

(提案 6)

(案)

報告

数理科学と他分野科学・産業との連携



平成 26 年（2014 年）〇月〇日

日 本 学 術 会 議

数理科学委員会

数学分科会

この報告は、日本学術会議数理科学委員会数学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議数理科学委員会数学分科会

委員長	楠岡 成雄	(第三部会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
副委員長	石井 志保子	(第三部会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
幹事	萩原 一郎	(第三部会員)	明治大学先端数理科学インスティテュート教授
幹事	前田 吉昭	(連携会員)	慶応大学理工学部教授
	小澤 徹	(連携会員)	早稲田大学理工学術院先進理工学部教授
	柏原 正樹	(連携会員)	京都大学名誉教授
	桂 利行	(連携会員)	法政大学理工学部教授
	河内 明夫	(連携会員)	大阪市立大学特任教授
	小磯 深幸	(連携会員)	九州大学マス・フォア・インダストリ研究所教授
	小谷 元子	(連携会員)	東北大学原子分子材料高等研究機構長
	長井 英生	(連携会員)	関西大学システム理工学部教授
	中尾 充宏	(連携会員)	佐世保工業高等専門学校校長
	中村 玄	(連携会員)	北海道大学名誉教授
	中村 佳正	(連携会員)	京都大学大学院情報学研究科教授
	宮岡 礼子	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
	宮本 雅彦	(連携会員)	筑波大学数理解物質系教授
	三輪 哲二	(連携会員)	京都大学国際高等教育院特定教授
	室田 一雄	(連携会員)	東京大学大学院情報理工研究科教授
	山口 佳三	(連携会員)	北海道大学総長
	吉田 朋広	(連携会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授

報告書及び参考資料の作成にあたり、以下の方々に御協力いただきました。

儀我 美一	(連携会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
栗木 哲	(連携会員)	統計数理研究所教授
坪井 俊	(連携会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
平田 典子	(連携会員)	日本大学理工学部教授
真島 秀行	(連携会員)	お茶の水大学人間文化創成科学研究科教授
宮岡 洋一	(連携会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
津田 一郎		北海道大学電子科学研究所教授
西浦 廉政		東北大学原子分子材料高等研究機構教授

本件の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

事務局	盛田 謙二	参事官(審議第二担当)
	齋田 豊	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	西川 美雪	参事官(審議第二担当)付審議専門職付

要 旨

1 作成の背景

数学は様々な科学の基盤となる科学であり、諸科学や産業と数学あるいは数理科学が結びつくことで大きな発展を生み出す可能性がある。このため、海外の主だった国では数理科学と諸科学を結びつける国家プロジェクトが行われているが、日本では数理科学と他分野の科学や産業との共同研究が組織的には行われてこなかった。しかし近年、数理科学と諸科学や産業との連携を深めるための組織や、産業におけるイノベーションを生み出すことに数理科学を活用するというプロジェクトが立ち上がっている。

数学研究は専門化しており、数学全般を詳しく知る数学者はおそらくいないといわれている。数理科学の分野の中には応用を意識して生まれたものも多いが、それらの分野においても、基礎となる数学は、応用を意識せず純然たる知的好奇心から生まれたものであることが少なくない。そのために他分野の科学や産業界の研究者の中には数理科学の汎用的な力に期待する人も多い。課題が既に数学の問題として定式化されている場合は、数理科学と他分野との連携は比較的容易である。しかし、今日の数理科学への大きな期待は、データ等からは単純な構造が見出せないような複雑な現象の中に、何らかの数学的構造を見出すことで現象の解明が出来るのではないかとといった考えからもたらされており、この場合は、どのような数学概念や手法が有用であるかは、あらかじめわからないことが多い。このことが専門化した数理科学研究者と他分野の研究者との連携を難しくしている側面がある。連携強化のためには、様々な取り組みが必要となる。

2 現状及び問題点

本分科会では「社会との関わりを持つ研究・教育」をテーマとして、数理科学と諸科学・産業との連携について、問題点や振興策について議論を行った。

現在、数理科学と諸科学・産業との連携を目的とした連携組織が各大学で様々な形で立ち上がっている。また、連携を目的とした競争的資金も数種類存在する。この意味では環境は整いつつある。しかし、数理科学が、他分野や産業との連携を強め、社会に数理科学の成果を還元するという目的を図るためには、諸科学や産業に強い関心を持つ数理科学研究者や、数理科学を広範囲に理解する諸科学や産業における研究者が、多数必要で、そのような研究者の存在により数理科学と他分野の間の橋渡しが可能となる。しかしながら、我が国では、数学の深化においては世界を主導する研究者を多数輩出しているが、数理科学と諸分野・産業との橋渡しできるような研究者はあまり育っておらず、新しい機運に対する障害となる可能性がある。研究者育成も大きな課題である。先に述べた連携組織の活動は、政府の競争的資金や民間資金などの時限付き資金に支えられており、活動の継続に対する不安がある。このことが若手研究者による融合的分野の研究への挑戦を躊躇させている側面がある。

3 報告の内容

(1) 大学における数理科学と他分野との連携のための組織

現在、各大学では数理科学と他分野との連携組織が立ち上がっている。ここでは2006年以後に設立された比較的規模の大きな6組織について現状と課題を述べた。物質科学、材料科学、宇宙物理学、計算科学、金融・保険、情報通信、生命科学など様々な分野との連携が行われている。これら組織の多くは、時限付き資金によって活動が支えられており、持続可能性が大きな課題である。

(2) 競争的資金による連携

連携推進のための政府の競争的資金もいくつか存在し、視覚の数学モデル、輸送・渋滞の数学モデルによる解析など成果が上がっている。しかし、これらも時限付き資金によるものであり、連携研究が定着するまでの継続が望まれる。

(3) 人材育成（主に博士課程での教育）

数理科学研究者の産業界との連携を視野に入れた新たな取り組みである「長期インターンシップ」が始まっている。これを継続的に実施していくために経験の蓄積と教育環境の整備が必要である。大学における連携のための組織等において融合的分野の若手研究者が育ちつつあるが、そのような人材に対するキャリアパスの充実、大学におけるアカデミックポジションの拡大が望まれる。

(4) 大学における教育

社会における数理科学によるイノベーションの期待に答えるために、大学における理系学生への数理科学教育の改革、数学科及び大学院での専門教育に関してモデリング教育、統計教育の強化など、数理科学教育のあり方を変えていく必要がある。本分科会では理学・工学系協会連絡協議会所属の学協会に対してアンケート調査を行い、理系学生への数学教育への要望、及び数学の応用例に関する文献、の2点について情報提供を受けた。この結果を報告本文中に反映させると共に、アンケートにあげられた文献はすべて付録に掲載した。

(5) 初等中等教育における算数・数学教育

各種調査によれば、初等中等教育での、数学の社会での有用性に関する教育・統計教育・論理教育について問題点が指摘されており、これら教育の充実が必要である。このためには現職教員に様々な研修の機会を与えることも必要である。教員養成制度・教員採用試験等に関しても課題が存在する。

目 次

1	はじめに	1
2	大学における数理科学と他分野との連携組織	2
(1)	北海道大学 数学連携研究センター	2
(2)	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR)	3
(3)	東京大学 数理科学連携基盤センター	4
(4)	明治大学 先端数理科学インスティテュート (MIMS)	5
(5)	大阪大学 金融・保険教育研究センター	5
(6)	九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所	7
3	競争的資金による連携	9
(1)	科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 ーさきがけ (個人型研究) 及び CREST (チーム型研究) ー	9
(2)	数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出の ための研究促進プログラム (数学協働プログラム)	10
(3)	日本学術振興会科研費 特設分野 連携探索型数理科学	11
4	人材育成 (主に博士課程での教育)	12
(1)	数理科学博士課程修了者の産業界への進出: 「インターンシップ」	12
(2)	諸科学における数理科学研究者のアカデミックポジション	13
5	大学における教育	14
(1)	理系学生への数理科学教育	14
(2)	数学科及び大学院における数理科学教育	15
①	モデリング	15
②	統計教育	16
③	数学の応用例について	17
6	初等中等教育における算数・数学教育	18
7	まとめとして	19
	<参考文献>	20
	<参考資料> 数理科学委員会数学分科会審議経過	22
	<付録> 理学・工学系協会連絡協議会所属学協会へのアンケート	23

1 はじめに

数学は様々な科学の基盤となる科学であり、諸科学や産業と数学あるいは数理科学が結びつくことで大きな発展を生み出す可能性がある。このため、海外の主だった国では数理科学と諸科学を結びつける国家プロジェクトが行われているが、日本では数理科学と他分野の科学や産業との共同研究が組織的には行われてこなかった[1]。しかし近年、数理科学と諸科学や産業との連携を深めるための組織や、産業におけるイノベーションを生み出すことに数理科学を活用するというプロジェクトが立ち上がっている。

数学は19世紀後半から20世紀にかけて深化・分化し抽象化されていった。同時に数多くの概念や手法が生まれた。結果として数学研究は専門化した。数学全般を詳しく知る数学者はおそらくいないであろうといわれている。数理科学の分野の中には数理統計学、数値解析、逆問題、符号暗号理論、数理ファイナンス等のように応用を意識して生まれたものも多い。しかし、それらの分野においても、基礎となる数学は、応用を意識せず純然たる知的好奇心から生まれたものが少なくない。そのために他分野の科学や産業界の研究者の中には数理科学の汎用的な力に期待する人も多い。課題が既に数学の問題として定式化されている場合は、どのような数学概念や手法が有用であるかはわかりやすく、この場合は、数理科学と他分野との連携は比較的容易である。しかし、今日の数理科学への大きな期待は、データ等からは単純な構造が見いだせないような複雑な現象の中に、何らかの数学的構造を見いだすことで現象の解明が出来るのではないかとといった考えからもたらされている。この場合は、どのような数学概念や手法が有用であるかは、あらかじめわからないことが多く、このことが専門化した数理科学研究者と他分野の研究者との連携を難しくしている側面がある。

数理科学が、他の科学分野や産業との連携を強め、社会に数理科学の成果を還元するという目的を図るためには、諸科学や産業に強い関心を持つ数理科学研究者や、数理科学を広範囲に理解する諸科学や産業における研究者が必要で、そのような研究者の存在により数理科学と他分野の間の橋渡しが可能となる。しかしながら、我が国では数学が学問分野として確立した19世紀半ば以後に様々な知識が欧州よりもたらされたという歴史的経緯もあり、数学の深化においては世界を主導する研究者を多数輩出しているが、数理科学と諸分野・産業との橋渡しできるような研究者はあまり育っておらず、新しい機運に対する障害となる可能性がある。このため、研究者育成も大きな課題である。

数理科学委員会数学分科会では、「社会との関わりを持つ研究・教育」をテーマとして上記の事柄について様々な議論を行ったが、具体的な政策提言を行うまでに議論は至らなかった。一方、議論の過程で、数理科学と他分野との連携に対する全国の大学の試みやプロジェクトの現状、研究者育成の試み、大学における教育の現状等についての紹介がなされ、将来の課題についても提起がなされた。これらについて報告を行う。

2 大学における数理科学と他分野との連携組織

大学における、社会貢献を目的とし数理科学と諸分野・産業との連携を目指す組織には様々なものがある。ここでは、文部科学省科学技術政策研究所による科学諸分野・産業における数学の重要性を指摘した報告 [1] の出た2006年以後に設立された、比較的規模の大きな6組織をとりあげる。

(1) 北海道大学 数学連携研究センター

本センターは、21 世紀 COE 「特異性から見た非線形構造の数学」の成果、内外からの高い評価を踏まえてなされた北海道大学理学研究院と同電子科学研究所の共同提案を受けて、2008 年 4 月 1 日、学内共同教育研究施設として設置された。

本センターの目的は、数学の教育研究活動の深化を支援すると共に、他の研究分野における数学的問題を探索し解決するために数学を共通の合意言語として形成し、科学の諸領域における「つながる知」の中核としての機能を担うこと、またそのための人材育成を推進することである。今まで次のような取り組みを行い、内外から高い評価を得ている。

平成 21-22 年度 JST 先端計測・機器開発プログラム「複雑系科学に基づく経年変化の計測と予測に関する調査研究」を実施し、外部評価にて S 評価が与えられた。

平成 22 年度 Human Frontier Science Program (HFSP) に採択され、海外共同研究を実施した。（平成 25 年度で終了）

法人や企業から委託事業を請負い、それぞれ数学ポータル構築や数学モデルの開発を行った。

平成 24 年度から文部科学省委託事業「数学・数理科学イノベーション研究推進プロジェクト」を統計数理研究所、主要大学と共に共同実施している。

数学と諸科学の共同研究の芽を発掘し、学内においていくつかの共同研究が進展している。

数学連携サロンを主催し、数学・数理科学と諸科学の連携研究を推進した。

RCIM Letters, RCIM Proceedings を発行し、大学院生、若手研究者への数学連携の具体的な指針としている。

センター兼務教員が編集委員、執筆者である「連携する数学」シリーズ（共立出版）の出版が開始された。

設立 5 年が経過し大学からの 5 年後評価の結果、さらに継続することが決まった。しかしながら、兼務教員だけの組織では運営に継続性を持たせることができないため、現在学内において将来構想を検討中である。当センターが我が国、さらには世界の数学連携拠点の一翼を担うことができるように体制強化を図ることが望ましい。体制強化が今後の課題である。

平成 25 年度から大学院リーディングプログラム「物質科学フロンティアを開拓する Ambitious リーダー育成プログラム」が実施されるが、当センターもこの育成プログラムに関わり、数学と物質科学の協働研究を介した新しいタイプの若手研究者育成のため

の教育に参画することになっている。このような試みを通してセンターが人材育成に関与していく。

(2) 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR)

東北大学における数学と諸科学の組織的連携活動は、「応用数学連携フォーラム」(Advanced Mathematics Forum)を平成 19 年に立ち上げたことに始まる。情報科学研究科尾畑伸明氏のリーダーシップの下、諸分野の研究者と数学者との出会いの場となるワークショップを定期的に開催している。この実績を基に、平成 22 年には、東北大学「重点戦略支援プログラム」に採択され「数学をコアとするスマート・イノベーション融合研究共通基盤の構築と展開」(研究リーダー尾畑伸明氏、平成 22 年度～平成 26 年度)に採択され、4つの研究領域「数理材料科学」「IT/コミュニケーション」「数理生命科学」「社会環境システム」を切り開く基盤作りを行っている。6名の SMART 助教が配置され、数理科学の展開と人材育成の場として機能している。また 21 世紀 COE (平成 15 年度～平成 19 年度)、グローバル COE (平成 20 年度～平成 24 年度)では「物質階層構造」の解明を目指し、数学・物理・天文・哲学が共同で大学院教育と研究者交流を活発に行った。

文部科学省は、世界の舞台で認知される頭脳循環のハブとなる研究所を形成するために、平成 19 年に「世界トップレベル研究拠点形成事業 (World Premier International Research Center Initiative、WPI)」を開始した。国際的な研究環境と支援体制を整備し、最高水準の研究、国際化、システム改革、異分野融合による新しい研究領域を開発することが WPI 拠点のミッションである。東北大学はこのプログラムに採択され、国際的優位を誇る材料科学、物理学、化学、工学分野から最高の研究者を選りすぐり、原子分子材料科学高等研究機構 Advanced Institute for Materials Research (AIMR)を設立した。平成 25 年 3 月現在 31 名の主幹研究者と約 200 名の教職員が AIMR に所属し、そのうちの半数が外国人である。材料科学の研究所として前半 5 年間 (19 年度～23 年度)に顕著な研究実績をあげたが、それを飛躍的に発展させるために、平成 23 年に数学ユニットを設置し、平成 24 年度より数学者を機構長とした。ナノレベルの観測・制御技術に加え、高度な IT 技術が次々と開発される 21 世紀にふさわしい材料開発を目指し、世界に例のない「数学と材料科学の連携拠点」を目指している。

最初は、研究者のボランティアとして始まった数学者と諸科学研究者の出会いの場の形成が、実質的な共同研究に結びつき、また学内での必要性が認められた学内プロジェクトに発展し、さらに数学と材料科学の融合を目指す研究所の設置に結びつき、たくさんの萌芽研究が生まれており、結果が Science, Phys. Rev. Lett., Pure and Appl. Chem., Carbon などの高インパクト雑誌から論文として出版されている。また、新領域として Springer Briefs in Mathematics のシリーズに Mathematics in Materials Science が開始される予定である。研究者の自発的活動に政策が結びつく高い効果があがる実例となっている。

(3) 東京大学 数理科学連携基盤センター

大学院数理科学研究科は 1992 年に設立された。その後、連携併任講座(1996)、21 世紀 COE プログラム(2003-2008)、グローバル COE プログラム(2008-2013)、リーディング大学院プログラム(2012-)を遂行する中で、数理科学と諸科学や産業界との連携が広がられてきた。社会的にも、「忘れられた科学—数学」(2006)、「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」(2007-2016)、「数学・数理科学と他分野の連携・協力の推進に関する調査・検討」(2009)、「数学イノベーションユニット」(2011-)、「数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」(2012-)など、数理科学と諸科学や産業界との連携が強く求められてきた。それに応え、数理科学連携基盤センター (ICMS)は 2013 年 4 月に、産業及び諸科学との連携の下で、学際的な数理科学の研究教育を進めるために設立された。

数学は科学の共通の言葉を提供しているが、それ以上に、実に様々な分野において、科学者が物事を全体として記述するための強力な手段を提供している。したがって数理科学は科学や技術の基礎として不可欠なものになっている。多くの科学分野や産業が、新しい数学の方法や数学の素養を持つ科学者を必要としており、数学とその様々な応用分野との共生関係はますます広がっている。数理科学連携基盤センター (ICMS)は、産業及び諸科学との連携の下で、学際的な数理科学の研究教育を進めることを目的とし、諸科学や産業界との連携を通じて、数学研究を応用に結び付けていくと共に、そのための教育プログラムも整備していくことも目的としている。

数理科学連携基盤センター (ICMS)は、教員 7 名からなる運営委員会の下、学術連携部門、社会連携部門を有し、教員：本務者 4 名（特任准教授 2 名、特任助教 2 名）、兼務者 16 名（教授 12 名、准教授 4 名）、事務職員：本務者 1 名、兼務者 2 名が所属している。運営資金は、数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP)、生物学と数学の融合拠点 (iBMath)、数学協働プログラム (Coop-Math)、JSPS などの外部資金によっている。当面の活動内容は以下のものである。ア 東京大学大学院数理科学研究科設立から 20 年間の学術連携・社会連携の記録の整備。イ 研究の国際連携の推進。ウ 産業界との連携活動の受け入れ窓口としての活動。エ 数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP)における学術連携ならびに社会連携の支援。オ 生物学と数学の融合拠点 (iBMath)の活動の支援。カ 数理科学研究科における数学協働プログラム (Coop-Math)の実施支援。平成 25 年度実施の主な項目は、FMSP、iBMath、Coop-Math によるもの以外に次がある。Study Group Workshop 2013 (2013 年 7 月 31 日～8 月 6 日)、日本インド「アジア学術セミナー2013」離散数学とその応用 (2013 年 11 月 3 日～11 月 10 日)。

数理科学連携基盤センターは大学内部、大学外部との協働を推進するための組織であるので、ビジビリティーを高める必要がある。

研究者育成・教育は、数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP)、生物学と数学の融合拠点 (iBMath)、数学協働プログラム (Coop-Math)の活動を推進する中で行っている。

(4) 明治大学 先端数理科学インスティテュート(MIMS)

先端数理科学インスティテュート(MIMS)は、2007年に設置され、自然や社会の複雑現象と数理の世界の橋渡しである「モデリング」をキーワードとして、「現象数理学」を提唱し推進してきている。2008年6月には、文部科学省事業「グローバルCOEプログラム「現象数理学の形成と発展」が採択され、2013年3月までの5年間、現象数理学の世界の拠点として、「モデリング」をキーワードとして関連研究分野の発展の支援、共同利用・共同研究の支援、この分野で活躍するポスドクの雇用による若手の養成、国際会議・定期的セミナーを実施してきた。

この間、2011年4月には、本プログラムの若手研究者育成を継続する目的で大学院先端数理科学研究科現象数理学専攻が開設された。高度で幅広い数理科学的素養を身に付け、現象数理学を学び、自立して研究活動を行い得る人材の育成を実施する大学院組織が誕生した。更に、2013年度には現象数理学を教授する学部組織として、総合数理学部現象数理学科が開設された。

2013年3月に文部科学省支援の下でのグローバルCOEプログラムが終了したあともグローバルCOEプログラムの更なる展開を目指して、国際的に評価の高い研究分野として「生物・社会と数理の融合研究」、「錯覚と数理の融合研究」、「社会と代数構造の数理の融合研究」そして「折り紙幾何学と計算科学との融合研究」の4つを重要拠点として選び、MIMS内に「現象数理学研究拠点(Center for Mathematical Modeling and Applications (CMMA))を設置し、特に次の4つの活動を中心に行っている。

- (a) 共同研究と研究集会の機会の提供、この分野で活躍するポスドクの雇用による若手の養成、国際会議・定期的セミナーなどを実施して、現象数理学分野の発展と人材養成を推進する。
- (b) 現象数理学分野の国内外の研究者を招聘して共同研究・研究交流を行い、この分野の国際的拠点としての機能も果たす。
- (c) 高校生のための見学会、体験教室、模擬講義、研究発表会などを実施し、次世代を担う若者に現象数理学という学問分野の面白さと重要性を広く知ってもらう機会を作る。
- (d) 現象数理学の若手研究者向けに企業マインドセミナーを開催し、この分野の若手専門家のキャリアパスの中に企業での活躍の道も広く開拓する。

この活動を通じて目指す役割は次の通りである。

現象数理学分野の国内外の研究者に国際的研究交流センターとしての機能を提供すると同時に、その環境を生かしてこの分野で世界を先導する研究機関となる。また、この分野の若手研究者が企業も含めて広く活躍できる道を開拓する。さらに、若者向けの解説・啓もう活動を推進して、現象数理学の面白さと重要性を次世代へ広める情報発信機関となる。

(5) 大阪大学 金融・保険教育研究センター

高度に複雑化し国際的にも相互に関連し合う金融・経済システムに多くを依拠する我

が国にあって、金融・保険の分野におけるスペシャリストの継続的な育成が重要な課題であるとの認識を共有し、この課題の解決を使命として、2006 年度文部科学省特別教育研究経費（連携融合）に向けて、“新領域分野「金融・保険科学」に関する文理融合型教育プログラムの開発”と題するプロジェクトを申請し、採択された。当センターは、これの実施母体として設立され、基礎工学、経済学、理学、情報科学の4研究科連携の下で同年4月に発足した。

当初、大学院副プログラムとして、2011 年度入学生からは大学院副専攻プログラムとしてカリキュラムを提供しているが、博士前期課程を対象とする「スタンダードプログラム」、博士後期課程相当の「アドバンストプログラム」の2階立てになっており、各プログラムは「金融経済・工学コース」「インシュアランスコース」「数理計量ファイナンスコース」の3つのコースからなっている。また、社会人向けに「科目等履修生」用カリキュラムも開放している。プログラム全体の履修生は2012 年度のデータで計145名である。開設科目数は2012 年度で48 科目であり、その中には実務家によるものが10 数科目ある。スタッフは、特任（常勤）教員2～3名の他、4研究科にまたがった兼任教員20 数名の協力の下で実施し始めたが、2009 年6月から大阪証券取引所寄附研究部門「デリバティブ取引とリスクマネジメント」が発足し、この部門に属する特任（常勤）教員1名、特任（非常勤）教員数名が加わった。この寄付研究部門は2014 年3月で終了する。一方、金融実務界13 社と結んだ連携協力協定は継続している。研究活動としては、非定期で年に計10 回程度行われる各種セミナーシリーズや、実務家との連携を図る「中之島ワークショップ」、国際連携のための「国際ワークショップ」等を行っている。また、VXJ 研究グループは日経225 オプション価格のデータに基づき、Volatility Index Japan(VXJ)をVIX による方法で算出、同時に独自方式による精度の高いCSFI-VXJも算出・公開しており[2]、国内外に広く知られ用いられている[3]、[4]。

また、2009 年にはセンターに関わる教員を中心にして、科学振興機構のCREST 課題研究に「複雑な金融商品の数学的構造と無限次元解析」を応募・採択され、活動している。上記特別教育研究経費は2010 年度で終了し、2011 年度から4年間のプロジェクトとして、当センターと情報科学研究科、国立情報学研究所GRACE センターとの協働で、文部科学省特別経費「ソフトウェアイノベーション先導のための研究教育プログラムの開発」に取り組んでいる。

これまで、数学・経済学・計算機科学の分野連携の下に、金融・保険に関わる各分野の教育科目を開放・共有し、また新たに学際的内容や実務的な内容の科目を盛り込んだカリキュラムを組んで博士前期課程の学生を対象とした教育に主に取り組んできたが、今後の課題として、博士後期課程の教育に関して、高度専門職業人・研究者の養成を図り、受講者のキャリアパスの形成を充実させることを検討している。一方、センターに関わった教員のキャリアパスの面では、センターは特に大きな貢献を果たしてきたと思われる。実際、これまでに雇用し、任期を終えた特任（常勤）教員8名全員がパーマネントの職についており、内訳は東北大（1）、東工大（1）、中央大（1）、大阪大（2）、甲南大（1）、関西大（1）、シドニー大（1）である。就職先の専攻・学科は数学系

3、経済学系3、学際系2となっている。

以上述べたように、当センターはグローバルな金融経済システムに支えられた社会に貢献しうる金融スペシャリストの継続的な育成に寄与する文理融合型教育組織であり、金融・保険の分野の重要な研究拠点となっており、学際領域で活躍する若手研究者の育成に寄与している。

(6) 九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所（以下「IMI」と称する）は平成23年4月に設立され、平成25年4月には「産業数学の先進的・基礎的共同研究拠点」として文部科学省共同利用・共同研究の拠点認定を受けた。全国共同利用研究所としては、統計数理研究所、京都大学数理解析研究所に続く我が国で3つ目の数学系研究所である。

IMIの構想は、文部科学省グローバルCOEプログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」（平成20年度-24年度）において、数学の新しい研究領域として考案されたマス・フォア・インダストリ(Math-for-Industry、略称MI)に始まる。マス・フォア・インダストリとは、純粋・応用数学を流動性・汎用性を持つ形に融合再編しつつ産業界からの要請に応えようとすることで生まれる未来技術の創出基盤となる数学の新しい研究領域であると言われている。

IMIは専任教員26名（教授12、准教授10、助教4）、客員教員18名、学術研究員5名を有し、以下の6つの部門より成る。(1) 数学テクノロジー先端研究部門（専任教員8名）：企業や他分野研究者との共同研究を推進する。(2) 応用理論研究部門（専任教員7名）：応用のための理論的研究を進める。(3) 基礎理論研究部門（専任教員7名）：応用に関心のある純粋数学者による基礎研究を行う。(4) 数学理論先進ソフトウェア開発室（専任教員4名）：数学理論や定理をアルゴリズム化し、ソフトウェアとして実装する。(5) 連携推進・技術相談室：産業技術と数学の連携推進と技術相談の窓口。(6) 客員部門：国内外の企業、研究所や他大学の研究者を招聘して最先端の課題を研究する。

IMIを欧米の応用数学・産業数学の研究所と比較すると、純粋数学の研究者を配置しているという特色がある。これは、数学はいつどこで応用されるか予測できず、しばしば基礎研究が爆発的な応用力を内包しているという観点から、長期的視野に立てば、産業への応用研究を進めるためには数学の多様な分野の研究者を確保することが重要であるという観点による。また、数学の産業への応用だけでなく、産業界・他分野から数学研究へのフィードバックの場の構築、新しい数学の問題発掘や萌芽育成を重要視し、産業界との連携により数学それ自身をも豊かにすることを目指していることもIMIの特色である。

MIを実現する取り組みとして、ワークショップや国際会議の企画・運営、スタディグループ（産業界・他分野の未解決問題の解決を目指す研究集会）の企画・運営、産学連携・異分野連携セミナーの開催、技術相談、数学キーテクノロジーに関するチュートリアル、IMI Colloquium（主として産業界の研究者による講演会）の開催等を行っている。また、MIレクチャーノート（講義・講演録、研究集会報告集、他）、Journal of

Math-for-Industry (学術雑誌)、MI プレプリントを公刊している。

さらに、IMI は、九州大学数理学研究院との協力関係を維持発展させることにより、数学の教育研究・若手研究者の育成の拠点としての役割を担っていくことをも目指している。

共同利用研究所としては、公募による研究集会及び短期共同研究を行っており、研究集会では組織委員会と講演者それぞれについて産業界からの参加を必須としている。また、運営委員会（外部委員 12 名、学内委員 4 名、所内委員 6 名）、共同利用・共同研究委員会（外部委員 8 名、学内委員 3 名、所内委員 5 名）には産業界からも委員を迎えている。

IMI のメンバーと企業との共同研究の例として「デジタル映像数学の構築と表現技術の革新」がある（研究成果は[5]でみることができる）。また、COE プログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」ではニュースレターを発行していた。そこでは、暗号解読プロジェクトの成果、トポロジーと力学系理論の情報通信・生命科学等への応用、などの研究成果を解説した記事などを載せている[6]。

3 競争的資金による連携

(1) 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業

ーさきがけ（個人型研究）及び CREST（チーム型研究）ー

戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索（幅広い科学技術の研究分野との協働を軸として）」の下、数学を核とする最初の複合型研究領域「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」（研究総括 西浦廉政 東北大学原子分子材料科学高等研究機構）が平成 19 年度に発足した（平成 27 年度に終了予定）。

① 背景

第 3 期科学技術基本計画にある「新たな知の創造のために、既存の分野区分を越え課題解決に必要な研究者の知恵が自在に結集される研究開発を促進するなど、異分野間の知的な触発や融合を促す環境を整える必要がある。」という記述を受け、数学においても諸科学、諸分野、産業等への広がりとその具体的な連携が各方面から期待されてきた。異分野間の障壁を越えることは容易ではないが、数学は諸科学の基礎となる学問であり、他分野との連携研究により多くの領域での研究開発においてブレークスルーをもたらすものである。したがって、数学それ自体の振興にとどまらず、その成果を活用することで異分野の更なる発展に貢献できるような取り組みに早急に着手することが求められてきた。

② 数学領域の活動概要

数学領域は個人型研究のさきがけとチーム型研究 CREST からなり、研究期間はそれぞれ 3 年半、5 年半である。総括と共に数学基礎論から産業界にわたる 10 名の領域アドバイザーの支援の下、領域全体としてヴァーチャルインスティテュートの形成を目指している。採択については、書面審査、面接を経てさきがけは 308 件の応募から 32 件採択、CREST は 111 件の応募から、13 件採択された（詳細は参考資料参照）。他分野との連携は大きく進展し、双方向的協働による学術論文の成果のみならず、特許出願においても、さきがけ、CREST 含め、国内、外国を合わせ 35 件以上実施（平成 25 年 12 月現在）された。これは数学の潜在的な大きな力を予感させるものと言える。領域としての一体的機能を発揮するために総括及びアドバイザーによるサイトビジットを実施し、合宿型の領域会議も年 2 回のペースで実施した。特にさきがけにおいては異分野間の人的ネットワーク形成とその後の協働に大きくつながった。領域シンポジウム（研究成果報告会）の開催、企業研究所との交流、国際研究集会も実施し大きな成果が得られている。さらに全国各地での様々なアウトリーチ活動（さきがけ数学塾（さきがけ）及び J S T 数学キャラバン（さきがけ＋CREST））も継続的に実施し、高校生からも熱い支持が得られた。明確なミッションの下で組織されたヴァーチャルインスティテュートの発足はさきがけ/CREST という枠組みによって初めて可能となり、ヘテロな研究者・研究分野の相互作用とネットワークの形成は、今後の新たな学術領域の創成を大きく期待させるものとなっている。

なお、平成 19 年度に採択された、さきがけの研究課題の内の 6 つの課題、輸送と渋

滞に関する諸現象の統一的解析と渋滞解消、数学と計算機科学の連携による数理モデルの大域的計算理論、水圏環境力学理論の構築、ウェーブレットフレームを用いた視覚の数学モデル、臨床医療診断の現場と協働する数理科学、「計算システムの科学」のための数学、に関して、その成果が一般書[7]で解説されている。また、さがけ・CRESTでの成果をJSTニュースでもわかりやすく解説している[8]。

(2) 数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム（数学協働プログラム）

本プログラムは、2012 年、文部科学省の委託事業として 2012 年度に発足した。その目標は、全国の数学・数理科学研究者と諸科学・産業界の研究者が集中的・継続的に議論する場を提供し、数学・数理科学と諸科学・産業の協働による具体的課題の解決に向けた研究を促進することである。

統計数理研究所を中核機関とし、8 協力機関（北海道大学数学連携研究センター、東北大学理学研究科、東京大学数理科学研究科、明治大学先端数理科学インスティテュート、名古屋大学多元数理科学研究科、京都大学数理解析研究所、広島大学理学研究科、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所）と連携している。統計数理研究所は事務局として大きな役割を果たしている。最高意思決定機関として、プログラム参加機関代表と関連学会や諸企業等からの外部有識者からなる運営委員会を置いている。数学・数理科学と諸科学・産業との協働による成果が期待できる分野として、2012 及び 13 年度は以下の 6 つの重点テーマを選定した。

1. ビッグデータ、複雑な現象やシステム等の構造の解明
2. 疎構造データからの大域構造の推論
3. 過去の経験的事実、人間行動などの定式化
4. 計測・予測・可視化の数理
5. リスク管理の数理
6. 最適化と制御の数理

本プログラムの運営委員会では、以上に掲げたテーマに関連するワーキング・グループ、研究集会、ワークショップをインターネットにより広く全国から公募し、採択されたものに対して旅費・講演謝金・印刷費などを資金援助している。

現在までの採択実績は以下の通りである。

2012 年度

プログラム開始記念シンポジウム 1 件

ワークショップ 9 件

2013 年度

ワーキンググループ 2 件

研究集会 7 件

ワークショップ 10 件

本プログラムは予算規模も小さく萌芽的な試みではあるが、数学や数理科学と他分野

とのインターフェースを徐々に拡大する試みの一環として、また各地の研究機関の協働関係を構築していくための準備として、大きな意義を持つ。

(3) 日本学術振興会科研費 特設分野 連携探索型数理科学

日本学術振興会は平成 25 年度、新たな試みとして科研費「特設分野研究」を設けた。未開のまま残された重要な分野、技術の長足な進歩によって生まれつつある分野、分野横断的な研究から生まれることが期待される分野を対象として、学術コミュニティからの要望や最新の学術動向等を踏まえて、日本学術振興会の学術システム研究センターが候補分野を提案し、文部科学省の科学技術・学術審議会学術分科会科学研究費補助金審査部会において、平成 26 年度公募に、「ネオ・ジェロントロジー」、「食料循環研究」と共に、「連携探索型数理科学」が設けられた。複数の分野での共通する数学的構造の発見は、諸問題の関連性を浮かび上がらせ、新しい学問を切り開くであろう。このようなことを加速していくために数理科学研究者とそれ以外の研究分野の研究者が連携して今後も応募することが期待されている。なお、従来細目で採択されている研究者がより野心的に連携研究に乗り出すことも期待されている。数理科学は、その抽象性と普遍性により、科学における基盤的地位を有している。既に数理科学と密接な結びつきが確立されている分野以外でも、新たな数学的構造が見出される余地は大きい。

連携探索型数理科学には、217 件の応募があり、数理科学と諸分野の連携に対する学術コミュニティの強い期待の現れと言える。この事業の成果を観察・評価することで、振興が期待できる分野を特定し新領域に発展させるための支援が望まれる。

4 人材育成（主に博士課程での教育）

(1) 数理科学博士課程修了者の産業界への進出：「インターンシップ」

現代社会、特に産業界において数理科学は広大で多様な適用領域を持つており枚挙にいとまがない。例えば、流体関連の数値シミュレーション、ゲノム解析、金融工学、リスク・マネジメント、CAD、CG、情報セキュリティ、LSI の設計などにおいては、偏微分方程式、数値解析、確率論、数理統計学、記号処理の数学的理論、微分幾何学、整数論、最適化理論、グラフ理論、組合せ論といった、多様な数学理論とそのコンピュータ上への実装が必要となっている。

したがって、高度な数学の専門的知識・能力を持ち、企業現場が抱える諸問題を数理的に解決できる高度専門職業人の養成は産業界からの強い要請と期待でもある。しかるに、現在の数理科学系博士課程教育は、研究の後継者養成に偏りがちであり、産業界が大学院教育に期待する人材育成像とはかけ離れたものとなっている。

このような状況を打開して博士課程修了者の社会進出を促進する方策が、数理科学博士課程大学院生を対象とする企業への「長期インターンシップ」の取り組みである。

すなわち、従来行われてきた1～3週間程度の短期インターンシップでは、「産業界の現場を垣間見てきた程度」であり、企業にとっても overhead 的な見方が大半であり、ましてや共同研究・開発を模索することは論外であろう。そこで、例えば3ヶ月以上にわたり企業に滞在する長期インターンシップを実施すれば、①企業にとってもある程度仕事を任せられる、②学生にとっては数理科学の活かし方、使われ方を実体験できる、③大学の教員と連携した共同研究にまで発展する可能性もあり得る、といったメリットが期待できる。

このことが、これまで産業界に定着していなかった「高度な数理的能力を備えて、数学の汎用性と論理性を実際問題に活用できる人材を系統的に採用する仕組み」の創設につながり、ひいては博士課程大学院生の社会進出への道を切り開くと考えられる。

例えば、九州大学大学院数理学府では、21 世紀 COE プログラム「機能数理学の構築と展開」の事業の一環として、博士課程学生に対する3ヶ月以上の長期インターンシップ制度を導入した。同事業終了後もこの長期インターンシップ制度は存続しており、制度を開始した2006 年度から2010 年度までの5年間に36 件（受け入れ企業：18 社）を実施している。その中には、インターンシップを契機として九州大学数理学研究院教員と企業との共同研究にまで発展するケースも現れている。また、インターンシップ実施中に共著論文の執筆や共同特許申請に至った例も複数報告されており、これらの成功例は数学外の専攻分野を含め産官学から大きな注目を集めるに至っている。また、同期間に博士の学位を取得して企業に就職した大学院学生も17 名に達し、そのほとんどが長期インターンシップ経験者である。その後もこの制度は継続し、数理科学の若手研究人材が産業界に進出するというルートを定着させたといえる。

九州大学によるこの事業は、我が国の大学院博士課程学生のキャリアパス形成にも一石を投じることとなったが、このような長期インターンシップが制度として定着するためには、その背景として次のような教育環境があったことに注意する必要がある。

- ① 「応用」ないし「実用」を目ざす数理科学の研究・教育が数学教室に根付いていること
- ② 大学としての「包括的連携協定」の締結など企業との連携が構築できていること
- ③ 適切で有能な専任のインターンシップ・コーディネータが配置されていること
- ④ カリキュラムとしてインターンシップが義務づけられていること
- ⑤ 21 世紀 COE プログラムやグローバル COE プログラムなど、博士の社会進出を必須とする環境に置かれていること

これらをふまえ長期インターンシップ実施には以下のことに留意する必要がある。

- ① 数学を社会に活かすことの重要性を大学院学生に認識させること
- ② 長期インターンシップの引受先を安定的に確保すること
- ③ 学生・教員・企業の間にとって、常時適切な世話ができる体制を構築すること
- ④ 必修単位とするなどの方法により、学生に忌避できないという意識をもたせること
- ⑤ 社会的な使命感・責任を教員団が自覚すること

博士後期課程修了生を毎年複数名輩出する規模の大きい研究科が、組織的に学位取得者の産業界への進出に取り組む場合、上記に記した教育環境の構築に配慮することが望まれる。特に③のコーディネータの配置は、担当教員自身の適性にも依存し多くの労力を要するが、長期インターンシップ制度が定着するまでは不可欠と考えられる。

(2) 諸科学における数理科学研究者のアカデミックポジション

第2章、第3章で述べたように数理科学分野の研究者と他分野との研究者の連携による様々な研究が始まっている。このような融合的な研究を行う研究者が育っていくには、このような研究者が大学や研究所等のアカデミックポジションを得ることができる環境を作ることが必要である。しかしながら、数理科学のみならず他分野においても、「大学院重点化」、「ポストドクター1万人計画」などによって博士号取得者数が大幅に増加した一方で、研究者のキャリアパスは狭く硬直しており、近年、博士課程進学者数の減少を招いている[9]、[10]、[11]。第4期科学技術基本計画（平成23～27年度）では、研究者のキャリアパスの整備が人材育成のための強化すべき取り組みとして掲げられ、テニュアトラック制の普及、定着を進める大学への支援事業を行っている[12]。しかし、これら事業のほとんどは時限付き予算で行われており、大学の運営費交付金の減額に伴い、肝心のテニュアポジションが減少している状況下では抜本的解決とはならない。[10]で述べられているように、若手研究者に希望を与えるには、長期的視点に立った政策の下、長期的、継続的な予算投資を行っていくべきである。また、アメリカの大学のように、大学が多額の基金を保有していれば、期限付きの資金等で雇用していた若手研究者を期限終了後も大学自身の判断で数年間雇い続けることが可能となり、若手研究者の任期に関する不安を多少とも和らげることができる。大学が十分な基金を積み立てることができるような政策を考えていくことも一案である。

5 大学における教育

(1) 理系学生への数理科学教育

数理科学は科学・技術のインフラである。大学初年度における理系学生に対する数理科学教育は科学立国日本の生命線であり、数理科学教育の中でも最も重視されるべき部分である。この段階での数理科学教育は、教養教育の一環としてなされることが多いが、理系の学生にとっては専門基礎としての位置づけになる。この場合、教育の根幹が、必要となる知識の教授と応用力の育成、及び論理的思考力の涵養であることは、時代と共に推移することのない普遍的なものであろう。

理系の学生にとっては、数理科学は専門教育の基盤となるものであるから、講義を理解して数理科学を有効に用いる力を身に付け、具体的な計算力を育むことが必要である。数学基礎教育の2本の柱は微分積分学と線形代数であり、これらは、それ自体が専門科目の理解に役立つだけでなく、高度な数学をさらに学修するための礎となる。具体的な学習科目とその内容としては次のようなものが考えられる。

【線形代数】

線形代数は、一次方程式の世界であり、その本質を抽出したベクトルと行列の概念の理解が学修のテーマとなる。固有値は、量子力学を始め、科学技術の問題解決にしばしば現れる概念であり、その基本的な考え方までは学修すべきである。現実の現象は、線形では捉えきれないことも多いが、近似としての線形の世界が有効に働く局面は多く、線形代数は数理科学の基礎としての意味を有する。

【微分積分】

微分積分は関数の変化をその線形近似として捉えるもので、ここでは極限の概念が重要になる。現象をモデル化して微分方程式として捉えるケースは多く、科学技術のどの分野においても微分積分の有用性には端倪すべからざるものがある。

基礎的な数学の学習を終えた学生に対する数理科学教育は、専門分野の特性に合わせた多様なものとなる。初等整数論、群・環・体の理論、微分幾何学、代数幾何学、複素関数論、関数解析、偏微分方程式、確率論、数理統計学、グラフ理論、結び目理論・トポロジーなど、既に科学・技術に応用されている数理科学は枚挙にいとまがない。偏微分方程式が諸科学に用いられているのは言うまでもないが、初等整数論・代数幾何学や有限体の理論は符号・暗号理論に、複素関数論は流体力学に、確率微分方程式を始めとする確率論は数理ファイナンスに、解析学におけるラドン変換は医療に応用されており、グラフ理論はコンピュータサイエンスを始めとする様々な工学の分野に、結び目理論・トポロジーは生化学のトポイソメラーゼの働きや高分子合成の分野に応用されている。また、素粒子論には偏微分方程式、関数解析、微分幾何学、代数幾何学、複素関数論など様々な数理科学が使われている。

理系の学生に対する数理科学教育について、学協会から様々な要望が寄せられている。数学の知識を増やし演繹推理力を養成するという従来型の教育成果の他に、モデリングを行う能力の育成や、統計的に起こる現象を数学的に捉える力の養成なども大学初年度

での数理科学教育に期待されている。情報科学分野の協力を得て、コンピュータの活用を含む数理科学教育の強化も必要になろう。数理科学教育の現場でも、学生の数学基礎力を育てることを通して、将来の学生の専門につながり、学びの意欲を高めるような工夫が始まっている。例えば、東京工業大学では、数学科の教員が担当している1年次の数学の授業に、工学系の教員が出向いて、数学が工学に如何に役に立つかを、問題等を交えながら紹介し、学生が数学を学修するモチベーションを高める試みを行った実績がある。早稲田大学教育学部では、「解析概論」レベルの数学やコンピュータプログラミングを学びながら、実験を通じて数学・物理学における基礎概念導入の必然性を理解させるコースを、物理学実験として開講している。教養課程における数学教育についての議論が盛んになり、その重要性を認識した教育改善が広がりつつあるが、学協会へのアンケート回答にも、基礎重視から応用重視まで多様な意見の広がりがある。

フォン・ノイマンによるコンピュータの原理の発明のように、数理科学は、時として、社会を根底から変える力を発揮することがある。社会において、数理科学によるイノベーションの期待が高まる中、数理科学教育のあり方については、学生の現状と将来を見定めながら効果的な方法を探っていくことが必要であろう。

(2) 数学科及び大学院における数理科学教育

① モデリング

モデリングとは社会・自然・生物現象などを含む広範な対象から数学の土俵への変換操作である。この変換の方法は、各分野によって、また、同じ分野でも習熟度や理解の深さによって異なるなどやや職人的作業と見なされ、大きな社会的ニーズがあるにもかかわらず、数理科学教育の中ではあまり議論されることはなかった。しかし、人類の課題が複雑化し、また計算技術が高度化する中で、モデリングはもはやアカデミアに閉じたことではなく、ほぼすべての意思決定の手段の一つになりつつある。また、数理科学研究者と諸分野・産業との協働が進む中で、モデリングの重要性が数理科学研究者にも認識され始めている。このような現状を認識し、高等教育の中で数理モデリングをいかに位置づけるかを議論する時期にきている。

自然現象、生命現象、社会現象、すべてに適用できるモデリングの定義付けは困難であることから、ここでは工学的なモデリング手法に絞って以下に述べていく。

モデリングについては、現象に基本方程式や実験式がある場合にも、それらの式を直接解析していく方法（ボトムアップ型）を採用する場合もあるが、基本方程式の系が巨大である場合は、着目している現象に焦点を絞る目的で、マクロ概念の導入や集中離散化によって得られる簡易化されたモデルを用いる方法（トップダウン型）を採用する場合も多い。また、ボトムアップ型であっても解析手法によって異なった方法となることがある。例えば、流体の流れや物体の振動あるいは化学反応などは、一般に偏微分方程式を用いてモデル化されるが、それらを定量的に解くための近似手法としての差分法や有限要素法なども含めて考えると、その方法にはかなりの違いが発生する。

基本方程式が見つからない場合は、過去の経験や実験で得られた諸知識から様々なデータ群に基づいたモデルが使われる。この場合は、経験した現象範囲でのみ適用が可能である。また、異なる数学分野の技法を融合し、全く新しい定式化を行うことにより、数理モデルが得られるケースもある。例えば、交通流は自然現象とは異なるため当初は数理モデルなしで検討されていたが、各地点の交通流量と車両密度との関係に相転移現象を思わせる図が得られることから渋滞の数理モデルが導かれ、研究に広がりと深みを与えている。

現象を直接説明する数理モデルの導入が困難な場合は、機械学習、ニューラルネットワークなどを用いたデータ駆動型モデルを使用し、統計学的手法を用いてパラメータを決定、あるいは変化させていくという手法が用いられる。

ボトムアップ型のモデリング以外においては、モデリングには分野によっての違いや個人差がある。同じ工学系でも分野が違えば互いのモデルを理解することは難しい状況であり、モデリングの共通言語化が重要になりつつある。近年のハイブリッド自動車などメカトロニクス分野などでは、一人の技術者が電気・電子工学、機械工学両方のトップダウン型モデルを扱うケースも多いが、最近、共通のトップダウン型モデリングの再構築が一部でなされつつある。

モデリングの教育をどのように行うかは今後検討すべき課題であるが、先にも述べたようにモデリングには多様性があり、一つの教育システムとして統一して構築できるかどうかは明らかではない。特に支配原理や基本方程式が明確でない課題の場合にはそういった議論は一層困難であろう。一方で、例えば交通流のモデルなど、数理的手法の援用により数理モデルが得られた場合には、数理的手法に関する教育の代表的なアプローチとして、一般論ではあるが次のような手順が考えられよう。

- ・ 経験や実験で得られたデータ群から基礎となる方程式を推測
- ・ 基礎となる方程式からモデルを構築
- ・ モデルに基づき数値シミュレーションなどを行いデータ等と比較、評価

これらの手順においては、種々の数値解法や機械学習、ニューラルネットワークなどの知識を教えると共に統計学の教育も必要となる。

なおモデリングは、数理科学だけの問題ではなく、自然科学、人文科学といった分野を問わず、すべての研究者にとって重要であり、モデリングの教育は全分野の研究者が一体となって考えるべきものである。

② 統計教育

日本では、欧米先進諸国、韓国、中国などとは異なり統計を専門とする学部が存在しない（後述する総合研究大学院統計科学専攻をのぞいて）。そのため、統計教育は、様々な学科に分散した教員が担当している現状がある。特にその数理的な側面については、数学関連学科、研究科が担っている。特筆すべきこととしては、近年ではいくつかの大学において、社会の様々な要請に応える形で、正規のカリキュラムとは別の統計プログラム教育コースが新設されている。例えば東京大においては、平成17年度に数理科学研究科においてアクチュアリー・統計プログラムが設けられた。これは未

来のアクチュアリー（アクチュアリーとは資格試験を通った保険年金数理のプロのことである。詳しくは[13]を参照されたい）を養成していくと同時に、数理統計学の基礎を体系的に学んだ統計家を養成することを目的としている。具体的には、将来アクチュアリーに必要となるファイナンス・リスク管理及びその統計的取り扱い、保険数理を含んだ確率論・統計学の包括的教育がなされている。また大阪大では学内6研究科の協力の下に、統計学を体系的に履修できる大学院等高度副プログラム「データ科学」が平成26年度に新設される。同プログラムは、統計数理コース、機械学習コース、人文社会統計学コース、保健医療統計学コース、経済経営統計学コースの5つの履修コースを提供する[14]。前述の総合研究大学院統計科学専攻は、大学共同研究機関法人統計数理研究所を基盤とする博士後期課程を中心とする教育機関である。数理・推論研究系に属する教員を中心に、数理統計、機械学習、最適化の教育が行われている[15]。

平成22年8月20日に統計関連学会連合理事会、同統計教育推進委員会によって、報告書「統計学分野の教育課程編成上の参照基準」[16]が公表されている。その内容は、参照基準策定の基本的考え方、参照基準の基礎となる統計学の考え方・ポイント、統計学の教育課程編成上の参照基準、大学基礎科目としての統計教育の参照基準（心理学・教育学、経済学、社会学、経営学、数理科学、工学、医学・薬学）にわたる。また文部科学省の平成24年度大学間連携共同教育推進事業として「データに基づく課題解決型人材育成に資する統計教育質保証」が選定され、それを受けて「統計教育大学間連携ネットワーク」[17]、[18]が発足した。これは我が国の大学における統計教育の体系化が不十分という現状を大きく変革することを指向するものである。大学における統計教育の標準的カリキュラム体系の策定、その体系に基づく標準的コンテンツの作成、達成度評価の整備を通して、データに基づく科学的な思考力、すなわち統計思考力を持った人材育成のための教育を目標としている。

③ 数学の応用例について

数理科学委員会数学分科会は平成25年2月に理学・工学系協会連絡協議会各学協会へのアンケート調査依頼を行い、数学の応用に関する文献をあげていただいた。あげられた文献は付録にすべてを記載してある。また、海外でも、数学イノベーションについての調査は様々な学会が中心となっており、特に、The Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) は13000人以上の会員を有する応用数学の学会であるが、2009年に数学の応用についてのレポートを出版している[19]。また、欧州数学会は欧州における産業数学における成功例についてシュプリンガー社からレポートを出版している[20]。その中に紹介されている大学と企業の共同研究の例を2、3あげると、高速鉄道の車両内の音響場についての解析 (p. 9)、非線形シュレディンガー方程式を用いた巨大波の解析法 (p. 32)、公共交通システムの最適化問題についての研究 (p. 92) などがある。これらから、実際に社会や企業での数学がイノベーションに果たす役割の重要性が見られる。

6 初等中等教育における算数・数学教育

グレート・ジャーニー説によれば、人間社会は、アフリカで誕生した人間が環境適応しながら地球全体に広がった結果できた、グローバル（地球規模的）な、つながり（ネットワーク）が重要な社会であり、そこで生き抜いていく上で大切なことは、筋の通った議論ができ、公正な判断ができるということである。これこそが初等中等教育で教授されるべき基本能力であり、算数・数学という教科において培われるべき能力である。しかし現在の算数・数学教育には、特に数理科学と社会との結びつきに関し、いくつか問題点が存在する。

公正な判断のためには、必要なデータを集めて統計的手法を使って判断する力が求められる。今後、初等教育から高等教育に至るまでの各段階における統計リテラシーを重視した統計教育がますます必要となる。指導要領の改訂により統計教育に対する関心は高まっているが、教育現場では具体的な指導方法に苦慮しており、統計教育に関して教員への研修の充実や実践的な統計教育の充実の必要性が指摘されている[21]。

また、学生の論理的に思考する過程における能力について、いくつかの課題が指摘されている[22]。論理的思考の多面性に鑑み、図形の「証明」に限定せず、様々な場面で論理的思考を育むことが必要である。

日本の教科書は、諸外国に比べて、数学がどのように社会で応用されているかの記述が少ないことが指摘されている[23]。また、IEA 国際数学・理科教育動向調査の2011年調査[24]及びOECD 生徒の学習到達度調査(PISA)2012年調査[25]においても、日本の学生は数学の有用性をあまり理解していないという結果が出ている。学生が数学を学ぶ意義を実感できるように、数学と社会での役割を教えていく必要がある。

また、この二つの国際調査では、日本は諸外国に比べて、学校におけるデジタル教材やPCの活用が余りなされていないこと、教員がこれらの活用法についてあまり研修を受けていないことも明らかとなっており、早急に対策をとる必要がある。

諸外国に比較して教師の科学的素養と専門的教養が平均的に低いことが指摘されている[26]。その原因として、教員養成制度に課題があること、特に「教科に関する専門科目」をあまり履修せずに教員となることが多いこと、及び教員の中の大学院修了者の率が低いことがまず指摘されている。さらに、諸外国に比して研修への参加機会が少ないことも大きな問題として指摘されている。算数・数学教育についていえば、数学の社会での役割をまず教員が理解するためには、数学や関連する科目をもっと履修するような方策を取る必要がある。教員となった後も急速に変化していく科学・技術について学ぶためにも様々な研修の機会を与える必要がある。

算数・数学の教員の採用に当たっては、教科をきっちりと修得していることを確認するため、また教員を目指す学生時代に教科の勉強をするよう促すために、数学の証明問題の出題や数学の試験の点数配分を多くするなどの方策が有用である。

7 まとめとして

現在、数理科学と他の分野科学・産業との連携による研究活動を行うという機運が高まっている。大学においては数理科学関連の研究科が中心となって規模の大きい連携組織がこの10年の間にいくつも設立された。また、2007年度には科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業として数理科学と他分野の研究を支援するための複合型研究領域が創設され（2014年度にも同じ趣旨の領域が設定されている）、また2012年度より文部科学省の委託事業として数理科学と諸科学・産業との協同研究促進プログラムが始まり、さらに2013年度より数理科学と他分野との共同研究促進のために日本学術振興会科研費の特設分野が設けられるなど、政府による支援も行われている。しかし、これにより、数理科学と他の分野科学・産業との連携が一挙に進展するとは必ずしも言えない状況にある。

数理科学の研究は基本的に理論研究であり、多くの研究者が自身の考えに基づき独立して研究を行うことが多様な研究を生むために必要である。多様性の中から、諸科学・産業で真に役立つ研究が現れてくる。他分野科学・産業との連携を意識した研究を行う研究者はまだ少ないため、若手研究者を多く育成することが急務となっている。しかし、大学にできた新しい連携組織のほとんどは期限付きの資金により維持されているため、任期付きのポジションしか持たないところが多い。また数理科学に限らず、融合分野の研究者は任期終了後のキャリアパスがはっきりしていない。若手研究者が将来に不安を抱えずに研究に専念できるような制度を整備していく必要がある。

大学院での教育に関しても、新たな分野の研究者や高度な数学知識を持つ専門職業人の育成を目的とした新しい教育の試みが始まったばかりであり、適切な教育制度を作り上げるには経験の積み重ねと共有が必要である。数理科学の社会との連携、社会への貢献を進めるには、大学での数理科学教育、初等中等教育での算数・数学教育の役割も重要である。これまでの教育においては、数理科学の社会での役割、数学の有用性を学生に実感させ、基礎数学を学ぶ動機を与えることが十分にはなされてこなかった。この点をふまえて教育も変革していく必要がある。

本報告では、数理科学と他の分野科学・産業との連携を進める上での様々な課題をあげたが、これを解決するためにどのような政策がとられるべきか、今後も数学分科会において検討を行っていく。

<参考文献>

- [1] 細坪護孝、伊藤裕子、桑原輝隆 『忘れられた科学—数学：主要国の数学研究を取り巻く状況及び我が国の科学における数学の必要性』 文部科学省科学技術政策研究所、Policy Study No.12 2006 年 5 月
- [2] 大阪大学 金融・保険教育研究センターの VXJ の HP
<http://www-csfi.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/structure/activity/vxj.php>
- [3] “From tsunami to Typhoon” :The Economist March 26th 2011, pp.67-68.
- [4] “Forecasting with Option-Implied Information” 表 10.1. Volatility Indexes Around the World (597page) : Handbook of Economic Forecasting, Vol.2, Chap. 10, G. Elliott and A. Timmermann (eds.), North Holland.
- [5] デジタル映像数学の構築と表現技術の革新 Mathematics for Computer Graphics
<http://mcg.imi.kyushu-u.ac.jp/index.php>
- [6] マス・フォア・インダストリ教育研究拠点ニュースレター vol.7 p.1, p.5, vol.8 p.3
http://gcoe-mi.jp/publish_list/pub_inner/id:1
- [7] 西浦廉政 編 『越境する数学』 岩波書店 2013 年
- [8] JST ニュース 2007 年 11 月号 p.12, 2009 年 1 月号 p.14, 2010 年 2 月号 p.14, 2011 年 5 月号 p.14, 2012 年 6 月号 p.16, 2013 年 4 月号 p.8, 2013 年 9 月号 p.12, 2013 年 11 月号 p.12 <http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/>
- [9] 日本学術会議 数理科学委員会 数理科学振興策検討分科会、提言『数理科学における研究と若手養成の現状と課題』2008 年 8 月 28 日
- [10] 日本学術会議 環境学委員会・数理科学委員会・物理学委員会・地球惑星科学委員会・情報学委員会・化学委員会・総合工学委員会・機械工学委員会・電気電子工学委員会・土木工学・建築学委員会・材料工学委員会合同 若手・人材育成問題検討分科会 数理科学振興策検討分科会、提言『新しい理工系大学院博士後期課程の構築に向けて—科学・技術を担うべき若い世代のために—』2008 年 8 月 28 日
- [11] 日本学術会議 科学・技術を担う将来世代の育成方策検討委員会、提言『科学・技術を担う将来世代の育成方策～教育と科学・技術イノベーションの一体的振興のすすめ～数理科学における研究と若手養成の現状と課題』2013 年 2 月 25 日
- [12] 文部科学省 平成 25 年版 科学技術白書
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201301/1326593.htm
- [13] 公益社団法人日本アクチュアリー会 HP <http://www.actuaries.jp/index.html>
- [14] 大阪大大学院等高度副プログラムに向けた活動
<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/~Estat/subprogram.html>
- [15] 「数学通信」第 17 巻第 4 号, p.41 数学教室だより (統計数理研究所)
<http://mathsoc.jp/publication/tushin/1704/ism.pdf>
- [16] 統計学分野の教育課程編成上の参照基準
<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/atstat/statedu/shitsu/sanshouki-jun-20100820.pdf>

- [17] 統計教育大学間連携ネットワークホームページ <http://jinse.jp/>
- [18] 統計教育大学間連携ネットワーク 平成 24 年度 (2012) 総合報告書
<http://jinse.jp/pdf/24souhou.pdf>
- [19] APPLIED MATHEMATICS AT THE U. S. DEPARTMENT OF ENERGY: Past, Present and a View to the Future
http://science.energy.gov/~media/ascr/pdf/program-documents/docs/brown_report_may_08.pdf
- [20] Forward look: Success stories - The European Mathematical Society
http://www.euro-math-soc.eu/files/FLMI-Success_Stories-v3.pdf
- [21] 「公的統計の整備に関する基本的な計画」 第 II 期基本計画 (平成 26 年 3 月 25 日閣議決定)
- [22] 国立教育政策研究所 教育課程研究センター 『特定の課題に関する調査 (論理的な思考)』 平成 25 年 3 月
- [23] 国立教育政策研究所 『第 3 期科学技術基本計画のフォローアップ「理数教育部分」に係る調査研究』 平成 21 年 3 月
- [24] 国立教育政策研究所編『算数・数学教育の国際比較 国際数学・理科教育動向調査の 2011 年調査報告書』 明石書店 2013 年
- [25] 国立教育政策研究所編『生きるための知識と技能 5 OECD 生徒の学習到達度調査 (PISA) 2012 年調査国際結果報告書』 明石書店 2013 年
- [26] 日本学術会議 教師の科学的素養と教員養成に関する検討委員会、要望
『これからの教師の科学的教養と教員養成の在り方について』 2007 年 6 月 22 日

＜参考資料＞ 数理科学委員会数学分科会審議経過

平成 23 年

11 月 16 日 日本学術会議幹事会（第 140 回）
分科会設置、委員決定

平成 24 年

3 月 21 日 数理科学委員会数学分科会（第 1 回）
○ 審議事項、今後の進め方について
7 月 1 日 拡大懇談会（第 1 回）
9 月 26 日 数理科学委員会数学分科会（第 2 回）
○ 論点整理

平成 25 年

2 月 13 日 理学・工学系協会連絡協議会各学協会へのアンケート調査依頼
7 月 29 日 拡大懇談会（第 2 回）

平成 26 年

3 月 26 日 数理科学委員会数学分科会（第 3 回）
○報告書案について
3 月 26 日 公開シンポジウム「数理モデリング（数学と諸科学・産業との連携の観点から）」 開催

○月○日 日本学術会議幹事会（第○回）
数学分科会報告「数学と他分野科学・産業との連携」について承認

〈付録〉 理学・工学系協会連絡協議会所属学協会へのアンケート

数理科学委員会数学分科会は平成 25 年 2 月 13 日に理学・工学系協会連絡協議会各学協会へのアンケート調査依頼を行った。質問は以下の 2 項目である。

1. 貴学協会に関連する分野で数学が役立っている事例がありましたら、その内容または参考となる図書や文献を（出来るだけ多く）お教え下さい。
2. 大学における数学教育に関してですが、どのような内容を教えるべきか、どのような形で教えるべきかについて、貴学協会から要望がありましたらお知らせ下さい。

これに対して、日本結晶学会、映像情報メディア学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会、日本セラミックス協会、情報処理学会、都市住宅学会、高分子学会、横断型基幹科学技術研究団体連合の 8 学協会から回答を頂いた。この場を借りて感謝の意を表したい。2 の項目の数学教育に対する意見は多岐にわたるため、詳細は記載できないが、報告中の 5. 大学における教育 (1) 理系学生への数学教育 において参考にさせていただいた。

1 の項目であげられた数学の応用に関する文献については、その後の調査で得た文献を含めて下記に記載する。

X 線結晶構造解析（化学新シリーズ） 大橋 裕二（著） 裳華房 2005 年

「X 線解析入門」 角戸 正夫、 笹田 義（著） 東京化学同人 1993 年

「粉末 X 線解析の実際」 中井 泉、 泉 富士夫（著） 朝倉書店 2009 年

日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌 刊行後、1 年以上 オープンアクセス

The mathematics of diffusion, by J. Cran, 2nd ed. - Oxford Clarendon Press, 1979

結晶工学の基礎 応用物理学選書 小川智哉著 裳華房 1998 年

Universal Relaxation Law: Dielectric Relaxation in Solids by A K Johnscher Chelsea Dielectric Press 1995

量子材料化学入門—DV-X α 法からのアプローチ 三共出版 足立裕彦他 2010 年

金属材料の量子化学と量子合金設計 三共出版 足立裕彦他 1997 年

固体内の拡散 シュウモン コロナ社 笹木和夫・北澤宏一共訳 1994 年

粉末 X 回折の実際 朝倉書店 中井泉・泉富士夫著 2009 年

「重畳表示型ビデオチャットにおける枠の 3 次元的な移動と存在の効果」吉野 孝， 藤田 真吾， 情報処理学会論文誌, 54(1), 249-255 (2013-01-15)， 1882-7764

「Excel で今すぐ実践! 感性的評価—AHP とその実践例」 酒井 浩二（著）， 山本 嘉一郎（著） ナカニシヤ出版 2008 年 ISBN-10: 4779502691

「信頼の構造：こころと社会の進化ゲーム」 山岸俊男 東京大学出版会 1998 年

「ネットワーク分析—何が行為を決定するか」 安田 雪 新曜社 1997 年

「ショッピング情報を用いた予測モデル構築法の検討」 江崎 健司， 石黒 勝彦， 倉島 健， 高屋 典子， 内山 匡 情報処理学会研究報告 グループウェアとネットワークサービス

(GN) , 2013-GN-87(2), 1-5

「スピーカの配置に基づいたサラウンド音場補正手法の提案と評価」 秋山 大知 , 金井 秀明 情報処理学会 研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN) , 2013-GN-87(5), 1-8

「推薦システムのアルゴリズム(2)」神嶌 敏弘 人工知能学会誌 23(1), 89-103, 2008-01-01.

都市住宅学会機関誌『都市住宅学』76号(2012年7月)掲載

- ・水谷徳子氏 「公的賃貸住宅は民間賃貸住宅をクラウドディング・アウトしているのか？」
- ・谷下雅義氏・長谷川貴陽史氏・清水千弘氏 「地区計画・建築協定の規制が戸建住宅価格に及ぼす影響」

高分子学会機関誌「高分子」の2008年2月号 特集「数学と高分子」

- ・高分子科学における数学の効用 三宅 彰
- ・高分子とカオス 異常拡散と階層的規則性 松永 康佑, 小松崎 民樹
- ・高分子とフラクタル 超撥水性表面とフラクタル 辻井 薫
- ・対称性と群論 松澤 淳一
- ・高分子と対称性 共連続立方相とアルキメデスタイリング 松下 裕秀, 堂寺 知成
- ・高分子と統計力学 ループ・レプリカ・カスケード 田中 文彦
- ・高分子トポロジー化学 ポアンカレと見る高分子の「かたち」 手塚 育志
- ・高分子とソリトン 共役ポリマーにおけるソリトンとポーラロン 田中 一義

高分子と数学とに関連した専門雑誌「MACROMOLECULAR THEORY AND SIMULATIONS」

「遺伝的アルゴリズムを使った物性推算で成功例」として

長阪 匡介、「高分子物性データベースの構築と物性予測手法」、日本化学会情報化学部会誌 Vol. 22 (2004) No. 3 (August) P 38

「重回帰式を使った高分子物性推算」として

Properties of Polymers: D. W. van Krevelen, Klaas te Nijenhuis, Elsevier, 2009, ISBN 0080915108, 9780080915104

Prediction of Polymer Properties, Jozef Bicerano, CRC Press, 2002, ISBN 0203910117, 9780203910115

Physical Properties of Polymers: Prediction and Control, Andrey A. Askadskii, Gordon and Breach Publ., 1996, ISBN 2884492208, 9782884492201

「高分子物理全般（数学的アプローチが前提）」の代表的文献

Statistical Mechanics of Chain Molecules, Paul J. Flory, Hanser Gardner Publications, 1989, ISBN 1569900191, 9781569900192

Scaling Concepts in Polymer Physics, Pierre Gilles De Gennes, Cornell University Press, 1979, ISBN 080141203X, 9780801412035

The Theory of Polymer Dynamics, Masao Doi, Sam F. Edwards, Oxford University Press, 1988, ISBN 0198520336, 9780198520337

The Physics of Polymers: Concepts for Understanding Their Structures and Behavior,
Gert R. Strobl, Springer, 1997, ISBN 3540632034, 9783540632030

「フラクタル次元解析」として

Mikihito Takenaka, "Analysis of structures of rubber-filler systems with combined scattering methods", Polymer Journal (2013) 45, 10~19.

流体力学序説 (内田茂男, 森北出版 1990 年), 流体力学 前編 (今井 功, 裳華房 1973 年),
流れ学 (谷一郎, 岩波全書 1967 年), 流体力学 (日野幹雄, 朝倉書店 1992 年),
流体力学 (巽 友正, 培風館 1995 年), 流体力学 1, 2 (ランダウ=リフシッツ, 竹内 均
訳, 東京図書 1970 年),

気体力学 (リープマン・ロシュコ, 玉田 琰訳, 吉岡書店 2000 年),

気体力学 (西田迪雄, 吉岡書店 2004 年), 宇宙飛行体の熱気体力学 (久保田弘敏他 2 名,
東京大学出版会 2002 年), 乱流: 流体力学の進歩 (谷 一郎, 丸善 1980 年), 等角写像と
その応用 (今井 功, 岩波書店 1979 年), 気液二相流 (植田辰洋, 養賢堂 1981 年),

Boundary-Layer Theory (Schlichting, McGRAW-HILL 1987), Turbulence (Hinze,
McGRAW-HILL 1975), Introduction to Physical Gas Dynamics (Vincenti & Kruger, KRIEGER
1975), 流体力学の数値計算法 (藤井孝蔵, 東京大学出版会 1994 年),

流体力学ハンドブック (日本流体力学会編, 丸善 1998 年)

ジェットエンジン概論 (J.L. ケルプロック/梶昭次郎・訳、東京大学出版会 1993 年)

超高速液流翼の流体力学 (西山哲男、東京図書出版会 2004 年)

回転機械の力学 (石田幸男・山本敏男、コロナ社 2001 年)

振動・音響学 (鈴木浩平・西田公至・丸山晃市・渡辺武、サイエンス社 1989 年)

伝熱工学 (庄司正弘、東京大学出版会 1995 年)

機械系のための数学 (高木周、数理工学社 2005 年)

ベクトル解析 (上野和之、共立出版 2010 年)

はじめての CFD (棚橋隆彦、コロナ社 1996 年)

反復法の数理 (張紹良・藤野清次、朝倉書店 1996 年)

界面ダイナミクスの数理 (太田隆夫、日本評論社 1997 年)

動く曲面を追いかけて (儀我美一・陳蘊剛、日本評論社 1996 年)

L. J. Segerlind 著、川井忠彦監訳、築地恒夫他共訳、『応用有限要素解析』、丸善 1992 年

S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill 1970

S. T. Dennis and A. N. Palazotto, "Nonlinear Analysis of Shell Structures," AIAA
Education Series 1992

M. N. Bismarck-Nasr, "Structural Dynamics In Aeronautical Engineering," AIAA
Education Series 1999

A. Mouritz, "Introduction to Aerospace Materials," AIAA Education Series 2012

K. K. Gupta and J. L. Meek, "Finite Element Multidisciplinary Analysis, Second
Edition," AIAA Education Series 2000

R. L. Bisplinghoff, H. Ashley and R. L. Halfman, "Aeroelasticity," Dover 1996

高橋幸伯、町田進、『基礎 材料力学』、培風館 2004 年
 井上達雄、『弾性力学の基礎』、日刊工業新聞社 1997 年

小林繁夫、『航空機構造力学』、プレアデス出版；増補新版 2014 年
 小松敬治、『機械構造 振動学』、森北出版 2009 年
 日本機械学会編、『モード解析の基礎と応用』1986 年
 足立修一、『システム同定の基礎』、東京電機大学出版局 2009 年
 高見穎郎、河村 哲也著、『偏微分方程式の差分解法』、東京大学出版会 1994 年
 緒方秀教、『変分法』、コロナ社 2011 年
 清水昭比古、『連続体力学の話法 流体力学、材料力学の前に』、森北出版 2012 年
 Celestial Mechanics Vol.1,2 (Yusuke Hagihara, MIT Press, 1970, 1972)
 Celestial Mechanics Vol.3,4,5 (Yusuke Hagihara, JSPS, 1974, 1975, 1976)
 天体力学講義（堀源一郎、東京大学出版会、1988 年）
 キーポイント力学（吉田春夫、岩波書店、1996 年）
 天体と軌道の力学（木下宙、東京大学出版会、1998 年）
 力学（大貫義郎・吉田春夫、岩波書店、2001 年）
 天体の位置と運動（福島登志夫・編、日本評論社、2009 年）
 力学の解ける問題と解けない問題（吉田春夫、岩波書店、2005 年）
 Periodic orbits and binary collisions in the classical three-body Coulomb problem,
 M.M.Sano and K.Tanikawa, Physics Letters A, Vol. 372, 6899 – 6903 (2008)
 天体物理学基礎理論（加藤正二、ごとう書房、1989 年）
 天体物理学の基礎 I, II（観山正見・他（編）、日本評論社、2008, 2009 年）
 シミュレーション天文学（富阪幸治・他（編）、日本評論社、2007 年）
 光学（久保田広、岩波書店、1964 年）
 反射望遠鏡（山下泰正、東京大学出版会、1992 年）
 宇宙の観測 I 光・赤外天文学（家正則・他（編）、日本評論社、2007 年）
 宇宙の観測 II 電波天文学（中井直正・他（編）、日本評論社、2009 年）
 Light-weight telescope structure optimized by genetic algorithm, M.Kurita et al.,
 SPIE, Vol. 7733, 77333E (2010)
 数理工学への誘い、東京大学工学部計数工学科数理情報工学コース編、日本評論社 2002
 年