された[7]。ちなみに、執筆している現在 2010 年は有機
超伝導体の発見 30 周年にあたる。 $(TMTSF)_2PF_6$ の超伝導
は、12 kbar の圧力下において転移温度が 0.9 K で発現す
る。その後、アクセプター分子 (以下、アニオンと呼ぶ)

である PF_6^- を AsF_6^- や SbF_6^- , ClO_4^- 等のアニオンに置換することで化学的圧力を用いた研究へと発展していく。一方、ドナー分子自体に注目し、硫黄を含む六員環を付加した BEDT-TTF (bisethylenedithio-tetrathiafulvalene) 分子が合成され、このドナー分子でも $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ReO}_4$ という物質で超伝導が観測された[8]。BEDT-TTF 分子を用いた有機導体は、多種多様なアニオン分子との組み合わせで合成されるのみでなく、ドナー分子の配列が異なる合成も行われた。これにより、BEDT-TTF 分子による有機導体では、超伝導や磁性、電荷秩序といった様々な興味深い物性が報告されている。一例としては、 D_{2d} 型有機超伝導体の中で最高の超伝導転移温度は、BEDT-TTF 分子からなる有機導体 $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$ における 14.2 K (82 kbar の圧力下) である[9]。

これらを踏まえて、有機導体の主な特徴を列挙してみよう。

1. 有機導体は複雑な分子構造や結晶構造を持つにもかかわらず、分子間結合が分子内結合よりも非常に弱いため、電子状態を考える際に構成分子の複雑な詳細に立ち入る必要がない。これは、バンド構造において、物性に重要な寄与を与えるフェルミ準位近傍のバンドに注目すれば十分であることに対応する。
2. ドナー分子の π 軌道と積層構造により、低次元性を持ちやすくなる。
3. 分子間結合は比較的弱い結合であることから、圧力印加により分子間の格子定数や結晶構造の変化が起こりやすい。それによる電子状態の変化が多様な物性を生み出す。
4. 化学修飾を行えるため、アニオン分子を置換して化学的圧力を加えたり、ドナー分子自体を拡張する等の制御が行える。
5. 分子間結合が電子の移動エネルギーの起源となるため、電子の運動エネルギーが小さくなる。そのため、電子間のクーロン斥力相互作用の影響が相対的に強くなり、強相関電子系となる。

これらが背景となり、有機導体の研究は、化学分野の研究者を中心とした合成による研究のみではなく、低温や高圧等での電子状態を観測する実験物理の研究者、強

相関電子系の理論やバンド構造に関する理論物理の研究者が相補的に発展させてきたと言える。それにより、有機導体では、超伝導や磁性、電荷秩序、モット (Mott) 絶縁体等の物性のみならず、最近活発に議論されているスピン液体状態の可能性[10]、ディラック (Dirac) コーン型バンドによる質量ゼロのフェルミ粒子の物性[11]等が議論されている。

3. 多体電子系

現実の結晶中では、様々な相互作用が生じる。ここでは多数の電子により構成される系 (多体電子系) に注目し、電子系でのエネルギーについて説明する。電子状態は、運動エネルギーと電子間のクーロン相互作用に起因するエネルギーの2つから構成される。

3.1 運動エネルギーとバンド構造の形成

ある原子が単独で存在する場合、電子はその原子の周囲にエネルギー準位に基づいた電子軌道を形成する。しかし、一般に固体中では、隣接した原子の周囲の電子軌道が混成する事でより複雑な電子軌道を形成する (図3)。このエネルギー準位を電子の運動量で表示したものがバンド構造である。これを理論計算により評価する際、有

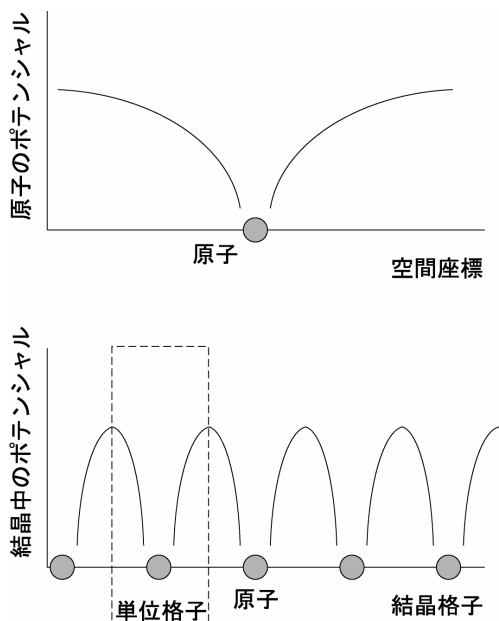


図3. 単独原子と結晶が作るポテンシャルの概念図

機導体の研究では拡張ヒュッケル (Hückel) 法による電子の重なり積分に関する計算が活躍している[12]. これは分子軌道を計算する事で分子上の電子状態を求める方法である. 分子軌道を求めた後, 結晶を構成する分子上に適用する事で分子間の重なり積分を計算する. 重なり積分が得られれば, 電子が分子間を移動するエネルギーが評価できる. ここで, 各電子は分子が作る周期的なポテンシャルにある程度束縛されて運動することから, 各分子を電子が存在できる場所 (サイトと呼ばれる) とみなすことが出来る. この様に分子間の電子の運動エネルギーを電子によるサイト間の飛び移りと見なす模型を強束縛模型と呼ぶ. 拡張ヒュッケル法によるバンド計算は, 個々のサイト間を電子が飛び移る際の移動エネルギーを与え, 有機導体の物性研究に多くの知見を与えている.

一方, 最近, 活発化しているバンド構造の計算方法として, 第一原理バンド計算による評価が挙げられる. これは, 無機物におけるバンド構造の計算を実験結果に依らない非経験的なものとして行うために用いられてきた手法である. 第一原理バンド計算は密度汎関数理論[13]に基づいており, 擬ポテンシャル+平面波基底による方法[14]と全電子状態を計算する方法[15]とがある. 第一原理バンド計算による有機導体のバンド構造の計算では, 分子軌道を仮定せず, 分子を構成する原子の電子軌道を直接計算し, 得られた電子状態から電子の運動エネルギーであるバンド構造が得られる. 得られたバンド構造に基づく強束縛模型を構築する際には, サイト間の移動エネルギーを様々な値にすることでフィットするという方法が無機物や有機物を問わず以前から行われてきた. 最近, 注目されている方法では, 最局在ワニエ (Wannier) 関数を用いた第一原理計算による有効強束縛模型の導出[16, 17]も行われ, 有機導体でも数例存在する[18].

3. 2 電子間相互作用の扱い

強束縛模型の導入により, 電子間に生じるクーロン斥力相互作用の扱いにも, 電子の局在性の効果を導入する事で単純化を行うことができる. すなわち, 「電子はサイト上にしか存在できない」ということから, クーロン斥力が最も強くなる状況は同一サイトに2つの電子がきた場合と考えられる. この時, パウリ (Pauli) の原理から同一サイト上に存在できる電子は, 反平行のスピンを持った電子同士のみである (図4). この時に生じる電子間斥力相互作用はしばしばオンサイト相互作用と呼ばれる. 強束縛模型にオンサイト相互作用を考慮した模型はハバード (Hubbard) 模型と呼ばれる. また, 無機物ではサイ

トが原子または軌道に対応するのに対し, 有機導体ではサイトが分子に対応する. 当然, 分子の方が原子よりも大きいことから, そこに局在した電子間のクーロン相互作用は有機導体の方が小さくなる. これは有機導体での強相関効果に起因する物性において, クーロン斥力相互作用の長距離成分の役割が無機物の場合よりも重要となってくることに対応している. 実際, 有機導体では最隣接サイト間の斥力相互作用等を導入しなければ理論的に理解できない物性 (電荷秩序状態等はその例である) が多々報告されている[20, 21].

また, 最近の試みとして, 第一原理バンド計算により, 電子間クーロン斥力相互作用の振る舞いを計算するというものがある[18]. この計算では, 無機物の場合, 近距離クーロン斥力相互作用が非常に強く, 長距離成分は減少する. 一方, 有機導体の場合, 近距離クーロン斥力相互作用が無機物に比べて小さく, 長距離成分は無機物と同様に減少していくという結果を示している. ここからも, 有機物の強相関効果を扱う際には, 電子間クーロン斥力相互作用の長距離成分が重要であることがわかる.

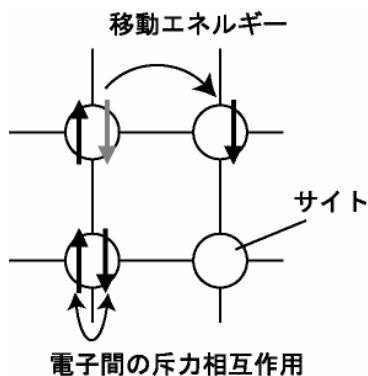


図4. 強束縛模型+電子間相互作用であるハバード模型における移動エネルギーと電子間相互作用の概念図. 矢印は電子のスピンを表し, 丸はサイトを表す.

4. 有機導体におけるバンド構造に起因する物理

有機導体におけるバンド構造とそれが結果として与える影響に関する研究は様々ある. それら全てに触れることは不可能であるため, 最近の研究の中で, バンド構造が重要な役割を果たしたものの, 特に拡張ヒュッケル法と第一原理バンド計算の両方に触れられるものを紹介しようと思う.

4. 1 α -(BEDT-TTF)₂I₃のゼロギャップ電気伝導

ディラック電子に起因したゼロギャップ電気伝導体は2005年にグラフェンで実現され、大変注目されている[22]。グラフェンとは蜂の巣状に炭素原子が結合した単

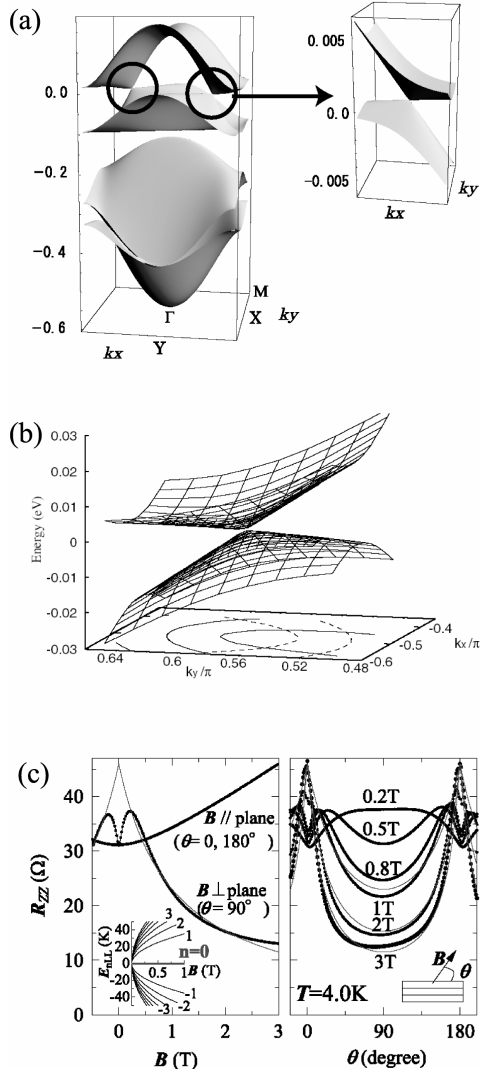


図5. 有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃におけるディラック電子に関する研究の一部。(a) 拡張ヒュッケル法に基づいて得られたバンド構造と(b) 第一原理バンド計算により得られたディラックコーン近傍のバンド構造。(c) 磁場下におけるゼロギャップ伝導体に特有のランダウ準位の観測(黒実線)と理論計算(赤波線)。

一層の物質である。ディラック電子によるゼロギャップ電気伝導体では、素粒子のニュートリノと同様に質量ゼロの電子が結晶中に存在し、それが電気伝導を担う。このため、通常の金属や半導体では見られない電気伝導特性や量子効果を示す。

有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃に対する拡張ヒュッケル法を用いた計算から得られるバンド構造を図5(a)に示す。これから、運動量空間のある一点において第一バンドと第二バンドが接触し、その周囲では線型な分散関係を持っていることがわかる[23]。さらに、より厳密なバンド計算方法である第一原理バンド計算により得られたバンド構造が示され(図5(b))、拡張ヒュッケル法と同様に、第一バンドと第二バンドが線型分散を持ち、運動量空間のある一点で接触していることが示された[24]。これらは、 α -(BEDT-TTF)₂I₃におけるゼロギャップ伝導体の理論研究であるが、実験的な確証も最近、得られた。それは、磁場下におけるこの物質の電気抵抗を調べたもので、ゼロギャップ伝導体に特有の振る舞いが観測された。この測定では、磁場下における物質中の電子のエネルギーがランダウ(Landau)準位と呼ばれる離散的な値しか取れなくなることで、さらにゼロギャップ伝導体では特有のランダウ準位が現れることを用いており、測定結果はゼロギャップ伝導体で予想される理論計算とよく一致している[25]。この有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃は、多層状の単結晶でゼロギャップ電気伝導体としての性質を持つ世界初の物質である。単一層のグラフェンとの比較等も含め、電子状態の特性に関するさらなる研究が期待される。

4. 2 τ -(EDO-S,S-DMEDT-TTF)₂(AuBr₂)_{1+y}の熱電効果

熱電効果とは、電気伝導体や半導体等において熱エネルギーと電気エネルギーが相互に影響を及ぼし合う効果の総称とである。ここでは、その中でも物質の温度差が電圧に変換されるという現象に対応するゼーベック(Seebeck)効果について、有機導体 τ -(EDO-S,S-DMEDT-TTF)₂(AuBr₂)_{1+y}(EDO-S,S-DMEDT-TTF=ethylenedioxy-S,S-dimethylethylene dithiopyrene)に関して行われた最近の研究を紹介する。

有機導体 τ -(EDO-S,S-DMEDT-TTF)₂(AuBr₂)_{1+y}は非常に大きな単位格子を持っているが、ドナー分子を含む伝導面内の分子配置は図6(a)に示す様な配列をしている。この物質は基本的にD₂A型の有機導体であるが、アニオン分子の比がわずかに2:1型からずれており、D₂A_{1+y}型となっている。これにより、ドナー分子あたりの電子の数を制御できるという特徴がある。この有機導体に対する

拡張ヒュッケル法を用いたバンド計算の結果[26]を図6(b)に示す。これから、全体のバンド構造は分散的であるものの、バンド構造中央に非常に平坦な部分を持つこと

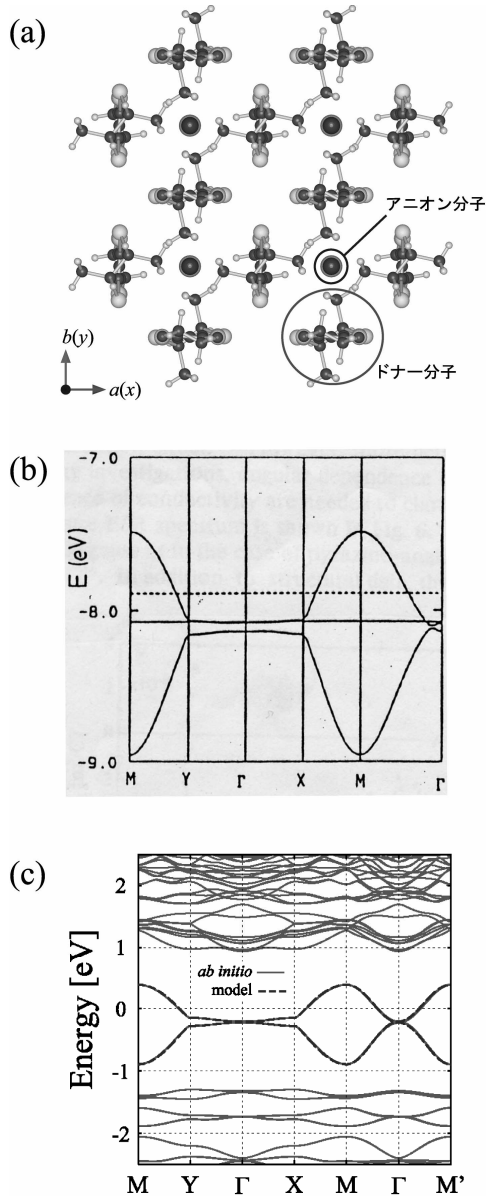


図6. (a)有機導体 τ -(EDO-*S,S*-DMEDT-TTF) $_2$ (AuBr $_2$) $_{1+y}$ の伝導面内の分子配置。(b)拡張ヒュッケル法によるバンド構造と(c)第一原理バンド計算によるバンド構造。青波線は有効強束縛模型によるフィットである。M点やY点、 Γ 点は運動量空間における対称性のいい値に対応する。

が分かる。最近、この物質に対する第一原理バンド計算が行われたが[27]、バンド構造は拡張ヒュッケル法と類似したものとなっている(図6(c))。また、第一原理バンド計算の結果をみると、フェルミ準位より離れたエネルギー領域において非常に局在化したバンド構造が存在する。これは、「2.有機導体とは」や図1で触れた分子内の原子の結合によるバンド分散に起因したものである。青い波線は第一原理バンド計算のバンド構造をよくフィットする有効な強束縛模型によるバンド分散である。このバンド構造の特徴として、バンド分散の中央近傍にある小さなエネルギーギャップの存在が挙げられる。

この物質におけるゼーベック係数の温度依存性に関する測定の結果を図7(a)に示す。これにより室温から温度の低下に伴いゼーベック係数は負の大きな値へと増加し、140K から 150K の温度領域でゼーベック係数が約 $-130 \mu\text{VK}^{-1}$ という負の最大値を持った後、さらに低温化することでゼーベック係数はゼロへと向かうことが示された[28]。この物質のゼーベック係数の温度依存性に関する理論研究として、図6(c)で示された第一原理バンド計算に基づいて得られた有効強束縛模型にボルツマン(Boltzmann)輸送理論を適用することで、ゼーベック係数の温度依存性を計算したものが図7(b)である[27]。赤

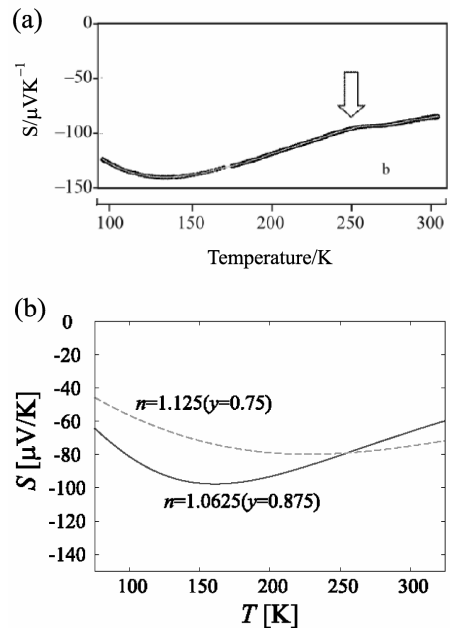


図7. 有機導体 τ -(EDO-*S,S*-DMEDT-TTF) $_2$ (AuBr $_2$) $_{1+y}$ のゼーベック係数の温度依存性に関する(a)実験結果と(b)ボルツマン輸送理論を用いた理論研究。

い実線はこの物質のアニオン分子量に近い状況での計算結果で、ゼーベック係数の温度依存性とその値がよく再現されている。この様なゼーベック係数の温度依存性の起源としては、高い熱電能の起源として最近指摘されている“プリン型バンド”（バンド構造において平坦部分と分散的な部分を併せ持つバンド構造）の効果[29]とこの物質のバンド構造の中央近傍にある小さなエネルギーギャップの存在により理解できることが示されている。バンド中央付近にあるエネルギーギャップは非常に小さいにも関わらず、ゼーベック係数の温度依存性というマクロな測定結果として現れたといえる。

ここでは、有機導体におけるバンド構造の詳細が重要な役割を果たすもの内、拡張ヒュッケル法と第一原理バンド計算の両方が行われた研究の一部に触れた。拡張ヒュッケル法はもちろん、これからも強力な手法である。一方、有機導体のバンド構造を知る上で、今後徐々に第一原理バンド計算による評価も重要となりつつある。これらが相補的に発展していくことで、有機導体のさらなる理解を促進すると思われる。

5. 有機導体における強相関効果に関する物理

有機導体における強相関効果は非常に重要であるのはもちろんだが、無機物に比べ、複雑なものとなっている側面がある。その一因は、有機導体のバンド幅が無機物のそれと比べて狭いことにより、電子相関が強く現れることに対応する。さらに、電子が局在する場所であるサイトが有機導体では分子となるため、近距離の電子間クーロン斥力相互作用が無機物に比べ小さくなり、相対的に長距離の電子間クーロン斥力相互作用を考慮する必要が出てくる。これは有機導体での金属-絶縁体転移の起源として、磁気秩序のみならず、しばしば電荷秩序に起因していることから明らかである。有機導体における強い電子相関効果が与える影響は、非常に活発に研究されている。ここではそれらの中で、世界初の有機超伝導体であり、強相関効果により様々な電子状態が現れる擬一次元有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ ($\text{X}=\text{PF}_6, \text{ClO}_4$ 等) に関する研究を紹介しようと思う。

有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ 及び $(\text{TMTTF})_2\text{X}$ (TMTTF=tetramethyl-tetrafulvalene) では、力学的圧力やアニオン分子置換による化学的圧力の変化に応じて、非常に多彩な電子状態が発現する。図8は有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ 及び $(\text{TMTTF})_2\text{X}$ に関する圧力-温度相図である[30]。低温領域では圧力の増加ともない電荷秩序やスピン-パイエルス (Peierls) 状態、反強磁性、スピン密度波 (Spin D

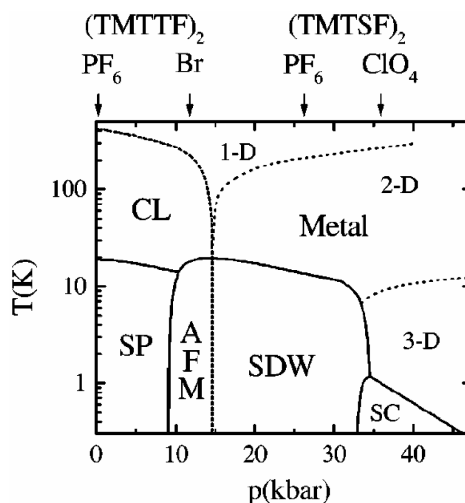


図8. 有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ 及び $(\text{TMTTF})_2\text{X}$ に関する圧力-温度相図。CLは電荷局在, SPはスピン-パイエルス状態, AFMは反強磁性, SDWはスピン密度波, SCは超伝導を表す。

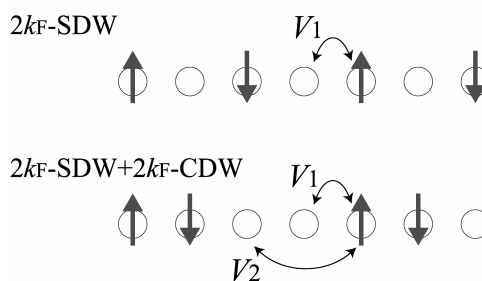


図9. 従来のSDWの電子状態とSDWとCDWが同周期で共存した電子状態の概念図

ensity Wave, SDW), 超伝導が現れる。 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ ($\text{X}=\text{PF}_6, \text{ClO}_4$) の超伝導状態は、化学的圧力や力学的圧力から見て、比較的高圧側に位置する。 $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ は常圧の低温下ではSDWに起因した絶縁体となるが圧力をかけることで、約1 Kで超伝導転移する。この超伝導状態に関しては、以前から超伝導ギャップが異方性を持つ非従来型超伝導状態である可能性が実験的にも理論的にも指摘されてきた[31]。また、近年行われた散乱X線散乱実験では、超伝導相と隣接するSDW相の電子状態が従来のSDW状態ではなく、SDWの周期と同じ電荷密度波 (Charge Density Wave, CDW) と共存していることが示された (図9) [32]。この様な電子状態

を理解できる有効的なモデルとして、長距離の電子間クーロン斥力相互作用を考慮した拡張ハバード模型が提案された[33].

さらに、この物質の超伝導状態として、スピン三重項超伝導を示唆する実験結果が複数報告された。従来の超伝導体の多くはクーパー対を形成する2電子のスピン向きは反平行なものであった。これらはスピン一重項超伝導と呼ばれ、多くの超伝導体がこれに属す。一方、スピンの向きが同じ2電子でもクーパー対は形成できる。これらはスピン三重項超伝導と呼ばれ、非常に稀な超伝導体である。現在、 He^3 の超流動現象が唯一確定しているものであり、その可能性が強く示唆されている物質では Sr_2RuO_4 や重い電子系と呼ばれる物質群の UPt_3 等わずかである。ここでは、最近報告された $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の上部臨界磁場測定を紹介する。ここで、上部臨界磁場とは超伝導体に磁場をかけたときに超伝導状態が壊れる臨界磁場である。スピン一重項超伝導の場合、パウリ限界磁場 H_P に向かって超伝導状態は抑制されていくが、スピン三重項では $S_F=\pm 1$ の場合、 H_P 以上の高磁場下でも超伝導転移が可能である。図10(a)の報告では、 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ における上部臨界磁場は超伝導転移温度から見積もられる $H_P(\approx 20\text{kOe})$ より高磁場でも超伝導転移していることが示された[34]。ただし、非常に最近行われた実験では、超伝導揺らぎの可能性も指摘されている。

このようなSDWとCDWの共存と、超伝導ギャップが異方的な非従来型超伝導、さらにスピン三重項超伝導の可能性という実験事実を統一的に理解できる理論研究として、スピン揺らぎと電荷揺らぎの共存を媒介としたスピン三重項超伝導の可能性が指摘された[35]。ここでは、最近行われた $(\text{TMTSF})_2X$ を念頭に置いた模型に関する磁場下での超伝導転移の理論研究を紹介する。SDWとCDWの共存が記述できる拡張ハバード模型に対して、磁場の効果としてゼーマン効果を考慮し、強相関効果を摂動論によって扱った微視的理論計算による結果を図10(b)に示す[36]。これは、磁場の増加により磁場耐性の弱いスピン一重項超伝導から磁場耐性の強いスピン三重項超伝導等の状態に超伝導状態間で転移する可能性を示している。この理論研究と実験結果との関係に興味を持たれる。

ここでは有機導体 $(\text{TMTSF})_2X$ という物質に関する研究を通じて、SDWやCDW、超伝導といった強相関効果に起因した現象が複雑に共存・競合する様子を見てきた。最後に、他の有機導体で強相関効果が重要となる現象を簡単に触れたいと思う。具体例を挙げていけば、枚

挙に暇がないため2例に留める。まず、強い電子相関効果に起源を持つ典型的な現象としてモット絶縁体が挙げられる。これは、 $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2X$ という物質で観測されており、ドナー分子が作る二量体が三角格子的に配置していることから、低温でもスピン秩序が起らないスピン液体状態の可能性が議論されている[10]。また、 $\theta\text{-(BEDT-TTF)}_2X$ という物質では非線形伝導という従来の伝導特性とは異なる現象が観測されている。これは電荷秩序[20, 21]に起因していると考えられているが、その電荷秩序は複数のパターンが競合しあっており、全容が解明したとは言い難い。これらの起源として、長距離

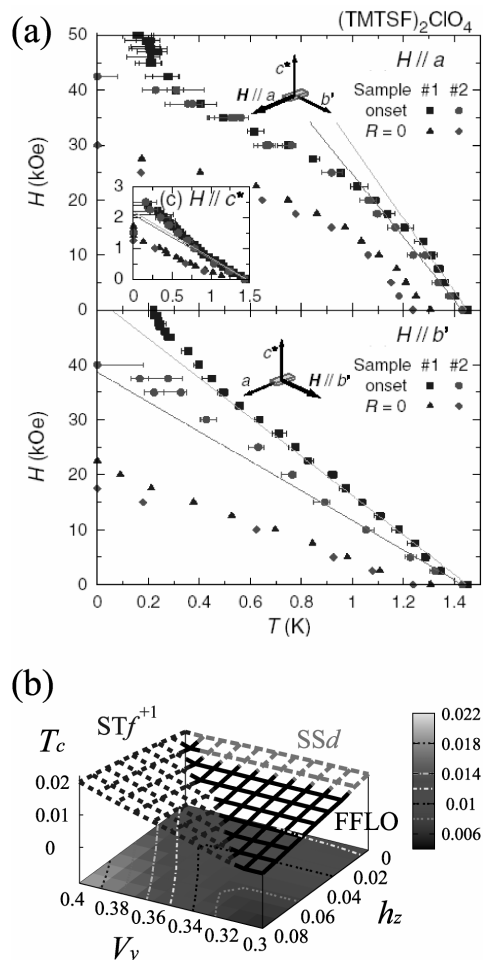


図10. (a)有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ における上部臨界磁場測定。(b)拡張ハバード模型を用いて微視的理論により計算された超伝導転移温度のパラメータ空間の相図。SSdはスピン一重項、 STf^{+1} はスピン三重項超伝導を表す。

クーロン斥力相互作用や格子振動の可能性が議論されている。

6. まとめと今後の展望

本稿では、通常の有機物がなぜ絶縁体なのかを通じて、有機導体がどのような設計指針で合成されたのか、さらにそれらの延長線上に見えてきた有機導体という非常に豊かな物理が存在する研究領域のごく一部について記させていただいた。そこには、複雑な分子から構成される結晶構造とは裏腹に、非常にシンプルなバンド構造が得られ、時としてそれがその物質の特性を理解するための最も重要な鍵となり得ることを見てきた。また、電子の移動エネルギーが分子間結合という弱いエネルギーを起源としていることにより、電子相関が強くなりやすく、磁性や電荷秩序、超伝導といった多様な電子状態が起こり得ることを見てきた。

最後に、今後の展望を記したいと思う。合成化学の分野では、これまでの TTF 系ドナー分子ではない TTP (te trathiapentalene) 系のドナー分子による有機超伝導体の合成が活発であり、 β -(BDA-TTP)₂X (2,5-bis(1,3-dithian-2-ylidene)-1,3,4,6-tetrathiapentalene) という物質は新しい有機超伝導物質群として注目されている[37]。この物質と理論物理との関係で言えば、TTP 系分子は TTF 系分子と分子骨格の構造が異なるため、従来行われてきた拡張ヒュッケル法によるバンド計算の結果が、第一原理バンド計算の結果や実験的に観測されたフェルミ面の結果と若干異なる可能性が指摘されている。このような差異が生じる原因の解明は TTF 系分子と TTP 系分子の違いに関する知見を与えるのみでなく、さらに興味深い物質の開発へと還元できるものと考えられる。

また、D₂A 型の有機超伝導体ではない有機超伝導体として、最近合成された物質にピセンの結晶による超伝導体がある[38]。これは芳香族としては世界初の超伝導体であり、有機化合物では世界最高の超伝導転移温度である 18K に達した。このような非 D₂A 型有機導体が秘める可能性も今後、活発に議論されていくと考えられる。

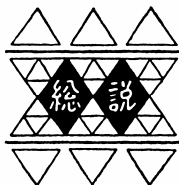
一方、有機導体において興味深い物性の発現環境は、高圧下であったり、極低温であったりと極限環境である場合が主である。これにともなう実験技術の発展もめざましく、数 GPa という超高圧下において数 K という極低温での精密な物性観測が可能となっている。このような実験技術の発展は、さらなる極限環境下における新奇な電子状態の発見に繋がると考える。有機導体に関する研究の発展は、化学者、実験物理学者、理論物理学者の協力

関係が重要な役割を果たしてきた。このような分野横断的な研究者間の協力による活発な研究活動が、問題を着実に解決していくと期待したい。

参考文献

- [1]. T. Ishiguro, K. Yamaji, G. Saito, *Organic Superconductors* (Springer-Verlag, Heidelberg, 1998) 2nd ed.
- [2]. H. Seo, C. Hotta, H. Fukuyama: Chem. Rev. **104**, 5005 (2004).
- [3]. L. B. Coleman, M. J. Cohen, D. J. Sandman, F. G. Yamagishi, A. F. Garito, A. J. Heeger: Solid State Commun. **12**, 1125 (1973).
- [4]. 総説として, H. Mori: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051003 (2006) 等がある。
- [5]. H. K. Onnes: Akad. Van Wetenschappen (Amsterdam) **14**, 113, 818 (1991).
- [6]. J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer: Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).
- [7]. D. Jérôme, A. Mazud, M. Ribault, K. Bechgaard: J. Physique Lett. **41**, L95.
- [8]. S. S. P. Parkin, E. M. Engler, R. R. Schumaker, R. Lagier, V. Y. Lee, J. C. Scott, R. L. Greene: Phys. Rev. Lett. **50**, 270 (1983).
- [9]. H. Taniguchi, M. Miyashita, K. Uchiyama, K. Satoh, N. Mori, H. Okamoto, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Hedo, Y. Uwatoko: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 468 (2003).
- [10]. 総説として, K. Kanoda: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051007 (2006) 等がある。
- [11]. 総説として, N. Tajima, S. Sugawara, M. Tamura, Y. Nishio, K. Kajita: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051010 (2006) 等がある。
- [12]. 先駆的な研究として, T. Mori, A. Kobayashi, Y. Sasaki, H. Hobayashi: Bull. Chem. Soc. Jpn. **56**, 3376 (1983) 等がある。
- [13]. P. Hohenberg, W. Kohn: Phys. Rev. **136** (3B), 864 (1964).
- [14]. この方法に基づく第一原理バンド計算パッケージの例として, "Quantum ESPRESSO (<http://www.quantum-espresso.org/>)"がある。
- [15]. この方法に基づく第一原理バンド計算パッケージの例として, "WIEN2K (<http://www.wien2k.at/>)"がある。
- [16]. N. Marzari, D. Vanderbilt: Phys. Rev. B **56**, 12847

- (1997).
- [17]. 最局在ワニエ関数を用いたパッケージとして, "Wannier90 (<http://www.wannier.org/>)"がある.
- [18]. K. Nakamura, Y. Yoshimoto, T. Kosugi, R. Arita, M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 083710 (2009).
- [19]. T. Kosugi, T. Miyake, S. Ishibashi, R. Arita, H. Aoki: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 113704 (2009).
- [20]. M. Watanabe, Y. Noda, Y. Nogami, H. Mori: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 116 (2004).
- [21]. T. Mori: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1469 (2003).
- [22]. A. K. Geim, K. S. Novoselov: Nat. Mater. **6**, 183 (2007).
- [23]. S. Katayama, A. Kobayashi, Y. Suzumura: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 054705 (2006).
- [24]. H. Kino, H. Miyazaki: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 035704 (2006).
- [25]. N. Tajima, S. Sugawara, R. Kato, Y. Nishio, K. Kajita: Phys. Rev. Lett. **102**, 176403 (2009).
- [26]. G. C. Papavassiliou, D. J. Lagouvardos, J. S. Zambounis, A. Terzis, C. P. Raptopoulou, K. Murata, N. Shirakawa, L. Ducasse, P. Delhaes: Mol. Cryst. Liq. Cryst. **285**, 83 (1996).
- [27]. H. Aizawa, K. Kuroki, H. Yoshino, K. Murata: Physica B **405**, S27 (2010).
- [28]. H. Yoshino, G. C. Papavassiliou, K. Murata: J. Therm. Anal. Cal. **92**, 457 (2008).
- [29]. K. Kuroki, R. Arita: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 083707 (2007).
- [30]. M. Dumm, A. Loidl, B. W. Fravel, K. P. Starkey, L. K. Montgomery, M. Dressel: Phys. Rev. B **61**, 511 (2000).
- [31]. 総説として, I. J. Lee, S. E. Brown, M. J. Naughton: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051011 (2006)等がある.
- [32]. J. P. Pouget, S. Ravy: J. Phys. I France **6**, 1501 (1996).
- [33]. N. Kobayashi, M. Ogata, K. Yonemitsu: J. Phys. Soc. Jpn. **67**, 1098 (1998).
- [34]. S. Yonezawa, S. Kusaba, Y. Maeno, P. Auban-Senzier, C. Pasquier, D. Jérôme: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 054712 (2008).
- [35]. Y. Tnaka, K. Kuroki: Phys. Rev. B **70**, 060502 (2004).
- [36]. H. Aizawa, K. Kuroki, Y. Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 124711 (2009).
- [37]. J. Yamada, M. Watanabe, H. Akutsu, S. Nakatsuji, H. Nishikawa, I. Ikemoto, K. Kikuchi: J. Am. Chem. Soc. **123**, 4174 (2001).
- [38]. R. Mitsuhashi, Y. Suzuki, Y. Yamanari, H. Mitamura, T. Kambe, N. Ikeda, H. Okamoto, A. Fujiwara, M. Yamaji, N. Kawasaki, Y. Maniwa, Y. Kubozono: Nature **464**, 08859 (2010).



局所地形の影響を考慮した強風マップの作成

大熊武司* 岡田 創** 片桐純治** 丸川比佐夫** 野田 博***

Design wind speed map considering with effect of topography

Takeshi OHKUMA* Hajime OKADA** Junji KATAGIRI** Hisao MARUKAWA** Hiroshi NODA***

1. はじめに

建築基準法及び建築物荷重指針⁽¹⁾の風荷重算定では、地域ごとに与えられた基本風速 V_0 に建設場所の周辺状況に応じた風速鉛直分布係数 E を乗じて設計風速を定める。このとき地形の影響を受けると考えられる場合は、その効果を考慮して設計風速を定める必要がある。局所的な地形の影響を考慮して設計風速を定めるには、1つの方法として指針に示される小地形による風速の割増係数を設計風速に乗じることが考えられる。

しかしながら、実際の地形は複雑であり指針に示される適用範囲を超えるものも多い。その一例として、山と山の間の谷間に沿って風が吹くような地形で、指針で考慮していない効果により風が強まり被害が生じた可能性が考えられる被害例⁽²⁾もある。故に、現実の地形の影響を反映して風速を推定する実用可能な手法の開発が必要である。

近傍に気象官署等が無い地点において風速統計量を推定する場合、台風の襲来傾度をモンテカルロ法を用いた台風シミュレーション^(3~7 等)により推定して統計処理することが行われる。台風シミュレーションでは、中心気圧低下量、台風進路、移動速度などのパラメータを統計量としてモデル化し、モンテカルロ法により任意の期間の台風をシミュレートすることにより、風速統計量を得る。台風シミュレーションより得られる風速統計量は上空の傾度風に関するものであり、これから地上の風速を推定するためには地表面の粗度や地形の影響を考慮する必要がある。

台風シミュレーションにより得られた結果から地上の風速を推定する手法として、領域気象モデル（メソスケールモデル）^(8,9)を用いた数値流体解析を行うことが考えられる⁽¹⁰⁾。メソスケールモデルを用いた解析では、解析領域を $1,000 \times 1,000 \text{ km}$ 程度の広さとし、ネスティング計算により最終的に格子間隔が $1 \sim 2 \text{ km}$ 程度の解像度の領域を解析する^(10 等)。さらに細かい小規模な地形の影響を考慮するために、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いた解析を組み合わせることも行われている^(12,13)。しかし、風速統計量を得るためには膨大な期間の解析を行う必要があり、メソスケールモデルを用いた解析により地上の風速を推定することは現時点では困難と考えられる。

孟・松井他^(14~17)は、ナビエ・ストークス方程式を傾度風に関する方程式と地表面の摩擦による成分に関する方程式に分け、傾度風速と地表面の摩擦による風速成分の近似式を得た。この方程式を台風 9119 号に適用し、台風時の風速の鉛直方向分布をべき数を粗度長の関数とした指数関数で近似できることを示した。この粗度長は、周辺の地形による影響を考慮した相当粗度長⁽¹³⁾を用いるが、風洞実験などにより全風向について相当粗度長を同定する必要がある。

風洞実験により上空風速と地上高さの風速の関係を定める場合、風洞内に納める地形模型の再現範囲が問題となる。十分な精度で地形を再現できるように大きな縮尺率で模型化した場合、模型化範囲の外側の地形の影響を反映するように流入気流を何らかの形で仮定する必要がある。一方、模型化範囲を大きくした場合、地形を再現する精度を考えると局所的な地形の影響を評価して風速を測定することは困難である。また、いずれの場合も情報が得られる地点は風速の測定を行う点に限られる。

上述のように、現時点では台風シミュレーションによって得られた傾度風速から地形の影響を考慮して地上高

*名誉教授、客員教授、工学研究所

Professor Emeritus, Visiting Professor, Research Institute for Engineering

** 泉創建エンジニアリング

Izumisohken Engineering Co., Ltd.

*** 三井住友建設

Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

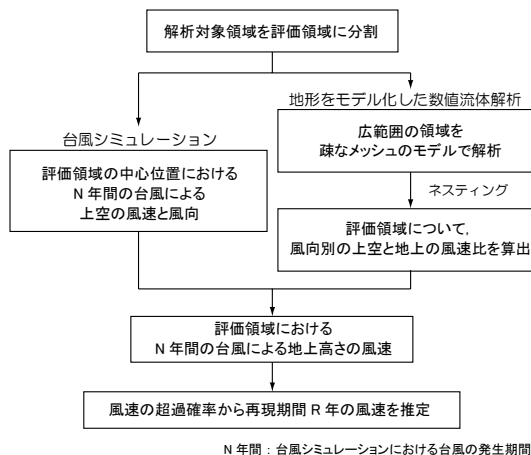


図1 地形による影響を考慮した任意の再現期間年の風速算出要領

さにおける風速を推定するには困難を伴う。そこで、本研究では、上空と地上の風速の関係を標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析により求め、地形の影響を考慮して任意の再現期間の風速を推定する手法について検討を行う。広範囲の地形をモデル化して標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析を行うことにより、検討対象地点の風上側の地形の影響を考慮して上空と地上の風速の関係をマップとして得ることが比較的容易に出来る。さらに、提案した手法に基づいて地形の影響を考慮した強風マップの作成を行う。以下に本研究の構成を述べる。

2章では、本研究における地形の影響を考慮した任意の再現期間の風速を推定する手法の概要を示す。併せて、同手法で用いる数値流体解析と台風シミュレーションの手法について示す。数値流体解析による複雑地形の流れの解析については、実際の複雑地形を対象とした風洞実験と比較検討した研究例^(18,19,20)はあるものの、広範囲の地形を模型化した風洞実験と比較した例は見当たらない。そこで、3章では神奈川県中央部を対象として地形模型を用いた風洞実験を行い、数値流体解析結果の精度の検討を行う。4章では、対象領域を神奈川県内の2箇所のエリアとして本研究で提案する任意の再現期間の風速を推定する手法を適用し、強風マップの作成を行う。5章では、検討結果についてまとめる。

2. 解析手法の概要

2.1 地形の影響を考慮した任意の再現期間の風速の推定方法

本研究では、解析対象領域を評価領域に分割し、各評価領域について台風シミュレーション及び数値流体解析

結果を組み合わせることで地形の影響を考慮して任意の再現期間の風速の推定を行う。図1に算出要領のフローを示す。

台風シミュレーションでは、各評価領域の中心位置における上空の風向と風速を推定する。台風シミュレーションによる台風の発生期間は、任意の再現期間 R 年の超過確率を統計的に十分に得られる N 年間とする。

数値流体解析では、評価領域の上空と地上高さの風速の関係を風向別に求める。評価領域の流入条件として風上側の地形の影響を十分に考慮できるように、広範囲の地形を疎な格子間隔でモデル化した1次領域の解析を行い、ネスティングを行うことにより局所的な地形の影響を考慮できる格子間隔のモデルで評価領域を含む領域を解析する。

台風シミュレーションから得られた N 年間の台風による上空の風速に、数値流体解析より得られた上空風速と地上高さの風速の比を風向に応じて乗じることにより、評価領域内の各点について地上高さにおける N 年間の台風によって生じる風速を推定する。

任意の再現期間 R 年の風速は、評価領域内の各点について得られた N 年間の台風による風速から年最大風速の超過確率を算出して推定する。

2.2 数値流体解析手法の概要

数値流体解析は、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いたレイノルズ平均 NS 方程式によるシミュレーションにより行う⁽²¹⁾。

非圧縮性の流体现象は、下に示す連続の式と NS 方程式で記述される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

ここで、 U_i は瞬間速度ベクトルの各成分、 P は圧力、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数である。速度及び圧力は、次のように平均部分と変動部分に分解される（レイノルズ分解）。

$$U_i = \bar{U}_i + u_i, \quad P_i = \bar{P}_i + p_i \quad (3)$$

式(3)を式(1)ならびに(2)に代入し、両者にレイノルズ平均を施すことにより次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) \quad (5)$$

右辺の $\overline{u_i u_j}$ はレイノルズ応力である。レイノルズ応力を線形渦粘性型モデルで近似すると次式で与えられる（Boussinesqの渦粘性近似）。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

ここで、 k は乱流エネルギー、 ε はエネルギー散逸率、 ν_t は渦動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーの δ である。本研究で用いている標準型 k - ε モデルでは $C_\mu=0.09$ とする。乱流エネルギー k の輸送方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (7)$$

ここで標準型 k - ε モデルでは $\sigma_k=1.0$ とする。また、 P_k はせん断力による k の生成項で、次式で与えられる。

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

また、エネルギー散逸率 ε の輸送方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{e1} P_k - C_{e2} \varepsilon) \quad (9)$$

本研究で用いた標準型 k - ε モデルでは $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{e1}=1.44$ 、 $C_{e2}=1.92$ とする。

本研究では、支配方程式の離散化は差分法を用いる。空間微分の差分近似は移流項については3次風上差分、その他の空間差分は2次中心差分とする。時間微分の差分近似はAdams-Bashforth法⁽²²⁾（2次陽解法）を用いる。差分近似した運動方程式を連続の式を満足するように時間進行させるための計算アルゴリズムはHSMAC法⁽²³⁾を用いる。計算格子は不等間隔の直交スタaggerド格子を用いる。

流入境界はべき数 α の指数分布の境界層乱流を設定する。流入におけるエネルギー散逸率 ε は乱流エネルギー k の生産と散逸がほぼ釣り合っているものとして与える。

$$u(z) = u_0 (z/z_0)^\alpha \quad (10.a)$$

$$k(z) = 1/1.2 \cdot \sigma_u(z)^2 \quad (10.b)^{(24)}$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{\partial u(z)}{\partial z} \quad (10.c)$$

$$\sigma_u(z) = 0.1u(z)/(z/z_G)^{(-\alpha-0.05)} \quad (10.d)$$

流出境界は平均流速の勾配0の条件、側面及び上面の境界についてはslip条件を与える。また、地表面（壁面）の境界については、粗面対数則分布を仮定する。

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (11.a)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (11.b)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa z} \quad (11.c)$$

ここで、 $C_\mu=0.09$ 、 d :ゼロ面変位、 z_0 :粗度長、 z :物体面からの距離、 u^* :摩擦速度である。

2.3 台風シミュレーション概要

本研究では、上空風の風速統計量を安井・大熊他^(5,7)の研究に基づくモンテカルロ法を利用した台風シミュレーションにより算出する。安井・大熊他^(5,7)の研究では、台風の再現に関わるパラメータを解析領域、台風発生域での特性（発生頻度、移動速度、中心気圧低下量）、台風の移動特性（移動速度、中心気圧低下量）としている。モデルを作成する際に用いた台風の資料は、1951年から1995年の間に発生した台風の内、中心気圧が980hPaより低下した台風である。

図2に台風シミュレーションを行う解析領域と区画を示す。各区画内の数値は、1951年から1995年に各区画を通過した台風の個数を示すものである。風速の推定値

域を日本全域としたことにより、解析領域は北緯 $24^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、東経 $113^{\circ} \sim 152^{\circ}$ としている。

解析上の台風を発生させる領域は、北緯 $24^{\circ} \sim 26^{\circ}$ の区画とし、各区画における1年ごとの台風の出現個数の確率分布を Poisson 分布と仮定し、各区画で台風を出現させる。また、出現区画における台風の移動速度及び中心気圧低下量の確率分布は、正規分布としている。

台風移動時の移動速度と中心気圧低下量の統計的性質は、現時点の値から6時間後の値を次式の関係により推定する。

$$X_{new} = a \cdot X_{old} + b + \varepsilon \quad (12)$$

ここで、 X_{new} : 6時間後の値、 X_{old} : 当該時点での値、 a, b : 回帰係数、 ε : 誤差で平均値0の正規分布に従う。気圧分布は次式に示す Schloemer⁽²⁵⁾の気圧分布式を用いる。

$$P = P_c + \Delta P \cdot \exp(-r_m / r) \quad (13)$$

ここで、 P : 観測点の海面気圧、 P_c : 中心気圧、 ΔP : 中心気圧低下量、 r_m : 最大旋衡風速半径、 r : 観測点と台風中心との距離である。

安井・大熊他は1991年から1996年に発生した台風について(13)式を用いて最大旋衡風速半径 r_m を求めた。解析結果に基づけば、最大旋衡風速半径 r_m の統計量はほぼ正規分布で表され、その平均値と中心気圧低下量の関係は(14)式の関係にある。なお、 ΔP の値が小さいほど r_m のばらつきは大きくなることから、 $\Delta P < 33$ (hPa)の台風については r_m を一定の値とした。

$$\bar{r}_m = 2.06 \times 10^4 \cdot \Delta P^{-1.27} \quad (14)$$

ここで、 \bar{r}_m : 最大旋衡風速半径の平均
傾度風速は、光田・藤井⁽⁴⁾と同様に次式で求める。

$$V_g = \frac{C \sin \theta_r - f \cdot r}{2} + \sqrt{\left(\frac{C \sin \theta_r - f \cdot r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (15)$$

ここで、 C : 台風の移動速度、 f : コリオリパラメータ、 ρ : 空気密度、 θ_r : 台風中心から見た台風進行方向と観測点がなす反時計回りの角度である。

安井・大熊他は、台風シミュレーションによる風速推定値と各気象官署における観測値に3時間程度の移動平均を施した値が一致した傾向を示すことを示した。さらに連続した10分間平均風速の観測結果から、3時間移動平均値周りの10分間平均値の偏差はほぼ正規分布に従い、変動係数(移動平均値で除した時系列の標準偏差)は概ね0.1であることを示している。

本研究では、6時間毎に得られる台風経路を10分間間隔のデータに補間し、傾度風速はばらつきを考慮して10分間平均風速に相当する値に変換する。このとき、変動係数の値はやや大きめの0.15とした。

3. 数値流体解析による複雑地形上の流れの解析結果の検証

3.1 検証の目的

数値流体解析により複雑地形上の流れの解析を行うためには、検討対象とする領域の風上側の地形の影響を反映した流入条件を与える必要がある。1つの方法として、風上側に十分長い解析領域を取ることにより、対象領域

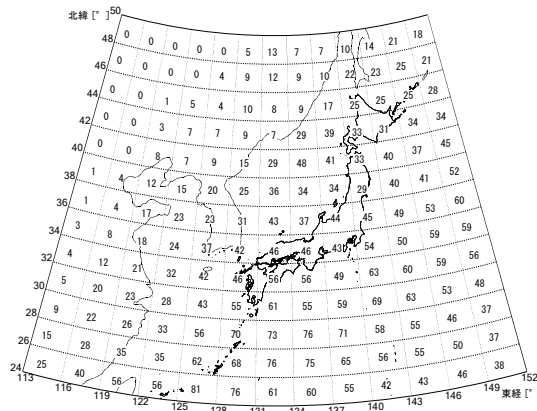


図2 台風シミュレーションにおける解析区画と台風通過数⁽⁵⁾

付近で風上側の地形の影響を反映した風速分布を得ることが考えられる。計算容量を考えると局所的な地形の影響を反映できる格子間隔で十分に広い領域の解析を行うことは困難であり、ネスティングによる解析を行う必要がある。しかし、先に述べたように広範囲の地形をモデル化した風洞実験と数値流体解析結果を比較した例は見当たらず、数値流体解析による解析結果の精度は十分に検証されたものとはいえない。そこで本研究では、神奈川県中央部を対象として縮尺 1/2500 の地形モデルを用いた風洞実験と数値流体解析を行い、数値流体解析による解析結果の精度の検証を行う。地形モデルは建物等の構造物はモデル化せずに一様粗度を貼り付け、地形が風速に及ぼす影響について着目する。

精度の検証は次の手順で行う。まず、地形モデルと等しい一様粗度を貼り付けた平板上を発達する乱流境界層を風洞実験により測定する。これと数値流体解析結果を比較し、数値流体解析で与える壁面境界の条件を定める。

次いで、神奈川県中央部を対象とした地形モデル上の気流を風洞実験により測定する。測定結果と数値流体解析による解析結果を比較することにより、解析時の格子間隔、ネスティングによる解析結果の精度を検討する。

図3に地形モデルのモデル化範囲を示す。

3.2 平板上の乱流境界層における検討

検討対象は、地形モデルに貼り付けたものと同じ 4mm 角のラフネスブロックを 30mm 間隔で流れ方向 5.4m、横方向 1.8m の範囲の平板に貼り付けた平板である。

実験風洞は、幅 2.2m、高さ 1.8m、測定部長さ 20m の

室内回流式エッフェル型風洞で行った。

風洞実験における風速の測定は、X型プローブの熱線風速計を用いて測定した。数値流体解析の流入境界はラフネスブロックの風上端部における風洞実験による測定結果を用いた。また、格子間隔は、表1に示す地形モデルの解析で用いる3種類の格子とした。

図4に風洞実験より得られた風上から 5.2m の位置における風速の鉛直方向分布を示す。このラフネスブロックにより発達する境界層は、べき法則に近似した場合べき数 α は $\alpha=0.2$ となる。また、対数則で近似した場合、ゼロ面変位 d をラフネスブロック高さの 0.6 倍の 2.4mm とした場合に床面近傍の風速勾配は粗度長 $z_0=0.02\text{mm}$ の分布で近似できる。そこで、数値解析における床面境界は、粗度長 $z_0=0.02\text{mm}$ の壁面対数則として与えた。

図5に風上から 5.2m の位置における実験結果と解析結果の比較を示す。Case1 の格子 B と Case2 の解析結果は、実験結果とよく一致している。Case1 の格子 A の解析結果は、60mm 以上の上空では他の解析結果と一致しているが、床面付近ではやや大きめの風速となっている。

図には、Case2 の格子で床面对数則に於ける z_0 を、大熊・丸川他⁽²⁰⁾に基づいてラフネス密度より求めた $z_0=0.04\text{mm}$ 、 $d=1.5\text{mm}$ とした場合、及び Counihan⁽²⁷⁾ よりべき数 α を用いて求めた $z_0=0.14\text{mm}$ (縮尺 1/2500 として換算) とした場合の解析結果を併せて示した。大熊他による d と z_0 を用いた解析結果は、実験値よりやや小さいが概ね一致しており、Counihan による z_0 を用いた解析結果は実験値より風速が低くなっている。これらと比較して d と z_0 を各々 2.4mm 及び 0.02mm とした解析結果は実

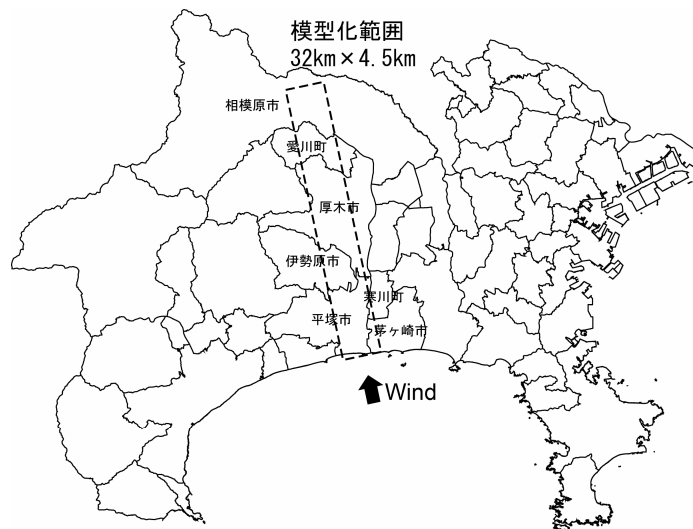


図3 地形モデルのモデル化範囲

験値とより一致しており、これらの値を用いることが妥当なものと考えられる。

3.3 地形模型を用いた風洞実験の概要

実験模型は、図3に示す神奈川県平塚市の海岸から相模原市津久井湖周辺までの幅4.5km、長さ32km（模型スケールで幅1.8m、長さ12.8m）の地形を縮尺1/2500で模型化したものである。地形の模型化は、厚さ4mmのベニヤ板（海岸付近では厚さ2mm）を縮尺1/2500の地形図に基づいて10m毎（模型上4mm）の等高線でカットし、これを積み上げることで作成した。地形模型と風洞壁面の隙間には、模型端部と同じ高さにカットしたステンレナボードを設置した。対象領域及び風速測定点を図6、実験模型の設置状況を図7に示す。建物などの構造物は模型化していないが、地表面の粗度として模型表面に4mm角のラフネスブロックを30mm間隔で山岳地と水面上を除き千鳥に貼り付けた。実験風速は、X=-8.5km地点の高さ1.2mにおいて約10m/sとした。

実験風向は、図6に示すように海側からの風とした。風速の測定は、同図に●で示す15箇所で鉛直方向の平均風速を測定した。また、風下側のX=-8.25~0km、Y=-2~2kmの範囲では、水平方向250m間隔で地上からの高さ25m（模型上10mm）の平均風速の測定を行った。

図6に示すX=-16.5kmより風上側では、縦型のI型プロープの熱線風速計を風洞床下より手動で測定高さに設置して測定した。X=-8.5kmより風下側では、X型プロープの熱線風速計をトラバース装置で測定位置に移動して測定した。X型プロープではu-wおよびu-v成分の測定を行った。風速の測定時間は30秒とした。なお、●で示す測定位置の高さ12mmにタフトを設置し、全ての測定位置において逆流が生じていないことを目視で確認して

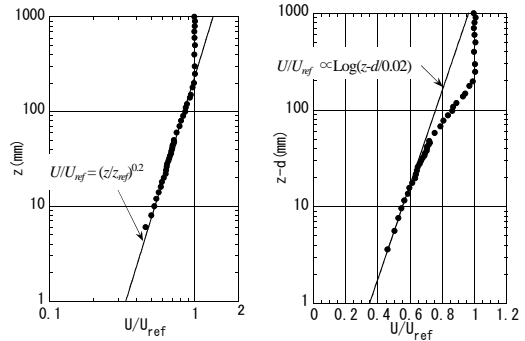


図4 模型に貼り付けたラフネスブロックにより平板上を発達する風速分布の測定結果

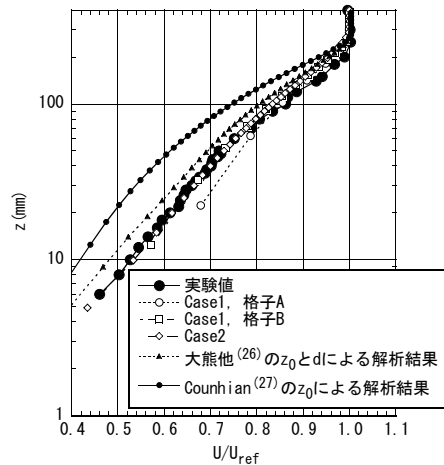


図5 平板境界層の解析結果

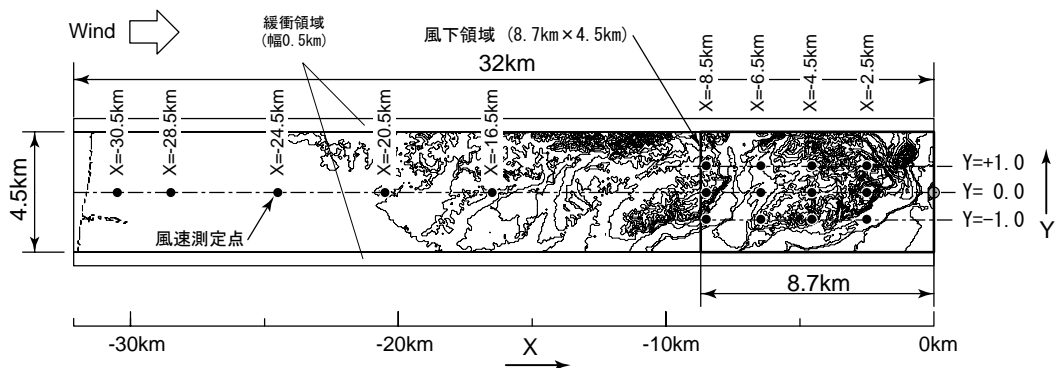


図6 対象領域及び風速測定点

いる。

3.4 数値流体解析方法概要

数値流体解析は、風洞模型全体を対象とした場合（以下、Case1）と風下の8.5kmの領域を対象とした場合（以下、Case2，風下領域）の2ケースについて行った。表1に示すように計算格子間隔は、Case1では100km四方程度の領域の解析を想定した水平方向に400m，地表面付近の鉛直方向に100mの格子（以下、格子A）と50km四方程度の領域の解析を想定した水平方向に100m，地表面付近の鉛直方向に50mの格子（以下、格子B）の2種類とし、Case2では10km四方程度の領域を解析することを想定して水平方向に50m，地表面付近の鉛直方向に25mの格子とした。地形の数値データは、Case1では数値地図50mメッシュ（国土地理院），Case2では10mメッシュ地形図（北海道地図(株)）を用いた。図8にCase1で格子Bを用いた解析モデル、及びCase2の解析モデルを示す。格子節点数は、Case1の格子Aでは $81 \times 15 \times 23 = 27,945$ ，格子Bでは $321 \times 51 \times 42 = 687,582$ ，Case2では $175 \times 91 \times 49 = 780,325$ である。Case2の領域においては、水平方向に25m，鉛直方向に12.5mの格子を用いた解析も行ったが、Case2の解析結果と大きな差が見られ

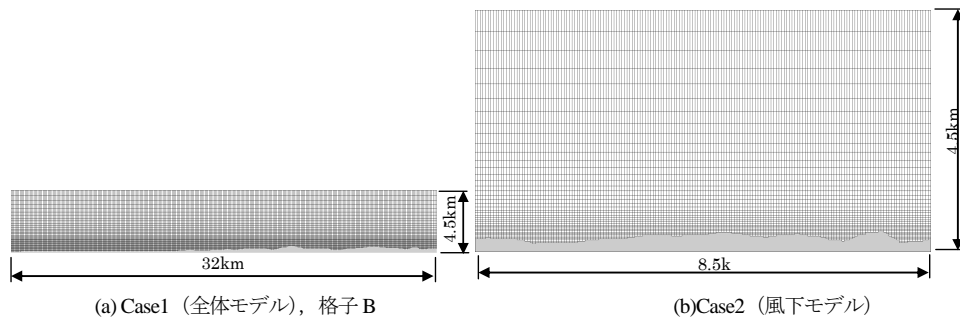


図7 地形模型設置状況（風下側より撮影）

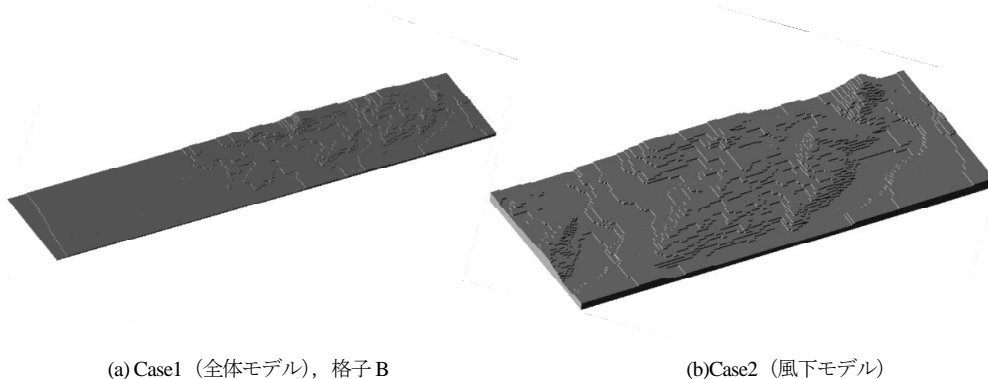
表1 地形模型 計算格子間隔

		X方向	Y方向	Z方向 最小間隔
Case1	格子A	400m(81)	400m(81)	100m(23)
	格子B	100m(321)	100m(51)	50m(42)
Case2		50m(175)	50m(91m)	25m(49)

カッコ内は格子節点数



(1) 計算格子 (x-z 断面, Y=0km)



(2)モデル鳥瞰図

図8 地形模型解析モデル

なかったため、本論文では Case2 での解析結果を示す。

複雑地形の解析では、一般座標系や非構造格子あるいは構造格子に FAVOR 法⁽²⁸⁾や IBM 法^(29,30)を適用するなどして解析精度を上げることが考えられるが、本研究では乱流モデルや解析モデルを変えての精度の向上に関する検討は今後の課題とし、最も基本的な乱流モデルである標準 $k-\epsilon$ モデルによる風況予測精度の検証を行った。

流入境界及び解析初期値は、Case1 では実験模型風上端部中央の測定結果に基づいて平均風速及び乱流エネルギー k の鉛直分布を流入境界として与え、初期値はこれと同じものを解析領域全体に一樣に与えた。Case2 では、Case1 の格子 B による解析値を補間して流入境界及び初

期値とした。

地表面境界は、粗度長 $z_0=0.5\text{m}$ (模型上 0.02mm)、ゼロ面変位 $d=6\text{m}$ (模型上 2.4mm) の壁面対数則を与え、つ側壁面及び天井面の境界はスリップ条件、流出は自由流出条件とした。

3.5 Case1 の解析結果と実験結果の比較

以下では、測定結果及び解析結果について、流れ方向成分風速 U 、流れ直角方向成分風速 V 、鉛直方向成分風速 W を境界層風速 U_{ref} で規準化した風速比で示す。

図9に中央部 ($Y=0\text{km}$) の流れ方向の測定点における Case1 の格子 A 及び B による解析結果と実験結果の比較

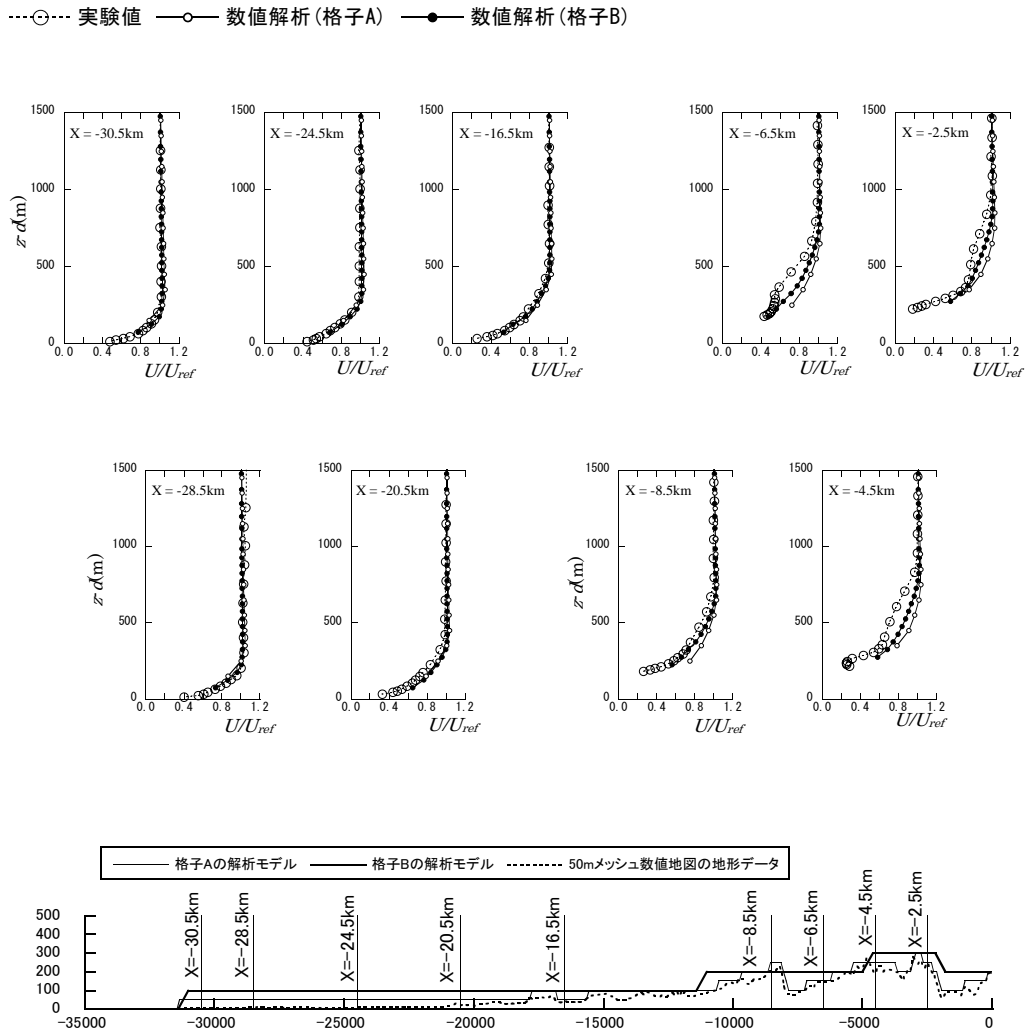


図9 Case1 の解析結果及び実験結果 ($Y=0\text{km}$)

を示す。

$X=-8.5\text{km}$ 地点より風上では、格子 A の $X=-8.5\text{km}$ 地点を除き格子 A 及び B 共に風速分布、境界層高さのいずれも解析結果と実験結果は一致しており、風上から境界層が発達する様子が得られている。 $X=-6.5\text{km}$ より風下側についてみると、境界層高さは実験値と解析結果は一致しているが、風速分布は実験値に見られる風速低下の状況が格子 A と格子 B のいずれの解析値についても一致していない。これは、格子 A, B 共に地形の凹凸が十分に再現されていないためと考えられる。また、 $X=-8.5\text{km}$ より風下での格子 A の解析結果は、地表面付近の風速は格子 B よりも大きくなる結果が得られている。

3.6 Case2 の解析結果と実験結果の比較

図 10 に風下領域における地上 25m 高さにおける水平成分の風速絶対値 $\sqrt{U^2 + V^2}$ について実験結果と Case2 の解析結果の比較を示す。

Case2 の解析結果では、 $X=-8.5\text{km}$ 付近の地形の影響が比較的風下側まで現れているが、実験結果と数値流体解析結果は概ね良い対応をしているといえる。

図 11 に風下領域における U 成分及び V 成分の鉛直方向分布の Case2 の解析結果と実験結果の比較を示す。

Case2 の U 成分の解析結果は、中央部 ($Y=0\text{km}$) と風下の $X=-2.5\text{km}$ 地点を除き地表面付近まで一致している。中央部の測定点について風速分布をみると、流入に近い $X=-8.5\text{km}$ 地点では実験値とほぼ一致した結果が得られているが、 $X=-6.5\text{km}$ より風下側では実験値と差が見られる。これは、 $X=-8\text{km}$ 付近にある起伏からの剥離流が Case2 において十分に表されていないためと考えられる。

また、 $X=-2.5\text{km}$, $Y=\pm 1\text{km}$ 地点はいずれも崖状地形の風下となっているが、これらの地点では地表面付近の解析値は実験結果と比較して小さめの値を示す。

V 成分の解析結果は、中央部 ($Y=0\text{km}$) の $X=-6.5\text{km}$ 地点では明瞭な差が見られるものの、その他の地点では地表面の近傍を除き定性的傾向は一致した結果が得られている。

図 12 に中央部 ($Y=0\text{km}$) における W (鉛直方向) 成分の実験結果と解析結果の比較を示す。 W 成分の解析結果は、 V 成分と同様に地表面付近において実験値と異なるものの定性的傾向は一致した結果が得られている。

以上、数値流体解析による複雑地形周りの予測精度の検証のために、縮尺 1/2500 で地形を風洞全体にモデル化した風洞実験とこれを対象に標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析結果の比較検討を行った。風洞実験結果と数値流体解析結果は、起伏が激しい一部の領域を除き概ね良い一致を示す。起伏の激しい地形の後流域では、数値流体解析結果と風洞実験結果では風速の分布に差が見られる。この原因として、解析モデルの格子間隔が粗く地形を十分に再現できていないことが考えられる。また、 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析では乱流エネルギー k の過大評価によって剥離や逆流の再現性が悪くなることが知られている⁽³¹⁾。これらの影響を受ける範囲は限られていると考えられるが、数値解析により風速を評価する場合、解析精度を考慮して地表面境界から適宜離れた高さで評価する必要がある。

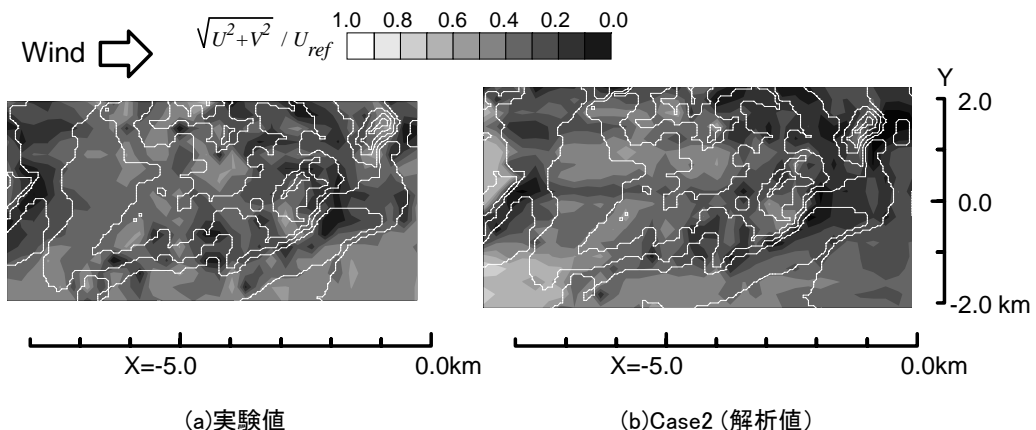


図 10 地上高さ 25m における風速比の比較 (風下領域)

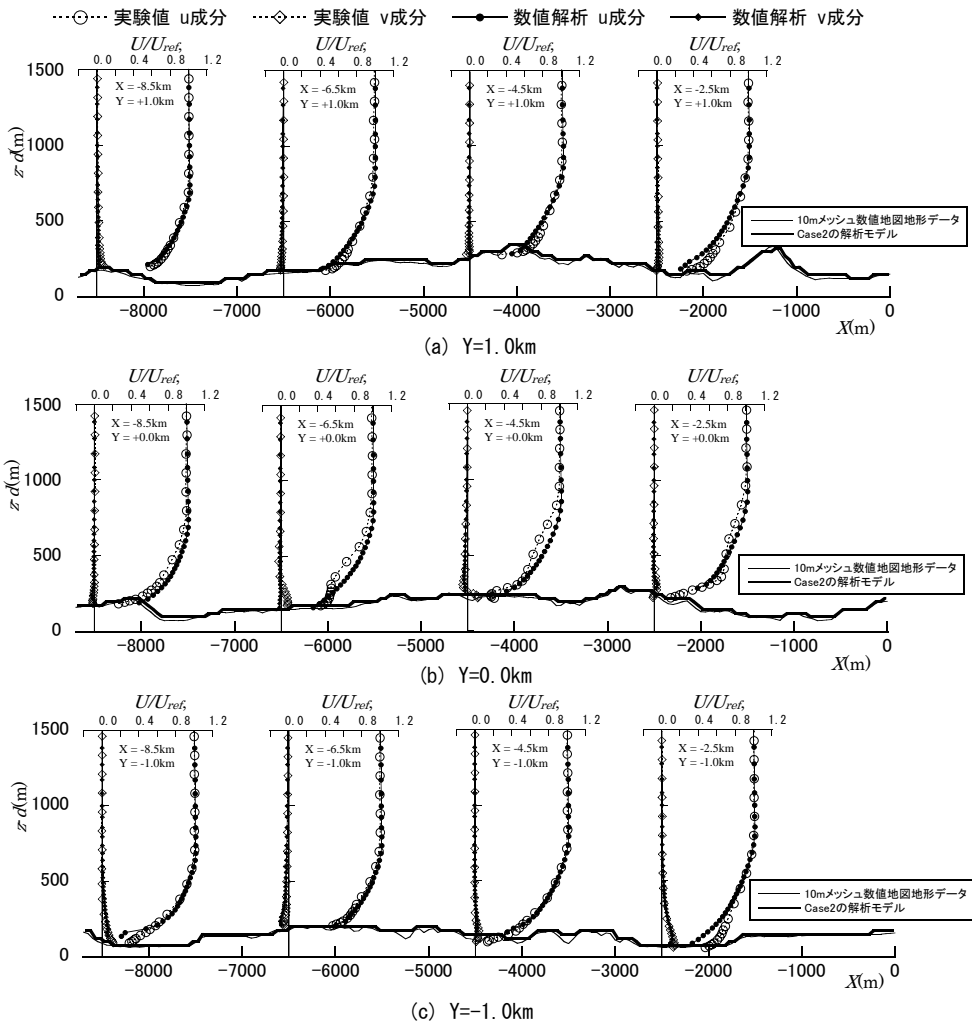


図 11 Case2 の U, V 成分の解析結果と実験結果の比較

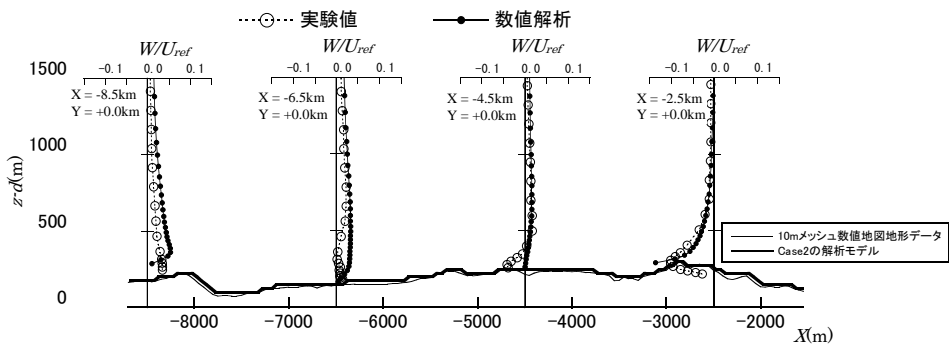


図 12 Case2 の W 成分の解析結果と実験結果の比較 (Y=0km)

4. 局所地形の影響を考慮した強風マップの作成

4.1 解析領域

ここでは、提案した手法に基づき神奈川県を対象に地形を考慮した再現期間 50 年の風速を求め、強風マップの作成を行う。強風マップの作成は、神奈川県全体を 2km 四方のメッシュに区分し、図 13 に示す 2 つの領域について行った。

1 つは、横浜市中心部を構成する西区、中区、神奈川区、保土ヶ谷区、南区をほぼ包含する領域（領域 A）である。領域 1 の東側は海に面して平地となっており、西側は最高地点の標高が 70m 程度の丘陵地帯となっている。領域内には、横浜地方気象台が含まれる。

もう 1 つは、三浦半島の横須賀市、葉山町、鎌倉市をほぼ包含する領域（領域 B）である。領域 B の東側と西側は海に面しており、中央部は標高が最高 240m の丘陵となっている。領域 A と比較して、領域 2 では地形の起伏が激しく、海岸線も複雑な形状となっている。

図 13 には、平成 12 年建設省告示 1454 号に基づく基準風速 V_0 を併せて示す。基準風速 V_0 の値は、領域 A では 34m/s、領域 B では 36m/s である。

4.2 解析方法概要

数値流体解析は、神奈川県全体を含む 1 次領域から風速比を評価する 3 次領域までの 3 段階のネスティングを行った。各領域の解析範囲及び最小格子間隔を表 2 に示す。1 次領域の鉛直方向の解析領域は 20km であり、現実の大気境界層と比較して大きい。解析領域が小さい場

合、境界層の発達に伴い流れ方向に圧力勾配が増加することが考えられる。このため、上面の境界で境界層の発達に伴って鉛直方向に流出させる境界を与える⁽³²⁾場合もあるが、本研究では解析領域を大きくすることにより、この影響を相対的に小さくした。また、大気境界層の上部は地表面の粗度よりも気圧傾度力やコリオリ力が大きくなるが、本研究における数値流体解析ではこれらの力を考慮せず、地上と上空の風向差は別途考慮する。

1 次領域では流入風の境界条件を平均風速がべき指数 0.15 で近似される勾配流として与え、2 次、3 次領域では上位の計算結果を補間して計算格子点に流入境界及び初期条件として与えた。地盤面の境界条件は粗度長を 0.05m、海面は粗度長を 0.005m とした対数則の壁関数を与えた。地盤面に与えた粗度長は、3 章の地形モデルの解析モデルと同じ値であり、平板上では平均風速の鉛直分布はべき指数 0.2 の指数分布の気流と良い一致を示す。

地上高さの風速は地形の他に周辺の建物や樹木等の影響を受けていることが考えられるが、これらの影響は地点によって異なっており年代と共に変化するため一律に評価することは困難である。そこで、本研究では地形以外の建物や樹木の影響は対象とする地域の状況に応じて別途考慮されるものとして数値流体解析における地表面粗度は一様とし、建物等の影響が比較的小さく局所的な地形の影響が十分に反映されると考えられる地上高さの風速の分布から上空と地上の風速比を求めた。数値流体解析結果の風速を評価する高さは、解析結果の精度を考慮して地表面から 30m 高さの風速とした。ただし、対数

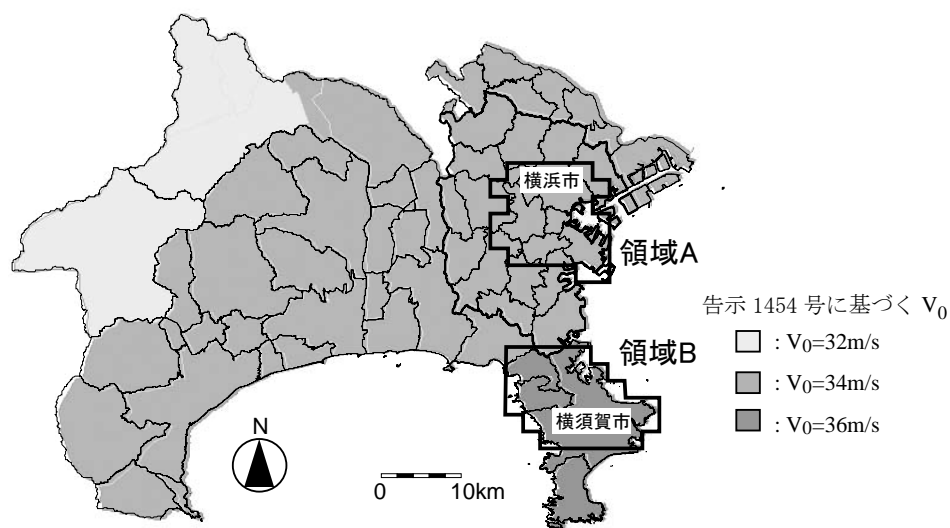


図 13 再現期間 50 年の強風マップ作成領域

則で境界条件を与えていることを考慮して実際の地盤面からの高さは解析上の高さにゼロ面補正值（中低層市街地を想定し建物平均高さ約7~8mの0.6倍⁽³³⁾程度の5m）を加えた35mである。上空と地上の風速比は、3次領域の風上から2kmと左右の側面から1kmの範囲を除く2km×2kmの解析結果に基づき算出した。

数値流体解析より得られる流速は、x,y,z方向3成分のベクトル値である。従って、崖状地形の後流など乱れ強さが大きくなっている領域では、風速スカラー値を時間平均した値と必ずしも一致しない。そこで、本研究では数値流体解析結果から得られる流速を次式により乱流エネルギーkを用いてスカラー平均風速相当の風速に補正して評価した⁽³⁴⁾。

$$U' = \sqrt{|U|^2 + 2k} \tag{16}$$

ここで、U'は補正後のスカラー風速、|U|は風速の絶

対値（ $=\sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ ）である。

解析風向は、45°刻みの8風向（N, NE, E, SE, S, SW, W, NW）とした。

台風シミュレーションにおける地上風向の上空風向に対する偏角は、過去に横浜地方気象台に接近した台風について、台風モデルにより推定した傾度風風向 θ_{sim} と気象台における同時刻の風向観測結果 θ_{met} を比較することにより求めた。解析対象とした台風データは、横浜地方気象台を中心とする半径500km以内に接近した中心気圧が980hPa以下の台風である。図14に台風モデルより推定した傾度風風向 θ_{sim} と気象台における同時刻の風向 θ_{met} の比較を示す。傾度風風向が $\theta_{sim} = 315^\circ$ 付近ではややばらつきが大きいものの、その他の風向では両者は良い相関を示す。本解析では、地上風向の上空風向に対する偏角は領域内で一律に時計回りに30°とした。

表2 数値流体解析における解析領域及び最小格子間隔

	解析範囲 (x × y × z)	x,y 方向 最小格子 間隔	z 方向 最小格子 間隔
1次領域	96km × 72km × 20km (風向: N,E,S,W) 96km × 96km × 20km (風向: NE,SE,SW,NW)	500m	100m
2次領域	24km × 24km × 4km	100m	50m
3次領域	4km × 4km × 2km	50m	11.2m

x: 流れ方向, y: 流れ直交方向, z: 高さ方向

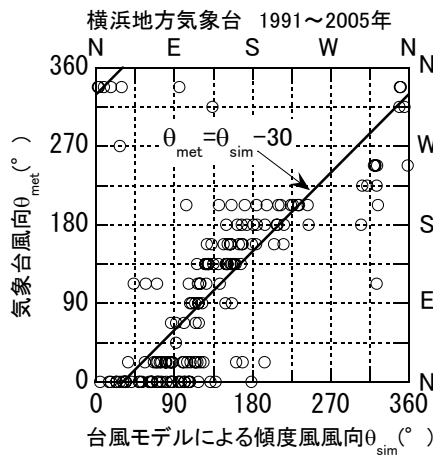


図14 台風モデルによる上空風向と気象台観測風向の比較（横浜地方気象台，1991~2005年）

4.3 台風シミュレーション結果

表3に台風シミュレーションによって得られた対象地域の再現期間50年の上空風速を示す。同表には、地上における偏角を考慮して8風向の風向別に求めた年最大風速に基づき求めた再現期間50年の風速を併せて示す。

全風向の年最大風速より推定した再現期間50年の上空風速は、領域Aと領域Bのいずれも56~57m/sであり領域内で差は小さい。年最大風速を風向別に求めて推定した場合、再現期間50年の上空風速の値は、領域Aと領域Bのいずれも風向S, SWでは52~54m/sであるのに対し、風向N, NEでは40~42m/sである。

図15にシミュレートした台風の進路の例として横浜における最大風速が上位10位までの台風の進路を示す。図に示す進路は、最接近時を中心として前後18時間ずつの位置である。図中の円は1時間毎の台風中心位置、円の

の大きさは中心気圧低下量の大きさを示す。

図に示すように上位の最大風速を示す台風の進路は概ね南西から北東への向きである。このため、解析領域における最大風速時の風向は、進路と傾度風の風向が一致する南から南西の風向となり、風向別の再現期間50年の風速はS, SWで大きくなる。

領域Aと領域Bを比較すると、再現期間50年の上空風速に大きな差は見られないが、風向別に見るとN, SW, Wの風向で領域Bのほうが若干大きい値を示す。

地表面粗度IIと仮定してべき指数 $\alpha=0.15$, $Z_0=350\text{m}$ として、台風シミュレーションより得られた再現期間50年の上空風速を地上10mの風速に換算すれば、33.0~33.5m/sとなる。この値は、領域Aの基準風速 $V_0=34\text{m/s}$ とほぼ同程度であり、領域Bの $V_0=36\text{m/s}$ と比較するとやや小さめの値である。

表3 再現期間50年の上空風速 (m/s)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	全風向
領域A	40.5~ 41.4	40.5~ 41.1	43.4~ 44.4	47.5~ 49.8	52.1~ 53.3	51.7~ 53.0	47.2~ 48.5	45.0~ 46.3	56.3~ 57.1
領域B	41.3~ 42.4	40.9~ 41.7	43.7~ 44.4	47.6~ 48.6	52.2~ 53.3	53.2~ 53.8	48.2~ 49.3	45.2~ 46.4	56.7~ 56.9

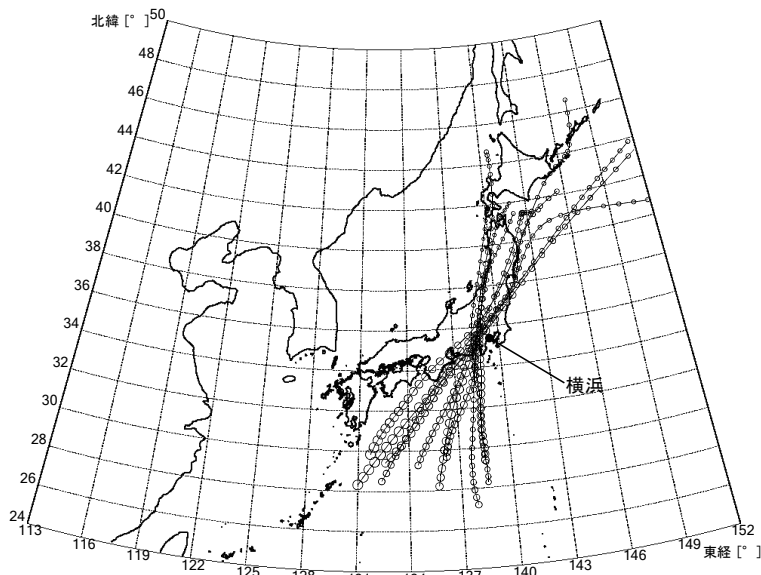


図15 横浜における最大風速が上位10位までのシミュレートした台風の進路

4.4 領域 A における再現期間 50 年の風速

(a) 上空風と地上の風速比

図 16 に領域 A の地形コンター図、図 17 に領域 A の数値流体解析結果から得られた上空と地上の風速比分布の例を示す。ここに示す風向は、風向別の上空風の再現期間 50 年の風速が大きな値を示す風向 SW である。地形コンター図の等高線間隔は 15m である。

風速比の値は、風上側の地形が急峻で標高が急に高くなる部分で大きくなっている。一方、標高が急に低くなる崖上地形の風下側では、風速比の値が小さくなっていることがわかる。

(b) 領域 A における再現期間 50 年の風速

図 18 に領域 A の地上高さ 35m における再現期間 50 年の風速マップを示す。ここで、風速のコンターは 19~39m/s の範囲を 2m/s ごとの階級に分けてプロットした。

図中に黒線で示す 2km 四方のメッシュ内部でも地形の影響を受け再現期間 50 年の風速が高い領域と低い領域がある。再現期間 50 年の風速は、海岸に近い領域と地形が急峻で小高くなっている領域で大きな値を示す。

平成 12 年建設省告示 1454 号による横浜市の基準風速 V_0 は 34m/s である。これを次式で地表面粗度区分Ⅲの 35m 高さの風速 $V_{III}(z=35)$ に換算すると 34.7m/s となる。

$$V_{III}(z=35) = 1.7 \left(\frac{35}{450} \right)^{0.2} \cdot V_0 \quad (17)$$

対象領域内の再現期間 50 年の風速が告示に基づく設計風速を上回る地域はごく一部であるが急峻な傾斜地や尾根のピークに見られる。

(c) 横浜地方気象台における観測結果との比較

本解析により得られた再現期間 50 年の風速について妥当性を確認するために、横浜地方気象台（観測高さ 19.5m）の観測結果から得られる再現期間 50 年の風速との比較を行った。

図 19 に横浜地方気象台の 1961~2009 年の年最大風速の観測結果から求めた年最大風速と超過確率の関係を示す。ここで、非超過確率 F_T は Hazen の方法によりプロットした。これより再現期間 50 年 ($-\ln(-\ln(1-1/50)) = 3.9$) の風速は 25.0m/s となる。

本解析より得られた気象台位置における地上高さ 35m の風速は 31.1m/s である。べき指数を $\alpha=0.2$ として、気象台観測高さの $z=19.5m$ の風速に換算すると 27.7m/s となり、気象台における観測結果と比べて若干高い風速である。

両者の差の原因として、気象台における観測結果が周辺の建物などの影響を受けていることが考えられる。そこで、気象台周辺を対象とした地形模型の風洞実験を行い、周辺建物が気象台における観測結果に及ぼす影響に

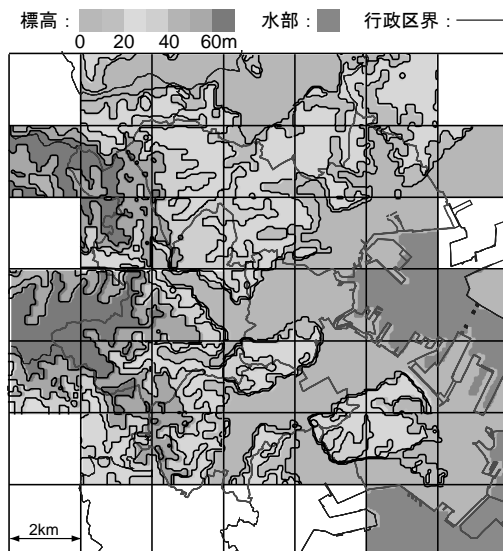


図 16 解析領域の地形コンター図 (領域 A)

について検討した。

実験模型は横浜地方気象台を中心とした半径 500m の範囲を縮尺 1/1000 で再現したものであり、周辺の建物及び樹木をモデル化している。図 20 に実験模型を示す。

流入気流は地表面粗度区分 IV に相当する $\alpha=0.27$ で近似される境界層乱流とした。実験における流入気流の鉛

直分布は数値流体解析で想定しているべき指数 $\alpha=0.2$ の気流と異なっているが、地形模型の外側も同じ粗度が連続していると考えたものである。風速測定は、X 型プローブの熱線風速計を用いて u-v 成分を測定した。風速の平均時間は 30 秒とした。

図 21 に気象台高さ(19.5m)の風速 U_B (19.5)に対する地

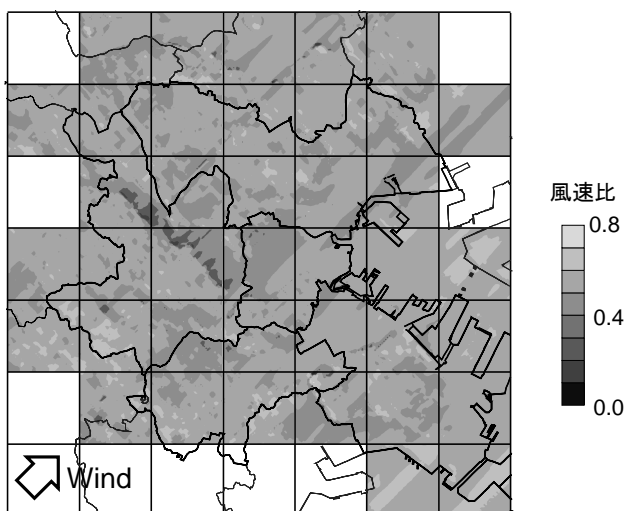


図 17 数値流体解析結果から得られた上空と地上の風速比分布の例 (領域 A, 風向 SW)

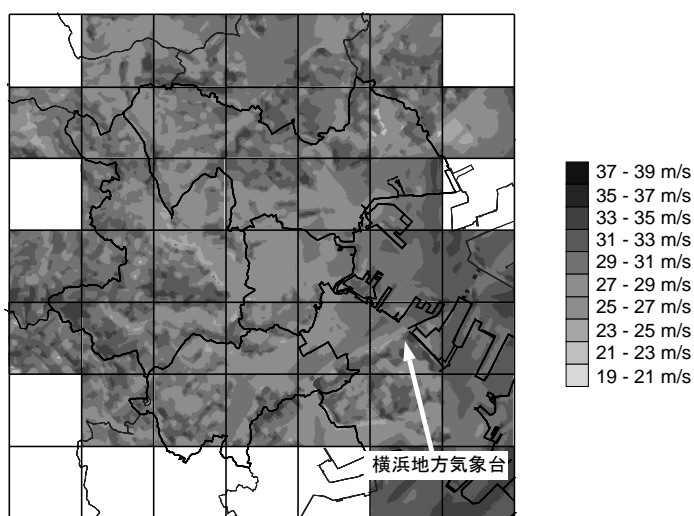


図 18 地形を考慮した再現期間 50 年の風速 (領域 A, 地上高さ 35m)

表面高さ $z=35\text{m}$ の風速 $U_B(35)$ の風速比を示す。

高さ方向の風速比 $U_B(35)/U_B(19.5)$ の値は、風向 NE を除くと 1.1~1.2 である。気象台周辺の地表面粗度を IV と考えてべき数 $\alpha=0.27$ とすると風速比の値は 1.17 であり、気象台周辺は概ね地表面粗度 IV に相当する地域であるといえる。なお、風向 NE では他の風向と比較して大きい値を示すが、1961~2009 年の観測結果では風向 NE の年最大風速は観測されていない。

高さ方向の風速比として風向 NE を除いた平均値の 1.15 を用いれば、本解析より得られた地上 35m 高さの風速を気象台高さの風速に換算すると 27.0m/s となる。観

測結果と比較して若干高い値であるが、両者は概ね良い対応をしているといえる。

4.5 領域 B における再現期間 50 年の風速

(a) 上空風と地上の風速比

図 22 に領域 B の解析領域における地形コンター図、図 23 に領域 B における上空と地上の風速比の例として、風向 SW の解析結果を示す。地形コンターの等高線間隔は、20m 間隔である。図には 2km 四方の領域に南北方向に A~F、東西方向に 1~9 のインデックスを付して示す。

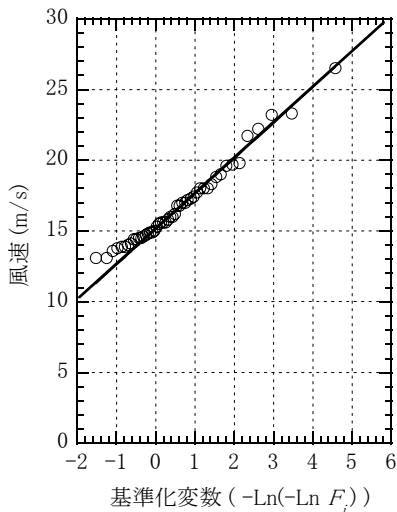


図 19 横浜地方気象台の観測結果に基づく経験的非超過確率 F_T と年最大風速の関係 (1961~2009 年)

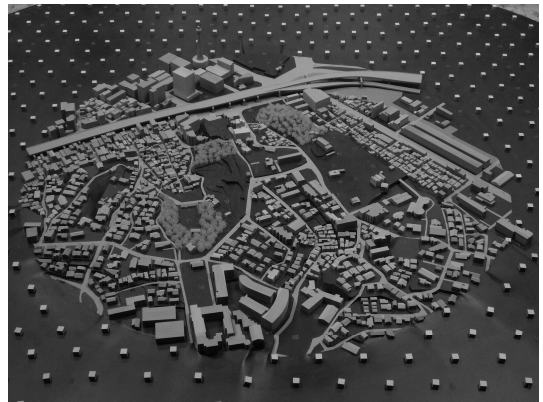
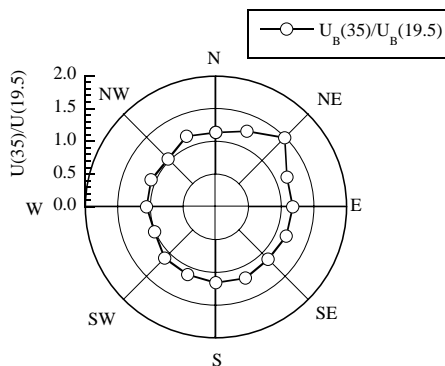


図 20 横浜地方気象台周辺地形模型



$U(19.5)$: 気象台高さ風速, $U(35)$: 35m 高さ風速

図 21 横浜地方気象台周辺地形模型 実験結果

標高が 200m 程度の山のピークでは、高い風速比の値を示す。風上側となる西側の海岸近くでは、標高が 100m 程度のピークにおいても高い風速比を示し、地形によって風速が高くなっていることがわかる（領域 D2 など）。

ここで、風速コンターは、30~44m/s の風速範囲を 2m/s 刻みで階級分けした。これは、領域 B における基準風速 $V_0=36\text{m/s}$ を式(17)より粗度区分Ⅲに於ける高さ $z=35\text{m}$ の風速に換算すると 36.7m/s となることから、告示に基づく設計風速前後の領域に着目してプロットしたものである。領域 B における再現期間 50 年の風速は、12~54m/s であり、領域 F5 の標高 204m のピークで最大値を示す。

(b)領域 B における再現期間 50 年の風速

図 24 に領域 B における再現期間 50 年の風速を示す。

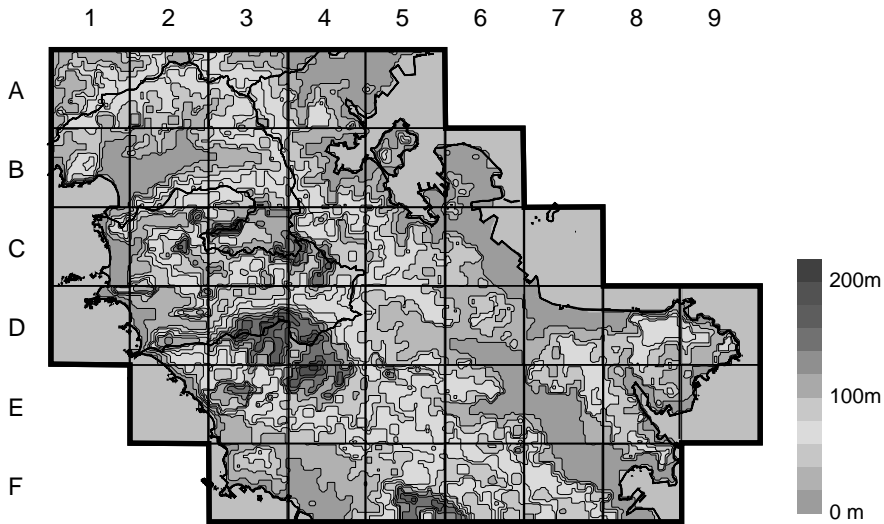


図 22 解析領域の地形コンター図（領域 B）

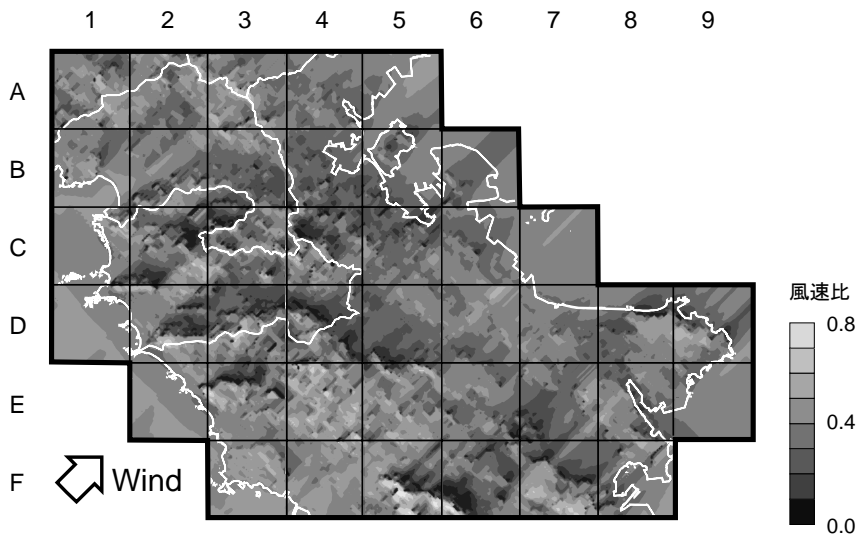


図 23 数値流体解析から得られた上空と地上の風速比分布の例（領域 B，風向 SW）

領域 B においても、急峻な山のピークでは地形を考慮した再現期間 50 年の風速は高い値を示し、標高が 200m を超える山のピーク付近では告示に基づく設計風速を上回る。また、西側の海岸近くのピーク（領域 D2, E2 と E3 の境, F3 等）や東に突出した岬の段丘の上（領域 D9）でも告示に基づく設計風速を上回る。さらに、西側の海岸近くでは、設計風速を上回らないものの低地部分（領域 F4）でも 34~36m/s の高い風速を示す。台風シミュレーションで得られる上空の再現期間 50 年の風速が領域 A と領域 B で大きな差が見られないのに係らず、領域 B では低地においても地上高さにおける再現期間 50 年の風速が基準法に基づく設計風速に近い値を示す領域がある。この理由として領域 B の西側の海岸では南西~西よりの風向で低地においても高い風速比を示し、この風向では風向別に見た台風シミュレーションから得られる上空の風速も高い値を示す。このため、この領域では、地上高さにおける再現期間 50 年の風速が高くなることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、局地的な地形の影響を考慮した強風マップの作成を目的として、数値流体解析及び台風シミュレーションに基づき任意の再現期間の風速を推定する手法について検討した。

強風マップの作成に先立ち、数値流体解析による複雑

地形上の気流解析結果と地形模型を用いた風洞実験の比較を行い、数値流体解析結果の精度を検討した。以下にまとめを示す。

- (1) 神奈川県中央部を対象として標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析結果と地形模型を用いた風洞実験結果を比較した。
- (2) 数値流体解析結果と地形模型を用いた風洞実験結果は概ね良い一致を示すことが確認された。
- (3) 数値流体解析による解析精度が悪くなる要因として、解析モデルの格子が粗く地形を十分に再現できていないことのほか、標準 $k-\epsilon$ を用いた解析では剥離や逆流の再現性が悪くなることの影響が考えられる。影響を受ける領域は起伏の激しい地形の後流となる領域の一部であり、地上付近の風速の分布に数値流体解析と風洞実験の結果に差が見られる。
- (4) 数値流体解析により複雑地形上の風速を評価する場合、上述の解析精度に関する問題を考慮して地表面境界から適宜離れた高さで風速を評価する必要がある。

さらに、神奈川県内の 2 つの領域を対象として提案する手法に基づき地形の影響を考慮した再現期間 50 年の風速を推定した。解析対象とした領域は、神奈川県内の横浜市中央部と横須賀市付近の 2 領域で、告示に示される基準風速は各々 $V_0=34\text{m/s}$ と 36m/s の区域である。以下にまとめを示す。

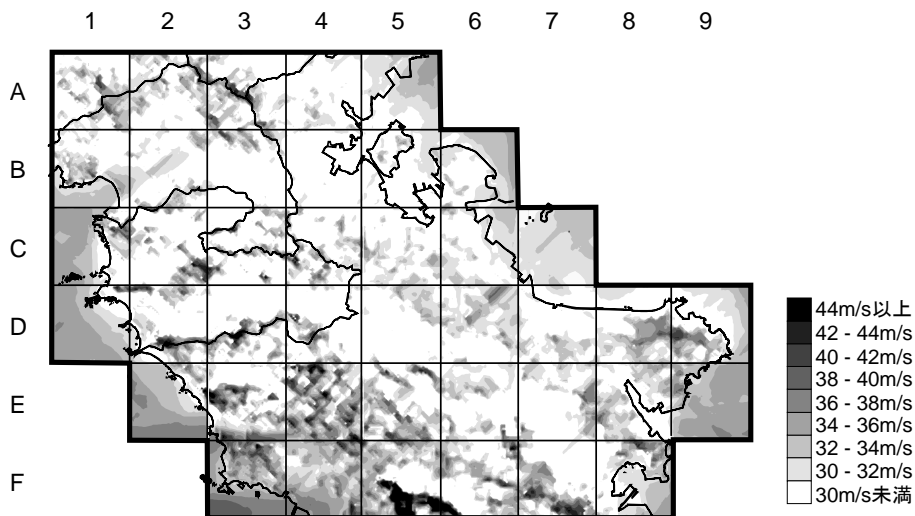


図 24 地形を考慮した再現期間 50 年の風速（領域 B, 地上高さ 35m）

- (1) 横浜地方気象台における観測結果について、周辺建物の影響を考慮して本解析より得られた再現期間 50 年の風速と比較した結果、両者は良い整合性を示す。
- (2) 2 つの領域とも、一部を除いて地形の影響を考慮して推定した再現期間 50 年の風速は、告示に示される基準風速に相当する風速と比較して小さい。
- (3) 急峻な傾斜地や尾根のピークでは、地形の影響を考慮した再現期間 50 年の風速は告示に基づく設計風速を上回る地域がある。

謝辞

本研究は、文部科学省・神奈川大学学術フロンティア推進事業「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究（平成 17-21 年）、研究代表者 荻本孝久教授」の一部として行ったものである。

本研究における風洞実験の実施では、(株)泉創建エンジニアリング鶴見俊雄氏に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) “建築物荷重指針・同解説”，日本建築学会(2004)，p. 16.
- (2) 例えば “2004 年の強風被害とその教訓—強風被害が残したモノ—”，日本建築学会 (2006)
- (3) Russell, L.R., “Probability distributions for hurricane effects”, J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div., (1971), 97, p.139-154
- (4) 光田寧, 藤井健, “日本南方洋上における台風の確率モデルの作成”, 京都大学防災研究所年報, (1989), 32, p.335-348
- (5) 安井八紀, 大熊武司, 吉江慶祐, 片桐純治, 廣川雅一, “モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究”, 第 16 回風工学シンポジウム, (2000), p.65-70
- (6) 大熊武司, 丸川比佐夫, 安井八紀, “レビュー: モンテカルロ法を利用した台風シミュレーションによる強風の評価”, 災害の研究, (2001), 第 32 巻, p.101-113
- (7) Hachinori Yasui, H., Ohkuma, T., Katagiri, J., Marukawa, H. “Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method” J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., (2002), 90, pp.1529-1540
- (8) Mellor, G.L., Yamada, T., “Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems”, Rev. Geophys.

- Space Phys., 20, No.4 (1982), pp.851-875
- (9) Nakanishi, M., Niino, H., “An improved Mellor-Yamada Level 3 model with condensation physics: its design and verification”, Boundary-Layer Meteorology, 112, (2004), p.1-31
- (10) 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
- (11) 佐々木澄, 川本陽一, 山中徹, 土屋直也 他, “都市気候解析のための 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, (2007), D-1, p.781-778
- (12) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子, “局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証”, ながれ, 22,(2003), p.-375-386
- (13) 山口敦, 石原孟, 藤野陽三, “力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証”, 土木学会論文集 A, Vol.62 No.1, (2006), p.110-125
- (14) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜, “台風に伴う強風場を求めるための解析モデルの提案”, 日本風工学会誌, (1993), 57, p.1-14
- (15) 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., (1995), 56, p.291-310
- (16) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜, “中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その 1 非台風時の強風”, 日本風工学会誌, (1995), 65, p.1-15
- (17) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜, “中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その 2 台風時の強風”, 日本風工学会誌, (1996), 66, p.3-14
- (18) 中西昭彦, “複雑地形のシミュレーション例と今後の課題”, ながれ, (2003), 22, p.397-403
- (19) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, “複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証”, 土木学会論文集, (2003), No.731, p.195-211
- (20) 服部康男, 奥田慎也, 石川智己, 加藤央之, “送電設備の風荷重・風応答評価技術”, 電中研レビュー, (2008), No.48, p.39-43
- (21) 片桐純治, 大熊武司, 岡田創, 野田博, 丸川比佐夫, “標準 k-ε モデルを用いた複雑地形周りの流れ解析”, 第 20 回風工学シンポジウム, 2008 年
- (22) Bashforth, F., Adams, J.C.: “An attempt to test the theories of capillary action: by comparing the theoretical and measured forms of drops of fluid”, Cambridge Press., (1883)
- (23) Hirt, C.W., Cook, J.L., “Calculating three-dimensional

- flows around structures and over rough terrain”, *J. Comp. Phys.*, (1972), Vol.10, p324-340
- (24) Yamaguchi, A., Ishihara, T., Fujino, Y., “Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (2003), 91, p.247-264
- (25) Schloemer, R.W., “Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida”, *Hydrometeorological Report, No.31*, (1954)
- (26) 大熊武司, 丸川比佐夫, 宮下康一, “市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究”, 第9回風工学シンポジウム, (1986), p.61-66
- (27) Counihan, J., “Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972”, *Atmospheric environment*, (1975), 9, p.871-905
- (28) Hirt, C.W., “Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (1993), 46-47, p.327-338
- (29) Tseng, Y.H., Ferziger, J.H., “A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry”, *Journal of computational physics*, (2003), 192, p.593-623
- (30) 千秋雅信, 中山昭彦, “一般座標系を用いた流れの計算における IBM 法の適用”, 応力学会論文集, (2003), Vol.8, p.919-927
- (31) 持田灯, 村上周三, 林吉彦, “立方体モデル周辺の非等方性乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルと LES の比較—乱流エネルギー生産の構造とノルマルストレスの非等方性に関して—”, 日本建築学会計画系論文集, (1991), 423, p.23-31
- (32) 野澤剛二郎, 田村哲郎, “ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価”, 日本建築学会構造系論文集, (2001), 541, p.87-94
- (33) 嶋田健司, 藤永崇志, 石原孟, “風力発電のための地域気象モデルと非線形風況予測モデルを用いた風況予測”, 第19回風工学シンポジウム, (2006), p.127-132
- (34) “建築物のための流体計算ガイドブック”, 日本建築学会, (2005), p.113



構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の 高性能化に関する研究

米田 征司*

山口 栄雄**

大杉 功***

Ravhi S. Kumar****

Possibility of Improving Thermoelectric Performance of Chalcogen Compounds by Structural Phase Transition

Seiji YONEDA*

Shigeo YAMAGUCHI**

Isao J. OHSUGI***

Ravhi S. KUMAR****

1. はじめに

我が国は 2020 年の温室効果ガス排出削減中期目標として、90 年比 25%削減を目指して行く。目標の実現にはこれまで以上に様々な分野からの温暖化ガス削減を要求されることが予想される。

熱電発電は熱を電気に直接変換するエネルギー変換である。これは未利用熱や排熱をリサイクルすることによって、エネルギーの有効利用が可能となり、CO₂ 排出量削減にも繋がることからエネルギー・環境問題の切札として期待が高まっている。この効果は、熱電発電のエネルギー変換効率を上げることで、さらにその効果を増すことが期待できる。高効率熱電変換発電モジュールの開発のためには、新しいアプローチによる高性能な新規熱電変換材料の開発が必用である。

2. カルコゲン系熱電材料

カルコゲン系熱電材料、特にテルライド化合物の熱電材料は、性能が高いことで知られている。室温近傍で最も性能が優れ、熱電冷却・加熱では産業・商業等の用途に実用されているのは Bi₂Te₃系化合物である。この化合物の発見から 50 年以上材料研究が行われているにも関わらず、未だにそれを凌ぐ実用材料は現れていない。最近でもこの系において、島根大学の長谷崎グループからバ

ルク材料で無次元性能指数 $ZT = 2.2$ が報告され、Bi₂Te₃系熱電材料のポテンシャルの高さに改めて注目が集まっている。この発現機構は結晶粒微細化によって、キャリアの散乱因子の絶対値の増大による熱電能の向上が主要因であることが述べられている⁽¹⁾。

500 °C近傍の中温度領域で発電用熱電材料として月面上に配置された計測機器や宇宙探査機の電源に搭載され、民生においても実用されている PbTe 系化合物は発電システム構築上、優れた適応性を有することから、世界で広く研究開発が行われている。最近の応用研究では、アメリカとドイツで PbTe 系熱電モジュールを用いた自動車からの廃熱回収のための研究は官民一体となって行われている^{(2),(3)}。PbTe の性能は最大性能指数 $Z_{max} = 1.5 \times 10^3 \text{ K}^{-1}$ を示し、 ZT は 1 を超える⁽⁴⁾。

AgSbTe₂系化合物は $Z_{max} = 1.8 \times 10^3 \text{ K}^{-1}$ であることが示され⁽⁵⁾、このときの ZT は 1.2 を示し、同じ温度域で開発されている他の熱電材料と比較しても非常に高く、更なる高性能化が期待される熱電材料である。また、この系に GeTe を加えた TAGS は $ZT = 1.9$ の高性能な値を示している。

AgPb₁₈SbTe₂₀系化合物は、2004 年に学術雑誌 Science で

表 1 テルライド化合物の熱電性能

熱電材料	無次元性能指数 ZT	最大性能指数 $Z_{max} (\text{K}^{-1})$
Bi ₂ Te ₃	2.2	7.1×10^3
PbTe	1	1.5×10^3
AgSbTe ₂	1.2	1.8×10^3
TAGS	1.9	2.5×10^3
AgPb ₁₈ SbTe ₂₀	2.1	2.6×10^3

*助教 電子情報フロンティア学科

Assistant Professor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers

**教授 電子情報フロンティア学科

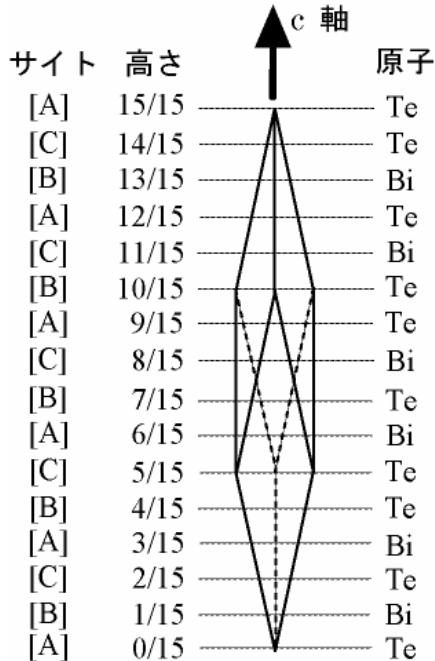
Professor, Dept. of Electronics and Informatics Frontiers

***教授 サレジオ工業高等専門学校

Professor, Salesian Polytechnic

****ネバダ大学

Associate Research Professor, University of Nevada Las Vegas

図1 Bi_2Te_3 の結晶構造

初めて発表された熱電材料である⁶⁾。この化合物の $ZT = 2.1$ に達することが報告されている。

3. テルライド化合物の結晶構造

先に述べたテルライド化合物の結晶構造は Bi_2Te_3 を除いて、すべて NaCl 構造を有する。最大性能指数 Z_{\max} のみを比較すると、 Bi_2Te_3 が最も大きな値を持つ。 Bi_2Te_3 の結晶構造は単位胞の中に Bi と Te の原子をそれぞれ 2 個と 3 個含む菱面体構造である。(図 1 参照) また、この菱面体構造は見方を変えると、六方晶の結晶構造になる。

(図 2 参照) 六方晶の c 軸方向に Bi の層と Te の層が積層するが、結晶周期的に Te-Te の結合が存在し、分子間力によって結合している。六方晶構造は a 軸と c 軸の長さが異なっており、異方性を示す。この異方性については、単結晶が作製されて、各方位についての熱電特性が調べられており、a 軸方向が最も性能が高くなることが知られている⁷⁾。

Bi_2Te_3 の高熱電性能は、結晶構造の異方性が 1 つの要因であると考えられる。これに基づいてテルライド化合物の高性能化の手段として構造相転移の導入を試みた。ポイントは以下の 2 点である。

- ① 異方性を示す結晶構造の導入の可能性
- ② 熱電性能向上の可能性

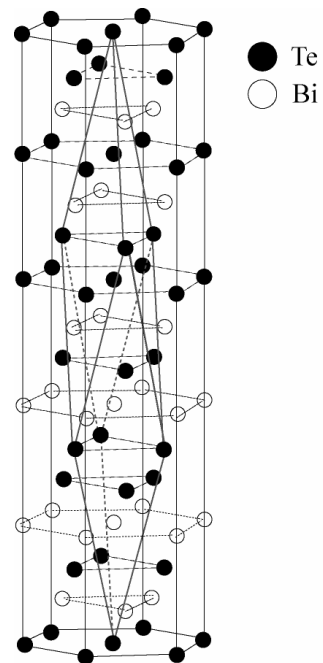


図2 菱面体構造と六方晶構造の関係

そこで、熱電発電材料として高性能を有し、次世代の

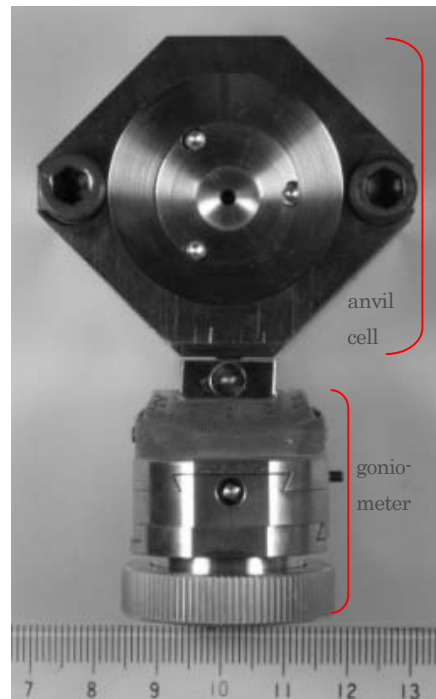


図3 ダイヤモンドアンビルセル概観 (正面)

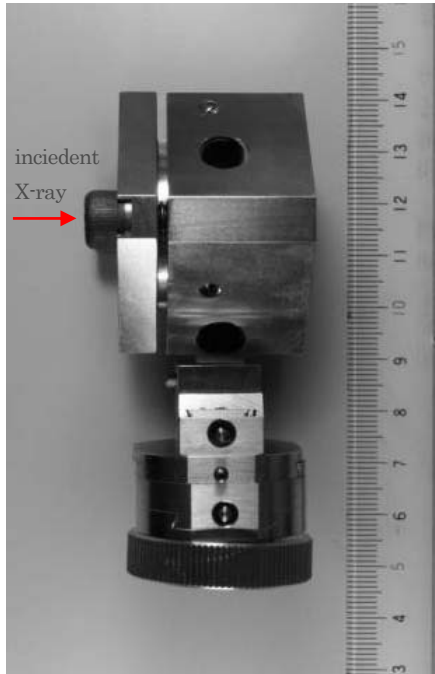


図4 ダイヤモンドアンビルセル概観（側面）

高性能な中温度域熱電材料として AgSbTe_2 および $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ を取上げて、上記の2つの点について調べた。

4. 実験方法

高純度 (6N) の原料を希望組成に秤量し、透明石英アンビルに入れて、油拡散真空装置と酸水素バーナーを用いて真空封入した。アンビルを攪拌溶解ロッキング炉内に配置し、方向性凝固法を用いてインゴットを作製した。得られたインゴットは、粉末 X 線回折を用いて単相であることを確認した。高圧実験はインゴットから小片サンプルを切り出し、図3および4に示すダイヤモンドアンビルセルの中に設置し、圧力伝達媒体を通じて加圧を行った。回転対陰極 X 線発生装置 (Rigaku Mo-K α) を用いて、得られた X 線回折パターンは、イメージングプレートカメラを使って検出し、解析した。

5. 構造相転移

5. 1 AgSbTe_2

大気圧における AgSbTe_2 の X 線回折パターンは、 AgSbTe_2 単相の回折ピークを示し、NaCl 構造を示した。回折ピークから算出した格子定数 $a = 6.0780$ (1) \AA の fcc 格子で同定された。ダイヤモンドアンビルを用いて、試料に圧力を加えた。このときの結果を図5-8に示す。回

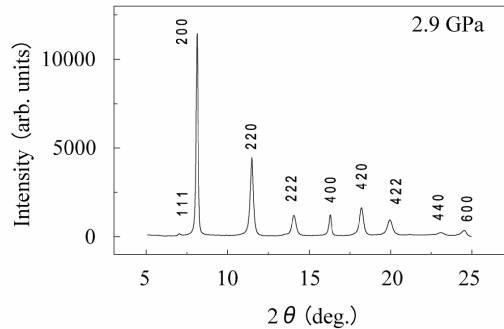


図5 2.9GPa の AgSbTe_2 の X 線回折パターン

折線は圧力が加えられながらも、鋭いピークは維持され、対称性を維持しながら高角度側にシフトした。

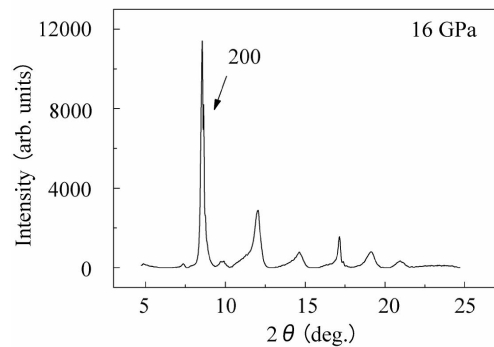


図6 16GPa の AgSbTe_2 の X 線回折パターン

15GPa まで NaCl 構造は安定していたが、16GPa で(200)と(420)の回折ピークが分離し、他の回折ピークは広がり、構造相転移が示された。そこで、16GPa で得られた X 線回折パターンに対して解析を行った結果、斜方晶であることがわかった。このとき得られた格子定数は、 $a = 3.7974$ (3) \AA 、 $b = 4.238$ (4) \AA と $c = 5.6358$ (1) \AA であ

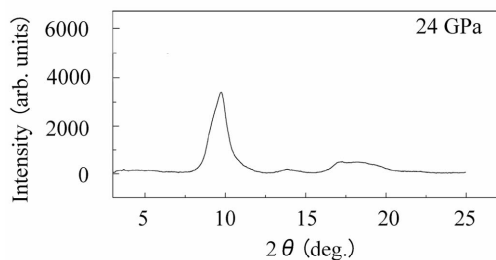


図7 24GPa の AgSbTe_2 の X 線回折パターン

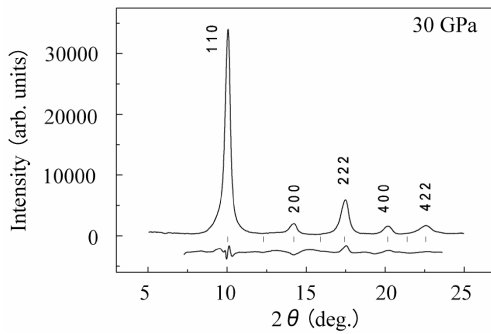


図 8 30GPa の AgSbTe_2 の X 線回折パターン

った。さらに、17GPa ではすべての回折線の強度が低下し、アモルファス相が出現した。このアモルファス相は 25GPa まで維持された。26GPa で結晶性を示す回折線が再び現われ始めた。これはアモルファス相から新しい結晶相に相転移していることを示しており、X 線回折パターンを解析したところ、格子定数 $a = 3.4500(\text{Å})$ を持った CsCl 構造であることがわかった。この CsCl 構造は本実験において到達した最高圧力である 62GPa まで安定していることがわかった。

大気圧で、NaCl 構造を持つ AgSbTe_2 は、高圧力によって斜方晶および CsCl 構造に構造相転移することが明らかになった。斜方晶は異方性を示す結晶構造であることから、 AgSbTe_2 の熱電性能向上の可能性を示すことが出来た。

5. 2 $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$

$\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ に対する高圧 X 線回折実験で得られた結果を図 9 に示す。この結晶構造は、Pb-Te 母相と Ag-Sb の微細な領域から構成された PbTe 二元合金に良く一致した立方晶であった。5.5GPa までは立方晶が維持されていた。圧力の増加にともない全ての回折ピークは高角度側にシフトする傾向を示した。これは格子定数が減少して行くことを示している。

6.4GPa 近傍では、 $2\theta = 7 \sim 10^\circ$ に新たな回折ピークが出現し、 $2\theta = 7.4^\circ$ では立方晶を示す高い強度のピークが分離した。このことから、この圧力で圧力誘起構造相転移が発生していることを示した。新たに出現した相は、11GPa まで安定であった。12.1GPa の圧力では、2 回目の圧力誘起構造相転移が発生した。この相はさらに 30GPa の圧力まで安定であった。得られた回折パターンから、高圧相の第 1 相は斜方晶と高圧相の第 2 相は CsCl 構造が同定された。 $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ においても圧力誘起構

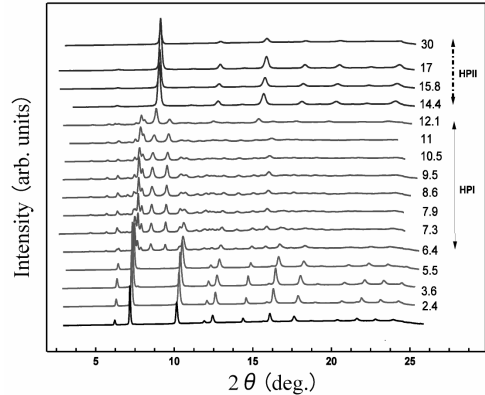


図 9 30GPa までの $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ の圧力増加に伴う X 線回折パターン変化。

HPI (6.4 ~ 12.1GPa の圧力領域) : 斜方晶

HPII (14.4 ~ 30GPa の圧力領域) : CsCl 構造

造相転移が示された。

高圧による第 1 相は斜方晶であることから、異方性を有する結晶構造であり、熱電性能の高性能化の可能性を示すことができた。

次に 20GPa までの比抵抗の変化を図 10 に示す。比抵抗は 5GPa まで圧力に依存して急激な減少を示した。構造相転移を示した 4.7GPa 近傍で、比抵抗は突然大きく減少した。この測定結果は X 線実験結果に一致している。2 回目の構造相転移が現れる 14GPa 近傍では、著しい変化は確認されなかった。

比抵抗の減少は、圧力によって格子定数の減少、すなわち体積収縮が生じた。これによって格子欠陥の低減などの影響によって、移動度の増加によるものと考察する。

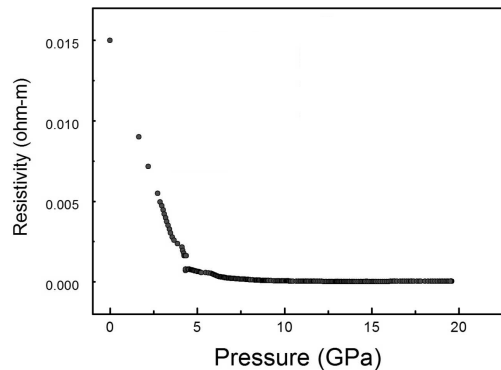


図 10 20GPa までの $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ の比抵抗の圧力依存性。

移動度の変化にともない、キャリアの散乱パラメータの変化が期待でき、熱電能に対しても影響を及ぼしていることが示唆される。したがって、比抵抗の低減化によって、熱電特性の向上の可能性が示されたと言える。

6. アンビルセルシステムの新しい圧力評価方法

本研究を通じて、新たにアンビルセルシステムの新しい圧力評価方法についても提案することができた。この方法はアンビルセルの表面4箇所、対称的にひずみゲージを取り付けるものである。定数が既知の精密バネを使用することでアンビルセルのひずみ-圧力特性の校正を行った。その結果、十分な直線性と再現性が確認された。そこで、この「ひずみゲージによるアンビル圧測定」を簡便な新規評価方法として特許出願するに至った。

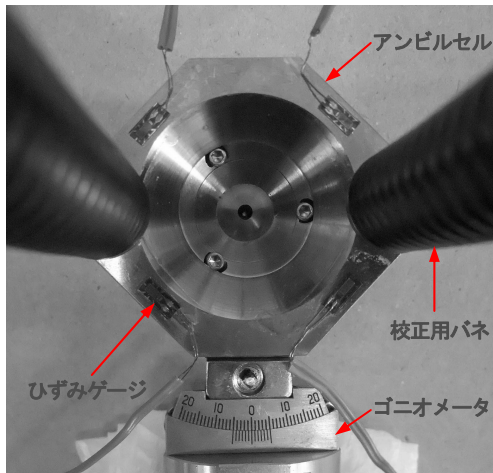


図11 ひずみゲージによるアンビル内圧測定の様子

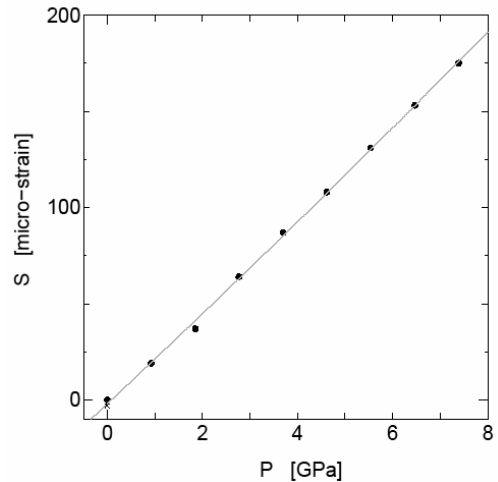
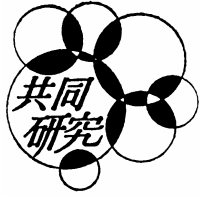


図12 ひずみとアンビル内部圧力との関係

7. 参考文献

- (1) K. Hasezaki, et al., Materials Transactions 51, (2010), 863.
- (2) D. Crane and J. LaGrandeur, "Progress report on BSSr Led, US DOE automotive waste heat recovery program", Abstracts of ICT2009, (2009), p.52.
- (3) G. Buschmann, "Thermoelectric goes Automotive", Abstracts of ICT2009, (2009), p.42.
- (4) Z.H. Dughaish, Physica B 322, (2010), p. 205.
- (5) S. Yoneda, Y. Ohno, E. Ohta, N. Yuhashi, I. Shiota, Y. Shinohara, H.T. Kaibe, I.J. Ohsugi and I.A. Nishida, IEEJ Trans. FM, Vol.124, No.4, (2004), p. 312.
- (6) K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J. S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. K. Polychroniadis, and M. G. Kanatzidis, Science 303 (2003), p. 818.
- (7) H. Kaibe, Y. Tanaka, M. Sakata and I. Nishida, J. Phys. Chem. Solids 50, 9 (1989), p. 945.



計画支援を意図した 空間情報視覚化システムの開発

山家 京子* 荏本 孝久* 曾我部昌史*
山本 俊雄** 佐々木一晋*** 飯澤 清典****

Spatial Information Visualization System with for Planning Support

Kyoko YAMAGA* Takahisa ENOMOTO* Masashi SOGABE*
Toshio YAMAMOTO** Isshin SASAKI*** Kiyonori IISAWA****

1. はじめに

近年、地理情報システム（Geographic Information System）の普及により、誰もが大量な空間情報（空間の位置データと属性データを合わせたデータ形式）を扱うことができるようになった。主に、GISのツールとしてGPS(Global Positioning System)機能を内蔵した小型端末を携帯することによって、現地で取得した画像やコメント、音声データなどが気軽に日常で活用されつつある。こうした状況下において、実地で取得した空間情報を単に一個人の目的で活用するだけでなく、地域コミュニティにおいて有効に活用していくことが期待されており、個別に取得した空間情報を特定の地域課題に還元していくための実践的活用手法が期待されている。地方公共団体や研究機関によって整備された広域な基礎情報を傍観するだけでなく、地域住民が主体的立場になって、より実践的に市区町村スケールの空間情報を活用していくことが望まれている。

著者らは、神奈川県を対象に、地域コミュニティにおける実践的活用方法として空間情報の属性データの検討および分析を進めると共に、これらの空間情報の応用的理解を手助けできるような開示的なプロセスおよび視覚的で分かりやすい表現技法の検討を行ってきた。

特に2007年度以降については、GISシステムを活用して空間情報の実践的活用方法の検討を進めてきた。神奈川県においては、GISシステムを活用して地盤関連情報のデータベース化作業を行い、これらのデータを利用して市町村単位で細密な3次元的地盤構造モデル（市町村単位）の検討を可能としうるデータベースを作成した。震源断層モデルにより生成される地震波の波動伝播特性を簡単な手法によるシミュレーションを用いて実施することにより、これまで不可能であった細密な地震予測が可能となり、地域の地震防災活動に有益な情報を提供することが可能となっている。

2008年度からは、横浜市神奈川区を対象として区内全自治会町内会へ配布した防災活動・意識に関連するアンケートの集計結果の指標化を進め、GISシステムを活用して地震災害危険度と併せて災害に対する地域防災力の総合的評価の視覚化を行った。神奈川県南部の郊外住宅地を対象に、生活支援施設と移動手段及び居住動向に関するアンケート調査を行ない、自己組織化マップ(SOM)を用いて郊外住宅地における日常生活の行動域パターンの視覚化手法の検討を行った。

2009年度以降は、相模川水系の中小河川を対象にして、浸水用地図を重ね合わせて外水氾濫時の浸水深度の予測値の分布GISの整理を進め、GISによる空間解析を用いて外水氾濫時の避難所の選定に関する基礎的な考察、および神奈川県内の市街地における火災危険度と避難行動の評価に関する基礎的な検討を進めてきた。また、鎌倉市O地区においては、これまでのGISにより蓄積されてきた空間情報と住民ワークショップおよびその成果として作成された防災マップを参照して空間情報の視覚化手

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

助手 建築学科, *特別助手 建築学科

Research Associate, Dept. of Architecture

****株式会社パスコ

PASCO corporation

法を検討してきた。生活支援施設に関する地域住民のアンケート結果に基づいて、(a)生活支援施設の分布域の作成、(b)生活行動域の移動域マップによる視覚化を行ってきた。

神奈川県域において GIS 上のデータは同質のデータであり、このような空間情報や地域カルテの作成方法が構築できれば、神奈川県全域において詳細な地域区分（市区町村単位、町丁目単位、小学校区単位、自治会単位、自主防災組織単位など）において情報共有が可能となり、地域コミュニティを支援できる可能性が高くなるものと考えられる。

以下、4 つのケーススタディを通じて、地域固有の空間情報を対象とした実践的活用事例の報告を行う。

2. ケーススタディ I

2-1. 洪水災害に関するハザード評価の基礎的な検討

再現間隔の比較的最長い地震災害に比較して洪水災害は多発する傾向があり、これまでは西日本方面において洪水・土砂災害などが顕著であったが、最近の傾向は全国的に発生する危険性が高くなっている。この点、地域防災を考える際には地震災害のみではなく洪水災害についても住民の関心は大きく、本報告では、2000 年に改定された改正水防法により著しく進展した、浸水予想地図いわゆる洪水ハザードマップを活用して、相模川水系の中小河川を対象に浸水用地図を重ね合わせて外水氾濫時の浸水深度の予測値の分布 GIS（地理情報システム）を用いて整理し、GIS による空間解析を用いて外水氾濫時の避難所の選定に関する基礎的な考察を行った。

再現間隔が比較的小く、住民の意識が高い洪水災害についても災害危険度を情報提供するため、基本的な情報を整理して公表する手法について検討を行った。本報告は、外水氾濫時に避難場所まで逃げるといった行動に視点をおき、徒歩で避難することが出来る範囲に避難所が設置されているのか、GIS の空間解析法を用いて、避難所の立地位置の検討を試みた。

2-2. 研究内容

1) 対象河川・地域

神奈川県内の一級河川、相模川水系のうち本川である相模川を除いた支川の内 11 河川、関係する 11 市町村を研究対象とした。対象となる地域と河川の位置・標高を図-1、浸水想定区域図で想定されている計画降雨等を含めた河川概要を(表 2-1)に示す。

2) 空間解析について

GIS とは、地球上の物体や事象の位置・形状（＝空間データ）と属性（＝非空間データ）に関するデータベースシステムである。言い換えると地図情報に様々なデータ一般的には、GIS を用いる上では、多くの解析ツールを有し、複合的な分析・統計・表示が可能である。本報告では、GIS ソフトとして ESRI 社の ArcGIS を用いた。

3) 避難所までの距離

町丁目界ポリゴンの重心点データと各市町村が公表している防災マップを参考に作成した建築物を有する避難所のデータを作成し、町丁目界の重心点から 500m でバッファリングを行い(図 2-2)、直線距離によって避難所を分類しデータ化した。ここで 500m を採用した理由として、避難距離を道のりで 700m (350×350m のブロックの対角線≒495m) 以内が望ましいと仮定したためである。この場合の避難時間は 10～15 分程度を想定している。

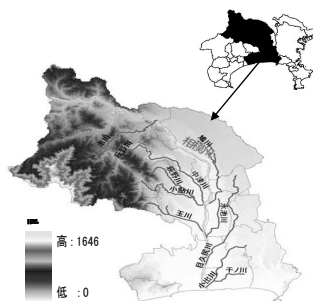


図 2-1 対象地域と河川ライン・標高

表 2-1 河川概要

	河川名	関係市町村	計画降雨	降雨確率
1	小出川 千の川	寒川町、藤沢市 茅ヶ崎市、平塚市	1時間最大 81mm	50年に1回
2	目久尻 川	座間市、海老名市 綾瀬市、寒川町	1時間最大 81mm	50年に1回
3	永池川	海老名市	1時間最大 74mm	30年に1回
4	小鮎川 萩野川	厚木市、清川村	時間最大 93mm 102mm	100年に1回
5	中津川	厚木市	2日間総 雨量 493mm	100年に1回
6	鳩川	座間市、海老名市 相模原市	1時間最大 74mm	30年に1回
7	串川	相模原市	1時間最大 74mm	30年に1回
8	玉川 細田川	厚木市、平塚市 伊勢原市	1時間最大 93mm	100年に1回

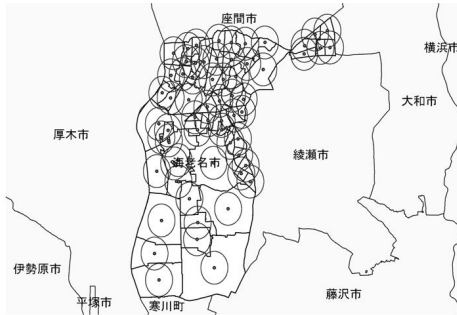


図2-2 GISによる500mバッファ解析(海老名市)

表2-2 ランクDの避難所リスト

町丁目界	避難人口	必要面積(m ²)	推薦避難所	延面積(m ²)	地上階数	直線距離(m)
須賀	384	769	ポノリス開発技術C	3713	3	491
馬入	0	0	—	—	—	—
大谷	116	233	海老名高等学校看護学院	1962	2	503
国分寺台1丁目	0	0	—	—	—	—
浜田町	0	0	—	—	—	—
愛甲	1155	2311	天田金属加工技術振興財団	15885	2	638
船子	54	108	厚木在宅介護サービスC	3780	3	299
戸田	633	1267	アンリツ研修C	6746	5	200
上落合	278	555	伊勢原市立石田小学校	9718	3	438
下津古久	538	1076	神奈川県消防学校	5354	5	404
長沼	82	164	神奈川県消防学校	5354	5	437
酒井	341	682	記念会館	1833	5	424

4) 浸水領域

浸水領域のデータは神奈川県土木整備部河川課が公表している浸水想定区域図をGISで町丁目界ポリゴンデータと重ね、50mメッシュデータを用いて作成した。2.3で作成した避難所データと合わせGISで空間解析し、表2のように避難所のランク分けを行なった。また、浸水想定区域図同士の重ね合わせは計画降雨が異なるため行なってはならないと考えられるが、中小河川の場合、浸水域が

小範囲のため同一平面で解析している。以上よりマップとしてまとめたものを図2-3に示す。

5) 避難所の立地位置の検討

ランクDとして抽出した6ヶ所の避難所(表2-2)の対象となる町丁目界で新たな避難所の立地位置の検討を行った。その際、避難人口と新設避難所に必要となる延床面積を算出した。使用した計算式を(1)、(2)として示す。なお延床面積は平成17年の建物データの属性に格納されている数値を参考にした。

避難人口 = 人口 × 浸水する建物棟数 / 全建物棟数 … (1)

必要延床面積 = 避難人口数 × 2.0 (m²/人) …… (2)

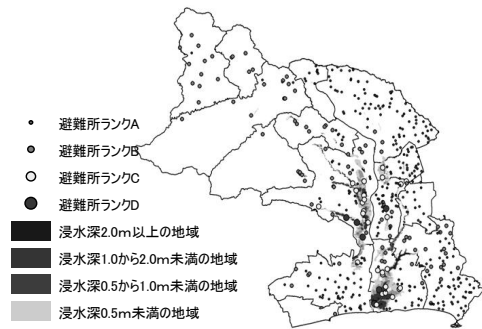


図2-3 避難所位置と浸水域

表2-3 避難所のランク区

	浸水想定区域外	浸水想定区域内
重心から500m内	ランクA	ランクC
重心から500m外	ランクB	ランクD

表2-4 新設避難所リスト(Cセンター)

施設名称	住所	指定されている町丁目界
市立萩園中学校	茅ヶ崎市萩園 2425	須賀、馬入
市立中島中学校	茅ヶ崎市 中島 1469-2	須賀、馬入
市立大谷中学校	海老名市 大谷 3535	大谷、国分寺台1丁目、浜田町
市立愛甲小学校	厚木市 愛甲 2783	愛甲、船子
市立戸田小学校	厚木市 戸田 545	戸田、上落合、下津古、長沼
市立東名中学校	厚木市 愛甲 1809	酒井、愛甲、船子

2-3 検討結果

浸水区域は相模川下流にいくにつれ広がっているため下流ほど浸水する避難所が増加している。よって相模川下流に D ランクの避難所が集中する結果となった。中でも平塚市須賀は相模湾近郊に位置し、広い工場地帯となっていて、そこに家屋が点在することから避難の際に抱える問題は深刻である、更に市町村をまたいで避難所を指定している行政は 2 件、避難施設を提供している民間企業が 1 件という実状もわかり、避難所の指定方法にもまだまだ改善の余地はあると思われる。

2-4 まとめ

本報告では、避難所の指定方法の問題点及び外水氾濫のみを考慮するに留まっているが内水氾濫も視野に入れた洪水の被害想定を行なう必要が今後の問題提起となった。

3. ケーススタディ II

3-1 市街地の火災危険度と避難行動の評価に関する基礎的な検討

地震被害は振動による建物被害とそれに起因する火災が大きく占めている傾向があり、大地震時には火災の被害が広範囲に、多大な影響を及ぼし、建物、人的被害に大きく関わる。神奈川県において火災危険度を評価したものはあまり公表されていない。また、火災が起こった際の避難行動の有無やその難易による効果を考慮した危険度評価についても、公表されていない

本報告は、神奈川県全域で火災危険度を評価し、危険度の高いと評価された地区を対象として、避難行動をコンピュータ上でシミュレーションを行い、避難行動を含めた有効な災害リスクマネジメントのための基礎的な検討を行うことを目的としている。

3-2 神奈川県の建物分布図

行政所有の地域データを使用し、1 棟単位の建物の属性データを調査し、「建物構造種別」、「建物年齢別」の 2 項目に関してデータ整理したものを、GIS によって図示を行った。「建物構造種別」に関しては、木造・非木造・不明の 3 種類、「建物年齢別」に関しては、昭和 46 年以前・昭和 47 年～昭和 55 年・昭和 56 年以降の 3 種類でカウントを行った。一例として神奈川県の建物棟数の分布図を図 3-1 に示す。

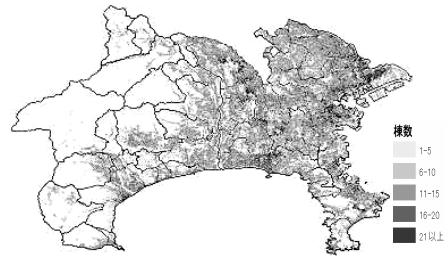


図 3-1 建物棟数分布図 (50m メッシュ)

表 3-1 ランク区分表

ランク	建物棟数	木造棟数	空地率[%]
1	1-3	1-3	80-100
2	4-7	4-7	60-80
3	8-12	8-11	40-60
4	13-19	12-15	20-40
5	20以上	16以上	0-20

3-3 延焼危険度図

データベースより、メッシュごとの建物棟数、木造棟数、空地率[(メッシュ面積-建築面積)/メッシュ面積]を算出し、それぞれを 5 段階にランク付けし、その平均をとったものを延焼危険度とした。ランク区分を表 1、延焼危険度図を図 3-2 に示す。



図 3-2 延焼危険度 (50m)

3-4 想定地震

火災のシミュレーションにあたり、想定地震として、南関東地震とした。この想定地震の最大速度を村尾・山崎(2000)の被害関数で用いた(1)式に入力することにより算出される被害率に建物棟数を掛けることで、建物構造種別の倒壊数および建物倒壊数を算出した。

$$PE(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \dots (1)$$

PE(PGV) : 被害率

PGV : 地表面の最大速度

λ : 平均値

ζ : 標準偏差

また、震度分布図を図3-3に示す。

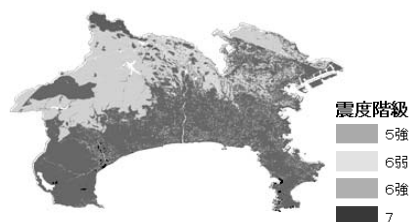


図3-3 南関東地震を想定した場合の震度分布図

3-5 出火率

本報告は、中央防災会議(2006)の首都直下地震防災戦略における被害軽減量の算出手法を参考にし、出火率及び出火件数を算出した。出火率は(2)式により算出し、ここで使用する全壊率は想定地震の木造の被害率と非木造の被害率を足したものとした。

$$\text{出火率} = \text{出火係数} \times (\text{揺れによる全壊率}) 0.73 \dots (2)$$

また、出火率に建物棟数を掛けることにより、出火件数を求めた。この結果、火災危険度の高い地域は、小田原、平塚、茅ヶ崎、横浜市などに顕著に認められた。出火率分布図を図3-4に示す。

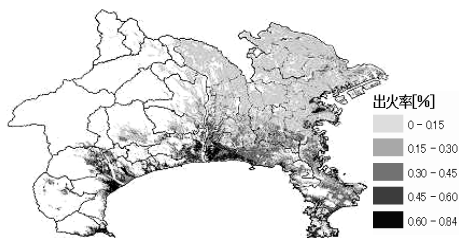


図3-4 冬18時の出火率分布図

3-6 避難シミュレーション

1) マルチエージェントモデル

相互作用しあう多数のエージェント(自律的に思考・行動・変化する人間等のモデル)から構成されるモデルであり、複雑な人間または生物の行動の研究に用いられる。こ

のモデルを構築したり、動かしたりするものをマルチエージェントシミュレーターといい、本報告ではartiscoc(構造計画研究所)という汎用ソフトウェアを使用した。

2) シミュレーションモデルの構成

i) 避難行動モデル

エージェントは①避難所認知者、②避難所不認知者の2種類を用い、①は避難所までの経路を知っていて、避難所に辿りつくように経路を選択して移動する。②は避難経路を知らないので、ランダムに経路を選択し、また、視野範囲に①がいると避難経路を教わり、①と同じように行動できるようになる。群集密度に応じて歩行速度が変化し、火災による危険ポイントを回避するようにもした。

ii) 避難ロケーション

シミュレーションを行う区域は、横浜市内で延焼危険度、出火率が高く火災危険度が高い南区の石川小学校避難区域とした。エージェントは道路ネットワーク上を移動し、通路と通路の交差点計147箇所それぞれ1エージェントずつ配置した。石川小学校区域を図3-5に示す。

iii) 火災モデル

火災は出火件数値が高い5つのメッシュから1件ずつ火災が発生するものとして、時間に沿って延焼していく、また、地震による建物倒壊などの道路閉鎖点も任意で配置した。

iv) シミュレーション実験

避難所不認知者が避難所認知者と同じ行動を取れるようになるパターンを以下の4つのケースに分けて実験を行った。ただし、ここでは視野1で約7mとする。

ケース1…視野0.2以内に①が2エージェント

ケース2…視野0.7以内に①が2エージェント

ケース3…視野1.2以内に①が2エージェント

ケース4…視野1.7以内に①が2エージェント

また実験は30分で終了し、時間ごとの避難完了率をカウントしている。

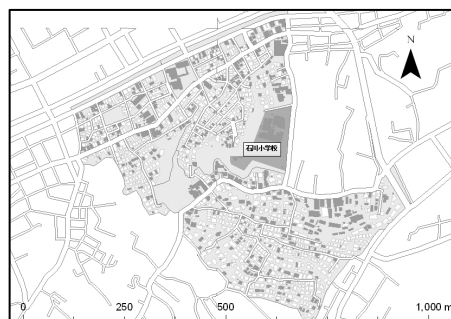


図3-5 石川小学校区域

3) シミュレーション実験結果

避難完了率グラフを図 3-6 に示す、縦軸は避難完了率、横軸はステップ数(時間)、細線は避難所認知者、太線は避難所不認知者を表す。

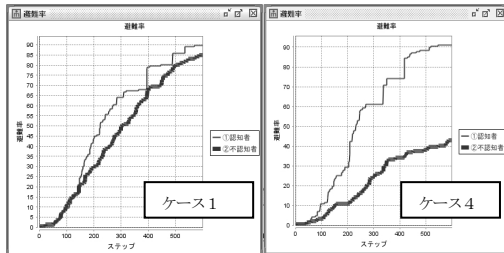


図 3-6 避難完了率グラフ

3-7 まとめ

神奈川県全域について火災危険度の評価を行い、危険度の高い地区を対象に避難シミュレーションにより、有効な避難行動について検討を行った結果、避難所認知者と避難所不認知者の積極的な声かけ等の住民間のコンセンサスを持つことが災害リスクマネジメントに有効である事と思われる。

4. ケーススタディⅢ

4-1 地域防災活動を支援することを目的とした防災カルテに関する基礎的な検討

これまで GIS により蓄積されてきた情報とその活用により作成された防災マップに基づいて、防災カルテの作成を試みた。GIS 上のデータは神奈川県全域において同質のデータであり、このような防災カルテの作成方法が構築できれば、神奈川県全域において詳細な地域区分(市区町村単位、町丁単位、小学校区単位、自治会単位、自主防災組織単位など)において防災カルテの提示が可能となり、地域防災活動を支援できる可能性が高くなるものと考えられる。

本報告では、地域別の防災カルテを作成し、住民が防災活動を行う上での基礎資料として活用できる情報を提供することを目的とし、一例として、川崎市川崎区を対象として防災カルテの作成を試みた。

4-2 対象地域および想定地震の設定

これまでに、GIS を活用した防災関連データが蓄積されている。地盤関連は、微地形区分図、地盤増幅率図が 50m × 50m メッシュで作成され、神奈川県を対象として 10 ケースのシナリオ地震を設定した震度分布図が作成され、

建物関連データも収集されている。本報告は、これらの GIS データを引用して町丁目単位の防災カルテを作成することとし、以下の 6 項目の診断項目を整理することにした。対象地域は、政令指定都市の 1 つである川崎市を抽出し、その中で特に人口の流動が激しく、様々な建物が集まる川崎区を対象とした。また想定地震としては、神奈川県に多大な影響を与えると予想される南関東地震を想定した。

- ・人的被害危険度
- ・地盤危険度
- ・液状化危険度
- ・建物倒壊危険度
- ・延焼危険度
- ・予測震

多摩川の下流から河口にかけての南側に位置し、全域が平地となっている。海側は埋め立てにより工業地の造成が進んでおり、人工島の東扇島や扇島もある。

4-3 診断項目の評価方法

(1) 地盤危険度の評価

東京都地域危険度測定調査を参考に、軟弱地盤別にウエイトを振り分けた。(表 4-1)

地域別に地盤別の地盤構成面積比を算定し、(ウエイト × 地盤構成面積比) の値を地盤危険度とした。算定式を以下に示す。

$$\text{地盤危険度} = \sum_{i=1}^{11} W_i \times R_{Gi} \cdots (1)$$

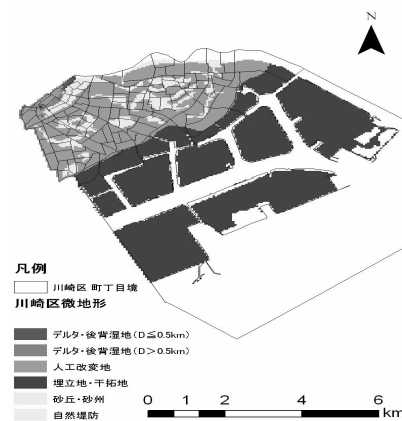


図 4-1 川崎区微地形区分図

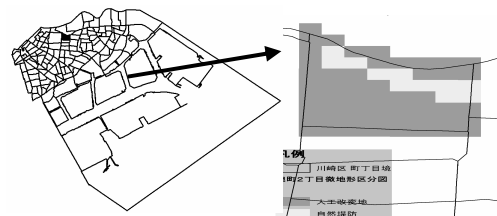


図 4-2 旭町 2 丁目微地形区分図

表4-1 軟弱地盤に対する地盤特性ウエイト

番号(i)	地盤分類	ウエイト (W ¹⁰)	面積比 (R _{Gi})
1	埋立地・干拓地	0.6	R _{G1}
2	砂洲・砂丘	0.5	R _{G2}
3	後背湿地	0.5	R _{G3}
4	自然堤防	0.5	R _{G4}
5	谷底平野	0.5	R _{G5}
6	人工改変地	0	R _{G6}
7	扇状地	0.2	R _{G7}
8	ローム台地	0	R _{G8}
9	砂礫台地	0	R _{G9}
10	火山・他の地形	0	R _{G10}
11	丘陵地	0	R _{G11}

表4-2 液状化に対する地盤特性ウエイト

番号	地盤分類	ウエイト	面積比 (R _{Li})
1	埋立地・干拓地	0.6	R _{L1}
2	砂洲・砂丘	0.5	R _{L2}
3	後背湿地	0.5	R _{L3}
4	自然堤防	0.5	R _{L4}
5	谷底平野	0.5	R _{L5}
6	人工改変地	0.3	R _{L6}
7	扇状地	0.2	R _{L7}
8	ローム台地	0.2	R _{L8}
9	砂礫台地	0.2	R _{L9}
10	火山・他の地形	0	R _{L10}
11	丘陵地	0	R _{L11}

(2) 液状化危険度の評価

松岡・若松 (2005) の微地形区分図より, 表4-1 から液状化の可能性がある地盤を抽出し, それ以外の地盤のウエイトを0とした. 表4-2に液状化に対する地盤特性ウエイトを示した. (ウエイト×地盤構成面積比) の値を液状化危険度とした. 算定式を以下に示す.

$$\text{液状化危険度} = \sum_{i=1}^{11} W_i^{LQ} \times R_{Gi} \dots (2)$$

(3) 予測震度の評価

南関東地震を対象として算定されている 50mメッシュごとの地表面の最大速度 PGV データを地域別に平均し, 翠川・他(1999)が示している最大速度と計測震度との関係式より予測震度を算定した. 算定式を以下に示す.

$$\text{予測震度} : I = 2.68 + 1.72 \log (PGV) \dots (3)$$

PGV : 地域別の地表面における最大速度 (cm/s)

(4) 建物倒壊危険度の評価

地域別に建物棟数をカウントし, 以下の式より建物倒壊危険度を算定し建物倒壊危険度とした. 東京都地域危険度測定調査を参考に振り分けた地盤特性ウエイトを表

4-3 (左表) に, 耐震性能ウエイトを表4-3 (右表) に示す.

$$P_k = N_k (1 - W_k U_k) \dots (4)$$

(k=1~5: 建物分類)

N_k: 建物棟数

W_k: 耐震性能ウエイト

U_k: 地盤特性ウエイト

表4-3 地盤特性ウエイト (左表), 耐震性能ウエイト (右表)

地盤分類	ウエイト	建物分類	ウエイト
丘陵地	1	木造	0.6
火山・嶺の地形	1		
砂礫台地	0.8		
ローム台地	0.8	非木造 1~3 階	0.8
扇状地	0.8		
人工改変地	0.7	非木造 4~6 階	0.6
谷底平野	0.5		
自然堤防	0.5	非木造 7~9 階	0.7
後背湿地	0.5		
砂洲・砂丘	0.5	非木造 10 階~	0.9
埋立地・干拓地	0.4		

(5) 延焼危険度の評価

地域別に木造延床面積率及び木造割合を算定し, 両者の平均ランクを延焼危険度とした. 算定式を以下に示す.

$$\text{木造延床面積率} = (\text{木造延床面積合計} / \text{地域面積}) \times 100 \dots (5)$$

$$\text{木造割合} = \text{木造棟数} / (\text{木造棟数} + \text{非木造棟数}) \times 100 \dots (6)$$

(6) 人的被害危険度の評価

軽傷、重傷、死亡の全てを含み, 人口が多い地域ほど何らかの被害を受ける確率が高いと判断した. そこで, 川崎区の地域別の昼間人口データを地域別の面積で除した値を人的被害危険度とした. 算定式を以下に示す.

$$\text{人的被害危険度} = \text{人口} / \text{地域面積} \dots (7)$$

4-4 地域別防災カルテ

6 項目の危険度の診断評価から得られた値が大きいほど危険性が高いと評価されるように配慮し, 最大値を 10 に標準化した. 例として, 川崎区全 138 地域の内の 1 つである, 旭町 2 丁目の防災カルテを以下に示す.

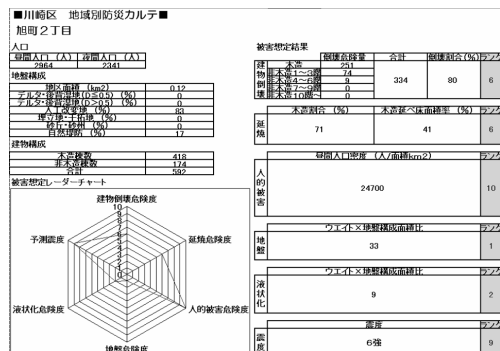


図4-3 旭町2丁目防災カルテ

4-5 まとめ

総合評価として、地域の防災カルテによる診断結果をレーダーチャートで示した事で、一目で地域の危険項目を把握する事が可能となった。今後は地域別に防災カルテを配布し、住民同士でソフトな面での防災対策を進めていく事が重要となる。

同様の方法で神奈川県全域の防災カルテを作成する事が可能となった、川崎市だけに留まらず、神奈川県全体で防災カルテを活用して、地震災害に備える災害リスクマネジメントが重要である。

5. ケーススタディV

5-1 神奈川県南部地域における生活支援施設と住民意識に関する実態調査

郊外住宅地の多くは 1960～70 年代にかけて丘陵地を切り開いて開発された。その立地特性から、地域住民が利用する生活支援施設（商業・サービス施設など）の多くは徒歩圏外に位置する傾向にあり、交通機関の不便を感じている高齢者も多い。また、近年は住宅地の空洞化により街区内に空き地や空き家、駐車場などが増加しており、近い将来の郊外地住宅地の居住環境および地域計画のあり方を再検討していくことが望まれている(文献 12)。

(1) 調査目的・概要

2008 年度から引き続き神奈川県南部地域の 3 地区において、「生活支援施設と住民意識」に関するアンケート調査(表 5-1)を通じて、現状の生活支援施設とその移動手段の実態調査を行った。対象地区は 1980 年以前に民間により開発された横須賀市の 2 つの郊外住宅地 (S 地区、I 地区)、および鎌倉市 O 地区(補注 1)の 3 地区とする。個別の生活支援施設とその移動手段(点群データ)の集計結果を大域的に調査・分析を行うことによって、神奈川県南部地域の住宅地における生活支援施設と移動手段の相関特性および生活環境の課題を明らかにし、今度の新たな地域課題や地域計画・方針の策定の際の検討事項を抽出することを目的としている。

(2) 調査内容・結果

「生活支援施設と住民意識に関するアンケート」の設問項目と回収率、および生活支援施設への移動手段の上位 10 施設を表 5-1、属性区分一覧を表 5-2、生活支援施設の分布域図を図 5-1 に記す。各地区ともに、移動手段別に鉄道駅周辺および国道沿いの地域に生活支援施設が

表 5-1 「生活支援施設と住民意識に関するアンケート」の概要

	S 地区 (横須賀市)	I 地区 (横須賀市)	O 地区 (鎌倉市)
配布数(葉)	1092	835	508
有効回収数(葉)	225	135	140
有効回収率(%)	20.6%	16.1%	27.6%
配布時期	2008年10月	2008年10月	2009年10月
アンケート項目 I (生活支援施設への移動手段)	1: スーパー(自動車) 2: 病院・クリニック(自動車) 3: スーパー(バス) 4: 理容室・美容院(自動車) 5: 飲食店(自動車) 6: ドラッグストア(自動車) 7: スーパー(電車) 8: 病院・クリニック(バス) 9: 生鮮食品(自動車) 10: 書店(自動車)	1: スーパー(自動車) 2: 生鮮食品(自動車) 3: 飲食店(自動車) 4: ドラッグストア(自動車) 5: 余暇活動(自動車) 6: 電気店(自動車) 7: スーパー(電車) 8: 飲食店(徒歩) 9: ドラッグストア(徒歩) 10: 病院・クリニック(バス)	1: スーパー(自動車) 2: スーパー(自転車) 3: 生鮮食品(自転車) 4: 病院・クリニック(自動車) 5: 病院・クリニック(徒歩) 6: 生鮮食品(自動車) 7: 酒・米店(自動車) 8: 病院・クリニック(自転車) 9: 飲食店(徒歩) 10: ドラッグストア(徒歩)
(補注) 上位 10 施設			
アンケート項目 II (住環境・住民意識)	家族構成・住居・住環境 住民意識: 住環境近隣関係・地域交流活動		
アンケート項目 III (生活支援施設)	移動交通手段・利用頻度 商業/サービス施設の利用・宅配サービスの利用状況		

神奈川県南部地域 (3 地区) におけるアンケート配布数および回収率、移動手段別生活支援施設の集計数の上位 10 項目。アンケート項目および集計結果の詳細は奈須(2009, 文献 14)。

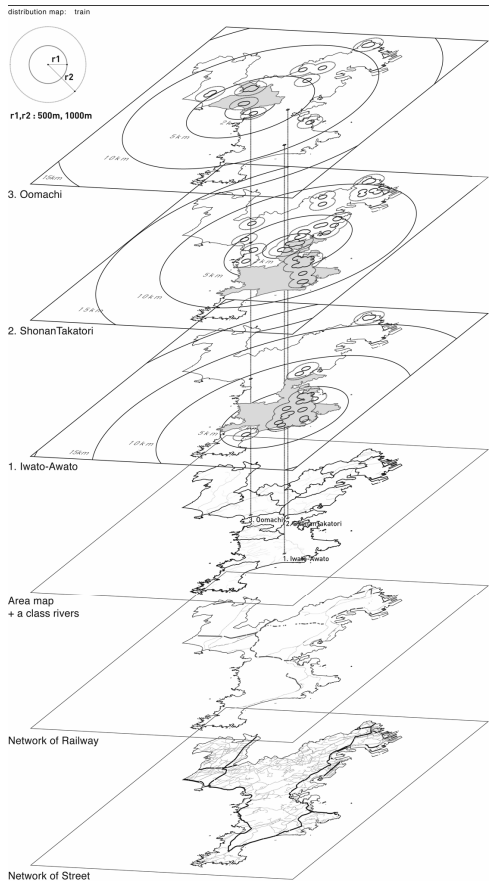


図 5-1 鉄道移動による生活支援施設の分布域 (r1=1km, r2=2km, 神奈川県南部の 3 地区: 横須賀市 S 地区・I 地区、鎌倉市 O 地区)

表5-2 生活圏の属性区分一覧

施設区分(12要素)						
S : スーパー	A : 酒・米店	Bo : 書店	La : クリーニング			
C : コンビニ	D : ドラッグストア	R : 飲食店	H : 病院・クリニック			
F : 生鮮食品	E : 電気店	Ba : 理容室・美容院	Le : 余暇活動			
移動地域(43要素)						
湘南農産	横須賀中央上大同	葉山	鎌倉	杉田	長井	新宿
金沢文庫	熊立大学 平成町	藤沢	上郷	伊勢佐木町	元町	川崎
金沢八景	横浜 基木/金沢区基木	田浦	熱海	永谷沢	榮崎	北久里
湯浜	六浦 馬浜	東京	大船/大船駅	新座	栗区下郷	公藤
汐入	龍見台 櫻内	蓮子駅	久里浜	東温子	船越町	逸見
移動手段(7要素)						
電車	タクシー	バス	徒歩	自転車	バイク	自動車
$(0.3^* \alpha)$	$(0.2^* \alpha)$	$(0.1^* \alpha)$	(± 0.0)	$(-0.1^* \alpha)$	$(-0.2^* \alpha)$	$(-0.3^* \alpha)$
他律的移動 ← ○ → 自律的移動						

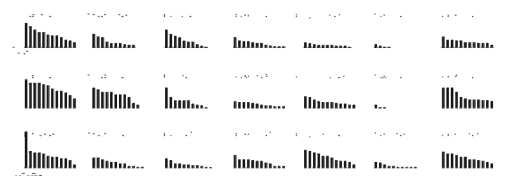


図5-2 神奈川県南部の3地区(上から、横須賀市S地区・I地区、鎌倉市0地区)における移動手段別度数分布図。(左から、自動車、電車、バス、バイク、自転車、タクシー、徒歩)

分布していることが確認できる。3地区ともに主要の移動手段は自動車であり、2つの主要駅間に位置するS地区では鉄道移動の占める割合(20.0%)が他2地区に比べて7%~10%程高い。また、0地区においては、自転車移動に占める割合(21.1%)が他2地区と比べ2~3倍と高い。これは駅勢圏の周縁エリアに自転車やバイクで積極的に移動していることが理由に考えられる。また、いずれの地区も、タクシーでの移動先の大半は徒歩圏内の病院・クリニックであり、0地区においてはスーパー(7)、病院・クリニック(6)、生鮮食品(4)、書店(2)、理容室(2)などの複数の移動先に幅広く乗車する傾向が確認できる。生活支援施設の地域と種別、およびその移動手段の相関特性については次項の移動域マップに記す(図5-4)。

5-2. 生活圏域の可視化

対象地区間の生活圏域の特性を把握するために生活支援施設の「移動地域」と「移動手段(7区分)」,「施設属性(12区分)」と「地区内の移動者数・施設数」を変数とした符号化による視覚的を行う。対象地区の外縁形状を正円型(以降、移動域マップと称する)に抽象化し、各生活支援施設の位置座標を符号化して再配置することによって大量の個別データを大域的に把握することができる。全ての生活支援施設は単純な母点とバッファ領域に置き換えられ、施設別の移動者数とその移動手段に応じて母点の位置、半径と色、線種が割り当てられる。

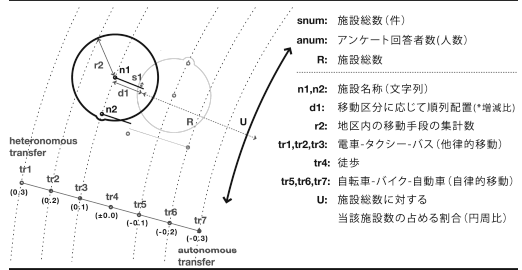


図5-3 生活行動の移動域マップの概要

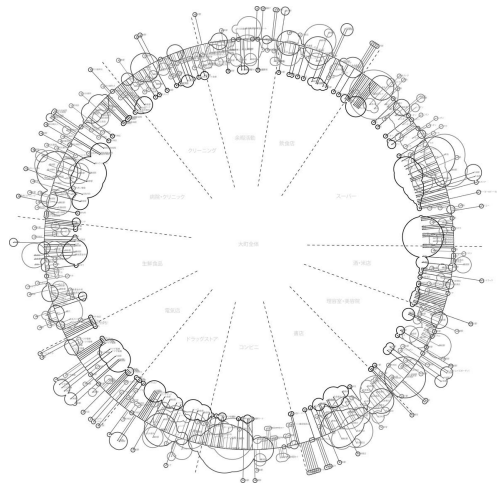


図5-4 鎌倉市0地区における生活行動の移動域マップ、移動手段の種別はカラー表示および移動者数に応じて線の太さを調整、符号化された生活支援施設の重複領域は複合シェイプを生成。

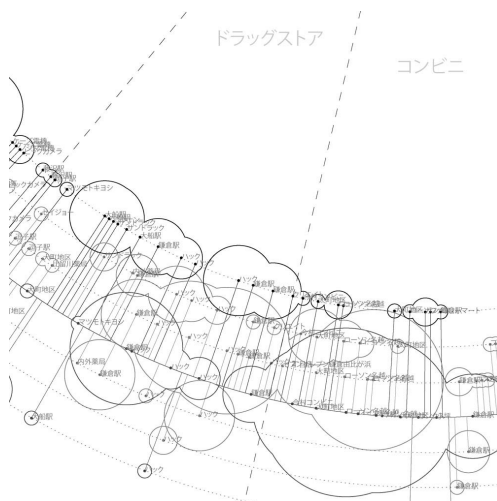


図5-5 鎌倉市0地区におけるドラッグストアとコンビニへの移動手段と分布図(図5-2の左下部を拡大)

また、ここでは地域住民の移動特性として(表5-2下段)、徒歩・自転車・バイク・自動車等による「自律移動」と、タクシー・電車・バス・飛行機等による「他律移動」の2種類に分類を行う。移動域マップのサイズは地域住民が訪れる施設の総数に比例しており「徒歩移動(tr4)」の位置を軸円にする。軸円から広がるように「他律移動：バス(tr3)・タクシー(tr2)・電車(tr1)」による移動先が順列的に再配置され、「自立移動：自転車(tr5)・バイク(tr6)・自動車(tr7)」による生活支援施設が内縁に向けて順列的に再配置される(図5-3)。

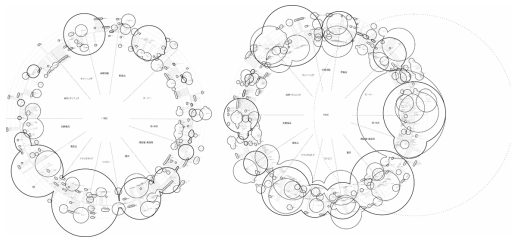


図5-6 O地区における生活行動の移動域マップ(左図)、S地区における生活行動の移動域マップ(右図)

5-3. 生活圏域の現状

O地区と比較して、S,I地区では日用品に関するドラッグストアやスーパー、クリーニングなどの特定のサービス施設に依存する傾向がある。ここでは、当該施設の大半が鉄道駅周辺もしくは国道沿いの地域に立地していること、そして徒歩圏外であるためにバスや自動車の移動手段に単一化していることが一つの要因に考えられる。一方で、S地区においては、鉄道や道路交通の利便性を活かして5km圏外への移動が数多く見られる。また、O地区においては、自転車でスーパー(21件)や生鮮食品(20件)、病院・クリニック(18件)へ移動する比率が最も高く、駅勢圏ではカバーできない地域への移動手段としても自転車が活用されている。

生活圏域の居住環境を持続的に改善していくためには、生活支援施設とその移動手段の相関特性を考慮した上で地域計画を検討していくことが期待されている。その為には、地域住民が主体的立場になって身近な問題を拾い上げ、より実践的に市区町村スケールの空間情報を活用していくため実践的手法が必要になってくると思われる。

6. まとめ

2008-09年度の共同研究の最終報告を行った(文献15)。4つのケーススタディを通じて空間情報に有用な属性データの検証を行うと共に、地域住民との共同ワークショ

ップやアンケート調査などを通じてコミュニティの主体的かつ継続的な活動を支援する表現手法の検討を行ってきた。当該研究は2010年度も引き続き実施していく。ケーススタディIVにおけるアンケート配布・回収の補助に当たっては鎌倉市市役所市民経済部市民活動課の方々、鎌倉市O地区自治会町内会の方々、横須賀市役所市民部市民生活課の方々、I地区3丁目の町内会長様、S地区5丁目の町内会長様および住民の方々にはご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

補注

(1) O地区の選定に当たっては、2008年度に実施したワークショップから得られた当該地域間の困難度評価を参照し、横須賀S地区、I地区と同様に中心市街地への移動が困難であることを考慮した。

参考文献

- (1) 土木学会四国支部第7回技術研究発表会講演梗概集, 2001
- (2) 末次忠司: 河川の減災マニュアル, 山海堂出版, 2004. 6
- (3) 神奈川県県土整備部: 浸水想定区域図(神奈川県全域), 2009. 10
- (4) 神奈川県: 防災マップ(神奈川県全域), 2007. 5
- (5) 中央防災会議: 首都直下地震防災戦略における被害軽減量の算出手法について, 2006
- (6) 神奈川大学: 災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントの構築に関する研究(研究成果報告書), 2006
- (7) 山影 進: 人口社会構築指南—artiscocによるマルチエージェントシミュレーション入門, 2007. 1
- (8) 愛知工業大学研究報告: 「防災カルテを用いた地域および企業防災力の評価法に関する研究」, 第40号B, 2005
- (9) 東京都都市計画局: 「地震に関する地域危険度測定調査」第6回, 2008. 2
- (10) 独立行政法人統計センター: 「地図で見る統計GIS」, 2005
- (11) 神奈川県県土整備部都市計画課: 「都市情報データ」, 2005
- (12) 郊外住宅地における生活支援施設と住民意識に関する研究, 原田佳幸, 平成20年度 神奈川大学大学院 工学研究科建築学専攻修士論文
- (13) コミュニティ支援を意図した防災空間情報に関する研究, 齊藤千夏, 平成20年度 神奈川大学大学院 工学研究科建築学専攻修士論文
- (14) 低層住宅地における生活支援施設と住民意識に関する調査研究, 奈須竜也, 平成21年度 神奈川大学工学部建築学科卒業論文
- (15) 計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発, 神奈川大学工学研究所報, no32, p84-92



超伝導量子干渉計のオンチップ・アレイ化による 高感度磁束計の製作

中山 明芳* 阿部 晋** 穴田 哲夫***

Fabrication of High-sensitivity Magnetometer by On-chip Arraying of Superconducting Quantum Interference Devices

Akiyoshi NAKAYAMA* Susumu ABE** Tetsuo ANADA***

1. 緒言

超伝導は1911年カマリン オネスにより、約4.2K以下で水銀の抵抗値が測定できないほど小さくなるというかたちではじめて発見されている。この超伝導の 特徴的な性質としては

- (i) 超伝導体内の磁束密度が零 (反磁場の効果で磁束線が超伝導体の外へ押し出される)
- (ii) 直流抵抗の消滅
- (iii) 超伝導体でつながれた接合間の干渉効果 (超伝導量子干渉計 (Superconducting Quantum Interference Devices) というかたちで利用)
- (iv) オーダパラメータにより表される超伝導状態
- (v) 超伝導サンドイッチ構造での超伝導電子 (クーパー対) のトンネル効果がある。

性質(v)について、イギリスのケンブリッジ大学のジョセフソン氏は2枚の超伝導体で薄い酸化膜を挟んだサンドイッチ構造で電流が流れても電位差が生じないことを1962年理論的に予想し、この現象は翌年実験的に観測されている。以来この構造はジョセフソン接合と呼ばれる。

ジョセフソン接合は基本的に二端子の素子である。超

伝導デバイス及び超伝導集積回路は、超伝導体/バリア/超伝導体の構造である、この2端子のジョセフソン接合を中心的な構成素子として使い、回路的に工夫することでこれまで種々の超伝導回路が製作されてきている。しかしながら、超伝導をより素子数が少なく論理回路等に応用するには、超伝導を使った三端子の構造の素子も望まれている。

超伝導体自体や超伝導デバイスの数値解析については、超伝導体中のオーダパラメータ Ψ の振る舞いをギンツブルグ-ランダウ方程式により解析するのがほとんどであった。しかし、この方法ではジョセフソン接合のトンネルバリアでの電子のトンネル効果をうまく取り込むことができない等の問題点がある。ジョセフソン接合の中で、特にトンネル型ジョセフソン接合自体の解析は、量子力学の中の場の量子論的手法が要求され、これまであまりおこなわれてこなかった。本報告では、場の量子論の方法により超伝導接合およびより複雑な構造の超伝導構造の解析をし、数値解析もおこなった。ジョセフソン接合の解析のための基本的な数値計算方法の開発と、基礎構造でのその数値計算結果の解析と他の現象論との比較をまずおこなった。

また、ニオブを使った超伝導薄膜堆積、アルミニウムとの堆積とその自然酸化プロセスの最適化、及びフォトグラフィックと陽極酸化方法を使った接合部決定プロセスの改善により、実際に超伝導二端子および超伝導干渉計構造を製作し、その基本特性を測定する予定である。特にその中でも外部から加える磁界に対する超伝導接合の電

*教授 電子情報フロンティア学科

Professor, Electronics and Informatics Frontiers

**准教授 電子情報フロンティア学科

Associate Professor, Electronics and Informatics Frontiers

***教授 電子情報フロンティア学科

Professor, Electronics and Informatics Frontiers

流電圧特性と超伝導電流の特性を測定する新しい測定手法を開発してきた。ここでは、神奈川大学工学研究所共同研究の平成21年度の途中経過として、研究成果を以下報告する。

本共同研究の目的を述べる。

- (1) 超伝導接合理解のため超伝導構造解析の理論を、基本的な数値計算のおこなえるように整備する。
- (2) 基本的な超伝導体/バリア/超伝導体、さらに複雑なバリア領域をもつ超伝導構造に対して数値計算のおこなえるモデルを求め、特性計算する。
- (3) 実際に、シングルバリア超伝導接合を製作し、その基本特性を測定する。このとき種々の接合形状の素子を製作し、その2次元磁界特性を測定比較する。
- (4) 実際に、製作したシングルバリア超伝導接合の磁界変調の基本特性を測定する。また、磁界センサーとして使用して、超伝導ニオビウム薄膜近傍の磁界を測定する。
- (5) シングルバリア超伝導接合を組み合わせた干渉計の構造を製作し、その基本特性を測定する。

2. 超伝導接合構造の数値解析

超伝導のジョセフソン効果は超伝導エレクトロニクスと基礎物理で重要である。ジョセフソントンネル接合では外部磁界により、ゲージ不変な位相差が変調する。

まず、磁界がない状態での超伝導接合特性を以下に調べよう。超伝導デバイスの解析は、超伝導体中のオーダパラメータ Ψ の振る舞いをギンツブルグ-ランダウ方程式により解析するのがほとんどであった。しかし、この方法では超伝導接合の特にバリア領域での電子のトンネル効果をうまく取り込むことができない等の問題点があり、超伝導接合の中で、特にトンネル型ジョセフソン接合自体の詳しい数値解析はあまりおこなわれてこなかった。我々は、場の量子論の方法によりトンネル接合の解析をおこない、数値解析する。実際に超伝導接合を製作して特性測定して得た実験結果と比較できる数値解析モデルを作る。

「非常に薄い絶縁膜を挟んで2つの超伝導体があるとき、2つの超伝導体の間に電流が流れていても、2つの超伝導体の間の電位差が0でありうるという現象」が、ジョセフソンにより理論的に予言され、翌年実験により確かめられ、ジョセフソン効果と呼ばれることになった。この現象は、言い換えると、一方の超伝導体から他方の超伝導体へ、電子のみならず、いわば、超伝導電子対(クーパー対)もトンネルするというわけである。「非常に薄い絶縁膜を挟んで2つの超伝導体のある構造」はジョセ

フソントンネル接合と呼ばれる。

量子力学の教えによれば、通常の量子井戸には束縛状態が存在する。束縛状態の波動関数は、局在し、無限遠で零に収束するという性質をもつ関数である。超伝導接合では、ハトリーポテンシャル $U(x)$ とペアポテンシャル $\Delta(x)$ の分布と比較するとわかるように、この超伝導接合ではペアポテンシャル $\Delta(x)$ が井戸構造をもつ。ゆえに超伝導接合にも束縛状態があり、接合を流れる電流と相関がある。超伝導接合ではいわゆるボゴリューボフ-デュジャンヌ方程式が基本方程式となる。この基本方程式に従う準粒子の運動を考慮し、超伝導接合の接合部から離れたと値が0に収束する束縛状態での波動関数の離散的なエネルギー準位と、そのときの具体的な2成分波動関数を数値解析で求めた。離散的なエネルギー準位は接合部の厚さ D に対して振動しながら減少していく。厚さ D が増えたと離散的なエネルギー準位の数は階段状に増加していく。2成分波動関数で最も値の大きくなる成分は、厚さ D が増加するとともに、上成分実部、上成分虚部、下成分実部、下成分虚部の順番で変わっていく。因子を適切に選ぶことにより、両成分とも実部は位置 x の偶関数、虚部は位置 x の奇関数となる。

サンドイッチ形の超伝導接合を電流が流れても、二つの超伝導電極間に電位差は生じない。このとき、2つの超伝導体間に電位差なしで、いくらでも大きな電流を流せるわけではなくて、流しうるある上限の値がある。2つの超伝導体を下部の超伝導体電極及び上部の超伝導体電極と呼ぶことにすると、この下部超伝導体電極から上部電極に向かって、接合を電位差なしで流れる電流 i は、二つの超伝導体電極間の「(ゲージ不変な)位相差 γ 」の \sin に比例し、

$$i = \sin \gamma \quad (1)$$

の関係が成り立つ。基準となる下部の電極内の任意の点 a のオーダパラメータの位相を $\theta(a)$ 、この点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、もう一方の上部の電極内に入り点 b を考える。その点の位相を $\theta(b)$ としている。接合面を垂直に横切る経路に沿ったゲージによらない「ゲージ不変な位相差 γ 」は、

$$\gamma = \theta(b) - \theta(a) + \frac{2\pi}{\Phi_0} \int A \cdot ds \quad (2)$$

である。ここでゲージ不変な位相差 γ の前半は、上部電極の点 b の位相 $\theta(b)$ と、基準となる下部電極の点 a のオーダパラメータの位相 $\theta(a)$ の差である。後半は点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、もう一方の電極の点 b ま

での経路に沿う電磁場のベクトルポテンシャル \mathbf{A} の線積分の項が入っている。さらに、上部電極の点 c と下部電極の点 d を4点 $abcd$ が長方形 $abcd$ になるように考えてみる。このとき、経路 dc に沿うゲージ不変な位相差 γ の、経路 ab に沿うゲージ不変な位相差 γ に対する差分 $\Delta\gamma$ は、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束 $\Delta\Phi$ の $2\pi/\Phi_0$ 倍であることになる。数式で書くと

$$\Delta\gamma = \frac{2\pi}{\Phi_0} \Delta\Phi \quad (3)$$

である。特に、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束が磁束量子 Φ_0 1個分であれば、位相の増分は 2π である。 $\mathbf{i} = \sin\gamma$ により、接合全体について接合内の各点各点での電流値の和をとることにより、与えられた磁界における接合を流れる電流が得られる。特別な場合として、外部磁界がなければ、この位相差は、接合内で一定で、特に $\pi/2$ のとき、最大の電流 I_c が接合を流れ、 I_c はこの接合の最大臨界の超伝導電流値である。

3. 実験

3.1 センサー作製用スパッタリング装置

センサー接合の製作のためには、スパッタリング装置を使う。装置は以下の構成である。

試料交換用ロードロック室

↓↑

真空トンネル⇄ニオブウム用スパッタリング室

↓↑

真空トンネル⇄ニッケル用スパッタリング室

↓↑

真空トンネル⇄鉛用蒸着堆積室

↓↑

真空トンネル⇄収束イオンビーム(FIB)装置

↓↑

真空トンネル⇄メタルマスク交換室

試料交換はロードロック室の内部空間のみの真空を破ることでおこなうことができる。排気はターボポンプ7台、ドライポンプ7台、イオンポンプ1台、チタンサブリメーションポンプ2台である。ドライポンプとターボポンプ下部を除いて装置全体はベーキングパネルに覆われて、150度までのベーキングが可能である。現在105度までしかベーキングできないスパッタリング用水晶振動

子を使用しているため、通常100度で数時間のベーキングをおこなっている。

3.2 磁界特性測定装置

円形コイル[ヘルムホルツコイル]を3対使い、 x 、 y 、 z （東西南北および垂直上下）方向の外部平行磁界を生成する。パーソナルコンピュータにより GPIB 制御された直流電源によりコイルに電流を流すと、その電流に比例して磁界が生じる。これによりプログラムのファイルであらかじめ設定したアルゴリズムで、外部磁界を正確に生成することが可能となる。ニオブウム超伝導薄膜試料を x - y 平面、センサー接合を y - z 平面に平行に位置させた例を下図に示す。この相対位置の設定状況では、例えば H_z 磁界はニオブウム超伝導試料薄膜に垂直で、センサー接合の面に平行になる。

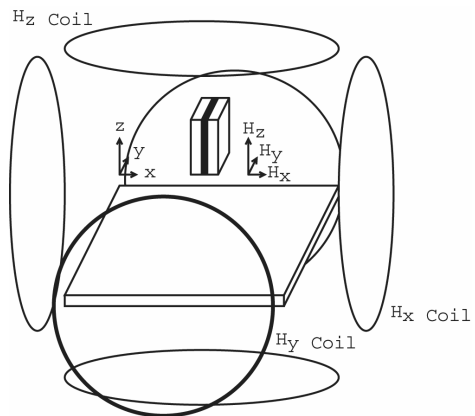


図1. 実験のセットアップ 素子に加える外部平行磁界は3対の円形コイル[ヘルムホルツコイル]で生成する。コイルは GPIB 制御された電源により電流が流され、その電流に比例して磁界が生じる。これにより設定した外部磁界を正確に生成することが可能となる。上図の例では、ニオブウム超伝導薄膜試料は x - y 平面、センサー接合の面は y - z 平面に平行に位置する。 H_z 磁界はニオブウム超伝導試料薄膜に垂直で、センサー接合の面に平行になる。磁束はニオブウム超伝導試料薄膜に侵入でき、センサー接合により検出可能である。

4. 測定結果

4.1 磁界特性の接合形状依存性

外部から磁界を加えることにより、サンドイッチ型超伝導接合を流れる超伝導電流は変調するこのサンドイッチ型超伝導接合の酸化膜バリア自体を横切る経路に沿ってのゲージ不変な位相差は、両方の超伝導電極の位相の差に、経路に沿っての電磁場のゲージポテンシャルの線積分の項を足したものである。その結果、前の式(3)よりゲージ不変な位相差はバリア内部の磁界の向きに垂直な方向に空間的に変調する。この変調周期は加える磁界の大きさに反比例する。このようなわけで、超伝導ジョセフソントンネル電流の変調特性から、トンネルバリアそのものの一様性等を診断することができる[1]。これまで quartic polynomial 形 [2,3] や x 線解析のための normal-distribution-function 形[4] の接合について調べられてきている。ただし、このような磁界特性は外部磁界を一次元方向に走査して調べられてきているのが現状である。これに対して我々は2方向、3方向に外部磁界を走査し、 $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 特性を調べていることを提案して、実際に数値解析と、さまざまな接合形状の素子製作、実験により測定に成功している。

2方向に外部磁界を走査したとき、接合に流れる超伝導電流が変調される様子を、長方形の接合を例に考えてみる。この超伝導接合が長方形の場合の $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性の数値解析結果を下の図 2 の a) に示し、その a) の $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性の各点 b), c), d), e), f) で、実際の接合内においてどのように電流が流れているかを、周りの同じ記号で対応する b), c), d), e), f) の長方形の図中に示す。長方形接合中の電流の分布はこれらの図からも解るように、外部磁界に垂直な向きに空間変調していると考えられる。例えば図 c) のように磁界が上向きであれば、接合中の電流は横方向に変調され、図 e) のように磁界が左向きであれば、接合中の電流はそれと垂直な上下方向に変調されるというわけである。長方形接合の全領域での和が接合自体の電流となるので、数値計算で求めた和が a) に示す磁界特性ということである。

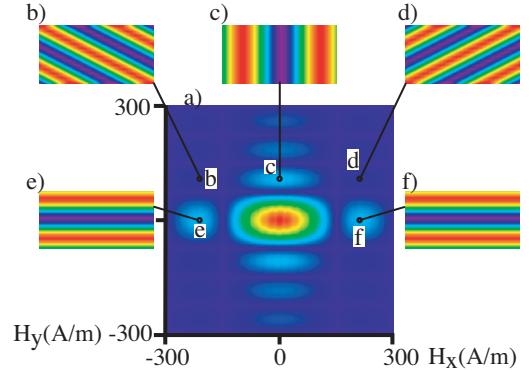


図 2. 長方形の接合の $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性 a) $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性の数値解析結果と b), c), d), e), f) は a) の磁界特性の各点での、長方形接合中の電流の分布を示す。赤い領域と紫の領域はそれぞれ、正および負の向きに電流が流れていることを示す。長方形接合前領域での和が接合の電流となる。電流分布は、外部磁界の方向と垂直に空間変調される。

以上はシミュレーションであるが、実際に素子を製作し、測定した[5-12]。図 3 は、長方形の接合の $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果である。数値解析した図 2 の結果との一致は良いといえる。実際に作製した接合では、レジストの角が丸くなり、接合自体も丸みを帯びていることにより、特性そのものもやや実験結果の方が丸みを帯びている。

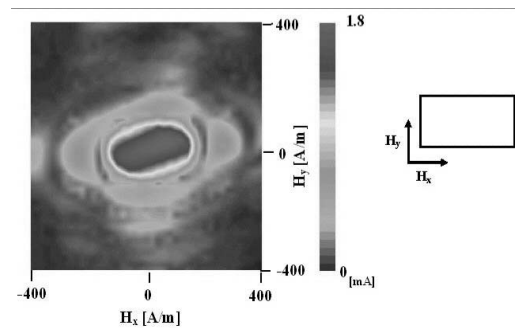


図 3. 長方形の接合の $I_c\text{-}H(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果。数値解析した図 2 の結果との一致は良いといえる。やや

実験結果の方が丸みを帯びているのは、実際に作製した接合の形のかどの丸みを帯びていることの反映であろう。

正六角形の形状の接合も製作した。図4に示すように、この正六角形の形状の接合の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果では、正六角形の対称性が観測された。すなわち、正六角形の角である0度、60度、120度、180度、240度、300度の向きに磁界を加えたときに、尾根の形状となる $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性が観測された。

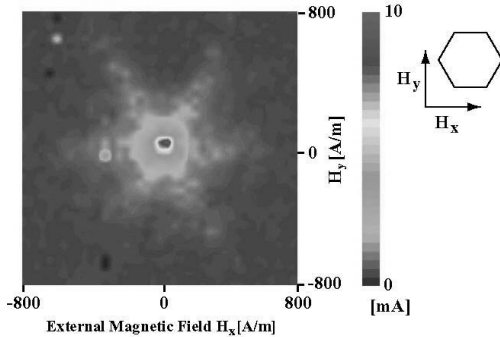


図4. 正六角形の形状の接合の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果

正三角形の形状の接合も製作した。図5に示すように、この正三角形の接合形状の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果でも、正六角形の対称性が観測された。すなわち、正三角形の角を通る0度、60度、120度、180度、240度、300度の向きに磁界を加えたときに、尾根の形状となる $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性が観測された。

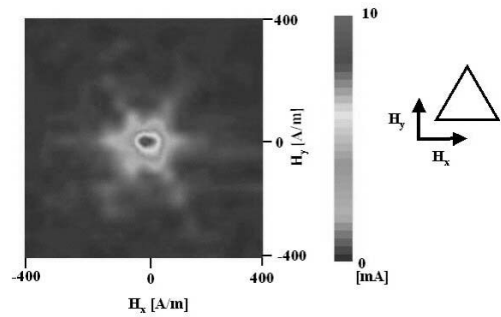


図5. 正三角形の形状の接合の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果

このような $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性を説明するには、いわゆる滑車モデルの発展形である、「円筒滑車モデル」が直感的な描像を得やすいと判断される。図6は円筒滑車モデルである。この図において、左のa)は正三角形の辺に垂直に磁界を加えた場合、右側のb)は正三角形の辺に平行に磁界を加えた場合である。

両者の対応関係を以下に示す。

超伝導接合の場合 \Leftrightarrow 円筒滑車の場合

最大超伝導電流値 \Leftrightarrow 最大引っ張り力(滑車はほぼ静止)

超伝導接合の形 \Leftrightarrow 円筒表面の重りの形

超伝導接合の位相 \Leftrightarrow 滑車軸からの角度

それぞれa) b)の滑車の右に示す数字は角度(位相)を表す。よって、円筒滑車自体のバランスはとれているとして、図a)のように、三角形の重りが円筒側面に張り付いていると考えてみるとよい。左の図a)で説明すると、正三角形のある辺に垂直に磁界を加えているので、その辺に垂直に接合各点の位相が変わる。左奥に示す縄が鉛直下向きに引っ張る力を徐々に徐々に大きくしていったときに、どの値までバランスをとれて滑車が定常回転しない状態であるかの類推が成り立つ。

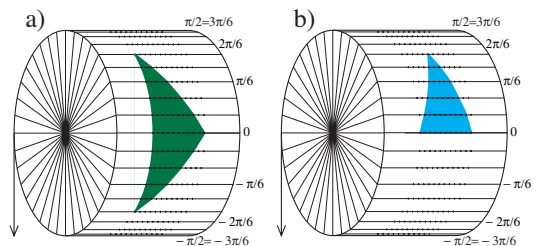


図6. 正三角形の形状の接合の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の円筒滑車モデル

超伝導量子干渉計の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果を図7に示す。図7の右上の差し込み図からもわかるように超伝導量子干渉計では、2つの超伝導接合の下と上の電極が超伝導電極で並列に接続されている。この座標設定では、大きな超伝導ループが H_x 方向の磁束を捕獲するので、 H_x 方向の感度が良くなる。

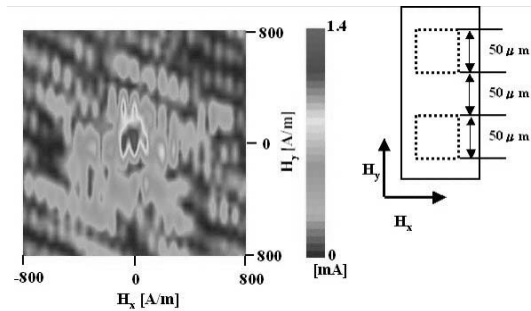


図7. 超伝導量子干渉計の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果

4. 2 磁界センサーとして接合自体を使っての超伝導薄膜の近傍磁界の測定

次に、まず、簡易に接合自体を磁界センサーとして、超伝導薄膜に近接して接合を置いた、図1の測定系でのセンサー接合の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性の測定結果について述べる。測定系において、この接合形状依存性センサー接合の面は y - z 平面に平行に位置する。 H_z 磁界はニオブウム超伝導試料薄膜に垂直で、センサー接合の面に平行になる。

ニオブウム超伝導薄膜試料がない場合に、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性を図8に示す。正方形の接合であるが、接合の角が丸まっている分、特性の方も丸まった阿蘇の外輪山のような依存性特性となっている。

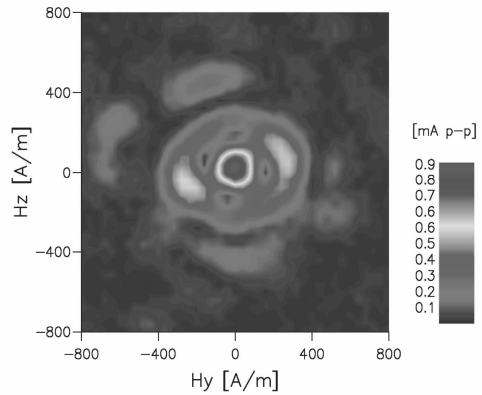


図8. ニオブウム超伝導薄膜試料がない場合に、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性

ニオブウム超伝導薄膜試料がある場合に、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性を図9に示す。ニオブウム超伝導薄膜試料のマイスナー効果で、磁束線を試料外部に追い出し、その分接合のある点での磁界が外部から加えたものに比べて小さくなっている。その結果、 $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性は、図8と比べて H_z 方向に延びた特性である。

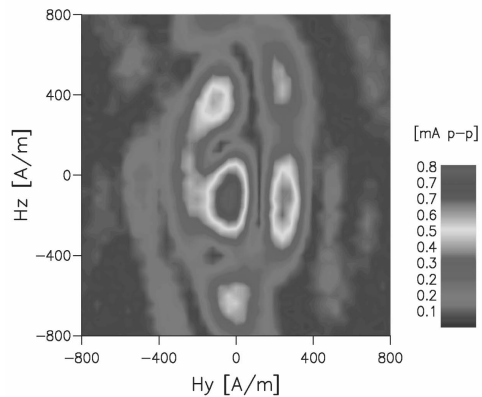


図9. ニオブウム超伝導薄膜試料がある場合に、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 磁界特性

同じくニオブウム超伝導薄膜試料がある場合に、 H_z を三角形の形で0から最高値 H_{zmax} まで増加し、再び0に戻したあとに調べた、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c-H(H_y, H_z)$ 磁界特性を図10に示した。左上の図では $H_{zmax}=2000[A/m]$ 、右上の図では $H_{zmax}=3000[A/m]$ 、左下の図では $H_{zmax}=4000[A/m]$ 、右下の図では $H_{zmax}=5000[A/m]$ である。図9と比べて全体に特性は H_z 負方向にシフトしている。その H_z 方向のシフト量は最高値 H_{zmax} が(2000)-(3000)-(4000)-(5000A/m)に対応して、それぞれ(0)-(-60)-(-400)-(-800A/m)であった。

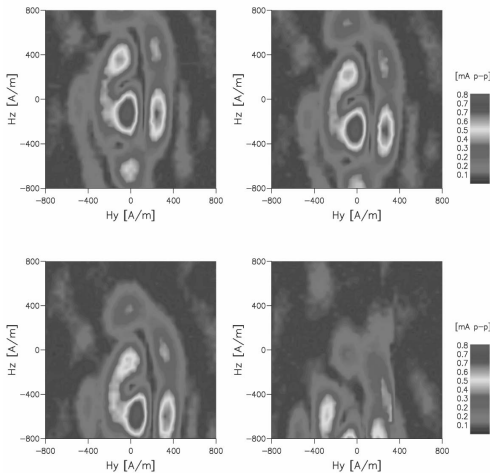


図10. ニオブウム超伝導薄膜試料がある場合に、Nb/AlO_x/Nb 超伝導トンネル接合センサーを流れる超伝導電流 I_c の $I_c-H(H_y, H_z)$ 磁界特性 [H_z を三角形の形で0から最高値 H_{zmax} まで増加し、再び0に戻したあとの $I_c-H(H_y, H_z)$ 磁界特性] 左上の図では $H_{zmax}=2000[A/m]$ 、右上の図では $H_{zmax}=3000[A/m]$ 、左下の図では $H_{zmax}=4000[A/m]$ 、右下の図では $H_{zmax}=5000[A/m]$ である。その H_z 方向のシフト量は最高値 H_{zmax} が(2000)-(3000)-(4000)-(5000A/m)に対応して、それぞれ(0)-(-60)-(-400)-(-800A/m)である。

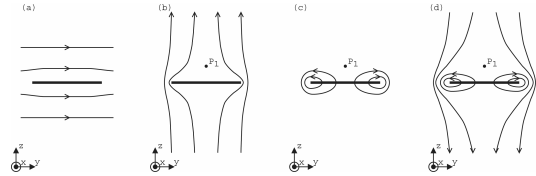


図11. 磁界のモデル (a)完全反磁性(マイスナー)効果: [図で太い黒線で断面を表した]ニオブウム超伝導薄膜試料に外部磁界が平行な場合 (b)完全反磁性(マイスナー)効果: 超伝導試料に外部磁界が垂直な場合 (c)ニオブウム超伝導薄膜試料に捕獲された磁束 (d)ニオブウム超伝導薄膜試料に捕獲された磁束による磁界と、外部から加えた磁界のセンサー位置での和が零となる。

これまでの磁界特性を説明するための磁界のモデルを考えてみよう。ニオブウム薄膜試料は、測定している液体ヘリウム温度 4.2K では超伝導状態を示している。超伝導状態では、完全反磁性(マイスナー)効果を試料は示し、ニオブウム薄膜試料に対して平行な H_y 磁界方向については、薄膜試料から磁束線は排除されるにも関わらず、図11(a)からも明らかのように、その磁束線軌跡の乱れは少なく、外部から加えた H_y 磁界値と同じ値がそのまま、センサー位置でも観察される。図(b)の超伝導試料に外部磁界が垂直な場合はこの値が 2000A/m 以下であるなら、薄膜試料の完全反磁性(マイスナー)効果は磁束線を排除し、その結果、センサー位置での磁界の値は、外部から加えた H_z 磁界値の半分くらいの値が、センサー位置(図中の点 P_1 で示す位置)で観察される。その結果、磁界特性上では、 H_z 磁界方向に特性は伸びた形状として観察されることになる。超伝導試料薄膜がある場合の図9の $I_c-H(H_y, H_z)$ 特性を、超伝導試料薄膜がない場合の図8の $I_c-H(H_y, H_z)$ 特性と比較することにより、特性は約2倍に H_z 磁界方向に伸びた形をしているので、センサー位置(図中の点 P_1 で示す位置)で、 H_z 磁界は約半分に減少していると考えられる。 H_z 磁界値の最大値が 2000A/m を大きく超えるようになると、その形状効果から、磁束線が超伝導試料薄膜に侵入し、 H_z 磁界を取り除いても、図(c)に示すように、一部の磁束線は超伝導試料薄膜に捕獲されたままになると考えられる。一度、ニオブウム超伝導薄膜試料に磁束が捕獲されると、一般に、ニオブウム超伝導薄膜試料の近傍のセンサー位置での磁界は、超伝導薄膜試料に磁束が捕獲された磁界と、ヘルムホルツコイルにより外部から加えたる磁界の和になる。図(d)に示すように、センサー位置で、超伝導薄膜試料に捕獲された磁束による磁界と、外部から加えた磁

界のセンサー位置での和が相殺した場合、接合センサー自体に加わる実質磁界が零となる。このように考えることにより、センサー位置で H_z 上向き磁界となるような磁束が超伝導薄膜試料に捕獲された場合、特性は H_z 下向きにその分シフトしたものとなることが解る。

5. 結言

本報告は工学研究所の共同研究の平成21年度の研究成果報告である。本共同研究の1年目の成果としては、超伝導電流の磁界特性の接合形状依存性を調べた。また、磁界のセンサーとして超伝導デバイス素子を使用して、超伝導薄膜試料近傍の磁界を測定した。その結果、超伝導薄膜試料の完全反磁性効果[マイスナー効果]を確認できた。また、超伝導薄膜試料に垂直に3000A/m以上の磁界を加えた場合の薄膜試料への磁束の捕獲と、それともなう磁界特性のシフトを観察した。これらの結果をもとにさらに、超伝導量子干渉計を使い、より感度の高い磁界測定に挑戦していきたい。

本共同研究は1年目が過ぎたところではありますが、このような共同研究の機会を与えてくださった工学研究所所長および工学研究所に感謝する。

参考文献

- [1] A. Barone and G. Paterno, "Physics and Applications of the Josephson Effect," Wiley-Interscience, New York, (1982)
- [2] R.L. Peterson, *Cryogenics*, Vol. 31, Pages 132- (1991)
- [3] J. G. Gijbbersen, E.P. Houwman, B.B.G. Klopman, J. Flokstra, H. Rogalla, D. Quenter, S. Lemke, *Physica* Vol. C249, Pages 12- (1995)
- [4] K. Kikuchi, H. Myoren, T. Iizuka, S. Takada, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.77, Pages.3660- (2000)
- [5] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tatsuyuki Morita, Makoto Iwata, and Yusuke Yamamoto, *IEEE Trans.Mag.*, Vol.36, Pages 3511-(2000)
- [6] A.Nakayama, S.Abe, T.Shoji, R.Aoki, and N.Watanabe, *Physica* Vol. B329-333, Pages 1493- (2003)
- [7] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Kunimori Aizawa, *J. Appl. Phys.*, Vol.97, Pages 10B116 1- May (2005)
- [8] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, K.Aizawa, *J. Appl. Phys.*, Vol. 97, Pages 10B116- (2005)
- [9] Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Tetsuya SHIMOYAMA, Norimichi WATANABE, Hsu Jui-Pang and Yoichi OKABE, *J.Phys.Conf.Ser.* Vol. 43 Pages 1092- (2006)
- [10] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, *J. Appl. Phys.*, Vol. 101, Pages 09G105- (2007)
- [11] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, et.al, *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, Pages 07C707- (2008)
- [12] N.Watanabe, A.Nakayama, S.Abe, et.al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 105, Pages 07E312- (2009)



人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システムの構築

—カーブミラーの視認性向上による交差点視環境改善—

堀野 定雄* 森 みどり** 久保 登*** 北島 創****

Ergonomics study on the safe and smooth road traffic system at uncontrolled intersections - Improvement of the visual environment at intersections based on installing traffic convex mirrors with enhanced visibility -

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

1 はじめに

警察庁統計によると、わが国における交通事故は、この数年減少傾向が窺われている¹⁾。しかし、2009年中の発生件数736,688件、負傷者910,115人、死亡者4,914人で、事故は依然として深刻な多発状況にある。また、出会い頭事故(199,196件)は全事故の1/4(27%)を占め、市街地生活道路無信号交差点で多発している構造上に変わりはない。

本研究室が行った横浜市鶴見区でのフィールド調査から、無信号交差点における出会い頭事故の要因として、一時不停止や安全不確認を誘発する「見えない交差点視環境」があること²⁾³⁾、また、見通しの悪い交差点で補助視界を得るために有効なカーブミラー（以下、単にミラーと略）について、視認性が低いミラーが多く設置されている実態や良好な視界を得る上で必ずしも十分な設置指針が存在しないこと⁴⁾、などが分かった。

そこで、2007-2008年度の本学工学研究所共同研究において、全国のミラー（2009年7月現在で約224万本設置）の総点検および、新設・改修工事の際に利用できるミラー設置・調整の標準的簡便法を提案するため、(1)交差点視環境の定量評価、(2)視環境検出用の可搬型組立式ミラー・位置決め用マーカーランプなどの開発、(3)これらの実験装置・器具を用いたミラー視認性評価フィールド実験、(4)コンピュータ上でミラー視界を含む視環境を再現する3次元コンピュータグラフィクス(3D CG)ソ

フトウェアを用いたシミュレーターの開発、(5)開発したシミュレーターによる最適な視環境やミラー設置位置の検出、などを実施してきた⁵⁾。同研究の成果として、これまでのミラー設置・調整は、現場適用が容易な基礎的方法論が不足し、現場作業は感覚と経験に大きく依存していること、不良な交差点視環境の原因が種々の視覚的障害物や、不適切に設置したミラー等にあること、ミラーにより良好な補助視界を得るための調整範囲（位置・角度）は予想外に厳密である（狭い）こと、鏡像内に映る接近車両の最遠見認距離はミラー諸元（ミラー直径・材質等）や対象物（4輪車・2輪車の別等）によって変化すること、などが見出された。また、現場での設置・調整方法の標準化・簡易化以前に、一定の視界・視認性を確保するミラーの設置条件検出用の基礎的データ、特に良好な補助視界を得るために有効な交差点ミラーの設置基準が土木工学分野に存在しないことも明らかになった⁶⁾⁷⁾。すなわち、2007-2008年度共同研究により、ミラーの視認性評価および適切な補助視界を確保するための設置基準導出の基盤となる研究方法論と多くの基礎的知見が得られた。

本稿は、2009年度に研究助成を受けた工学研究所共同研究の成果概要を報告するものである。なお、2007・2008年度共同研究の研究経過・成果の概要については、当該年度工学研究所報告において報告⁸⁾しているので参照されたい。

2. 研究目的および研究計画

上述のような研究成果をふまえて、2009・2010年度の研究では、引き続き、ミラーの視認性評価方法および適切な補助視界を確保するための諸条件を明らかにして、ミラーの設置基準再設計・調整の指針を体系化し、交差点視環境設計の人間工学的基盤の整備をはかる。あわせて、視認性に問題があるミラーの総点検と新設・改修工事の際に現場での設置・調整を簡易化、

*准教授 情報システム創成学科

Associate Professor, Department of Information Systems Creation

**助教 情報システム創成学科

Research Associate, Department of Information Systems Creation

***客員研究員 工学研究所高安心超安全交通研究所

Visiting Researcher, Research Institute for Well-informed and Risk-free Transportation (KU-WIRF)

****特別研究員 工学研究所高安心超安全交通研究所

Research Fellow, Research Institute for Well-informed and Risk-free Transportation (KU-WIRF)

効率化できる標準的方法を提案し、ミラーの視認性向上、安全円滑な交差点交通システムの実現をはかることを目的とした。

2009年度の具体的研究計画としては、ミラー視認性の人間工学3原則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⁹⁹⁾を満たすミラー設置条件(位置・角度)を迅速かつ正確に測定・調整する方法について、フィールド研究および3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーション研究を併用し、実証的研究開発を試みる。すなわち、実際の交差点で最小限の交通阻害で安全円滑に実施できることを前提条件とし、下記の3つの課題を中心に研究を遂行することとした。また、必要に応じて、関係行政機関等と連携し協力を得ることとした。

- (1) フィールド研究：実ミラーを用いた視認性評価と設置・調整方法の検討
- (2) 3次元CGシミュレーション研究：3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーターの構築とミラー設置状況の検討
- (3) ミラー視認性評価、ミラー設置条件の体系的整理

3. [課題1] フィールド研究：実ミラーを用いた視認性評価と設置・調整方法の検討

3.1 ミラー視認性評価のフィールド実証実験：ミラーによる接近車両の視認距離測定

3.1.1 研究方法

2007年度に実施した接近車両視認性評価実験の結果、ミラーの大きさ・曲率や視認対象車両に加えて、ミラー材質、実験条件、被験者属性など諸要因の効果を検証し、安全視距離について検討することが課題であると確認できた⁹⁸⁾。そこで、各種条件においてミラーによる交差点接近車両の視認性を評価するため、実際の交差点環境を模擬した実路テストコースにおいて、以下のような条件で実車走行実験を行った(財)日本自動車研究所(JARI)、2009年9月、天候：快晴(図1、図2)。

(1) 実路テストコースにおけるミラー視認距離の測定

市街地の隅切りのない見通しの悪い無信号交差点を模擬した実路テストコース交差点で、下記の4要因を組み合わせた16条件で、ミラー諸元、接近車両の相対による見え方(視認距離)を比較する実験を実施した。

- (1) ミラーの大きさ・曲率(2水準)：①直径600mmφ：曲率半径2200mm、②800mmφ：曲率半径3000mm
 - (2) 接近車両(2水準)：①乗用車セダン、②原付バイク
 - (3) ミラーの材質(4水準)：①メタクリル樹脂(反射率85%)、②ガラス(同80%)、③ポリカーボネート樹脂(同80%)、④ステレンス(同60%)
 - (4) 被験者(2水準)：①若年者(大学生、3名)、②高齢者(60歳代、3名)
- 実験は、交差点境界線停止中の乗用車運転席の被験者からみ

て右方の交差点境界線250m後方から0m地点まで約40km/hで車両(乗用車、バイク)を接近させ、交差点左方コーナーに設置したミラー鏡像で車両を視認できた距離を実測した。被験者は全員運転免許取得者で、矯正視力は左右とも1.0以上であった。

なお、今回の実験は実験条件(16条件)・回数(96回)が多く、8種類のミラーを短時間で交換・調整する必要があった。そこで、2007-2008年度先行研究で独自設計し、市販のアルミ製伸縮式脚立と特注アルミ製支柱で製作した可搬組立型ミラー(3.2項参照)を使用することで、円滑かつ効率的に実験できた。

(2) 3次元CGシミュレーション：ミラー鏡像における視認対象車の大きさ測定

3次元CGソフト(商品名「Shade」)で本実験実施環境をコンピュータ上に作図・再現し、交差点の交差点境界線から10mごとの地点を走行する乗用車、バイクの乗用車運転者アイポイント(EP)からみた鏡像のサイズ画像のpixel数を測定した。

3.1.2 研究結果および考察

(1) 実路テストコースにおけるミラー視認距離の測定

各条件における接近車両の視認距離実測値は、平均69-120m、レンジ(38, 154m)に分布した(図3)。視認対象が乗用車の場合、大型ミラー(800mmφ)での視認距離は平均115m、レンジ(89, 154m)に対し、小型ミラー(600mmφ)は同89m(62, 145m)と約70-80%の距離が縮小した。原付バイクの場合、大型ミラーでの視認距離は同80m(57, 108m)、小型ミラーでの視認距離は同61m(30, 93m)でやはり約70-80%が縮小した。一方、バイクの視認距離は乗用車に比べて、大型・小型ミラー共に約60-70%と短かった。ミラー材質では、ポリカーボネート製の視認距離は、他3種に比べて、最短の場合約85%と短かった。さらに、接近車両視認距離実測値に関して4元配置分散分析を行ったところ、ミラーの大きさ、材質、接近車両の主効果が各々1%水準で有意であり、材料*車両、大きさ*材料*車両の交互作用が各々1%水準で有意、年齢*材料、年齢*材料*車両、年齢*大きさ*材料*車両の交互作用が各々5%水準で有意であった。

今回の視認距離実測値と安全視距離(理論値)に基づき、ミラー間接視界(見え方・視認距離)の有効性・妥当性を検討すると、いずれの条件でも平均値では安全な視認距離を確保できている。すなわち、ミラーの大きさ・曲率、材質や車両の種類による視認性のおよその傾向が把握でき、ミラーを介して接近車両を安全に発見するミラー性能の有効性・妥当性が確認できた。

但し、今回の実験条件は、道路交通環境、天候、運転タスク等が何れも非常に良好で負荷が小さいなど、必ずしも日常の実路での運転状況を再現したものでない。従って、一概にミラー視認性、日常運転環境での安全性を評価することはできず、特に視認距離の短いバイクなどは、ミラー設置環境での視認性評価が重要である。また、ミラー材質では反射率と視認距離に

必ずしも明確な関係がみられず、ミラー材質による視認特性については、反射率以外の要因を含めた検討が必要といえる。これらのミラー諸元、実験条件・手順、被験者属性など諸要因の効果や、実際の交通場面でのミラー視認生の推定と安全視距離の確保については、さらに検討が必要であると確認できた。

②3次元CGシミュレーション：ミラー鏡像における視認対象車の大きさと視認距離

3次元CGシミュレーションで再現、測定した乗用車・バイクの運転者アイポイントからみた大きさ(鏡像サイズ、pixel数)は、800mmφミラーの乗用車が最大、600mmφのバイクが最小であり、境界線から50m地点の画面面積(pixel数)は800mmφでは600mmφの約1.8倍、乗用車とバイクで約3.8倍の相違がみられる(図4)。ここで、乗用車・バイクともに、800mmφと600mmφミラーの視認可能な距離(平均値)における車両の大きさを比較すると、画像サイズ(pixel数)はほぼ一致しており、車両の視認可否は対象車両の鏡像の大きさによることが実証された。

3.2 ミラー設置・調整方法の検討：簡便な角度測定と微調整方法 設置手順等

既設および新設時の簡便・正確なミラー角度測定は意外に容易ではない。2008年までに、実験用の可搬組立型ミラーにおいて、ミラー支柱を2分割して上半部が回転可能な「水平角調整型」のものを製作した(図5)が、これは角度目盛が2度刻みで、1度以下の調整をするには適当ではない。

俯角については、ミラー背面に傾斜計を当てることで概ね1度単位の計測ができる(図6)ので、2009年度は以下のような方法で水平角を概ね1度単位で計測する手法を考案した。

(考案した水平角測定方法)

図7のように、水平角の基準となる位置(たとえばアイポイント)からミラーを撮影する。この際、基準となる位置そのものではなく、ミラーから見て、その位置を通る延長線上に十分(20m程度)下がって、望遠撮影するとよい。

このミラーの写真から、映ったミラーの像の、天地方向の長さA(鉛直方向の直径)と、水平方向の長さB(水平方向の直径)を求め、水平角θを

$$\theta = \cos^{-1}(B/A)$$

として求める(図8、 $\theta=45^\circ$)。なるべく離れたところからミラーを撮影することにより、ミラーを見上げる仰角によるAの誤差は無視した。

この方法によれば、ミラーそのものに触れることなく、水平角をおおむね1度程度の分解能で計測することができる。

4. [課題2]3次元CGシミュレーション研究：3次元CGソフトを用いたシミュレーターの構築とミラー設置状況の検討

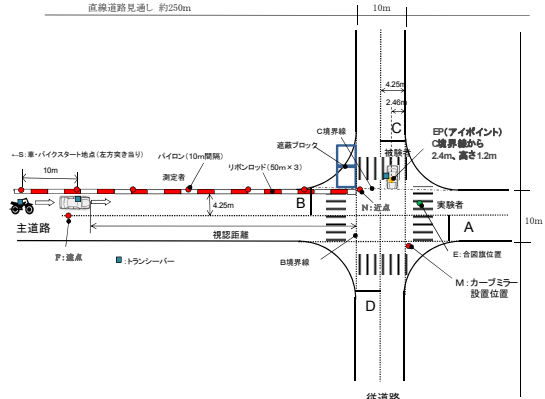


図1 ミラー視認性評価実証実験の実験方法



図2 ミラー視認性評価実証実験の実施状況 (JARI 実路テストコース)

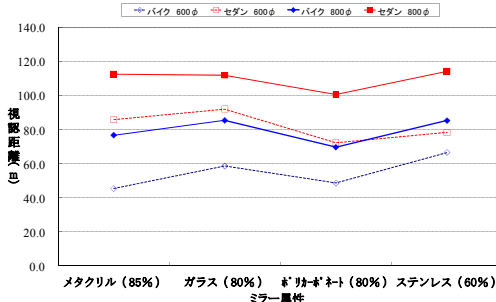


図3 乗用車とバイクの視認距離分布 (平均値, N=6)

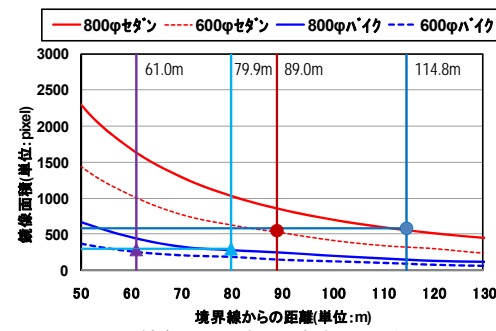


図4 ミラー鏡像における視認対象車両の大きさ (3次元CGシミュレーション)と視認距離 (実測平均値)
 (視認距離: セダン [800mmφ] 114.8m, [600mmφ] 89.0m
 バイク [800mmφ] 79.9m, [600mmφ] 61.0m)

4.1 3次元CGシミュレーション法の概要

現在実用化しているコンピューターグラフィックスでは、3次元物体の表面の表現が非常に進歩していて、木材や塗装面などの通常の表面の他に、ガラス・水などの透過物体、鏡面などの反射面などの表現もきわめて実感的に行える。特に、透過物体や鏡面などの光の屈折や全反射を伴う表面の表現には、レイトレーシングと呼ばれる精密な光線追跡計算を行う。このレイトレーシング表現を用いれば、鏡面に映った路面や車両等の位置が正確に計算で求められる。

そこで、本研究では2007年度より、レイトレーシングを用いたミラー鏡像および交差点環境のシミュレーションシステムの構築を開始し、2009年度は2008年度までの結果に4.3のような成果を追加した。

4.2 3次元CGソフトを用いた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、テストコース・実路を対象に、3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーション環境・手法を実験的に開発した。シミュレーションの再現性を検証後、典型的な交差点環境におけるミラー設置条件をシミュレーションし、ミラー視認性評価、調整手順の標準化・簡易化に資することを企図した。

2008年度までに構築した3次元CGシミュレーターの概要は以下の通りである。

- (1)市販のPC用の汎用3Dグラフィックエンジン(商品名「Shade」)を用いて、ミラー本体(鏡面・支柱含む)、路面、壁・塀・植栽、電柱等の部品を作成した。
- (2)これらをPC内のシミュレーション空間内に配置して、ミラーの角度調整などを簡単に行えるように操作法を考案した。
- (3)実際にPC内のシミュレーション環境で、ミラーを備えた無信号交差点を作成し、ミラーの位置を変化させることで、非優先側道路のアイポイント(停止線手前で停止した自動車運転者の視点)からどのように優先側の道路・車両等が見えるかを検討した。

2008年度までに、この3次元CGシミュレーターを用いて、(1)JARI実路テストコースで実施したミラー視認性評価実験の実験状況と実験用ミラー視界の再現、(2)ミラー設置交差点のミラー鏡像シミュレーション例として横浜市鶴見区芦穂崎地区の市街地交差点、(3)ミラー未設置交差点の例として横浜市港南区日野交差点などでシミュレーションを行った。その結果、交差点に設置されたミラー反射像を、実際の道路交通状況に合わせて再現でき、ミラー鏡像における視認距離・死角発生状況を含めて鏡面内実鏡像とシミュレーションの一致度が高く、実用化に充分な性能を備えていることを実証した。

以上の研究成果を踏まえて、2009年度は、主として以下に述



図5 水平角が調整できる実験用ミラー



図6 ミラー背面に試験計を当てて俯角を測定する

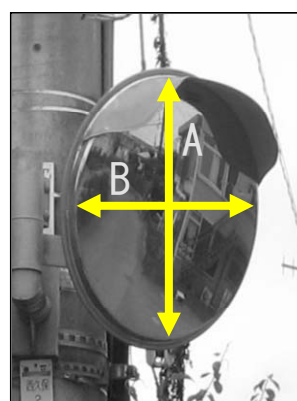


図7 基準位置の延長線上、遠方より撮影したミラー

べる3次元CGシミュレーター研究開発とシミュレーション応用事例の拡充・発展を進めた。

4.3 3次元CGソフトウェアを用いたシミュレーターの構築:

シミュレーション簡便化ツールの開発(入力専用フロントエンドプロセッサ「交差点エディター」)

2008年までの作業では、PC内にシミュレーションを行いたい交差点形状を生成するのにかなりの手間を要した。このため、交差点形状を容易に生成できるようにする入力容易化ツール「交差点エディター」を外注製作した。このツールを交差点形状生成に応用し、効果を検証した(図9)。

従来、1本1本の輪郭線を引きながら交差点全体の形状(幅員、長さ、勾配、交差する道路の中心線同士の食い違い等)を作成していくことに対して、このツールは、図9に示すように、「ガイド図」の案内に従って、交差点中心、交差道路(枝)の数、それぞれの枝の角度、幅員、勾配、枝の長さなどを入力するだけで、シミュレーション空間にそのまま取り込める形式でのデータを生成する。

このツールを用いた結果、従来の入力方法より、「交差点エディター」で作図の方が、作業時間を1/10程度に短縮できた。この「交差点エディター」では、交差点データ生成のうち、①「交差点平面図作成」を容易化するものであるが、①の後に行う、②「柵等を配置し交差点上面図作成」についても作業容易化ができるようにツールの改良が必須である。

このツールはシミュレーション法の簡便化・利便性向上に有効で、機能拡大で迅速・簡便な交差点安全性の検証が可能となる。今後はこの改良も含め、さらに入力容易化を行い、実際のミラー設置組織現場(道路事務所等)での利用も目指す。

4.4 [事例1] 右直事故発生交差点における事故原因分析及と視環境改善シミュレーション

2009年度の研究では、ミラーの設置された実交差点で、ミラー視界が不適切だったために発生したと考えられる事故事例を取り上げ、原因の推定や現地交差点の改善方法を検討した。

4.4.1 研究方法

事故概要：県下茅ヶ崎市西久保の死角ある無信号・ミラー設置T字路で、非優先道路を右折しようとした車が、右方から来た優先道路走行自転車と出会い頭でぶつかる事故(2009年6月)が起きた。自動車運転者はミラーには自転車映っていなかったと証言した。

ミラー設置改善シミュレーション：シミュレーターで交差点環境を再現し(図10)、非優先道路で停止中の乗車視点(EP)から視認距離=60m以上、死角(図10)の三角部分、長さ92m*最大幅3.7mが最小となるミラー設置改善案を作成した。

4.4.2 研究結果および考察

改善案の検討：構築したシミュレーション環境で交差点環境を再現後、事故原因分析及びミラー設置位置・高さ・角度を変動

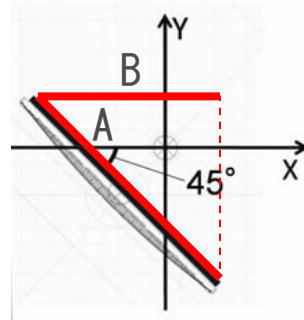


図8 ミラーの水平角の求め方

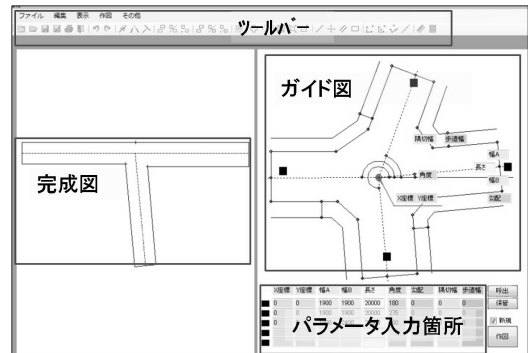


図9 交差点エディター

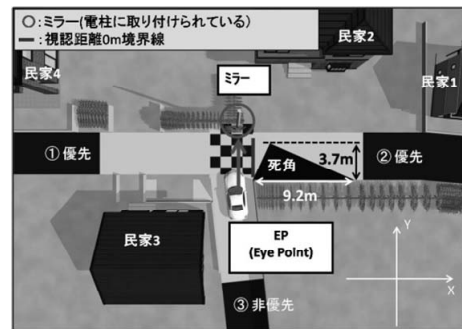


図10 事故発生交差点上面図(無信号T字路、死角あり)

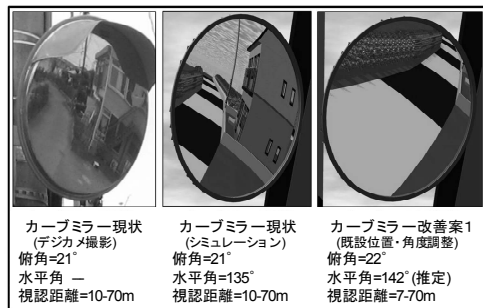


図11 ミラー設置条件の再現と既設位置での改善案シミュレーション

させ、改善案を検討した。既設ミラーでは②優先方向に9.2m死角があり間接視界が不十分である(図10)。改善案としてミラー(ガラスφ600,R=2000mm)位置をx軸方向へ4.3m移動すれば死角を1mに削減でき、間接視界で80mの視認距離が確保できる(図11, 12)。シミュレーション環境を用いることで、現場では容易に実験できない、民家敷地内へのミラー移動の効果を簡単に分析することができた。

道路管理者への提案：当該ミラーを管理する道路管理者(当該交差点のある市役所内)へ改善を提案し、一定の理解を得た(2009年12月)。なお、偶然、調査後に直接・間接視界の死角要因となる生垣と家屋が撤去されて駐車場に変わったため、死角は解消し、問題となっていた状況が改善された。

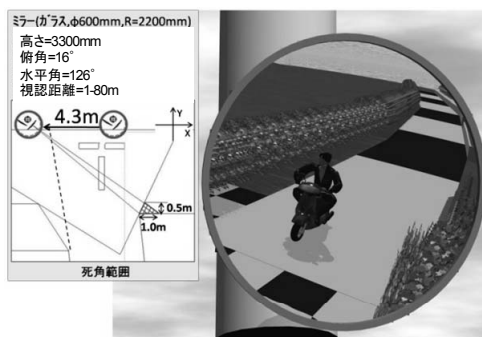


図12 ミラー設置最適改善案シミュレーション
(既設位置からx軸4.3m移動 白黒スケール:道路10m, 交差点内1m)

4.5 [事例2] 典型的な生活道路交差点におけるミラー視認性評価シミュレーション：道路幅員、設置位置、等の効果

前述の3次元CGシミュレーション手法を用いて、市街地交差点における非優先道路運転者からみたミラー視認性について、道路環境や設置諸元を系統的に変化させて評価し、安全視界の確保に影響を及ぼす要因を検証するとともに、適切なミラー設置条件の検討を行った⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。以下に、その一端を紹介する。

4.5.1 研究方法

(1)生活道路交差点におけるカーブミラー視認性評価

3次元CGシミュレーション手法より典型的な生活道路交差点環境をPC上に再現し(図13)、非優先道路の乗用車運転者視点(EP:路面高1200mm)からみた視認性が最大となるミラー設置最適解を検証した。ミラー設置最適解とは、鏡像で交差路右方の安全視距離(境界線から60m以上:50km/h走行の優先車発見後、非優先車が衝突回避可能な距離)が確保でき、かつ交差点直近の死角(図13のBD距離)が最小となる条件とした。

(2)ミラー鏡像の視認性評価：道路幅員の検討

非優先道路幅員3条件(4,5,6m)、優先道路幅員5条件(6,7,8,9,10m)を組み合わせた計15条件の交差点で、交差路右方視界確保のため左コーナー角地Mに設置するミラー(800φmm, R=3000mm, ミラー鏡面下端高=2.5m)の設置最適解(俯角・水平角, 最大視認距離, 交差点直近死角距離)を求めた(図13)。

(3)ミラー鏡像の視認性評価：水平位置の検討

次に、非優先道路4m×優先道路6mの交差点を対象に、隅切りのない左コーナー角地Mを原点とし、x軸方向4条件(+1, 0, -1, -2m), y軸方向3条件(+1, 0, -1m)を組み合わせた計12地点におけるミラー設置最適解(俯角・水平角, 最大視認距離, 交差点直近死角距離)を求めた(図13)。

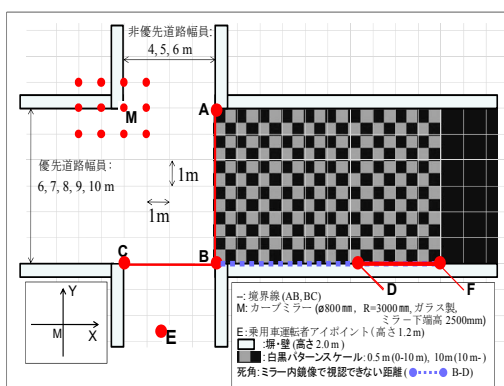


図13 3次元CGシミュレーションによる生活道路交差点ミラー視認性の評価方法

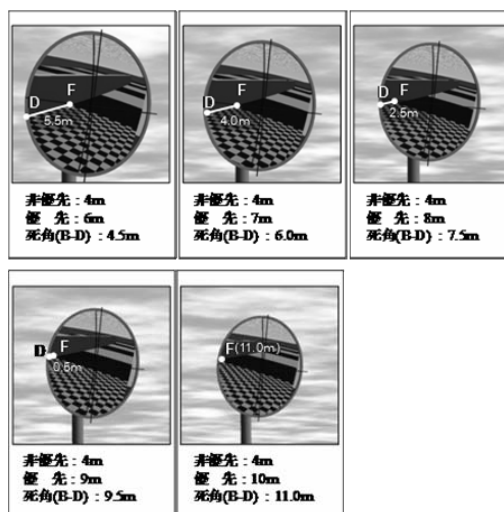


図14 3次元CGシミュレーションによる評価：ミラー鏡像と道路幅員の関係

4.5.2 研究結果および考察

(1)ミラー視認性評価と設置最適解シミュレーション：優先／

非優先道路幅員の検討

交差点右方60mの視認距離確保を必須条件とすると、交差点直近の死角量は優先道路幅に比例して増加し、非優先道路幅に反比例して減少する。15条件中、ミラー内死角の最小値は2.5m(非優先6m×優先6m)、最大値は11.0m(非優先4m×優先10m)で、死角0になる条件はなかった(図14, 図15)。直接視界が不良の交差点では、自転車・バイク全長が直近の死角2.5mに入り、発見できない危険性がある。また、12条件で小型乗用車全長(4.7m)が隠れる死角があり、ミラーのみで直近の視界を確保することは困難である(図14, 図15)。

(2) ミラー視認性評価と最適設置解シミュレーション：ミラー

水平設置位置の検討

交差点直近の死角量は、ミラー位置をx軸y軸共にマイナス方向に移動すると減少することがわかった(図16, 図17)。また、左コーナー12地点における死角最小値は1.5m、最大値は7mで、死角0の条件はなかった。交差点境界線上の非優先方向乗用車EPからみたミラー最適設置位置は、角地Mからx軸-2m(左端)、y軸-1m(近方)地点であった。

(3) 交差点直接視界シミュレーション：ミラー鏡像最適案と直

接視認性のトレードオフ

交差点隅切りや歩道がなく、かつ横断歩道や停止線位置によっては境界線から10m程度手前でミラー確認が必要となる交差点もある。そのような環境では、左方の直接視界が不十分で、(2)で検討した最適位置のミラーを直接視認できず、ミラー設置位置に制約が生じることが明らかになった。

以上、適切なミラー設置条件は狭い範囲に分布し、交差点環境・ミラー諸元等のシミュレーションに基づく分析と事前の十分な設置法検討が重要とわかった。

(4) まとめ

交差点環境・ミラー位置とミラー鏡像の関係の系統的分析により、交差点視認距離、死角発生への影響、安全視界確保上重要な要因などが明らかになった。3次元CGシミュレーション法の活用により、ミラー設置最適案を机上で検討できるばかりでなく、交差点視環境改善や危険要因の検討幅を拡大・効率化でき、ミラー設置最適化や直接/ミラー間接視界の確保により、出会い頭事故削減に有効であることが確認できた。

また、ミラー設置・点検改修にあたって、本知見をベースにすれば、設置現場と道路環境が類似したケースを参照して設置条件を絞り込み、複数の設置方法を詳細にわたって検討するなど、毎回最初からシミュレーションを行う必要がなく、効率的かつ精度の高い設置案の計画が可能になる。これにより、安全視認距離の確保、交差車両の早期発見を保証し、フィージビリティの高いミラー設置最適解を導くことが可能になる。

シミュレーション法のさらなる簡便化・利便性の向上、直接/間接視界の死角解消条件の検討などが今後の課題である。

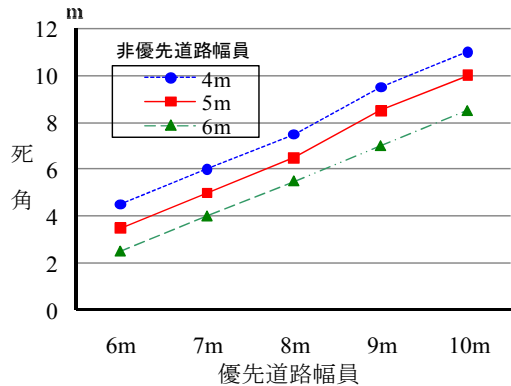


図15 ミラー鏡像と道路幅員の関係：
シミュレーション鏡像における死角量分布

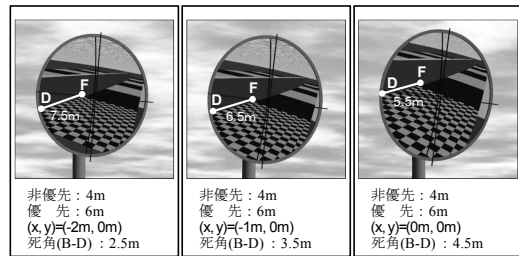


図16 3DCGシミュレーションによる評価：
ミラー鏡像と設置位置の関係

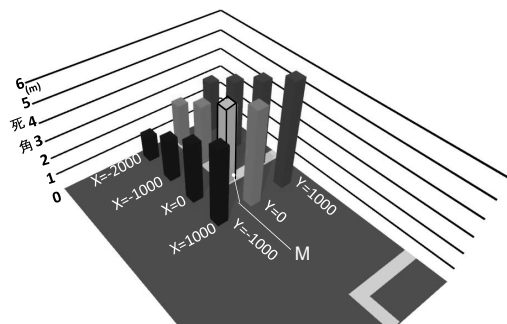


図17 ミラー鏡像と水平位置の関係：
シミュレーション鏡像における死角量分布

4.6 [事例 4]ミラー角度微調整と鏡像変化の系統的シミュレーション：ミラー角度変化による鏡像マトリクスの作成とミラー設置最適化への活用

4.6.1 研究方法

前述のように、ミラーのシミュレーションがミラー設置の現場でも容易に実施できるようにしなければならず、現在はまだ実現できない。そこで、シミュレーションの結果を現場で容易に役立てることができるように、図18のような「鏡像マトリクス」を作成した。この鏡像マトリクスは、標準的な十字路に設置されたミラーについて、最適な水平角・俯角のものを中心に、角

水平角 俯角	-9°	-6°	-3°	最適解	+3°	+6°	+9°
-9°	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=40-80m ●死角=10m	 ●視認距離=60-80m ●死角=10m
-6°	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=9.5m	 ●視認距離=0m ●死角=8.0m	 ●視認距離=0m ●死角=9.5m	 ●視認距離=30-80m ●死角=10m	 ●視認距離=20-80m ●死角=10m	 ●視認距離=20-80m ●死角=10m
-3°	 ●視認距離=0m ●死角=2.5m	 ●視認距離=0m ●死角=3.5m	 ●視認距離=0m ●死角=3.0m	 ●視認距離=50-80m ●死角=6.5m以上	 ●視認距離=10-80m ●死角=9.0m	 ●視認距離=10-80m ●死角=10m	 ●視認距離=20-80m ●死角=10m
最適解	 ●視認距離=0m ●死角=1.0m	 ●視認距離=0m ●死角=2.0m	 ●視認距離=0m ●死角=3.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=4.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=7.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=10m	 ●視認距離=10-80m ●死角=10m
+3°	 ●視認距離=0m ●死角=0.5m以上	 ●視認距離=0m ●死角=1.5m	 ●視認距離=0m ●死角=2.5m	 ●視認距離=10-40m ●死角=4.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=9.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=10m	 ●視認距離=10-70m ●死角=10m
+6°	 ●視認距離=0m ●死角=0m	 ●視認距離=0m ●死角=1.0m	 ●視認距離=0m ●死角=2.5m	 ●視認距離=10-20m ●死角=4.0m	 ●視認距離=10-80m ●死角=6.5m	 ●視認距離=10-80m ●死角=10m	 ●視認距離=20-80m ●死角=10m
+9°	 ●視認距離=0m ●死角=0m	 ●視認距離=0m ●死角=1.0m	 ●視認距離=0m ●死角=2.5m	 ●視認距離=0m ●死角=4.5m	 ●視認距離=10-20m ●死角=8.0m	 ●視認距離=0m ●死角=10m	 ●視認距離=0m ●死角=10m

図18 3次元CGシミュレーションに基づく鏡像マトリクス

度を左右・上下へわずかずつ変化させながら、鏡像の映り方がどのように変化するかを表したものである。

4.6.2 研究結果および考察

この鏡像マトリクスを、実際に調整しようとしている交差点ミラーの鏡像と照合して、現状で最も近い状況の図と、中心にある「最適」な図との水平角・俯角の差を読み取って、実際の調整の補助とすることを検討した。

本年度研究では、実際のミラー設置または調整に、この鏡像マトリクスを用いてはいたが、本研究で構築したシミュレーション環境では、このような、他の手法では非常に手間のかかる改善案も容易に作成でき、鏡像マトリクスの作成は、本研究の有効性を示すよい例といえる。

5. [課題3] ミラー視認性評価、ミラー設置条件の体系的整理：ミラー設置・調整用マニュアル開発に向けた指針の導出

本研究では、2008年度から引き続き、現場で短時間で調整出来るミラー位置決め、設置角度測定・調整簡便法と標準化手順の基礎的部分を開発・検討し、マニュアルの骨子の整備を進め

てきた。今後の研究発展として、以下のような研究課題が考えられる。

(1) ミラー視認性、ミラー設置条件の体系的整理

道路幅員・勾配・カーブなどによる視景境の変化、良好な視環境を得るための必要条件などの体系的整理と実施容易なミラー設置基準策定、などを引き続き行う。また、交差点における直接視界とミラーによる間接視界の相補性、連続性確保(隅切り・妨害物効果)について、さらに検討を進める。

(2) 平易なミラー設置マニュアルに対する指針の導出

上記にあるように、今後さらに、ミラー設置者(道路管理者等)が設置ミラーの点検や新設の際、平易に利用できるようなマニュアルを構成できるように、マニュアル内容の指針を検討する。

6. まとめ

本年度の研究では、フィールド研究として、実ミラーを用いた視認性評価とミラー設置・調整方法の検討を行った。また、交差点の視景境を正確に再現するシミュレーション環境を構築し、これを用いて、実際の事故発生交差点の視景境改善提案や、

ミラー設置位置の定量評価、実験にも使えるようなマニュアルの素材（鏡像マトリクス）の作成などを行った。さらに、このシミュレーション環境への入力容易化のために、「交差点エディター」というツールを作成した。

この結果、交差点の視環境については、その良しあしを左右する要素が定量的に明らかになり、良好な視界・視認性を確保するミラーの設置条件を検討する基礎的知見、特に良好な補助視界を得るために有効な交差点ミラーの指針が得られた。

これらの成果により、ミラー視認性評価実験やミラー視認性シミュレーション、実交差点でのミラー評価、ミラー設置現場への応用などを系統的に展開する基礎技術が得られた。

今後は、さらに、国・県等の行政組織と働きかけてミラーの間接視界不良による出会い頭事故の低減を図りたい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、人間工学研究室所属の卒業研究生であった、狩野裕二、笹山博樹、廣田祐子、杉山洋紀、小野雅史、福永佳洋、渡邊修平、西村洋、野口絵理香、稲村和也、吉川一茂の各氏にフィールド研究、3次元CGシミュレーションなどの実施に熱心な協力を得た。さらに、国土交通省道路局地方道・環境課、関東地方整備局、警察庁、神奈川県警察、横浜市道路局、同鶴見土木事務所、同港南土木事務所、川崎市道路整備課、(社)全国道路標識表示業協会、道路反射鏡協会、(財)日本自動車研究所、(独)国土技術政策総合研究所、横浜市港南区日野自治会の各氏に多大の助言やご協力を得た。心からの謝意を表すものである。

参考文献

- (1) 警察庁交通局交通企画課，“平成21年度中の交通事故死者数について”，<http://www.npa.go.jp/toukei/kouki/> (2010-2)。
- (2) M. Mori, S. Horino, S. Kitajima, M. Ueyama, T. Ebara, T. Itani, “Ergonomics solution for crossing collisions based on a field assessment of the visual environment at urban intersections in Japan”, *Applied Ergonomics* 39, (2008-8), pp. 697-709.
- (3) M. Mori, S. Horino, Y. Inomata, H. Sasayama, Y. Hirota, “Low-cost and low-technology oriented improvement of visual environment at intersections by ergonomic installation of traffic convex mirrors for preventive safety against crossing collisions”, *Proceedings of the 10th*

Korea-Japan Joint Symposium on Ergonomics, CD-ROM, (2007-5).

- (4) 堀野定雄, 森みどり, 狩野裕二, 笹山博樹, 廣田祐子, “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.
- (5) (社)日本道路協会, “道路反射鏡設置指針”, 丸善出版, (1980)。
- (6) 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)。
- (7) 堀野定雄, 森みどり, 久保登, 北島創, 平成19年度神奈川大学工学研究所共同研究中間報告 “出会い頭事故未然防止の研究—交差点ミラー視認性評価と再設計マニュアル開発—”, *神奈川大学工学研究所研報*, 第31巻, (2008-11), pp.78-84.
- (8) 堀野定雄, 森みどり, 久保登, 北島創, “出会い頭事故未然防止の研究—交差点ミラー視認性評価と再設計マニュアル開発—”, *神奈川大学工学研究所研報*, 第32巻, (2009-12), pp. 77-83.
- (9) M. Mori, S. Horino, N. Kubo, S. Kitajima, “Ergonomics proposal for visibility requirements at urban intersections in Japan for preventing frequent crossing collisions”, *Proceedings of the Applied Human Factors and Ergonomics 2nd International Conference, CD-ROM (2008-7).*
- (10) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, 福永佳洋, 渡邊修平, “市街地無信号交差点における視環境評価と出会い頭事故防止”, *日本人間工学会誌*第45巻特別号, (2009-6), pp.286-287.
- (11) 久保登, 森みどり, 堀野定雄, “鏡像シミュレーションによる交差点ミラー視認性向上のための設置条件検討”, *日本機械学会論文集C編*, 第76巻第768号, (2010-8), pp.2154-2159.
- (12) M. Mori, S. Horino, N. Kubo, “Ergonomics study on the visual environment at urban uncontrolled intersections based on visibility simulation approach applying 3-Dimensional computer graphics software”, In: W. Karwowski and G. Salvendy (Eds), *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries*, CRC Press/Taylor & Francis, Ltd., (2010-7), pp. 873-882.
- (13) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, 西村洋, 野口絵理香, “3DCGシミュレーション法による交差点ミラーの視認性評価”, *日本人間工学会誌*第46巻特別号, (2010-6), pp.344-345.
- (14) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, “3DCGシミュレーションによる交差点視環境評価—運転者視点の比較—”, *人類動態学会会報*No.92, (2010-6), pp.30.



植物も週末はお休み —環境に及ぼす人間活動の影響—

白井 達也*

Plants also stop Product Activities over the Weekend

like Human

— The Influence of Human Activities to the Environment —

Tatsuya SHIRAI*

概要

梅と桜の開花日、公孫樹の黄葉日、楓の紅葉日の曜日分布を調べた。その結果、梅と桜の開花日には、人間活動の影響があることが分かった。

1. はじめに

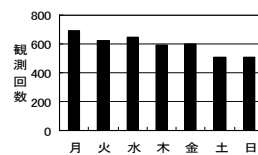
近年、地球が温暖化していることは多数の人々が認めている¹⁾。しかし、温暖化は人間活動の影響によるものか、自然現象なのかということに関しては全員が合意しているわけではない。

ここでは、人間活動が植物に与える影響を知るために、日本における梅と桜の開花日、公孫樹の黄葉日、楓の紅葉日の曜日分布を調べた。

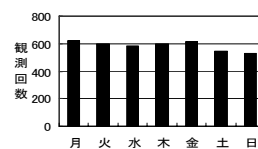
2. データ解析

日本の気象庁は、1953年から2007年までの55年間の生物季節観測累年値を公表している²⁾。その中から梅と桜(染井吉野)の開花日、公孫樹の黄葉日、楓の紅葉日の観測値を利用した。観測値の内訳は表1のようである。

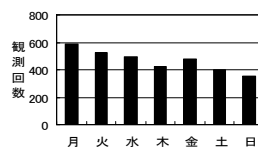
これらの事象が起こった日の曜日の度数分布を図1に示す。



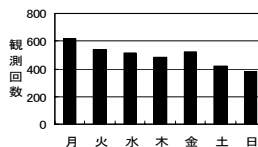
(a) 梅の開花日



(b) 桜(染井吉野)の開花日



(c) 公孫樹の黄葉日



(d) 楓の紅葉日

図1 曜日の分布

これらの図を見ると、どれも土曜日と日曜日の観測数が少ない。そこで、曜日分布の一様性について χ^2 検定を行った。表1にその結果を示す。

*教授 物理学教室
Professor, Institute of Physics

表1 一様分布のチェック

	植物名	観測地点数	観測総数		平均値		e %	χ^2		分布の 一様性
			N	N ₀	n	n ₀		値	自由度	
A	梅	87	4181		597.3			38.59	6	×
	桜	76	4089		584.1			13.02	6	×
	公孫樹	82	3260		465.7			79.98	6	×
	楓	89	3482		497.4			73.14	6	×
B	梅	87	2316	1865	579.0	621.7	-6.9	5.23	1	×
	桜	76	2307	1782	576.8	594.0	-2.9	0.87	1	○
	公孫樹	82	1822	1438	455.5	479.3	-5.0	2.09	1	○
	楓	89	1945	1537	486.3	512.3	-5.1	2.35	1	○
C	梅	87	1297	1865	648.5	621.7	4.3	1.37	1	○
	桜	76	1236	1782	618.0	594.0	4.0	1.15	1	○
	公孫樹	82	1067	1438	533.5	479.3	11.3	7.03	1	×
	楓	89	1143	1537	571.5	512.3	11.5	7.84	1	×
D	梅	87	1019	1867	509.5	621.7	-18.0	26.18	1	×
	桜	76	1071	1782	535.5	594.0	-9.8	7.20	1	×
	公孫樹	82	755	1438	377.5	479.3	-21.2	28.37	1	×
	楓	89	802	1537	401.0	512.3	-21.7	31.80	1	×

表1の記号は以下のことを表す。

A: 月、火、水、木、金、土、日の7組に対する検定

B: 月、金、土、日の総数と火、水、木の総数の2組に対する検定

C: 月、金の総数と火、水、木の総数の2組に対する検定

D: 土、日の総数と火、水、木の総数の2組に対する検定

N₀: 火、水、木、の観測総数

N: 月、金、土、日又は、月、金、又は、土、日の観測総数

n₀: 火、水、木の曜日当たりの観測数の平均値

n: 月、金、土、日又は月、金又は、土、日の曜日当たりの観測数の平均値

e: $\frac{n-n_0}{n_0} \times 100$

○: 検定の有意水準が5%で一様性を否定できない

×: 検定の有意水準が5%で一様性を否定できる

表1より、図1のどれもが検定の有意水準が5%で一様分布でないことが分かる。

3. データの吟味

観測値が一様分布でないことは分かった。しかし、事象の本当の分布が一様であっても、見かけ上、土曜日と日曜日の観測数が少なくなることもある。その理由として、次のようなことが考えられる。

- (1) 閏年があるため、1953年から2007年の間の同月同日に出現する曜日の数にバラツキがある。例えば、1月1日には、火曜日7回、月、水、木、金、土、日はそれぞれ8回出現する。
- (2) 幾つかの地点の観測が55年間連続して行われていなくて、欠損がある。
- (3) 観測者の怠慢により、土曜日と日曜日に観測しなかったことがある。

(1)について考えるために、事象が起こった日を基準日(例えば1月1日)から数えた日数で表示する。これを観測日、ある地点での各年の観測日の平均値を平均日と名づける。日本列島は南北に長いので、各地点での平均日は異なっており、最大値と最小値で30日以上差がある。また、同一地点での観測日も年によってばらついている。このばらつきの標準偏差は、桜では約5日であり、他はそれよりも大きい。

この二つの理由により、(1)の影響は無視できる。

(2)についても、地点ごとに事象の平均日と観測欠損年が異なるので、この影響も無視できる。念のため、観測回数が55回(桜、観測欠損なし)、50回以上(梅)と45回以上(公孫樹、楓)の地点のデータのみでも解析したが、表1の結果と矛盾しなかった。

(3)の場合には、土曜日と日曜日に起こった事象の一部は金曜日又は月曜日に観測されたと記録されるであろう。そうであるならば、以下の事が予想される。

- (ア) 月、金、土、日の観測総数と火、水、木の観測総数は一様分布と合致する(表1のB参照)。
- (イ) 月、金の総数と火、水、木の総数は一様分布に合致しない(表1のC参照)。
- (ウ) 土、日の総数と火、水、木の総数は一様分布に合致しない(表1のD参照)。
- (エ) 表1の e の値はBはほぼゼロ、Cは正、Dは負で、CとDの絶対値はほぼ同じ大きさになる。

以上の観点から表1を眺めてみると、梅の開花日は(3)の影響を考慮しても、本当の分布は一様ではない。桜の開花日は、梅ほど明らかではないが、一様分布ではない可能性は大きい。公孫樹と楓については(3)の影響が大きく、一様分布と矛盾しないが、一様分布でないことも否定されない。

4. 結論

以上のように、梅と桜の開花日は、土曜日と日曜日が少ない可能性が大きいことが分かった。

ところで、曜日というものは人間による取り決めであり、植物は知ることができない。それにもかかわらず土曜日と月曜日の開花日が少ないということは、人間活動が環境に変化を及ぼし、その変化が植物に影響を及ぼしていると考えざるを得ない。

何の変化が、植物に影響を与えているかということは今の時点では分からない。しかし、梅や桜のつぼみの成長が気温に大きく左右されることを考えれば、開花日も気温の影響を受けている可能性は大きい。

謝辞

この論文のために、多くの数値計算を行った。これらの大部分は物理学教室の井上道晴さんと長谷川満さんに行っていた。ここに心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 例えば、国連の気候変動に関する政府間パネル、"Climate Change 2007: The Physical Science Basis", Cambridge U. Press, New York(2007)
- (2) 日本気象庁、"生物季節観測値"、(財)気象業務支援センター (2009)

受理日 2009年9月3日



神奈川大学とともに過ごした日々

寺尾 道仁*

On the days I spent with Kanagawa university

Michihito TERAO*

はじめに

私は1977年4月に神奈川大学に赴任した。当時、定年まで気が遠くなるほど永い居場所と感じられた大学もあと半年で去らなければならぬ時期が来た。後述するが、その最後の年度になって不覚にも脳に大怪我を負って入院してしまった。この原稿依頼を受けたのは退院後の9月下旬である。すでに国際誌に投稿を約束した論文の原稿作成が期限ぎりぎりになっている。また、定年に際して様々な後片付けにも迫られているが、まるで進捗していない。この随想については、その原稿締め切り期限に間に合わせることが不可能と判断してお断りしたが、1ページでもと請われて不本意ながらお引き受けした次第である。

新任教員のころ

神奈川大学は、首都圏でも若者に人気が高い横浜に立地し、そのキャンパスも往時の人気建築家山口文象の作品として建築界で注目を浴びていた。私学にあっては研究環境も高水準にあり、お誘いいただいたときにはほとんど二つ返事で身を委ねることにした。私が現在居場所としている研究室は、その作品の中でもとくに傑作とされる6号館(旧図書館)にあり、しかもその館長室である。宿命的なものを感じる。

東大安田講堂の攻防に象徴されるごとく全国で吹荒れた大学紛争も、私の本学就任の頃にはようやく沈静化しつつあった。しかし、神奈川大学は全共闘の最後の大学拠点として、青ヘル・竹槍集団が闊歩していた。現20号館の敷地にあった鉄筋コンクリート5階建の学生寮を占拠し、夜間はその屋上の投光ランプを煌煌と照らして

城砦化していた。大学側も大変な混乱状態にあり、年も暮れる頃になって「助教授のポスト(お誘いいただいた条件)が用意できなくなった。そこで1年間だけ助手のポストで我慢してくれないか」との話になってしまった。すでに他の大学の誘いも断ってしまっており、これを受け入れざるを得なかった。恥を晒すようで通例の転職挨拶・通知もできなかった。

着任して夏季は卒研の実験準備や夏季後半に集中する所属学会の年次研究発表会のプレゼン準備などに忙殺された。卒研生との協働や電算機との関係で大学(研究室)を中心に据えた活動パターンをとらざるを得ず、コンクリートで冷房がない室で裸で仕事する羽目になった。これまで長く冷房完備の施設で研究活動を続けてきた人間にとっては辛かった。

入試の時期になると、入試粉砕を叫ぶ活動家の破壊活動から入試試験会場を守るために夜を徹して警備に当たらざるを得なくなった。見廻り時は防寒具をまともにも凍え、暖房もない部屋で寒さに耐えて夜を明かした。とんでもない大学に身をおいてしまったものだ。正直、そのときは長居できる大学ではないと感じた。

それが34年も在籍する結果になった。研究スペースと学生に恵まれたこと、補助職員を採用して責任が発生してしまったこと、研究施設・機器予算が採択され、それを使った成果を挙げなければならなくなったこと、などがある。

研究活動

研究内容 着任したばかりの頃は、音・光環境、温熱空気環境、空気調和・換気設備など建築環境工学および建築設備分野の研究を手広く行っていた。VAV空気調和システム、換気量の現場測定法などに関する研究、とくに工場建築の環境については、全国各地の鍛造工場や自動

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

車塗装・修理工場などを実測して回り、これと 1/10 縮尺模型実験や数値解析による改善提案づくりなどに力を注いだ。その中で常に疑問が残る分野が騒音制御であり、次第に音環境に関する研究が中心になった。

その研究における独自のツールとしては、部分領域化境界要素数値解析および 2 マイクロホン位置ダクト内音響計測手法が挙げられる。いずれもデジタル信号処理技術の発展によって現実化した手法であり、現在では市販されるまでに普及したが、そのパイオニアとしての一端を担ったといえる。それは打出の小槌とも言え、以下のように多様な研究が展開された。

「ダクト要素の音響特性」に関して、エルボ、分岐等の低次数モード音響特性、ペーン類や繊維質材料を含む消音装置、共鳴器によるダクト内透過音の低減原理とチューニング手法、窓および換気開口の遮音特性など、「繊維質材料の固有音響特性」に関して、インピーダンスチューブ内試料前後各 2 マイクによる測定法、斜入射吸音率のダクト内測定法など、「壁面粘性・熱伝導音響消散」について、数値解析への粘性・熱伝導アドミタンス行列の導入、音圧・粒子速度分布が一般音場における減衰係数、「音源の音響放射」に関して、送風機の 2 ポートモデルによる固有音響特性（受動特性および駆動力特性）の同定、ダンプ類の気流音発生メカニズムの解明など、「FFT と DSP を活用した仮想現実シミュレーション技術」については、チャープ信号など特殊信号を使ったインパルス応答計測法、その応用による歌舞伎座や芝居小屋の音場保存など、がある。

学会活動 研究活動の場とした主要な学会は日本建築学会、空気調和衛生工学会、日本音響学会、日本騒音制御工学会、米音響学会、INCE (International institute of Noise Control Engineering) などである。その中で日本音響学会、日本騒音制御工学会、INCE などでは、理事、評議員などとして学会運営にも参画するようになった。

日本音響学会および日本騒音制御工学会では、この約 20 年間、年次大会研究発表会において継続的にセッション座長担当などダクト音響分野を任せられ、同時期に開催される空気調和衛生工学会には参加できず、学会賞を戴いたにもかかわらず次第に疎遠になってしまった。日本音響学会では、ポスター賞顕彰委員会委員長 (1999-2003)、学術会議工学共通基盤研究委員会委員長 (2003-06) など、日本騒音制御工学会では、北米・欧州騒音研究機関視察団団長 (1988, 92, 93 年)、編集部会会長 (1992-94)、出版委員会委員長 (1995-97)、出版事業委員会委員長 (2000-02) などを務めた。以下にその一端を述べる

日本騒音制御工学会では、私が出版委員会委員長の時期に学会をあげてハンドブック出版に取り組むことになり、その編集委員長に指名された。百余名にのぼる著者をまとめて B5 版 1300 ページのハンドブックを上梓した時、その企画から約 6 年間経緯していた。それは日常業務の合間を見て行うことになるから、この間、休日らしい休日は全く取れなかった。企画段階で中核的に参画していた編集委員も勝手気ままな注文をさせていただいたら居なくなってしまい、校正段階になると出版社にたいして逃げるに逃げられない立場の私だけになっていた。この仕事の達成により騒音制御工学会功労賞 (2005) を受賞することになったのがせめての慰めといえる。

横浜は、中華街やみなとみらい地区など新旧多様な文化、また、国際会議場やホテルなどの施設に恵まれ、ここでの学会開催の要請が多い。私も日本音響学会年次大会研究発表会 (1986 年, 2002 年)、国際会議 Inter-noise 94 (1994 年)、日本騒音制御工学会年次大会研究発表会 (1995 年) などの本学や横浜地区での開催に漕ぎ着け、その実行委員長を務めるなど中核的役割を果たした。

国際会議など 1980 年代に入ると、わが国からも国際会議への参加が容易になり、国際会議で評価されないとい国内でも評価されない風潮になった。私も 1984 年から毎年、国際会議に参加、研究発表をして著名な先生方とお付き合いさせていただくことになった。L. Beranek, U. Ingard, 故 M. J. Lighthill, A. Pierce ら錚々たる先生方とごく親しく言葉を交わすこともできた。今年のノーベル化学賞で話題になった Purdue 大学の招聘を受け、その客員研究員 (1989 年 7-9 月) として共同研究を実施する機会を得たのもそのような縁の一つである。

1994 年からはチェアマンやセッション・コーディネーターの役割が回ってきた。Inter-noise2006 (イスタンブール) の Call for Paper パンフレットには日本の著名大学の 2 先生と並ぶ代表者 (International advisory committee 委員) として名を連ねる栄誉を得た。また、ISO/TC43/SC2 (Building Acoustics) 委員 (1994-96) として ISO 規格の原案作成に参画し、ISO 10534 (1998) については、その理論記述を担当した。これは後に翻訳 JIS 化 (JIS A 1405:2007) され、そこでは (財) 建材試験センター-JIS1405 原案作成委員会主査 (2004-06) として主導的責務を担った。

教育活動

研究室の運営 学会業務などで多忙を極めたが、学生との触れ合いに手を抜くことはしないように努力してきた。ゼミ学生に対して用意した恒例行事には、夏と冬のゼミ

旅行, 秋の研究室歓迎会と忘年会, 春の慰労会などである。

卒研指導 私の研究室からは, 優秀卒研賞を受賞する学生の比率も高く, 社会的に活躍する卒業生を多数輩出している。卒研では自主性を重視し, テーマ決定は各自の責任で行う。気にはなっても手助けはぎりぎりまで我慢することを心がけてきた。それが達成感を高め, 卒業後の自信に繋がると考えたからである。

ゼミ合宿 新任早々の研究室には卒研の学生が6名いた。その一人の発案で, 夏休み新穂高温泉露天風呂で一泊した後, ロープウェイを利用して西穂山荘で一泊することになった。山荘に到着して一息入れると, 西岳に向けて散策しようということになった。その往路, 雲海の中, 北アルプスの稜線をホイホイと心も軽く飛び歩いて行った。そして帰路, 雲海が引け晴れ間が見えると遙か谷まで急峻な断崖絶壁, それと知らずに飛び跳ねて歩行していたのだ。ゾー。岩にしがみ付きながらの帰途となった。西穂山荘の夜の寒さ・せんべい布団とともに忘れられない思い出である。

その後, ゼミ旅行として夏は高原(ハイキング), 冬は雪山(スキー)が恒例行事となった。その狙いは学生に神奈川大学の学生時代の豊かな体験や思い出を持たせたかったこと, 学生と最前線で向き合うのが卒研の指導教員であり, その責務であると考えたからである。冬のゼミ旅行はバブル景気が崩壊した2000年頃まで続いた。夏合宿は, 富士見高原に大学の研修所が開設してからは, 専らこれを利用(学生の経済的負担軽減)して長続きしている。

3D-CAD 教育 1980年代に入ると建築界でも汎用CADソフト活用の機運が高まり, 1990年代には3D-CADソフトによる設計は当たり前, 写真顔負けの建築提案プレゼンによる受注競争が始まった。そこで本学学生にもそのような時代への対応に必要な教育環境を用意することにした。1995年18号館18-11室をフリーアクセス・フロア化してコンピュータ電源・イーサネットケーブルを敷設し工学部共通のPC利用室に改造した。3D-CADソフトおよびPCは80台を大学で用意し, 残る履修希望学生には自己購入する意欲ある学生を受講対象者として授業を開始した。その後, 設計・施工・運用における急速な電子化の波を受けて受講希望者が多くなり, 2001年23号館23-109室および23-111室に移転した。このような高度なCAD教育は, その指導およびハード・ソフトを導入・指導・運用できる教員が存在して初めて可能であるため, それが実施されている大学は全国的に極めて少なく, CAD教育を本建築学科の特色と

して志願してくる受験生も多い。

設備設計一級建築士への挑戦 2018年の建築士法改正において, 一級建築士でかつ構造設計と設備設計に責任をもつことができる専門家資格が誕生した。実務的内容の比重が大きい教育の担当者として無資格では気持ちが悪い。そこで定年間際の老骨に鞭打って設備設計一級建築士の試験に挑戦することにした。このような姿勢を学生に見せるため, その覚悟を公言して自らの逃げ場を塞いだ。そして首尾よく合格した。

委員会・大学運営など

工学部および大学院工学研究科に関係する委員会としては, 建築学科主任, 人事委員会, 教育委員会, 研究委員会, 工学研究所運営委員会, 大学院学務委員会, 工学研究科運営委員会, 工学研究科人事委員会など, また, 全学委員会としては, 国際交流委員会, 学生部委員会, 広報委員会などの委員として働いてきた。以下に特筆すべき役割について述べる。

情報処理センター所長 副所長(1993-95)を経て所長(1995-99年)を拝命した。当時, 本学情報処理センターは3億円に近い予算規模があり, その半額が文部省関係の補助金で助成されていた。(社)私立大学情報教育協会(私情協)は文部省の情報処理機器関連予算の配分に一定の権限があるとされ, 私は本学の代表者としてその委員会活動に協力せざるを得なかった。その関係で私は情報処理センター所長の任を解かれた今も私情協の委員会から開放していただけない。

当時, 大学や研究機関の研究者の間ではインターネット(情報ケーブルやルーター)を利用したe-mailやデータ通信が急速に普及しつつあった。工学部としては, 大型計算機相互利用を中心とした大学間電子データ通信への参画・利用は不可欠であり, これを情報処理センターのみならず直接各研究室からアクセス可能にしたいとの要請があった。図書館も全国図書館電子通信ネットワークへの対応(紙カード検索から電子端末検索など)に迫られていた。情報処理センター運営委員会では, 本学でも将来的にみて全学一体運用のインターネットインフラ整備が必要であるとする推進派にたいし, フロッピーデスクで十分とする反対派が根強く存在した。個別の要請に応じて通信回線の接続を行う, 個別乱立型のインフラになりかねなかった。そこで大型数値計算は東大はじめ全国大学大型計算機相互利用機関のメインフレームに委ね, 本学としてはそれを利用するデータ通信インフラ(後のインターネットインフラ)を構築すると同時にPC教育環境の大幅な増設を図る方向に進めた。しかし,

その予算措置に関しては理事会側の理解を得るに至らず、情報処理センターとしてメインフレームに代えることにより捻出せざるを得なかった。その後、インターネットはブラウザ(当時はMosaic, 現在のIE, Google Chromeなど)を含めて画像情報の送受信が現実化すると爆発的に発展の勢いを高め、現在、e-mailやホームページ開設等の基幹インフラとして機能しており、当時としては適切な判断であったと考えている。

図書館館長 館長(2000-2001)の候補者として私の名が挙がったときには、図書館はその事務組織も確立しており気楽な家業と高をくくっていた。ところが実際に担当してみると、図書館運営委員会、学術情報委員会を主催するほか、総合メディア委員会、総合学術推進委員会、教学改革委員会、評議会、大学点検評価委員会、また、国際交流その他の図書館への来訪者対応や様々な懇親会などに参画を求められる。そこでの提案等を受けて多大な業務が発生する。それを教育研究活動と同時にこなしていかなければならない。教学の意思決定にかかわる重要な職務であることを思い知らされた。

規定化まで漕ぎ着け得た課題は、日常業務に関するものの他、リポジトリの実施、平塚図書室に関する室から館への改正などである。心残りは、蔵書スペースの逼迫への対応、また、それに関連してラーニングコモンズに象徴される「学生の居場所づくり」を提案書として確立できなかったことである。

本学は名建築として名高い旧図書館(現6号館)をみても、現状は見るも無残、無粋で垢汚れた配管だらけ、美観に鈍感な本学施設課とその取巻き。専門学校の際困気から脱皮できない。ここ数年で競合他大学には、駅伝ばかりでなくキャンパス施設でも急速に格差が拡大している。将来の偏差値確保には女子学生の増加が重要であり、そのためにはシースルー(非密室型)エレベータ、シャワートイレはじめ斬新な建築からなるキャンパス・イメージづくりを急がなければならないのだが、

体育会硬式庭球部顧問部長 定年まで3年という時になって黒澤前顧問部長の真剣な要請によって引き受けざるを得なくなった。引き継いで2年目の2009年、7部で約70校の中を勝ち抜いて準優勝し、6部との入れ替え戦にも勝ち見事昇格を果たした。7部から6部は、いわば十両・幕下力士から幕内力士に昇格したようなもの。これを伝え聞いたOBが我がことのように喜ぶと同時に遠方より参集し、OB会の再生機運が盛り上がった。これほどにも大勢のOBが母校に愛着をもっているのだ。酒を注いでまわりながら責任の重さを思い知らされるばかりであった。

現役学生は顧問部長のわずかな言動で大きく影響を受ける。学生・OBは顧問部長を通じて大学の支援を感じる。大学の支援を力強く受け取るか無力と受け取るかは顧問部長の努力次第である。硬式庭球リーグでは、4名、すなわち毎年1名の卓越した選手が確保できればトップランク大学に駆け上がることができる。本学の近隣には有望選手を輩出している高校もあり、彼らを受け入れ得る環境づくりが急務であると考えている。しかし、下記の事故が、これを達成する上に必要な時間と行動力を私から奪い去ってしまった。

今年の5月30日OB会が開催され、現役を交えて紅白試合が開催された。この真剣勝負の最中に私は激しく転倒し失神に至る大怪我を負った。救急車で運ばれ前頭骨骨折、前頭葉脳挫傷、くも膜下出血、硬膜下出血等々の症状で無意識状態が3日間続き、意識が戻ったときには両手足と胴体を縛られ、点滴チューブ、おむつ、排尿チューブなどで覆われて妻が心配そうに夜を徹して付き添っていた。入院生活を余儀なくされたが、医師も驚くほど回復力が強く20日ほどで退院、以後は通院で回復を図ることにして社会復帰ができるまでになった。

この事故に関しては、大学の教職員の皆さんに多大なご迷惑をおかけした。授業について同僚とりわけ環境コース教員には、授業担当の肩代わりなどを含めて過重な負担をお願いせざるを得なくなった。2週間先に予定されていた国際会議出席も不可能になり、その宿泊・航空機・研究発表セッションなどのキャンセル作業、さらにそれに関する学内処理手続きについて多数の方々の手を煩わせた。わが身はわが身のみならず、を思い知らされたことである。ご迷惑をおかけした諸兄には心からのお詫びとお礼の意を表したい。

後遺症としては慢性硬膜下出血があるが、ごくたまに頭痛が出ること、左の指先の末端神経が数日に数分痺れることなど軽度であり、入院してまでの手術には担当医にもためらいがある。しかし、スポーツや過度な仕事は依然として厳禁とされており、社会活動上窮屈な状態はしばらく我慢というところである。

おわりに

以上、時間的余裕がなく雑駁なまま提出期限を迎えてしまった。新任当初こそ違和感を拭い得なかった大学であるが、今ではこの大学で過ごした34年に大いに満足している。名を挙げると際限がないので、失礼を承知で省略させていただいたが、ここまで大過なくやってこれたのも本学教職員各位のご支援があったからこそ、感謝の気持ちで一杯である。本当にありがとうございました。



人間工学一筋に

—安心・安全・快適・効率の整合を目指す変革の最前線で—

堀野 定雄

Well-filled years of my life thorough ergonomics study - At the front of challenge

harmonizing risk-free, well-informed, comfort and efficient society

Sadao HORINO*

1 感謝に尽きる

この随想の執筆機会を与えて頂いた編集委員会に心から感謝する。自分史の整理に役立つだけでなく、関心や志を同じくする多くの読者と時代や課題を共有できるからである。

同時に、私のこれまでの内外活動の場を与えて頂いた神奈川大学に篤く感謝する。私の青春から今日までを支えてくれたのはこの神大である。国際レベルの吹奏楽演奏を楽しみ、花の2区権田坂で応援する箱根駅伝はもとより、神大は私にとって活力の基地であり知力、精神力を発展させてくれた土壌である。質実剛健・積極進取の理念にも、組織や活動の仕組みにも大変助けられた。神大のモットー「成長支援第一主義」は学生だけでなく教員もその対象だと実感する。

2 激変する世界でフル回転

昨年テクノフェスタ講演録「人に優しい街づくり」にも書いたが今、世界は激変している。今春以来、主な学会活動として国内で札幌、仙台、東京、名古屋、小倉、鎌倉、国外ではアメリカ、インドネシア、ベルギー、韓国と出張が半ば以上。どれも内容は充実、楽しんで参加し、社会の激動に肌で触れてきた。

世界中で、中韓台を中心としたアジア台頭の勢を感じる。特に若者が積極的に国際舞台で堂々と発言する様になった。日本人も燃えているがアピールが毎日変わらずおとなしい。

札幌では日本人間工学会、仙台では日本交通心理学会と松島で日本経営工学会改善&アーゴノミクス研究会主催連合大学夏期研修会、東京では日本経営工学会と日本学術会議主催安全工学シンポジウム、名古屋では人類動態学会と日本機械学会、北

九州小倉では「ドラブリ2010」（ドライブレコーダー実践応用シンポジウム）、鎌倉では「観光とトイレ/鎌倉トイレフォーラム」、アメリカマイアミでは応用人間工学国際会議、バリ島デンパサールでは APCHI・Ergo-future2010: Asia Pacific Computer-Human Interaction・Ergo-Future 2010 International Joint Conference、ベルギーブルージュでは国際人間工学連盟（IEA: International Ergonomics Association）理事会と欧州連合人間工学連盟（Federation of European Ergonomics Societies）第1回大会、韓国釜山では17th Intelligent Transport System World Congress Busan 2010に出席し、論文発表や座長などを経験した。

数多く動いたなあと思う。毎年、講義や卒研指導と調和させながらこのペースで40年間動いてきたらしい。だからかなあ、数十年があつと言う間に駆け抜けた。自分では道半ばで未だ若いと思っているうちに・・・。

3 在任中の人間工学の普及と発展

活動を通して言えることは、人間工学と言う学問が確実・着実に国内的にも国際的にも浸透・定着しつつあるという嬉しい現実である。世の中は人間工学を受け入れ、必要とする方向に変化し加速していることは確かである。

国内的には産業界が、経済産業省、国土交通省、警察庁など中央行政府が、神奈川県、神奈川県警、横浜市、鎌倉市、東京都、奈良県など地方行政府が、更に中央高速道路路線、首都高速道路公団、交通事故対策機構などの公的機関が、官民コラボレートして人間工学の意義・役割を理解し導入している。ヒューマンエラーやPDCAサイクル概念の普及は好事例の一例である。

国際的にも、国際人間工学連盟 IEA 理事を20年間経験して、欧米中心から世界中に学会組織が拡大していると明白に言える。大きく様変わりし、アジア、南米各国で人間工学会はどんどん増えている。世界地図で人間工学会の空白域は中近東、アフリカ（南アは例外）だけになった。これも時間の問題だ。

*准教授 情報システム創成学科 人間工学研究室
Associate Professor, Department of Information Systems Creation
所長 工学研究所高安心超安全交通研究所
Director, Research Institute for Well-informed and Risk-free Transportation (KU-WIRF)

国際的に人間工学を加速度的に普及させている鍵は経済発展と人間工学チェックリストによる作業改善である。費用対効果に優れた低コスト・参加型の手法が野火の如く世界に広まりつつある。先輩の共同研究者小木和孝氏が主導し、国連ILOとIEAが1986年共同出版して図解入りの判り易い本を整理、十数ヶ国語に翻訳され、一気に普及、発展し成果を挙げた。

これは筆者が院生時代から着手し神大赴任後も一貫して継続している研究課題の一つで、安全な農業機械再設計や空港管制席作業や鋳造工場の作業改善、ユニバーサルデザイン応用の鎌倉街づくりなどで成果をあげている。例年、人間工学研究室に所属する演習生は神大生協のご協力で必須課題でチェックリストを活用して学食厨房の作業改善実習で成果を上げている。このノウハウ熟知が奏効して大手自動車会社も興味を持ち、卒業生が連続就職した実績がある有力なツールである。

4 人間工学と幸運な出会い

この道に入ったきっかけは大阪府大経営工学科2年講義でコンベヤーを使う大量生産システムの説明を聞いたときだった。ふと疑問に思い先生に、もし作業者がトイレに行きたくなったらどうするのか聞いたら先生は「そんなことを心配しなくていい」と答えた。何でも出来るフォアマンが雑席中代わりをする調べて判った。作業者の数だけ作業を細分化し時間を平準化するコンベヤーシステムは非人間的だと感じ、機械文明の中で人間が迫害されるのが気になって仕方なかった。

一方、高校・大学生時代、天平・奈良時代の歴史、寺院、仏像に興味を持ち、飛鳥、斑鳩、西ノ京、平城京跡などを度々訪れた。鑑真和尚の伝記に触れ、当時の先進国中国から失明しても発展途上国日本に仏教を伝えようと、志を貫いた彼の生き様に心を打たれ、唐招提寺裏のお墓に何度もお参りした。又、斑鳩の法輪寺住職を感じさせるほど猿轡に訪れて三重塔の前でじっと座って動かない熱心なアメリカ人が、中学の頃父の薦めで教わった英会話先生と判り驚いた偶然も影響したかも・・・。

この古寺巡礼と専門の勉強がエルトン・メイヨー「産業文明における人間問題」を通して企業技術者を目指していた自分の中でブレンドされ、技術だけでなく世の中は夢見る様子が行かないかも知れないと思うようになった。そんな時、好奇心を程よく満たしてくれる好きなイベント大阪国際見本市会場書籍コーナーで坪内和夫「人間工学」(日刊工業新聞社刊)に出合った。人間特性を吟味し、それに合うように製品やシステムをつくることを目的とした学問人間工学に深い魅力を感じた。今思えば、これが運命の分かれ道だった。人間工学で一生がまぼろうと決めたが、周囲では誰も注目する分野ではなく、大宴会の片隅で一人寂しくグラスを傾ける自分の姿を見ていた。買った本を一気に読み坪内先生を慕って早稲田の大学院へ進み、7年もいた。

5 忘れられない学会発表会のハプニング

当時日本で人間工学分野で活躍する多くの立派な研究者を紹

介して頂き、本明寛文学部長に取計らって心理学勉強の環境づくりを配慮して頂くなど恩師坪内先生には感謝の一語である。非常勤で大脳生理学を講義された岩波新書「脳の話」で著名な時実利彦先生に直訴し毎週6時間脳解剖実習で東大へ半年間通った経験は筆者の人生観とコンピュータ観を完全に変えた。

東京オリンピックの年、第1回日本人間工学会が早稲田大学大隈講堂で開催された。修士一年の若僧筆者はハプニングで生涯忘れることがないラッキー経験をするようになった。学会発表会式に日本学術会議代表が来ると思い込んでおられた先生は当日朝、本人が直接祝辞を述べこられると知って大慌て、準備を手伝っていた筆者に「堀野君、大変だ。偉い朝永振一郎先生が来られる。演壇の花が何かを飾りたい。急いで探して来てくれ」と。泡を食った。未だノーベル物理学賞受賞前だったが、恩師朝永先生の重みを熟知しておられた。日曜早朝で大学周辺の商店街は静まり返って、走り回っても何も見つからず会場へ戻って来たが中へ入らず、祈る気持ちで講堂近くの大隈会館へ駆け込み、事務に急を伝えて応援を依頼すると、どこからか優雅な松の盆栽を持って来て「これでどうだね」と親切に貸して下さった。嬉しさに胸を抱えた重さも感じず会場へ運びこみ、間一髪で一件着落した。その後、学会誌に掲載された第1回学会で発案する本川一郎初代会長や来賓写真で演壇の清楚で上品な盆栽を見るたびに、苦労も集中して事に当たれば問題も解決する教訓として今も鮮明に思い出す。

6 若い人材に期待して

筆者の主な研究成果は大型トラック左折巻き込み事故再発防止で多くの裁判で証言し判決に影響を与え、運輸省を動かして法律を変えた。筆者開発画角230度等立体角射撃魚眼レンズを用いた運転視界測定に始まり人間の周辺視用の疲れにくい安心して運転できるトラック開発(すゞ自動車の新型エルフに結実)、運転者が安心して分岐合流できる文脈性ある判り易い高速道路案内標識設計、最近では、交差点視界を確保する出会い頭事故防止の3DCG活用カーブミラー簡便設置法提案、国レベルで提案開発が進んだ映像記録型ドライブレコーダー実用などがあって工学研究所のお世話で今も多忙な研究計画をこなしている。他に、中島三千男学長も関心が高いリアフリーマップ作成などユニバーサルデザイン応用の鎌倉街づくり研究がある。

これらに共通しているのは、人間工学を応用して事故再発防止を図る安全・安心研究や負担軽減で快適・高効率作業場改善など院生時代から一貫した研究パラダイムと常に若い学生と共に歩む方法論がある。だが、研究の取組み手順や組織形態が時代と共に変化し、従来の単純技術応用で改善するモードから社会側面を重視して色々なセクターと接点を共有し国際・学際・職界モードへ切り替わりつつある点である。人間工学を取巻く環境は良くなり若い人材が活躍し易くなった。大いに期待する。産業文明の人間問題を解決すべく筆者の取り組みは続く。

2009年度（平成21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	江上 正 教授
電子情報フロンティア学科	山口 栄雄 教授
物質生命化学科	佐藤 憲一 教授
情報システム創成学科	北岡 正敏 教授
建築学科	重村 力 教授
物理学教室	大成 逸夫 教授
物質生命化学科	山村 博 教授（所長指名）

2) 研究所客員教授

沼田 俊一 (2009.4~2010.3)	塚田 敏郎 (2009.4~2010.3)
大熊 武司 (2009.4~2010.3)	西 和夫 (2009.4~2010.3)
坂田 弘安 (2009.4~2010.3)	

3) 研究所客員研究員

藤田 正則 (2006.11~2010.3)	南部 洋子 (2008.4~2010.3)
武田 重喜 (2007.10~2009.9)	石川 博敏 (2008.10~2010.9)
篠原 嘉一 (2008.4~2010.3)	大和 裕幸 (2008.10~2010.9)
磯田 幸弘 (2008.4~2010.3)	久保 登 (2008.10~2010.9)
堀 康彦 (2008.4~2010.3)	龍 重法 (2008.10~2010.9)
小原 晴彦 (2008.4~2010.3)	石倉 理有 (2008.10~2010.9)
山本 淳 (2008.4~2010.3)	Tomasz Kuje j (2009.4~2012.3)
李 徳成 (2008.4~2010.3)	

4) 研究所特別研究員

小川 隆博 (2007.10~2009.9)	北島 創 (2009.4~2011.3)
------------------------	----------------------

5) 研究所職員

教務技術職員 萩原健司
技術員 八高優勝

2. 予算

平成21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	2,956	3,065
大型共同設備管理運営	4,600	4,501
工学研究所共同研究*	13,000	12,972
(特)テクノフェスタ	3,000	2,700
合計	23,556	23,238

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者	予算額 (千円)
中山 教授	4,750
堀野 准教授	4,000
山家 教授	2,250
米田 助教	2,000
計	13,000

3. 共同研究／プロジェクト研究

平成 21 年度の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表-2 に示す。

表-2

共同研究

計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発	山家 京子／建築
構造相転移によるカルコゲン系熱電材料の高性能化に関する研究	米田 征司／電子情報フロンティア
超電導粒子干渉計のオンチップ・アレイ化による高感度磁束系の製作	中山 明芳／電子情報フロンティア
人間工学的視点に基づく安全円滑な平面交差システムの構築	堀野 定雄／情報システム創成

プロジェクト研究

A	熱電発電システム構成のための基礎研究	大野 吉弘／電子情報フロンティア
A	次世代自動車高性能蓄電システム技術開発事業／要素開発 ／高容量電池の開発	佐藤 祐一／物質生命化学
A	高性能高分子膜材料の開発と評価	西久保 忠臣／物質生命化学
A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発—固有 モードに基づく厳密な等価回路を適用して—	許 瑞邦／電子情報フロンティア
B	建築鋼構造のリユースシステムに関する研究	岩田 衛 /建築
C	地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と運営	山家 京子／建築
C	大気汚染環境化学研究所	井川 学 /物質生命化学
C	高安心・超安全交通研究所	堀野 定雄／情報システム創成

プロジェクト研究

A	2020年の電子デバイスを想定した電子回路の研究	島 健／電子情報フロンティア
A	デジタル生産システムにおけるCAEと品質工学の適用	北岡 正敏／情報システム創成
A	構造物の耐震安全性及び耐久性の評価方法に関する研究	趙 衍剛／建築
A	振動エネルギー流れに基づくシステムの評価と設計	山崎 徹／機械

4. 講演会

「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：暮らしの中の音

場 所：KU ポートスクエア

第1回 2009年10月3日（土）15:00～16:30

音って？－音の基礎と音問題とその解決法－

神奈川大学工学部准教授 山崎 徹

第2回 2009年10月10日（土）15:00～16:30

コンピュータによるくらしの中の音シミュレーション－音の伝わり－

日東紡音響エンジニアリング(株)主席研究員 鶴 秀生 氏

第3回 2009年10月17日（土）15:00～16:30

地球に優しく、人に優しい音の世界－音でこんなことができる－

神奈川大学工学部教授 遠藤信行

第4回 2009年10月24日（土）15:00～16:30

音環境をデザインする－その必要性と事例紹介－

音環境デザインコーディネーター/横浜国立大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー講師

船場ひさお 氏

「科学と工学の最前線」連続講演会

テーマ：生命の化学とものづくり

場 所：神奈川大学横浜キャンパス

第1回 2009年10月31日（土）13:00～16:00

1. 化学物質が寿命をのばす－タミフルはなぜ効くのか？－

神奈川大学工学部教授 小野 晶

2. 体の中と同じように高分子をつくる

神奈川大学工学部教授 横沢 勉

第2回 2009年11月7日（土）13:00～16:00

1. 骨を作らせる薬 日光浴でなぜ骨は丈夫になるのか？

神奈川大学工学部教授 岡本専太郎

2. エコ社会へのキーテクノロジー：酵素に学ぶ触媒開発

神奈川大学工学部教授 引地史郎

「若者と語る」シリーズ講演会

テーマ：セレンディピティーを知っていますか

—電気を通すプラスチックを発見するまで—

場 所：神奈川大学セレストホール

2009年7月25日（土）14:00～15:30

筑波大学名誉教授 白川英樹 氏（2000年ノーベル化学賞受賞）

5. 神大テクノフェスタ2009 —暮らしと環境の未来—

日時：2009年10月16日（金）12:00～17:30

内容：・研究成果発表（2号館）

ポスター発表・実演展示（工学研究所）共同研究8件／プロジェクト研究4件

ポスター発表・作品展示（大学院生）47件

・企業展示 23社（2号館）

・講演会（16号館セレストホール）

テーマ【暮らしとまち】【暮らしと環境】

・特別講演（16号館セレストホール）

『風と建築物』 神奈川大学名誉教授（工学研究所客員教授） 大熊 武司

・懇親会（ラックスホール）

6. 大型装置使用実績

平成 21 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	TF-XRD	XPS	ICP	CCD
機械工学科	0	22	166.5	0	0	0	0
工藤研究室			166.5				
竹村研究室		22					
電子情報フロンティア科	0	407.5	202	483.5	87	0	0
平手研究室		312.5		483.5	87		
山口研究室		95	202				
物質生命化学科	355.5	486	1179	207.5	243.5	184	3248
井川研究室		11.5				144	
池原研究室	90	6	133				
岡本研究室			45				
小出研究室		216.5	18	117.5			2861
佐藤(憲)研究室							24
佐藤(祐)研究室	55	192	141		57	24	
内藤研究室	203		33.5		160		55
西久保研究室			56.5				
引地研究室			24.5				308
横澤研究室	3.5	22.5					
山村研究室	4	37.5	727.5	90	26.5	16	
化学教室	66	58.5	7	0	0	16	0
亀山研究室		18					
川口研究室						16	
田島研究室	66	40.5	7				
理学部	0	11	0	0	116.5	0	0
森研究室		11			38		
山口研究室					78.5		
合計時間	421.5	985	1554.5	691	447	200	3248
機械工学科(%)	0.0	2.2	10.7	0.0	0.0	0.0	0
電子情報フロンティア 学科(%)	0.0	41.4	13.0	70.0	19.5	0.0	0
物質生命化学科(%)	84.3	49.3	75.8	30.0	54.5	92.0	100
共通教室(%)	15.7	5.9	0.5	0.0	0.0	8.0	0
理学部(%)	0.0	1.1	0.0	0.0	26.1	0.0	0

工学研究所だより

2009年4月28日 発行 No. 2009-1
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

神大テクノフェスタ 2009 について

準備企画委員会委員長 成田清正

I. 神大テクノフェスタ 2009 開催について

神奈川大学の工学部・工学研究科・工学研究所は工学系として有機的に活動し、研究活動と研究成果の情報を広く社会に公表し、かつ、学外の様々な教育・研究機関との連携および企業・地域との交流を積極的に推進しています。そして、更なるコラボレーションの高揚を目的として、2008年10月17日、神大テクノフェスタ 2008 を開催しました。開催の結果について高い評価を得ることができたのは、本学の教職員、学生および企業のご協力と学内関連部署のご支援の賜物であります。とりわけ、学生と企業の橋渡しに関しては、双方に今後の確固たる未来実現を予感することができました。

本準備企画委員会は上記の実績に照らし合わせ、かつ、神大テクノフェスタ 2008 実行委員会による総括を踏まえて今後に向けた検討をしてみました。その結果、情報の発信と公開はわかりやすくすること、学生と企業の交流の場を提供していくこと、そして、既存のイベントとリンクしていくことなどに一段の工夫を凝らすことによって、学生、大学、企業および地域との共進化に更なる効果を上げることができると判断しました。かかる観点から、本準備企画委員会は神大テクノフェスタ 2009 の開催は相応しいと考え、次のように準備をしていくこととなりました。

開催委員長 佐藤祐一 (工学部長)
 副委員長 遠藤信行 (工学研究科委員長)
 副委員長 許 瑞邦 (工学研究所長)
 実行委員長 原村嘉彦 (機械工学科教授)

II. 神大テクノフェスタ 2009 企画案について

主催：工学部、工学研究科、工学研究所
 共催：ハイテクリサーチセンター、学術フロンティア
 協力：産官学連携推進室、広報部、就職部、
 入試センター、高大連携室

1. 本学工学部のブランド力を高めるため、『神奈川大学工学部の研究成果・ポテンシャル(高さ・幅)を社会にアピールすること』に則って、工学部/工学研究科/工学研究所の研究成果の発表・展示・実演の場を提供します。とくに、外部からの参加者の方々、異分野の方々にも分かりやすい情報発信の場となるように工夫を凝らした企画とします。神大テクノフェスタ 2009 においては、前回と同様に企業に出展を依頼しますが、出展依頼の趣旨を明確化し、参加企業に十分なメリットがあるような企画とします。具体的には、大学院生・学部生と企業の交流の場と位置づけ、学生諸君への各企業の事業内容のアピールの一環として、企業に出展を依頼します。また、学部・大学院の教育の一環として以下のような効果が得られるよう企画します。

- 異なる専攻間・学科間での学生同士、あるいは教員と学生の異分野交流
 - 異分野の方にも分かりやすい情報発信を大学院生に考えさせ、体験させることによる教育的効果
 - 研究室配属前の学生諸君への研究内容の紹介、および大学院への進学意欲の醸成
2. 開催時期：2009年10月16日予定
3. 開催場所：横浜キャンパス 2号館・3号館
4. プログラム例：
- 大学院生による研究室、大型研究プロジェクト内の研究ポスター発表
 - 企業展示
 - 招待講演
- 4) 年度内で開催しなければならない発表会
- ハイテクと学術フロンティアの発表
 - 大学/文科省予算で購入した教育研究設備の発表
 - 工学研究共同研究、プロジェクト研究の発表
 - 共同研究奨励助成、学術褒賞の発表
- 5) インターン体験報告
- 6) 企業と神奈川大学の共同研究、受託研究発表会
- 上記内容については昨年の12/10の教授会にて了承済みです。なお、準備企画委員は以下の通りです。
- 委員長：成田 副委員長：齊藤
 委員：山崎、岡本、山家、朝倉、原村

2009 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養系より選出された6人の運営委員と所長指名の運営委員(山村教授)と所長の8名で構成され、工学研究所の運営のために以下の分担で仕事を進めております。

運営委員会の構成

許 瑞邦 (所長)
 江上 正 (機械工：自己点検・評価、学内外への情報発信、だより、Web 担当)
 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)
 佐藤 憲一 (物質生命化：所報編集委員長)
 北岡 正敏 (情報システム創成：研究支援委員会幹事、学内イベント企画、テクノフェスタ担当)
 重村 力 (建築：新企画・将来計画担当)
 大成 逸夫 (教室系：講演会関係担当)
 山村 博 (所長指名：運営委員会幹事)
 事務局：萩原健司、八高優勝、沼田智恵

研究支援委員会

委員長：青木 勇 副委員長：大野 吉弘
 委員：山村 博 寺尾 道仁 大成 逸夫
 北岡 正敏 (幹事)

大型装置管理委員会

委員長：内藤 周弼
委員：井川 学 岡本 専太郎 平手 孝士
山村 博 横澤 勉 山口 栄雄（幹事）

関連各種委員会

神大テクノフェスタ 2009 実行委員会

委員長：原村
委員：山口, 高山, 北岡, 島崎, 伊藤, 田村
工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子編集委員会
委員長：成田 副委員長：原村 委員：島, 鎌田, 瀬古沢,
山村, 新中（協力）, 宇佐見（作業責任者）

講演企画委員会

委員長：庄司 委員：井川, 大成, 鎌田
大学主催講演会”若者と語る”シリーズ実行委員会
委員長：大成 幹事：横澤 委員：池原, 岡本, 亀山
山口（理学部）, 中山（附属）顧問：西久保, 中濱

工学研究所共同研究, プロジェクト研究

2008 年度（終了）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）
- ・07-A4 出合い頭事故未然防止の研究 交差点カーブミラー視
認性評価と再設計マニュアル開発（堀野：情シ）

2009 年度 共同研究

- ・08-A1 計画支援を意図した空間情報視覚化システムの開発
（山家：建築 225 万円）
- ・08-A2 構造相転移によるカルコゲン系熱材料の高性能化に
関する研究（米田：電フ 200 万円）
- ・09-A1 人間工学視点に基づく安全円滑な平面交差交通システ
ムの構築 ーカーブミラーの視認性向上による交差点視環
境改善ー（堀野：情シ 400 万円）
- ・09-A2 超電導粒子干渉計のオンチップ・アレイ化による高感
度磁束計の製作（中山：電フ 475 万円）

2. プロジェクト研究について

- 本年度開始するプロジェクト研究は以下の通りです。
- ・09-A1 2020 年の電子デバイスを想定した電子回路の研究
（島：電フ）
 - ・08-C1 防災まちづくり支援研究センター（佐本：建築）
 - ・09-C2 地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と
運営（山家：建築）

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。
2008 年度 第 10 回（3 月 16 日開催）
白川先生講演会準備状況/南部客員研究員の継続申請/X 線分析
装置の移管について/工学研究規則および客員研究員申請書の
英語版/工学研究所 Web 開設の件/自己点検自己評価の状況/産
官学関連イベント関係/ASIX の廃棄報告/工学研究所予算の使
用状況 /プロジェクト研究 C（西教授）終了報告書
2009 年度 第 1 回（4 月 16 日開催）
新運営委員の紹介/所長指名の運営委員の了承/工学研究所規則
他確認/工学研究所組織について/運営委員の分担について/工学

研究所活動計画について/平成 20 年度予算について/大学主催
講演会”若者と語る”シリーズ講演会準備状況/プロジェクト研
究/客員研究員/特別研究員の募集について/工研だより 09-01 号
について/大型装置管理委員会の報告

2. 2009 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	4,600,000 円
研究所運営	2,937,000 円

また、特別予算として神大テクノフェスタ 2009 として 330
万円が認められました。したがって、本年度の工学研究所総
予算は 23,837,000 円となります。

3. 工学研究所所報原稿の募集

所報 32 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。詳しくは後日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

4. 工学研究所プロジェクト研究の募集

平成 21 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。詳細については後日メーリングリストに
てお知らせいたします。

申請書応募締切 5/29（金） ヒアリング 6 月開催予定

5. 総合学術研究推進委員会/研究委員会報告

前号の工学研究だよりからこれまでの 3 回にわたる委員会
での議題は以下の通りです。

2008 年度 第 9 回（2 月 20 日開催）議題

- ・グローバル COE の申請について
- ・『日本常民文化研究所非文字資料研究センターとブリ
ティッシュコロンビア大学アジア学科の非文字資料研究に係
る学術交流についての覚書』締結について
- ・平成 19 年度私立大学等経常費補助金の交付状況について
- ・プロジェクト研究所設置について
- ・『人文学及び社会科学における共同研究拠点の整備の推進
事業』に係る申請について
- ・文部科学省補助金（大型装置・設備等）申請に係る学内順
位について
- ・競争的資金等の不正使用に係る通報窓口について
- ・『心理相談センター』の設置について
- ・研究所客員教授の任用について

2008 年度 第 10 回（3 月 18 日開催）議題

- 平成 21 年度学術研究振興資金の選考結果について
- 2010 年度日本学術振興会特別研究員の募集について
- 『人文学及び社会科学における共同研究拠点の整備の推進事
業』に係る申請について
- 2009 年度神奈川大学学術褒賞の応募書類および学術褒賞候補
者の推薦書類の選出について
- 不正防止計画推進委員会委員について
- プロジェクト研究所の設置について
- プロジェクト研究所活動報告書・活動計画書について

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

2009年8月3日 発行 No. 2009-2
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

神大テクノフェスタ 2009 の概要について

実行委員長 原村 嘉彦

実行委員会では、神大テクノフェスタを以下の要領で開催すべく現在準備を進めています。工学研究所所員の全面的な支援をいただけますよう、お願い申し上げます。

開催の趣旨：

神奈川大学工学部・工学研究科・工学研究所の研究実績・ポテンシャルを社会に広くアピールし、「神奈川大学」のブランドを高めるため、工学研究所・工学研究科・工学部が共同して、研究成果の発表・展示・実演を実施する。

開催日：2009年10月16日（金）

開催内容

(1) 講演会

特別講演を含めて「暮らしと環境の未来」を統一テーマとし、工学研究所のプロジェクト研究を中心に、2つのテーマで講演会を開催する。1つは山家先生のオーガナイズによる「暮らしとまち」（13:00～14:20）、もう1つは山村先生のオーガナイズによる「暮らしと環境」（14:30～15:50）である。いずれも3つの講演からなり、セレストホールで行う。

(2) 特別講演

大熊先生に「風と建築物」というテーマで講演をいただく。セレストホールにおいて、16:00～17:30を予定。

(3) 大学院生/研究室によるポスター発表・作品展示・実演展示

広く研究内容とその成果を発表することを目的に、ポスター発表形式で、大学院生が研究発表する。建築学専攻の作品模型展示を伴う発表を含む。発表件数50件程度。2号館演習室において、12:00～15:30を予定（後半はポスター掲示のみ）。

(4) 工学研究所共同研究/プロジェクト研究の成果に関するポスター発表

まだ学内での発表を行っていない共同研究ならびにプロジェクト研究に関して、ポスター発表形式で発表いただく。2号館演習室において、12:00～15:30の時間帯に12件を予定。

(5) 研究相談窓口

産官学連携室が外部からの研究相談を受け付ける窓口を開設する。2号館演習室において、13:00～16:00を予定。

(6) 企業展示

企業における技術者の仕事を中心に企業紹介をして

いただく。昨年よりリクルート色を強める形で実施。2号館演習室において、各学科から推薦をいただいた合計25社の参加により、12:00～15:30での実施を予定。

(7) 懇親会 学内で、18:00～19:30

開催組織/開催委員長 工学部長 佐藤 祐一

開催副委員長 工学研究科委員長 遠藤 信行

工学研究所所長 許 瑞邦

実行委員長 原村 嘉彦

実行委員 山口 栄雄、高山 俊夫、北岡 正敏、

島崎 和司、伊藤 博、田村 忠久

以上

白川英樹博士による”若者と語る”講演会の報告

大学主催の『若者と語る』講演会は昨年に引き続き7月25日（土）にセレストホールで開催されました。ノーベル化学賞受賞者の講演とあって、ホール一杯の参加者の半数強が高校生・大学生となり、参加者からの活発な質問もありとても充実した講演会となりました。



Drappli2009 シンポジウムの報告

工学研究所プロジェクト研究の課題研究所「高安心超安全交通研究所（KU-WIRF）」設立記念のシンポジウムが7月24日（金）にセレストホールで開催されました。

学外から約140名の参加者が、ドライブレコーダーに関する講演に熱心に耳を傾けていました。

連続講演会の企画について

工学研究所・工学研究科共催の連続講演会のテーマ、日程および企画責任者が以下のとおり決定いたしましたのでお知らせいたします。

○暮らしの中のサイエンス

暮らしの中の音

日時：10/3～10/24 土曜日 15:00～16:30 全4回

○科学と工学の最前線

生命の化学ともの作り

日時：10/31, 11/7 土曜日 13:00～16:00 全2回

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。

2009年度 第2回 (5月27日開催)

プロジェクト研究 (応募状況・審査依頼) について/所報32号について/テクノフェスタ2009進捗状況/『若者と語る』シリーズ講演会進捗状況/テクノサイエンス連続講演会進捗状況/工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子/外部イベントの企画について/高安心超安全交通研究所設立記念シンポジウム開催に伴う予算申請について/『X線分析装置』の取り扱いについて/神奈川大学学術機関リポジトリ登録について/工学研究所 Web ページについて

2009年度 第3回 (6月24日開催)

プロジェクト研究審査結果について/所員会議の議題について/所報32号について/テクノフェスタ2009進捗状況/『若者と語る』シリーズ講演会進捗状況/テクノサイエンス連続講演会進捗状況/自己点検について/外部イベントの企画について/工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子/2010年度プロジェクト研究 (後期) 募集について/客員教授の募集 (含む再任) について/高安心超安全交通研究所設立記念シンポジウムの進捗状況/神奈川県ものづくり技術交流会について

2. 工学研究所共同研究、プロジェクト研究の募集

2010年度共同研究と2009年度後期プロジェクト研究のテーマを募集しております。詳細については近日中に配信するメールの募集の案内をご覧ください。

応募の締切は10月9日(金)となっております。

※共同研究継続の場合も継続申請書をご提出ください。

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。

3. 客員教授ご推薦のお願い

工学研究所客員教授の推薦をお願いいたします。必要書類は申請書/推薦書で、詳細は近日中に配信するメールをご参照ください。締切は10月9日(金)を予定しています。

4. 総合学術研究推進委員会/研究委員会報告

今年度これまでの3回にわたる委員会での議題は以下の通りです。

2009年度 第1回 (4月14日開催) 議題

- ・昨年度の活動総括
- ・本年度の活動予定
- ・神奈川大学常民文化研究所非文字資料研究センターと華東師範大学民族学と人類学研究所との非文字資料研究に係る学術交流についての覚書
- ・神奈川大学常民文化研究所非文字資料研究センターと北京師範大学中国民族保護会ほう研究センターとの非文字資料研究に係る学術交流についての覚書
- ・2008年度海外学会等出張旅費配分(案)について
- ・研究所客員教授について

2009年度 第2回 (6月17日開催) 議題

- ・2009年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金の採択状況について
- ・平成21年度「人文学および社会科学における共同研究拠点の整備の推進事業」の採択結果について
- ・大学発・政策提案制度の提案書類の提出について
- ・2009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
- ・文部科学省「平成21年度補正予算(案)の概要」について
- ・2010年度学術システム研究員候補者推薦について
- ・2010年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金の公募について
- ・2010年度日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金(若手研究者奨励金)の公募について
- ・2010年度文部科学省補助金に係る構想調査・計画調査等の資料(仮)作成・提出について
- ・2010年度国際交流(学術研究)事業の公募について
- ・2009年度研究装置、教育基盤・研究設備に係る計画調査の提出について
- ・2008年度プロジェクト研究所活動報告について
- ・研究所客員教授の任用について

2009年度 第3回 (7月22日開催) 議題

- ・日本常民文化研究所非文字資料研究センターと海外研究機関との覚書締結について
- ・国際常民文化研究機構運営委員会規程案について
- ・平成21年度住宅・建築関連先船頭技術開発助成事業(2次募集)の応募について
- ・2008年度競争的資金に係る「間接経費」の使用状況について
- ・2008年度科学研究費補助金 申請・採択状況について
- ・先端学術研究人材養成事業の申請について
- ・プロジェクト研究所2008年度活動報告および2009年度活動計画について

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

2009年10月6日 発行 No. 2009-3
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

平成 22 年度 科学研究費補助金の申請について

工学研究科 研究委員会
 委員長 伊藤勝悦

大学の教育および研究の質を保証するために、大学基準協会の認証評価を受審することは重要である。日本技術者教育認定機構(JABEE)は大学が国際的に通用する技術者を卒業させているか否かを認定する機関であり、JABEEに教育プログラムを審査して戴くことは工学部としては重要である。これらの公的機関の審査を受けるために、教育職員と事務職員は自己点検・評価活動および受審事務のために膨大な時間と労力をかけている。しかし、これらの審査がフィードバックされて有能な学生を卒業させることに寄与していると筆者は思っている。

大学基準協会や JABEE の審査結果は、受審大学あるいは学部(学科)のみに通知されるだけであり、新聞等に公表されることはない。他方、大学の教育力・研究力等が、大学側の了解を得ることなく、ランク付けされて公表される場合がある。例えば、朝日新聞出版(朝日新聞社の完全子会社)が毎年出版する「大学ランキング」を通してである。このデータ集から研究面での主な項目を拾い出せば、科研費、外部資金、特許取得、ISI 論文引用度指数となる。多くの大学が、科研費の採択率の向上に躍起になっているが、公的機関による評価項目になっているだけでなく、時々、マスコミによって採択率が公表されるからであろう。

教員は、採択されるように書類を整えて、科研費を申請する必要がある。数年前から、工学研究科研究委員会は、採択されるように書類を整えるための勘所をレターにまとめて9月1日頃に、工学部全教員に配布している(お手元に無い場合は、中山先生あてご連絡戴ければ幸いです)。科研費採択実績が全国に公表されていることを考えれば、高校の進路指導部教員にも少なからず影響を与えているのではないかと筆者は思っている。

前述のように、「大学ランキング」には、ISI 論文引用度指数も公開されている。この指数の定義は不明であるが、ISI が指定する 7000 誌ほどの学術雑誌の論文に引用された論文の回数に関係している数値のように思われる。論文をどこの学術雑誌に投稿・掲載しても正当に評価されるべきである。しかし、高校の進路指導部教員や高校生のご父兄の方々が、「大学ランキング」に公開される数値によって大学の研究力を判定している可能性があることを考えれば、大学教員としては論文の投稿先に無頓着であってはならないと筆者は思っている。なお、特許取得・外部資金の導入実績も重要な指標になっている点を再度指摘しておきたい。

○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 **10月7日(水) 12:00-13:00** に1号館3階308会議室にて開催されます。

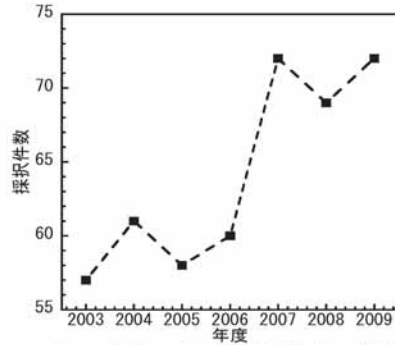


図1: 本学の科研費採択件数の推移

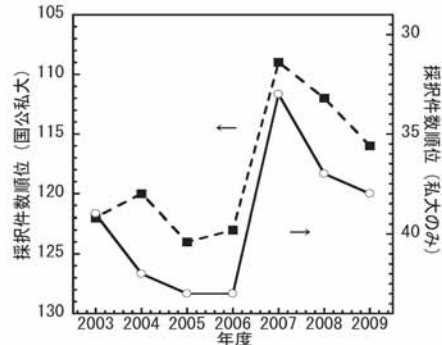


図2: 本学の科研費採択件数順位の推移

工学研究所からのお知らせ

1. 運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2009年度 第4回 (7月29日開催)

- ・所員会議の報告
- ・高安心超安全研究所シンポジウムの報告
- ・『若者と語る』白川先生講演会の報告
- ・所報 32号について
- ・テクノフェスタ 2009 について
- ・客員研究員・客員教授について
- ・共同研究・プロジェクト研究について
- ・外部イベントについて

2. 工学研究所に関連する申請の締切

10月9日(金)が以下の締切となっております。詳しくは工学研究所(内線3631)までご連絡ください。

- (1) 共同研究
- (2) プロジェクト研究
- (3) 客員教授
- (4) 客員研究員・特別研究員

神大テクノフェスタ 2009 『暮らしと環境の未来』

開催日時：2009年10月16日（金）12:00～17:30

開催場所：神奈川大学横浜キャンパス 2号館、16号館セレストホール

責任体制

開催委員長	佐藤 祐一（工学部長）	
開催副委員長	遠藤 信行（工学研究科委員長）	許 瑞邦（工学研究所所長）
実行委員長	原村 嘉彦	
実行委員	山口 栄雄（院生ポスター発表）	高山 俊夫（企業展示）
	北岡 正敏（懇親会）	伊藤 博（会場）
	田村 忠久（講演会＜共同研究＞）	
事務局	萩原 健司（工学研究所）	

主 催：神奈川大学工学部・工学研究科・工学研究所

共 催：ハイテクリサーチセンター、学術フロンティア

後 援：神奈川県産業技術センター、神奈川県産業技術交流会、かながわ研究交流推進協議会、財団法人横浜企業経営支援財団、財団法人川崎市産業振興財団

協 力：神奈川大学産官学連携推進室、就職部、広報部

問合せ先：神奈川大学 工学研究所（techno-festa@kanagawa-u.ac.jp）

web <http://www.rie.kanagawa-u.ac.jp/techno-festa/tf2009.html>

内容：

1) 講演会・特別講演会

【暮らしとまち】オーガナイザー：山家京子（13:00～14:20）

「歴史を活かしたまちづくり」 西 和夫

「災害から学ぶまちづくり」 荏本孝久

「ひとに優しいまちづくり」 堀野定雄

【暮らしと環境】オーガナイザー：山村 博（14:30～15:50）

「緑豊かな丹沢の山に」 井川 学

「捨てる熱から熱発電」 山村 博

「エネルギー技術と地球環境との関わり」 大野吉弘

【特別招待講演】（16:00～17:30）

『風と建築物』 大熊武司（神奈川大学名誉教授）

2) ポスター展示・作品展示発表（12:00～16:00）

・大学院生 47件（ポスター40件 作品7件）

・工学研究所 12件（プロジェクト研究 8件、共同研究 4件）

3) 企業展示 23社（12:00～16:00）

4) 懇親会

日時：2009年10月16日（金） 18時～19時30分

場所：生協食堂 ラックスホール

会費：教職員 無料、ポスター発表大学院生 招待（無料）、大学院生 500円

（企業および一般参加者 3000円）

工学研究所だより

2010年3月31日 発行 No. 2009-4
 神奈川大学工学研究所
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
 Tel 045-481-5661 (内線 3631)
 hagi@kanagawa-u.ac.jp

工学研究所所長退任にあたって

工学研究所 所長 許 瑞邦

工学研究所所長の職を2期4年間にわたり勤めて参りましたが、今年度をもちまして退任することになりました。在任中、以下の企画を新規に立ち上げました。

1. プロジェクト研究A,B,Cの推進

2007年度より実施したプロジェクト研究は順調に推移し、継続実行中のテーマが13件(A8件、B1件、C4件(うち今年度終了予定3件))、新規(A)が1件となり、所員の要望に応える事が出来たと考えております。なお、プロジェクト研究では、前所長が提案した客員教授制度が有効に機能している事を申し添えます。

2. 神大テクノフェスタの開催

2008年度より 工学部・工学研究科・工学研究所が協力し、学外に神大工学のポテンシャルを示す目的で始められた「神大テクノフェスタ」は、2回目が終了し、試行錯誤を重ねながらも何とか形が出来始めた所です。これは、2006年度に「工学研究所公開」として、研究所施設の公開、講演会、そして次年度に院生のポスター発表等を加えた行事が発展したものであります。

3. 連続講演会の企画・実施

本企画は当初研究委員会で提案されましたが、工学研究所でも同様の構想がありましたので、これらを一本化し2007年度より以下の連続講演会として実施しました。

1) 暮らしの中のサイエンス

2) 科学と工学の最前線

また、高校生を対象に、将来の進路選択の一助になればと企画した「若者と語る」は、大学主催の講演会として承認され、これまで2年にわたり開催されました。現在講師の推薦から開催まで工学研究所が中心となって行っております。なお、講演会の企画・開催にあたっては広報部のご支援を頂いております。

4. 工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子発行

受験生用の教員紹介冊子は比較的充実しているのに対して、企業等など外部向けの研究紹介冊子がないとの指摘を受け、2008年度より編集委員会を構成して標記冊子を発行し、学内外に配布しております。学内でも、この冊子が教員の研究活動紹介の一助になっているのではないかと自負しております。

これらの活動に対して、所員各位にご協力いただきました事にあらためて謝意を表します。特に関連行事の担当委員としてご尽力下さった所員には心からお礼申し上げます。また、工学部長/研究科委員長をはじめ、職員・技術員及び事務局には、行事の円滑な進行にご支援をいただき感謝する次第です。

今後は、これらの活動を維持発展していくとともに、新しい企画を立案・実行して本学の工学研究に資するだけでなく、工学研究所が開かれた研究所として社会に役立つ存在として発展する事を願ってやみません。最後になりましたが、4年間のご協力ありがとうございました。

神大テクノフェスタ 2009 の開催報告

実行委員長 原村 嘉彦

- 日時：2009年10月16日(金) 13:00-17:30
- 場所：神奈川大学横浜キャンパス 2号館演習室・16号館セレストホール

3. 実施内容

1) 講演会 (於：16号館セレストホール)

【暮らしとまち】オーガナイザー：山家京子 教授
 「歴史を生かしたまちづくり」 西 和夫 客員教授
 「災害から学ぶまちづくり」 荻本 孝久 教授
 「ひとに優しいまちづくり」 堀野 定雄 准教授
 【暮らしと環境】オーガナイザー：山村 博 教授
 「緑豊かな丹沢の山に -酸性霧から森を守るには-」
 井川 学 教授

「エネルギー技術と地球環境の関り」

大野 吉弘 教授
 「捨てる熱から熱発電」 山村 博 教授
 【特別講演】「風と建築物」 大熊 武司 客員教授

2) 工学研究所共同研究・プロジェクト研究

- ポスター発表 (於：2号館演習室)
- ・共同研究4件
 - ・プロジェクト研究8件
 - ・大学院生によるポスター発表・作品展示
 機械工学専攻8件、電気電子情報工学専攻5件、
 応用化学専攻17件、経営工学専攻4件、
 建築学専攻13件(うち作品展示6件を伴う)、
 計47件
 - 3) 企業展示 23社 (於：2号館演習室)
 - 4) 研究相談窓口 (於：2号館演習室)
 - 5) 懇親会
 (於：19号館LAXホール 18:00-20:00)

4. 参加者数ならびに講演会の聴衆

企業展示関係者：49名
 一般参加者：74名
 学生参加者：612名
 懇親会参加者：一般22名、学生21名、
 大学院生36名、教職員 約50名
 講演会の聴衆：セッション1 約60名、
 セッション2 約50名、
 特別講演 約70名

開催組織

開催委員長 工学部長 佐藤 祐一
 開催副委員長 工学研究科委員長 遠藤 信行
 工学研究所所長 許 瑞邦

実行委員長

原村 嘉彦
 実行委員 山口 栄雄、 高山 俊夫、
 北岡 正敏、 島崎 和司、
 伊藤 博、 田村 忠久

工学研究所からのお知らせ

1. 運営委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した運営委員会の主な議題をお知らせします。

2009年度 第5回(10月21日開催)

- ・神大テクノフェスタ2009の報告
- ・2010年度共同研究/プロジェクト研究応募状況
- ・客員教授/客員研究員・特別研究員申請状況
- ・2010年度工学研究所予算
- ・次期所長選出・選挙管理委員会の構成
- ・所員会議(12/9予定)の議長代理の件
- ・所報の進捗状況
- ・自己点検
- ・工学研究所設置のSEM分析装置に代わる超高分解能走査電子顕微鏡導入申請
- ・第8回産官学連携推進委員会の参加及び旅費の報告

2009年度 第6回(10月28日開催)

- ・プロジェクト研究(継続申請)の取扱い
- ・次期所長選挙の準備状況

2009年度 第7回(11月18日開催)

- ・神大テクノフェスタ2009の報告
- ・客員教授・客員研究員(継続)人事審議
- ・2010年度共同研究/プロジェクト研究の審査結果
- ・客員教授/客員研究員・特別研究員審査結果
- ・次期所長候補者
- ・特別予算業務計画書
- ・所員会議(12/9予定)の議題
- ・所報の進捗状況

2009年度 第8回(12月18日開催)

- ・所員会議の報告
- ・来年度の運営委員の確認
- ・今年度の総括と来年度への準備
- ・今年度予算の使用状況と使用予定

2009年度 第9回(1月20日開催)

- ・今年度の総括と来年度への準備
- ・神大テクノフェスタ2009の報告
- ・神大テクノフェスタ2010企画委員
- ・工学部・工学研究科・工学研究所紹介冊子
- ・神奈川大学主催「若者と語る」連続講演会

2009年度 第10回(3月11日開催)

- ・来年度の各種委員会の構成案
- ・神大テクノフェスタ2010企画委員会報告
- ・神奈川大学主催「若者と語る」連続講演会
- ・今年度予算執行状況
- ・科学技術関係の新聞切り抜き・NHK録画番組一覧

2. 総合学術研究推進委員会/研究委員会報告

前号の工学研究所だより発行からこれまでに開催した総合学術研究推進委員会/研究委員会の主な議題をお知らせします。

2009年度 第4回(10月21日開催)議題

- ・平成21年度学術研究振興資金に係る研究計画の公募
- ・平成21年度学術研究振興資金(若手研究者奨励金)に係る研究計画の公募
- ・平成21年度科学研究費補助金説明会
- ・2009年度研究装置・研究基盤・研究設備に係る計画調書の提出
- ・平成21年度「グローバルCOEプログラム」審査結果
- ・平成22年度「グローバルCOEプログラム」学内募集

- ・平成21年度学術研究振興資金(若手研究者奨励金)に係る研究計画書の提出

- ・不正防止計画推進委員会
- ・海外研究機関との覚書締結

2009年度 第5回(11月18日開催)議題

- ・「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)」の基づく体制整備等の実施状況報告書の提出
- ・若手研究者海外派遣事業に係るへいせい22年度以降の公募の取り止め(通知)
- ・2010年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の審査
- ・2010年度国際交流(学術交流)の事業の審査
- ・客員教授の任期更新

2009年度 第6回(12月16日開催)議題

- ・2010年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の審査結果

- ・2010年度国際交流(学術交流)事業の審査結果

- ・日本常民研究所と海外研究機関との覚書締結
- ・2009年度競争的資金に係る間接経費予算(共通経費分)(案)

- ・2010年度文部科学省補助金(大型装置・設備等)

- 申請に係る審査

- ・日本常民研究所と海外研究機関との覚書締結(案)

- ・神奈川大学ホームページ「研究活動の支援」

2009年度 第7回(1月20日開催)議題

- ・2010年度文部科学省補助金(大型装置・設備等)

- 申請に係る審査結果

- ・日本常民研究所と海外研究機関との覚書締結

- ・2010年度神奈川大学共同研究奨励助成金の募集及び選考日程

- ・文部科学省補助金(私立大学戦力的研究基盤形成支援事業、教育・研究装置、ICT活用事業等)に係る

- 学内推薦順位(案)

- ・研究所客員教授の任用

- ・研究所客員教授の任期更新

2009年度 第8回(2月17日開催)議題

- ・2010年度文部科学省補助金(大型装置・設備等)

- 申請に係る採択結果

- ・文部科学省補助金(私立大学戦力的研究基盤形成支援事業、教育・研究装置、ICT活用事業等)に係る

- 学内推薦順位

- ・デンマーク王立アカデミー建築大学と神奈川大学の

- 学術交流協定(案)

- ・研究所客員教授の任用

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

- ・研究所客員教授の任期更新

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。

神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978年（昭和53年）2月5日

改訂1988年（昭和63年）4月13日

改訂1990年（平成2年）7月18日

改訂1991年（平成3年）5月29日

改訂1994年（平成6年）1月26日

改訂2005年（平成17年）1月27日

1. 投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部属教職員とする。ただし原稿を編集委員会が依嘱する場合はこの限りではない。また連名者については制限しない。

2. 記事の種類

巻頭言

論説 学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説、意見。

総合論文 専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として、著者の一連の研究をまとめ、これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの。

共同研究報告 発足時点では〔共同研究の紹介〕、中間時点では〔共同研究の現況〕、研究終了または一段落の時点では〔共同研究の成果要約〕として、その現状が報告される。

総説 総合論文と略同一性格の記事であるが、解説的色彩の強いもの。

トピックス その時々のトピックスについての展望あるいは解説。

随想 研究・開発などの思い出、意見、感想、経験談など。

国際交流研究 学外（国内、国外）における研究・講義・出張に関する経験談など。

特集 その号の特集として特別記事を設けることがある。

3. 用語

用語は和文とする。ただし総合論文に限り欧文でもよい。また〔英文目次〕作成のため、原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名、所属〕の英語名をつける。

4. 提出期日

その年度により定める。

5. 頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す。

総合論文 原則として20頁以内。和文の場合は〔欧文内容概要（1頁以内）〕、欧文のときは〔和文内容概要（1頁以内）〕をつけることができる。

論説・随想 原則として4頁以内。

総説・トピックス・その他の記事 原則として8頁以内。

6. 原稿の書き方

原稿の書き方は、この〔規程〕ならびに〔神奈川大学 工学研究所 所報 執筆要領〕による。

7. 原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする。またその著作権・編集出版権は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する。

8. 採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学 工学研究所 編集委員会〕において行う。

9. 原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

10. その他

- (1) 原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが、状況により超過分の実費を徴することがある。
- (2) 図が印刷に不適当な場合は、専門家に依嘱して書直すことがある。この場合の経費は著者負担とする。

編集後記

編集委員ならびに工学研究所事務職員のご協力のもと、工学研究所所報第33号が刊行となりました。お忙しいところ、進んで原稿をお寄せ下さいました先生方に厚くお礼申し上げます。

所報を通して工学研究所の年間活動および所員の研究活動や研究分野の紹介をして研究水準の高さを社会に発信できるよう配慮しました。新任の教員には、これまでの研究成果やこれからの抱負などできるだけわかりやすく専門分野の研究内容を総説として執筆して頂きました。また、本年度をもって退職される教員には研究や教育での随想を執筆頂きました。さらに、工学研究所共同研究の成果報告に加えて工学研究所の年間活動が分かるように年次報告等が記載してあります。前々から言われてきたことですが、産官学と連携して研究活動を行っている先生方は地域の企業活動や社会活動に貢献されております。これらの活動や研究成果は企業の秘密にならない程度で公表していただくことが必要です。公表の場としては工学研究所所報を利用することが賢明です。これにより、産官学と企業と工学研究所の緊密な関係が確立されます。工学研究所との緊密な関係の中で産学協同研究がスタートすることを期待します。発刊にあたりご協力頂きました方々に改めて敬意を表するとともに、ご協力に感謝申し上げます。

(情報システム創成学科 北岡正敏)

工学研究所 所報 (No. 33)

工学研究所所長 山村 博

工学研究所 所報 編集委員会

委員 長 北岡 正敏 (情報システム創成学科)
委員 林 憲玉 (機械工学科)
山口 栄雄 (電子情報フロンティア学科)
新中 新二 (電子情報フロンティア学科)
佐藤 憲一 (物質生命化学科)
重村 力 (建築学科)
大成 逸夫 (物理学教室)

SCIENCE REPORTS (No. 33)
of
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Hiroshi YAMAMURA

Chief Editor Masatoshi KITAOKA (Dept. of Information Systems Creation)
Editor Hun-ok LIM (Dept. of Mechanical)
Shigeo YAMAGUCHI (Dept. of Electronics and Informatics Frontiers)
Shinji SHINNAKA (Dept. of Electronics and Informatics Frontiers)
Kenichi SATO (Dept. of Material and Life Chemistry)
Tsutomu SHIGEMURA (Dept. of Architectonics)
Itsuo OONARI (Dept. of Physics)

神奈川県工学研究所所報第33号

2010年11月25日 印刷

2010年11月30日 発行

編集兼発行者 神奈川県工学研究所
〒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