

数学は世界を変えられるか？  
～「忘れられた科学－数学」から 10 年  
数学イノベーションの現状と未来

平岡裕章 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授

水藤 寛 岡山大学 大学院環境生命科学研究科 教授

中川淳一 新日鐵住金(株) 先端技術研究所 数理科学研究部 上席主幹研究員

西浦廉政 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授

2015 年 4 月

文部科学省 科学技術・学術政策研究所

文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課 数学イノベーションユニット

本講演録は、2015年4月16日に文部科学省で行われた、東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授 平岡裕章氏、岡山大学大学院環境生命科学研究科 教授 水藤寛氏、新日鐵住金(株)先端技術研究所数理科学研究部 上席主幹研究員 中川淳一氏、東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授 西浦廉政氏の講演会の内容を、講演者の了承のもとに当研究所においてとりまとめたものである。

また、本講演録の内容は、講演の記録として講演者の見解を掲載しており、当研究所の公式の見解を示すものではないことに留意されたい。

編集責任者 : 文部科学省 科学技術・学術政策研究所  
文部科学省研究振興局 基礎研究振興課 数学イノベーションユニット  
問合せ先 : 〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関 3-2-2  
TEL:03-3581-2395 FAX:03-3503-3996

本講演録の引用を行う際には、出典を明記願います。

## 目次

講演会概要	3
講演内容	7
○要約	9
○開会挨拶	11
○数学イノベーションの取組について	13
○数学と他分野・産業との協働による研究の紹介	19
「材料・生命・情報通信と応用トポロジー」	19
「高齢化社会における日本の臨床医療とそれに貢献する数理科学の役割」	33
「数学が製造現場・研究現場を変える ～数学イノベーションの可能性」	49
○意見交換	65
○閉会挨拶	73



# 講演会概要



## 講演会概要

演題： 「数学は世界を変えられるか？ ～「忘れられた科学－数学」から10年 数学イノベーションの現状と未来」

日時： 2015年4月16日(木) 15:00～17:00

場所： 文部科学省 13階会議室 13F1, 2, 3

プログラム：

○開会挨拶

行松泰弘 文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課 課長／数学イノベーションユニット長

○数学イノベーションの取組について

栗辻康博 文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課 融合領域研究推進官／数学イノベーションユニット次長

○数学と他分野・産業との協働による研究の紹介

「材料・生命・情報通信と応用トポロジー」

平岡裕章 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授

「高齢化社会における日本の臨床医療とそれに貢献する数理科学の役割」

水藤 寛 岡山大学 大学院環境生命科学研究科 教授

「数学が製造現場・研究現場を変える ～数学イノベーションの可能性」

中川淳一 新日鐵住金株式会社 先端技術研究所 数理科学研究部 上席主幹研究員

○意見交換

モデレーター：西浦廉政 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授

○閉会挨拶

奈良人司 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 所長

講師略歴:

平岡裕章(東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授)

2009年広島大学大学院理学研究科准教授、2011年九州大学マス・フォア・インダストリ研究所准教授を経て、2015年より現職。主にトポロジー・力学系・計算機を用いて材料・生命科学や情報通信分野への応用数学に従事。その間、2008年より科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業さきがけ研究者として「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」研究領域に所属(研究テーマ:シャノン限界の実現と次世代情報通信理論の構築)。

水藤 寛(岡山大学 大学院環境生命科学研究科 教授)

1986年千葉大学理学部物理学科卒業。会社勤務等の後、1996年千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程入学、1998年博士(工学)の学位取得、同年千葉大学工学部助手、2002年岡山大学環境理工学部助教授を経て、2010年より現職。その間、数理科学と数値シミュレーションをバックグラウンドとして、様々な分野との協働研究を進めてきている。2004年より科学技術振興調整費の重要課題解決型研究の一つである廃棄物処分場からの有害物質評価に関する研究プロジェクトに参加し、廃棄物科学や衛生工学分野との協働研究を経験した。2007年より科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業さきがけ研究者として「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」研究領域に所属し、臨床医学者との協働研究を推進してきている。2010年より同領域のCREST研究チームのひとつである「放射線医学と数理科学の協働による高度臨床診断の実現」研究代表者。

中川淳一(新日鐵住金株式会社 先端技術研究所 数理科学研究部 上席主幹研究員)

1979年大阪大学基礎工学部化学工学科卒業、1981年大阪大学大学院化学工学研究科修士課程修了、1981年新日本製鐵株式会社入社、大分製鐵所設備部配属、1995年部長代理、1997年技術開発本部主任研究員、2001年主幹研究員、2012年より現職。2013年より東京大学大学院数理科学研究科連携併任非常勤講師(客員教授)を兼務。2000年から数学者との連携を開始し、数学を活用した研究現場・製造現場のイノベーションに従事。

西浦廉政(東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授、主任研究者)

1950年大阪府生まれ。京都大学理学部卒業。広島大学教授、北海道大学電子科学研究所教授、2003-2005年同研究所所長などを経て、2012年より現職。理学博士。2007年より、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」領域の研究総括をつとめる。2002年日本数学会賞秋季賞、2012年文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。Physica D, SIADS, Mathematics of Planet Earth (Springer)等の編集委員。

# 講演内容



## ○要約

平成 18 年(2006 年)の科学技術政策研究所の報告書「忘れられた科学－数学」において新たなイノベーションにおける数学の重要性が指摘されたことを受け、文部科学省では数学イノベーションユニットを設置し、数学イノベーション(※)に関する取組を行ってきました。しかし、数学の姿は外からは見えづらく、実際にどのような研究が行われ、どのような成果が出ているのかは分かりにくいところがあります。そのため本講演会が企画されました。

具体的には、平岡裕章氏(東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授)より、数学的シーズ(トポロジー)が生命・材料・情報通信等に応用されている事例、水藤寛氏(岡山大学大学院環境生命科学研究科 教授)より、臨床医療の現場からの具体的ニーズに数学側が応えた事例、中川淳一氏(新日鐵住金株式会社先端技術研究所数理科学研究部 上席主幹研究員)より、企業の現場が抱える問題や社会的問題に関して、これまで応用が考えられてこなかった純粋数学(代数、数列など)からの視点が役立った事例、を紹介いただきました。そして、数学イノベーションを加速するために必要なこととして、①地道で継続的な投資支援、②数学的アイデアを可視化できる人材による支援、③若手数学者参入のためのキャリアモデル、④数学研究者の目を外に向かせる仕組み、等をご提案をいただきました。

講演後の意見交換では、西浦廉政氏(東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授)から問題提起をしていただいた後、諸問題の解決のためのブレークスルーに必要な人材像、社会と数学がジョイントするための場、数学のシーズが現実社会において潜在的に持っている大きな市場の積極的顕在化について議論が行われました。

なお、本講演には産・学・官から 81 名の御参加をいただきました。

(※)「数学イノベーション」とは、産学の諸問題を数学・数理科学からのアプローチで解決に導き、新たな社会的価値や経済的価値を創出すること。



## ○開会挨拶

行松泰弘 文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課 課長／数学イノベーションユニット長

【司会】 定時になりましたので、本日の講演会、「数学は世界を変えられるか? ～『忘れられた科学－数学』から10年 数学イノベーションの現状と未来」講演会を始めさせていただきたいと思っております。

本日は、多数の御来場を頂き、まことにありがとうございます。傍聴者の方々、80名超ということをごさいますて、当初予定していた会場ですと席が入らないということにして、急きよ、会場変更ということになり、皆様には窮屈な思いをさせてしまい、大変申し訳ございません。司会進行は、私、科学技術・学術政策研究所と数学イノベーションユニットを併任させていただいております細坪が進めさせていただきます。



では、開会の御挨拶を、行松泰弘研究振興局基礎研究振興課長、数学イノベーションユニット長様からお願いいたします。

【行松】 皆さん、こんにちは。こんなに多くの方に御参加いただいたということで非常にうれしく思っております。御紹介いただきました文科省の基礎研究振興課長で数学イノベーションユニット長の行松と申します。タイトル、先ほど御紹介ありましたけれども、平成18年に科学技術・学術政策研究所の報告書、「忘れられた科学－数学」が発表されて今年で10周年ということになるわけでありまして。このタイトル自身が非常に刺激的な名前でしたが、10年たちまして、数学の政策という意味では、戦略創造、FIRSTにも取り上げられておりますし、WPIとか、いろんなところで数学の取組というのが広がってきているんじゃないかと思っております。文科省としても、数学のイノベーションを生み出すことを目指した取組ということをいろいろ御支援を申し上げてきたと思っております。



数学に関しては、私ども、科学技術・学術審議会でも数学の委員会がありまして、数学イノベーション戦略というものを去年8月に取りまとめていただいております。そういう中でも、もし時間がございましたら是非見ていただければと思うんですけども、数学の姿は外からなかなか見えづらくて、実際にどのような研究が行われて、どういう成果が出ているのか、かなり分かりにくいところがあるという指摘があります。どうも数学を政策的に支援する、ということについては、なかなかイメージが湧きにくいところもあろうかと思っております。実際は、数学というのは諸科学の共通の言語でありまして、幅広い分野でブレークスルーに橋渡し、あるいは触媒という形で大きく役に立っているということでありまして、きょうの講演会でも数学的手法が様々な分野に横断的に応用されているという事例でありますとか、数学を活用して臨床医療や企業の現場が抱える問題に取り組んでおられる事例ということで、3人の先生方から分かりやすく紹介をしていただこうと思っております。

その上で、このような取組を推進していくに当たって、どのような問題点があるのか、その解決のために、どういうふうに取り組んでいけばいいのか、何が必要なのかということについて、会場の皆様から意見交換をさせていただいて締めくりたいと思っております。

きょうの講演会が、数学の持つポテンシャルが実に大きいということの理解につながって、様々な

世界で数学の力が発揮されて、イノベーションが発展していくきっかけになることを祈念しまして、私の御挨拶とさせていただきます。よろしく願いいたします。(拍手)

【司会】 行松課長殿、ありがとうございました。

## ○数学イノベーションの取組について

栗辻康博 文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課 融合領域研究推進官／数学イノベーションユニット次長

【司会】 それでは、次に「数学イノベーションの取組について」ということで、栗辻康博、同基礎研究振興課融合領域研究推進官、数学イノベーションユニット次長様より講演を頂きます。

【栗辻】 御紹介にあずかりました栗辻と申します。今、行松から話がありましたように、数学の姿はなかなか外から見えず、数学イノベーションと言っているけれども、一体何なのかよく分からないと多くの人から言われるところもありまして、具体的な研究の中身ですとか、あるいは、どういうところにどのように数学が使われているのかということを知っていただくのが非常にいいかなと思ひまして、この講演会を企画させていただきました。



最初に私からは、文部科学省、ここにありますように、4年前、数学イノベーションユニットというのを設けて活動しているわけですが、主にそこの取組を中心に、ごく簡単に紹介させていただいて、3人の先生方の講演につなげたいと思っております。

最初のページにありますのが、先ほどちょっと出てきました数学イノベーション戦略という、昨年8月に数学イノベーション委員会という文科省の審議会ですとまとめた報告書の概要でございます。3つポイントがありまして、1つは、この緑の部分の、いわば数学をうまく使うことで解決できるようないろいろな問題が産業界、あるいは、いろいろな学術分野にあり、それをうまく見つけていこうという試みでございます。その次が赤色の部分で、これがいわゆる協働研究の研究費ということでございます。一番下の黄色の部分で、研究所などの組織・体制でございます。

数学イノベーションに関係する研究の中で一番特徴的なのが、数学者だけでは数学の外の世界のことは分からないし、生物学ですとか材料科学ですとか、いろいろな問題を抱える側だけでも、自分たちのどういう問題に数学が役に立つのかというのは分からないということです。そこで両者が集まって議論する場を意識的に作りましょうという事業を3年ほど前からしております。これが数学協働プログラムということで、受付のところにもパンフレットを置かせていただきましたけれども、昨年度の例で言うと、年間40回以上、いろいろな会合をして、具体的にどういう問題にどういう数学が使えるのか。あるいは、数学を使って解決に導くような解決策を具体的に議論しているようなワークショップや研究集会のようなものが行われております。

もう一つは、研究費ということで、実はきょうお越しいただきました、この後、講演していただく平岡先生や水藤先生、それから、最後の意見交換のモデレーターをしていただく西浦先生、この一番上の写真に出ている方ですが、2007年に発足したJSTの戦略的創造研究推進事業の数学関係の領域の主要メンバーでございます。ここでいろいろ研究の成果の芽が出てきているということでございます。あと、ここ1、2年で、またその後継になるようなビッグデータ、あるいは数理モデリングに関する領域も始まっているところです。

3つ目が組織・体制で、ここにありますように、いろいろ書かせていただいているんですけど、北大から九州大学まで、数学と異分野連携、あるいは産業連携の拠点とも言うべき研究所、組織が幾つかできて、活動を続けられています。本日の講演者で言いますと、平岡先生は今年の3月までは九州大学のマス・フォア・インダストリ研究所におられて、今年の4月からは東北大学のWPIの

AIMR に移られて活躍されています。現状はどうかといいますと、こういった取組は、実はここ 3、4 年でやっと本格化したところなのですが、先ほど申しました西浦先生の戦略創造の数学と異分野協働の領域で、きょう御発表される平岡先生、水藤先生を含めて人材が育っているところがございます。

それから、もう一つ特筆すべきなのは、人材も育っているんですけども、日本数学会をはじめとする関連学会で、いわゆる純粋数学だけではなくて、応用数学にも目を向けるような取組が幾つかなされていることです。例えば直近の取組ですと、今年の 3 月に数学会で「生物学と数理科学」というタイトルのワークショップが行われたり、あるいは統計学会で「物理学と統計学」というワークショップが行われたりしています。

また、応用数学について表彰するような新しい賞ができたりですとか、あと、次に出てきますけれども、昨年の秋に開催した日本数学会が中心になって開催した、数学専攻の主に博士課程の学生と企業約 20 社の方が一堂に会して、学生側のポスター発表や企業からの個別のブースを設けた説明会などが行われ、非常に盛況でございました。こういった取組を今後も強化していきたいと思っています。

最後に、日本の現状をとということで、実はこのような取組が始まってまだ数年ということで、まだまだ不十分な点は多いわけなんですけれども、1 つの指標として、左上にアメリカの『ウォール・ストリート・ジャーナル』で、2014 年の Best jobs の十傑が挙がってしまっていて、トップが Mathematician、数学者なんですね。あと、トップ以外にも、いわゆる統計だとか Actuary だとか、そういった数理系の職業が挙がってしまっていて、これは単純に給料がいいからというだけではなくて、給料以外にも、充実感、達成感があるとか、ストレスが大きい過ぎなくて職場環境がいいとか、あるいは安定性があるとか、そういったものを総合して判定されているそうなんですけれども、こういったところにアメリカは数学者が挙がるようになってきているということです。

日本の場合どうかと申しますと、純粋数学は伝統的に強くて、御存じのとおり、フィールズ賞の受賞者数は 3 名で、これはアジアでは当然断トツだと。それから、フィールズ賞の受賞者である森重文先生が今年、2015 年から国際数学連合、フィールズ賞の受賞者を審査して決定する団体ですが、この総裁に、ヨーロッパとかアメリカで活躍する数学者以外では初めて総裁になられています。

このように、欧米から見ても、日本あるいは日本を含むアジアの数学研究のポテンシャルには非常に期待が高まっていると思うわけなんですけれども、日本の場合は、応用数学というものに少しフォーカスしてみると、残念ながら、必ずしも国際的なプレゼンスは十分高くないところがございます。

下のグラフは、これは単純に論文の数のデータで、必ずしも質のデータというわけではないんですが、左側がいわゆる応用数学の論文数の国際的な推移です。これは国際的なシェアの推移なので絶対数ではないんですけれども、シェアで見ると、左側のグラフにあるように、中国が急激に伸びて、アメリカを抜いているのが分かります。日本は下の方の下位のグループにいて、アメリカと日本を除いた 3 位から 10 位までの国の部門を縦に伸ばして見たのが右側のグラフで、これも実は、2000 年には 7 位ぐらいだったのが、じりじり落ちてきているのが現状でございます。世界全体ですと、応用数学の論文数というのは、ここ 10 年で倍ぐらいに伸びていて、日本も絶対数では伸びているんですけども、世界全体におけるシェアは落ちているのが現状で、こういうのをいかに改善していくのかということも含めて、きょう、いろいろ意見交換していただければと思っています。

以上でございます。

【司会】 栗辻融合官殿、どうもありがとうございました。

# 数学イノベーションの 取組について

平成27年4月16日  
文部科学省 研究振興局  
数学イノベーションユニット

## 数学イノベーション委員会報告書「数学イノベーション戦略」の概要

背景

- 諸科学や産業において**数学的アプローチが不可欠との認識**が高まっている  
(ビッグデータ、複雑な現象や問題の増加、計測技術・計算機性能の飛躍的向上等の**社会的・技術的要因**)
- **国際的にも数学と科学・産業との連携に向けた動き**が見られる  
(例: 欧米やアジアにおける連携研究拠点の整備等)

**数学イノベーションが必要**  
(数学の力(具体的実態を抽象化する力)を活用して新たな社会的・経済的価値を創出)

必要な活動

**1. ニーズ発掘から協働へ**  
(数学へのニーズの発掘から数学と諸科学・産業との協働へつなげるための活動)

「**出会いの場**」「**議論の場**」の実施  
 ・数学者と諸科学・産業の研究者が集まる**ワークショップ**  
 ・諸科学・産業の具体的な課題を数学者が集中的に議論する**スタディグループ**

課題発掘

**2. 数学との協働研究の推進**  
(数学者と諸科学・産業との協働による研究)

- ◆ JST戦略創造事業「**数学と諸科学との協働によるブレークスルー探索**」領域(2007年度～2015年度)
- ◆ JST戦略創造事業「**ビッグデータ**」関連領域(2013年度～)
- ◆ JST戦略創造事業「**数学協働**」「**数理モデリング**」領域(2014年度～)

研究成果

当該課題の解決

数学へのフィードバック

他分野への水平展開

**3. 人材育成(必要な人材の育成)**

- 数学界における人材の育成
  - ・ 諸科学・産業との協働への参画・実践による育成
  - ・ 国際交流による育成
  - ・ 大学の数学教育研究組織における育成
  - ・ 新たなキャリアパスの構築
  - ・ 数学界における協働による成果への評価
- 諸科学・産業における人材の育成

**4. 情報の発信等**

- 諸科学・産業向けの情報発信、成果の展開
  - ・ シンポジウム・講演会、諸科学分野学会でのチュートリアル
  - ・ 成果を分かりやすい形で整理しウェブページ等で外部へ発信、ツール化・ソフト化
- 一般向けの情報発信、子供たちへの取組
  - ・ 子供や一般向けの講演会(数学の社会での活用事例、最先端の研究等の紹介)

必要な体制

**5. 体制(必要な組織・体制)**

- 【**大学共同利用機関**】 統計数理研究所
- 【**共同利用・共同研究拠点**】
- 京大 数理解析研究所
- 九大 マス・フォア・インダストリ研究所(2013年度～)
- 明治大 先端数理科学インスティテュート(2014年度)

○各拠点間の連携・協力体制

- 「**数学協働プログラム**」(2012年度～)
- ・ 実施機関: 統数研
- ・ 協力機関: 北大、東北大、東大、明治大、名古屋大、京大、広島大、九大

# 1. 数学へのニーズ発掘から協働へ

(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)

平成27年度予算額  
3,970万円

## 施策の概要

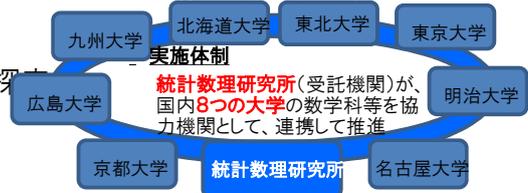
平成24年度より開始。数学・数理科学による解決が期待できる課題を発掘し、その課題の解決策の具体化に向け以下の活動を実施

### ○主な活動(平成26年度)

- ◆ **連携ワークショップ** 21件・・・数学者と諸科学・産業の研究者とが議論
- ◆ **スタディグループ** 9件・・・諸科学・産業における**具体的課題の解決策について数学者が議論**
- ◆ **作業グループ** 4回・・・**生命科学と材料科学**において**課題の発掘・分析**を目指し議論
- ◆ 一般向け情報発信 2回・・・**サイエンスアゴラ**出展(**講演会、展示**)  
**展示(数学で制御する生物模倣型ロボット)**が**リソーピア賞を受賞**
- ◆ 学生キャリアパス構築 2回・・・**学生と企業の交流会**(26年10月)、**キャリアパスセミナー**(27年3月)
- ◆ 関係学会での企画 7回・・・数学会(2回)・応用数理学会(1回)・統計学会(1回)で**応用事例紹介のワークショップ**等開催、各学会で公募説明会(計3回)

### ○ワークショップ、スタディグループの主なテーマ

- ・ **生命ダイナミクス**の数理とその応用
- ・ 計算材料科学と数学の協働による**スマート材料デザイン**手法探索
- ・ 安心、安全・快適な**社会インフラ維持**への数理科学の適用
- ・ **感染症流行モデリング**
- ・ **気象学**におけるビッグデータ同化の数理 等



### 事業のイメージ; A~Cを本事業で支援

**A 諸科学・産業界の課題の発掘・設定**

大腸がんの病理組織画像診断を迅速かつ正確に行ないたい...

**B 研究テーマの抽出(研究集会)**

数学・数理科学者と諸科学・産業の研究者の交流・議論

**C テーマに応じた解決策の具体化**

具体的な課題を数学的な問題へ変換し、解決策を集中討議・検討

**D 共同研究へつなげる**

実験データと理論の間で検証を重ねて大腸がんの自動検出・悪性度の自動判定アルゴリズムを開発

## 2. 数学との共同による研究の推進

### JST戦略的創造研究推進事業による取組

#### 戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決に向けた数学」(平成19年度開始)

##### ◆「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」領域

**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(WPI-AIMR)教授)

**さががけ:** 31名(平成19~24年度終了) **CREST:** 13チーム(平成20~27年度終了予定)

##### 主な研究テーマ ※【 】内:参加研究者の所属機関

- 輸送と渋滞の数理モデルとシミュレーション、実証実験【東京大学】
- インフルエンザウイルスの変異予測【北海道大学】
- 離散幾何学と新物質創成【東北大学】
- 数理医学による腫瘍形成原理の解明【大阪大学、東京大学】
- 計算錯視学の構築—錯視の数理モデリングと応用【明治大学、東京大学】等



西浦総括

#### 戦略目標「分野を超えたビッグデータ利活用により新たな知識や洞察をえるための革新的な情報技術及びそれらを支える数理的手法の創出・高度化・体系化」(平成25年度開始)

##### ◆「各分野のビッグデータ利活用推進のためのアプリケーション技術」領域(CREST)(平成25年度~)

**研究総括:** 田中讓(北海道大学大学院情報科学研究科 特任教授)

**CREST:** 6課題(25年度2課題、26年度4課題)

##### ◆「ビッグデータ統合利活用のための基盤技術」領域(CREST/さががけ)(平成25年度)

**研究総括:** 喜連川優(国立情報学研究所 所長)

**CREST:** 6課題(25年度4課題、26年度4課題)、**さががけ:** 10課題(25年度6課題、26年度4課題)



喜連川総括



田中総括

#### 戦略目標「社会における不安定・不確実な諸現象の「本質」を抽出する分野横断的基盤モデリング技術の構築」(平成26年度開始)

##### ◆「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」(CREST)(平成26年度~)

**研究総括:** 坪井俊(東京大学大学院数理科学研究科 教授・研究科長)

**CREST:** 7課題(26年度)

##### ◆「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」(さががけ)(平成26年度~)

**研究総括:** 國府寛司(京都大学大学院理学研究科 教授)

**さががけ:** 9課題(25年度)



坪井総括



國府総括

### 3. 体制 数学・数理科学と諸科学・産業との協働の主な拠点

- 近年、全国の大学において、**数学・数理科学と諸科学・産業との連携による研究拠点**の設置が進んでいる。
- 各拠点ごとに、連携相手や形態など様々な特色がある。

- 大学共同利用機関
- 共同利用・共同研究拠点  
(H27年4月現在)

- **京都大学**  
数理解析研究所(S38年～)  
数学連携センター(H25年～)
- **大阪大学**  
数理・データ科学教育研究センター  
(H27年10月発足)
- **九州大学**  
マス・フォア・インダストリ研究所(H23年～)

- **北海道大学**  
電子科学研究所附属社会創造数学研究センター(H27年～)
- **東北大学**  
応用数学連携フォーラム(H19年～)  
WPI-AIMR(原子分子材料高等科学研究所)数学ユニット(H24年～)  
知の創出センター(H25年～)

- **統計数理研究所**  
NOE(Network Of Excellence)形成事業(H22年～)  
統計思考院・統計思考力育成事業(H23年～)

- **明治大学**  
先端数理科学インスティテュート(H19年～)

- **東京大学**  
WPI-Kavli IPMU(カブリ数物連携宇宙研究機構)(H19年～)  
大学院数理科学研究科附属数理科学連携基盤センター(H25年～)

- **早稲田大学**  
総合研究機構 流体数学研究所(H27年～)

- **慶應義塾大学**  
先導研究センター 統合数理科学研究センター(H19年～)

### これまでの取組を通じた成果

#### ○数学と諸科学・産業との連携を担う人材が育ちつつある

##### ～育った人材が、次世代を「育てる」人材に

(例)

- JST戦略的創造研究推進事業 数学領域(2007年度発足)の研究者の活躍例
  - ✓ 水藤先生 さきがけ1期生(2007～2010年度)、CREST3期生(2010年度～2015年度予定)
  - ✓ 平岡先生 さきがけ2期生(2008～2011年度)

※本領域のさきがけ研究者31名のうち、10名が教授職についている。  
本領域のCRESTチームで活躍したポスドク30数名も活躍中。

#### ○日本数学会等の関連学会でも、諸科学・産業との連携に向けた動き

- 他分野との連携研究を紹介するワークショップの開催
  - (例)日本数学会2015年年会(2015年3月23日)  
数学連携ワークショップ「**生物学と数理科学の協働**」
  - (例)日本統計学会春季集会(2015年3月8日)  
特別セッション「**物理学と統計学の接点:新潮流と展望**」
- 応用数学を表彰する賞の創設
  - (例)日本数学会 **応用数学研究奨励賞**(2013年創設)
- 学生のキャリアパス構築のためのイベント
  - (例)**数学専攻学生と企業との交流会**【別紙参照】

# 【別紙】 数学専攻学生と企業の交流会(第1回 2014年10月)

【主催:日本数学会】

日本数学会が設けた産官学の有識者からなる社会連携協議会が中心となり、初めて2014年10月に「異分野・異業種研究交流会」を開催。産官学から約130名が参加。

- ・ 若手数学研究者(主に博士課程学生等): 52名
- ・ 企業関係者: 56名
- ・ その他大学教員等

## 数学・数理学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会

日時: 2014年10月25日(土) 13:00~20:00

場所: 東京大学駒場キャンパス数理学専攻科棟

プログラム

13:00~13:05: 開会挨拶 日本数学会理事長 舟木 直久 氏

13:05~13:15: 来賓挨拶

文部科学省研究振興局基礎研究振興課 課長 行松 泰弘 氏  
日本経済団体連合会社会広報本部 副本部長 長谷川 知子 氏

13:15~13:50: 基調講演

演題: 産学協働による若手研究者の躍動に向けて

講師: 株式会社日立製作所研究開発グループ 技師長 内山邦男 氏

14:00~15:00: 協力企業紹介

**15:00~17:00: 若手数学研究者によるポスター発表**

**17:00~18:00: 個別交流会(若手数学研究者が企業ブースを訪問)**

18:30~20:00: 情報交換会

協力企業:

アイシン・エイ・ダブリュ、旭硝子、東芝、ニコン、三井住友銀行、日立製作所、富士通研究所、三菱東京UFJ銀行、鉄道総合技術研究所、サイバネットシステム、新日鐵住金、住友生命保険、ソフトバンクモバイル、大同生命保険、トヨタ自動車、日本生命保険、日本電気、日本電信電話、日本ユニシス、BNPパリバ証券、ライフネット生命保険

協力大学: 北大、東北大、東大、慶応大、明治大、早稲田大、名古屋大、京大、阪大、九大

共催: 日本応用数学会 統計数理研究所「数学協働プログラム」(文部科学省委託事業)

東京大学数物フロンティア・リーディング大学院

後援: 日本経済団体連合会

第2回研究交流会: 2015年11月14日(東京大学)開催

開会挨拶



ポスター発表  
(若手数学研究者  
→企業関係者)



個別交流会  
(企業関係者  
→若手数学研究者)



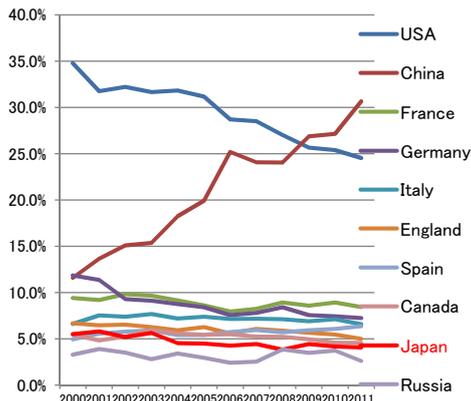
## 数学イノベーションを巡る現状

米国 Wall Street JournalのBest Jobs  
の第一位がmathematician

### Best Jobs of 2014 / Midlevel Income

1. Mathematician / \$101,360
2. Tenured University Professor / \$68,970
3. Statistician / \$75,560
4. Actuary / \$93,680
5. Audiologist / \$69,720
6. Dental Hygienist / \$70,210
7. Software Engineer / \$93,350
8. Computer Systems Analyst / \$79,680
9. Occupational Therapist / \$75,400
10. Speech Pathologist / \$69,870

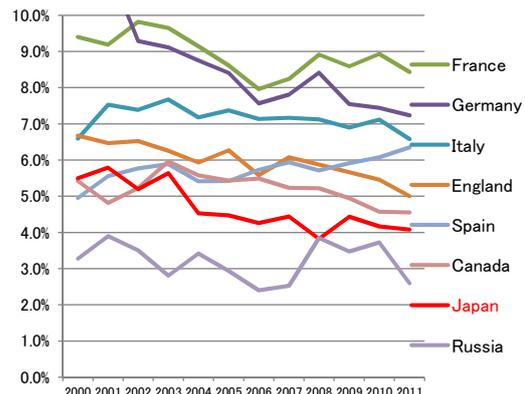
### 応用数学の論文数の国別シェアの推移 (上位10カ国)



- 日本
- フィールズ賞の受賞者数は3名(アジアでは1位)
  - 2015年より国際数学連合(IMU)の総裁に日本人が初めて就任(森重文 京都大学 数理解析研究所教授、1990年フィールズ賞受賞者)。欧米以外を拠点に活躍する数学者が総裁になるのは初めて。
  - しかし、応用数学については、日本の国際的プレゼンスは必ずしも高くない。

(例) 応用数学の論文数は世界全体で2000年以降の約10年間でほぼ倍増。しかし、**応用数学の論文数の日本の世界シェアは低下傾向**

### 応用数学の論文数の国別シェアの推移 (中国、米国を除いた上位3~10位の国) 日本は順位低下(7位→9位)



※出典: トムソンロイター Web of Science

数学全体=主要22分野でmathematicsに分類されているもの

応用数学=上記のうちMATHEMATICS APPLIED or MATHEMATICS INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS or STATISTICS PROBABILITYを含むもの

## ○数学と他分野・産業との協働による研究の紹介

### 「材料・生命・情報通信と応用トポロジー」

平岡裕章 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 准教授

【司会】 それでは、数学と他分野、諸科学、産業との協働による研究の紹介ということで、各先生方による講演に移らせていただきたいと思います。各講演、発表時間はそれぞれ 20 分、プラス質疑応答の時間を 5 分の 25 分ということで、お願いします。

まず、1 番目の講演として、東北大学准教授の平岡裕章先生から「材料・生命・情報通信と応用トポロジー」という内容で御発表をお願いします。

【平岡】 御紹介ありがとうございました。東北大学原子分子材料科学高等研究機構の平岡といいます。先ほど御説明ありましたけれども、この 4 月までは九州大学に在籍して、この春からこちらに異動してきました。

きょうは、こういうタイトルで講演させていただきたいと思います。限られた時間ではありますけれども、きょうは私の専門分野である応用トポロジーと呼ばれるものを題材にして、数学研究の諸科学とのつながりに関して、簡単にではありますが、紹介させていただこうと思います。

本日お伝えしたいメッセージは、この 3 つです。最初のメッセージは、位相的データ解析、英語では Topological Data Analysis、頭文字を取って、以後、「TDA」と呼ぶこともあるかもしれませんが、これについて簡単に紹介したいと思います。

詳細は後のスライドで説明していきますけれども、簡単に言うと、今世紀になって数学者が開発した新たなデータ解析手法です。近年、ビッグデータとかデータ解析とかいうと、関連する数学としては統計学を想定される方が多いかもしれませんが、これは純粋数学の一分野であるトポロジーと呼ばれる分野を使った非常に新しい、今までになかった見方を提供するデータ解析手法で、従来では取り扱えなかったような幾何学的な特徴付けを与えるという強力な解析手法です。これについて、まず簡単に紹介します。



その次に、数学の普遍性についてですが、きょうの講演会では、私のグループが最近行っています Topological Data Analysis を材料科学に応用するところに焦点を当てて話を進めていきますけれども、もちろん応用分野は材料に限ったものではありません。ここに書いていますように、たんぱく質であったり粉体の解析であったり、さらには情報通信、ネットワークの解析においても同様のプロセスで TDA を行うことができます。これらの応用研究を幾つか提示することによって、このユニバーサリティーについて少し言及したいと思います。

3 番目は、本講演の内容としましては、数学研究を諸科学に応用していくということなんですけれども、これは 1 つのスタイルとして、シーズ発の研究となります。それに対する政策としての継続的な投資の必要性について、簡単にですがコメントさせていただこうと思います。これは、今アメリカで、TDA を実際に用いたベンチャー企業として、AYASDI という企業が非常に注目されているんですけれども、これを例に挙げて、このあたりのことを、簡単にですが紹介させていただこうと思います。よろしいでしょうか。

では、本論に入ります。まず、形の記述というところから話を起こしていこうと思うんですが、分かりやすい例としてたんぱく質を想像していただければいいかもしれませんが、物の形とそ

の物の機能は密接に関係します。これはたんぱく質に限った問題でもなくて、例えば、材料科学の問題では、材料の分子構造というのが材料の固さやもろさといった物性に密接に関係してきますし、情報ネットワークにおいても、例えば、情報の効率的なフローの流し方であったり、ロバスト性、ネットワークの頑健性というのは、ハブと呼ばれる特徴的なノードであったり、サイクルと呼ばれる特徴的なネットワーク形状が関わってくる。すなわち、形状が大事になってくるわけです。そういう意味で、機能を開発する、制御するという立場に立った場合には、まず初めに、対象となる物の形、特徴的な量を記述することをする必要があります。

形の記述というのは数学では幾何学が得意とするところであって、この形の特徴的な記述というのは、言い方を変えると、幾何学的に現象をモデリングしていくプロセスになります。対象が結晶構造のようなものであれば、基本的には基本構造の繰り返しで結晶、周期構造というのは記述できますから、問題はさほど難しくなく、例えば、フーリエ解析を使うことで形の記述という問題は恐らく解決するでしょう。一方で、ここに出しているような、これはたんぱく質の分子です。あと、これは後で出てきますけれども、アモルファス、ガラス材料のネットワーク構造を示していますけれども、このような結晶とは異なる、非常にワイルドな形状に対して適切な特徴付けを行うのは困難が伴います。

例えば、どういった困難があるかという、これらの構造は一般的には構造自体が単一のスケールで記述されているわけではないので、複数のレイヤー、マルチレイヤーの問題として形を考えていかないとはいけません。そうすると、真面目にそのような問題を考えると、膨大な情報量が必要になるわけですね。そういった難点があったわけですが、これからお伝えしたいメッセージの1つ目、Topological Data Analysis、位相的データ解析で、これらの問題に対して、ある1つの解決方法を提示しています。キーワードはトポロジーで、例えば、形の適切な特徴付けというのは、位相不変量と呼ばれるものを使って特徴付けを与えます。また、マルチスケールの問題について言うと、パーシステンスというキーワードが解決を与えます。膨大な情報量に関しては、トポロジーとしては連続変形という概念で対応していくと。こういった対応関係になります。

ということで、まず、これが形の記述に関することですが、位相的データ解析とは何なのかということについて簡単に説明していきたいと思います。背景です。Topological Data Analysis、これは先ほども言いましたけれども、今世紀に数学者が開発したデータ解析手法です。具体名を挙げると、Herbert Edelsbrunner という方と、ここに出ている Gunnar Carlsson という2人です。現在、数学的にも活発に研究が進んで、今世紀に入って開発された概念ですが、また更に同時に、具体的な諸科学の問題に今、応用されています。

世界的に見て、大きく分けて4つのグループがあります。TDAを諸科学の問題に応用しているグループとしては、世界的に見て4つあります。1つは、Gunnar Carlssonのグループです。スタンフォードの教授であって、後で出てきますけれども、AYASDIというベンチャー企業の創始者です。彼はビッグデータの解析であるとか、こういう様々な業種に応用しています。

あと、Robert Ghrist。ペンシルベニア大学の数学科の教授ですが、彼は情報ネットワーク分野にTDAを応用していると。Konstantin Mischaikowは、流体解析、時系列解析に応用していて、我々のグループ、東北大学のAIMRは、世界に先駆けて材料科学への応用を積極的に進めているといった、こういった背景です。

この位相的データ解析なんですけれども、キーとなる道具が幾つかあります。そのうちの1つがパーシステントホモロジーという道具であったり、また、その表示法であるパーシステント図と呼ばれる概念です。

まずは、きょうは、これらの2つの、2つというか、具体的にはパーシステント図という概念を簡単に紹介して、例えば、それをどのようにして材料科学の問題に応用するのか。対象を変えて、たんぱく質の解析であったり、情報通信の問題に応用するのかということを引きょうは中心に話を進めていきたいと思います。

ということで、簡単にですけれども、パーシステントホモロジーの紹介をしたいんですけれども、その前に、その前の概念であるホモロジーについて簡単にインプットしておきたいと思います。よろしいでしょうか。

ホモロジーというのは、入出力関係で書くと、このような対応になります。何かデータが入力として与えられたときに、ホモロジーというブラックボックスだと思って構いませんけれども、そういうものを通すと、出力としては、1ごとに、入力に含まれている1次元の穴の数を出力します。ここで1は0、1、2……と非負の整数を動かします。正確には、これ、ベッチ数と呼ばれるものなのですが、きょうはそのこの区別はしていきません。例えば、このような複雑なパターンを入力した場合、出力としては、このような数が出てきて、例えば、H1が847という出力はどう読み取るかという、この複雑なパターンの中に847個1が1、1次元の穴ですね、ですから、こういう輪っかです。1次元の穴、輪っかがあるということが分かる。また、H2が0というのは2次元的な穴ですから、キャビティー、空洞がこの中にはありませんといったことが分かります。大ざっぱに言うと、ホモロジーというのはそういう道具です。

背景としましては、この概念自体は、100年ほど前に数学者のポアンカレが、その骨格となる概念を考案しました。もちろん数学的な興味の下で。その後、数学者によって数学研究にのみ使われてくると。非常に強力な手法であることから、数学研究では現在でも多くの分野で使われています。今世紀になって、少しずつ状況が変わってきました。どう変わったかという、計算機の発達に伴って、数学的な興味として、計算機を使ってホモロジー、計算できるのという問題に取り組んだ数学者がいます。これが現在、「計算ホモロジー」と呼ばれている分野で、実際、現在はこのような複雑なパターンを入れたときに、計算機を用いて、非常に高速にホモロジーを計算することができるようになりました。ただし、ここでリマークしておくことは、この時点でもまだ応用は全く意識してないんですね。単に数学的な興味として、このような問題を考えた数学者がアメリカとヨーロッパに現れて、日本も結構貢献していますけれども、考えられてきました。

その後、我々のグループであったり、先ほど挙げた4つのグループが実社会の問題に応用してみると、結構これは使えるぞということが分かってきて、現在、急速に応用が進んでいるといった流れです。これが、今言っているTopological Data Analysisの源流になっています。

こういうものです。実際に応用してみると、しかし、このホモロジー、まだまだ改良の余地があることが徐々に分かってきたわけです。例えば、穴の数だけが分かっても、応用上は余りうれしくない状況もあります。もう少し言うと、穴のサイズであったり形であったり、ひずんでいるとか曲がっているとかいう形であったり、あと、階層構造、マルチスケールの問題を考えると、なった場合には、大きな穴の中に小さな穴があって、更に小さな穴があってとかいう階層構造に関しても情報が欲しくなったりするわけです。そういう問題に対処するために開発されたと言うと、ちょっと制限し過ぎですけれども、1つのモチベーションとしては、そういった問題に対処するために開発された道具が、先ほどから何度か言ったパーシステントホモロジーです。ですから、概念としてはホモロジーよりもちょっと上の概念です。

これはどういうものかという、入力に対して出力が出てきますけれども、各1に対して穴のサイズや形状や階層性といったメトリックに関する情報まで出てきます。例えば、こういったヘモグロビンの原

子配置を入力すると、パーシステントホモロジーというのは、出力としてパーシステント図と呼ばれる、こういう2次元の散布図を1ごとに出力します。これ、意味合いは何かというと、パーシステント図というのは、今後、「PD」と呼ぶことにすると、PDの構成法としては、このような点が与えられたときに、球を膨らませていくというプロセスを考えます。そうすると、ある半径で穴が発生します、この**b**という半径で。更に膨らませると、この半径**d**でこの穴が消滅します。この**b**と**d**という半径を発生軸、消滅軸としてプロットしたものが、このパーシステント図です。よって、P、Dの各点はデータに含まれている穴を表し、発生軸、消滅軸はそれぞれ穴の発生、消滅を表します。

この意味合いから、対角線付近の点というのは、この点の配置を、摂動を加える、ちょっと配置を換えると、すぐに消えてしまいますから、その意味で対角線付近の点はノイジーな穴であると。一方、対角線から離れたところは、少し変えてもパーシストしますからロバストな穴であって、例えばヘモグロビンの場合で言うと、たくさん対角線付近にノイジーな穴があるんだけど、ここに点があるんですね。これは何に対応するかというと、ヘモグロビンが持っているこのサイクルに対応したものが取り出せていることになります。こういったメトリックな情報も手に入ると。このサイズとか形に関する情報が手に入るというのはグッドニュースで、例えば材料科学への応用とかが、ここから急速に進んでいきますと。ここまでが大体、パーシステントホモロジーとパーシステント図の紹介です。

では、具体的に、これらの概念を材料科学の問題に応用するという事例を紹介してみたいと思います。これは、ガラスの幾何構造に応用した例ですけれども、SiO<sub>2</sub>というシリカの構造解析の例です。シリカというのは、結晶状態、液体状態、ガラス状態がありこれらはシリカの原子配置を表す。各点はSi若しくはOです。結晶は規則的になっているから、これはすぐ識別できるわけですね。ここでの興味は、ガラスの状態と液体の状態、これを識別することが可能かどうかという問題を考えている。ガラスの幾何構造の記述は、現在の科学でも実は未解決問題で、日常的にありふれた材料なんですけれども、実は余り分かっていません。ただし、そういったものに対して適切な数学的な言語を与えるというのは、応用的には太陽光のパネルであったりストレージ材料、DVDとかブルーレイディスクとか、ああいうものの開発にとっても重要になってくる。なので、ガラスと液体を区別できるかという問題、さらに、ガラス特有の、ガラスの構造のみに隠された情報を抽出できるかという問題が重要になってきます。

これに対してパーシステント図を適用してみましょ。すなわち、各点に対してボールを置いて半径を膨らませていって、先ほどの図を描いてみます。結論はどうなるかというと、これが計算結果です。結晶、液体、ガラスですね。横軸、Birth、縦軸、Deathで、結晶は非常に限られた点にしかないと。これは結晶に限られた形の穴しか許されないということを反映しています。一方、液体は2次元的にパーシステント図が分布しているわけですね。これは、液体のランダム性を表します。ここで特徴的なのは、ガラスにのみ曲線が表れていると。すなわち、結論だけ言うと、このパーシステント図というのは液体とガラスを区別することに成功していることになっているわけです。だから、最初の問題はクリアです。

じゃ、次に、更に何か構造が抽出できるかということを考えてみます。すなわち、今までのプロセスは原子配置が与えられた。これは非常に複雑で、非常に取扱いが難しい、解析が難しい。それをパーシステント図に情報を縮約するわけですね。縮約した世界で何か違いが見えた。そうしたら、次に考えることは、この違いを表している曲線は、もともとの空間のどういった性質から表されているのかと。すなわち、逆問題を考える必要があるわけです。何が、この曲線を生み出しているのかと。それにちゃんと答えることができれば、ガラスの幾何構造を明確に記述することができると、アンサーが

得られるわけです。

我々のグループは、逆問題に対する数学的な枠組みをちゃんと設定して、アルゴリズムを開発して、ソフトウェアを開発してきたというグループです。詳細は省きますが、その逆問題のツールを使うことで、実はシリカガラスのリングは階層性を持っていますよとか、中距離的な、ニアレストネイバーだけじゃなくて、ちょっと離れたところの幾何構造も結構分かりますよとか、FSDP という物理の重要な問題があるんですけども、それに対して幾つかの答えを用意することができるよとか、幾つかの成果を今まで得てきました。これがガラスの話です。

もう時間、恐らくあと2分か3分ぐらいしかありませんので、次、数学の普遍性という。ここもこのスライドですけども、今までの話、原子配置が与えられて、TDA を行って、特徴抽出をして、その特徴はどこから来ているかということ逆問題で考えた。これがストリームラインです。その際に、データというのは別に材料科学の問題に特化する必要はなくて、例えば、私がこれまでやってきた研究では、このデータに含まれる部分を、たんぱく質の構造解析に変えたり、これはプロテインデータバンクというデータバンクがありますけれども、それに対して TDA を行って物性に関して情報を得るとか、粉体解析を行ったり、あと原子をセンサーに変えて、原子半径、球を置きましたけれども、あの球をセンシング領域だと思えば、実はこの問題、センサーネットワークの解析にも使えます。そういった形で、この部分を整備することによって、このデータに関しては、かなり広い適用範囲があります。これは数学の持つ1つのメリットだと思います。

では、これ、最後のスライドです。シーズ研究に対する継続的な投資ということですけども、先ほどから名前が出てきました Gunnar Carlsson という方、パーシステントトポロジーの創始者ですけども、彼自身が学生のときに、実はトポロジーを用いたデータ解析は今後伸びると考えたらしいです。直接、彼と話したことがあるんですけど。そのときに、既にベンチャー企業の構想があったようです。そこから彼は40年間掛けて、NSF とか DARRA とか Air Force とか、もちろんスタンフォードという大学の特徴も生かして継続的な資金を手に入れ、それを用いて学生やポスドクの確保をして、自分のチームを作って、企業を立ち上げる準備をしてきたわけです。40年たって、AYASDI という会社を立ち上げることに成功したと。業務としては TDA をメインにしていますけれども、取引先はこのようなものです。最近の動向としては、Series C になったという報道がされていました。Series C というのは、ベンチャー企業としてはかなり成功した例になるようです。

ここで言いたいことは、シーズ発研究に対して政策の必要性があるんじゃないかということです。すなわち、ベンチャー企業の精神が盛んなアメリカでも、最初は TDA に興味を持つ企業は全くなかったそうです。なので、自分で全部セットアップしないといけない。ただし、自分で全てできるわけじゃなくて、それをするためにはチームを作る必要がある。そのチームを確保するために、やはり資金が必要であると。その数学的アイデアを実用化、ソフトウェア化するための人材育成費用はやはり必要になると思います。そういったサポートを政策としてやっていただくのは意味があるんじゃないかなと個人的には思います。

それでは、恐らくちょうど時間ですので、これで終わらせていただきます。ありがとうございました。(拍手)

【司会】 平岡先生、御講演どうもありがとうございました。

【司会】 それでは、質疑応答に移らせていただきたいと思います。会場から御質問、御意見などございましたら、挙手をお願いいたします。

【質問者 A】 東京大学の林と申しますが、大変面白い話をありがとうございました。最後に、シーズのことが重要だということをおっしゃっていたんですけれども、この場合に、Carlssonという先生が、もともと純粋数学の先生だったわけですね。その人がこういうことを考えていたときに、社会的には理解されなかったということだと思んですけど、純粋数学の中ではどういう評価を受けたんでしょうか。

【平岡】 当時のことということですね。正確にお答えすると、そこまでは私は存じ上げてないですね。少なくとも大学がかなり巨額なサポートをしているということでもありますので、批判的ではなかったと思います、数学のコミュニティとしては。ただし、これは想像の域を出ませんので、正確な答えにはなってないと思います。

【質問者 B】 私は、数学協会の片瀬と申します。今、私は中身の問題じゃなくて、非常にすばらしいお話だと思うんですけれども、シーズへの継続的投資、人材育成費用が非常に重要だと。それで、現在あるいは今後にかけて、この投資は文部科学省がすると、そういうことになっているのか、いようとしているのか、それだけお伺いしたいと思います。

【平岡】 それは恐らく私が答えられるレベルではなくて、それを討論する場になっているのか、若しくは西浦先生がお答えするのがよろしいんでしょうか。これ、一提案、提案というほどでもありませんけど、意見ですので、文部科学省がサポートしていただければ、もちろんすばらしいことですし、ここに限ったものでもないとは思いますが。

【質問者 C】 科学技術・学術政策研究所の坂田と申しますが、最後の政策の必要性について2つ質問がありますけど、1つは、最初の企業との関係ですね。冒頭に課長の話だと、数学会の先生方と企業側というか、社会側、数学を使う側の人たちとの間の交流が盛んになりつつあるんですかね。それについては、今後、先生は今よりもこういう工夫をしてもらいたいという具体的なアイデアがあるかどうかですね。あれば聞かせていただきたい。

2つ目は人材育成というのがありますよね。数学的アイデアを実用化、ソフトウェア化する。これは大学の中に、そういう人材を養成するような、ある種の仕組みというのか、学科がいいかどうか知りませんが、学科の中にそういう仕組みを作るのがいいのか、やり方としては、どういうやり方をすることが今の日本では現実的なのか。その点についても、何かお考えがあれば聞かせていただきたいなと。

【平岡】 最初の御質問に関してですけれども、企業の方との連携ですね。これは幾つかの側面はあると思うんですけど、数学的なアイデアが出た段階というのは、やはり企業の方が興味を持っていただけるかどうかというのは、ちょっと不安があります。なので、そこの橋渡しをするために、最初に政策としてサポートをお願いしたいというのが、まず、ここのメッセージの1つです。

一方で、ある程度軌道に乗ってグループもできた段階においては、例えば九州大学がやられているようなスタディーグループ、東京大学とか幾つかの大学で最近行われていますけれども、スタディーグループという形で企業の方が実際に問題を提起して、それを短期間で数学者とコラボレーションして解決をするという取組がありますが、そういった地道な活動が今後生かされてくるのではないかなと思っています。まず、それが1つ目の質問に対するお答えです。

2つ目は、人材育成の仕方です。現状としては、理想論としてはもちろん、数学科の中に、そのようなものに特化した何か、グループなり組織ができるのが理想かもしれませんが、そこまで望むのはギャップがあると思います。ですから、最初にできることとしては、興味を持っている研究者の周りでまず小さなグループを作って、自分で、例えば、グラントを取ってくるなどしてグループを作って、

そこから徐々に広げていくことが現実的だと思います。組織として何かするというのは、現状としては幾つかハードルはあると思います。

【質問者 C】 そういう適当なグラントは今、制度としてあるんですか。

【平岡】 その代表的なのが、今、CRESTであったり、さきがけであったりという、そこら辺。現状、手元にあるものとしては、そういったものがあると思います。

【質問者 D】 特別なあれはないんですが、お茶の水の細矢先生という化学の先生で、今、名誉教授、ちょっと雑談したんだけど、化学物質は今のところ、分かっているのが数千万種あって、毎年200万種以上増えていると。大体が炭素系なんだけど、そういう膨大なものがあるわけですよ。だから、こういう話を聞いていて、何に的を絞るか、問題の選択は非常に大事になるような気がしています。

純粋数学の話だけど、皆さんの講演を聴いていると、20年間、ずっとこういう問題をやっていて、ようやく成果が出たという話をいっぱい聞くわけですよ。数学だけに限っても、僕もそうで、この間、定年の最終講義でそういう話をしたけど、20年間やっていますという話をしたけど、だから、どういう見方で問題を選ぶか、対象を選ぶかというのは、それなりの枠組みを作らないとどうしようもないですよ。炭素系って、要するに、たんぱく質とかそういうのがいっぱい出てきているんだけど、確かにその中に有用なものは、宝物があるには違いないけど、何を以て的を絞るかって。宝くじじゃ、やっぱりお金を幾らつぎ込んでもどうしようもないわけですよ。だからといって、できたものやって、いじくっても大したものではないかもしれない。だから、非常に難しいところだと思います。

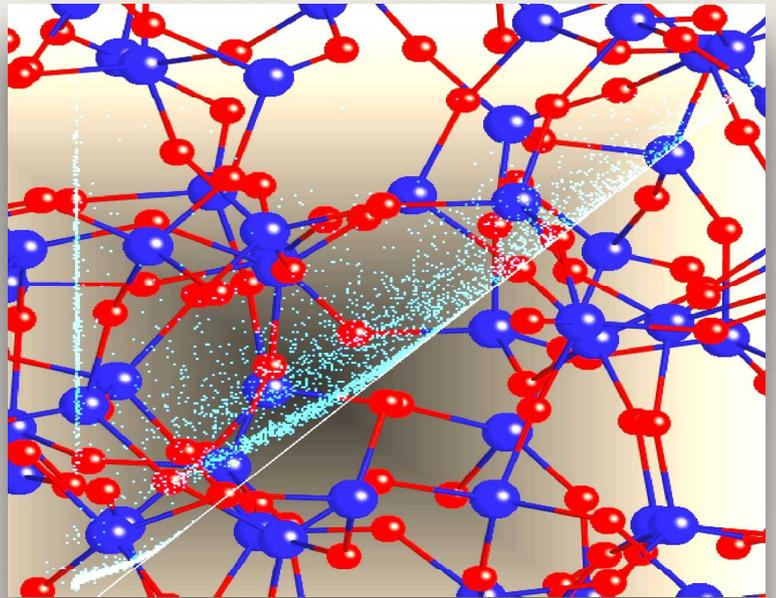
【司会】 それでは、平岡先生、どうもありがとうございました。(拍手)



# 材料・生命・情報通信と 応用トポロジー

平岡 裕章

東北大学  
原子分子材料科学  
高等研究機構  
(WPI-AIMR)



## 今日のメッセージ

### 1. 位相的データ解析 (Topological Data Analysis, TDA)

トポロジーを用いた強力なデータ解析手法

### 2. 数学の普遍性

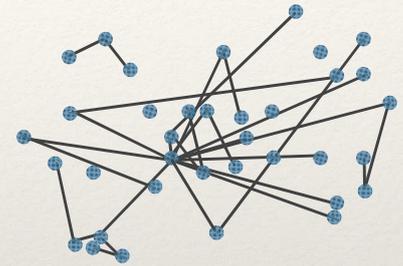
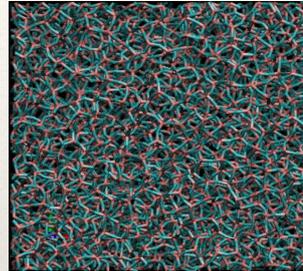
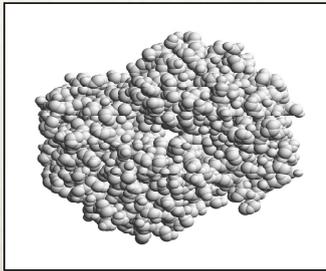
TDA → 材料科学, タンパク質, 粉体, 情報ネットワーク, etc

### 3. シーズ発研究への継続的投資の必要性

TDAベンチャー企業 AYASDI

# 形の記述

形と機能： タンパク質，材料，情報ネットワーク，ビッグデータ， etc



形の記述（幾何学的モデリング） → 機能の開発・制御

周期構造（結晶, 線形変調通信）： フーリエ解析！

非周期構造の難点：



形の適切な特徴付け， マルチスケール， 膨大な情報量



# 位相的データ解析

位相的データ解析 (Topological Data Analysis, TDA) :  
今世紀に数学者が開発した強力な (ビッグ) データ解析手法

Gunnar Carlsson's Gr. (math. Stanford, AYASDI)

- ビッグデータ, ソーシャルネットワーク, 医療, 金融 etc

Robert Ghrist's Gr. (math. UPenn)

- 情報ネットワーク, センサーネットワーク

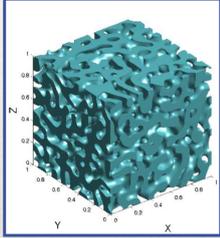
Konstantin Mischaikow's Gr. (math. Rutgers)

- 流体解析, データ時系列解析

東北大WPI-AIMR

- 材料科学 (ガラス, 粉体, 高分子, 金属, etc)

# ホモロジー



ホモロジー

$$\begin{aligned}
 H_0 &= 1 && : 1\text{個の連結成分} \\
 H_1 &= 847 && : 847\text{個のわっか} \\
 H_2 &= 0 && : 0\text{個の空洞}
 \end{aligned}$$

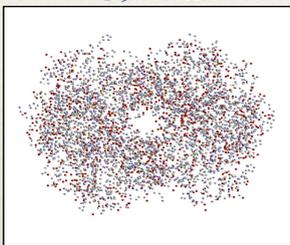
注) 正確にはベッチ数

- ポアンカレによって約100年前に考案
- その後、数学者によって数学研究にのみ使われる
- 計算機の発達に伴い、数学的な興味として計算機を用いてホモロジーを計算する方法が開発される (計算ホモロジー)
- 生命・材料・情報・ビッグデータなどへ急速に応用される (TDAの源流)

# パーシステントホモロジー

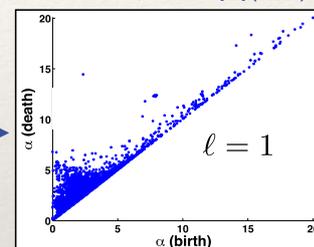


ヘモグロビン



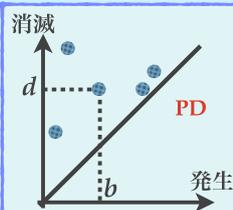
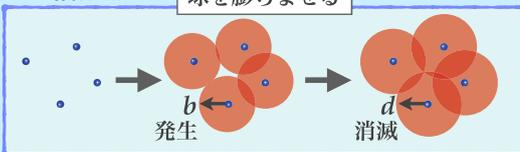
パーシステントホモロジー

パーシステント図(PD)



PD構成法

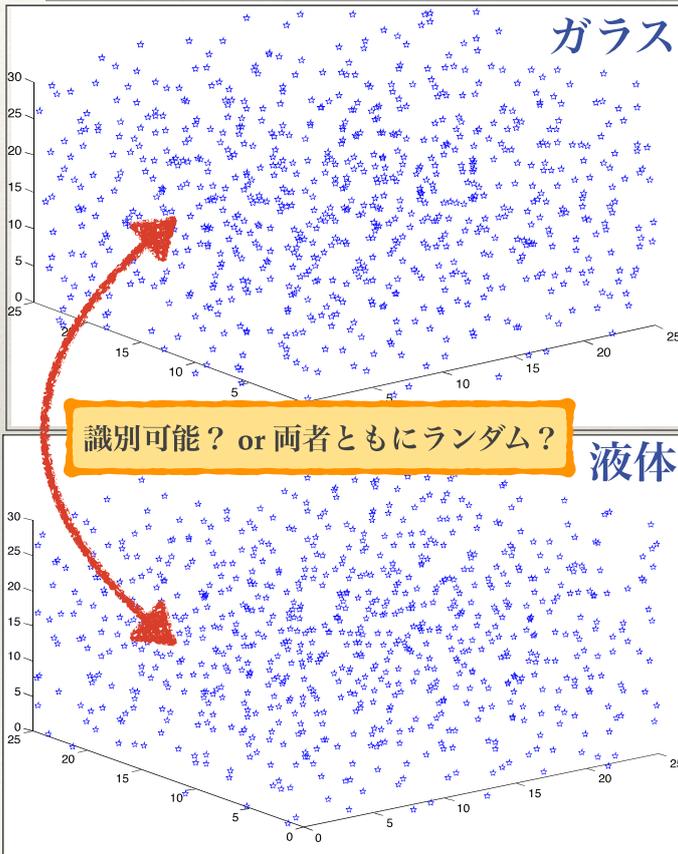
球を膨らませる



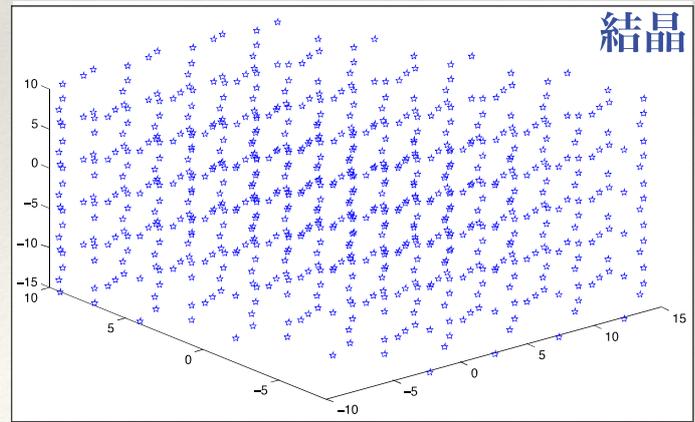
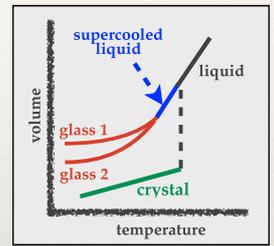
- PDの各点はデータ内の穴
- 発生軸は穴の発生パラメータ
- 消滅軸は穴の消滅パラメータ
- 対角線付近の点はノイズ
- 対角線から離れた点はロバスト

- 数学者Edelsbrunner, Carlsson等によって開発 (2003, 2005年)
- 穴のサイズ, 形状, 階層構造などを扱える
- 数学的進化と同時に、現在急速に諸科学への応用が進められている

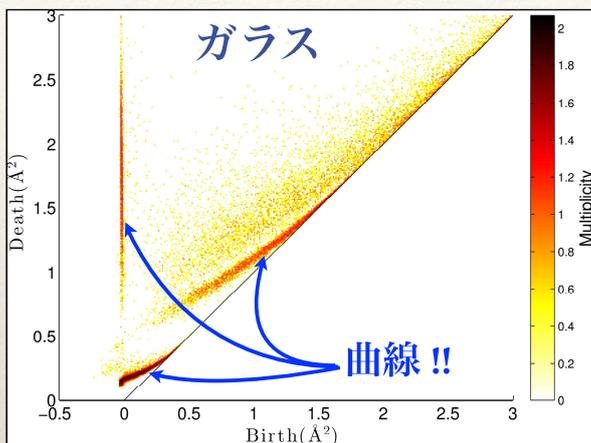
# ガラスの幾何構造



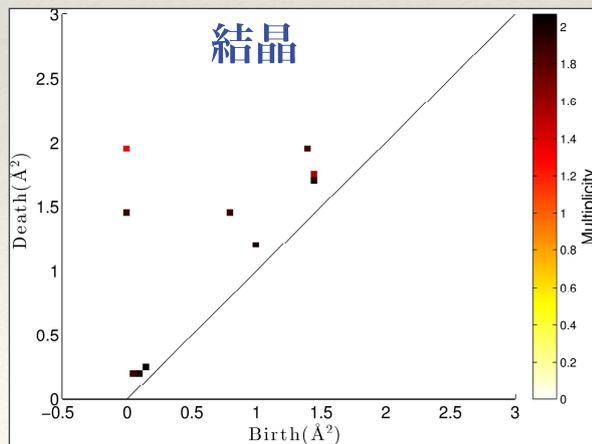
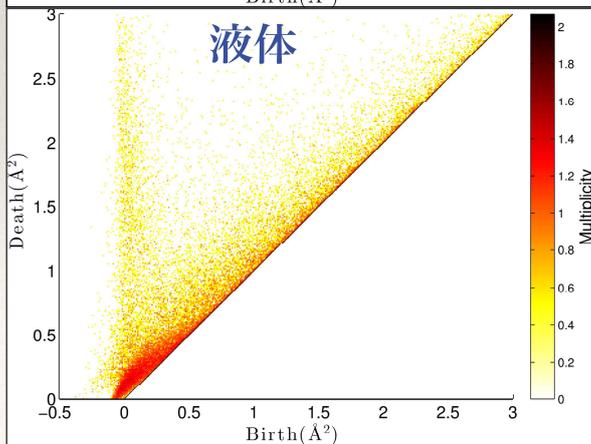
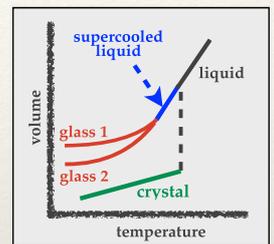
- 各状態での原子配置 (SiO<sub>2</sub>)
- ガラスの幾何構造記述は現代科学の未解決問題
- 太陽光発電やストレージ材料開発にとっても重要
- 液体とガラスの違い???



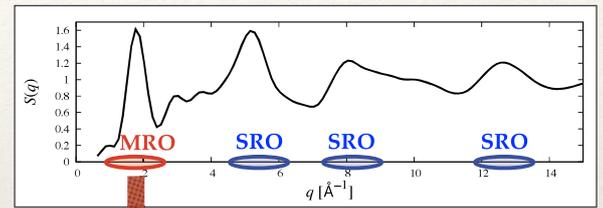
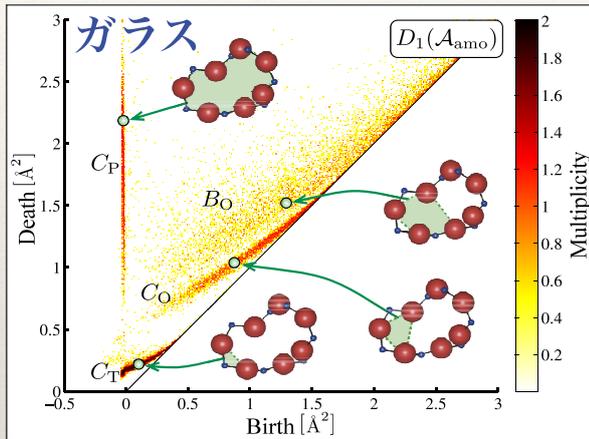
# ガラスの位相的データ解析



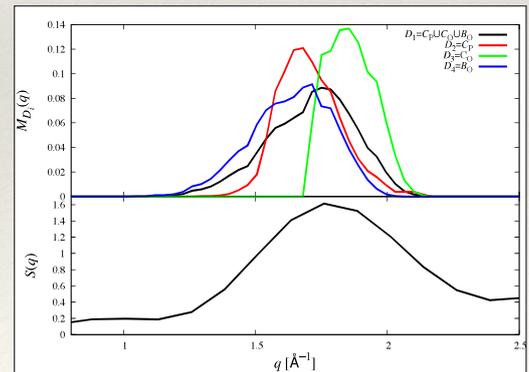
- PD1を表示 (リング構造に着目)
- 結晶の規則性は0次元的分布
- 液体のランダム性は2次元的分布
- **ガラスは1次元的分布 (曲線) !!**



# ガラスの階層クラスター構造



reproduce and decompose FSDP!



- 曲線の存在から、ガラスの中距離幾何構造を解明
- リングに階層クラスター構造があることを発見
- FSDPの実空間幾何構造の解明
- 幾何構造と物性（加圧特性）の関係も解明

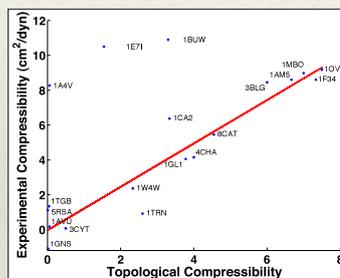
# 数学の普遍性

データ → 位相的データ解析 (TDA) → 特徴抽出

タンパク質解析

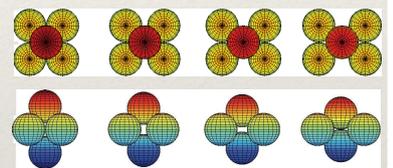
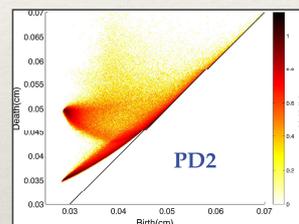


TDA



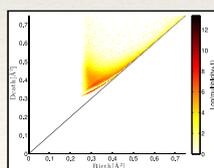
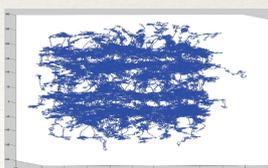
タンパク質圧縮率推定の成功

粉体解析



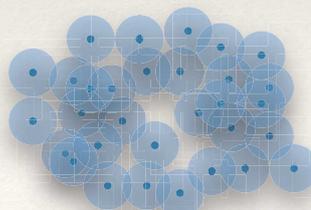
ジャミング転移点の幾何的特徴づけ (Sloan'sリスト)

高分子樹脂解析



粗視化幾何構造の解明

センサーネットワーク



原子 → センサー  
原子半径 → センシング領域

TDA

- 被覆問題
- ターゲットカウント
- ネットワーク流解析

# シーズへの継続的投資

1970s: G. Carlsson等によるTDAを用いたベンチャー企業構想発案

40年



NSF, DARPA, Air Force, 大学などから継続した  
研究資金サポート (学生やポストクの確保)

## AYASDI, Inc.

設立：2008年 (G. Carlsson, G. Singh, H. Sexton)

業務内容：TDAソフトウェア開発, ビッグデータ解析

取引先：生命科学, 医療, 製薬, 金融, 製造業, エネルギー, 情報通信など

最近の動向：ベンチャーキャピタル KPCBによる\$55M投資 (Series C)

## シーズ発研究への政策の必要性

- ベンチャー精神が盛んなアメリカでさえ, TDAに興味を持つ企業は当初は無し
- 数学的アイデアを実用化・ソフトウェア化するための人材育成費用が必要
- 短期的投資ではなく, 中長期的サポートが必要不可欠

## 「高齢化社会における日本の臨床医療とそれに貢献する数理科学の役割」

水藤 寛 岡山大学 大学院環境生命科学研究科 教授

【司会】 それでは、次の講演に移らせていただきたいと思います。岡山大学大学院環境生命科学研究科教授の水藤寛先生から御講演をお願いいたします。

【水藤】 御紹介ありがとうございました。岡山大学の水藤と申します。

私は、臨床医療の分野の医師たちと一緒に数理科学の立場から仕事をしていますので、その御紹介と幾つかの提案みたいなことを申し上げたいと思います。多分、先ほどの平岡さんのお話とは大分雰囲気が変わります。というのは、平岡さんは、おっしゃっていたように、シーズ発というかシーズ駆動型ですけれども、私の場合はニーズ駆動型です。臨床医たちが、こんなことをしたい、あんなことをしたいということを、どうやって形にしていくかということをやってきました。今話の出した数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索領域の中でやっております。何人かの医師たちと数理科学側の人間がチームを組んでやっています。



幾つかの柱を立てまして、主には病態機序、メカニズムの解明と、最近では統計的にどうかということが大事ですので、それを付けること。それから画像診断、これは今の臨床診断として非常に重要な部分を占めていますので、それらのことについて進めています。

臨床医たちが今どういう立場にいるのかなのですけれども、我々から見ると、とても大変だなというところなんです。数学の人たちも、いろんなことが、今、大変だ、大変だってぶつぶつ言っていますけれども、医師たちと付き合っていると、大きな病院に勤める医師の数はだんだん減って行って、だから、仕事が大変になって、より数が少なくなっていくというスパイラルに入っているようです。そうすると、研究に充てる時間は少なくなってきましたし、同時に、いろんな訴訟リスクにさらされていると。はたで見ても大変だなと思います。

それから、もう一つは高齢化の進行がありますので、検査の増加、医療費の増大。検査の増加ということは、上の訴訟リスクとも関係しています。病変がある可能性は高くないにせよ、病気がないことを確認するために検査をやっておかないと、後で大変になるという話があつたりします。そういう状況で、数理科学は何ができるかなのですけれども、それについて我々はいろいろトライ&エラーしております。目標とするのは、信頼性の高い予測であつたり、患者さんの負担、医師の負担を減らすこと。そういうことを通して、医療のレベルは保ちながら医療費の削減につなげられる、というわけです。

我々のチームでは、いろいろな話が持ち込まれると、それを1つずつやっているんですが、今日はそのうちから3つ、具体例を御紹介するつもりです。大動脈の形状、つまり大動脈りゅうという病気に関わる話と心不全の話、肝臓がんの画像診断の話です。

最初は、大動脈りゅうという病気に関係する話なんですが、最近ではCTとかMRIの撮像能力、つまりハードウェアはどんどん、どんどん進歩して行って、指数関数的に解像度も上がっています。それから、いろんな治療器具、ステントグラフトだとか人工心臓のようなものも、どんどん進歩していますが、どうもそういうものの進歩に対して、個々の患者さんのメカニズム、どうしてこの方は病気になったのか、どうしてこういうふうに進化したのかということを理解する論理はなかなか追い付いていません。

そういうことはよくあることかもしれないですか、ハードはどんどん進歩していきただけけれども、ソフト、論理がついていかないと。我々は理解したいと。大動脈の形状は個人差が大きい。形状がいろいろ違う。その形状と病態には関係があるような気がするが、よく分からない。そういうことが言われて、我々はそれを何らかの形で見つけようとしています。

例えば、我々の大動脈の形というのは個人差が大きいんですけれども、それをどうやって見たらいいのか。医師たちは、真っすぐだとか曲がっているとか、そういう言い方で表しているわけですが、それだけでは表現できない違いがあるんですね。そこで我々は、ある粗視化形状からの逸脱程度を用いた表現、その中では微分幾何学の方法論を使うわけですが、例えば、そういう比較をしています。

そうすると、いろんな形状、これはそれぞれが1人の患者さんで、左側はその患者さんの実際の形状で、右側は粗視化した形状です。色は壁面にかかっている壁をこするような力です。このような力は、大動脈の硬化とか大動脈りゅうの発生に直接影響しているわけですが、こういう力を比較して、でも、絵だけ見ても分からないので、これをある断面上で積分したりしてやりますと、はっきりした違いを見ることができます。赤が実際の形状で青が粗視化形状での力の分布です。

これを各患者さん、いろんな症例があるので、それを順番にやって、医師たちと一緒に眺めるわけですが、そのうちに、何か分類できるねということに気が付きます。左の列は、余り違わない。右側は大きく違っているところがあるということです。これによって2つに分かれたわけですが、こちらの列の症例というのは、実際には弓部、大動脈から脳とか上腕部に分かれる分岐血管がある場所ですが、そこに大動脈りゅうができた患者さんたちだったんです。そしてこちらの列は、下行部、胸の後ろから横隔膜を抜けておなかに行く方にできた症例なんです。この2つのグループを分離することは臨床的には重要なことで、その後の病態の変化の仕方も違いますし、手術や治療の難しさも大きく違います。弓部だと脳へ行く分岐のことがありますし、下行部は心臓の後ろとか、大事な臓器の間に挟まっていますので、治療方針は大きく変わってくるわけです。なので、この2つを区別したいというのが医師たちの要求でした。

これができて、しかも、このグラフを見て感覚的に比較するというのではちょっと困るので、ある積分量を定義すると、これがきれいに左右に分離できるようになります。元の形状があれば、それと先ほどの粗視化形状との違いを見ることで、2つのグループに分離することができるということが分かったわけです。つまり、今までは何となく、みんな個人差が大きいねと言っていたところに、ある幾何学的概念を導入したことによって、どの違いを見たらいいのかということを提供することができたというわけです。この違いが分かることで治療方針を立てることに役立つ、というストーリーです。

次の例で御紹介したいのが心不全です。高齢化に伴って、こういう病気がどんどん増えているわけですが、これの診断には幾つかの臨床的パラメータがあります。その1つに右室駆出率というパラメータがあります。我々素人は、どうも左心室の方が大事だろうと思いがちなんですが、循環器内科医たちは、右心室にも注目しています。右心室がどのぐらいしっかりポンプとしての役割を果たしているかという情報が非常に重要なことなんだそうです。これを知るために彼らは1拍分の心臓の動きの断層撮影をして、それを手でプロットして体積の変化を見えています。そんなの自動でできるだろうと思われがちですが、難しいんです。1人の患者さんについて熟練医が30分ぐらい掛けて、この作業をしているそうです。

それで、ある循環器内科医が、「〇〇の動きを見ていると病気の程度が大体分かると思うんだよね」ということを言いました。本当は〇〇のところに部位の名前が入るんですが、まだ論文になってい

ないので具体的な名前は伏せさせていただきます。「だから、数学で何とかならないかな？」という話になりまして、もうちょっと具体的にいろんなことを聞いて、紆余曲折(うよきよくせつ)があったわけですが、そうすると、その部位の軌跡が閉曲線を描くわけですが、その幾何学的なパラメータを幾つか取り出して重回帰分析に掛けると何かできそうになってきました。

そこまで枠組みができると、パラメータ選択の問題とか AIC という情報量基準を使うとか交叉検証法とか、いろんなツールはもう既にありますので、それらを使うと、きれいに相関が取れました。こちらが実測、つまり、1 人の患者さんに MRI の撮影をして熟練医が 30 分かけて算出した値で、こちらは 3 分でプロットして簡単に撮ったもので、これだけ合うなら臨床的に十分であろうというわけです。

そこまで来ると、あとは数理学側では、どんどん勝手に進み始めます。例えば、画像を見れば、これは自動抽出できるじゃないか？ということになります。今は医師が 1 枚ずつピックアップしているわけですが、そんなことをしなくても、自動で全部いけちゃうじゃないの？ということになってきました。実際にやってみるといろいろと難しいことはもちろんあるのですが、ここで強調したいのは、最初に数理学の枠組みに乗せるのはすごく大変なんですけど、一旦枠組みに乗ってしまえば、あとはいろんなツールが既にありますので、どんどん進んでいきます。それで、この話では結局、「何となくこう思うんだけど」と医師たちが言っていたことを、数理科学的に裏付けることができました。それによって手間が省けたし、MRI の画像も、もう断層でなくて、ある 1 断面でよくなる、ということで、いろんなところで省力化が実現するわけですし、これは先ほどの医師の負担軽減に対する 1 つの回答にもなっているわけです。

次の例が、今度は肝細胞がんの画像診断なんですけれども、これもいろいろ難しい問題があります。実際、今は、いろんな CT 画像、MRI 画像を撮りまして、それを熟練医が並べて見て、これはがんであるとかないとかの判断をしているわけですね。いろんな画像というのは、例えば MRI で、こういうところを強調して撮るとか、造影剤を入れる入れないなどで異なる画像が撮れます。それで、それらの画像の関係については、こんな図が教科書には描いてありますが、実はこの図の情報量は余り多くないんです。いろんなことが関係しているよと書いてあるんですが、それらが羅列されているだけで、それらの関係というか構造は不明なわけです。

でも不思議なことに、熟練医たちはそれらの画像を見て、正しい答えを出すんですね。しかし彼らは、どうやって判断しているのかは説明はできないんです。でも、何かあるはずなんです。なぜなら、熟練医たちは全員が同じ正しい答えを出すわけですから。そこで我々は、classification tree というのを使って、そこからアルゴリズムを抽出するというのを試みました。これは統計ではよくある手です。これをやると、最初にその画像で分離して次はどれで分離してという手順を 6 段階ぐらいすると、がんの低分化、中分化、高分化、良性というのを分けることができました。これを医師たちに見せると、そう言えば自分たちも最初はこの画像を見るよね、次に見るのはたしかにこの画像だよ、それでも分からないときはこっちを見るよね、ああ、そうだ、そうだ、ということで、数理科学的に抽出したアルゴリズムが、熟練医たちの直観によって裏付けられたわけです。それで、ああ、よかったなというところなんですけど、これが分かると、彼らは後輩に、研修医たちに、どうやって判断したらいいのかを順序立てて説明できるようになります。最初に、これを見るのだよ。次にはこれを見て、これを見て、それでも駄目だったら、これを見るんだよということが説明できるようになるので、よかったと。

先ほどの心不全の話と時と同様に、一端枠組みができると数学の方は進みやすくなります。今の場合の Classification tree だったら、これについて研究している人はたくさんいるので、「剪定(せんてい)」とか言うんですね。この枝を切って、短くできますよ。そうすると、3 段階で全部できちゃうわ

けです。これを今度は医師の方で使うようになれば、ずっと簡単なアルゴリズムで判断ができるというわけです。

ここで、思い浮かぶ話は機械学習ですね。この問題ではいわゆる教師データがあるのだから機械学習で全部できるんじゃないの？ということたまに言われます。ただ、それにはちょっと弱点があります。というのは、もし機械学習で完璧に判断できるブラックボックスができたとしても、あとから医学の進歩に伴って当然新しい医学的知見が加わっていくわけですよ。この部分に新しい検査法ができたとかです。そういうときにブラックボックスでは対応できず、もう一回、一から学習させなきゃなりません。というか、本当にその時点で完璧なブラックボックスができてしまうと、そこでもうその熟練医の技術は途切れてしまうので、それでは将来の発展につながらないわけです。なので、ブラックボックスではやっぱり困り、中身のロジックがどうなっているかということを知っておく必要があるわけです。ここが数学が関与できる重要なところだと思います。

ここで事例紹介を終えまして、幾つかまとめ的なこととお話したいんですけども、こうやって数理科学の人間が臨床医たちと一緒に仕事をするやるのはすごく大変です。言葉も違う、文化も違う、時間感覚も違うで、違うことばかりですが、それはそれで解決できます。我々もそれを長年やってきて、その経験を蓄積してきました。現状としては、医学の学会などでこういう話をさせていただく機会があると、たくさんの医師たちが次々と問題を持ちかけてきてくれます。今のところ、懸案になっているものを幾つかここに書きました。いろんな伝説とか、こんなことが言われているんだけど、僕たちはどうもそうじゃないんじゃないかと思っているんだ、とかという話がいろいろ出てきます。

だから、市場はいっぱいあります。その中には、数学というものに対する過大な期待ももちろんあります。何でもできるんじゃないかとか、もちろん、何もできないんじゃないかと思っている人は持っていないわけですけど。また、数学的な面白さが内在していることを予感させるような提案まで、いろいろあります。なので、こういう問題をひとつずつ解決していきたいんですが、マンパワーの問題から全部はできていません。

医師の側にも数学に対してはいろんな誤解があって、数学というのは数字を扱っているんでしょという誤解があります。非常に細かいことをやっていると思っている医師たちもいて、私も先日、医学の方の研究会で講演をしたら、そういうふうで紹介されて、いやいや、そうでもないんですということを行いました。でも、一人が両方を理解するのは難しいんですが、何かしら適切な通訳さんがいれば大丈夫です。私も一応、純粋数学の人と医師たちの通訳は、最近できるようになってきたんじゃないかなと思っています。

それから、もうひとつ、よくある誤解として、スパコン「京」で全部計算すればいいんじゃないかと言われることがあります。それはちょっと違うと思うんです。例えば、スーパーコンピュータで全てを計算する。人体を細かいところまで全部計算してしまって、患者個別の解決策を出そうという戦略もあります。それはできるだけ詳細な計算条件を使って全部計算していくわけですが、その対極として、もっと一般化した理解で、具体的じゃなくて抽象的、いろんな症例の共通部分を取り出す。それによって、何かの値を求めるんじゃなくて、メカニズムを明らかにするという方針です。

例えば天気予報ですと、あしたの何時に虎ノ門で雨が降るという情報は有用でしょうけれども、それが何でなのと。西から低気圧が近付いているからなのか、前線が停滞しているからなのかということを知っておくこともまた有効でしょうということです。それから、私は今、環境理工学部というところにいるんですが、環境問題では、信号がいいのか標識がいいのかという議論があります。信号というのは、環境基準値をちょっとでも下回っていれば安心してよくて、ちょっとでもオーバーしたら大変だっ

て大騒ぎするわけですけど、それよりも、この変化は許容できるのか、この変化は許容できないのかという方を重視する考え方があります。ここから先は私の勝手な考えですが、こちら側はどちらかというと工学的な考えかなと思います。こちら側が数学的な考えに近いんじゃないかと思います。

というのは、物事を具体化する、詳細に見ていくというこちら側の戦略と、抽象化していく、本質は何かということを探す戦略は、もちろん、どちらが良い悪いじゃなくて両輪として必要なんですけども、数学は多分、こちらが得意なんじゃないかと私は思うんです。また、先ほどもありましたが、数は扱ってなくて文字で扱っていることが多いとか。こういうふうにと考えると、臨床医というのは具体性を重視する工学側だよなと思いがちなんですけど、実はそうではありません。臨床医たちと話していると、彼らの対象は我々の体ですので、それは余りにも複雑です。全部理解しようと思ってもとてもできないものを扱っているんで、彼らはやっぱり一番大事な、この病気の本質的な要素は何か、をいつも考えているようです。そうすると、結構数学者に近いんですね。最近気が付いたんですが、医学の方には「典型的症例」という言葉があります。普通は、ある病気でも合併症があったり、いろんな状況があって違う様相を呈するわけですけども、そういうものがない典型症例というのがあると、それを使って、いろんなことが考えられるわけです。それって我々の言っている数理モデルじゃないかと思います。数学がやっている数理モデルと、彼らが言っている典型的症例というのは複雑極まりない対象から一番大事なところは何かということを取り出す抽象化の営みだと思うのです。

しかし、このようなことをするには、数理科学側としては非常に幅広い数学が必要になります。ということは、どうしても1人じゃできないんです。これは私の例ですが、先ほどの数学領域が始まったころというのは、私は放射線科の医師と2人だけでずっとやっていました。けれど、さきがけが始まり、その後、CRESTが始まってから、急に周りにネットワークがどんどん芽づる式にできてきて、今の状態はこんな感じです。臨床医側には外科医、内科医、数学側には応用数学の周りに純粋数学で助けてくれている人たちがこのようにたくさんいます。こういうネットワークでもって対処しないと、余りに問題の幅が広いのでできないというわけです。

最後に、平岡さんと同じく、幾つかの提案をさせていただきます。今御紹介したような研究というのは、ニーズ駆動型です。なので、やってみないと何が必要になるか分かりません。実際、やってみたら、いろんな数学が必要になりました。私の場合は、JST 数学領域というのがありましたので、困ったら、そこに行って、「こういうこと、困っているんですけど」と言うと、「ああ、それはね」と言って手を挙げてくれる人がいました。でも、JST 数学領域はいつまでもあるわけじゃないので、やっぱりそういうネットワークというものは必要だと思います。それを Virtual Institute と言ってもいいかもしれませんが、何かのときに助け合えるというか、知恵を出し合える数学者ネットワークです。もちろんそれをまとめたり、実質的にやっていくには、異分野の言葉や文化を通訳できる人材が必要です。これは国際交流と近いと思うんですけど、言葉が通じないときにどうやって話すかということですね。そういうことができると、次は、数理モデリング、これは数学の言葉にすることです。それができたら、それをコンピューターで実現する、それを人に見えるように可視化する、このようなスキルを持った人材はやっぱり確保しておかないと、ニーズが来たときに対応できません。

それから、これも先ほどちょっとありましたが、人材育成の話です。私たちのグループで今、強く思っているのは、こういうことをやっていく若手の研究者は非常につらいものがあります。というのは、このような研究は、既存の研究分野とか科研費という細目とかに属していないので、ここで何か成果を出したとしても、その論文が将来何らかのポストにアプライしたときに評価されるかどうか分からないという懸念があるわけです。

そこで幾つか勝手な提案ですが、例えばPDやDCの細目に、こういう他分野との連携ということを目指したものがあれば、若手研究者にとって1つのインセンティブになるであろうと思います。もちろんそういう人が目指すキャリアモデルというものも必要です。それから、数学界や、この数学界というのは日本数学会じゃなくて、数学者一般の「世界」の「界」ですけど、が、こういう取り組みを、「うん、それも必要だね」と思ってくれば、若手研究者も安心して、こういう連携研究に進んでいけると思います。そういうことをやっていけば、結局は諸科学と緊密に連携する数学・数理科学というのがだんだんと実現していくと思っている次第です。

以上です。どうもありがとうございました。(拍手)

【司会】 水藤先生、ありがとうございました。

【司会】 それでは、会場からの質疑応答の時間に移らせていただきます。

【質問者 E】 貴重な御講演ありがとうございました。科学技術・学術政策研究所の斎藤でございます。

こういった本当の意味での学際領域で、しかも非常にすばらしい世界につながった、これは本当に成功事例として、あちこちに喧伝(けんでん)したいような取組を伺った気がいたします。ただ、最後の方で先生が御指摘になった、やはり若手のキャリアパス、キャリアモデルが成立するかどうか、これが大変重要なポイントだと思っております、お話の中でも、適切な通訳が必要だということで、言葉も文化も時間軸も違う。あるいは、ひょっとすると、臨床と工学者ですとリスク評価の概念も全く違うんだろうと思うんですね。ある程度のリスクを許容できるということで進むのか、あるいは、わずかなリスクも許されないという、これで全然モデルも違ってくると思うんですが、1つは、そういった若手で両方を理解できる通訳というか、マルチディシプリンの人材が育ってきたとして、彼らが1つは、まずインセンティブの第1は、ポストを求めるときに学位が必要ですよね。ですから、まず学位の在り方として、やはり数学か医学かどちらかで取らなきゃいけないというのが1つあるわけです。そういう学際的な分野の学位というものが果たして成立するかどうか。あるいは、学会発表1つ取っても、普通、こういう学際領域ですと、中間的な応用数学・医学会みたいな、第3の学会ができる場合が多いわけですけども、本来で言えば、最後の御提案があったような数学会の方で臨床医学の発表ができる、あるいは臨床医学で数学の発表ができる。そうすると、両方で評価をされるわけですから、ポストのチャンスも2倍になるわけですよね。そういう伝統的な学会が、こういう学際領域に対応できるように本当になるかどうか、これは若手の頑張り次第かもしれません。それが1つでございます。

もう1つは、これ、きょうのお話を伺っていて、NIIの新井紀子先生が言っている「東ロボ君」を思い出したんですけれども、あれも人工知能が果たして東大合格レベルまでいくかどうか。あれの現状は、やはり国語の要約問題が苦手だという結果が出ております。これは、やはり1つ試算がありまして、熟練医の経験の勘みたいなのを、かなりの部分、数値化できる、モデル化できるということは分かったわけですが、やはりそれがやり切れない部分、どうしてもロジックに落とせない部分が残るんじゃないかと。それは1つは、無駄なところを切り捨てるという、そういうことかと思うんですね。意味のないところを切り捨て、本質のところを見に行く。これはやはり計算機だけでは、なかなかできないように私は思うんですけれども、先生御自身は、更にコラボレーションが進んでいくと、将来、熟練医でなければやれないロジカルでない部分というのはだんだんゼロに近づいていくというふうにお考え、あるいは、最後まで残るので、人間の仕事は最後まであるぞという、そういう感じか、そのコメントだけ伺いたいと思います。

【水藤】 私は最後まで残ると思います。というのは、少なくとも、今の時点で熟練医たちが持っている技術を完全に再現できるとは思えないからです。できることは、幾つかの病態について彼らがどう判断をしているかということの概略を抽出して、彼らが後輩に伝えられるようにするという事なんです。もちろん仮に完璧に診断できるシステムができたら、今はそれでいいかもしれないですけど、先ほどちょっと言ったように、それでは将来続かないですから、周りの状況もどんどん変化していくわけですし、それに対応していくには、やっぱりブラックボックスじゃ駄目で、中身が分かっていることが必要だと思います。あとは、医療の問題は社会的なことを含んでいますので、例えばブラックボックスができたとして、社会がそれを受け入れてくれるか。病院で検査値をコンピューターに入力したら、こういう治療をせよって出たから、はい、そのとおり、ってみんな思うかというところの問題もあります。現状は多分、それはノーで、やっぱり信頼できる医師が、こう判断するということで、皆ある程度任せる、という言い方がいいかどうか分からないですけども、そういうところがありますので、そのような社会的要因が大きいと思っています。

【司会】 先生、学位の方はいかがでしょうか。

【水藤】 学位ですか。私の個人的な考えでは、学位まで融合分野にしなくても、学位自体はそれぞれの分野で取る方がいいような気がします。というのは、もちろん研究は融合させたいんですけど、余り融合、融合と言っていると軸足がなくなってしまうというか、自分の故郷はどこだっけという感じになってきて、やっぱりそこのところは必要じゃないかと思います。国際交流でも、よく自分の国の文化をまずちゃんと知れということが言われるわけですけど、それと似たようなところはあるんじゃないかと思っています。なので、特に学部教育までおいたら、やっぱり今のような、それぞれの分野をちゃんとやるというのは必要だと思います。

【司会】 ありがとうございます。

【質問者 F】 一般参加なんですけど、お話の例、いずれも分かりやすかったんですけど、特に 2 番目の心不全の診断が非常に分かりやすかったんですけど、最後、ちょっともやもやしてしまったのは、数理モデルに乗ると、どんどん進むということで、もう既に日本中そうなっているよ。つまり、何枚も撮っているようなことはなくて、1 枚の断層でやっているよということになっていけば非常に分かりやすくなっているんですけど、最後、そこまでいってないんだなというところで、もやもやしたのは、もう少し時間がたてば、いずれ日本中そうなるよということなのか、何かそこに障害的なものがあるのか。

【水藤】 特に障害は今のところ、ないです。この結果が出たのは 3 月の末のことなので、じゃ、データを増やそう、と言って進めているところなんです。正直、いろんな例があって、そうやって途中でもやもやしちゃうやつもあるんです、ただ、この話はこのまうまくいくだろうと思っています。

【質問者 F】 順調にいくと、いずれは日本中こういうやり方になっていると思ってよろしいという結論だといいたんですけど。

【水藤】 もちろん、その間には、例えばガイドラインに載るまでの間には、すごく距離があるので、来年載るということはある得ないですけども、ずっと積み重ねていって、将来的には、ガイドラインに載るような共通の認識になったらいいなと思います。数学と臨床医療の協働にはいろんな話題があって、最終目標をどこに置くかというのは様々です。医師が何らかの仕組みを理解する助けになればオーケーという話と、ソフトウェアができたらオーケーという話と、医学の方のガイドラインに載ったらオーケーという話があるわけです。

【質問者 G】 科学技術振興機構の大竹と申します。どうもありがとうございました。

ちょっととんちんかんな質問になるかもしれないんですけど、先生、いろいろやっておられて、もち

ろん症例だからなんです、この後、こういういろいろな、例えば、画像データとか、すごいデータなわけですね。ビッグデータの的なアプローチで、更にいろんなことが進展するというのはあり得るのか。

【水藤】 あり得ると思います。

【質問者 G】 それはなさっていらっしやらない……。

【水藤】 まだビッグデータとしての扱いまでいけておりませんが、もちろんそれはつながっていくと思います、医療データは、ビッグデータそのものだと思いますので。

【質問者 G】 そうですよ。

【水藤】 はい。ただ、個人情報の扱いとか、すごくいろいろ難しいことがあるので、先日、ビッグデータ領域の方でやられている医療データの個人情報という研究会に勉強のために行ってきたんですけども、そういう問題も含めて解決しなきゃいけない課題はいっぱいあると思いますが、ビッグデータとしての扱いはとても大事だと思います。

【質問者 G】 なるほど。あと、もう一つ、先ほどの教育の話だと、実は今、我々の方でいろいろ検討しているんですけど、アメリカの NSF が日本の工学部の成功にならって、30 年ぐらい前からエンジニアリング・リサーチセンターというのをやって、まさに先生がおっしゃるように、パイ型というか、ミュー型というか、要するに、工学者であるけれど医学も知っている、医学者であるけれど工学も知っている、そういう人が、ダ・ヴィンチみたいなロボットを開発するような、そういうことをやると。そういうような、今、先生は、先生同士の協力ですけど、学科の間で、もちろんさっきおっしゃるように、1 つ軸足があった上で大学院レベルでそういうような連携を作る、そんなトライアルはなさるつもりはございますか。

【水藤】 はい、あります。というのは、私のいるところは田舎の大学ですけども、そういう取組はしていて、数学をやっている子が農学の研究室に行くとかその逆とか、そういうことはやっています。それをやると、学生の方にも非常にいい影響を与えますので、そういうことをもっとやっていきたいです。そういう取り組みがもっと大きな流れになるといいなと思っています。

【質問者 B】 大変すばらしいあれですが、ちょうど 10 年前、「忘れられた科学—数学」という、ここでシンポジウムが行われたと。そのときには、いろんな問題に対して、数学が非常に必要なんだけど、数学者側から出てこない、こういうことがあのかのときの結論であったような気がするんです。ただいまのお話を伺うと、これは言うなれば、数学者と臨床のコラボレーションの問題だと思うんですね。ただいま現在は、数学者が大分出てくるようになったのか、まだ足りないのかと、そこだけお伺いしたい。

【水藤】 臨床医学との協働にですか。

【質問者 B】 ええ。

【水藤】 足りないです。というのは今、医学側から寄せられる問題が多いのにその全てには対応できてないので、もっと一緒にこういうことをやる人が増えてきたらいいなと思います。もちろんいろんな、先ほども言っているような問題があるので、特に若手が加わるのには勇気が要るみたいなどころがありますので、そこを何とかしなければなりません。数学側にとっても臨床医学というのは一緒にやる相手として穴場だと思うんです。何かの役に立ちたいという欲求も満たせる、というのも変ですけど、必要とされていることが非常に多いので、若手を含めてもっといろいろな人を巻き込んでいきたいと思っています。

【質問者 B】 どうもありがとうございました。

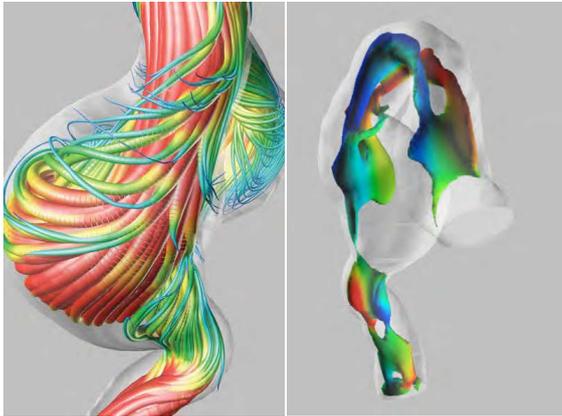
【司会】 時間が非常に押しておりまして、後ほど、意見交換の時間がございますので、その場で追加の質疑をさせていただければと思います。水藤先生、御講演ありがとうございました。(拍手)

# 高齢化社会における日本の臨床医療と それに貢献する数理学の役割

岡山大学大学院環境生命科学研究科 / JST-CREST

水藤 寛

[suito@okayama-u.ac.jp](mailto:suito@okayama-u.ac.jp)



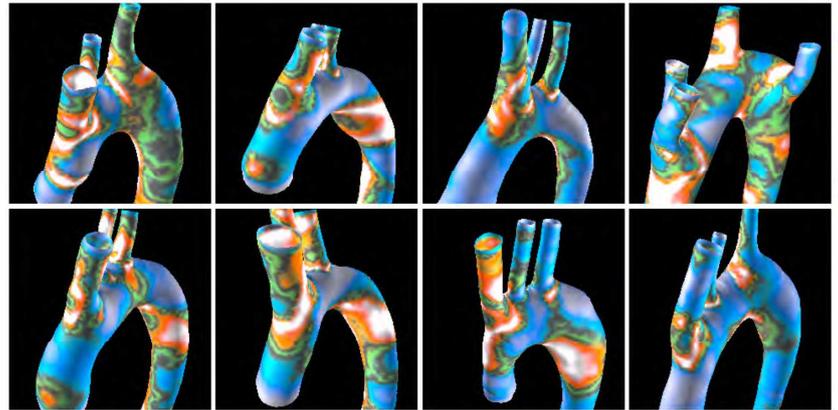
CREST 放射線医学と数理学の協働による高度臨床診断の実現  
ALLIANCE BETWEEN MATHEMATICS AND RADIOLOGY

Contents  
 トップページ  
 メンバー  
 研究概要  
 関係する研究会  
 研究内容の紹介  
 研究業績 (論文等)  
 研究業績 (口頭発表)  
 お知らせ  
 お問い合わせ

最新ニュース  
 数理学と放射線医学の協働による高度臨床診断の実現  
 (発表日: 岡山大学大学院環境生命科学研究科)

News & Topics  
 2012年4月20日 CRESTワークショップ「医療画像診断と数学・統計学の関わり」を開催しました。詳しくはこちらをご覧ください。  
 2012年3月11日 CREST研究員を募集しています。詳しくはこちらをご覧ください。一時的締め切りです。  
 2012年3月22日 第9回CRESTワークショップ in 岡山「特異なデータから実証しない情報を取り出す数学」を開催しました。詳しくはこちらをご覧ください。  
 2012年3月19日 CREST Workshop "Recent Developments of Mesh Generation and Biofields"を開催しました。詳しくはこちらをご覧ください。

Copyright © CREST "Alliance between Mathematics and Radiology". All rights reserved.



## JST-CREST 「放射線医学と数理学の協働による高度臨床診断の実現」

岡山大学大学院環境生命科学研究科 / 水藤 寛  
 誠馨会千葉メディカルセンター放射線科 / 植田 琢也  
 東京大学大学院数理科学研究科 / 齊藤 宣一  
 早稲田大学理工学術院 / 滝沢 研二  
 平静会大村病院画像診断部 / 井上 幸平  
 広島市立大学大学院情報科学研究科 / 増谷 佳孝



CREST 放射線医学と数理学の協働による高度臨床診断の実現  
ALLIANCE BETWEEN MATHEMATICS AND RADIOLOGY

Contents  
 トップページ  
 メンバー  
 研究概要  
 関係する研究会  
 研究内容の紹介  
 研究業績 (論文等)  
 研究業績 (口頭発表)  
 お知らせ  
 お問い合わせ

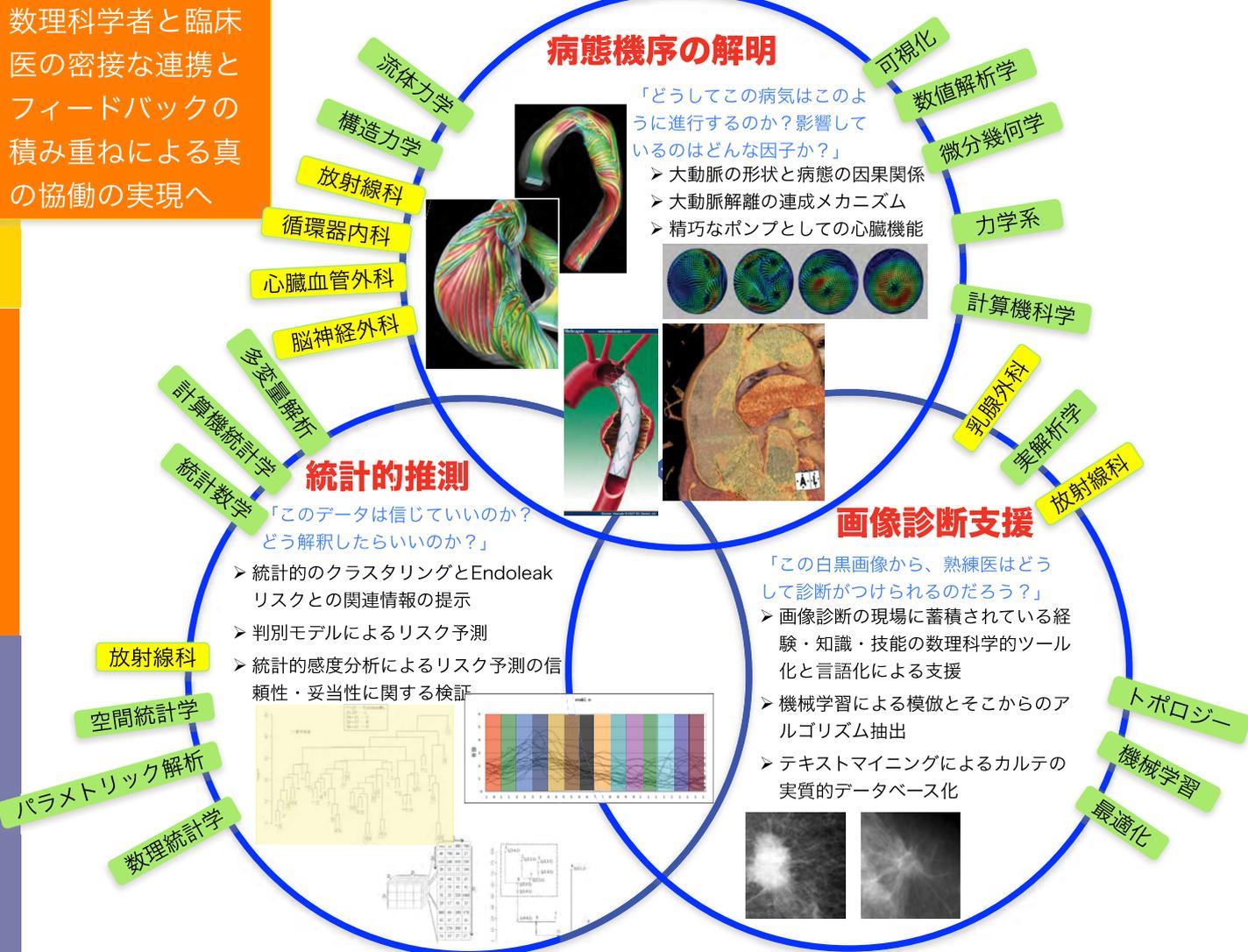
最新ニュース  
 数理学と放射線医学の協働による高度臨床診断の実現  
 (発表日: 岡山大学大学院環境生命科学研究科)

News & Topics  
 2013年5月28日 第13回CRESTワークショップ in 岡山 (徳野雅太郎氏) を開催しました。  
 2013年5月23日 第12回CRESTワークショップ in 岡山 (中津嘉彦氏) を開催しました。  
 2013年5月9日 第11回CRESTワークショップ in 岡山 (後藤慎一氏) を開催しました。  
 2013年3月18日 第10回CRESTワークショップ in 岡山 (Evangelos Mitsis氏、関野昌子氏) を開催しました。  
 2013年3月13-14日 CREST国際シンポジウム Collaboration between Mathematical Science and Clinical Medicine を開催しました。

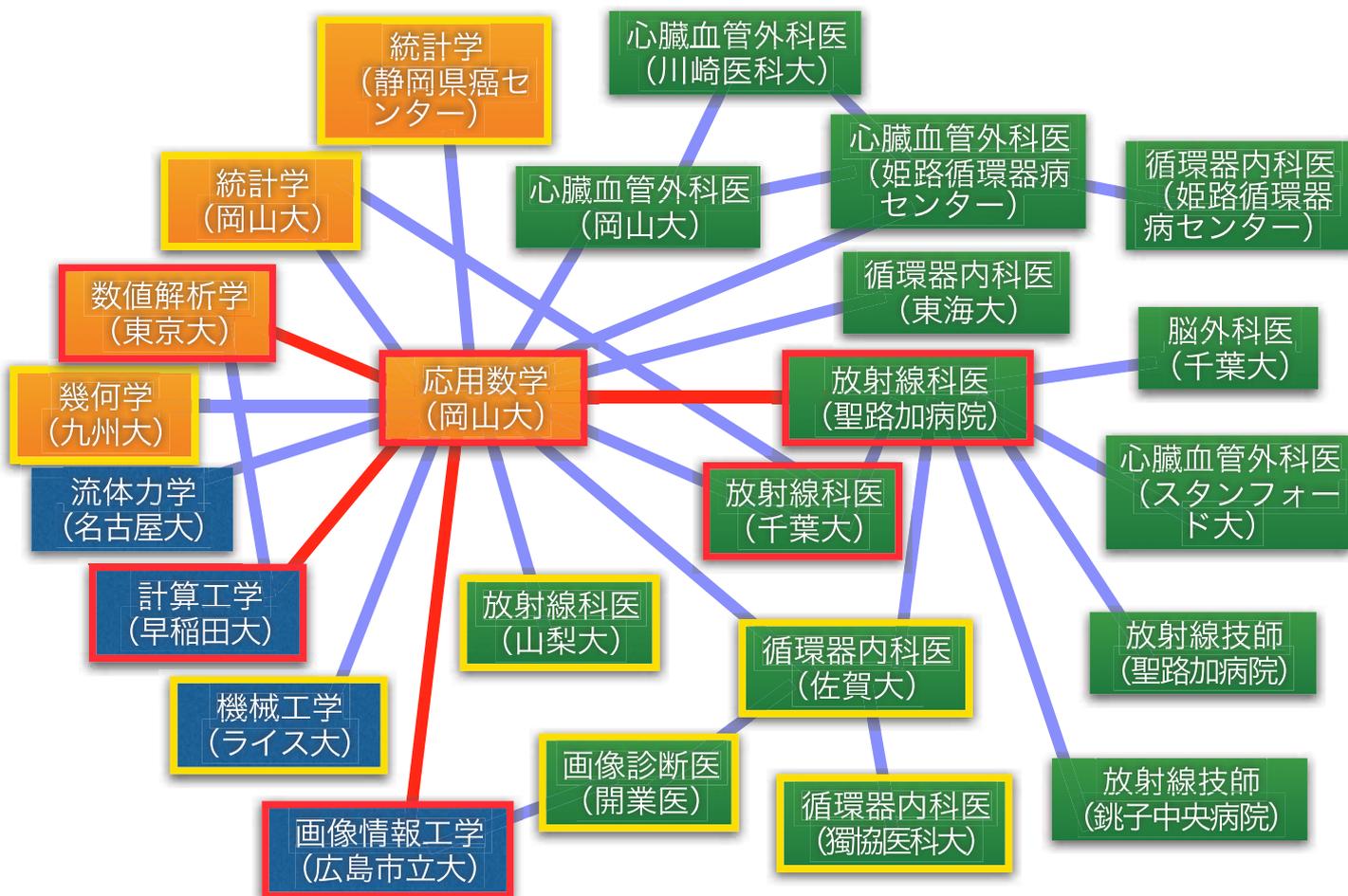
Copyright © CREST "Alliance between Mathematics and Radiology". All rights reserved.



数理科学者と臨床医の密接な連携とフィードバックの積み重ねによる真の協働の実現へ



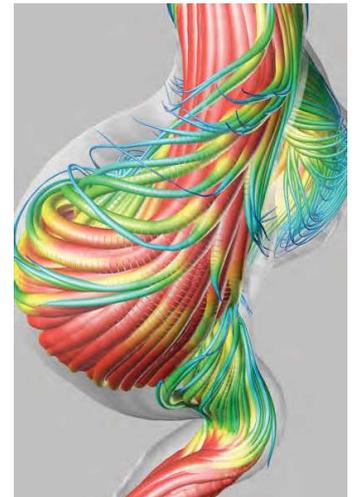
### さきがけ、CRESTを通して構築してきた研究者ネットワーク



# 臨床医学への数理科学からの貢献の形

□ 医師の負担増大（絶対数の不足、過重労働、研究に充てる時間の減少、訴訟リスク）

□ 高齢化の進行（意義のはっきりしない検査の増加、高度医療機関の負担増加、医療費の増大）



## 数理科学ができること

- 集積された経験的知識の体系化
- 最も本質的な部分の抽出
- 新しい視点・判断材料の導入
- 熟練医の技術・直感のアルゴリズム化

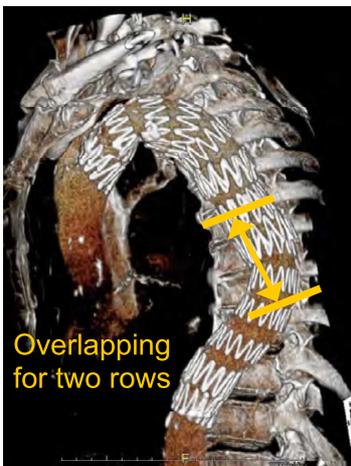


- 信頼性の高い予測
- 患者負担の軽減
- 医師負担の軽減
- 医療費の削減

## 事例紹介1

### 大動脈血流と大動脈瘤発生との関係 —幾何学的形状表現による理解—

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断

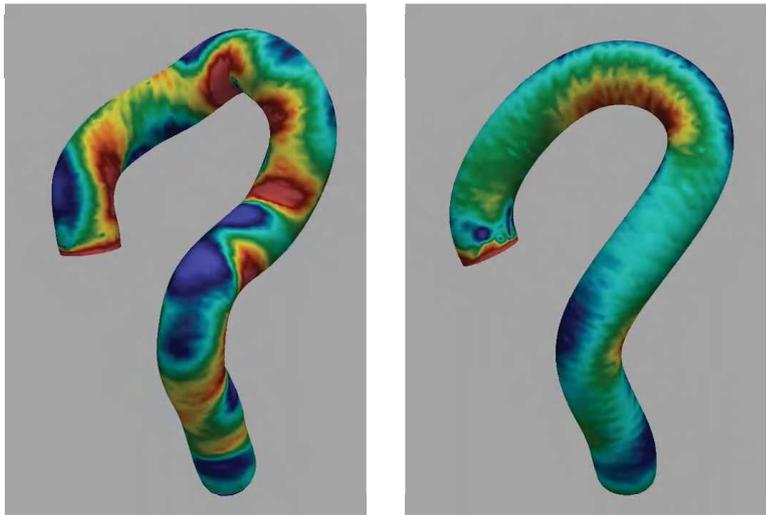


ステントグラフト治療後の屈曲

- 個人差の大きい動脈形状と病態の関係を明らかにしたい
- 治療の予後予測やリスクの算定につなげたい

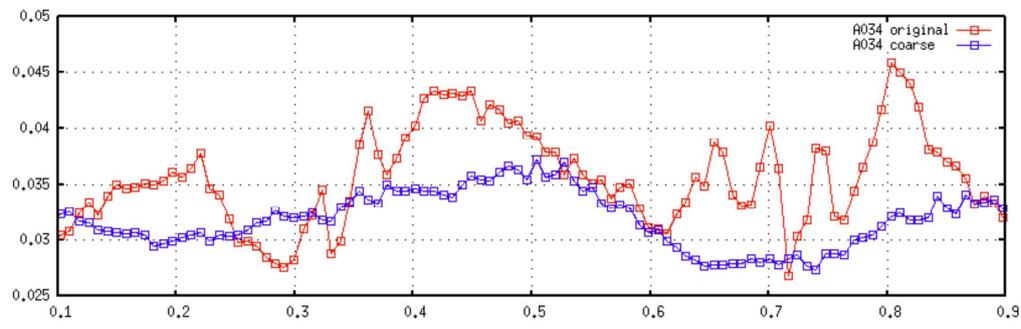
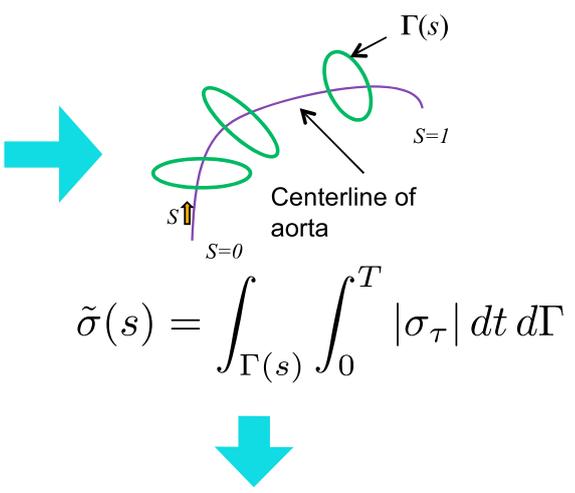
数学的手法で生成した粗視化形状との比較によって、患者固有の形状の特性が明らかになる。

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断



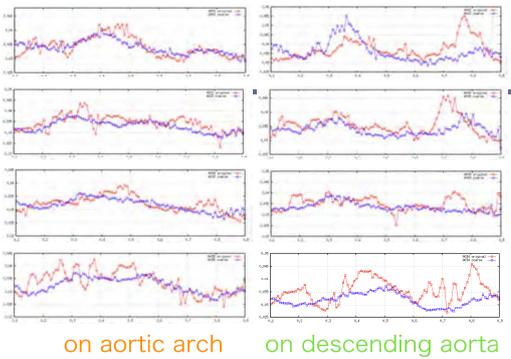
実際の形状

粗視化形状

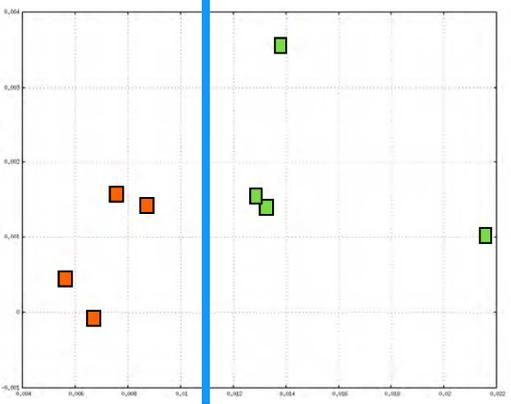
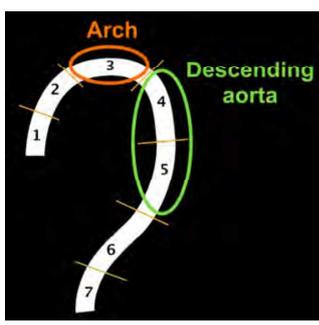


粗視化形状との比較による大動脈瘤発生位置の分類

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断



on aortic arch    on descending aorta



- 大動脈弓部に動脈瘤が発生した症例
- 胸部大動脈下行部に動脈瘤が発生した症例

- 個々の症例における形状の違いをどのような視点で見れば病態の違いに結びつけられるのかを示した。
- 形状の違いを端的に表現するための概念を提供した。
- 形状の違いがどのような仕組みで病態の違いに結びつくのかの理解につながった。

# 容易に取得できる画像情報を用いた心不全の診断とその自動化

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断

- 右室駆出率(RVEF)は、心機能を示すために重要なパラメータ
- 臨床現場においてRVEFを測るのには、医師・放射線技師の手作業量が多く、負担が大きい。
- 3次元(+時間軸)画像を取得するには検査時間も長くなり、患者にとっての負担も大きい。
- 容易に入手・処理できる画像の情報からRVEFを予測することができないか？

「心臓のある部分の動きを見ていると、心不全の程度がだいたいわかるような気がする」(熟練医の直感)



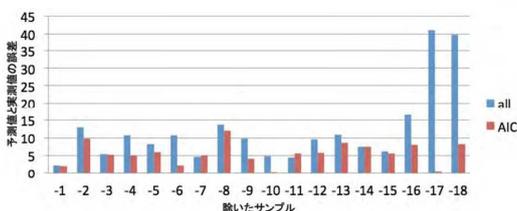
軌跡の閉曲線からいくつかの幾何学的パラメータを取り出して、重回帰分析にかけてみる。

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断

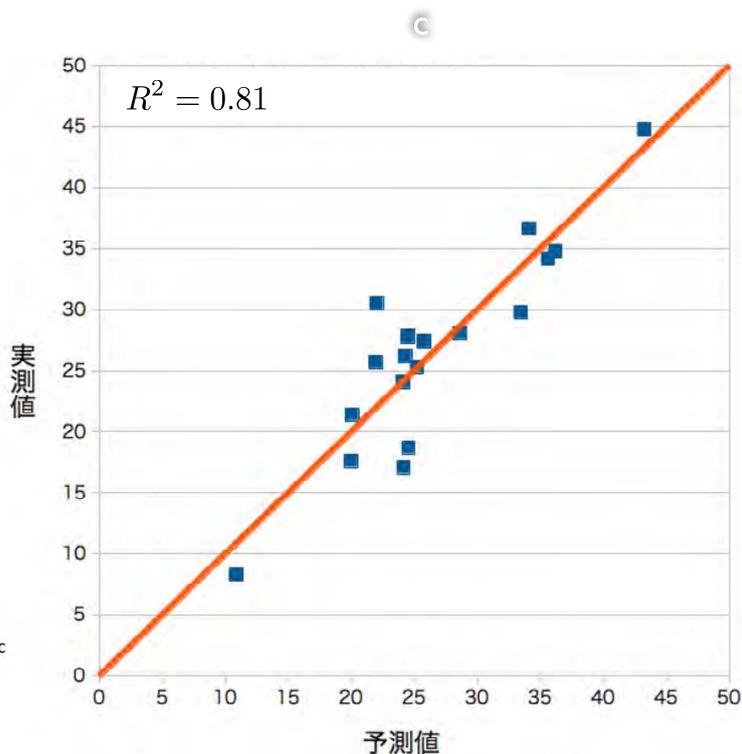
## 様々な統計的手法による改善

- どのパラメータを使うか？
- Over-fittingの問題
- 赤池情報量基準(AIC)を使う。

★ 数学分野では、数多くの手法が日々改善されつつある。



Leave-one-out 交叉検証法



臨床に十分な精度で予測ができた！

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断

# もっと省力化するには？

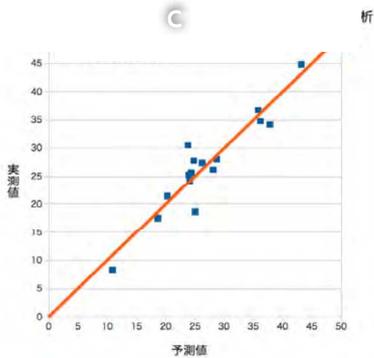
- 画像データから軌跡を自動抽出できれば、医師の負担はさらに軽減できる。➡ **計算解剖学との協力**
- コンピュータビジョン向けのライブラリである**OpenCV**に実装されている**テンプレートマッチング**という手法を用いる。

★ いったん数理学の枠組みに乗れば、あとはどんどん改善が進む！



- ★ 熟練医の「何となくの直感」を裏付けることができた。
- ★ 大幅な省力化が可能になった
- ★ 患者側のリスクも軽減
- ★ 医師不足社会における効率化

- DoubleTemplateMatching  
大小二つのテンプレート画像でマッチングを行う
- UpdatingTemplateMatching  
テンプレート画像を1ステップごとに更新する
- InteractiveTemplateMatching  
人の判断を反映できるようにする



心機能に対するもっと高いレベルでの理解が芽生えた → 発展中

## 事例紹介3

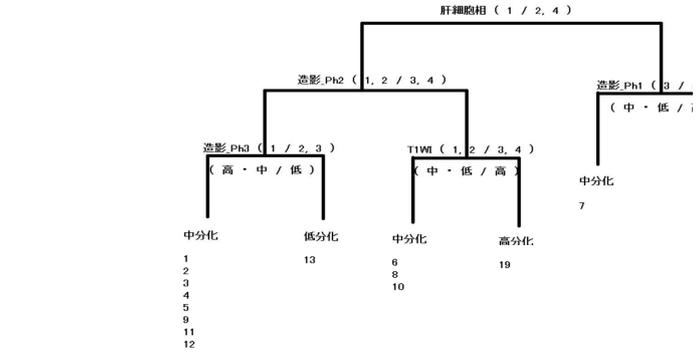
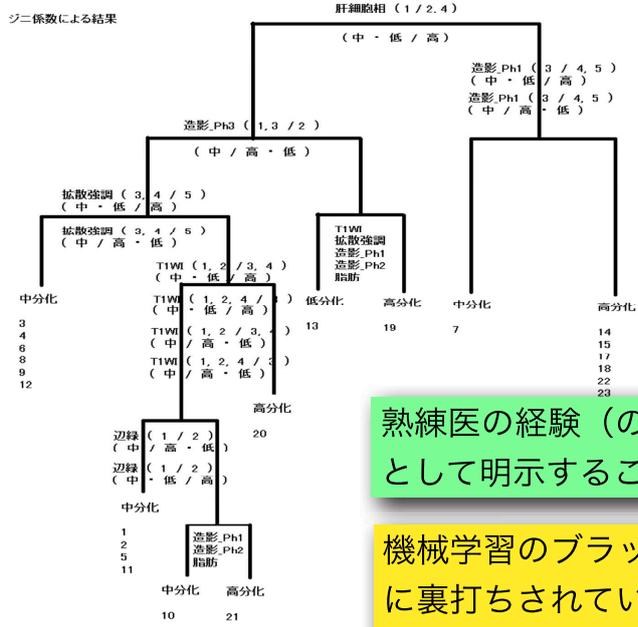
### 肝細胞癌における病理組織学的特性・血管新生の評価

- 大動脈の形状と病態との関係
- 心不全の診断
- 肝細胞癌の画像診断

樹木モデルを適用して明確な論理構造を抽出することを試みた。ここで扱うデータは、入力が計量的データ、出力が質的データ(カテゴリカルデータ)であり、ジニ係数またはエントロピーによる情報利得に基づいて分類木(classification tree)を作成する。(岡山大学・林邦好)

#### 逐次判断

#### 判断先読みによる単純化(剪定)



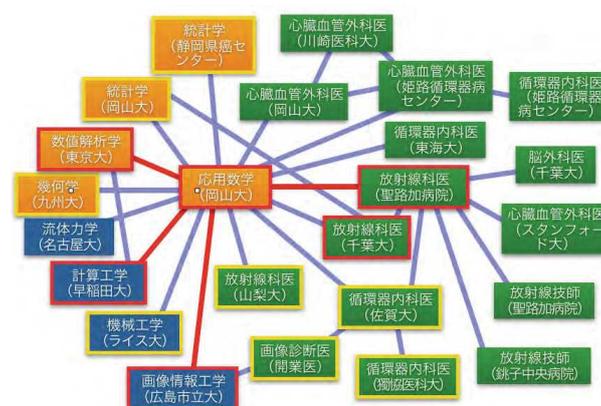
熟練医の経験 (の一端) をアルゴリズムとして明示することができた！

機械学習のブラックボックスではなく、熟練医の経験と直感に裏打ちされていることが重要。ブラックボックスでは、その後に出てくる新しい知見に対応できない。

## 臨床医学と数学・数理科学との協働

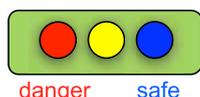
### 連携するときに大変なこと

- 言葉の違い、文化の違い
  - 研究を進める上での時間感覚の違い
  - 成果の評価に対する時間軸の問題
- 医学と数学の意思疎通には、大変なことが多い。しかし、それを解決する経験は蓄積してきた
  - 興味を持った医師たちから、次々と問題が提案されるが、対応しきれない。
  - 数学は「とても細かいことをやっている」という誤解
  - 数学に対する「過大な期待」を持った提案から、よく検討された現実的な提案、数学的な面白さが内在していることを予感させるような提案まで、千差万別。
  - 適切な通訳があれば大丈夫！

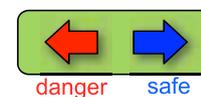


### 高性能スーパーコンピュータを用いた「全てを計算する」戦略との相違

- 患者個別解析 (Patient-specific simulation)
- 出来るだけ詳細な計算条件
- 定量的に正しいこと目指す
- 何らかの「値」を求める



- 一般化した理解 (Abstraction)
- 出来るだけ抽象化した問題設定と計算条件
- 定性的に正しいことを目指す
- 本質的なメカニズムを明らかにする



- 個別化すればするほど、他症例には適用しにくくなる
- 一方的にデータを受渡す研究手法が可能

Engineering

- 汎用性が高くなる
- 常に緊密なフィードバックを重ねていくことが必須

Mathematics

・ 数学は「数を扱っていない」ことが多い

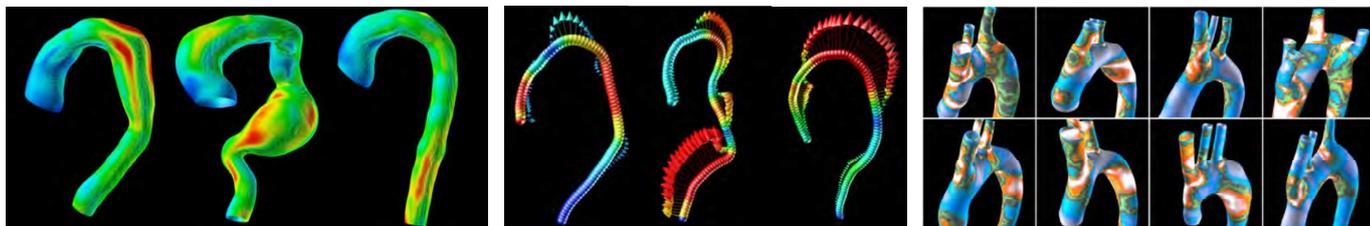
・ 「具体化する」（物事を詳細に見る）戦略と、抽象化する（本質は何か、を探す）戦略は、常に発展の両輪である。数学が得意とするのは後者

・ 臨床医は、常に「あまりに複雑で全部を理解するのはとても不可能なもの」を扱っている。そこから「本質的な要素は何か」を見つけようとする営みは、数学者に近いところがある。

# 臨床医学に対する数学・数理科学からの貢献の形



- 臨床医学と数学は案外相性が良い。本質的な部分だけを見ようとするところが共通点。
- 「典型的症例」と「数理モデル」は発想が似ている。複雑きわまりない対象から、一番大事なところだけを取り出そうとする「抽象化」の営み
- さまざまな数学が必要とされている。
- 医師の何となくの直感 →→→→ 数理科学的な枠組みの構築 → 新しい技法がどんどん適用可能に



15

## 提案

## このような数理科学と臨床医学の連携をもっと進めて行くには

- このような連携研究スタイルはニーズ駆動型である



どのような数学が必要になるかが、事前にはわからない。

- 課題解決を必要に応じて支援してくれる数学者ネットワークが必要 (Virtual Institute)
- 異分野の言葉や文化を通訳できる人材が必要
- モデリングのできる人材、コンピュータによる数理的実現ができる人材、可視化技術を持った人材、の三者を確保しておくことが必要

- このような連携研究スタイルは既存の研究分野 (細目) に属さない。



特に若手研究者にとって、そのような活動は学界から評価されにくく、将来に対するリスクがある。

- 将来のポストにつながるインセンティブが必要 (たとえば PD, DCの細目設定など)
- 他分野との連携を推進する若手研究者が目指すキャリアモデルが必要
- そのような活動を数学界や数学教室が評価してくれることが望まれる

## 「数学が製造現場・研究現場を変える ～数学イノベーションの可能性」

中川淳一 新日鐵住金株式会社 先端技術研究所 数理科学研究部 上席主幹研究員

【司会】 それでは、次、新日鐵住金の上席主幹研究員をされています中川淳一先生から、「数学が製造現場・研究現場を変える」で講演をお願いします。

【中川】 御紹介ありがとうございました。新日鐵住金の中川と申します。私のテーマはちょっと大きなタイトルですが、数学者のすばらしい発想を具体事例を通して御紹介したいと思います。

最初の事例は高炉の逆問題です。煉瓦(れんが)内部の温度計測値です。現場の技術者は温度計の情報を見て、高炉内部の状態を経験的に判断しています。温度値が上昇すると異常状態と判断します。異常の原因部位である煉瓦(れんが)上面の入熱量を逆問題で解析します。逆問題で観察可能になる高炉内部の情報は、煉瓦(れんが)に入る熱流束と凝固層です。熱衝撃が発生し、膨大な熱が煉瓦(れんが)に流入し煉瓦(れんが)が溶損していく様子が分かります。計測情報だけでは「熱衝撃」を観察できませんが、数学を介して初めて知ることができます。



熱流束の時間変動に着目します。熱流束の時系列データを7次元時間遅れ座標上に埋め込み、そのダイナミクスを観察します。2つの安定状態が存在し、①のように系が不安定なときは休風という外的刺激により、状態が推移することが分かりました。

逆問題のインパクトです。製造現場の問題を逆問題の数学で考える思考の枠組みが出来上がっています。データ科学と数学の融合のひとつの姿です。逆問題の有用性を製造現場が理解し、製造現場と数学の双方に変革をもたらした成功事例です。

数学は、いろいろな専門分野の実験結果&理論を一貫性のある論理で統合する科学・技術の共通言語体系であると認識しています。異分野融合に数学を活用しています。公理から始まるスタイルの厳密な数学は、紀元前3世紀から現代に至るまで、数学者が築き上げてきた思考体系であり、数学で一度証明されたものは永遠の真理であることから、我々は膨大な叡智(えいち)のリソースを手に入れています。そのため、多岐にわたる数学の理論体系全体を自在に使いこなすことに真正面から向き合う必要があり、数学連携があると考えます。数学は普遍的であるが故に、個別の現象やデータに依存せずとも理論が成立し、世界中から有能な人材を見だし、適宜協力を仰ぐことは数学ゆえに容易です。観察事実(データ等)の背後にあるべき数学理論を見だし、その理論体系を活用することで、一部を知り全体を把握することが可能となります。その結果、諸事実間の因果関係が合理的につながれば、既存技術のブレークスルーに導く着想を得るのは比較的容易です。国内外の数学の人脈を背景に、世界最先端の数学理論と我々のソフトウェア力を駆使して、ニーズに対応する技術を世界最速で提案することを目指しています。そして、数学イノベーションです。数学により抽象化した枠組みの中で現実世界の問題をとらえ問題の根源を明らかにすること、数学により構築した枠組みをもとに既存技術の再構築を図り、ゼロベースから新しい技術概念を創出すること、技術の出口をつくり、技術概念の製造現場や社会への普及を図り、イノベーションにつなげること、これらにより、数学が現場・社会を動かし、変えることが、私の考える数学イノベーションです。

2つ目は、純粋数学者の斬新なアイデアが材料物性予測精度の劇的な向上をもたらした事例です。

ここでのポイントは、図形構造データの表現方法です。純粋数学者たちが導出した図形構造データを使用することで結晶の結合エネルギーの予測精度が劇的に向上しました。

導出したのはGrowth数と多重度です。Growth数は配位数を一般化したものです。Growth数は赤い原子の近傍にある青い原子を数えます。2nd-Growthは赤い線と緑の線の合計で12です。3rdになりますと、原子を共有するリングが観察できます。このリングの個数を多重度と定義します。原子間の結合力を表す指標になると考えたのが発想の根源です。コンピュータシミュレーションによりGrowth数を数えます。重要なのは、 $g_{\infty}$ の性質です。これはコンピュータにはできません。Growth数の数列表現です。多重度の数列表現です。Growth数から計算できます。

3番目は、研究現場の根源ニーズに応えることです。東名高速道路にビデオカメラを設置し、画像から車の速度、位置を求めグラフにします。青色が渋滞気味の時間帯です。交通工学者の問題意識は、新しいタイプの計測データの出現により半世紀以上の歴史を有する既存の理論体系見直しの必要性を感じていることでした。提案は、既存の理論体系の上位概念であることが必要条件です。そのため、数学的視点から既存数理モデルをサーベイしました。①個々の車に着目した離散モデルと②車両流れに着目した連続モデルをつなぎ、その第1原理が何かを明確にしました。そして、第1原理に焦点をあて、数学で理論を再構築しました。数理モデルが減速域を再現しているのが分かります。新しい数学理論の発想です。既存モデルの2つの極限状態を粒子でモデル表現します。そして、ミクロとマクロをつなぐ数学理論を適用します。粒子の個数が唯一の保存量であるという必要最小限の前提条件のもとに、時間と空間を無限大にした場合の時間発展則を導出します。既存のLWR型の偏微分方程式が導出されます。インパクトは、交通流率の関数形 $\Psi$ が新しい第1原理から導出可能になったことです。既存の数理モデルの理論体系において、第1原理を見直し、数学でミクロとマクロをつなぐことで、上位概念の枠組みを提案できました。

数学イノベーション構想です。現実世界のミクロな系のデータを入力にして、コンピュータが多体問題の計算を行い、マクロな系の現象を出力するのが通常の方法です。数学を導入してうれしいことは、階層構造間の因果関係を明示化し群論等の数学の道具を使い普遍則として記述することで、実社会の様々な現象のダイナミクスの多様性やバラツキの直接原因であるミクロな系の制御が可能になることです。事例1ではマクロな系での数学と現実世界の変換を紹介しました。事例2では、物理の第一原理計算の第1原理である原子配列の法則を決めることを目指しています。事例3ではミクロとマクロをつなぐ方法を紹介しました。その中心には2つの数学の方法論の融合があります。ミクロな系のモデルをマクロにつなぐのが帰納的フロー、ミクロな系の方程式を合理的に分類しモデルを作成するのが演繹(えんえき)的フローです。帰納的フローは、交通流の方法を横展開します。粒子モデルはエネルギー交換を扱うことになるので、高度な数学の道具が必要です。演繹(えんえき)的フローは、普遍的な前提からミクロな系の多様性の背後にある原理を調べることになり、オートマトンという数学の道具を使い、多様な離散方程式を分類し、数理モデルのあるべき姿の基準を与えることとなります。

基本理念は、本来つながっているはずの純粋数学と応用数学をつなげ、我が国に数学をコアにした科学技術イノベーションの理論基盤を創りたい。そのため、①これまで応用とは無関係と思われていた純粋数学者が本気で社会的課題に取り組み、その理論に基づいたアイデアを数理モデルとして表現し、②一方で、応用数学者・統計学者がコンピュータに実装するための数理的手法を開発し、③情報科学・理学・工学・産業等における数学応用者がイノベーションに向けた新しい技術概念を創出する。そのような、互いの専門領域を尊重した上で専門家としての役割分担を相補的

に行える異分野連携の場を持続的に創出すること、です。そのため、まずは、数学連携チームとしての成功実績を示すことが必要です。連携課題は多種・多様であるほど数学に有利です。各分野（データ提供者）から、数学理論、数理モデルの妥当性評価を得て、検証・実用化企画の資金を共同で申請・獲得できていることが成果のひとつの姿だと考えます。まずは小さく始め、活動実績の評価を受けながら、チームを大きくすることになると思います。そのため、連携チーム運用のため、必要最小限の予算の獲得チャンスを増やすことが必要かと考えます。若手数学者への支援、特に、純粋数学者の斬新な発想に期待)します。議論のための諸経費も必要です。成果は議論の頻度に比例します。

以上です。ありがとうございました。（拍手）

【司会】 中川先生、どうもありがとうございました。

【司会】 それでは、会場の方から質問ありましたら、どうぞお願いいたします。

【質問者 C】 どうもありがとうございました。科学技術・学術政策研究所の坂田と申しますが、数学が科学技術の共通言語だと最初の方に書いてあって、確かにそうですよね。我々も学校で習ったときにはそう思って、だから、あらゆる科学、あらゆる技術の一番ベースになっている、とっても大事な分野であったのに、これまで社会での存在感というか、認識度が、率直に言うと、余りなかったですね。あれは学校時代に勉強する、ちょっと難しい学問という感じで。しかし、今お話を聞いていると、社会のニーズと結び付けて、数学をもっと応用していこうとか、数学が持っている力を、社会問題、様々な解決のために使おうということですから、そういう方向で是非頑張っていただきたいと思います。これは希望です。

一方で、先ほどの水藤先生の話もそうですが、ある種、ニーズオリエンテッドで学問を盛り上げていくということは、それ自体いいことだし、構わないと言うと変ですけど、いいと思うんですけども、やっぱりニーズから離れたところで学問そのものの発展をきちんと追求していくこともとても大事なので、それだけはきちんと忘れないでやってもらいたいと思いますし、役所の方もしっかりそれはサポートしてもらいたい。ニーズオリエンテッドな学問というのは、サポートしやすいわけですよね。それは、社会から理解されやすいから、そっちの方どうしても資金が流れたり、いろんなエネルギーも投入されたりしますが、それは悪いことじゃないのでいいんですけど、余りそこに偏るのもよくない。

私は最後に1つ質問があるのは、世界の数学の世界で、こういう社会ニーズに対応して数学というものをもっと活用していこうという動きがどれくらいあるのか、どの程度熱心なのかと、世界の数学界が。これを教えてほしいと思います。

【中川】 先ほどの御質問に対しては、例えば、イギリスでは、数十年前ぐらいからスタディーグループというのを始めています。産業の方から数学の課題を持ってきて、それに対して数学者がいろいろ考えて、一緒に議論して解決策を提案するというシステムです。そこで、主催者である数学者は、数学のテーマを外部から持ってくるということに重要な意義があるとおっしゃっていました。そういう意味で、数学の新たなテーマとして外部からの刺激をうまく数学の研究に結び付けることができれば、私がここに書いていますように、純粋数学者の人たちも参加できるような、うまい問題設定につなげることができると思います。

【質問者 C】 ありがとうございました。

【質問者 G】 科学技術振興機構の大竹です。

個人的な関心なんですけど、最後の事例3のやつというのは……。

【中川】 交通流ですね。

【質問者 G】 ええ。流体力学的な問題とパーティクルモーションをつなげているわけですよね。

【中川】 はい、そうです。

【質問者 G】 今、世の中、すごくそういうことをちゃんとシミュレーションするって重要なんだけど、計算機の能力が上がっているから、みんな、やおらパーティクルモーションをどんどん入れようと思っ  
てやっていますよね、地球規模の変動もプラズマの動きなんかも。だけど、これでやった方が、逆に  
言うと、シミュレーションなんかやるときに、力づくでやるよりも、非常にエレガントにいろんなことが分  
かって、計算機の資源を有効に使える。逆に言うと、今さっきの御質問とも関係あるんですけど、単  
に、これ、応用の話だけじゃなくて、科学のやり方の中へこれを戻していくと、もっといろいろ、フロー  
とパーティクルの問題が両方同居している問題設定って多いと思うんです。そういうところへは働き  
掛けてもらえるんでしょうかという質問です。

【中川】 働き掛けといいますと？

【質問者 G】 使ってもらうようにですね。要するに、地球変動のシミュレーションなんかのところへ  
持っていったら、もっとバリエーションのある研究ができるんじゃないか、そういう質問です。

【中川】 そうですね。粒子モデルは、ある程度考えやすいんですね。しかし、粒子モデルはローカ  
ルルールを記述しているだけです。大域的な相互作用全部、コンピューターに任せてるんです  
ね。そこを数学が入ることによって、大域的な因果関係がちゃんと明示化できていけば、例えば、こ  
の場合でいうと、メソ領域のところでは何をしたらいいかが分かり、うまくコンピューターに乗せれば、  
もっとうまくいくと思っています。応用分野はいろいろあると思います。

【質問者 G】 基礎科学にも相当影響があると。

【中川】 はい。

【質問者 E】 科政研の斎藤でございます。きょうは本当に企業の研究部門のお立場からのお話  
で、大変迫力のあるお話で有り難く拝聴いたしました。ちょっとぶしつけな質問になるかもしれない  
んですが、今、中川先生御所属の新日鐵から見た場合に、きょう、具体的に3つぐらいのモデルの  
応用の話がありました。土壤汚染ですとか高炉の話、材料の話、このあたりは新日鐵住金の業務と  
も関連が深いなという予想は付くんんですが、交通流とか、このあたりは直接、新日鐵住金のビジネス  
とは結び付かないような感じもいたしますが、逆に言うと、それもやっぱり社としては重要な領域だ  
ということで、研究をしたり、あるいは、先生御所属の数理科学研究部というところで、そもそもこういう  
数理工学、応用数学のディシプリンを持った若手を採用する意欲とカリソースなり、執行部の理解と  
いうのはあるんでしょうか。それによって、公的資金で支えなきゃいかんという話なのか、もうちょっと  
民間の資金というものも期待できるかというヒントになるかと思うものですから。

【中川】 今、御質問の中で、前半の高炉とか材料とか、会社の利益に関係するようなところは、会  
社の予算で実行できます。応用数学のニーズは大きいので、応用数学の人たちとは、会社のテー  
マで連携しています。しかし、会社のテーマだけでは動かせないのが純粋数学者たちです。そういう  
ところは、先ほどの交通流のように、うまいテーマを設定して、そこに優秀な人材を集める仕組みを  
つくるのが非常に重要だと考えます。今まで連携に余り参加されていないけど、非常に優秀な純  
粋数学者の方々に、どのように参加してもらうかが非常に重要で、今後は是非やらなければいけない  
ことだと思います。

【司会】 中川先生、ありがとうございました。(拍手)

3名の講演者の方々、それぞれ発表ありがとうございました。

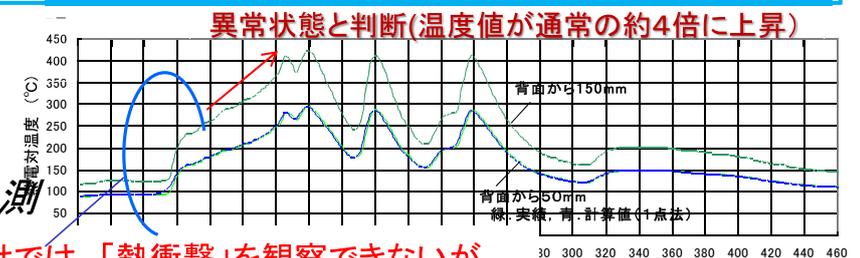
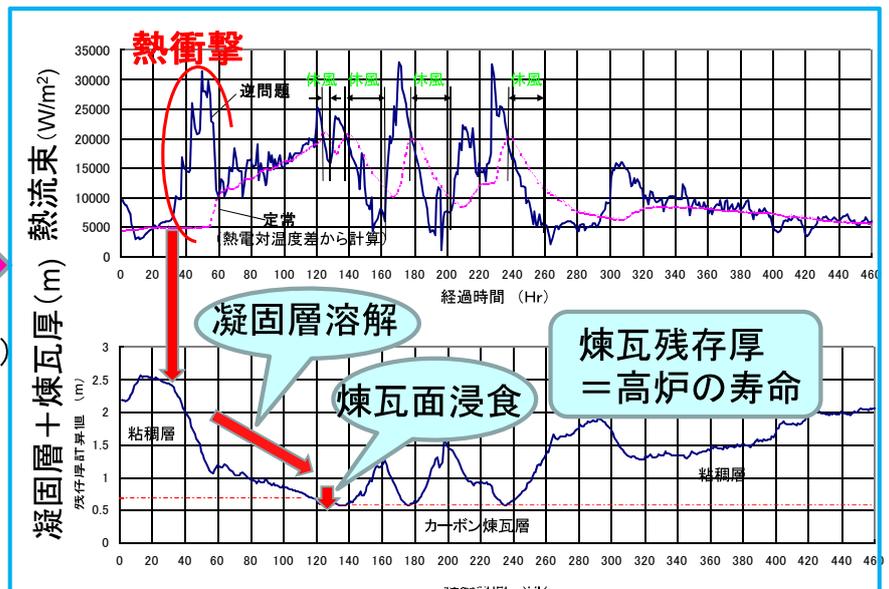
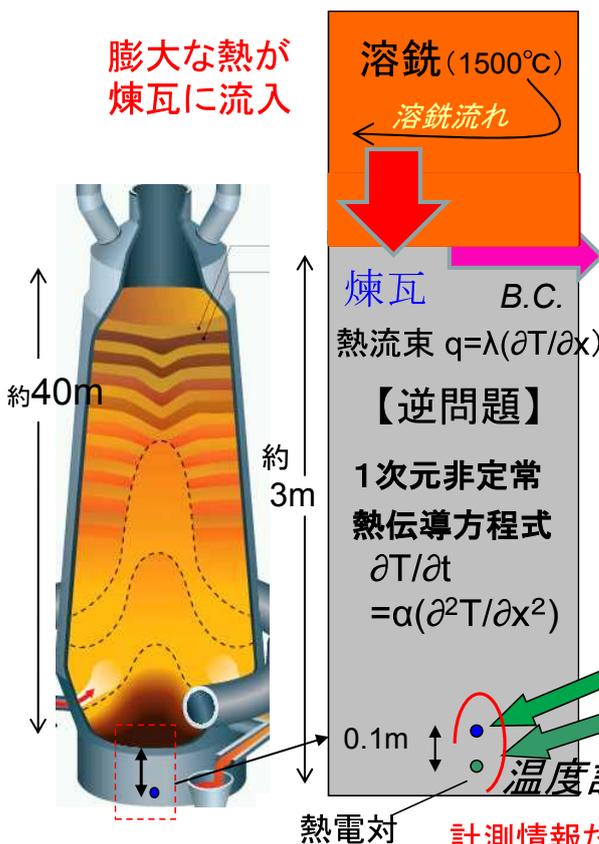
# 数学が製造現場・研究現場を変える ～数学イノベーションの可能性

文部科学省  
 13F 1, 2, 3会議室

新日鐵住金株式会社  
 先端技術研究所  
 数理科学研究部  
 中川淳一

## 事例1: 数学が製造現場を変える 高炉の伝熱逆問題

異常の原因部位である煉瓦上面の入熱量を逆問題で解析  
 (1) 逆問題で観察可能になる高炉内部の情報

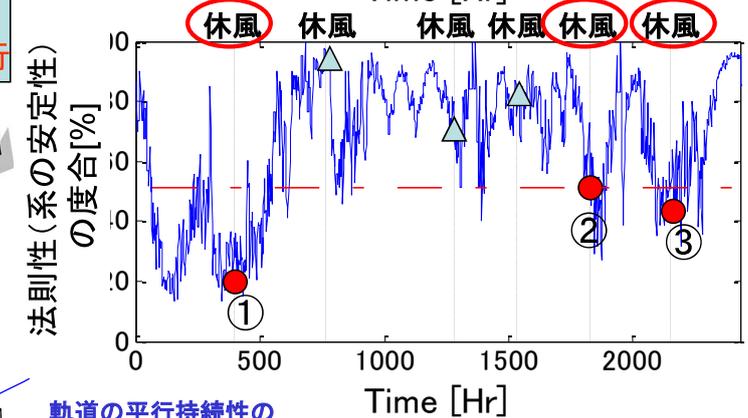
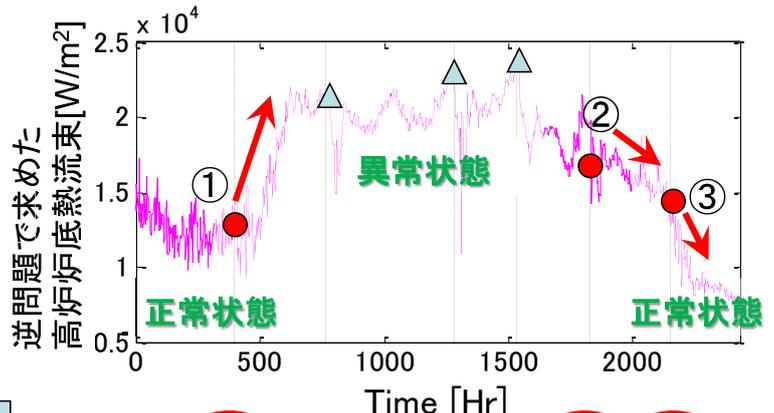
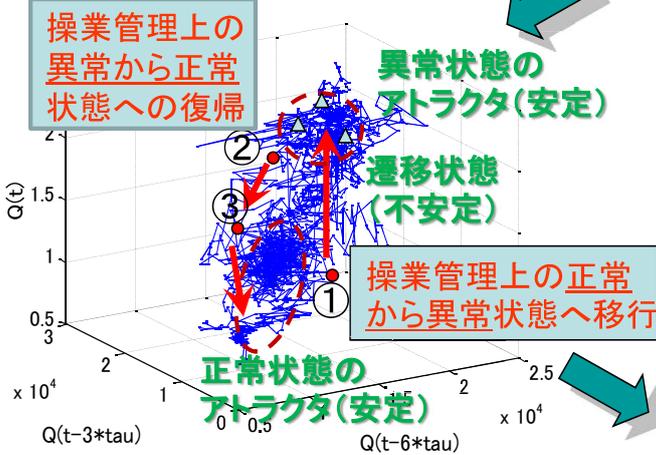


計測情報だけでは、「熱衝撃」を観察できないが、  
 数学を介して初めて知ることができる。

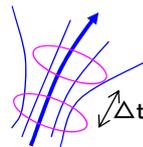
## (2) 操業データに内在する法則性の導出

データの背後にある法則性を数学世界上で解析 → 逆問題で求めた熱流束の時間変動に着目

7次元時間遅れ座標空間へ  
熱流束データを埋め込み、  
そのダイナミクスを観察する。



系が不安定なときは  
休風(高炉の生産一時  
中止)という外的刺激に  
より、状態が遷移する。



軌道の平行持続性の  
度合いを“法則性”と定義

## 逆問題のインパクト

製造現場の問題を、逆問題の数学で  
考える思考の枠組みが出来上がった。

「データ科学」と「数学」の融合のひとつの姿

計測データ ↔ 逆問題

逆問題の有用性を  
製造現場が理解し、  
製造現場と数学の  
双方に変革をもた  
らした数学イノベー  
ションの成功事例

数学が製造現場を動かす。

製造現場からのフィードバックで、  
数学の応用領域が広がる。

数学の新しい研究領域が生まれる。

# 数学の役割

いろいろな専門分野の実験結果 & 理論を、  
一貫性のある論理で統合する科学・技術の共通言語体系

⇒ **異分野融合に数学を活用**

**【目標】産業・社会の問題全体を扱う理論体系の創出**

## 数学連携(数学者との連携)

「公理から始まるスタイルの厳密な数学」は、紀元前3世紀から現代に至るまで、数学者が築き上げてきた思考体系であり、数学で一度証明されたものは永遠の真理であることから、我々は膨大な叡智のリソースを手に入れている。

そのため、多岐にわたる数学の理論体系全体を自在に使いこなすことに真正面から向き合う必要があり、数学連携がある。

## 数学で何ができるか

1) 数学は普遍的であるがゆえに、個別の現象やデータに依存せずとも理論が成立し、世界中から有能な人材を見出し、適宜協力を仰ぐことは数学ゆえに容易

2) 観察事実(データ等)の背後にあるべき数学理論を見出し、その理論体系を活用することで、「一部を知り全体を把握する」ことが可能

3) その結果、諸事実間の因果関係が合理的に繋がれば、既存技術のブレークスルーに導く着想を得るのは比較的容易

⇒ **国内外の数学の人脈を背景に、  
世界最先端の数学理論とソフトウェア力を駆使して、  
ニーズに対応する技術を世界最速で提案することを  
目指しています。**

# そして、数学イノベーション

- (1) 数学により抽象化した枠組みのなかで現実世界の問題をとらえ問題の根源を明らかにすること、
- (2) 数学により構築した枠組みをもとに既存技術の再構築を図り、ゼロベースから新しい技術概念を創出すること、
- (3) 技術の出口をつくり、技術概念の製造現場や社会への普及を図り、イノベーションに繋げること

数学が現場・社会を動かし、変える！

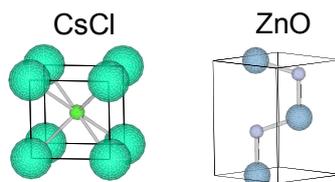
© 2015 NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION All Rights Reserved.



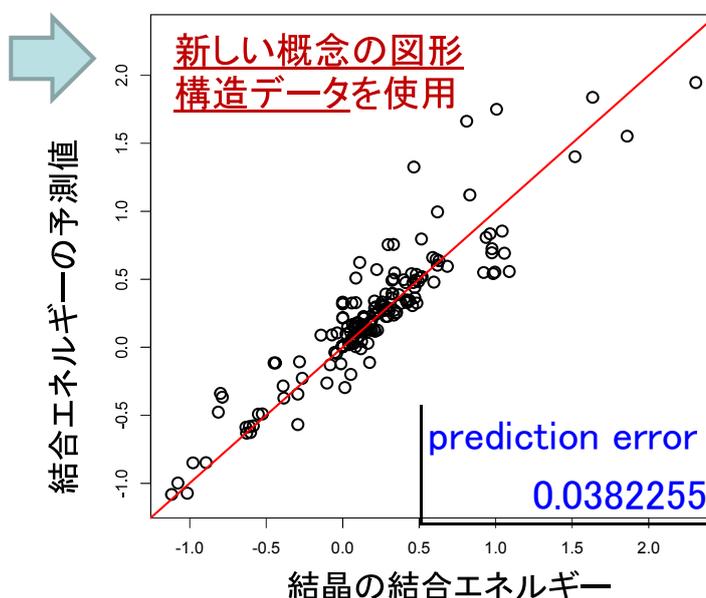
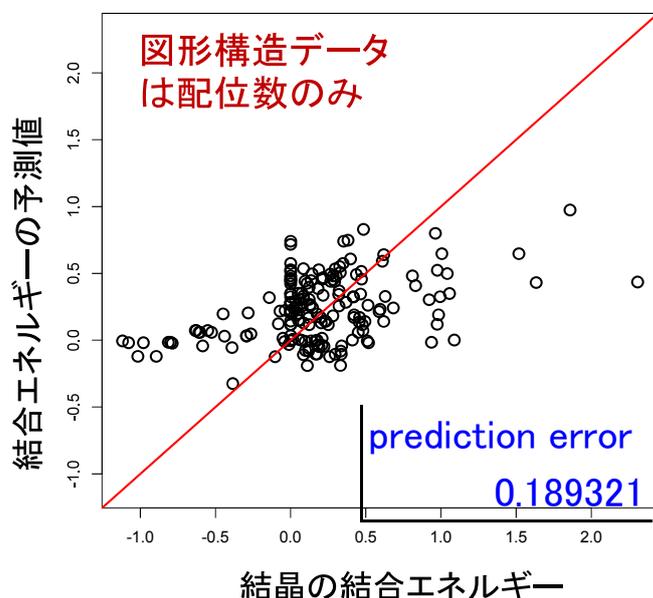
## 事例2: 純粋数学者達の斬新なアイデアの導入

### 材料物性予測精度の劇的な向上

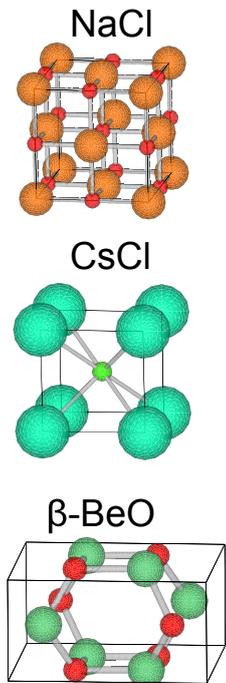
図形構造データの表現方法(数値化)がポイント!



- ・格子形状が違う
- ・原子配列が違う等

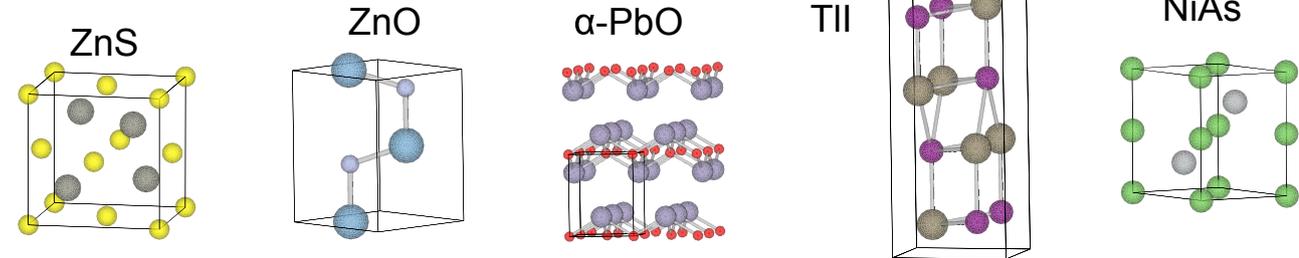


# 原子格子の図形構造表現方法の新概念



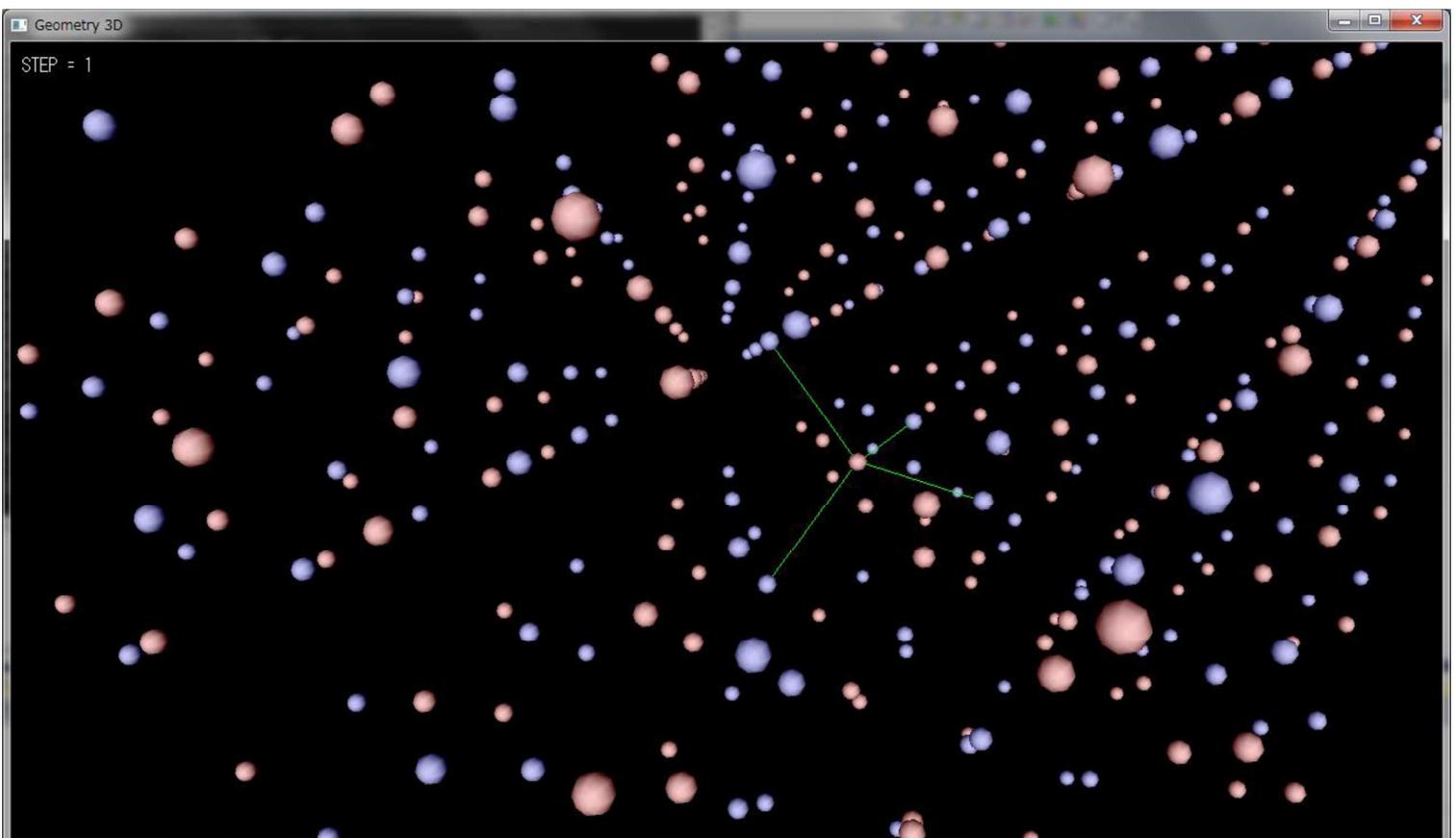
分子種	結晶格子	対称性 (群の位数)	Growth 数 / 多重度			
			1st	2nd	3rd	4th
NaCl	立方晶	48	6 / 12	18 / 40	38 / 84	66 / 144
CsCl	立方晶	48	8 / 30	26 / 96	56 / 198	98 / 336
$\beta$ -BeO	正方晶	16	4 / 1	11 / 8	18 / 23	41 / 38
ZnS	立方晶	24	4 / 0	12 / 12	24 / 18	42 / 44
ZnO	六方晶	12	4 / 0	12 / 11	25 / 20	44 / 45
$\alpha$ -PbO	正方晶	16	4 / 8	8 / 8	12 / 12	16 / 16
TlI	直方晶	8	7 / 20	22 / 65	47 / 135	82 / 230
NiAs	六方晶	24	6 / 10	20 / 48	42 / 88	74 / 168

材料分野の指標である配位数に着目  $\Rightarrow$  Growth数は配位数を一般化したもの



Growth数:  
赤い原子の近傍  
にある青い原子  
の個数を数える.

**ZnO**  
the 1<sup>st</sup> growth=4 (配位数に相当)



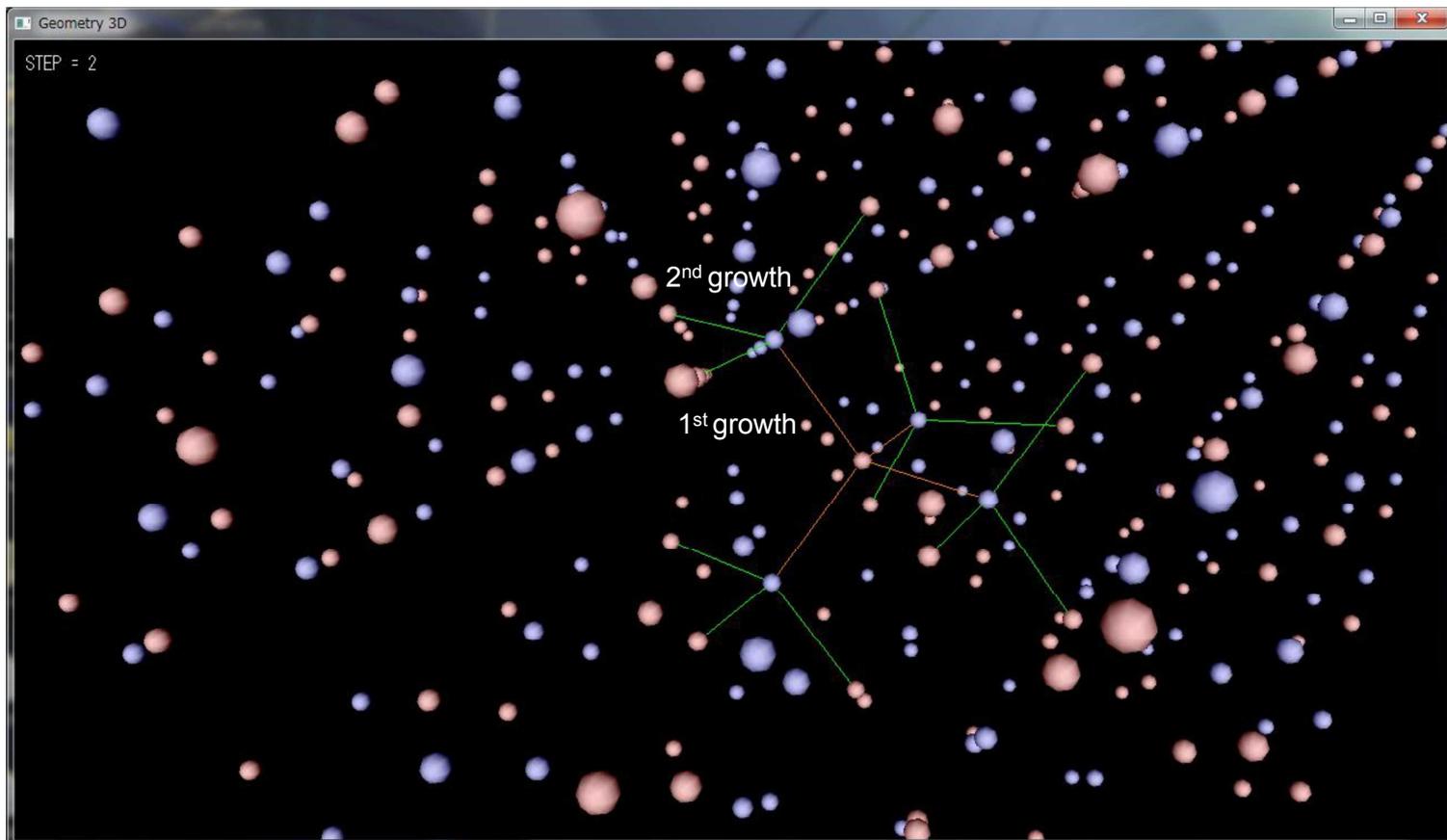
Growthを数える.

1<sup>st</sup> growth (赤色の線)

+追加されるgrowth  
(緑色の線)

# ZnO

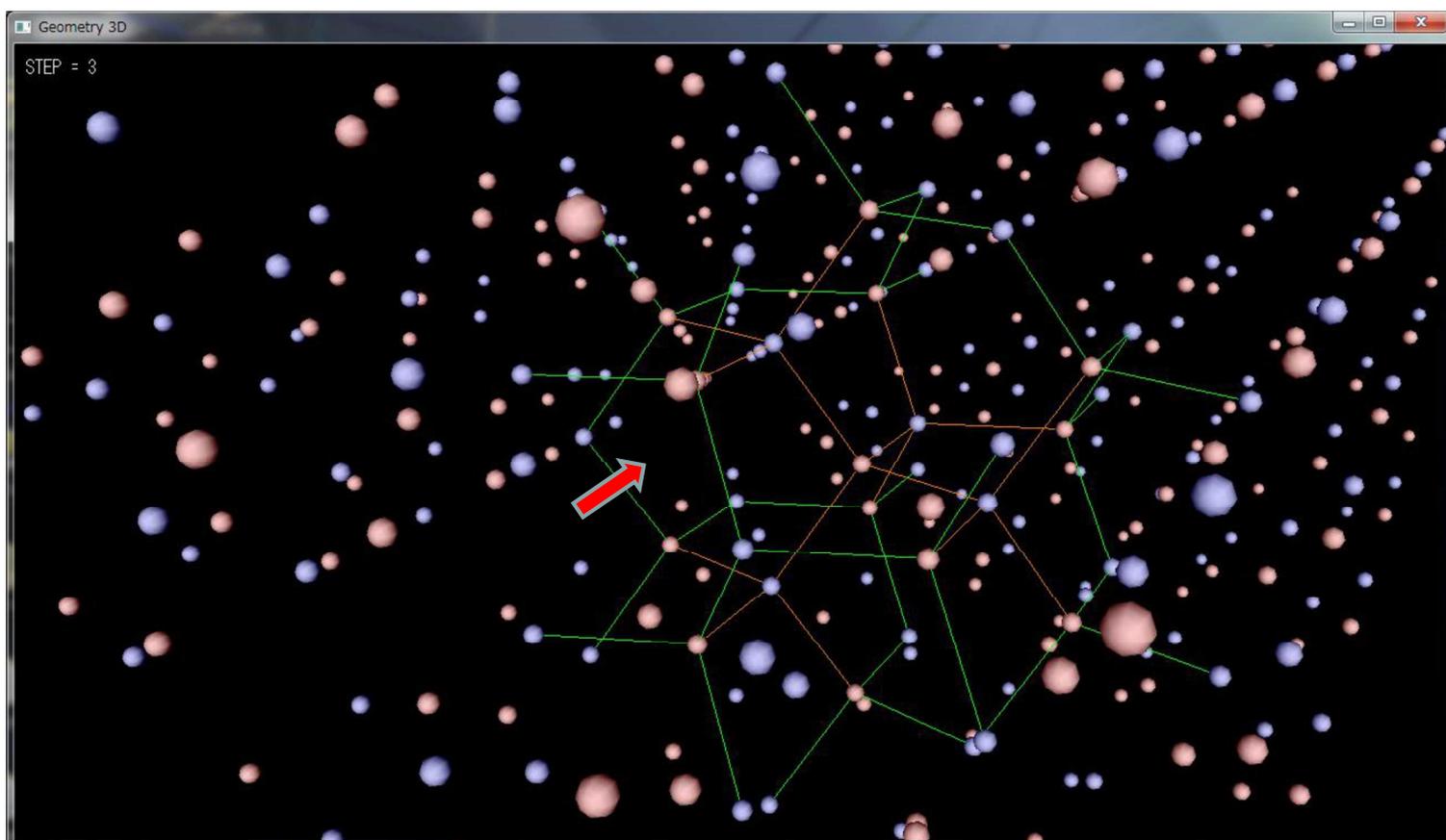
## the 2<sup>nd</sup> growth=12



原子を共有する  
リングの存在を  
観察できる.

# ZnO

## the 3<sup>rd</sup> growth=25



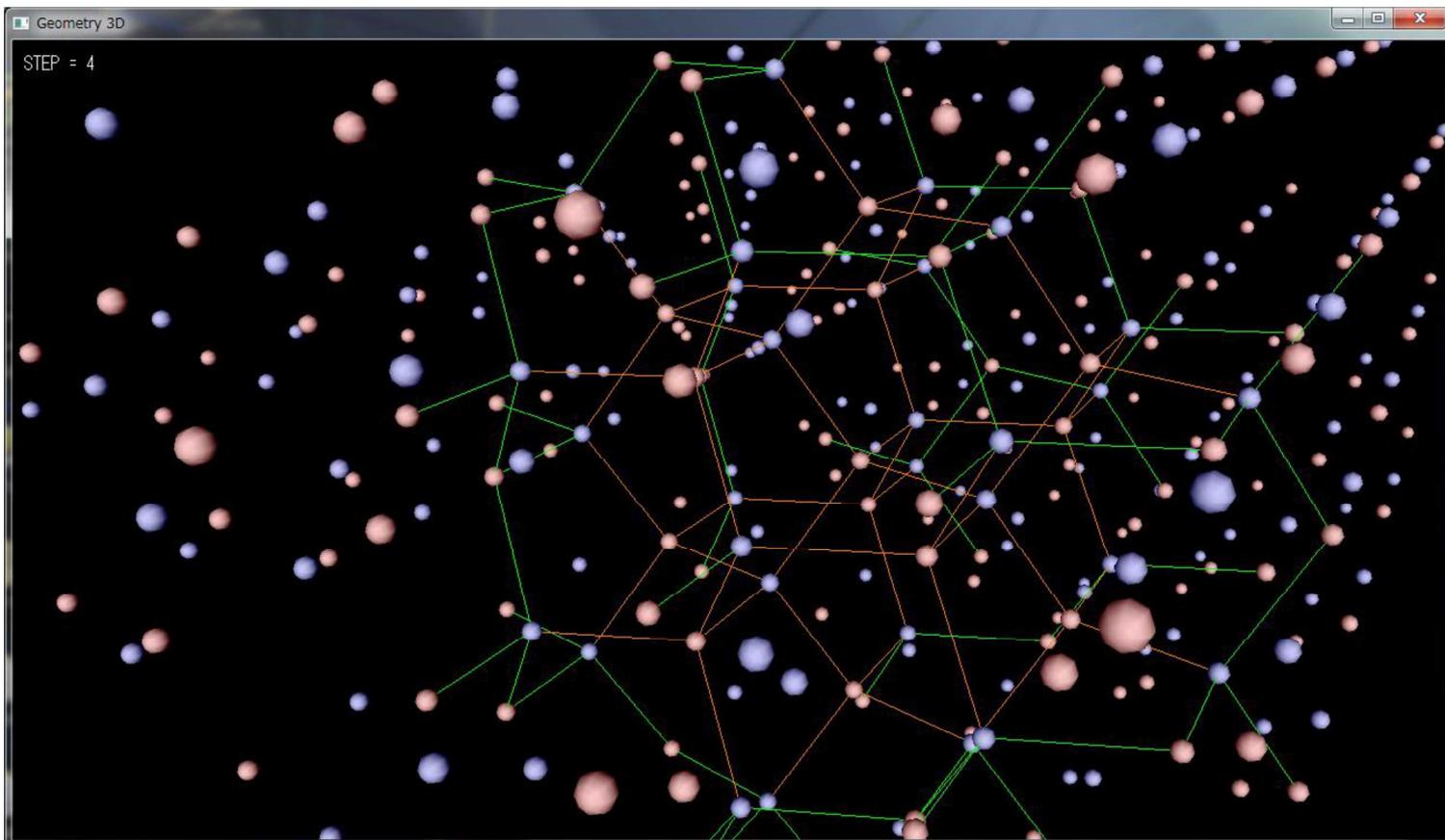
リングの数が多いほど原子間の結合力も大きいのでは？

⇒リングの個数を数えよう！（発想の根源）

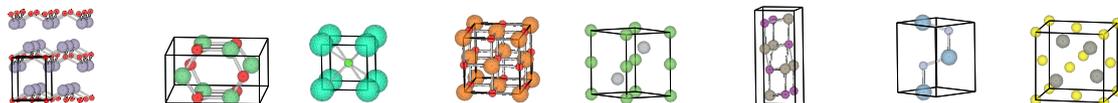
多重度を原子を共有するリングの数と定義

ZnO

the 4<sup>th</sup> growth=44



## コンピュータシミュレーションによるGrowth数の数え上げ



Growth	Crystals							
	$\alpha$ -PbO	$\beta$ -BeO	CsCl	NaCl	NiAs	TiI	ZnO	ZnS
g1	4	4	8	6	6	7	4	4
g2	8	11	26	18	20	22	12	12
g3	12	24	56	38	42	47	25	24
g4	16	41	98	66	74	82	44	42
g5	20	62	152	102	114	127	67	64
g6	24	90	218	146	164	182	96	92
g7	28	122	296	198	222	247	130	124
g8	32	157	386	258	290	322	170	162
g0	36	200	488	326	366	407	214	204
g10	40	247	602	402	452	502	264	252
g11	44	296	728	486	546	607	319	304
g12	48	354	866	578	650	722	380	362
g13	52	416	1016	678	762	847	445	424
g14	56	479	1178	786	884	982	516	492
g15	60	552	1352	902	1014	1127	592	564
g16	64	629	1538	1026	1154	1282	674	642
g17	68	706	1736	1158	1302	1447	760	724
g18	72	794	1946	1298	1460	1622	852	812
g19	76	886	2168	1446	1626	1807	949	904
g20	80	977	2402	1602	1802	2002	1052	1002

重要なのは、Growth数の極限 $g_{\infty}$ の性質（コンピュータが出来ないこと）<sup>14</sup>

# Growth数の数列表現

$$G_{\alpha\text{-PbO}}(n) = 4n.$$

$$G_{\beta\text{-BeO}}(n) = \begin{cases} \frac{22}{9}n^2 + \frac{1}{9}n + \frac{13}{9} & (n \equiv 1 \pmod{3}) \\ \frac{22}{9}n^2 - \frac{1}{9}n + \frac{13}{9} & (n \equiv 2 \pmod{3}) \\ \frac{22}{9}n^2 + 2 & (n \equiv 0 \pmod{3}) \end{cases}$$

$$G_{\text{CsCl}}(n) = 6n^2 + 2.$$

$$G_{\text{NaCl}}(n) = 4n^2 + 2.$$

$$G_{\text{NiAs}}(n) = \begin{cases} \frac{9}{2}n^2 + \frac{3}{2} & (n \equiv 1 \pmod{2}) \\ \frac{9}{2}n^2 + 2 & (n \equiv 0 \pmod{2}) \end{cases}$$

$$G_{\text{TlI}}(n) = 5n^2 + 2.$$

$$G_{\text{ZnO}}(n) = \begin{cases} \frac{21}{8}n^2 + \frac{11}{8} & (n \equiv 1, 3 \pmod{4}) \\ \frac{21}{8}n^2 + \frac{3}{2} & (n \equiv 2 \pmod{4}) \\ \frac{21}{8}n^2 + 2 & (n \equiv 0 \pmod{4}) \end{cases}$$

$$G_{\text{ZnS}}(n) = \begin{cases} \frac{5}{2}n^2 + \frac{3}{2} & (n \equiv 1 \pmod{2}) \\ \frac{5}{2}n^2 + 2 & (n \equiv 0 \pmod{2}) \end{cases}$$

15

## 多重度の数列表現

Growth数 $g_n$ から計算できる。

$$m_{2n} = g_1 \underbrace{\left( g_{2n-1} - g_{2n-2} + g_{2n-3} - \cdots + g_1 - 1 \right)}_{\text{\# of arms from (2n-1)-th growth}} - \underbrace{g_{2n}}_{\text{Actual \# of (2n)-th growth}},$$

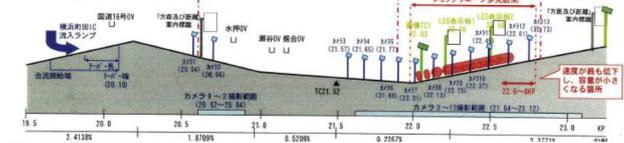
$$m_{2n-1} = g_1 \underbrace{\left( g_{2n-2} - g_{2n-3} + g_{2n-4} - \cdots - g_1 + 1 \right)}_{\text{\# of arms from (2n-2)-th growth}} - \underbrace{g_{2n-1}}_{\text{Actual \# of (2n-1)-th growth}}$$

(calculated inductively)

17

### 観測対象区間

- 東名・下り・大和BS付近
  - ITV設置・ビデオ映像収録
    - 1.2km区間に11台
    - 上流1km地点付近に2台
  - 13台の映像はGPS同期で時刻情報と共に記録
- 進行方向



東京大学 ITS 東大・生産研 大口敬教授(交通制御工学)

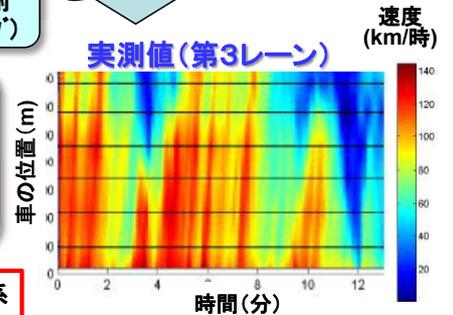
### 時系列画像データ



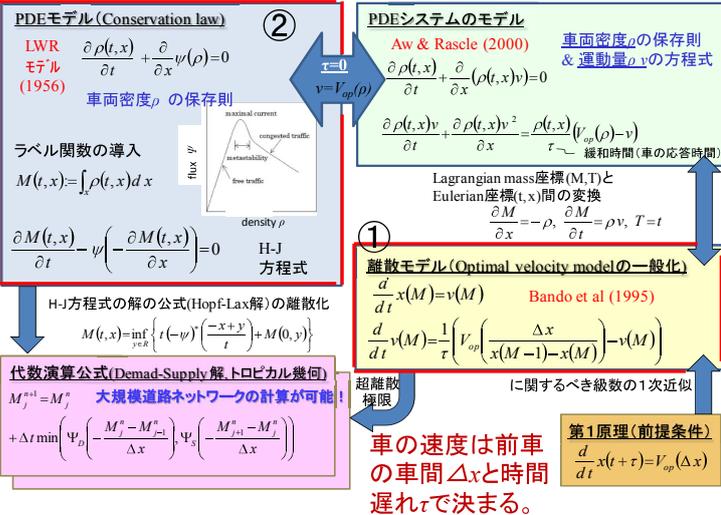
画像から各レーンを走る車の速度、位置を同定

種々のデータ融合による交通流現象の可視化技術の進化(断面計測+プローブ)

### 実測値(第3レーン)



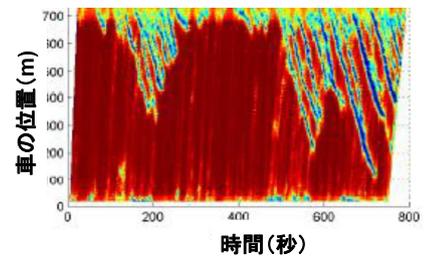
### 数学的視点に基づく既存数理モデルの理論体系化



交通工学者の問題意識  
新しいタイプの計測データの出現により半世紀以上の歴史を有する既存の理論体系見直しの必要性を感じている。

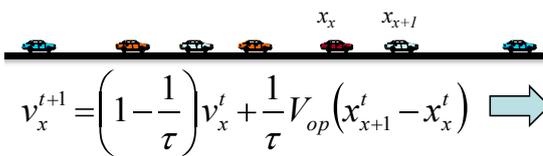
- 1) 提案は、既存の理論体系の上位概念であることが必要条件(既存理論を包含)  
⇒ 数学的視点から既存の数理モデル体系をサーベイ
- 2) ①個々の車に着目した離散モデル(OVモデル)と②車両流れに着目した連続モデル(LWRモデル)を繋ぎ、その第1原理を明確化  
⇒ 第1原理に焦点をあて、数学で理論を再構築

### 数理モデルによる減速域の予測



## 新しい数学理論の発想とインパクト

### OV model(既存離散モデル)



### SOV model(既存モデル改良版)

$v_x^t$ : probability to proceed on the cell automaton.  
 $V_{op}$  returns a value of [0,1].  
 $0 < \frac{1}{\tau} < 1$

### ミクロ(ランダム)とマクロ(決定論的)を繋ぐ数学理論

- ・[必要最小限の前提条件] 粒子(車)の個数が唯一の保存量
- ⇒ 時間と空間(粒子数)を無限大にした場合の時間発展則(偏微分方程式)を導出

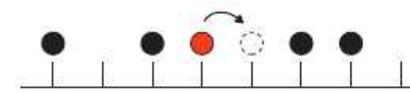
既存モデルの極限状態を粒子(車)でモデル表現

### ★ミクロ&離散の確率法則(車の挙動の新しい第1原理)

$\frac{1}{\tau} = 0$ :  $v_x^{t+1} = v_x^t$

TASEP (Totally Asymmetric Simple Exclusion Process)

・Each site allows to exist only one particle at most.



・A particle can move to the next right if the site is empty.

$\frac{1}{\tau} = 1$ :  $v_x^{t+1} = V_{op}(x_{x+1}^t - x_x^t)$

ZRP (Zero Range Process)

### ★流体力学極限

$$\partial_t \rho(t,x) + \partial_x \{ (1 - \rho(t,x)) \rho(t,x) \} = 0$$

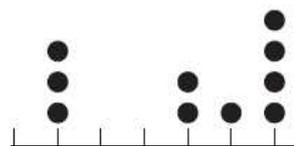
既存のLWR型 偏微分方程式(マクロ&連続)

$$\partial_t \rho(t,x) + \partial_x \Psi(\rho(t,x)) = 0$$

$$\partial_t \rho(t,x) + \partial_x \Phi(\rho(t,x)) = 0$$

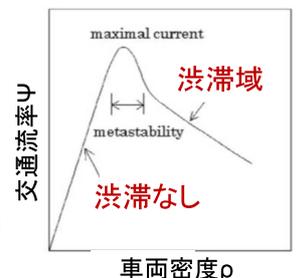
$\Phi(\rho)$  is determined only by a function  $g$ .

- ・the number of particles on a site  $\eta_x$  = vehicular distance
- ・particles move to the next right at the rate of  $g(\eta_x)$ .

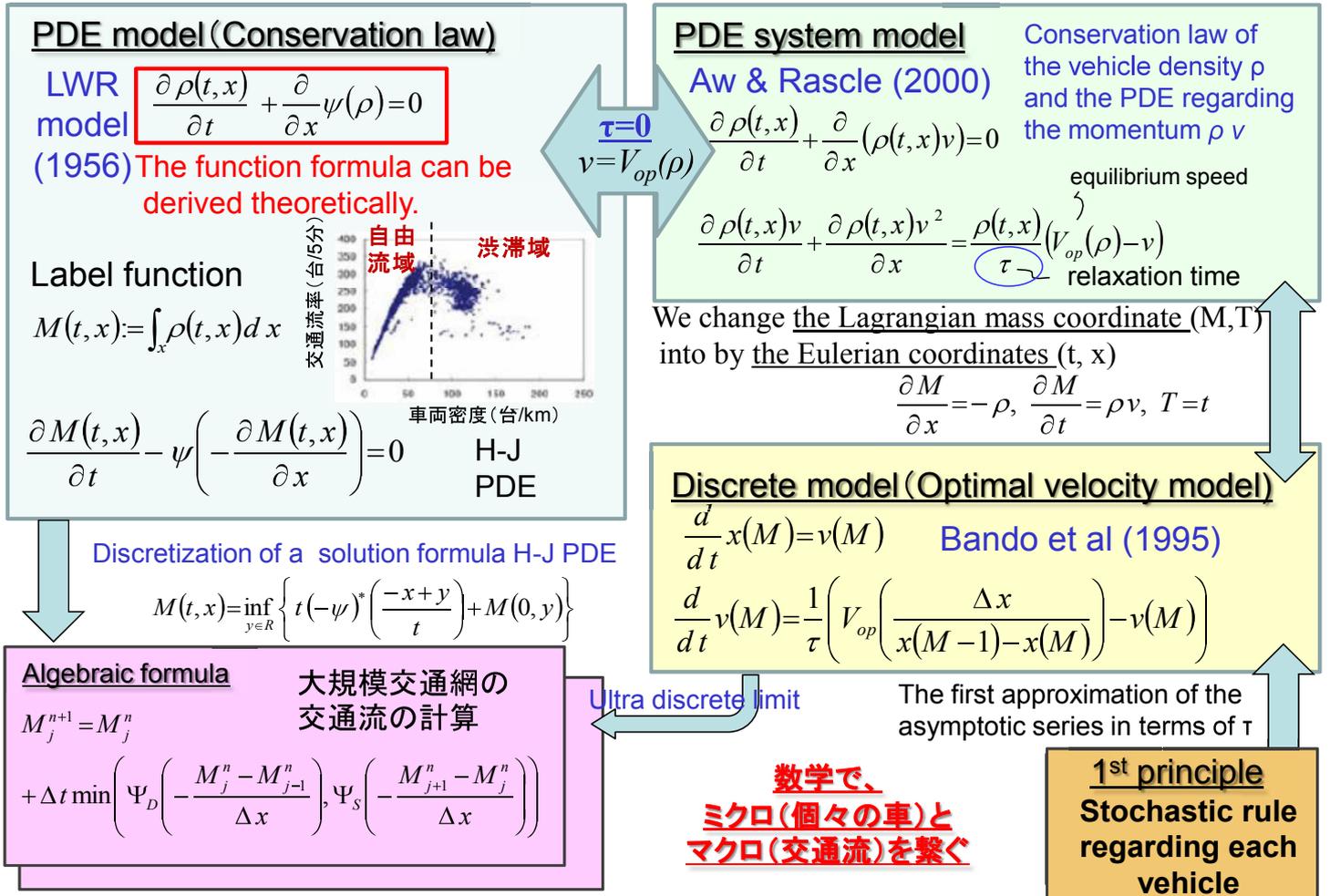


- $g(k) = 1$  の時,  $\Phi(\rho) = \frac{\rho}{1+\rho}$
- $g(k) = \frac{k}{q+k-1}$ , ( $q > 0$ ) のとき  $\Phi(\rho) = \frac{\rho}{\rho+q}$
- 形式的には  $g(k) = k$  のとき  $\Phi(\rho) = \rho$

交通流率の関数形  $\Psi$  が新しい第1原理から明示的に導出可能になった。←従来は計測やコンピュータシミュレーションでのみ求まるものとされていた。

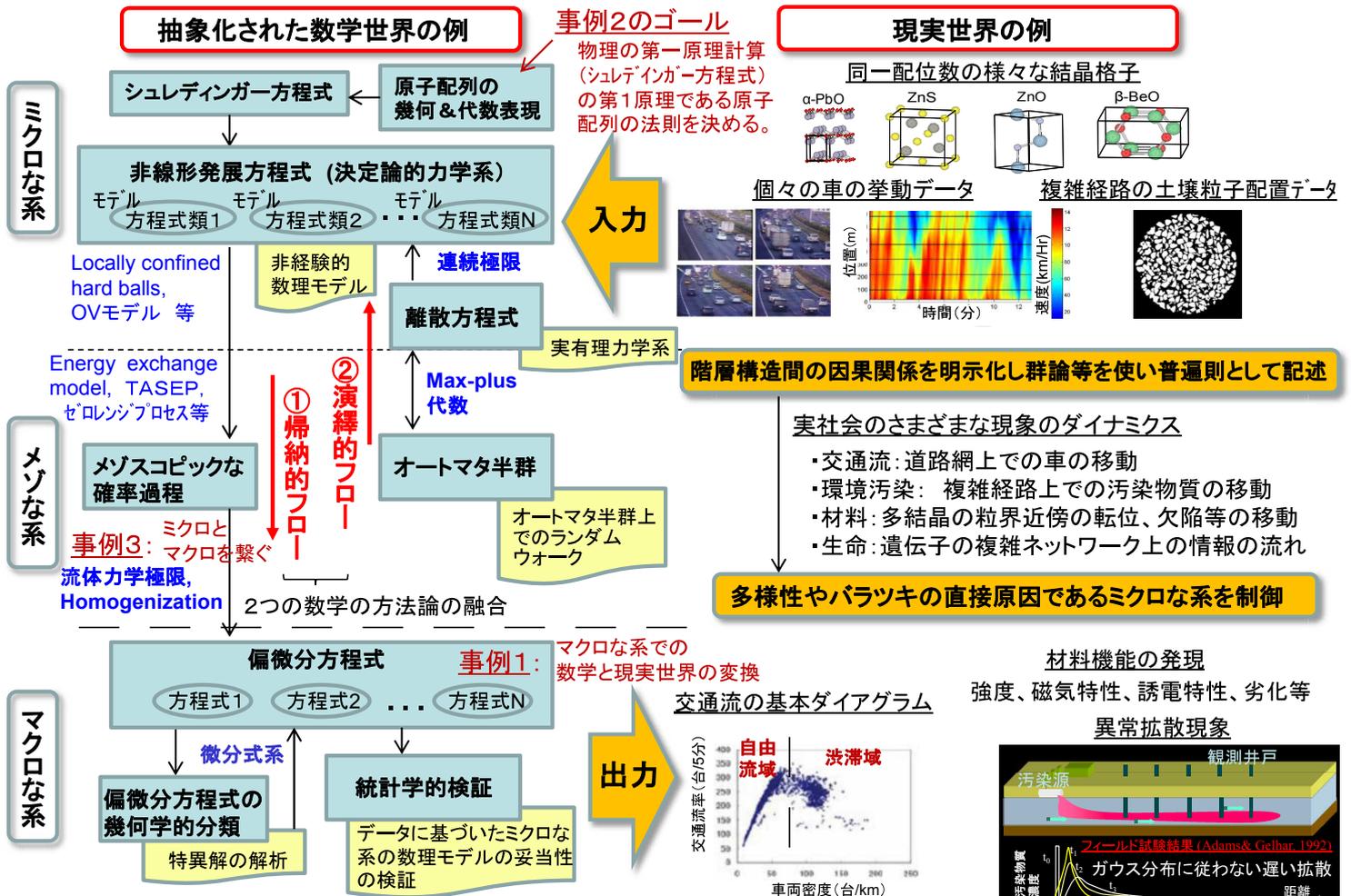


# 既存の数理モデルの理論体系の上位概念の枠組み提案



## 数学イノベーション構想: 数学連携チームが現場・社会を動かし変える!

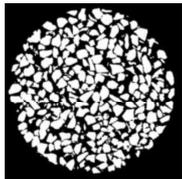
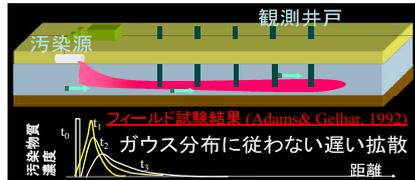
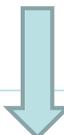
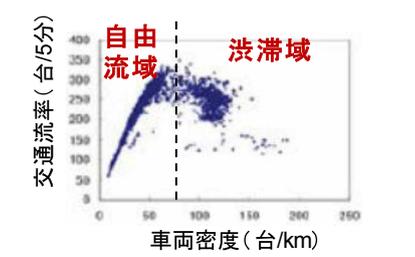
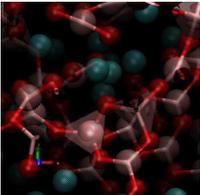
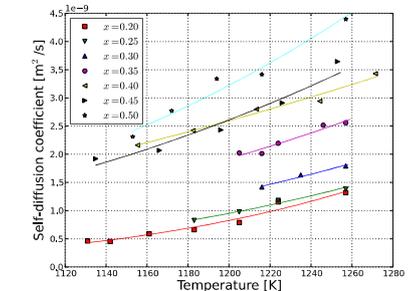
### 抽象的な数学世界上での数理モデリングと現実世界への変換



# ①帰納的フローの数学(ミクロからマクロへ)

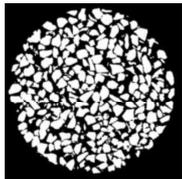
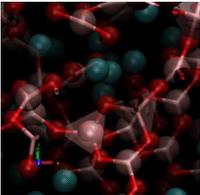
複数の個別テーマから一般的・普遍的な法則を導出する。

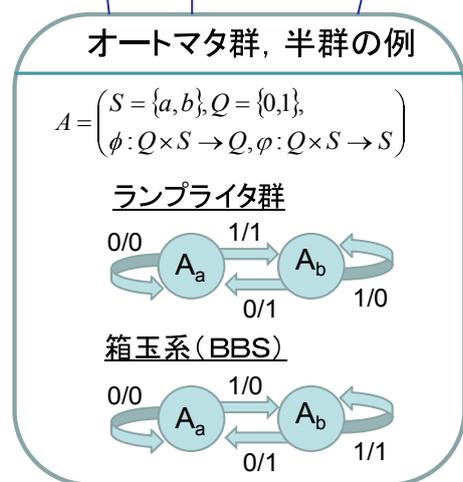
交通流での実施例を横展開。粒子モデルはエネルギーを交換するため、高度な数学の道具が必要

	ミクロな系(離散)	抽象化された数学の世界 粒子モデル → 偏微分方程式	マクロな系(連続)
土壌汚染 	 筑波大学大学院システム情報工学 構造エネルギー工学専攻 松島准教授	複雑な経路上のランダムウォーク 等方格子内のエネルギー交換の <b>流体力学極限</b>	sub-diffusion の熱核方程式, 非整数階PDE 多孔質媒体の 非線形拡散方 程式  筑波大学大学院システム情報工学 研究科 リスク工学専攻 羽田野教授
交通流 	 東京大学生産技術研究所 大口教授	TASEP(完全 排他過程)ま たは、ゼロレ ンジ過程の <b>流体力学極限</b>	車両密度に 関する流体 方程式(LWR 方程式) 
材料	硝子を構成する原子の運動  千葉大学大学院 共生応用化学専攻 大窪助教	原子同士のエ ネルギー交換の <b>流体力学極限</b>	未解決 

# ②演繹的フローの数学(メゾからミクロへ)

普遍的な前提(オートマ群, 半群)から ミクロな系の多様性の背後にある原理を調べる。

	ミクロな系(離散)	ミクロな系の 数理モデル	ミクロな系の物理の多様性に対応し 数理モデル(離散方程式)の候補は膨大 ゆえ、オートマ群という数学の道具を使 い、多様な離散方程式を分類する。
土壌汚染 	 筑波大学大学院システム情報工学 構造エネルギー工学専攻 松島准教授	複雑な経路上のランダムウォーク 等方格子内のエネルギー交換の <b>流体力学極限</b>	非線形発展方程式 (決定論的力学系) 方程式類1 方程式類2 ... 方程式類N 数理モデルのあるべき 姿の基準を 与える。 保存性、可逆性等の性質を調べあげ分類する。
交通流 	 東京大学生産技術研究所 大口教授	TASEP(完全 排他過程)ま たは、ゼロレ ンジ過程の <b>流体力学極限</b>	
材料	硝子を構成する原子の運動  千葉大学大学院 共生応用化学専攻 大窪助教	原子同士のエ ネルギー交換の <b>流体力学極限</b>	



# 基本理念

J.N., T.K., Y.K., M.F., H.K., S.T., T.T., K.S., T.A., H.I., M.S.,  
R.S., T.O., Y.H., T.O., T.K., S.T., K.S., S.K., K.H., N.N., T.H.

本来繋がっているはずの純粋数学と応用数学を繋げ、我が国に数学をコアにした科学技術イノベーションの理論基盤を創りたい。そのため、①これまで応用とは無関係と思われていた純粋数学者が本気で社会的課題に取り組み、その理論に基づいたアイデアを数理モデルとして表現し、②一方で、応用数学者・統計学者がコンピュータに実装するための数理的手法を開発し、③情報科学・理学・工学・産業等における数学応用者がイノベーションに向けた新しい技術概念を創出する。そのような、互いの専門領域を尊重したうえで専門家としての役割分担を相補的に行える異分野連携の場を持続的に創出すること

## 何が必要か？

まずは小さく始め、  
活動実績の評価を受けながら、  
チームを大きくする！

- ・まずは、数学連携チームとしての成功実績を示すこと
  - ✓連携課題は多種・多様であるほど数学に有利
  - ✓各分野(データ提供者)から、数学理論、数理モデルの妥当性評価を得て、  
検証・実用化企画の資金を共同で申請・獲得できていることが成果のひとつの姿
- ・連携チーム運用のため、必要最小限の予算の獲得チャンスを増やすこと
  - ✓若手数学者への支援(特に、純粋数学者の斬新な発想に期待)
  - ✓議論のための諸経費(成果は議論の頻度に比例)

ご清聴ありがとうございました。

## ○意見交換

モデレーター: 西浦 廉政 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授

【司会】 次に移りたいと思います。今後の課題や必要な方策に関する意見交換ということで、東北大学教授の西浦廉政先生にモデレーターをお願いして、まず、お三方の発表から課題抽出をお願いしたいと思います。

【西浦】 御紹介にあずかりました東北大学の西浦と申します。まず、お三方の先生方のまとめをいたしまして、2枚にまとめておりますので。その後、質疑応答に、もう既に時間が10分過ぎておりますので、なるべくその方に時間を割きたいと思います。

最初の平岡先生のお話は、シーズとニーズというふう言葉遣いで分けますと、シーズオリエンテッド。つまり、純粋数学の方のアイデアから、それが実際の現場に役立っていくという方向だったわけです。もちろん、先ほど質問が出ましたが、シーズにしるニーズにしる、特にニーズの方を、数学を何らかの形で使っていくと。1つ忘れてはならないのは、必ず応用する、現場において使うとフィードバックがあります。つまり、数学の方に非常に大きなフィードバックがあると。したがって、平岡先生のお話においても、実際に材料にPDAを使うということで、新たな数学の問題としての、解かなくちゃいけないという問題がフィードバックとして出てきます。ですから、必ずニーズにしるシーズにしる、双方向的なインタラクションが、特に数学の場合は多いと思います。ですから、そういう意味で、どちらの場合にしる、数学にとって必ず中期的には大きな、純粋数学にとっても大きなフィードバックがあると。そこを頭に置いていただきたいなと感じております。



時間がないので、そういうことで、水藤先生のは、膨大なニーズに数学者がどう応えていけばいいのかと。手がない、追っ付いていないわけですがけれども、そこで1つの大きなメッセージというのは、熟練医の先生が持っている典型的な症例、つまり、何かを判断するときの基準となる1つの標準モデル、それは数学者が言うところのエキスを抽出した数理モデルに非常に近い。つまり、ニーズというときに、臨床医が何を欲しいのか、何を欲しがっているのかということ、この患者のこういうデータから、その患者の全体像、どういう方向に治療を持っていけばいいのかという、ある種のガイドラインだと思うんですね。それは、個々のテクニック、手術のテクニックだとか画像の1つ1つの読み方ではなくて、何かアウトラインというものが欲しいと。しかし、それはこれまでではどうしても暗黙知、経験知であったわけです。水藤先生のスライドの中に幾つか出ていましたけれども、そこを酌み取ると。そこを数学の枠で記述できないかという試みをされていると。一部、その成果が、さきがけ、CREST というこの場を提供していただいたおかげで実現していると。これまでは、それがなかなか難しかったと思います。

中川先生のは、伝統的に非常に数学的に蓄積のあるマイクロからマクロの流体力学極限、離散モデル、連続モデル、そういう蓄積がある問題に関わる問題であれば、企業との連携、そういう問題の共有も非常にしやすいですし、分業的な協働が非常に役に立つ、スムーズに行く。

2枚目ですけれども、1行目に大きな市場性ということをあえて書きましたが、ここは市場というのは、単に企業とか、お金をもうけるという意味ではなくて、我々の社会そのものに数学という、特に純粋数学のアイデアが果たし得る役割は結構まだまだあると。そういう宝をどういうふうにして現実社会に

提供していくのかと。そのときに、御質問が先ほど出ていましたが、ランダムにやるということでは決していない。じゃ、方向性はどういうふうにしているのかと。これがなかなか難しいわけですが、若手の人であれば、例えば、さきがけとか CREST とか、そういうボトムアップの科研費ではない場、あれは何がすごいかというと、非常にヘテロな場を一定の期間、Virtual Institute という言葉で出ましたけれども、提供している。これが決定的に重要です。個々の科研費は極めて重要なんですけれども、そこを補完する形の場の提供。特にヘテロな場の提供が重要だなと。それによって、活用の場、さらに、そのヘテロなネットワーク、水藤先生にありましたように、非常に多彩なチームの編成の最初のきっかけができると。それによって、数学がハブとなることで、数学以外のものではなかなかそこまでの横断的なハブはできないと思うんですけれども、数学ならば、そこがより可能になり、よりつながりやすくなると。そういう印象を持ちました。

最後、既に 3 先生最後のスライドでも出ておりましたが、これはまだよく煮詰まっていなくて、やはり人材育成、いろいろ、この 10 年間で試みさせていただいたこと、試みたことがあるわけですが、まだまだ足りない。やはり先ほどの学際的な学位にしる、あるいはいろいろなインターディシプリナリーな研究を推進する上でも、本当はまず我々が変わらないといけない。そこが変わらないと、評価にしる、人材育成もできない。しかし、さきがけとか CREST というのは、もうちょっと玄人なんです。つまり、研究の経験があり、ネットワークもちょっとできている。そこにきっかけを与えると、ぱんといくということなんですけれども、物事というのは、閾値(いきち)が起こさないと、ぱつと爆発しないわけで、その閾値(いきち)のところまで若手を何とかして育てたい。ここら辺、応用連携、特別枠ができないかとか、これもリスクを許容する。したがって、これまでの評価とは違う評価枠がやはり必要かなと思っております。さらに、より国際的な国際さきがけ枠みたいなもの、こういうのをもっと促進できないかなと思っています。

最後に、我々自身が変わらないといけない。一挙に大学は変われないけれども、できることはいっぱいあると思うんです。例えば、副専攻というのをもう少し、自分のベースキャンプは徹底的に重要なんですけれども、やっぱりヘテロな場の中で泳いでいけるというのは、ちょっと、それプラスアルファが必要だと。だから、それを副専攻という形がいいのかどうか分かりませんが、例えばそういうことで、自分の仕事、自分の勉強、やっている研究を違う目、違う視点から見ると。そういうのを割と若い時分から、違う目、視点を持つのは極めて重要だと思います。

ということで、ちょっと時間が押しておりますが、もう一度、3 先生方、さらに、我々がこういう評価の転換とインセンティブということを 1 つの具体例として提案しているんですけれども、討論に入りたいと思います。よろしくお願ひします。

**【司会】** よろしくお願ひします。それでは、会場の皆様、講演者の皆様を含め、全員で質疑応答、意見交換などをしていただければと思います。御意見、御質疑ございましたら挙手願ひします。

**【質問者 H】** 信州大学の小嶋と申します。

数学って分かりにくいものですから、先ほどの齋藤さんの質問なんかともちょっと絡むんですけれども、どのくらいの人が必要なのかなということを知りたいんです。その前に、例えば、先ほど、いろんな例があったんですけれども、病院でやられる先生の例も、先生の方は非常に人が少ないと言われていたんですけれども、例えば、分子生物学の実験とかであれば、100 万の組合せをつぶさにやっていたら必ず見つかる。だけれども、例えば、研究者で優秀かどうかというのは、100 万のうちどこから当たりを付けるかというので、1 万やったところで見つける人もいれば、50 万までやられて見つけられない人もいるとかと違って差が付くかと思うんですけれども、数学の場合、例えば、さつ

きの交通流については、こういう式ができますよということで、式だけ見せられると、非常に簡単な答えが最後、出ているように見えるんですけども、例えば、そこに行き着くまでの時間は皆さんどのくらい掛かっていて、なおかつ、それが優秀な人と優秀じゃない人というのだと、どのくらい時間差が出るのかとかということ、量的にびんと来ないので、その辺を教えてもらいたいですけれども。

【西浦】 時間軸の問題が出ました。まず、中川先生から交通流について。

【中川】 交通流のときはゼロベースから2年間です。その代わり、参加している人たちは優秀な人が集まっていたので、早くできたと思っています。

【質問者 H】 ちなみに、先ほど、前の先生の、病院の方でやったいろんな関係、あのときは大体どのくらいで1つの事例、何人で取り組んで、どのくらいの時間で出たんでしょうか。

【水藤】 例えば、2番目でしたっけ、心不全の話というのは、始まったのは2年前くらいで、関わっている人は、医師の側が2人ですか。でも、技師さんも含めると4人くらいですね。数学側は、統計の人を含めて3人くらいですか。それで、やっぱり最初のうちはなかなか、何をやっていいかわからないんですけど、あるとき、分かったと急に進むという形です。進み方がリニアじゃないので、かかった時間というのがなかなか難しいと思うんですけども、進み始めるまで待つのが大変というのはあると思います。

【質問者 H】 進み始めるところで、お医者さんが考えていることが理解できるまでに掛かったのか、それとも、理解した上で、自分たちが考える方で時間が掛かったのか、どちらなのでしょう。



【水藤】 理解するまでですね。

【質問者 H】 やっぱりそちらですよ。

【水藤】 はい。というか、何を理解していいのかがまず分からないというか、どこを理解しなきゃいけないのかが、向こうも何を理解してほしいのかが言えない状態なので、そこをお互いが議論し合っ

て詰めるところに一番時間が掛かってきていると思います。

【質問者 H】 ありがとうございます。

【質問者 D】 大変失礼ですけど、西浦先生のコメントに1つ、けちを付けます。「天才は不要」というところなんですけど、僕、それ、違うと思うんですよ。やっぱりこういうことにも天才は要すると思うんですけど、たくさんの人を動かすというのは、ある程度年取って、才能を発揮するまでに時間が掛かると。だから、なかなかそれを見抜くのが難しいけど、純粋数学のところは、ある意味ではショーやゲームに近いわけです。非常に特殊化した世界だから、はっきり分かるけど、だけど、極端なことを言ったら、自分の専門しか分からない人が結構いるわけです。それがいいかどうかという問題は、別の種類の天才が要るんだと思うんです。

あと、水藤さんのでちょっと言いそびれたのは何かというと、医師の診断の解析の話で、第5世代のプロジェクトを取ったのを思い出しました。1980年から81年くらいでしたっけ、あれでエキスパートシステムというのでアメリカからファイゲンバウム教授の作った会社とか、リスプマシンとか巨額のお金を掛けて、要するに、診断みたいなことをやろうとして、僕の評価では見事に失敗して、多分、大方の評価では失敗して、なぜ失敗したかというのは、ある意味ではっきりしてきて、そういうのを乗り越えているという。だから、そういう意味では大切な仕事だと思います。ほかの話も立派な話が多かった。

例えば、ある意味では、言葉になるのは、エキスパートシステムに乗っかるのは簡単だけど、言語化できない部分をうまく取り出したというのは今後の模範になるんじゃないかと思います。人間の認知なんかでも、例えば、鳥の分類とかそういうのはなかなか言葉にできないわけですね。さっき、数理モデルと典型例と言ったけど、鳥と聞くと、人間はスズメとかツバメとか、真ん中にある典型例とか、周辺にいるペンギンとかコウモリとか、それによって反応時間が違うというのは脳科学の実験なんかで分かっている。才能はなぜかというのは、ひょっとすると少しずつ解明できるかもしれない。つまり、人間の認知のもっと一般的な行動と結び付ける夢のある話ではないかと思います。

ほかの話もちよっとあったんですけど、これから。

【西浦】 「天才は不要」のところですが、ここは前に形容詞が付いていることに御注意ください。そもそも、ホモロジーにしろ、ポアンカレという天才が追っているわけで、ここで言う天才不要という意味は、実際、そのアイデアは天才によるかもしれないけれども、それを実際ソフト化し、協働し、知財化するということは必ずしも天才でなくてもいい。つまり、普通の数学者がもっと働ける場というのはかなりあるんじゃないかと思っています。そういう意味で、天才は無論必要です。それはもう自明の理なので。誤解を与えたら申し訳ありません。

【中川】 先ほどの天才の話なんですけど、ニーズ主導の方は天才が要ると思います。今までできてないものを、ブレイクスルーする必要があり、天才の発想が鍵になります。それは私も経験していますので、絶対要ると思います。

【水藤】 今、ニーズ主導というのが出て、私はそれを題目にしていましたのでひとこと言わせていただきます。ニーズ主導の場合に天才が要るかという問題ですが、協働の現場には天才はいなくてもいいけど、通訳ができる人は要ると思います。一方、純粋数学の天才は要ると思うんです。私が思うのは、先ほどの中川さんが言われたことと反対になっちゃうんですけど、純粋数学の人は社会的課題を一生懸命考えてくれなくてもいいんじゃないかなという気がします。というのは、意識していることは必要ですけど、純粋数学の人は純粋数学をしっかりやっていただければ、ニーズが出てきたときに、我々なんかが間を取り持っていけると思うので、純粋数学の天才はいてほしいなと思いました。

【質問者 B】 ただいまのお話の実は反対のことを言いたいのでありますが、これ、全て、それぞれすばらしい進展と感じますけれども、ところが、全部併せてみると、やはり問題は研究資金が来たか、こういうことですね。もう一つは、数学系から人材が育成されているか。僕は、この2つに規定されるんじゃないかという感じがいたします。

どうしても私、アメリカの数学月間の、これは御存じだと思いますけれども、Mathematics Awareness Month という、これは実は、社会と数学の相互方向のベクトルを盛んに主張しております。私が見る限りでは、結局、問題はジョイントですね。数学と今おっしゃったような社会、いろんな問題があります。それをいかにジョイントするか。これは、私の友人のコバヤシコウジにも聞いたんですが、アメリカでもこれは非常に難しい課題である。だから、日本でも非常に難しい。つまり、非常に難しい課題だと思っただけですね。そうすると、アメリカには4学会から選出された Joint Policy Board for Mathematics というのがありまして、これが非常に強大な権力を持っておりまして、政治ともいろいろ話をしながら、ジョイントのテーマをどんどん、どんどん決めていくんですね。それに多分、予算が付いている、こういう仕組みがありまして、相当な成果を収めていると感じますので、ただいま私どものこの問題も、非常にうまくいってきたんだけど、いま一步、太く進展するためには、やっぱりこういったコンセプトを、数学の先生と学生に情報としてインプットされる、こういう場を是非作っ

ていただきたい、これが非常に有効ではないかという感じで、これは質問じゃなくて意見でございますが、よろしくお願ひしたいと思ひます。

【西浦】 我々が変わらないといけないというのは、先ほど申し上げたように、やっぱり一番重要だと思ひます。しかし、数学というのは人間がやるわけで、そうすると、人間がやる以上、日本人は特にリスクを嫌ひますし、周りの空気を読むといひますか、どう動いていつているかというのは敏感なわけですね。ですから、やはり我々としては、先ほど、何人かの先生方、あるいは御意見も出ていましたが、そういう役割を果たし得る若手の人材を一定数以上、どうしても必要だと思ひます。その閾値(いきち)を超えない限り、若手からも見えないし、こういう人がこういうやり方で、数学をこういうふうにより、さらに、純粋数学を作っているというプロセスを見る機会がないわけです。そこで、おっしゃったように、場が必要で、そのまま過去 10 年間の中でいろいろと施策上においても、実際の資金提供においても一定の役割を大いに果たしてくれて、一定の成果はきちっと出ていると思ひます。ただし、そこは継続的に、もうちょっと閾値(いきち)を本当に超えるまでやっていただくと、我々としては、我々とといひるか、次の世代にとってはエンカレッジな応援になるんじゃないかと思ひます。

そういう意味で、いろいろリスクーなんですけれども、そういうのはやはり確率論的に一定の成果が出るという施策でいいと僕は思ふんですけれども、やっていきたい、やらせていただければなど強く祈念しております。

【質問者 C】 何度も済みません。政策研、坂田ですけど、最後に 1 つお願ひといひるか、注文といひるか、激励をしたいと思ふんですけど、さっきのお話で、例えば、ニーズオリエンテッドな数学に取り組むにしても、純粋数学においても非常にメリットがあると。応用数学はましてやでしょうね。よく学問の社会的な応用を考えたときには、これは分野を問わずですけど、社会の中に研究テーマがあるといひことはよく言われますよね。だから、ひょっとしたら数学もそうかもしれない。そういうことを考えると、社会と数学との間のインタラクションを強めていくことは非常に重要だし、それから、今、先生がここに書かれている現実世界の大きな市場を持つ。これはまだポテンシャルになっていると思ふんですよ。だけど、もしこの市場がポテンシャルではなくて外に出てくれば、さっき議論があつた予算とか人といひのもの、予算も増える可能性が高くなるし、人を育てなければいけない社会的なニーズもより高くなると思ふんですね。だから、これはやはり大学教育にも影響が出てくる可能性があると思ひますし、サポートしている文部科学省もそういう意識は高まると思ふんです。そうすると、1 つは、現実世界に大きな市場があるのであれば、そのところ今この数学界を背負っている先生方が果敢にチャレンジして、そのポテンシャルを、水面下にあるんじゃないかと外に出してくるというような活動を、既にされているかもしれませんが、もっと一生懸命されたらどうか。そのことが結果として、くどいですが、将来の予算の増だとか人の育成だとか、これもあえて言うと、ニーズ主導型ですかね。ニーズもないのに何で予算を付けるんだと、ニーズもないのに何で学生の数を増やすんだといひ議論は社会では当然あり得ますから、そういう意味で、外に出ていって、ポテンシャルな市場を表に出してくる、そういう努力を是非していただくといいんじゃないか。これは激励の意味で申し上げたいといひことです。

【西浦】 どうもありがとうございます。既に最初に栗辻さんから何枚か御紹介があつた中に、日本数学会も含め、そういう努力は、まだまだ微力かもしれませんが、やっております。ですから、それは 10 年前、20 年前にはほとんどなかったことなので、それによって、若い人も含めて、我々自身が変わると。だから、そういう現場に露出するといひますか、エクスポーズさせる、我々もされ、若い人もさ

れる。そこから何を若い人は感じるかと。僕は、先ほど言いましたように、人間がやっているの、直接、生の現場というのは、何らかのインスピレーションなり何らかのインパクトというものを必ず感じる。ただし、それは最初は、そういういい場を与えてあげないといけない。いい人間に接するいい現象、いい問題のある、そういうそのものに触れさせる場を作っていかななくちゃいけない。そのことによって、徐々に人というのは変わっていくだろうと思います。ですから、そういう努力を我々自身もやはり、今おっしゃったように、もっともっと思いたいと考えております。

ほかに。

**【質問者 I】** 日産自動車の研究企画部の松廣といいます。きょうは貴重なお話をありがとうございました。

今年度、初めて九大の IMI の先生と御縁があってインターンシップを受け入れる予定なんですけれども、インターンシップの学生の方の研究テーマ、テーママッチングをどうしようかということで今、頭を悩ませているところなんです。例えば、学生の方にいろんな研究所を回ってもらって課題を見つけてもらうのがいいのか、やっぱりこちらから、こちらからというのはすごく難しいなと思っていて、その辺で気を付けることとかアドバイスとか、あと、うまくいっている事例とかありましたら教えていただければと思いました。

**【西浦】** 私が適当な回答者かどうか……。IMI は平岡さんがおられた。

**【平岡】** 僕の意見としては、企業の側から提供する若しくは学生から探す、どちらでも構わないと思うんですけど、変に学生の今まで勉強してきた経験を意識した課題を与える必要は全くなくて、学生は非常に柔軟です。やってみると分かりますけど、非常に柔軟で、彼らなりの解決策を何とか考えようとします。なので、余り学生のことを最初から意識してテーマを選ぶ必要はなくて、とりあえず企業の方が興味を持っている問題を出してみたらいいと思います。学生は動きます。それが、僕が体験した経験です。

**【西浦】** 私も幾つかティップスはあるんですけども、全部言っていると時間がないので 1 つだけ。もしその方が多少計算機を使えるのであれば、間に何らかの既存のソフトでもいいんですけども、ソフトウェアを介在させる。そうすると、そのソフトウェアの中に数学の何か本質的なものが含まれているソフトでも、データを入れたら、何か、その問題に関わるものがアウトプットとして返ってくると、「あれ、何か出るね」とか言って、この出るのはいくような意味がありそうだねとなると、そのときは本人にとってはブラックボックスになりますけれども、それを生み出す回答を返してくれる、その数学は何なんだということで、いわゆる手を動かすといいますが、ソフトウェアなり何なり、やっぱり手を動かすのが大事じゃないかと僕は思います。実体験として、自分の身にやっていることは何か返ってくる。そういう体験をさせる方が、今、平岡さんがおっしゃるように、そのときに分野がどうのこうの、過去に何をやっていたかというのは余り関係がないと僕は思います。実体験が、最近の若い方はシミュレーションは苦手じゃないので、いいかなと思います。

**【質問者 I】** 貴重なアドバイス、ありがとうございました。

**【西浦】** ありがとうございました。

# シーズとニーズのクロスロード

## —数学は「超サイバー社会」の要—

モデレータからの論点メモ  
西浦廉政(東北大学)

- ▶ **シーズとなる宝は数学に山とある**(平岡氏:PDA)
  - 宝と現実の関連を見つけ, ソフト化し, 協働し, 知財化する人材が不可欠, しかしそこへのインセンティブと支援が少ない.
- ▶ **ニーズが膨大な分野での羅針盤としての数学**(水藤氏:臨床医療)
  - 熟練医がもつ「典型的症例」は「数理モデル」と同じ発想.
  - 臨床医が現場で行う判断根拠のモデル化, 論理化
    - 機械学習ではない(Blackboxなし)暗黙知の論理抽出
    - 信頼, 安全, スピードを得る
- ▶ **伝統的に数学的蓄積とその浸透が十分な分野では分業的協働が有効かつ速い**(中川氏:逆問題, 物性予測, 交通流)
  - 交通流の時系列データ・物性予測マテリアルインフォ
  - **データから新たな知識の抽出は数学が鍵**(Growth数)

## シーズ発掘とその持続的発展への投資と評価

- ▶ **数学の最も抽象的な方法論が現実世界に大きな「市場」をもつ.**
- ▶ **シーズの早期発掘とそのソフト化への加速**
  - **古典的宝に新たな命を吹き込む.** リスクはあるが, 世界的競争の**一步先**をゆける. **From innovation to revolution**
- ▶ それらの「**活用の場**」の拡大と**計算機実装による現場での実践.**
- ▶ ニーズ主導の分野(臨床医療等)で**数学がハブとなるネットワーク**
- ▶ **評価の転換と若手研究者へのインセンティブ**
  - 数学アイデアのソフト化への支援と評価
  - 「さきがけ」「CREST」へ至る**前段階**での人材育成が不可欠
    - 抽象世界と複雑現実世界の往復運動を中高から.
    - 学振のDC, PD, 海外特別研究員における**応用連携の特別枠**設定
      - 科研費の「特設分野」と似た枠組み
    - 日本と諸外国の若手研究者の構成による「**国際さきがけ枠**」の創設.
  - 数学専攻での「**副専攻**」が奨励される
    - 「人類が直面する複雑問題」「超サイバー社会」へ数学はどんな枠組みを提供できるかを考えさせる. 単独のディシプリンでは解決できない.



## ○閉会挨拶

奈良人司 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 所長

【司会】 それでは、最後に閉会の御挨拶を、科学技術・学術政策研究所所長の奈良人司様からお願いいたします。

【奈良】 どうもありがとうございました。ただいま御紹介にあずかりました奈良人司です。実は昨日着任したばかりで、これがまさしく初仕事です。また、しばらく別な仕事をしていましたから、科学技術は、今、どうなっているのかな、などと思っていました。そこで、いきなり数学というテーマでしたが、科学技術の動向に関し、勘も一気に戻ってきた感じでございます。

本日、何回もお話がありましたけれども、2006年に政策研から「忘れられた科学－数学」という刊行物が出ました。数百冊以上出たということで政策研の報告書としては大ヒットだったのではないかと思います。また、その翌年の2007年にさきがけ、2008年、CREST実施ということで、この分野もその間、皆様の御尽力で随分進んできたと思います。2011年には、文科省に数学イノベーションのユニットができたということで、この分野、私は、余り今まで考えたことがなかったような分野ですが、本日お話を伺って、政策研として、当然ながら文科省をサポートしながら一緒に連携を取ってやりたいと思っておりますけれども、一体どこから手を付けたいかというのは、まさしく数学で解いてほしいなど、少しそう思った次第でございます。

本日は非常にたくさんのお話を聞かせていただき、数学のイノベーションをどうやって進めるかは非常に重要で、当然サポートするのですが、どうやればよいかということは、もう一回、中で少し考えてみたいと思います。例えば、先ほど、科学技術と数学の通訳というお話もありましたし、事例を集めるというお話もありました。一方、大学の数学の学生とかポスドクの人とかは、どう勉強して、社会のどこに出て、どうしているのだろう、と少し気になっています。その辺の人材育成の問題も現在調査していますが、比較的工学系の方はいろいろな情報があるのですが、政策研では、例えば純粋数学のような学術も対象にしていますが、それらの現場はどうなっているのかなと少し気になり出しました。そういうことも含めて、科学技術・学術政策研究所として調査研究するなり、また、このような講演会を何回か開かせていただくなりしてサポートしてまいりたいと思います。この分野、重要と考えますので、是非皆様も頑張ってくださいまして、また我々もサポートさせていただきますし、協力しながら進めたいと思いますので、よろしく願いいたしたいと思っております。本日はどうもありがとうございました。(拍手)

【司会】 傍聴者の皆様、講演者の皆様、そして関係者の皆様、皆様の御努力があって、本日の講演会を開催できました。本当にありがとうございました。お気を付けてお帰りください。どうもありがとうございました。

