

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

複雑な流れ現象の解明と 統合的制御

令和3年1月8日（金）開催

ワークショップ報告書
CRDS-FY2020-WR-14

エグゼクティブサマリー

本報告書は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和3年1月8日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「複雑な流れ現象の解明と統合的制御」に関するものである。本ワークショップでは、複雑な流れ現象に関わる流体科学分野（流体工学・流体力学およびその周辺分野）を俯瞰し、我が国における研究状況や今後進めるべき研究開発課題・推進体制について、次の2点をテーマとして議論を行った。

- ①複雑な流れ現象の普遍的な原理等の解明、高度な予測、統合的制御を可能にする、実験・シミュレーション・理論・機械学習を連携した研究推進体制の構築と研究要素
- ②サイエンスとしての流体科学とエンジニアリングとしての流体工学を統合させ、イノベーション創出や出口ニーズに繋がる研究開発課題とそれらの社会的・経済的インパクト

複雑な流れ現象とは、乱流など流体自体は単純だが流れが複雑なもの、混相流・非ニュートン流など流体自体が複雑なものなどがある。これらに対する研究はいずれも質的転換期にある。すなわち、従来のアプローチである支配方程式の解析と新しいアプローチである機械学習との融合により、複雑な流れ現象の本質的な理解が今後数年で大きく進展すると予想されている。機械学習による新たなアプローチによる研究は、現時点では基本的な流れで検証する萌芽的段階にあり、今後、乱流・複雑流体などの現実的な流れを対象とした研究で検証し、より本格的な研究に発展させる必要があることが示された。さらに、実験・理論・数値計算・機械学習を融合し、一体的に取り組むことを通じ、新たな流体力学の構築を目指す必要があることが示唆された。

日本においては、これまで本対象領域の様々な出口ニーズ（航空、環境、気象、バイオなど）に対応して、個別の流れ現象を対象にした具体的な研究が多く実施されている。しかし、それらは具体的な研究の個別目標実現にとどまり、流体現象の本質を解き明かすものではなかった。研究の質的転換期を迎えた今、個別の流れ現象や事例を数多く包含するテーマを設定し、個別具体的な研究と流体の本質に迫る研究との相互作用を促す制度設計が必要である。非線形性が強くマルチスケール性を有す複雑な流れ現象における普遍的な現象理解や理論の確立は、イノベーション創出のキーである。高忠実な流体データベースを構築し、豊富なデータから構成則の構築を目指す必要がある。本対象領域における航空・環境・気象・バイオ分野などの研究動向を見据えながら、普遍的な現象解明と理論の確立をテーマとして研究開発を推進する必要がある。

研究開発の推進方法としては、まず各大学・学会・産業界とのネットワークを形成する必要性が示唆された。当該分野は裾野が広いが、細分化している現状があり、本分野の転換期を迎えた今がネットワークを形成する最良の時期である。関連分野との接点や社会問題との接点を意識した対話を重ねながら、ネットワークを活性化させることが必要である。これに関しては、5年程度後の拠点化もしくはコンソーシアム化の実現を見据えながらネットワークにおいて研究を推進することが必要との認識を得ることができた。

本対象領域は2050年カーボンニュートラル社会の実現や安全安心な社会の構築に向けた基盤的科学技術であり、国としての中長期的な視点からの支援が不可欠である。新しい流体学理の創成と産業応用への基盤となるモデル構築とを両輪で進展させ、新しい価値創造を目指すことが今、求められている。

目次

1	ワークショップ開催概要	1
2	開催挨拶・趣旨説明	2
2.1	開会挨拶 佐藤 順一（科学技術振興機構 研究開発戦略センター （CRDS）上席フェロー）	2
2.2	趣旨説明 長谷川 景子（科学技術振興機構 研究開発戦略センター （CRDS）フェロー）	3
3	第一部	13
3.1	「複雑な流れ現象」俯瞰の試みと展開：反応性流体 丸田 薫（東北大学流体科学研究所 所長・教授）	13
3.2	“複雑流れ”の解明～今、挑戦すべき課題～ 後藤 晋（大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）	19
3.3	複雑な流れ現象の解明と統合的制御に向けた クロス・プロジェクト 店橋 護（東京工業大学工学院 教授）	25
3.4	トポロジカルデータ解析とその流体解析への応用 坂上 貴之（京都大学大学院理学研究科 教授）	31
3.5	機械学習を活用した流れ制御手法の構築に向けて 深淵 康二（慶應義塾大学理工学部 教授）	38
3.6	コメンテーターからのご意見	44
	藤井 孝藏（東京理科大学工学部 教授）	44
	梶島 岳夫（大阪大学大学院工学研究科 教授）	47
	長谷川 洋介（東京大学生産技術研究所 准教授）	49

4	第二部	53
4.1	航空宇宙分野における流体科学研究と 将来のイノベーション創出に向けた試み 河合 宗司 (東北大学大学院工学研究科 教授).....	53
4.2	分散混相流のマルチスケール問題 高木 周 (東京大学大学院工学系研究科 教授).....	56
4.3	AI 融合シミュレーションによる 微気象予測の実現と未来社会サービスの創出 大西 領 (東京工業大学学術国際情報センター 准教授).....	61
4.4	コメンテーターからのご意見.....	66
	藤森 俊郎 (株式会社 IHI 技術開発本部 技監).....	66
	茨木 誠一 (三菱重工業株式会社総合研究所 部長).....	68
	西村 浩一 (大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所 マネージャー).....	69
	大島 まり (東京大学生産技術研究所 教授).....	71
5	総合討論	74
5.1	社会的・経済的効果および研究開発の基盤要素.....	74
5.2	研究開発の推進方法および研究開発の時間軸.....	81
6	まとめ	83
	付録	86
	付録 1 プログラム.....	86
	付録 2 ワークショップ参加者リスト.....	87

1 | ワークショップ開催概要

■はじめに

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を把握・俯瞰し、調査・分析し、国として重要な研究開発領域や課題あるいはその推進方法等について戦略プロポーザルとしてとりまとめて発信している。今般、「複雑な流れ」の現象解明・予測・制御に関して研究開発動向や今後の在り方についての検討を深めるためワークショップを開催した。

■背景

我々の身の回りにある様々な物質や熱は、環境中あるいは生体内中で流れにより輸送され、拡散・反応している。これらの物質や熱の輸送には様々な流れ現象が複雑に関与している。こうした「複雑な流れ」は強い非線形性・高次元性・マルチスケール性を有し、境界条件や初期条件も不明な場合が多く、さらに様々な他分野との連成問題を含んでいる場合も多い。工学的解決に向けてこれらをパラメータで置き換え、個別問題として対応しているが、「複雑な流れ」の現象解明・予測・制御は依然として困難な研究課題である。

流体工学・流体力学分野は、環境・エネルギー分野を支える基盤科学技術分野として、実験流体力学、理論流体力学、数値流体力学がそれぞれ連携しながら発展してきた。近年、複雑化する流体工学の諸問題に対し、実験・理論・計算に加えて、機械学習や深層学習等のデータ科学的手法を用いたアプローチが盛んになってきており、本分野も新たな局面を迎えている。その流れを受け、欧米ではそれらを一体的に取り扱うプロジェクトが複数推進されているが、日本では流体工学・流体力学分野の大型プロジェクトはここ10年程度、実施されていない。

■目的

以上の背景を踏まえ、本ワークショップでは、複雑な流れ現象に関わる流体科学分野（流体工学・流体力学およびその周辺分野）を俯瞰し、我が国にて今後進めるべき研究開発課題やその推進体制について多様な専門家を交えて議論を行う。具体的には次の2点を主な議論テーマとする。

- ①複雑な流れ現象の普遍的な原理等の解明、高度な予測、統合的制御を可能にする、実験・シミュレーション・理論・機械学習を連携した研究推進体制の構築と研究要素
- ②サイエンスとしての流体科学とエンジニアリングとしての流体工学を統合させ、イノベーション創出や出口ニーズに繋がる研究開発課題とそれらの社会的・経済的インパクト

■開催日程

日時： 2021年1月8日（金） 10:00～15:35

場所： zoomにより開催（事務局：JST東京本部別館4階 F会議室）

2 | 開催挨拶・趣旨説明

2.1 開会挨拶

佐藤 順一（科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS）上席フェロー）

本日は本ワークショップにご参加いただき、ありがとうございます。

流体力学は非常に古い学問で、近代工学の一つの柱として、物理学や数学とともに発展してきました。

しかし、我が国では最近、この流体力学の国際的な実力が落ちているのではないかとこの危惧があちこちから聞かれています。これは流体力学だけではなく、工学の基盤に関する破壊力学やその他の分野でも同じ現象が起きております。

これはひとえに、明治時代に日本が開国した後、学問は海外から輸入して発展し、それとは別に、物をつくるという工学は工学として、技術提携その他で入ってきたことが関係しているのではないかと思います。つまり基礎と応用とが繋がっていないことが、大きな問題ではないかと考えています。また、基礎の分野でもかつてと違い、実験と理論と計算、応用それぞれ個別に進んでいることが、日本の現状であり、危惧を抱いております。

私はかつて反応性流体を専門としていました。日本の現状と比較して、アメリカやヨーロッパでは、複雑な現象の解明に、工学の研究者だけではなく、物理学の研究者や数学の研究者が参加し、チームとしていろいろな問題を考え、解いていました。日本では残念ながら、私が現役だった当時、そのような機運があまりありませんでした。

今回のワークショップでは、本来の流体科学・工学の在り方というものを考えて、我が国としてどのように推進していくかに焦点を当てて議論していきたいと思います。ご参加者の皆さんから様々なご意見をいただくとともに、本来こうあるべきであろう、将来こうしていくべきであろうというご提言をいただきたいと思います。我々はこれを提言としてまとめ、この分野の振興に関わるような施策を提案していきたいと考えています。

本日はよろしくお願いたします。

2.2 趣旨説明

長谷川 景子（科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS）フェロー）

CRDSは我が国の科学技術イノベーション政策に関連する様々な調査、分析等を行い、得られた成果を各種報告書や戦略プロポーザルと呼ぶ提言書として取りまとめ公開している。これらは関連府省の政策立案や各種委員会等での検討の際にエビデンスの一つとして参照・引用される等、様々な形でご活用いただいている。

本日のワークショップは、戦略プロポーザルを作成するための活動の一環として開催している。本日の議論の内容を踏まえ、戦略プロポーザルやワークショップ報告書を作成し、各府省などでプロジェクトを立案する際の基礎資料として使っていただきたいと考えている。我々チームとしての取りまとめの方向性を次のページから示す。本日、専門家の先生方にお集まりいただき、このような形の方がもっと伝わるのではないかと、この部分が足りないのではないかと、本日の話題提供やディスカッションでご提示いただきたい。（図2-1）

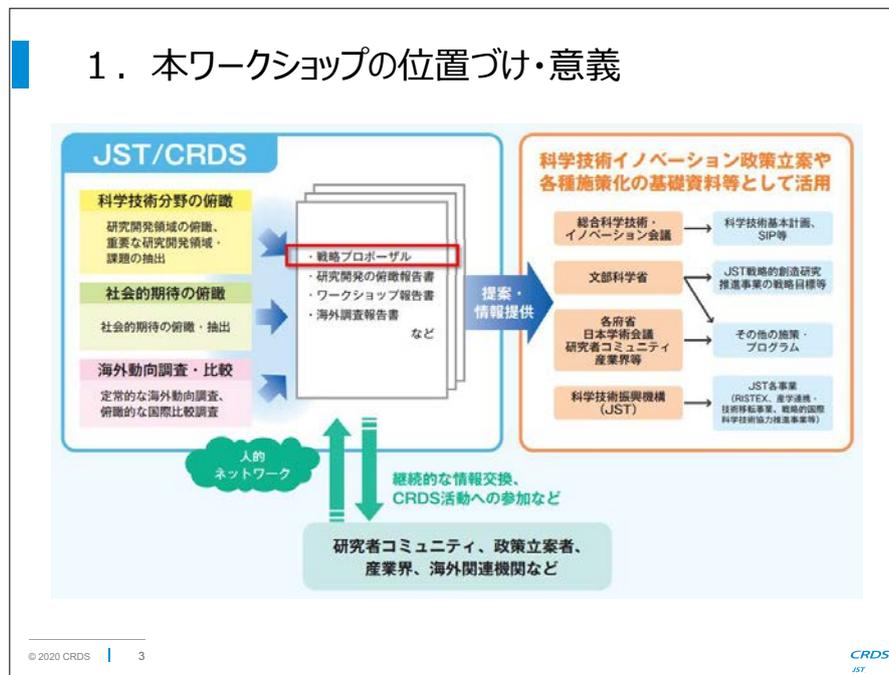


図2-1 本ワークショップの位置付け・意義

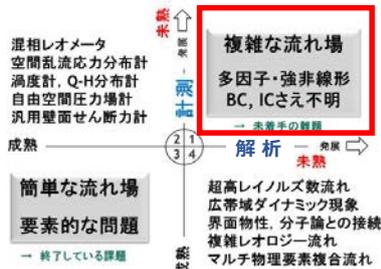
まず背景として、複雑な流れというものを定義している。複雑な流れは、強い非線形性・高次元性・マルチスケール性を含んでいる。まだ未着手の問題が山積している部分であり、今改めてこの問題に取り組むことによって、科学技術のみならず、実社会に対して大きな貢献が期待できるのではないかと考えている。（図2-2）

次に現状認識として、4つの側面からまとめている。1つ目として、ここ10年程度の計算機能力の向上や計算手法の向上によって、実験室内の乱流現象から十分に発達した乱流の直接数値シミュレーション研究が行える時代になった。2つ目として、計測・分析機器の面からも様々な進捗があり、いわゆる乱流ビッグデータと呼ばれる豊富なデータが取得可能になった。（図2-3）

2. [背景] 研究開発を実施する意義

2.1 複雑な流れとは

我々の身の回りにある様々な物質や熱は、環境中あるいは生体内中で流れにより輸送され、拡散・反応している。これらの物質や熱の輸送には様々な流れ現象が複雑に関与している。



図：複雑な流れ場とは

出典：流体機器のためのCFDと実験のデータ融合設計（北大・村井祐一教授）

こうした「複雑な流れ」は強い非線形性・高次元性・マルチスケール性を有し、境界条件(BC)や初期条件(IC)も不明な場合が多く、さらに様々な他分野との連成問題を含んでいる場合も多い。工学的解決に向けてこれらをパラメータで置き換え、個別問題として対応しているが、「複雑な流れ」の現象解明・予測・制御は依然として困難な研究課題である。

→ 複雑な流れの現象の本質的な理解を深めることは、複雑な流れに伴って生じる運動量輸送、熱物質輸送、化学反応などの正確な予測・制御が可能となり、実社会に対して大きな貢献が期待できる。

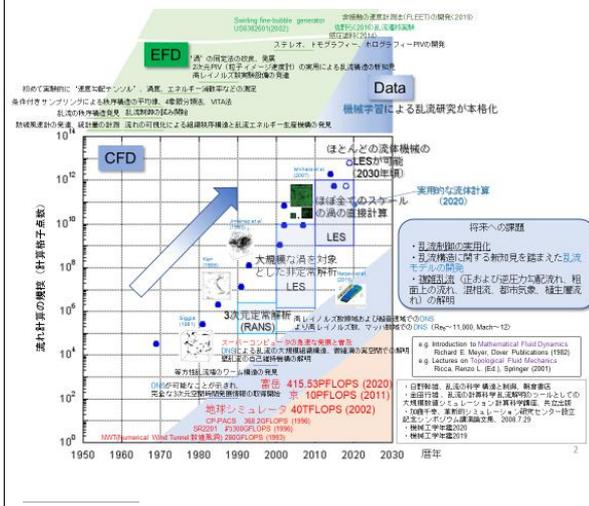
© 2020 CRDS | 4

CRDS
JST

図2-2 研究開発を実施する意義（複雑な流れとは）

2. [背景] 研究開発を実施する意義

2.2 現状認識



© 2020 CRDS | 1

JST

図2-3 研究開発を実施する意義（現状認識①）

これら2つが牽引する形で、3つ目として理論側でも発展が見られる。大規模データの解析の手法も整ったことから、さらに理論研究も進展するのではないかと期待されている。そして、4つ目として新しい機械学習を用いたアプローチが発展し、いくつか有効なアルゴリズムも開発されてきた。機械学習が乱流ビッグデータの解析に適していると考えられ、乱流ビッグデータを取り扱う準備がこの5～6年で整ってきた状況かと考える。（図2-4）

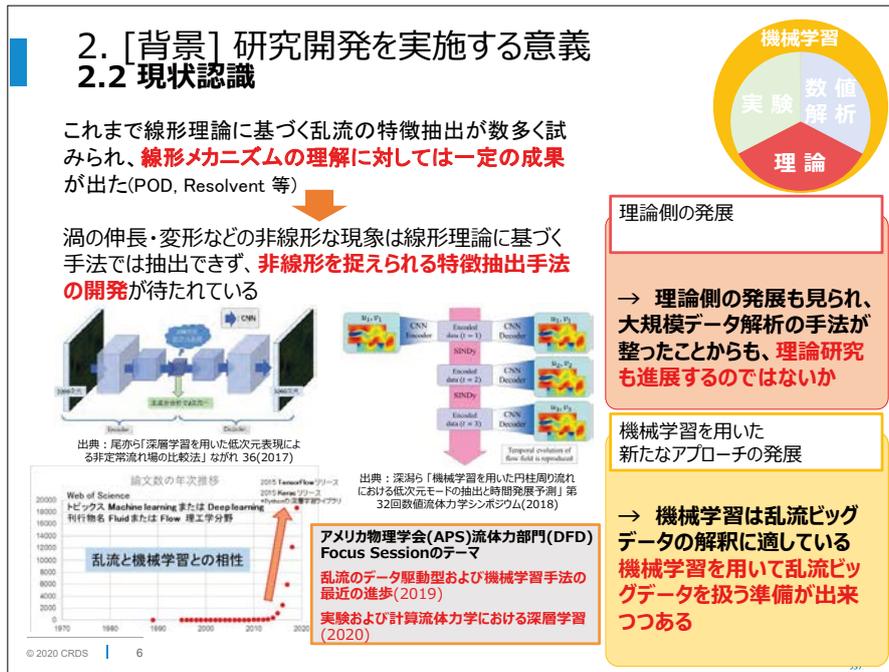


図 2-4 研究開発を実施する意義 (現状認識②)

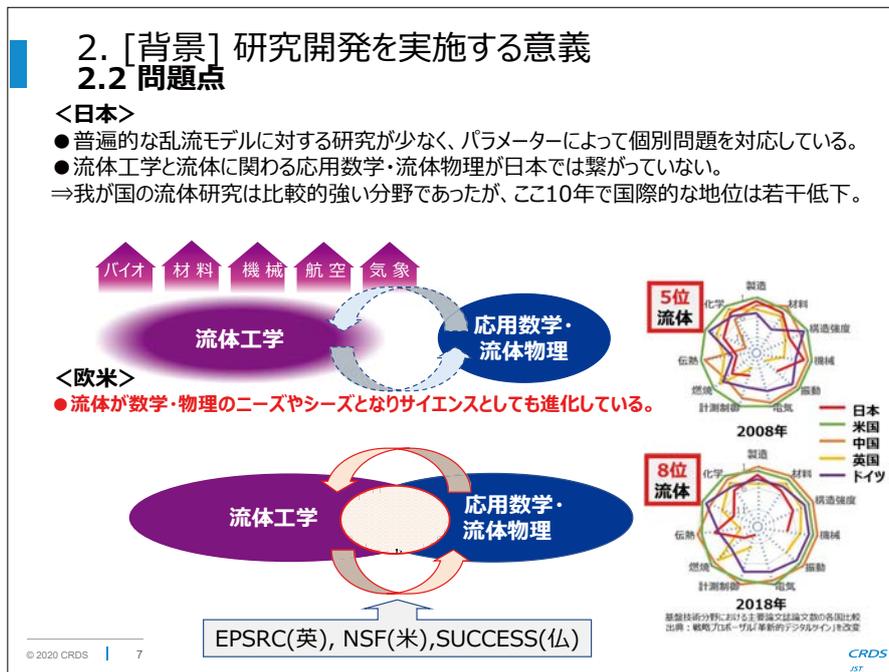


図 2-5 研究開発を実施する意義 (問題点①)

次に、我々チームとして、研究者の方々へのヒアリングを通じて抽出した問題点まとめた。この点については、ぜひ本日ディスカッションしたい部分である。1つ目の問題点として、日本においては、普遍的な乱流モデルに対する研究が少なく、パラメーターによって個別対応している点である。図2-5に書いたように、流体工学と流体に関わる応用数学・流体物理が日本では繋がっていないという状況にもある。その結果、日本では比較的強いとされた流体分野が、ここ10年程度で国際的地位も低下しているのではないかと考えられる。

一方の欧米では、流体が数学物理のニーズ・シーズになり、サイエンスとしても進化している状況にある。また、これらを繋ぐ形でプロジェクトが形成されている。

2つ目の問題点としては、実験・シミュレーション・理論・情報科学の研究者が連携し、一体的に研究を推進する体制が取れていない点が挙げられる。ここ10年程度大型の流体研究プロジェクトが実施されていないことも一つの原因かと考えている。

2. [背景] 研究開発を実施する意義

2.2 問題点

- 実験・シミュレーション・理論・情報科学の研究者が連携して、一体的に研究を推進する体制が取れていない。
- それぞれの領域でのボトルネック課題例

実験	数値解析	理論	機械学習
<p>さらなる高レイノルズ数の乱流実験およびその計測手法の開発</p> <p>極めて高いレイノルズ数において乱流の普遍則が現れるため、より大規模な乱流実験系の構築が必要</p> <p>同時計測</p> <p>いろいろな物理現象を同時に計測すること、特に4次元で追跡し、それを定量的な物理量・データとして得ることはまだ困難な課題</p>	<p>乱流データセットの不足・共有化の必要性</p> <p>複雑でマルチスケールな乱流のデータが不足</p> <p>データセットはデータを生成した人の手元にあり、コミュニティ全体に共有されていない</p> <p>マルチスケール性</p> <p>膨大な計測点や計算点数が必要(高コスト)</p> <p>多重スケール解析には現象を切り分けるスケールの選定が困難</p>	<p>より現実的な(高レイノルズ数)の乱流のDNS</p> <p>計算負荷が高く、解が安定しない</p> <p>流体・構造連成問題</p> <p>流体・化学反応連成問題</p> <p>異なる特性時間を持つシステムをどのようにシミュレーションするかはまだ困難な課題</p>	<p>支配方程式に基づく理論の限界</p> <p>ナビエ-ストークス方程式に基づく理論による普遍的なモデル構築は確立できていない</p>
<p>機械学習の導入が様々に試みられている(疎なデータからデータを補充(⇒実験)、膨大なデータから特徴抽出・次元圧縮(⇒解析)、支配方程式によらない方法論(⇒理論))一方で、「ブラックボックス」して学習できることが機械学習の欠点として挙げられる。</p> <p>単に予測・制御をするだけでは、物理的理解やそれに基づく新しい予測や制御指針には繋がらず、安全性を確保して機械や社会システムの中に組み込むことができない。</p>			

© 2020 CRDS | 8 CRDS
JST

図 2-6 研究開発を実施する意義 (問題点②)

2. [背景] 研究開発を実施する意義

2.3 社会・経済的効果

カーボンニュートラル社会の実現	新しいモノづくりコトづくり	安全安心な社会
<ul style="list-style-type: none"> ● 航空機・自動車・流体機械の抵抗低減、高効率でクリーンな燃焼 <p>能動制御を用いた旋渦制御等が航空機の抵抗低減の技術として注目されている。航空機の騒音低減にも割離せん断層や渦と翼の干渉に関する現象理解が不可欠である。</p> <p>→ 乱流摩擦抵抗の低減</p> ● 風力発電の効率向上 <p>大小さまざまなスケールが存在する風車周りの流れについて全てのスケール効果を取り入れたシミュレーション</p> <p>→ 風車ファームの最適化</p> ● 各種プラントの管内流れの効率向上 <p>管摩擦抵抗低減技術の向上</p> <p>→ パイプライン輸送の省エネ化</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● ものづくりの根幹をなす基盤技術 <p>製造業等で活用が広まるデジタルツイン、その中核にあるシミュレーションで流体解析は重要なターゲットである</p> <p>→ プロセスのタイムスケール短縮(開発期間を30%短縮することが可能に)</p> <p>医工学分野でも流体力学への応用が進み、分析・検査チップの開発にも貢献</p> <p>→ 流体の自由度を使った新しいものづくり</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 気象予測精度向上による防災・減災への貢献 <p>全球雲解像モデルによる気候シミュレーションや数km程度スケールで人間活動まで含めた数値モデル化</p> <p>→ 精緻な情報提供が可能に/積乱雲の発達や豪雨発達の正確な予測が可能に/防災・減災のための早期予測システムの構築</p> <p>2019年度水害被害額 2兆1500億円</p> ● コロナウイルス等の感染リスク低減への貢献 <p>感染メカニズムに関係する蒸発機構等、複雑なフィジクス・化学反応を組み込んだシミュレーション</p> <p>→ 空気の流れの最適制御と感染予防策の構築が可能に</p> <p>文化イベント経済損失額3兆円/3ヶ月</p> ● 血流と疾患の関連の解明への貢献 <p>血流計測手法の確立、分子レベルから臓器・全身循環器までの連成</p> <p>→ 疾患メカニズムの解明へ寄与</p>

© 2020 CRDS | 2 CRDS
JST

図 2-7 研究開発を実施する意義 (社会・経済的効果)

4つの観点でのボトルネック課題をまとめたものが図2-6である。例えば、より高いレイノルズ数の大規模な乱流実験系の構築やDNSが必要である。マルチスケール性の問題も大きく、多重スケール解析にはスケールの選定が困難であることも挙げられる。理論側では、支配方程式に基づく理論には限界が見えているのではないかということもある。また、機械学習の様々なアプローチが試みられてはいるものの、一方でブラックボックスとして学習できることが機械学習の欠点として挙げられている。物理現象の理解やそれに基づく新しい予測・制御指針に繋げるにはまだまだクリアすべきものがあると捉えている。

次に、このような研究開発の実施がもたらす社会・経済的効果を3つの柱として示す。(図2-7)

1つ目としては、カーボンニュートラル社会の実現への大きな貢献である。2つ目としては、新しいモノづくりコトづくりへの貢献である。流体はモノづくりの根幹となる基盤技術であり、例えば、開発期間が大幅に短縮することは大きなブレークスルーになる。3つ目としては、安心安全な社会構築への貢献である。例えば、気象の予想精度向上による防災・減災への貢献、昨今のコロナウイルス等の感染リスク低減への貢献、疾患メカニズムの解明などがある。

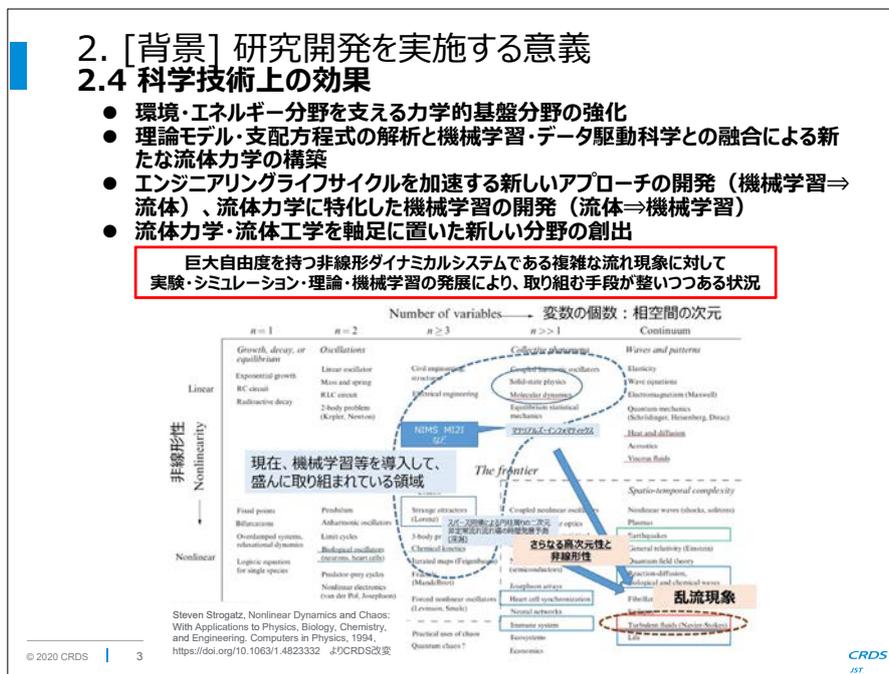


図2-8 研究開発を実施する意義（科学技術上の効果）

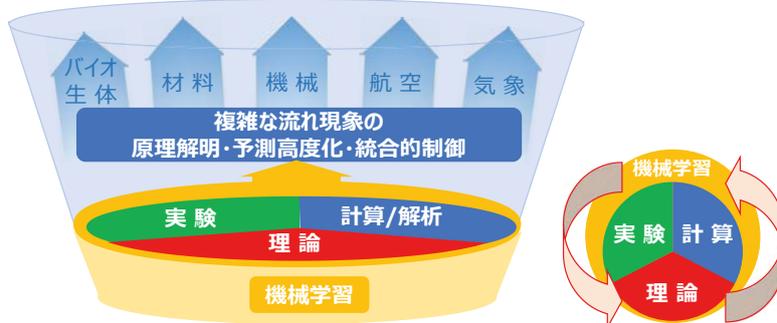
科学技術上の効果としては、大きく4つ挙げられる。1つ目としては、力学基盤分野の強化である。2つ目としては、従来のアプローチである理論モデル・支配方程式の解析と新しいアプローチである機械学習・データ駆動科学を融合して、新しい流体力学の構築ができるのではないかとことである。3つ目としては、エンジニアリングライフサイクルを加速するアプローチの開発である。4つ目としては、流体力学・流体科学に軸足を置いた新しい分野の創出である。(図2-8)

図2-8は、横軸に次元、縦軸に線形性・非線形性を取った際に、乱流現象は次元も高く非線形も高い右下に位置していることを表している。現在、機械学習等を導入して盛んに取り組まれている領域は青の点線で囲んだ部分である。本研究開発を実施することによって、少しでも右下に近づくように更なる高次元性と非線形性を追求していくことが必要ではないかと考えている。

図2-9は研究開発の概要である。本日の論点としても挙げているが、サイエンスとしての流体とエンジニア

3. 研究開発の概要 ★本日の論点

課題① サイエンスとしての流体とエンジニアリングとしての流体の統合がイノベーションを創出する。そのためには、分野を超えた実験・シミュレーション・理論・機械学習(情報科学)を連携した研究推進体制の構築が必要。→ 拠点(バーチャルも可)の構築



物理的・数学的な考え方と機械学習とを統合しながら、複雑な流れ現象のみならず、その普遍的な原理等を解明し、高度な予測、統合的な制御を可能にする知の構築を目指す。

© 2020 CRDS | 11

CRDS
JST

図2-9 研究開発の概要

リングとしての流体の統合がイノベーションを創出すると考えている。そのためには、個々の分野ごとに研究を実施するのではなく、分野を超えて密に連携するような研究体制の構築が必要であると考えている。

図2-10には具体的な研究開発課題をいくつか例示したが、こちらはぜひ先生方から本日話題提供いただきたい。例えば、乱流実験、さらなる高レイノルズ数の実験が必要であろうし、またデータセットとして共有化することが必要であろう。計測手法の高度化やマルチスケールの共通問題の設定と適切なスケール解析も必要である。理論側で、理論モデル・支配方程式の解析と機械学習を融合して発展させていくことも必要である。機械学習も闇雲に使うのではなくて、適切なマッチングが必要であり、検証等妥当性の確認も必要であることを例示している。

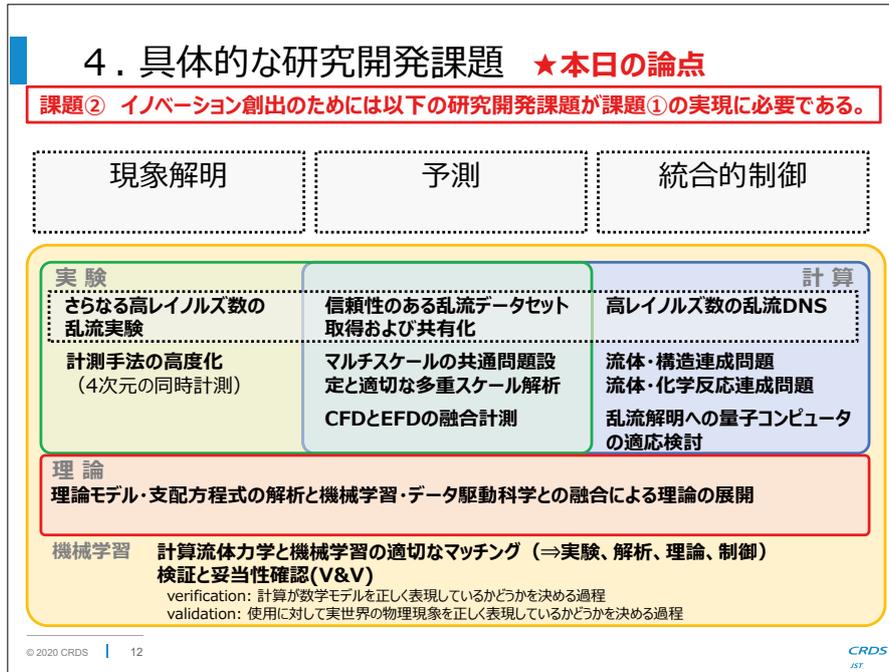


図2-10 具体的な研究開発課題



図2-11 海外での取り組み事例①

ここで海外での取組事例を少し紹介したい。

英国の研究費配分機関であるEPSRCのポートフォリオを図2-11左上に示す。工学分野は流体力学、航空力学を中心としたポートフォリオとなっており、このような分野が重要であると定義されている。航空等のモビリティだけではなく、例えばインフラ、都市システム、マテリアルエンジニアリングに対しても基盤的な分野であることが定義されている。

流体力学分野における予算内訳（図2-12右上）と各大学への予算配分額（図2-12左上）を示す。プロジェクト費が6割以上を占めている。博士課程のトレーニングセンターが3つの大学（インペリアル、ケンブリッジ、リーズ）に設置され、その予算配分額としては全体の42%を占める。我々は、青で示したそれ以外の大学にも研究費が配分されていることに着目した。多くの大学が参画し、ネットワーク化してUK Fluids Networksが形成されている。EPSRCも支援し、体系的に運営されている。続いて風洞設備にも予算が配分されている。他の大学や民間企業に25%の利用時間を解放しており、このような共用施設が卓越した研究者を惹きつけている。この分野でしっかりとした取組が実施されている事例である。

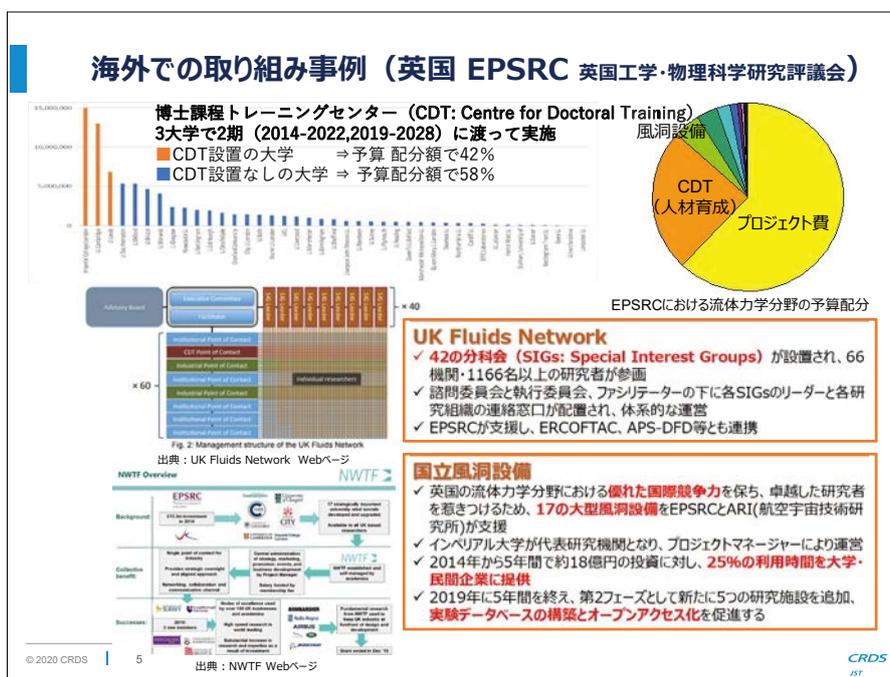


図2-12 海外での取り組み事例②

また、米国の取組事例として、ジョンズ・ホプキンス大学の乱流データベースを紹介する。（図2-13）NSFからの支援を受けており、あらゆる時刻、場所の流れのデータが自由にダウンロードできる環境が提供されている。さらにはテクニカルスタッフとポスドクが複数名いる体制で、学際的に運営されている。このようなデータベースを日本でどうするべきなのかというも、本日議論できればと考えている。

研究開発の推進方法、時間軸を図2-14で説明する。大きく4つのポイントがあると考えている。まずは中心に、本分野を長期的に見るプログラムディレクター（PD）を配置しなければならない。次に赤で囲んだ部分として、大学あるいは研究機関を拠点とし、風洞プラットフォームやデータベースの構築を含めて体系的に取り組む。この拠点は人材育成の役割も果たす。また風洞プラットフォームやデータベースという部分が、社会問題との接点、あるいは関連分野との接点を作っていかなければならないと考えている。また、海外との連携強化も必須だと考えており、このような体制についても本日議論できればと考えている。

海外での取り組み事例（米国 Johns Hopkins Turbulence Databases）

Johns Hopkins Turbulence Databases

Home Database Access Documentation Links Visualizations About

NOTICE: Sep-22-2020 Announcing a new dataset JHTDB now hosts 6 snapshots of a 8192³ DNS of forced isotropic turbulence, generated by Dr. PK. Yeung and his team. Five snapshots are at Re_λ = 1,300 while one snapshot is at Re_λ = 610, highly resolved with k_{max} = 5.3. See "Documentation" for "Dataset description" (note: for the time being, access via output is limited to subscribers up to 1024). Servers are functioning normally. For past announcements, please click here.

Welcome to the Johns Hopkins Turbulence Database (JHTDB) site

This website is a portal to an Open Numerical Turbulence Laboratory that enables access to multi-Terabyte turbulence databases. The data reside on several nodes and disks on our database cluster computers and are stored in small 3D subcubes. Positions are indexed using a Z-curve for efficient access.

Access to the data is facilitated by a Web services interface that permits numerical experiments to be run across the Internet. We offer C, Fortran and Matlab interfaces layered above Web services so that scientists can use familiar programming tools on their client platforms. Calls to fetch subsets of the data can be made directly from within a program being executed on the client's platform. Stream queries for data at individual points and times via web-browser are also supported. Evaluation of velocity and pressure at arbitrary points and time is supported using interpolations executed on the database nodes. Spatial differentiation using various order approximations (up to 8th order) and filtering are also supported (for details, see documentation page). Particle tracking can be performed both forward and backward in time using a second order accurate Runge-Kutta integration scheme. Subsets of the data can be downloaded in h5 file format using the data output service.

To date the Web-services-accessible databases contain turbulent flow in incompressible fluid in 3D (100 Terabyte), a DNS of forced, fully developed

出典：Johns Hopkins Turbulence Databases Webページ

- ✓ Johns Hopkins大学で公開されているTurbulence Databaseでは、あらゆる時刻、場所の流れのデータが自由にダウンロードできる環境を提供している。
- ✓ MATLABなどのプログラムからデータベースの流れ場の情報をダウンロードして、様々なデータ解析を行うことが可能となっている。（非圧縮性流体の等方性乱流DNS、非圧縮性磁気流体DNSなどのデータセットが格納）
- ✓ 実施体制：Johns Hopkins大学乱流研究グループが中心、教授6名、博士課程学生3名、ポストドク2名、テクニカルスタッフ3名（機械工学、宇宙物理、応用数学、コンピュータ科学）
- ✓ NSFから支援を受けている。
- ✓ 2020年9月22日に新しいデータセットを追加公開。（8192³点の等方性乱流のDNSの6つのスナップショット）

© 2020 CRDS | 6

図2-13 海外での取り組み事例③

2 開催挨拶・趣旨説明

5. 研究開発の推進方法および時間軸

5.1 研究開発の推進方法 ★本日の論点

- プログラムディレクター（PD）の配置
- 大学・研究機関と風洞プラットフォーム（PF）とデータベース（DB）を中心とした流体拠点と各大学・学会・産業界とのネットワークの形成、拠点における人材育成
- 社会問題との接点、関連分野との接点を意識した拠点運営
- 海外との連携強化

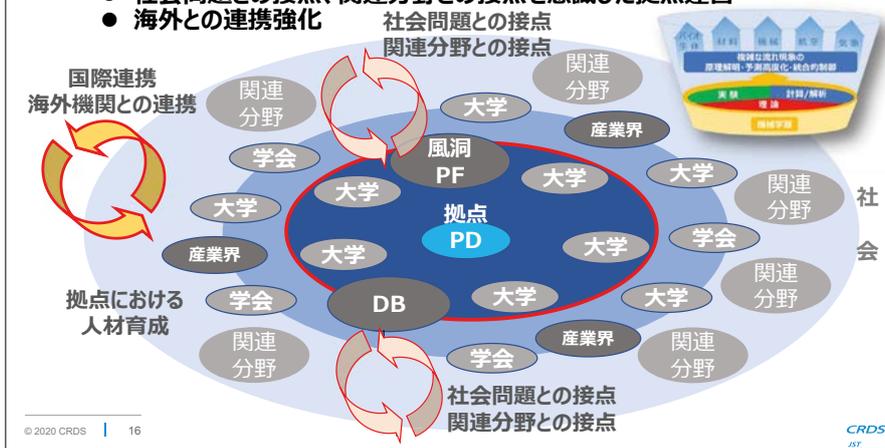


図2-14 研究開発の推進方法

研究開発の時間軸（図2-15）としては、なるべく長い期間、例えば10年や20年というスパンで実施しなければならない。人材育成やデータベースを柱にしなが、幾つかのテーマを本日抽出したい。

以上が、我々としてのまとめの方向性の説明となった。本日、第1部と第2部と分けて、いろいろな先生方から話題提供、コメントいただきたい。最後に総合討論の時間を設けているが、多くの方に御発言いただけるように御協力いただきたい。

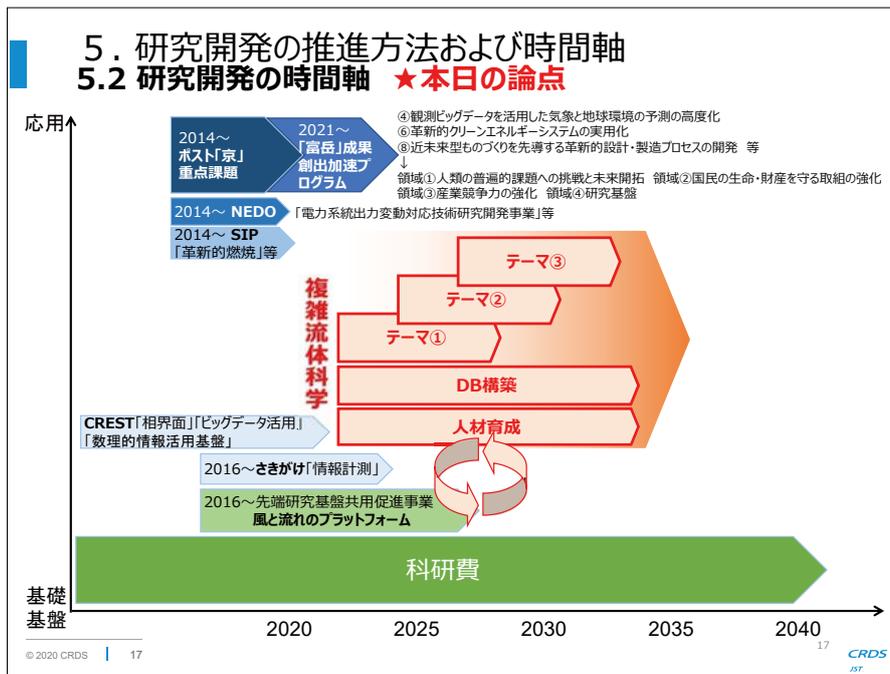


図 2-15 研究開発の時間軸

3 | 第一部

3.1 「複雑な流れ現象」俯瞰の試みと展開：反応性流体

丸田 薫（東北大学流体科学研究所 所長・教授）

「複雑な流れ現象」について、流体力学、流体工学のイメージから少し枠を拡げ大きく考えると、あらゆる熱と物質の輸送が対象になると考えられる。これに化学反応を含めると核反応以外の森羅万象を包含する概念になる。したがっていくつかの科学先進国で、流体の工学・科学を工学の中心に位置づけ、多くの分野を含む全体像の俯瞰を図っていることが理解できる。

この全体像を「見える化」できないか、論理構造を考察できないか、という観点で試みに3軸に「空間スケール・圧力 (P)・温度 (T)」を取った例 (図3-1-1) を考えてみた。空間スケール以外の2軸への配分の出来は良くない。圧力や温度の他に、数学との関わりとして方程式の種類やツールなども併記してはみたが、満足なものにはならなかった。

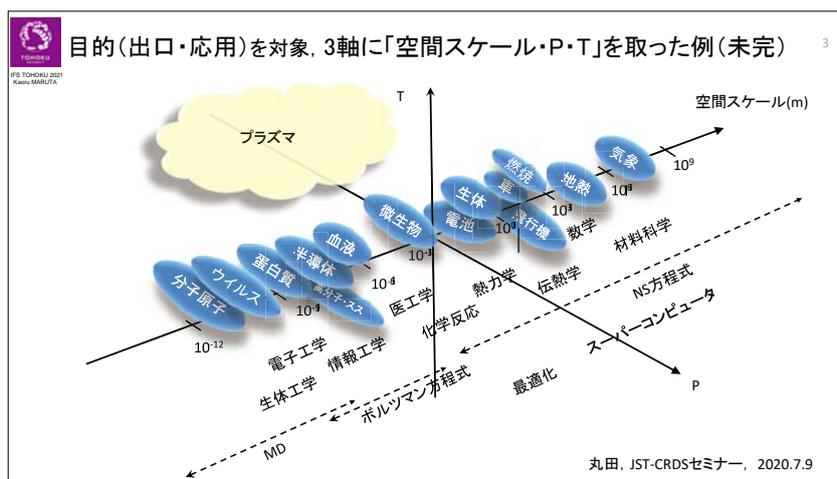


図3-1-1 目的を対象、3軸に「空間スケール・P・T」を取った例

そこで視点を変え、次の図3-1-2では、ある特定の研究分野の構造の「見える化」を試みている。分野を一つ取り出して考えると、その中も入れ子になっていて、実験と数値計算、そして理論解析などがある。こうした特定の分野とは、大きく捉えるならば航空宇宙推進、エネルギー、医工学などが該当するであろうし、もう少し小さく捉えるならば、材料、燃焼、制御等々が該当する。無論、さらなる個別の概念にも用いることが出来るであろう。

私自身の専門分野に近い、ガスタービンやロケットを含む航空宇宙推進についてフランスの例を挙げる。図3-1-3の右下の図の中央に、AVBP、YALE2と書かれている。これは反応流に関するフランスの数値計算コードの名称である。20年以上にわたり、継続してアップデートする専門の研究グループが配置され、国から研究費が投入され、長きに渡って世界最高水準を保っている。加えてこの分野に関わる企業や国の機関、出口に近い産の各機関が実機開発に際してコードを使い、コード改良のためのフィードバックも継続的になされ、ますます全体の水準があがっていく。このようなエコシステムに対してファンディング機関（フランス国内、

3
第一部

EU全体) から研究費のサポートが中長期的に継続され、航空機エンジンやロケット等、先端技術の継続した創出に上手く繋がっている。この中には人材育成も含まれており、まさに産官学全体を含む、win-winのエコシステムが機能している。

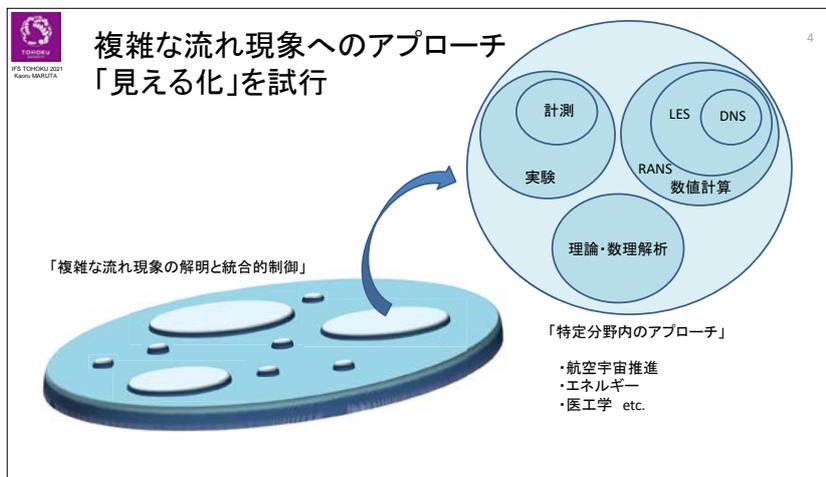


図3-1-2 複雑な流れ現象へのアプローチ「見える化」を試行

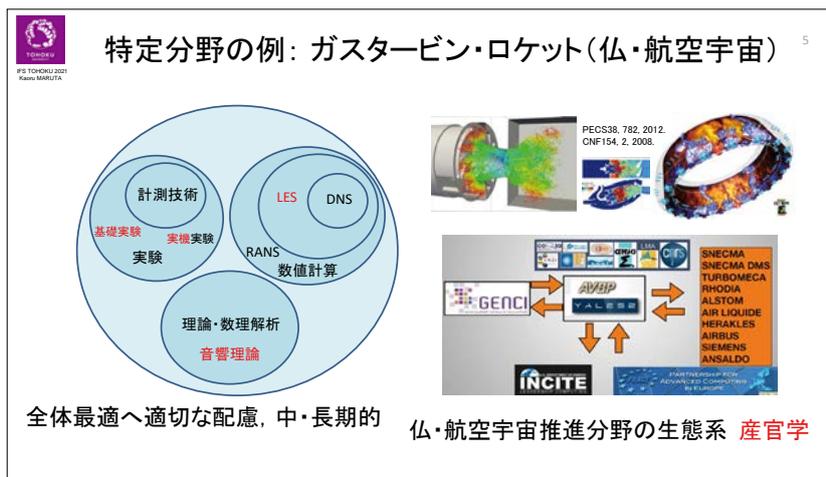


図3-1-3 特定分野の例：ガスタービン・ロケット（仏・航空宇宙）

ガスタービンやロケットの高性能化には音響・反応連成への理解が必須である。しかし圧縮性の反応性流体を含む全て、特に音響まで含めて解くことは現象の複雑さ、計算量の両面で難しい。しかしここにも十分に配慮がなされており、LESと音響解析を組み合わせる工夫がされている。

一方、我が国での良い例として、図3-1-4に示すSIP革新的燃焼技術¹が挙げられる。事業開始時には難しかった研究者間の意思疎通が、時間と共に好転した。特に最終段階では、柔軟な管理体制がよく機能し、エンジン実験や基礎実験、数値解析や理論が有機的に統合された。5年間という期間、また人的資源の再配置についてある程度学側からの意見が反映できたことで、日本の強みである具体研究の強みも活用された。基礎を担当する学から、出口を見据えた産までが繋がったため、運営を含め好循環を生んだことが功を奏し

1 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的燃焼技術、<https://www.jst.go.jp/sip/k01.html>(2021年3月1日アクセス)

たといえるであろう。

あら探しをすると、やはり基礎研究側は部分最適化に流されがちで、産側は原理原則はさておき結果を急ぐ傾向にあるので、両者の摺り合わせには一般に時間が掛かる。ものづくりの現場で重んじられる現物合わせ、スケジュール重視の文化と、スケーリングや一般性を重視する、流体基礎研究者の文化の違いが、その遠因ではないだろうか。

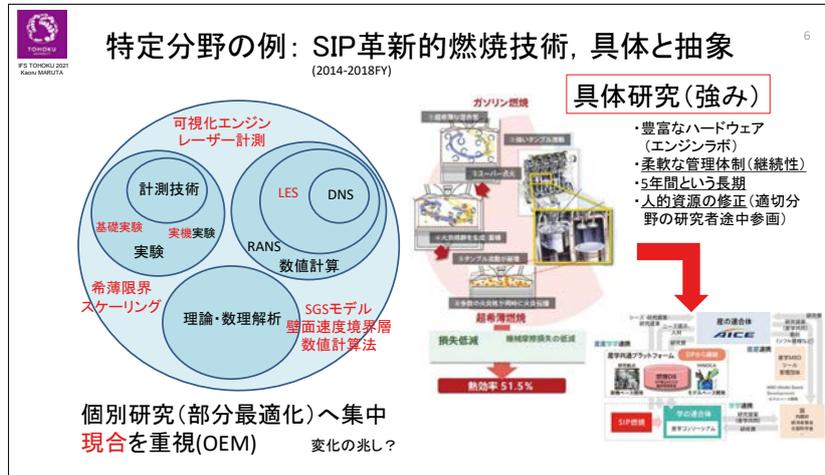


図3-1-4 特定分野の例: SIP革新的燃焼技術、具体と抽象

個別装置の特定条件を対象とする具体的な研究に加え、スケーリングや、流体に共通するいわゆる次元数を使ったような方法、一般化・抽象研究を組み合わせることは有効である。SIP革新燃焼プロジェクトでは、SI燃焼の中核技術であるリーンバーン現象と基礎現象、つまり乱流場での着火とが、等価の現象と見なせることがスケーリングに基づき仮説として提示された。この仮説はその後、各種の高度な流体計測、画像計測などによるエビデンスにより裏付けられ、SIP後継研究でも力が注がれた結果、2020年末の段階で53%を超える熱効率達成に寄与している。

具体と抽象²とを両用して物事を進めることは、風洞実験におけるレイノルズ数、燃焼研究と火災研究の対比などにも類似性が見られる。火災はスケールが大きいため、小規模火災を対象とする基礎研究スケールでのアプローチができず、理論解析に頼る傾向がある。両者の強みを活用することは、対象が変わっても有効と考えられる。図3-1-5は、具体的なアプローチと抽象的なアプローチとが併用される様子を図に表す試みである。抽象のキーワードには、アナロジー、創発的思考、セレンディピティ、水平思考といった語が挙げられよう。

アナロジーの例という、例えば火災伝播の支配方程式がある。体内のがん細胞の転移や、国を超えた感染症の伝播の支配方程式も非常に似ている。ロシアにおける国際会議の中、露仏デーと呼ばれる催事があった。そこで仏CNRSの研究ダイレクターが、創発を生むためのセレンディピティーは人為的に起こせるのか否かという課題で講演を行った。明らかに抽象思考を意識していることが感じられ、非常に興味深かった。

図3-1-5よりも広い範囲の戦略設定では、個々の構造が組み合わせられ、さらに複雑な大規模構造に繋がっていくはずである。例えば図3-1-6のように、ある水準や階層で具体的であったものが、ある種の抽象化を伴い、上位の概念や階層に統合されるのが良いのではないかと考えている。

2 細谷功氏による同名、または類似タイトルの著書が複数ある。

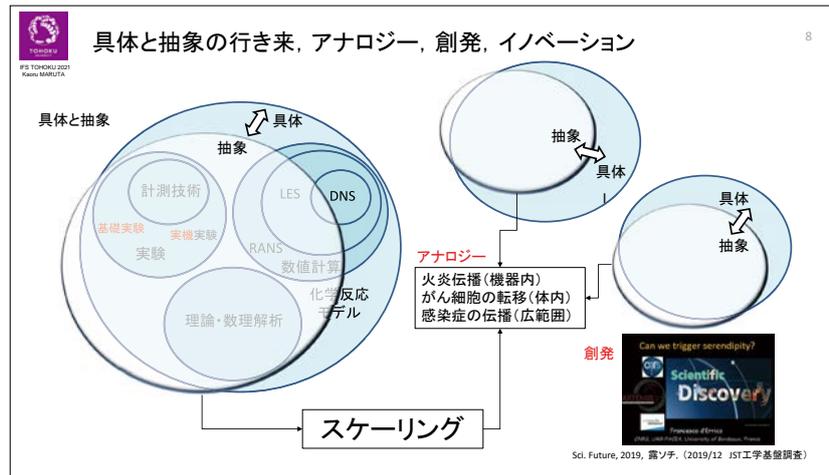


図3-1-5 具体と抽象の行き来、アナロジー、創発、イノベーション

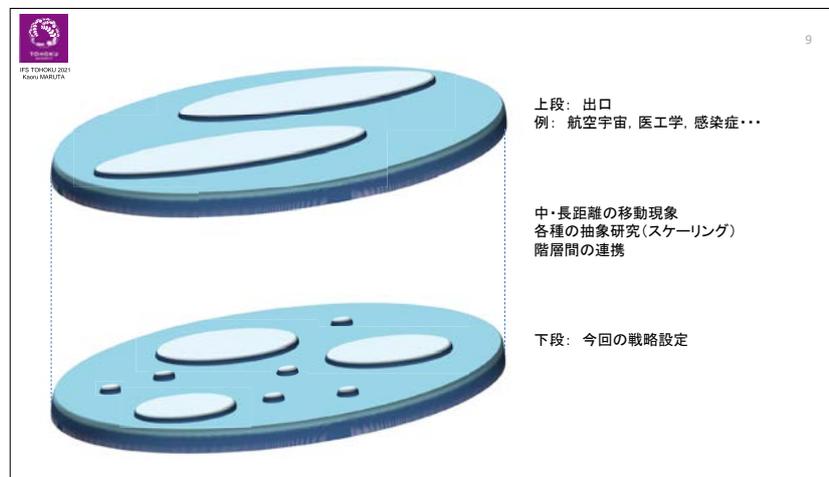


図3-1-6 具体と抽象の行き来

先に挙げたSIP革新燃焼プロジェクトの例で良い点を挙げたが、組織が国際的でないことについて海外の研究者から、なぜ日本人だけでやるのかと指摘された。国際性の観点でみた好例として、米国の一連のPAC (Plasma Assisted Combustion) プロジェクトがある。米MURI (Multidisciplinary University Research Initiative) プログラムから始まり、いくつかの異なるファンディングを経て進んだが、Air Forceのプログラムオフィサーが配置されていた。特に特徴的であったのは、共同研究プログラムの中にロシアの研究者が参加していたことである。プラズマ研究は伝統的にロシアが強いとはいえ、ロシアの研究者にアメリカのAir Forceが研究費を出しているということ自体、PACの潜在的な応用分野を考慮すると、大きな驚きであった。最高水準の科学を求める姿勢が徹底しており、最高水準のメンバーが文字通り世界から集められた例である。そのため若手研究者にとっても最高の学びと飛躍の舞台になっており、この場で活躍した若手研究者は、現在もうすでにその分野で世界的に知られるようになっている。

改めて日本での物事の進め方を振り返ると、具体研究には非常に強いと感じる。ロジカルに進めることに長じており、時間はかかってもこれまで大きな成果につながってきたのではないかと対になる「抽象」思考については、(ロジカル思考の対義語として) ラテラル思考という言い方もするようである。直感やひらめきなど、そういったものが含まれる。

話はそれるが、日本では文献の被引用数が低いことが指摘されている。この原因として、日本人が書く論文

における参考文献の数が少ない、すなわち文献を丁寧に当たっていないということが一部で指摘されている。これが遠因となって、多くの研究者に認知されにくくなり、ひいては被引用数の増加につながらないのだという。反対に、誰かが既に知っていることは改めて研究しなくていいよねという傾向が、欧米では非常に徹底している。先端研究では、どこまでが既知（他者の成果）で、どこから新しいか（自己の成果）の仕分について非常に厳しい。先行文献を引用しないとしばしば研究者間に衝突が起こる。日本では近年、和を尊ぶ風潮もあって、こうした激しい議論をする様子にはあまりお目に掛からない気がする。

関連して日本では、限りなく具体論を推し進める傾向があるのではないかと。これは場合により自分の研究しか引用しない論文につながる。話しの飛躍がすぎるかもしれないが、近年外国人旅行者を引きつけてきた多様な雑貨や土産物に、江戸時代の倭約令に際して裏地に懲りまくった着物に、日本的な傾向が感じられると言ったら言い過ぎであろうか（図3-1-7）。

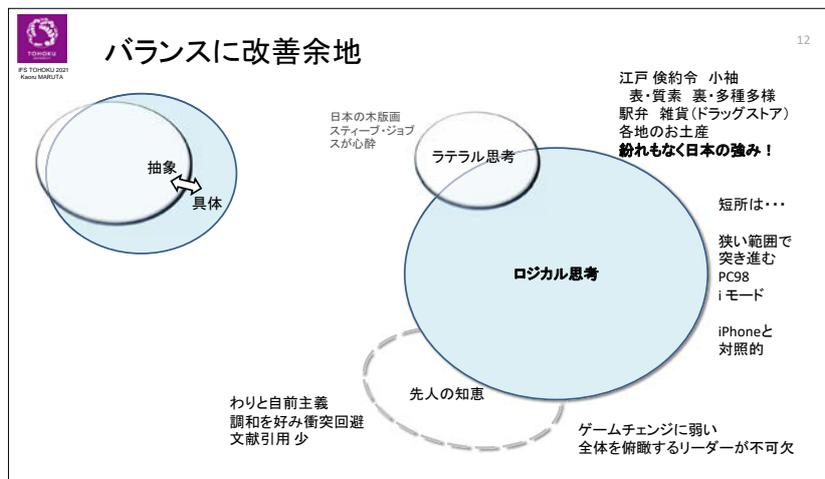


図3-1-7 バランスに改善余地

研究要素	日・個別研究	SIP革新燃焼	仏・GT	米・PAC	
実験研究		◎	○	◎	日本に強みアリ
大規模数値計算	どれか一つ or 二つ	△	◎	○	環境はある(既得権益)
理論研究		○	◎	◎	目利きが良ければ...
スケールリング	x	○	◎	◎	日本人の特性(弱い?)
運営要素					
研究統括者(PD)	x	○	?	◎	必須
期間	一般に短	○	◎	◎	中~長期がbetter
組織(横断的?)	一般に小	○国内のみ	◎産官学	◎	分野を横断, 柔軟に修正
組織(国際的?)	x	x	○	◎	国際性は必須

日本人の特性(強みも弱みも)

- 縦割り(部分最適化*)
- 前例踏襲型
- 謙虚, 和を尊ぶ(美德)
- 衝突回避: 徹底的な議論をしない

数値計算ドメイン(エンジン)

プラズマアシスト燃焼(米MURI)

- Air Force のPO
- 世界から最高メンバー招集 (AFプロジェクトに露研究者) (セキュリティ・クリアランス)
- 大局最適化
- 最高の人材育成の場

*木村昌史 日本企業は「勝手にやっている現場の集合体...」日経X-TECH, 2020/11/16
https://tech.nikkei.com/doc/tech/column/18/00148/111300146/111_c01-nisprint_mied_f1wth

図3-1-8 国際的な比較

【質疑応答】

Q：具体と抽象を行ったり来たりというところで、やはり日本人は抽象的な部分が非常に苦手かと思う。ここに何らかのプロジェクトができたと思うが、スケールリングのような抽象的テーマを設定することは可能か。

A : 先のアメリカのプログラムオフィサーの例のように、関係研究者と徹底的に議論を継続できるような仕組みを設けることに意を払えば、うまく機能するプロジェクトが実現できるのでは無いかと思う。何となく色々なことが縦割りになっている、あまりよそ様のことには口を出さないという日本人の美徳のようなものが、横断的な物事の進め方の邪魔をしている可能性がありやっかいではあるが。プロジェクト設定の方法について、具体的なアイデアはないが、やはりプログラムディレクターを立てる、あるいは、必ず数理解析の研究者を入れるなどがある。

なお残念ながら流体分野では世界的にも数理科学が弱くなってきているように思う。(アメリカは数値計算に移行し、伝統的に理論解析が強かったロシアでもそろそろ絶滅危惧種になってきている。) 数理科学や解析に強い研究者をグループに入れること、それから、やはり分野に限らず、(当該分野で実績のある) 外国人の判断や意見が反映される仕組みを設けておくことがよいと感じている。科研費にもこうした仕組みは無い。国内の各省庁が発する各種の研究費にも一般にはこうした仕組みはないように思われる。一方で結果だけ、国際共著論文の増加を欲するのは片手落ちでは無いだろうか。

Q : 国際性は必須との点について (図3-1-8)、何かこのようなプロジェクトを国として進めていったらよい、というようなことがあればコメントいただきたい。

A : 私は人ではないかと思う。各専門分野で国際的に著名な (できれば外国の研究機関の) 研究者を含めた研究体制づくりが望ましい。割とばっさりやらないと、難しいと思われる。日本的な「具体」の強さについては、他国からの視線には未だ尊敬は残っており、日本が内向きを打破した先には、その強みがさらに磨かれる機会があるように思う。

3.2 “複雑流れ”の解明～今、挑戦すべき課題～

後藤 晋（大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）

私は流体物理の出身であるが、冒頭のご挨拶にもあったように、最近基礎科学が軽視されており、この状態が続くと、この先ボディーブローのように効いてくるのではないかなと大変危惧している。このような機会をきっかけにして、少しずつ盛り返していきたいと考える。

“複雑流れ”は2つに分けて考えることができる。1つ目は、流体自身は単純であるが流れが複雑な場合である。2つ目は、流体自身が複雑なものである。

1つ目の流体自身は単純であるが流れが複雑な場合の典型例は乱流であり、伝統的に多くの研究がされてきた。最近の傾向としては、図3-2-1に示すように非常に大きなシミュレーションが行われるようになってきており、転機であると考えている。

2つ目の流体自身が複雑な場合における典型的な例としては、混相流や非ニュートン流体、粉体などが挙げられる。こちらも実験が先導していた状況から数値計算の力が徐々に増している。

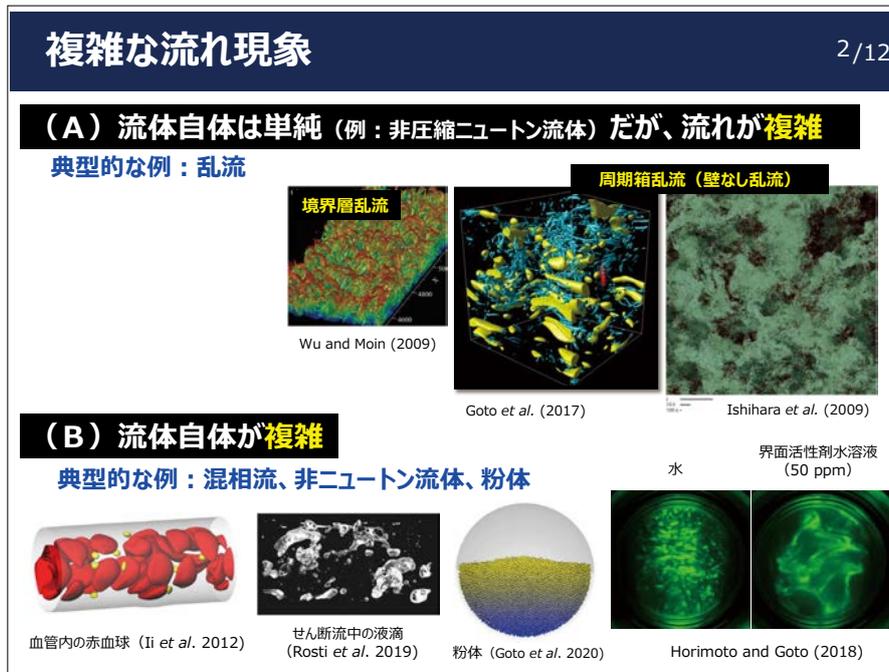


図3-2-1 複雑な流れ現象

まず、乱流において、「十分に発達した乱流」の定義を明確にしておく必要がある。DimotakisのJournal of Fluid Mechanicsの2000年の論文³では、レイノルズ数(Re)が2500の場合と1万の場合の写真(図3-2-2)が載っており、レイノルズ数1万の状態を発達した乱流と呼んでいる。レイノルズ数が大きくなると非線形性が強くなり、レイノルズ数2万ぐらい、テイラー長レイノルズ数(Re_λ)では140ぐらいを境に、十分

3 Paul E. Dimotakis, “The mixing transition in turbulent flows”, J. Fluid Mech., Volume 409 (2000), pp.69 – 98, doi:10.1017/S0022112099007946

に発達した乱流ができる。つまり、最大長と最小長が十分にスケール分離して、自己相似なフラクタル的な乱流ができると報告している。典型的な10cmのノズルから10cm/秒で水を流す場合、レイノルズ数は約1万であり、我々の感覚とも合っている。

R_λ が140を超えた十分に発達した乱流については、わが国においても、石原らによって前世紀の頭に既に数値シミュレーションが行われているが、これは壁がない場合であり、壁がある現実的な乱流の場合には、まだ容易ではない。最近、我々が実施した平面上の乱流境界層の直接数値計算の結果を図3-2-2に示すが、領域を2つに分割するなどかなり工夫して、初めて R_λ が100でのシミュレーションができるようになった。つまり、壁を伴う乱流に関しては、十分に発達した乱流が、我々が使えるノード数で今ようやく数値シミュレーションが可能になったところである。この意味で、乱流の問題は、今がまさに旬だと言える。

乱流研究の転機 (1/2) 4/12

十分に発達した乱流とは？

混合遷移 (Dimotakis 2000) →

レイノルズ数 ($Re > 20000$, $Re_\lambda > 140$) ではじめて十分に発達した乱流 (最大長 ≧ 最小長 : スケール分離 : 自己相似性 = フラクタル) 、つまり、乱流らしい乱流が実現される。

【例】 直径 $D = 10$ cm のノズルから $U = 10$ cm/s で水 (動粘性係数 $\nu = 10^{-6}$ m²/s) を放出 :

$$Re = \frac{DU}{\nu} = 10^4$$

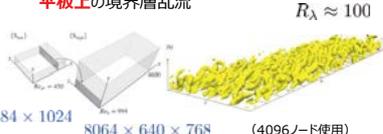
京を用いた数値シミュレーション例

① Ishihara et al. (2016)
周期境界条件 (壁なし乱流)

Run	Initial field	$Re/10^4$	R_λ
2048-1*	1024-1*	1.61	732
4096-2*	2048-2*	1.37	675
4096-1*	2048-1*	3.65	1131
6144-1	4096-1*	6.35	1423
8192-1	4096-1*	8.97	1747
12288-1	8192-1*	15.4	2297

格子点数 ↑ 12288³ → 混合遷移をゆうに超える。しかし現実の乱流には境界がある。

② Motoori & Goto (2020)
平板上の境界層乱流



$R_\lambda \approx 100$

2048 × 384 × 1024 8064 × 640 × 768 (4096ノード使用)

→ ようやく**本当の乱流**が (スパコンを使えば比較的容易に) シミュレートできるようになった。

∴ 今後、5年間で挑戦すべき課題 ただし、「シミュレーションできるからやる」というだけではない。

図3-2-2 乱流研究の転機 (1/2)

また、乱流には普遍性があることも重要な点である。図3-2-3中のグラフの右端、高波数領域、つまり小スケール領域では普遍関数形が見られる。レイノルズ数が大きい領域で5/3乗則が観察されるが、このとき、まさに構造の階層が現れる。Dimotakisの R_λ が140とは、この普遍性が現れるぎりぎりのレイノルズ数を意味する。様々な境界条件下の流れに対して、このような十分に発達した乱流の数値シミュレーションができるようになってきており、今まさにそういう時代だと言える。

ところで、乱流研究の目標は、この小スケール、高波数側の普遍性に立脚し、モデル化することによって、より複雑な問題にチャレンジするための基盤をつくることである。しかし、この問題を、運動方程式に立脚して演繹的な方法で取り組もうとするのは非常に難しく、これまでのところ、完璧なモデルはない。しかし、数値計算ができるようになり普遍性を持つデータが掌に乗ったことで、データ駆動型の研究の可能性が出てきたと考える。逆に言うと、どんどんデータが出てくるので、もうあと5年もすれば、この問題がある意味では解決してしまうかもしれないと思う。

したがって、もう一つの複雑な流体についてもチャレンジしたいと考えている。

複雑流体はありふれている。つまり、混相流、非ニュートン流体、粘弾性流体の問題は身の回りにもたくさんある。化学工学の研究室でも似たような現象に取り組んでいるが、応用オリエンテッドであり、実験則でも

いいから現象を理解できればよいという立場の研究が多いようである。一方で、物理学の研究室では、現象そのものが面白いために多くの取り組みが行われている。ところが、この間に接点がない。今こそ、融合研究をしたら、様々なことが進むのではないかという感触がある。

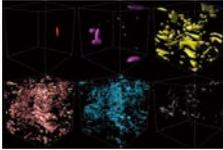
乱流研究の転機 (2/2) 5/12

発達した乱流 → 小スケールの普遍性

種々の乱流のエネルギースペクトル →

- グラフの右端 (高波数=小スケール領域) で**普遍関数形**
- 実験 (巨大Re) → -5/3乗則 (渦の階層のフラクタル)
- $Re_\lambda = 100$ → これが見えるぎりぎり (混合遷移の意味)

Goto et al (2017)
周期箱乱流中の渦の階層 →



乱流研究の目標

この**小スケールの普遍性**に立脚し、**普遍領域をモデル化する**。(巨大Re乱流の数値シミュレーション/制御/最適化の簡便化/高速化につながる。)

しかし、運動方程式 (ナビエ-ストークス方程式) に基づく**演繹的手法**は、非常に単純な場合を除けば、**ほとんど成功していない**と言ってもよい。

データ駆動型研究の可能性

幸い (前頁で示したように) 数値シミュレーションが可能となり**普遍性をもつデータが掌にのった**

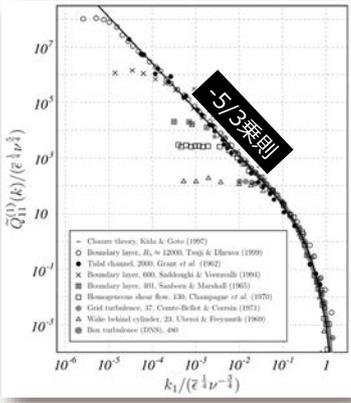


図3-2-3 乱流研究の転機 (2/2)

複雑流体 7/12

複雑流体はありふれている

- ◆ 身のまわりのほとんどは「混相流」であるか、
→ 多くの流れには、**界面がある/混合物を含む...**
- ◆ 複雑なレオロジー (流動特性) をもつ。
→ **粘弾性/非ニュートン粘性/降伏...**

これまで

各応用分野で、その**必要性から研究**されてきた (応用的知見) → **今こそ融合研究**
あるいは、**現象の面白さから研究**されてきた (科学的知見)

具体的な研究目標

- 構成則の構築が具体的な目標。
- 複雑流体の簡便な数値シミュレーションが可能となる。
- **科学的に重要**であるだけでなく、**応用上のインパクトも大**。

研究手法

- ミクロシミュレーション [MD (分子動力学) やDEM (離散要素法)] からの積み上げ
- **データはそこにある**: 乱流モデルの構築と本質的な類似性

データ駆動型研究の可能性

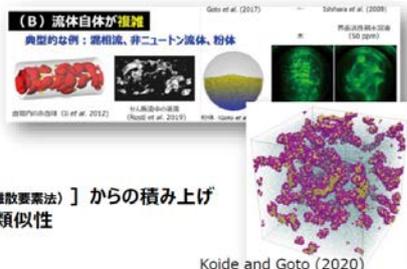


図3-2-4 複雑流体

具体的な研究目標はいろいろあるが、構成則の構築が具体的な目標のひとつだと考えている。混相流のかなり複雑な計算、シミュレーションが最近できるようになった理由は、簡単な数値シミュレーション手法ができたからであり、構成則を使ったオイラー的な手法が発達してきたからである。構成則できれば、科学的に重要であるだけでなく、応用上の、今までは実験則で頑張ってきた分野にもインパクトが大きいと考える。

研究手法としてはマイクロシミュレーションが適している。分子動力学や離散要素法（DEM）を使った計算によって、データはたくさんある。しかし、構成則はない。乱流モデルの場合と非常によく似ている状況である。

機械学習の果たす役割は、複雑な流れ、乱流、複雑流体で同じである。マイクロシミュレーション、数値計算によって、豊富なデータがある。実際の問題を解く際には、小さなスケールの渦はあまり問題ではなく、大きなスケールのデータが必要になる。その場合に、何らかの意味でのデータ縮約、情報縮約というか、モデル化、構成則の構築が必要になる。乱流で言えば、乱流モデルであり、複雑流体で言えば、文字どおり構成則であるが、それを使ってマクロなシミュレーションができるようにすることは非常に重要である。今までも、それぞれの分野において理論体系が地道につくられているが、一つ飛び越えて、データ駆動型の研究があるのではないかと考えている。

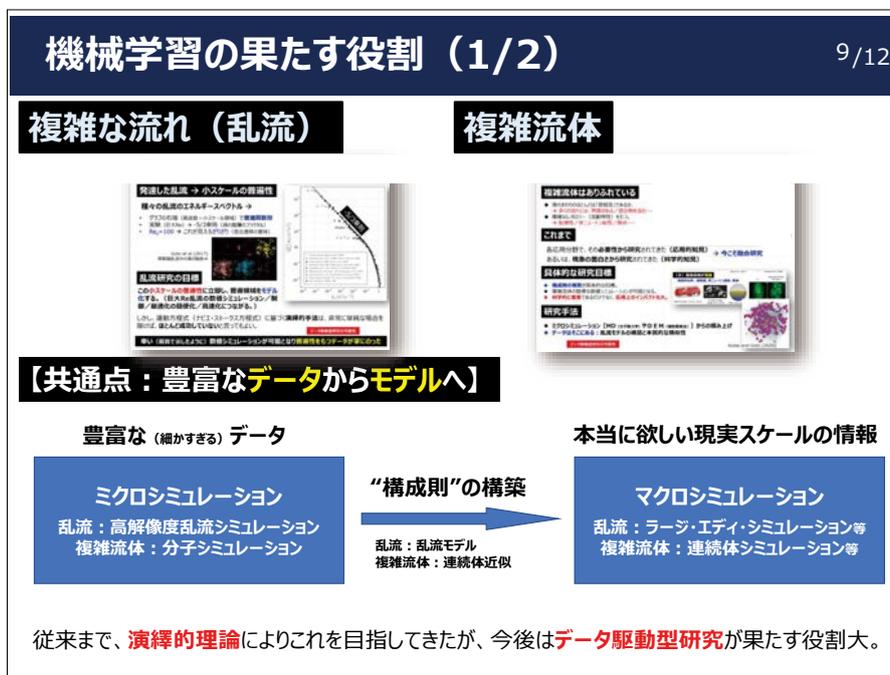


図3-2-5 機械学習の果たす役割 (1/2)

我々も、機械学習をこの2年ほど検討してきた。機械学習は内挿はできるが、外挿はなかなかできないという弱点がある。しかし幸いなことに、乱流は外挿が可能である。例えば、小さなレイノルズ数のデータを使って大きなレイノルズ数の乱流統計を予測する必要がある、つまり外挿が必要になる。乱流ではこれができる。乱流にはエネルギーカスケードという現象があり、情報が大きなスケールから小さなスケールに伝わる。つまり、小さなスケールの現象をモデル化したいと思ったときに、大きなスケールの情報を使うことができる。この情報が伝わるという性質のため、ここのモデル化というのは原理的には容易だといえる。

また、乱流には普遍性があるので、小さなレイノルズ数のデータを使って学習した結果を、高いレイノルズ数の結果に外挿することができる。これは、闇雲に外挿したのではなく、普遍性があるから可能なのである。実際に検討してみると、かなりうまく予想できる。また、実際の現象を理解することと機械学習の成功は両輪で進むものであり、機械学習をやることによって、現象がさらに理解できるということも多いと感じている。

図3-2-7にまとめを示す。

機械学習の果たす役割 (2/2)
10/12

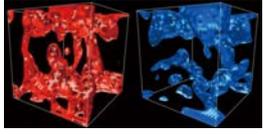
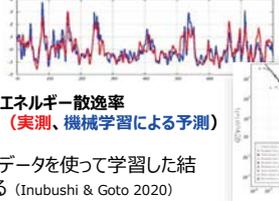
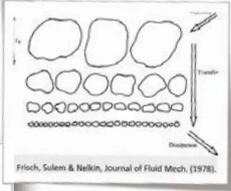
機械学習の弱点

機械学習は内挿は得意だが**外挿が苦手**

たとえば、乱流モデルの場合、小さな Re のデータを使って学習し、大きな Re の乱流統計を予測する必要がある（大丈夫か？）

乱流モデルと機械学習が相性がいい理由

- ◆ 3次元乱流であれば、“**エネルギーカスケード**”により大スケールから、小スケールに情報が伝達するために、小スケールの運動をモデル化しやすい

エネルギー散逸率
(実測、機械学習による予測)

- ◆ **普遍性**があるために、低 Re のデータを使って学習した結果を、高 Re の場に使いまわせる (Inubushi & Goto 2020)

現象の理解 (従来型研究) / 機械学習の成功は両輪で進むはず。

図3-2-6 機械学習の果たす役割 (2/2)

複雑な流れ現象の解明と統合的制御
12/12

【まとめ】

- ◆ **複雑さの原因**
流動状態のカオス (乱流) / 流体自身が複雑 / その複合
- ◆ **乱流研究の転機**
→ 高解像度計算による**データ蓄積**
- ◆ **複雑流体研究の転機**
→ 混相流はさまざまなシミュレーション手法の提案
→ MDやDEMによるマイクロシミュレーションによる**データ蓄積**
- ◆ いずれも、従来までは、**演繹的な理論によるモデル構築**を目指してきたが、強い**非線形性**がその確立を拒んできた。
- ◆ いずれも、今後数年間での、**データ駆動型理論によるモデル構築**への強い期待
→ しかし、闇雲にはできない。**それぞれの分野の専門家** (機械学会 / 流体力学会 / 化学工学会 / レオロジー学会 / 物理学会) と**応用数学者の協働**により、**現象の理解とモデル構築とが同時進行で進展**することが理想。

図3-2-7 複雑な流れ現象の解明と統合的制御

【質疑応答】

Q：「構成則の構築」のような共通目標を設定することで、乱流の研究グループと複雑流体の研究グループが相互作用を生み出して、例えば、プロジェクト化などが可能か。

A：乱流モデルの研究者は、その多くが、複雑流体で非ニュートン流体等のシミュレーションにも取り組んでいる。自分の手持ちのコードで、構成則の部分を乱流モデルの代わりに非ニュートン流体の構成則に置き換えればすれば使えるからある。その意味では、既に検討は始まっているが、本当に複雑流体を専門にしている先生と組んで研究したほうが、より効率がいいと思う。乱流のモデリングの経験がある先生方と、現場でリアルに非ニュートン流体あるいは複雑流体を扱っている人と組む、または別の方向から構成則をつくらうと目指している人たちと組むことによって発展が十分あり得ると考えている。

Q：図3-2-4に、「必要性からの研究」と「現象の面白さの研究」の融合の必要性が記載されているが、融合させるためのポイントや仕掛けはどんなことが考えられるか。

A：まず、人の交流。私自身心がけていることだが、化学工学の分野で今何が問題なのかをよく聞くようにしている。我々が持っている知識でどこまでできるのかを対話していかないことにはなかなか進まない。同じ問題を別のことから考えているケースは多い。まず、垣根を取り払い交流する場があれば進むと思う。流体力学の各分野では伝統的な縦割りの状況が続いており、相互の交流があまりなかったと思う。

Q：機械学習は外挿は一般に苦手だが、乱流に関してはエネルギーカスケードがあるので、外挿に強いというのは有用なメッセージである。いわゆる特徴量抽出や次元削減は非常に有効である。非線形の現象に関して、時間発展について難しいと考えていたが、乱流は、時間発展とについて機械学習は強力なツールになるという認識でよいか。

A：まさにそう考えている。使い方をうまくやれば、かなりの進展が見込めると思う。

3.3 複雑な流れ現象の解明と統合的制御に向けたクロス・プロジェクト

店橋 護 (東京工業大学工学院 教授)

複雑な流れの現象の解明と統合的制御に向けたクロス・プロジェクトについて講演する。

まず、クロスという言葉の意味を少し話する。文部科学省のリーディング大学院プログラム、博士教育プログラムに応募した時の資料から転用した (図3-3-1)。このような大きなプロジェクトを立案するときに、概念や目標や理念などが必要で、考えたことは2S×(クロス)3Eである。これは「掛ける」ではなく、「クロス」と読む。環境エネルギー分野は、非常に幅広い分野であり、材料も、太陽電池も、燃料電池もある。そういった全ての分野を俯瞰したプロジェクトであった。エネルギー、環境の問題は必ず3E(エネルギー、経済、環境)と言われる。震災後、日本としては安全という言葉が使われるようになり、Sを1個足した。それだけでは不足であろうとサステナビリティを付加した。ただ、エネルギー、環境の問題とサステナビリティや安全とは、全く次元の違う世界である。よい方向に導くためには、足し算、掛け算では無理である。我々は理工系であるため、外積に近いような考え方で全く別の方向へ持っていかなければ、良いプロジェクトにはならないだろうと考えた。そのため「クロス」というのはやや外積的な考え方をしようというものである。

クロス・プロジェクト? (足算でも掛算でもなく、..)

文部科学省リーディング大学院プログラム
環境エネルギー協創教育院
 - 産官学国際連携による自立解決型 2S × 3E 人材の育成 -

異分野協創教育プログラム
 全学45専攻中28専攻が参加
 【平成28年度教育改革以降】
 全学26コース中16コースが参加

産官学協創教育プログラム
 国内 30企業, 11政策機関等
 国外 18企業, 9政策機関等
 リーダーシップ → リーダーシップ力
 企業・政策機関へのインターンシップ → キャリアパス
 企業幹部による面談 → リーダーとしての資質評価・向上

国際連携協創教育プログラム
 海外プログラム担当者, 特任教授6名
 海外メンター20名
 環境エネルギー国際教育フォーラム
 42海外大学からの379名の博士課程学生が参加
 インターンシップ → コミュニケーション力
 国際教育フォーラム → 国際的リーダーシップ
 海外メンター制度 → 国際性の磨き

数少ないSS評価
 産業界からの要請
 ・異分野融合によるイノベーションが必要
 ・使命感、課題設定、解決力の養成
 ・教員から学生に与えずぎない

育てる能力
 ・高度な専門性
 ・複眼的視点からの権威力
 ・自立的課題設定・解決力
 ・国際的リーダーシップ力 兼備

図3-3-1 クロス・プロジェクト? (足算でも掛算でもなく..)

SIPの革新的燃焼技術は成功例 (図3-3-2) と考える。全体については先ほど丸田教授が講演されたため、開発したHINOCAという汎用のソフトウェア (エンジン用ソフトウェア) を説明する。これは元来は産業界が作りたいソフトウェアであった。ところが、応用的な研究をされている方が中心であった。例えばこのソフトで使用されているモデリングや、乱流が最重要であるが、流体のモデリングは全く考えずにソフトを組み上げることのみを考えられていた。歴史的に我々日本の乱流について、プログラムの中に使われるモデルが幾つかあるが、開発している研究者らが、実は日本でまだ現役で研究していることさえ知られていなかった。そのため研究者らを説得して同プログラムの中に参画していただき、目的意識を持ちながら再考していただいた。その結果、非常に短時間で新しいソフトウェアを構築できた。産産あるいは学学、あるいは基礎研究と開発研究、そして流体、伝熱、燃焼、こういった様々な分野の人たちをクロスさせて、目的意識を有して方向を見いだせたプログラムの例である。

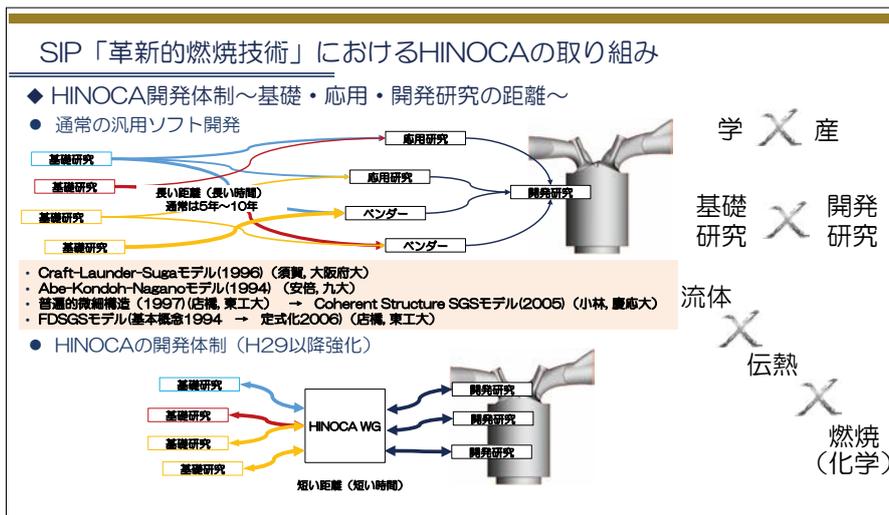


図3-3-2 SIP「革新的燃焼技術」におけるHINOCAの取り組み

他の例は日本燃焼学会の燃焼解析プラットフォーム構築である (図3-3-3)。SIPと同様に産業界、あるいは大学の研究者と非常に良いコラボレーションができた。ただ、これは解析プラットフォームであるので、数値的な研究かと捉えられるかもしれない。実はこの段階でも、日本の悪い部分かもしれないが、実験データ、ベースとなるデータを我々日本で持っていなかった。したがって、CFDと再度実験をしてデータを蓄積する必要がある。そのような概念があって行われた成功例のプロジェクトだったと考える。

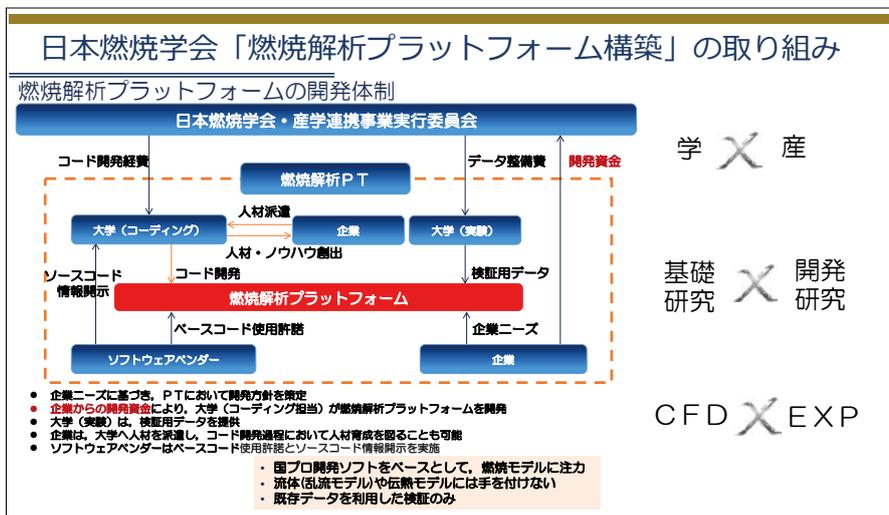


図3-3-3 日本燃焼学会「燃焼解析プラットフォーム構築」の取り組み

その次に、日本伝熱学会での特定推進研究を紹介する。これから先は一つ分野のみで新しい研究の方向性を見出すことは非常に難しいと考えられる。このテーマは未来型エネルギーシステムとエネルギーシステムに限定しているが、この中で乱流や燃焼を新しい方向に導くことを検討している委員会がある。ここでは、流体と伝熱と燃焼、あるいは化学といった研究者らがコラボレーションして、新しい方向性のあるプロジェクトにつなげる取り組みを行っている。もちろん、産業界にも御協力いただいている。実際に、AICEのプロジェクトやNEDOのプロジェクトへ徐々に繋がっている。方向性が明確にあることが重要であろうと考える。

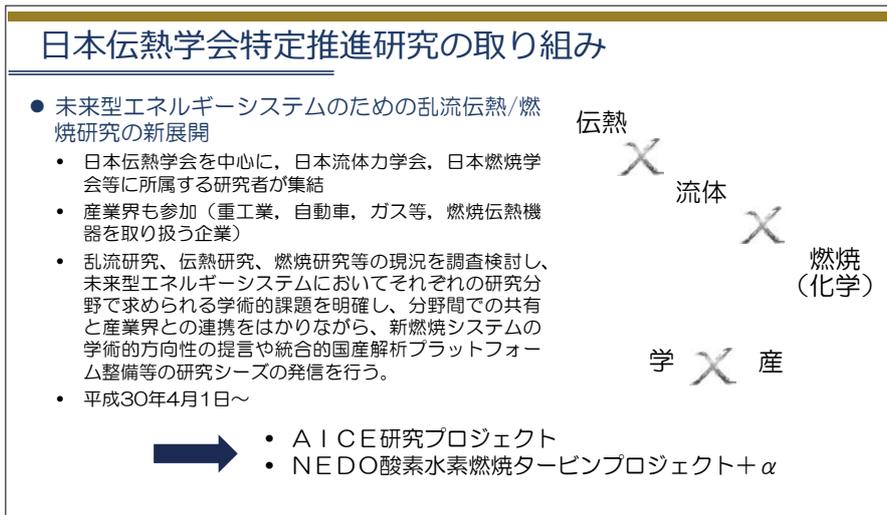


図 3-3-4 日本伝熱学会特定推進研究の取り組み

私自身は乱流の研究をしてきて、学生時からDNSを行っている。先ほど後藤教授が述べたように、コンピューターが高速化していく時代で、乱流とDNSという言葉に惹かれてこの世界に入った。1990年代に乱流のDNSができるようになった。私は乱流を研究する際に普遍性に留意している。一般的には等方性の乱流や壁面のせん断乱流や自由せん断乱流である。この中に乱流の普遍的なものが何かあるだろうと考えてきた。研究をしていて、今回の複雑な流れが乱流だとすれば、それに発展するものや関連するもの、例えば回転乱流や、MHD（Magnetohydrodynamics、電磁流体力学）乱流や、あるいは伝熱、抵抗、混相、混合、圧縮、騒音、燃焼が挙げられる。この広がりの中でどこでどういうクロスポイントを見つけられるかが、新しいプロジェクトを進めていく上で重要であろうと考えている。

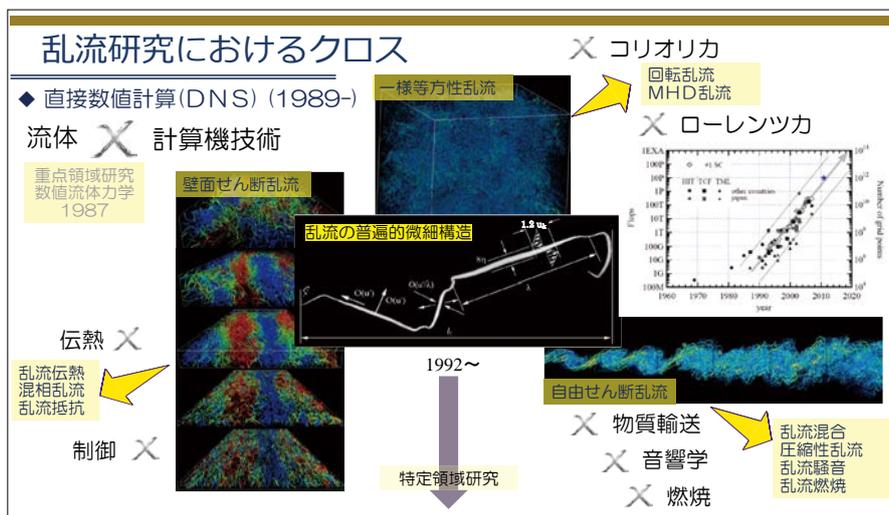


図 3-3-5 乱流研究におけるクロス

実際にこのテーマは1990年代に取り組んでおり、20代だった私が普遍的なものをという大抵受け入れられないのだが、非常に基礎的な研究をしている先生方から最初に評価をいただき、理解していただいたと思っている。

これらの研究は必ずプロジェクトとして作っていかねばならず、最終的には特定領域研究に発展させた

が、その間に幾度か失敗している。制御の部分についてはNEDOプロジェクトなどに発展させて研究を進めてきた。

先ほど丸田教授の講演にあったように、複雑な流れの中で例えば燃焼を含めると極めて複雑になる。これは燃焼反応自身が非線形であり、乱流も非線形であるためである。したがって進展が望めないのが2000年頃までの世界である。人類はコンピューター上に乱流燃焼現象はおそらく再現できないであろうと信じられていた頃だった。そのような中で私は世界で初めて乱流燃焼の3次元DNSを行った。図3-3-6は我々のラボの歴史の概要で、約20年で現実的な燃焼DNSに発展してきている。現在では世界中の研究者が乱流燃焼のDNSを研究ツールとして、一般的に使われるようになった。

重要な箇所は、伝熱との関係あるいは産との連携である。次第に産側が、これが意味があるものだと理解していただけたので、SIPに関連でき、こういう形で様々なところとクロスすることで研究が発達してきている。

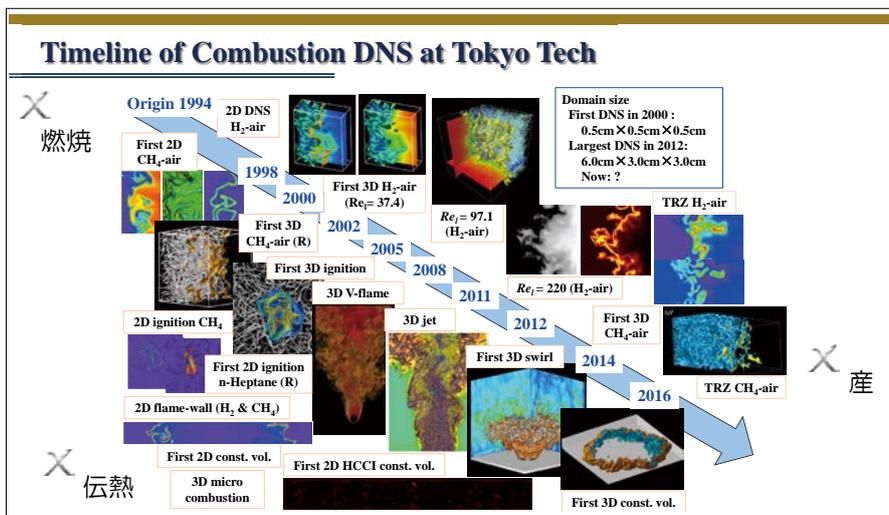


図3-3-6 Timeline of Combustion DNS at Tokyo Tech

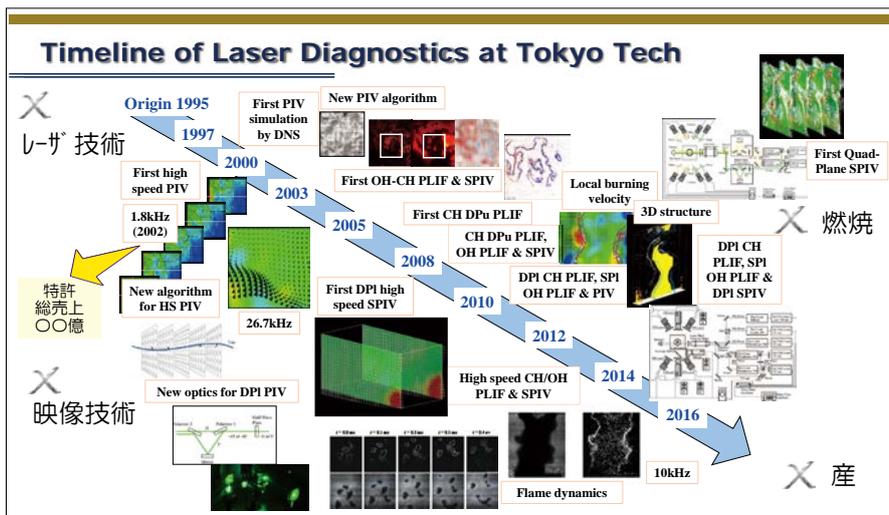


図3-3-7 Timeline of Laser Diagnostics at Tokyo Tech

そして私はDNSだけでなく計測も開始した。例えば、当時まとものできる計測方法がなかったため、全て自作した。現在高速のPIVがあるが、世界初でPIVを実施して論文発表せずに特許に出願した。また燃焼の

複雑なレーザー計測など、まず実験データがないと研究は前に進まないであろうため、このような研究をしてきた。

研究ベースで示している図3-3-8のように、多様なプロジェクトである方向性に向けて研究してきた。

複雑な流れ現象あるいは統合的という言葉が使用されているが、どこにクロスポイントを置くかが非常に重要であろうと考えている。いずれにしてもターゲットを明確に設定をして、かつ、その学術的な新規性を見いだせるような方向のチームの編成や、目的（ターゲット）の設定が非常に重要であろう。

もしそれがAIあるいは情報科学であったとすると、この使い方を我々が十分に吟味して研究することが望まれる。例えば、AIを使えば簡単にモデリングできること、今までの乱流モデルを簡単に代替できる場合、または直接使う場合である。あるいは、これまででは過去のモデルで全くモデリングとして成立しないものが、学習させるとそれなりの結果を出してくれることで、これは非常に良いことではある。

複雑な流れ現象の解明と統合的制御に向けて

- 「複雑な」の意味するところは?
- 「統合的」はどこまで統合的か?
- クロスポイントはどこか? X
- 明確なターゲットを設定できるか?
- 学術的新規性を見出せるか?

図3-3-8 複雑な流れ現象の解明と統合的制御に向けて

Machine learning assisted turbulent combustion modeling

- AIモデリング(直接+物理拘束)

乱流DNS
安部川・中澤・源・店橋・大阪・薬本、日本流体力学会年会2020

- AI(情報科学)

乱流燃焼DNS
中澤・源・志村・店橋、第57回燃焼シンポジウム2019

- AI支援モデリング(知の拘束)

FDSGS燃焼モデル (SGS燃焼モデルのベースモデルとしては国内唯一)
Yoshikawaら PCI(2013)等

乱流燃焼DNS
レーザ計測データ
GS火炎面に対する動的的手法により決定

Inner cutoffの相関式
 $\alpha = \frac{\epsilon_i}{\eta} = 8 \exp(C \frac{\delta_L}{\eta})$

南・源・志村・店橋、第34回数値流体力学シンポジウム、2020

図3-3-9 Machine learning assisted turbulent combustion modeling

ところが、先ほども外挿や内挿と指摘があったように、外れた場合の怖さを我々は知る必要がある。その際には、知の拘束を考慮したAIの支援モデリングが将来的には一つあるのではないかと考える。

これまで蓄積されてきた巨大なDNSデータやレーザーの計測結果を入れながら、簡潔に述べれば、過去の知でつくられてきたモデリングのパラメーターを学習で上手くやることで精度を向上させる。あるいは、拘束があるために全く違う外挿をしないというような拘束条件をつけていく（図3-3-9）。

燃焼器の燃焼振動では、制御の因子を抽出する際に、このAIを適切に用いるような使用法を考えることも重要である（図3-3-10）。

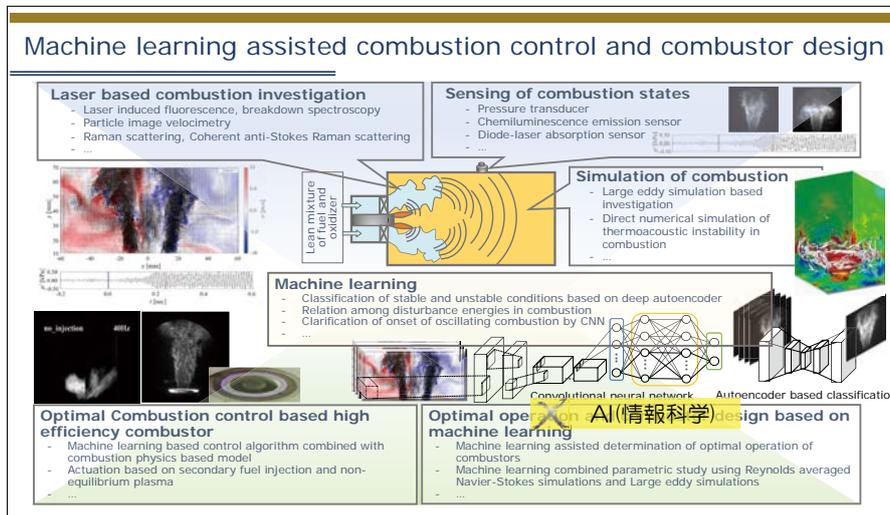


図3-3-10 Machine learning assisted turbulent combustion modeling

【質疑応答】

Q：クロスポイントというキーワードを紹介していただき非常に理解しやすかった。先ほどの後藤教授の話の流れからすれば、乱流と複雑流体というのは1つのクロスポイントと考えている。一方で、乱流単体を対象にすれば、講演の最後の辺りでAIとの接点が1つのクロスポイントとの言及があるが、それ以外のクロスポイントはあるだろうか。

A：先ほどのベクトルの幅がないとクロスさせても実は意味がなく、例えば流体を研究している人たちが、同じ方向だけを向いている人たちだけが集まって、AIで集まっても、実はさほど新規性は生まれてこないと考える。相手側がどうするか。AIでは、今はソフトも様々リリースされている。我々は情報科学の研究者と共に研究している。おそらく情報科学の研究者は別の方向を向いているであろうから、そういったクロスするポイントを得て、組織を適切に構築していく。さもなければ単に集合体になる。その点が最も重要だと考える。相手側の設定先、そして当方側も如何に尖鋭化されたベクトルを多く有するかが重要である。少し方向が違う研究者らを適切に結集して一つの方向に向けられるかが問題である。

Q：相手側も適切に巻き込んだ形でプロジェクトを提案していかなければならないと我々も考えている。そのときに共通するような学術的新規性、例えば流体と情報科学で学術的新規性を生み出すようなためには、プロジェクトにどのような工夫が必要だと考えるか。

A：難しい点である。その意味ではターゲットが必要と考える。多様な分野があり、例えば午後には各種分野の講演があるが、どの分野の何を向上するためなのかを明確にする。個別に明確なターゲットを設定すれば、シナジー効果が期待される。

3.4 トポロジカルデータ解析とその流体解析への応用

坂上 貴之（京都大学大学院理学研究科 教授）

私が現在研究している「トポロジカルデータ解析の流体解析への応用」というテーマで、今日は話題提供させてもらう。流体に関する部分は皆さんの専門で既に御存じのことも多いので、今回詳しくは話さない。まずは、データ科学に関係することとして、その問題点を少し挙げることから始める。

計算機の能力が向上し、多くの計測技術が開発されてきた結果、非常に多くのデータが現在取れるようになった。しかし、「それらのデータのどの情報に着目するか明らかでない」、「ノイズが非常に多い」、「データが少数しかない」などの理由で、データはあってもそこから有効な情報を抜き出せていないという問題がある。これに対して、その流れの中から意味ある情報、かつ潜在的な知識を抽出するにはどうしたらいいかという課題がある。AIや機械学習では、どこを見て、どういうデータを出力するかということをうまく教えれば、ある程度いい答えを返してくれるが、それがなければこのボトルネックを解消することは難しい。それに対して情報、数理科学、数学を含む数理で、情報認知能力を高めることによってこれを解決することが望まれる。（図3-4-1）

流れの研究・開発現場：従来手法の限界

計測技術や計算機の発展により、膨大な流れのシミュレーションデータや計測データを得ることが可能になっている。しかし...

- パラメータサーチが膨大
- どのような流れ情報に着目するか明確でない
- 画像データから意味のある情報を抜き出す
- 流れの中にある潜在的な知識を抽出
- 効率的な機械学習

流れに関する客観的な指標の提案が望まれる

図3-4-1 流れの研究・開発現場：従来手法の限界

私たちの研究グループが提案する流線トポロジー解析（TFDA; Topological Flow Data Analysis）は、数学の幾何学の一つである「トポロジー」と「力学系理論」という分野を使った新しいデータ解析手法である。詳しくは後段で説明するが、対象は図3-4-2に示すような流線のデータである。以降、2次元の場合で説明する。2次元の流れがあったときに、TFDAはこのトポロジーの表現、流線のトポロジカルな違いを表現する文字列を与える。すなわち、流れの構造の位置関係、配置関係をトポロジカルに分類し、それを文字列に表現するという技術である。

TFDAを例にデータ解析、つまり数学を使ってデータに何を語らせるかを考える。まず、このTFDAができることは、流れに対する曖昧さのない「言語化」である。これまでは分野間をまたがったコミュニケーションは絵や動画を介して視覚的にしかできなかったが、TFDAではそれを言語として表現できる。その中身は、ツ

リー構造や文字列表現などのトポロジー情報となっているので、データマイニングを使って、これを通じて新しい知識が得られる。さらに、この文字列表現自体が数学的に厳密な証明を受けてつくられているので、確実にパターンの変移を書き下すことができる。つまり、数学的にこのパターンからこのパターンにしか遷移しないということが証明されており、厳密な遷移予測が可能になる。これらの手法を使って新しい知見の抽出が可能になっている。以下では、この応用として、今回は心エコーデータへの応用例について説明する。(図3-4-3)

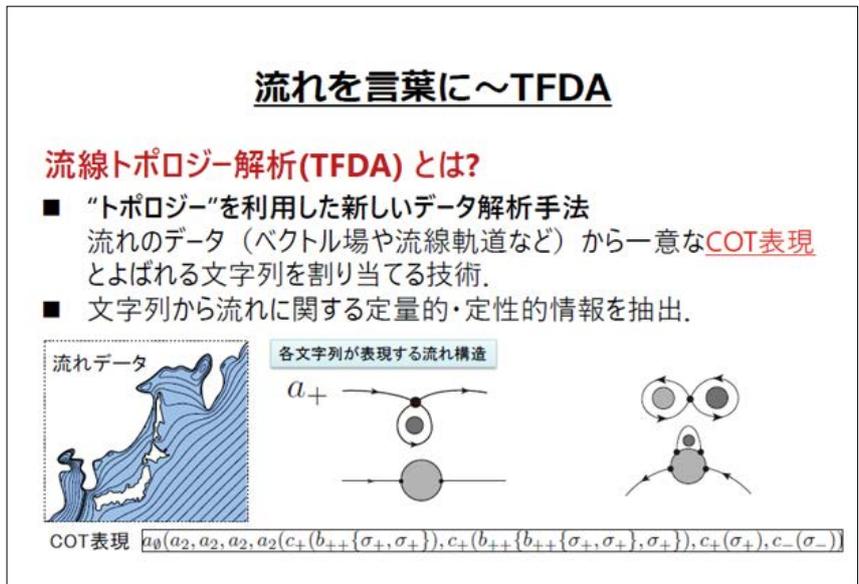


図3-4-2 流れを言葉に~TFDA

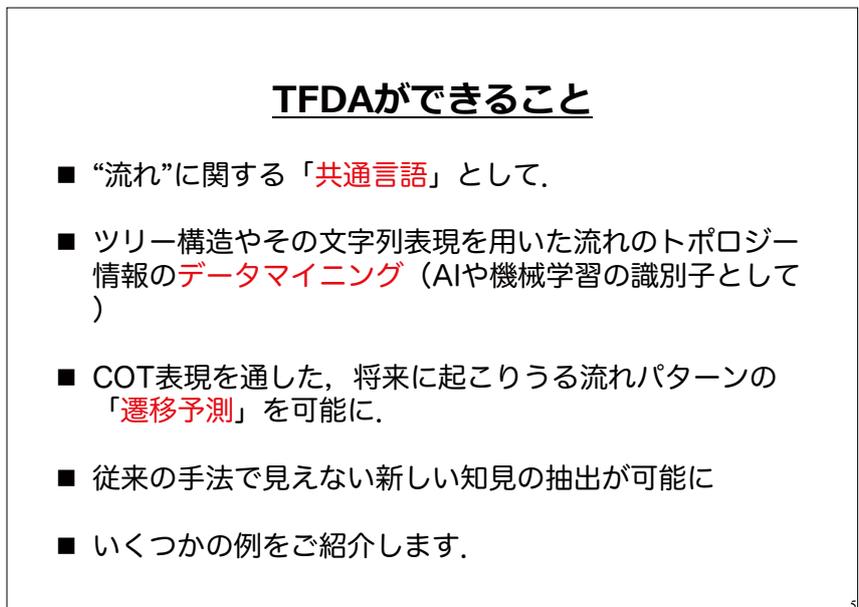


図3-4-3 TFDAができること

心カラードプラーデータを使った心エコー画像データに対するTFDAについて説明する。我々が考えたい問題は、図3-4-4左上図のようなカラードプラーデータを見たときに、そこにどのような流れがあるか、特に

心臓血流の機能の特徴付けとされている「渦流れ」が同定できるかというものである。通常のカラドプラーでは、流れの向きに応じて赤や青のように流れが表されおり、これに対して、VFM (Vector Flow Mapping⁴) という流線を起こす技術を使うと、流れの様子がよく見えるようになる (図3-4-4の左下図)。この図の赤や青は渦度を示しているが、その領域と流線の回転部分は必ずしも一致していないことが分かる。しかし、どこまでが渦 (回転流れ) の領域か、あるいは赤や青の部分以外にも渦らしきものが見えるのではないかなど不明瞭であった。また、この図からそうした情報の定量化がきちんとできれば、心エコーを使った心不全の診断が飛躍的に革新できると臨床医学の医師の間で言われていた。そこで、この渦領域の定量化という課題を解決するべく、TFDA解析を使い、この流れに対する文字列表現としてCOT表現⁵を与える (図右側)。これにより、左下図の回転している流線部分が示す渦領域は、右図の黄色でハッチングした部分に対応することが文字列との対応から確実に分かるようになった。また、渦の領域ではない部分もはっきりする。私達はこの領域を「位相的渦領域」と呼び、これを用いて渦の領域を抽出・定量化が可能となり、心不全例と健常例を位相的渦領域の配置や面積によって識別できることを確かめた。この方法は数学的な保証に基づく点が重要であり、心血流データにおけるよく分からなかった渦の情報化・定量化が可能になった例である。



図3-4-4 TFDAのもたらすもの (カラドプラーを例に)

もう少し理論的な部分を詳しく説明する。今回ターゲットとした左心室の流れパターンを図3-4-5に示す。左心室は3次元非圧縮流れと仮定する。ただし、心臓は拍動するため、流れ領域は移動境界で囲まれ、また僧帽弁、大動脈の流入、流出がある非常に複雑な流れのため、普通のシミュレーションは非常に難しい。一方、心エコーは、それを2次元断面で切った流れを取り出す。この左心室断面内に流れの内部に物理境界は存在せず、外部にあり移動境界と弁からの流入、流出あるという仮定の下で、このような流れが取れる。これを見て診断をするという技術である。

今回は、この心臓血流の流体数理モデルをつくるのではなく、データ解析で心エコーデータだけから情報を抽出しようというものである。その方法が図3-4-6に示すCOT表現と、その理論的保証を与える一意性定

4 エコー画像からベクトル場とその流線を再構成するソフトウェア
5 流れの階層的な構造の情報を表現するもの

理である。この定理によると、左心室心エコーの流れの流線図があったときに、これに対して文字列が一意に与えられることが証明されている。このaマイナスチルダと記述されている部分が、模式的に書いているが、ちょうどハッチングしたグレーの領域に対応しており、この定量化を用いて、それぞれの渦領域の同定をする。数学なので、これがきちんと一意に対応するということが証明されている。(図3-4-6)

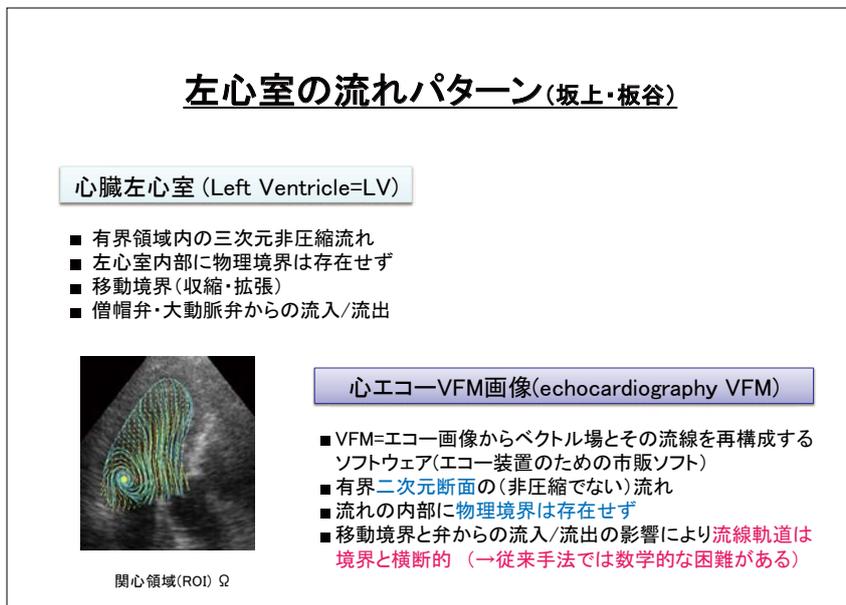


図3-4-5 左心室の流れパターン

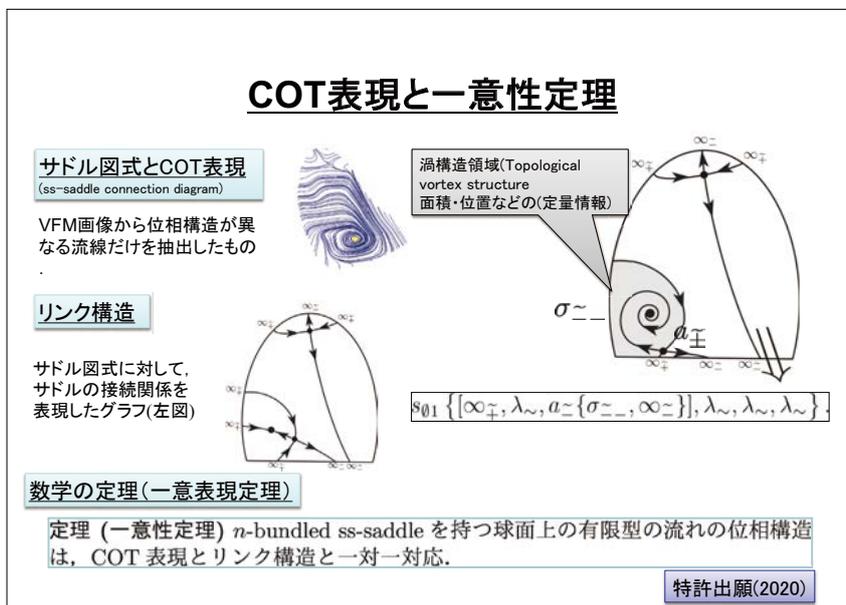


図3-4-6 COT表現と一意性定理

この方法を用いて健常心臓の流れを見てみる。収縮期、拡張期と2つの等容収縮期があり、左上の収縮期では流れが外へ出ており、そのときは渦がある。この渦が収縮期(図3-4-7左上)のCOT表現のaマイナスになっている。次に流体が入ってくる拡張期(図3-4-7右上)では、渦輪の断面のようなものができて、双子渦ができる。この双子渦も、COT表現の中にはここにプラス、プラスという形で現れており、この面積を測れ

ば、この渦の形成の議論ができる。

弁が閉じた状態となる等容収縮期（図3-4-7右下）では、左側の渦は消える。また右側にできていた渦が成長して中央に移動するプロセスを経て、次のプロセスに移る。典型的にはこのサイクルを繰り返す。健康な心臓のデータを40-50ケース見てみたが、この典型的な4状態について文字列を対応させた結果、大体このステップで回っているということが確認できた。

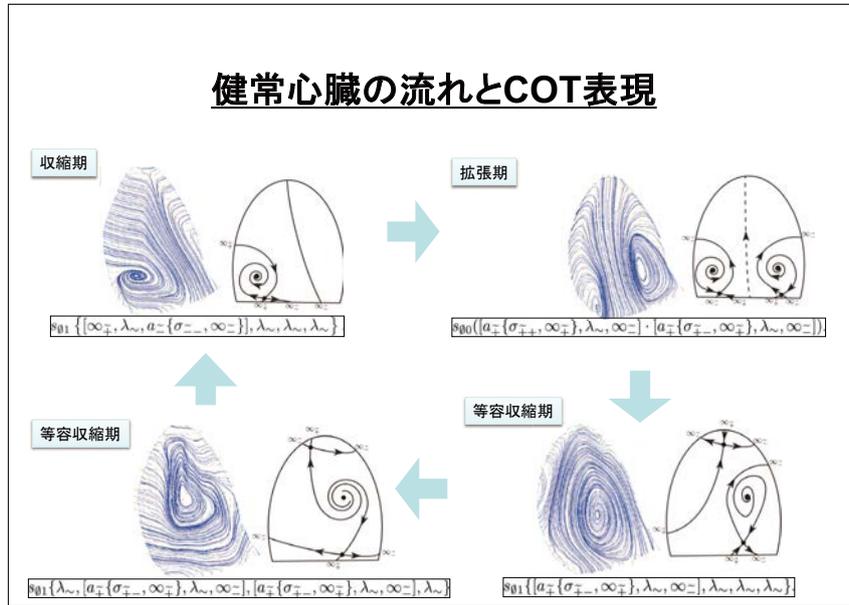


図3-4-7 健康心臓の流れとCOT表現

このパターンではない場合を心不全と呼ぶことになる。これを使って、心不全を位相的渦構造という言葉によって表現して、その面積や位置などによって記述できるのではないか、というのが研究要素になっている。図3-4-8では、左図が健常の場合で、中央及び右図が心不全の2つの例である。

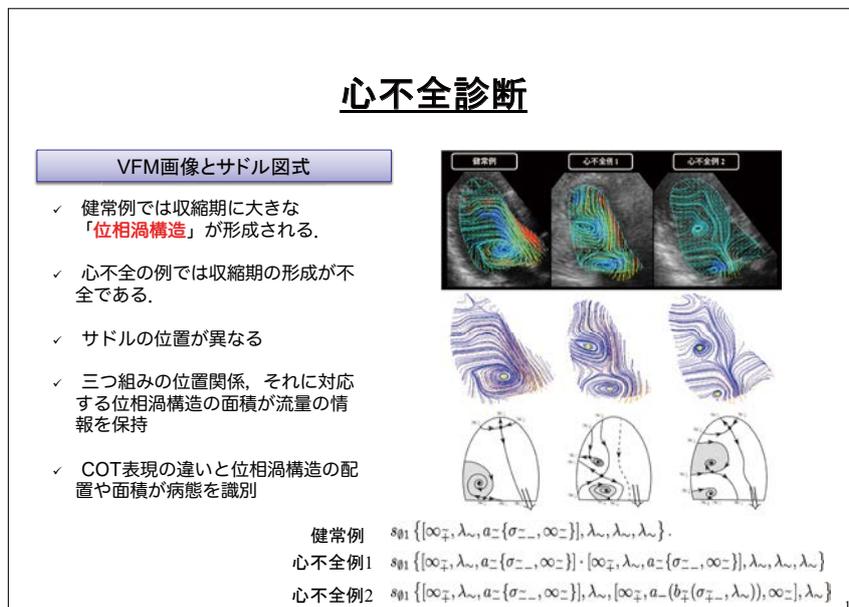


図3-4-8 心不全診断

心不全例のため、当然データ数は少ない。見た目だけで判断はなかなか難しいが、文字列にすると見て分かるように、中央及び右図の心不全の場合は渦が2つ割れている。また文字列でもきちんと、a マイナスが上、a プラスが下というような表現ができるので、あとはこの位置や配置などを医学的な知見と結びつけて渦診断に使うことを考えている。現在、JSTの別のプロジェクトで、社会実装までを目指して、臨床現場にソフトウェアを展開することに取り組んでいる。(図3-4-9)

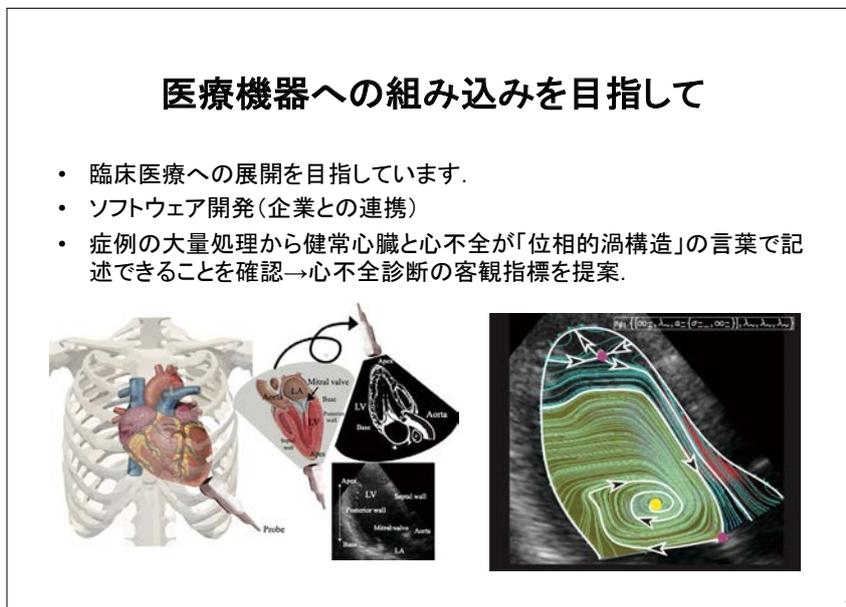


図3-4-9 医療機器への組み込みを目指して

ここまで研究事例を紹介したが、最後に、TFDAに関する研究の現状を説明する。今は3次元流れに対して、2次元スライスデータに適用できるようにしている。そういう意味での3次元化を行っている。これらの研究を行う体制として、マスキリニック（数学よろず相談室）という、私が数学上の諸分野・産業からの質問を受け付けるコンサルティング体制をつくり、外部からTFDAに関する問題を受け付けた。今回紹介したのはそこから生まれた結果の一つである。その他、気象・海洋データや産業界の人たちの共同研究、医療も別の分野などに実績に繋がった。こういう仕組みはうまく回っていると思っている。

今後の期待としては、数学が提供できるものは、データの中にある数理構造を抽出して理論的な保証を与えるデータ解析=数理データ解析技術である。今回紹介したように、機械学習ではできないようなものを補完する、あるいは強化するもの考えるデータ解析、あるいは従来の数理モデル解析をやっていくことになると思う。またデータ同化の逆問題という言葉があるが、これは今、数学の分野では不確実性定量化研究（UQ; Quantitative Uncertainty）と呼ばれている。UQという枠組みで、数学自体も発展してきている。それだけではなく、数学にとって流体研究は、打ち出の小づちであり、ありとあらゆる数学が流体を解く過程で刺激を受ける。今私が扱っている数学でも確率論、函数解析、偏微分方程式論、力学系理論、トポロジー、代数解析、離散数学、何でも使える。私見だが、全ての数学は流体研究のためにあると言ってもいいような状態である。これによって現代数学の非自明な応用による新展開が流体の方で生まれたり、流体の方から、今度は研究すべき新しい数学のテーマが生まれる。ご存じのように、ナビエ-ストークス方程式の解の存在と一意性を証明するというのはクレイ研究所のミレニアム問題の一つになっており、こういう形で両方の分野でWin-Winになれるようなものが生まれることが、こうした分横断的な研究に寄せる今後の期待と思っている。(図3-4-10)

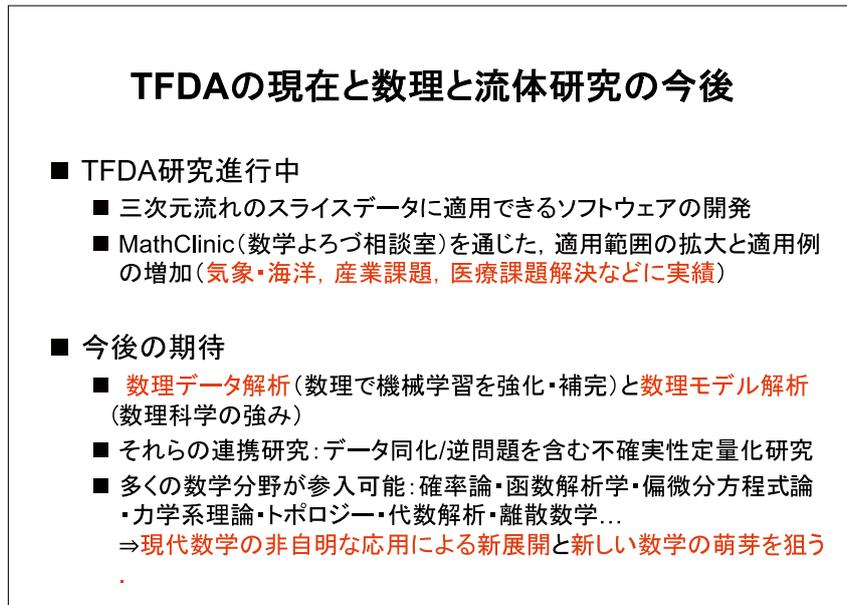


図3-4-10 TFDAの現在と数理と流体研究の今後

【質疑応答】

Q : 今後の期待の2点目として、データ同化/逆問題を含む不確実性定量化に触れられた。流体側の研究者からも、このようなことに取り組む必要があるとお話があったが、このテーマで流体の研究者との連携をどのような形で進めていけばよいのか、数学研究者の立場から、コメントをいただきたい。

A : 1つの具体例として、気象・海洋での成果がある。10年ぐらい前の私がまだ若かった頃のことだが、若手の気象関係者と数理気象学のようなものをやろうと、常日頃から議論をするということをはじめた。その中の一人に、理研でデータ同化の研究をされている先生がいた。この繋がりで、不確実性定量化の研究は、理研と組んで新しい展開を生むという形で、いわゆるヘテロな研究者の集まりで現在実施している。つまり、そういう横断型の研究に進むという段階にあって、その中で、元々はデータ同化という言葉だったものが、時代が進んで、今、不確実性定量化というより包含するような概念の分野になっている。

Q : 流体の研究が数学側の発展も非常に促していくというコメントは、我々プロポーザルの中に組み込みたい視点と思う。一方で、我々は日本では数学の研究者と流体の研究者が離れていると感じている。そこをどのようにつなげていけばよいか、コメントをいただきたい。

A : 他の先生も言われたが、目利き、つまり、俯瞰的にディレクションする人がしっかりしていることがとても大事だと思う。どの分野も同じだと思うが、研究者は専門家なので、分野の視点がとても強い。この話というのは、実は別のこの分野のこういう話になるんじゃないかということがサジェスションできる人がいるかないかで全く違うと思う。新しい数学を見たときに、このような流体に使えるのではないか、というアンテナを張っている人が中に入ると、違う向きの人たちがあるところで出会うようなことが生まれる。そういう人がどこかに入る、あるいは、そういう人がある程度、その研究全体のディレクションをする側にいることが重要である。要素は揃っていると思うので、その要素を統合していくところでの目利きができる人が必要と思う。

3.5 機械学習を活用した流れ制御手法の構築に向けて

深瀉 康二 (慶應義塾大学理工学部 教授)

この2、3年に我々の研究室で取り組んできた成果の幾つかを紹介し、流体力学に機械学習を使うことにより、どのようなことができそうかという、その一端を紹介したい。

近年、機械学習に関するアルゴリズムやライブラリの充実、機械学習に特化した計算機の普及、情報の充実により、流体力学に機械学習を使うための準備ができつつあり、また研究も活発に行われており、このような研究を推進する良いタイミングにきていると思う。

我々のグループは、科研費基盤A「機械学習による乱流ビッグデータ特徴抽出処方構築」(2018~2020年度)において、新たな特徴抽出手法を構築したいという大目標のもと、機械学習を流体力学に適用するという研究を行っている。これまで得られた成果を大きく分類すると、一つ目としていわゆる代理モデル、低次元モデルの構築、二つ目としてそれを使った欠損情報の推定が挙げられる。代理モデルに関しては、大きく分けて流れのダイナミクス予測、低次元化した非線形モードを解釈するというものを行っている。また、欠損情報の推定に関しては、超解像、限られたセンサ情報から不確かさも含めて場全体を推定、実験画像における欠損部の推定を行っている。これらについて簡単に紹介する。

一つ目の成果は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を用いて2時刻間の速度場の関係を直接回帰により求めるというものである (図3-5-1)。人間の視覚を模したネットワークであるCNNは、画像解析の分野でよく使われている機械学習手法である。これを使って、一番簡単な乱流であるチャンネル乱流の2次元断面における速度分布について、 n と $n+1$ という2時刻間で回帰することによっての時系列変化の予測を行うというものである。使用した機械学習モデルは、チャンネル乱流の断面における時刻 n の速度分布のデータをCNNエンコーダーで圧縮して低次元化した後、多層パーセプトロン (MLP: Multilayer perceptron) を用いて回帰を行い、CNNデコーダーで再び元のサイズに戻し、出力として時刻 $n+1$ の速度分布を得ている。

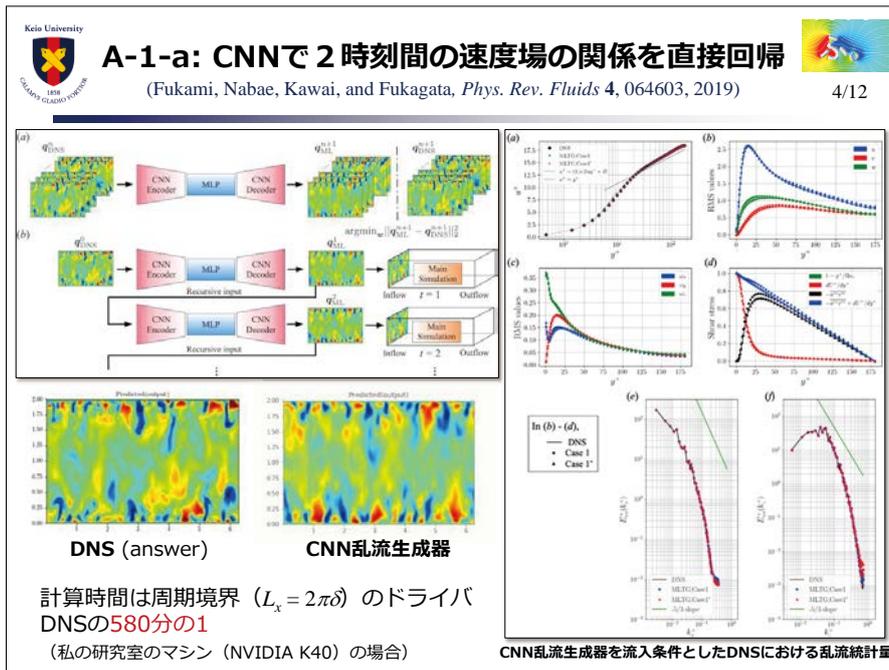


図3-5-1 CNNで2時刻間の速度場の関係を直接回帰

このCNN乱流生成器で得た結果と、DNSで得た速度変動を比較すると、定性的にはよく再現できていることが分かる。また、CNN乱流生成器を流入条件に使ったシミュレーションで乱流統計量を取ると、従来の周期境界のドライバDNSを用いたものとぴったり一致している。CNN乱流生成器を流入条件に用いることで、ドライバDNSを用いた場合に比べ計算時間が数百分の1になるため、シミュレーションのコスト削減に使えると考えている。

2つ目の成果は、CNNで低次元化し、LSTMで時系列予測をするというものである(図3-5-2)。LSTM(Long Short-Term Memory)とは、時系列を予測するためのネットワークの一種である。先ほどのCNN乱流生成器の場合、時間的、空間的な統計量が合っていることを目的としていたが、物体周りの流れや、時系列変化の詳細に着目する場合には、より正確な時系列変化の予測が必要となり、LSTMを用いた手法が有効であると考えている。

この手法を用いて、学習していない形状を含む様々な形状周りの流れの時系列予測を行い、流れ場の定性的な振る舞いや、抵抗係数、揚力係数、周波数を無次元化したストローハル数といった統計量に関して、DNSの結果を良好に再現できることを明らかにした。なお、学習していないレイノルズ数の場合には、外挿に当たるようなケースだと予測がうまくいかないことが確認されている。また乱流の場合、結果は大体は合うものの、まだ特徴を充分捉え切れておらず、さらなる改良が必要である。

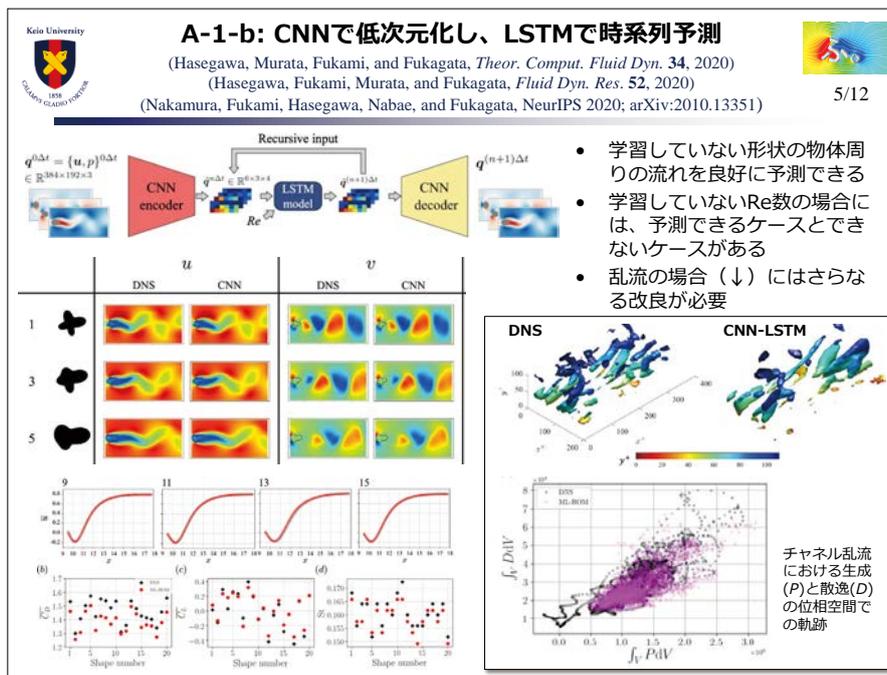


図3-5-2 CNNで低次元化し、LSTMで時系列予測

次の成果は、CNNで低次元化し、低次元化されたモードの時間発展を支配する常微分方程式を導出するというものである(図3-5-3)。先ほどの例ではLSTMを用いて時系列予測を行ったが、これに代わりSINDy(Sparse Identification of Nonlinear Dynamics)と呼ばれる手法で常微分方程式を導出し、それを数値積分することで時系列変化を得ることができる。この手法によって円柱周り流れなどがよく再現できている。この手法の利点として、理論に乗せやすいことが挙げられる。例えば、現代制御理論と融合することで、導出した支配方程式からフィードバック制御の制御則を求め、これを用いて渦放出の抑制ができるようになる。

CNN非線形低次元モードの解釈に関する成果も得ている(図3-5-4)。線形理論に基づく固有直交分解(POD: Proper Orthogonal Decomposition)は、線形の活性化関数を使ったCNNオートエンコーダと

基本的に等価である。一方、一般的なCNNオートエンコーダは非線形の活性化関数を用いており、これによって非線形性を有する流れ場を効率的に低次元化することができる。そのようなCNNオートエンコーダから得られた単一の非線形低次元モードの中には複数のPODモードを内包していることが明らかになった。さらに、階層型のCNNオートエンコーダというものを用いることで、より高圧縮化が可能であるということを示した。このような手法を用いて、非線形性をモードの中に押し込めることで、線形なモデルあるいは制御に乗せやすいモデルを構築できるのではないかと考えている。

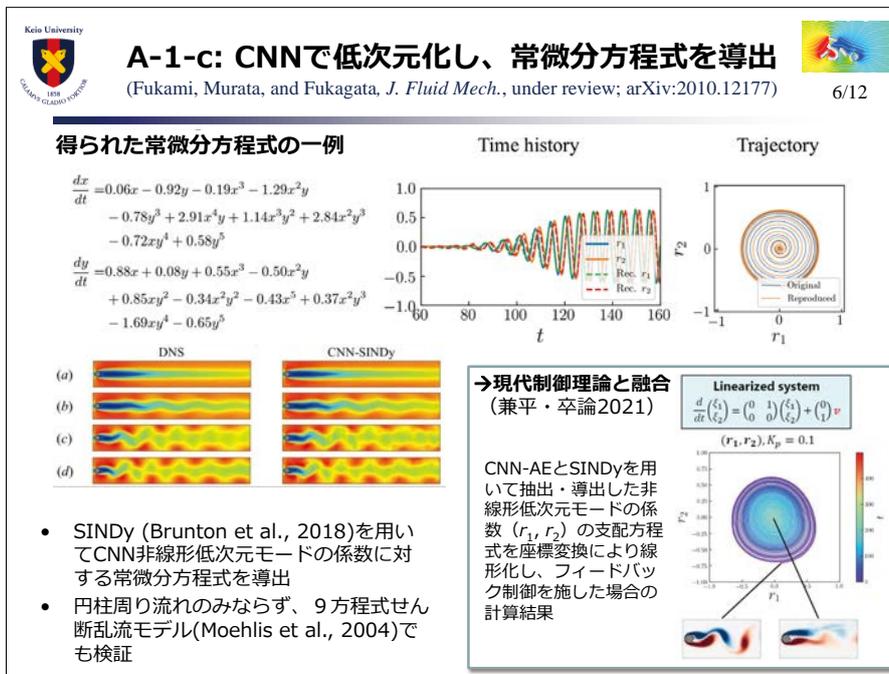


図3-5-3 CNNで低次元化し、常微分方程式を導入

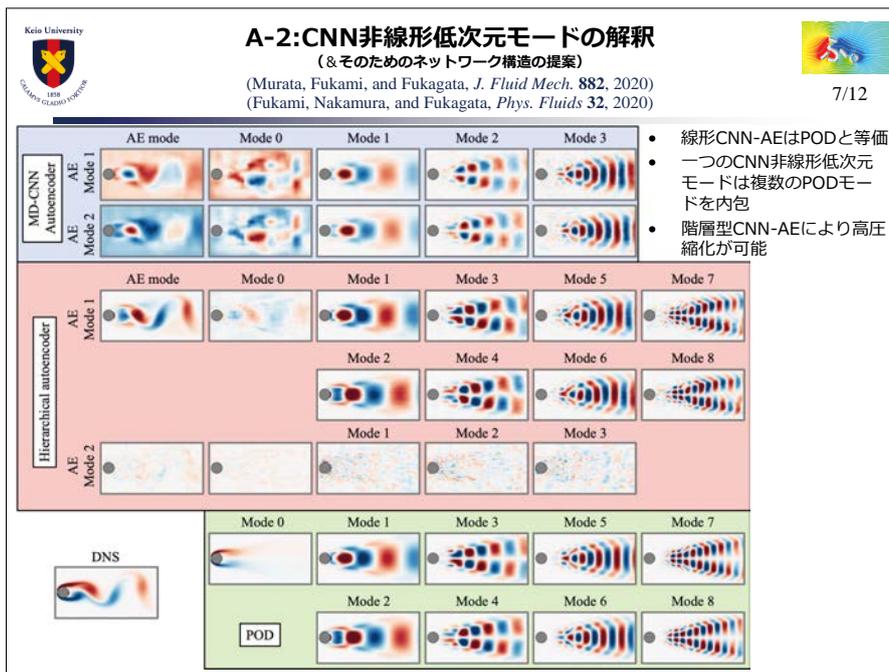


図3-5-4 CNN非線形低次元モードの解釈

次の成果が、低解像度データからの高解像度データの構築（超解像）である（図3-5-5）。2次元減衰乱流について、格子解像度 4×4 の超低解像度データから高解像度データを再構築しようとする場合である。普通のバイキュービック補間などを用いるとデータがなまってしまうが、機械学習によるスーパーレゾリューションを用いることで高精度な再構築が可能となる。同様に、空間3次元プラス時間方向の超解像についても取り組んでいる。

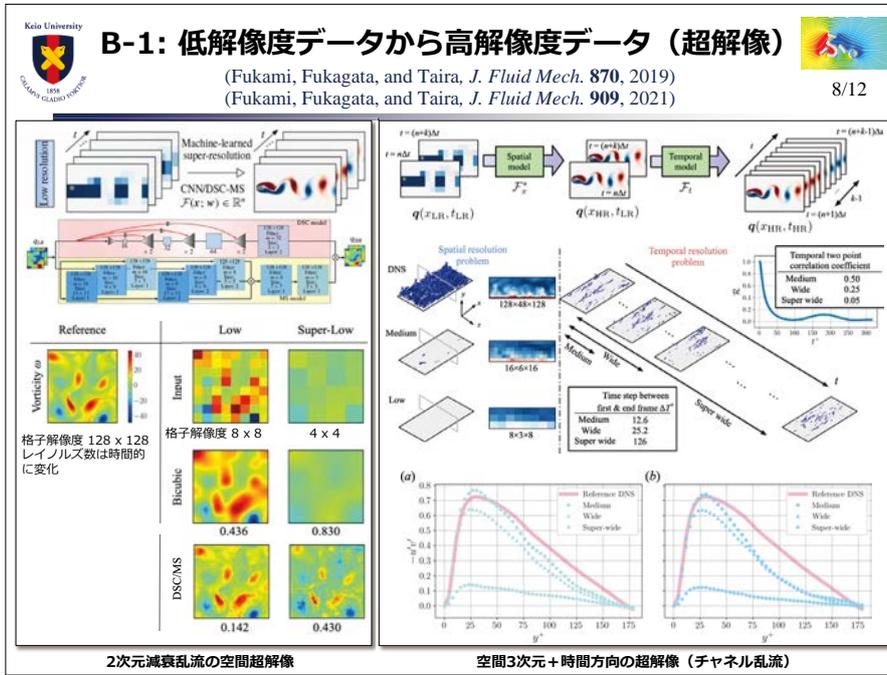


図3-5-5 低解像度データから高解像度データ（超解像度）

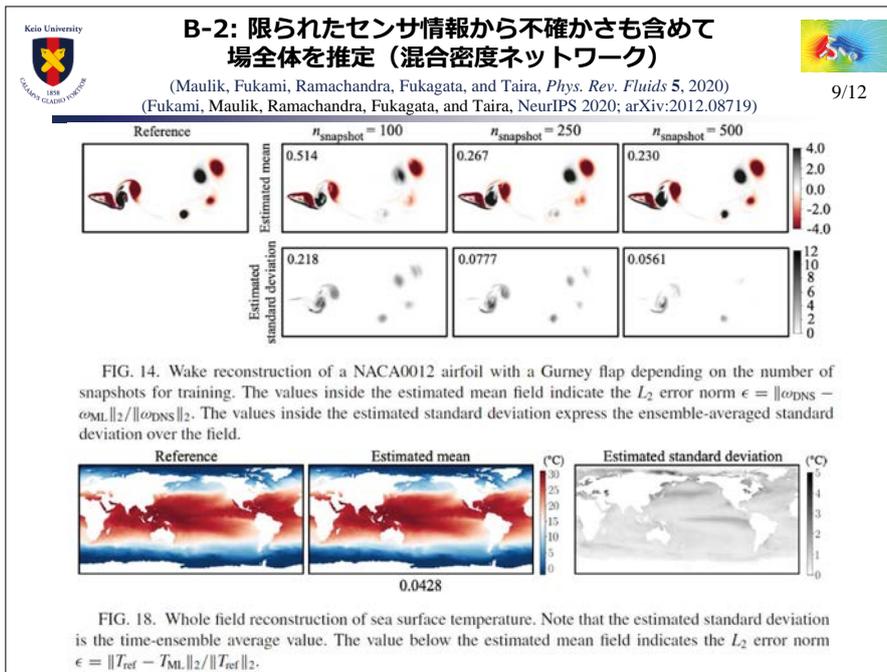


図3-5-6 限られたセンサ情報から不確かさも含めて場全体を推定

限られたセンサ情報から不確かさも含めて場全体を推定することにも取り組んでいる (図3-5-6)。例えば、翼面上の5つのセンサから翼周りの流れ全体を推定することや、全地球上の海面温度分布を気象衛星 NOAA の10個のセンサデータから推定するといった取り組みをしている。どちらも混合密度ネットワークというアイデアを用いて、推定された平均値と、その不確かさを求めている。これらの論文の共著者であるマウリック氏や、ラマチャンドラ氏はアルゴンヌ国立研究所に所属しており、応用数学をバックグラウンドとして流体力学や宇宙物理学の研究を行っている。このように、個人的なレベルでは応用数学系の研究者と一緒に研究を行っている。

最後の例として、実験画像における欠損部の推定を挙げる (図3-5-7)。シミュレーションデータのみならず、機械学習モデルを実験データに適用することによって、いろいろなことができそうだと示す例である。さらに、Grad-CAMという手法を用いて、機械学習モデルがどこの領域に注目して推定を行っているのか可視化することができる。図に示した例では、上流のレイヤーでは物体周りや欠損している画像の周りに注目しているのに対して、下流のレイヤーではせん断の強い領域に注目している、といったこと可視化することで明らかにし、現象の本質に関する理解につなげるといった取り組みをしている。

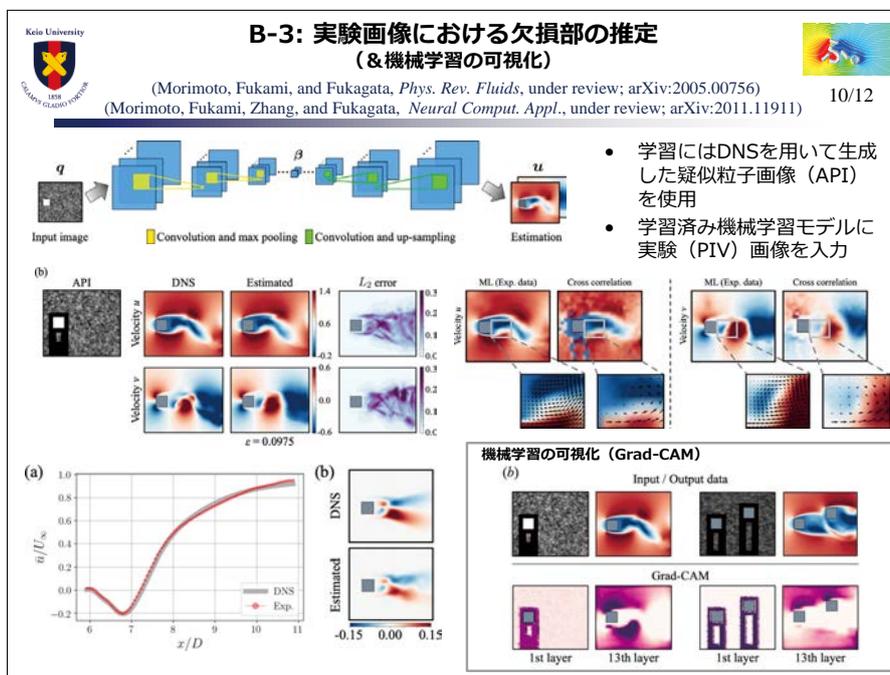


図3-5-7 実験画像における欠損部の推定

今回紹介した例は全て、基本的には図3-5-8に記載した数式で書けるフィッティングだが、紹介例から分かるように、単なるフィッティングを超えて、低次元化を通じた本質的な物理の理解、流れ予測のための計算コスト/データ量削減、制御理論・最適化理論との融合による流れの制御・最適化、などのための強力なツールとなり得る可能性を秘めている。さらなる一般化・有効活用には多様な流れ場のデータが必要であり、そのために大規模な研究プロジェクトというのが有効と考えられる (図3-5-8)。



まとめ



11/12

- 紹介した例は全て基本的には

$$w = \operatorname{argmin}_w [E(q, \mathcal{F}(q; w))]$$

誤差関数

重み

入力

出力

と書ける「フィッティング」だが、紹介例から分かる通り、単なるフィッティングを超えて、低次元化を通じた

- 本質的な物理の理解
- 流れ予測のための計算コスト/データ量削減
- 制御理論・最適化理論との融合による流れの制御・最適化

などのための強力なツールとなり得る可能性を秘めている！

- **さらなる一般化・有効活用には多様な流れ場のデータが必要**
 →大規模な研究プロジェクトが有効と考えられる
 (この分野における米国や中国の研究チームの勢いは凄まじい…)

図3-5-8 まとめ

【質疑応答】

Q：多様な流れ場のデータが必要だということについて、もう少し詳しく伺いたい。

A：我々が扱っている流れは、非圧縮性であり比較的レイノルズ数が低い流れである。乱流ではないものもある。しかも、チャンネル乱流、円柱周りや角柱周りの流れといった非常に基本的で限られた流れ場であり、実用という観点からはまだ距離がある。これらを実用に向けたツールとして使うためには、あるいはその検証のためには、非圧縮性流れに限らず、圧縮性流れ、混相流、燃焼流、非ニュートン流体など、流体自体が複雑な場合についても使っていきたい必要がある。どこが使えてどこが使えないのか、どうやったら改善できるのかということをも明らかにしていく必要があり、研究しなければならないことがたくさんあると感じている。

さらに、一般化に関して述べると、例えば低次元化の手法としても、これまで我々が取り組んできたような単に微分方程式を書くだけではなく、もっと抽象化すること、例えば記号的な扱いをする、そういう解釈の方もとても重要だと感じている。

3.6 コメンテーターからのご意見

藤井 孝藏 (東京理科大学工学部 教授)

私は、どちらかというものづくりに近い、応用に近い流体力学の研究者なので、その立場で話をさせていただく。私の話が、例えば現象理解と制御の組合せや、データサイエンスとHPCなど、そのようなものに関して何か役に立つことがあればと思っている。

図3-6-1の内容は、私が10年ほど前に残りの研究生活でどういう研究をやっていこうかと考えたときに作った資料に基づいている。そもそも流体力学の難しさは何かというと、図3-6-1右の失速の図のように、流れの剥離や渦構造の崩壊、衝撃波など、流れの制御にとって非常にクリティカルな流れ現象のほとんどは、ちょっとした形状の違いや、ちょっとした流れ条件の変化によって起きることにある。その理由は、最初の趣旨説明にもあった、流体現象が非線形性に支配されているためであり、ステイフネスというもう一つの問題もある。このことが流体力学研究、結果としては流体制御を非常に困難なものにしてきたと思っている。

これは非常に困難であって、要するに流体力学の難しさで不利な点であるが、考え方を逆転させて、この困難さを利点として考えられないか。すなわち、時空間の局所的な形状や流れ変化が流れ場全体を支配しているのであれば、非常に難しいが、局所流れをしっかりと理解して、そこに小さな工夫をすることで、流れ場全体を効果的に制御できるのではないか、欠点を利点として考えられないかと思った。このような発想で考え始めて、非常に小さなプラズマアクチュエータというマイクロデバイス、小型のデバイスを研究対象として捉えることにした。

一般的に言えると思うが、流体における形状工夫による空力設計は、非常に今難しい段階、つまり、細かいところまで手を入れないと性能が上がらない状態に来ている。例えば航空機でいうと、1カウント、抵抗の1万分の1を上げるためにものすごく苦勞をしなければいけない段階に来ている。

セキュリティでも何でもそうだが、図3-6-1の右下の図に示すように、エフォートに対するゲインはだんだん飽和し、かなりのエフォートを積み重ねても、得られるものが非常に小さくなる。こういう段階になってきたら、何かパラダイムシフトを考えなければいけないということがもう一つの発想としてあった。そこで、先ほど話し

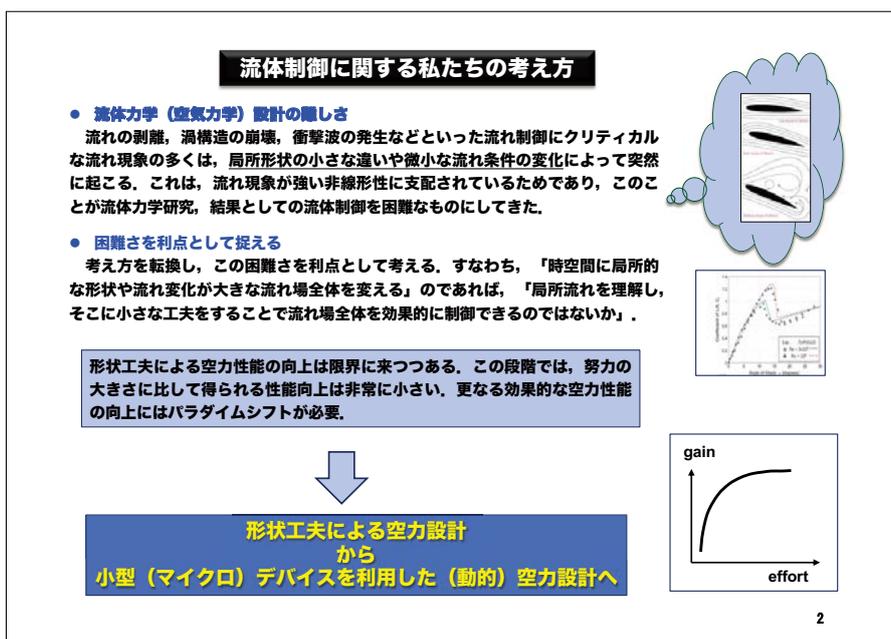


図3-6-1 流体制御に関する私たちの考え方

たマイクロデバイスを使うことで、形状工夫をしない空力設計はできないかと、これは30年先の話だが、その時そのように考えた。

プラズマアクチュエータの詳細は割愛するが、これは小型の全体で厚さ1ミリ弱ぐらいのデバイスで、薄い電極2枚を物に貼りつけて流れを制御しようというものである。この研究を始めてから、実験とシミュレーションと両方あったが、図3-6-2の右にあるように京のプロジェクトをやることができた。この一個一個の絵が1ケースに相当しているが、数百ケースのシミュレーションを行い、このパラメーターはどのようなときにどのような条件で作動させるのがいいかというようなデータを得ていった。その結果を左下の応用のほうで、小さなスケールから大きなスケールまで、それぞれに実際に物をつくると課題があるので、その課題を解決しながらやってきている。

また、右の図は、機械学習を使った流体制御をしているのだが、実はある特定の2点のデータだけ使って、制御を非常に高度化することや性能を上げることができる。先週、Air Forceの方と議論をする機会があったが、実際に色々な制御をしようとする、センサーのポイントがあまり多いと役に立たないと彼らは言っていた。だから、2点で制御ができるというのが非常に重要である。実はここに至るまでには、センサーの設置位置を選ぶにあたっては、たくさんのシミュレーションの結果が生かされており、実際の制御については機械学習を生かしている。HPCのような精緻なシミュレーションをたくさんやることと、それから制御とのつながりの例として話をした。

最初の話に戻るが、この左の図は、流れの剥離などが起こった場合、それを何とか動的に制御しようというものだ。私はこのデバイスの議論を始めたときに、最低でも30年先の技術であるという話をした。このようなデバイスを使うと、オンデザイン、デザインポイントだけではなく、今まで難しかったオフデザインの制御もかなりできるようになる。最終的には、下に示すように翼型の形を工夫する代わりに、このようなデバイスをたくさんつけてオンデザイン、オフデザイン、それぞれに応じて、デバイスをオン・オフすることでダイナミックな高性能を出すような流体機器が考えられるということやってきた。

繰り返しになるが、それを積み上げる段階として、HPCによる大量のシミュレーションと、実験、実機による実証をやってきて、その結果を分析してきた。今、さらにデータサイエンスの技術が非常に増えてきて、使えるものが明確に見えてきているので、いろんな形でこれらを使ってさらなる性能向上を図っている。

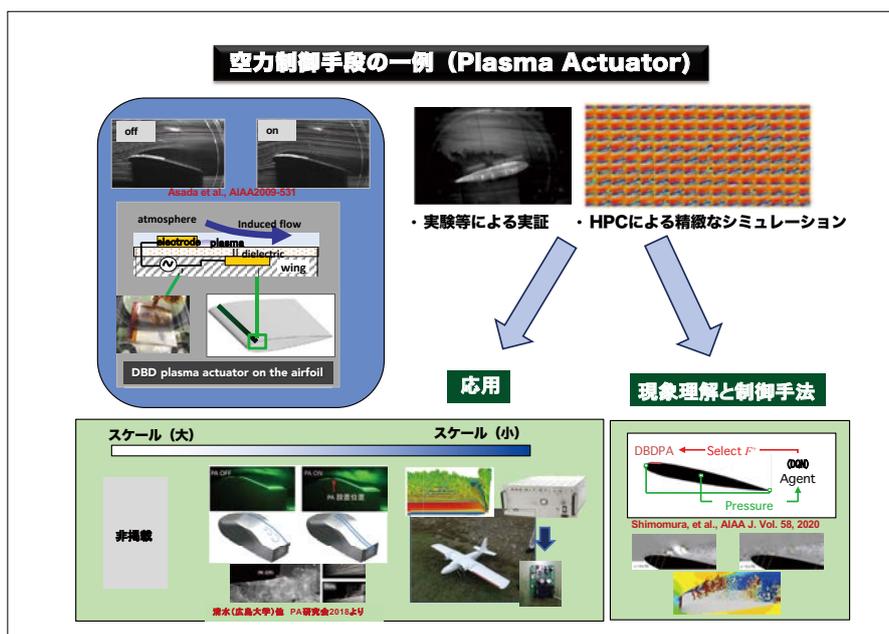


図3-6-2 空力制御手段の一例 (Plasma Actuator)

今日の冒頭の趣旨説明ではデータ分析ということと、その後の先生方のお話の中で構成則の構築と、この2つの使い方が主に話されていた。それだけではなく、深淵教授が少し触れられていた方程式を作ること、もしくは計算方法の改良のようなところにも、データサイエンスの技術はもっといろいろな使い方が考えられる。この辺を皆さんで議論して、いろいろなデータサイエンス技術の機械学習、低次元化モデルなども、考えていくことが大事と思っている。

最終的に、非線形と硬直性、この2つに対する道具として、私たちはHPCとデータサイエンスの技術をどう組み合わせていくのか、ということをごどこかで議論する場をつくってもらえると良いと思っている。



図3-6-3 過去・現在・未来

【質疑応答】

- C : この最後のスライドの緑で示していただいたところは、午後の総合ディスカッションで是非話をできればと考えている。また、制御の分野でも、例えば10年後、20年後にこういったものを目指せばよいのかというマイルストーンを示していただいたが、こちらもまた午後、引き続きお話を伺いたいと考えている。
- C : 大きな目標達成をいきなり実現とはいかないので、実際の成果を示すという意味で、まずは効果的な制御をやっていくことだと思う。ただ、大きな目標はもう一つ先にある。

梶島 岳夫（大阪大学大学院工学研究科 教授）

私は特にスライドを準備してはいないが、先生方の話の中から気がついたことをコメントとしてお伝えしたい。

まず、後藤教授の話の中に、構成則の構築が重要であるということがあった。一方で、店橋教授の話の中では、一つの成功例として挙げられた燃焼解析のプラットフォームのプロジェクトでは、乱流モデルと伝熱モデルにはあえて手をつけなかったということが印象に残った。そこでいう構成則というのは、ある種の平均化によって漏れてしまうような部分に対する、その物理を表す数理モデルと考えると、乱流に対する平均化は様々である。混相では体積率や質量分率など、反応場では反応のスケールでいろいろな平均がある。それぞれの平均を混ぜて一つの複雑流れの基礎式という、つまり、単成分・単相の乱流だけでも平均はあまりはつきりと定義されていないところがある。複雑な流れをつくっていくときに、例えば産業界でも共有できるような構成則にまとめるような、まずその基礎式の土台がないということが今一番自分が思っているところである。先ほどの丸田教授のスケーリングの話とはやや違うかもしれないが、最終的に使えるようなモデル、あるいは支配方程式に組み上げていくためには、逆戻りするような話かもしれないが、そういうところから何を表そうとしているかということを考えていく必要があるのではないかと思いついて聞いていた。

その指針を与える一つの手がかりになるかもしれないと思うのが機械学習であるが、機械学習の話をしていて、流体力学をやっているほとんどの人には、ナビエ-ストークスに代表されるようなオイラー記述が頭の中に染み込んでいるのではないかと思った。機械学習と本当に親和性があるのは、ひょっとしたらラグランジュ記述かもしれない。また、より前段階の、もっと別の運動論的に考え直す余地もあるかもしれない。坂上教授の話に抽象化の話もあったが、そういうのがヒントになるという感じがする。複雑流れそのものを直視するよりも、式をつくるということを意識しつつ、もっと抽象化した概念から入るのも一つの方向ではないかと思いついて聞いていた。

我々には少し勇気の要ることかもしれないが、最後の藤井教授の話をしていて、流れの特徴として、一部が全体を変えるというのは、これは非常に難しい問題でもあるし、面白い問題でもあるということは全く同意している。単相の乱流だけを考えると、後藤教授のお話に出てきたようなカスケードの話に落ち着くが、混相になると、例えば濡れの現象や界面の現象など、ごく小さなスケールのもので全体の流れを決めてしまうという傾向が顕著に表れてくる。大スケールから小スケールではなくて、小スケールから大スケールが決まってくるような別の傾向があるので、そういうスケール感のどちらが支配しているかというような支配機構にも留意しながら、やはり乱流と混相流、あるいは反応流で使われている式を組み合わせるのではなく、別の流体力学をつくっていくようなプロジェクトが何か出てくれば良いと思いついて聞いていた。

そろそろ引退も近く、自分ではできないことばかりなので、無責任にコメントしたが、今までの話を聞いて、そんなような感想を持った。

【質疑応答】

- Q：店橋教授の講演に関する質問も含まれていたと思うが、（本日午前中のみのお話となる）店橋教授にコメントをいただけるか。
- C：プロジェクトで何故伝熱モデルと乱流モデルに手をつけなかった理由は、先ほどあまり説明しなかった。プロジェクトマネジメント的な意味で外したというのが答えである。
- Q：今改めてこのような乱流モデルというものを一つの共通目標として、プロジェクトを立てていく方向性も、もちろんあると思うが、その点はいかがか。
- A：そう思う。つまりその前のSIPは逆の例になる。乱流モデルなどをそもそもやってきている人たちに、その応用側に一緒に来てもらって、そこで考えてもらった。要するに、今までのことをただ延長線上でやっていただくだけではなくて、現実的なターゲットも目の前にして進めてもらう。そうすると、実はそ

ういう研究者の見方も大分変わり、逆に新しい研究の方向を見いだしていただけるときもある。

長谷川 洋介（東京大学生産技術研究所 准教授）

この話を聞いたときに、幾つかの段階・項目があると思った。今回はそれを4つ挙げさせていただく。まず最初に、信頼性が高く解像度が高い、そういう流体のビッグデータが得られるようになったときに、それをきちんと管理して公開していくことが必要と思った。ここで、流体ビッグデータとは、シミュレーションデータのみならず、計測データも該当する。次は、そのビッグデータに基づいて現象を理解するという点であり、機械学習やビッグデータ解析が、今までの流体理論や物理法則とどのように融合していくかという点である。3つ目は、それを使った予測や制御など、新しい予測方法や制御手法に展開していく段階である。最終的には、4番目のようにそのような技術がいろいろな応用研究に進むということである。ただ、先ほども話に出ていたように、きちんとプログラムマネージャーが全体を俯瞰しながら、またある程度、方向性を決めて進んでいく必要があるとも思う。

**第1部：「複雑な流れ現象の普遍的な原理等の解明、高度な予測、統合的制御を可能にする
実験・シミュレーション・理論・機械学習を連携した研究推進体制と研究基盤」**

東京大学 生産技術研究所
長谷川洋介

主要項目

1. 高信頼性、高解像度の流体ビッグデータの取得、およびその一般公開
 - ✓ 大規模シミュレーションデータ、実験計測データ
2. 流体ビッグデータに基づく現象の理解
 - ✓ 機械学習、ビッグデータ解析、流体理論、物理法則、経験則等の融合
3. 上記の現象理解に基づく、流体現象の予測と制御
 - ✓ 乱流モデル、SGSモデル、データ同化、新しい制御則、etc.
4. データ科学、機械学習を用いた応用研究
 - ✓ エネルギー、バイオ、医療、環境、農業、etc

図3-6-4 主要項目

一つ目の流体ビッグデータの管理・公開について、以前に共同研究を実施したジョンス・ホプキンス大学の事例をご紹介します。ジョンス・ホプキンス大学では、3次元、時間を入れると4次元の詳細なDNSデータをインターネット上に公開しており、誰もがこのデータにアクセスすることが可能である。以前は、計算を実施したグループがそのデータを保持しており、それ以外のチームがそのデータにアクセスし、独自の視点で解析を行うことは容易ではなかった。しかし、現実には、データを得る人と解析をする人は必ずしも一致しておらず、最新のデータを多数のグループが共有し、解析するところに一つのブレークスルーが起り得ると考えている。

ちなみに、このデータベースでは、一様等方乱流、壁乱流など、理想的な流れ場の時空間データが保存されており、これまでの10年間ぐらいで112兆点のアクセスがあった。これはどれくらいかというと、例えば、空間的な解像度を100×100×100として、さらに時間的な解像度を100とすると1億点のデータ点数になるが、それが100万回分ということになり、かなり多くのアクセスである。その結果、ジョンス・ホプキンス大学と共同研究を行っていない研究グループが独自の視点からデータ解析を行い論文発表したり、大学の講義などでこのデータに学生がアクセスして、自らデータ処理をしたりしている。このように一つのデータのプラットフォームをつくることは学術的、教育的メリットが極めて大きい。

このようなものを利用して、例えば、我々のチームでは図3-6-5の右図のように、海洋での汚染源や熱水鉱床をロボットから計測するアルゴリズム、推定するアルゴリズムをつくるなどの研究を共同で実施した。ちなみに、このデータベースはMATLABとかFORTRANなど、一般によく使われるプログラムから呼び出すことができるので、あたかも自分がシミュレーションして、得られた生データを自ら処理することができる。

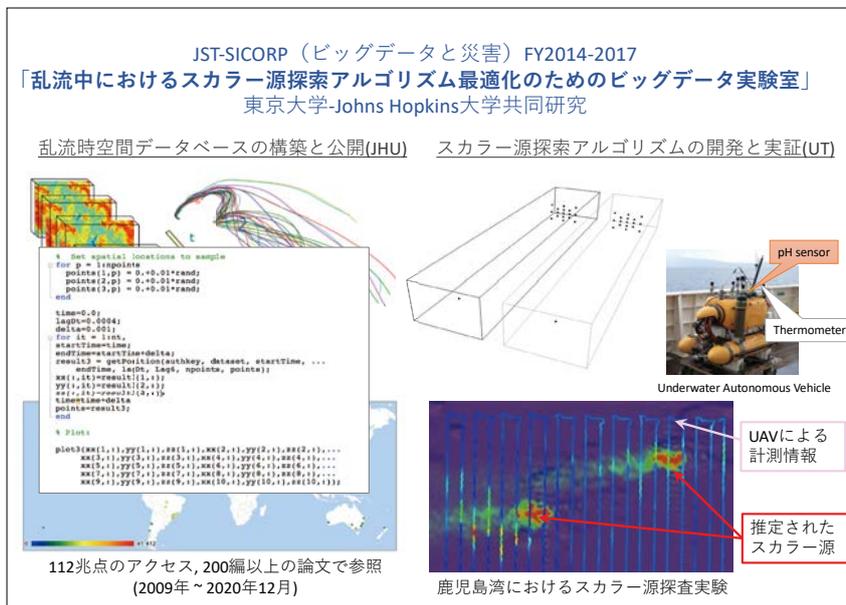


図3-6-5 JST-SICORP 「乱流中におけるスカラー源探索アルゴリズム最適化のためのビッグデータ実験室」

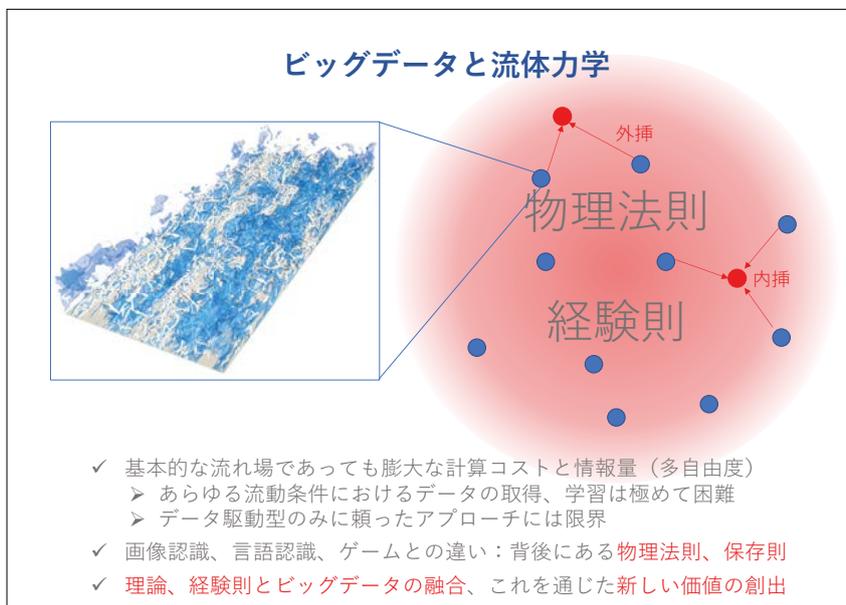


図3-6-6 ビッグデータと流体力学

次に2番と3番に関しての理解や予測・制御についてである。個人的な考えとして、ある1つの流動条件であっても、それをシミュレーションにより再現するためには膨大なコストと情報量が必要となる。最終的に機械学習を流体の問題に応用するためには、あらゆる流動条件における流れ場のデータを学習する必要があり、これは現実的には非常に難しいと思う。

流体情報を単なる「データ」として扱って、それを内挿、外挿することで未知の流れ場を予測し、制御しようとするのは現実的には難しいということは、実際に乱流研究を行っていて強く感じるころではある。一方で、画像認識や言語処理など、機械学習がうまくいっているものと流体の違いは、流体の場合、その背後に物理法則や相似則、これまでの経験則のようなものがある。そういったデータの背後にある理論や経験までを機械学習が学習する、もしくはそういった知識を陽的に機械学習の中に埋め込むことができれば信頼性のある予測ができると思っており、その辺が一つ鍵になるかと思っている。4番目は、午後のセッションになると思うので、ここで終わりたいと思う。

【質疑応答】

- Q：ジョンズ・ホプキンス大学については、JSTから、技官が3人、ポスドクが2人との説明があったが、実際データベースは誰が運用しているのか。
- A：このデータベースの特徴は、あたかも自分がシミュレーションを実施しているかのように、任意の時刻、場所の流体情報にアクセスできることであり、そのためにはデータベース側の高度な技術が必要となる。このようなデータベースのプラットフォームの構築自体が、情報系の一つの研究分野にもなっており、流体の研究者と情報系の研究者が一体となり、データベース構築に携わっている。流体の研究者がこれを管理しているわけではなく、そこはデータ科学の研究者・技術者との連携が必要である。
- C：最後に出てきた点とも関係するが、今SpaceXがすごい早さで有人飛行を成功させていることに対し、その手法に各分野から大きな注目が集まっていると聞いている。それは研究のマネジメントの仕方にも当てはまると思う。一般に、例えばHPCをやるときには、アメリカの研究所では、それぞれの分野の専門家はコーディングはしない。エンジニアがいて、情報系の人もちろんいる。どのようにしたら全体のアウトカムが最大化するかという観点で、上から見ている人がいるということだと思う。例えば、そのマネジメントの仕方などの例も良く見ていくということかと思う。ご紹介いただいたことは、「日本ではできない」と研究者レベルでは諦めてしまうが、今日のような会議では、もしかしたらそういうことがつながる可能性もあるかと思い、感じたこととして申し上げた。
- Q：もしこれでプロジェクト化をして何かできると期待しているのは、坂上教授が、新たな言語的な理論でトポロジーを使って説明されたが、そういう形で現象を理解する、抽象的にもきちんと理解していくということが、私はかなり重要だと思っている。私は最初、企業に在籍していたが、物事の開発や設計では、その概念が非常に重要であることを経験している。細かく計算してこの乱流のエネルギーの散逸のパラメータはこうだというのは、最終的な詳細設計の話であり、まず新しいイノベーションを生むこと、概念を生むということが非常に大切と思う。そういう意味では、本日様々な研究者が集まって、言語的な抽象的な概念をつくれなにかと思っているが、その辺はいかがか。
- A：今、シミュレーションはたくさんあり、見た目には非常に分かりやすい。しかし、それに対して、工学の研究者や物理学の研究者とコミュニケーションする際に、本質的に見るべきところはどこか、をお互いで共有されていないというのが一番の問題だと思った。そのため、誰が見てもこれは間違いなく言える概念として確立していく過程が、分野横断的なセレンディピティーを生み出す原動力になるだろうと思った。もちろんそれは万能ではなく、今回はトポロジーという、数学でいうとかなりざっくりとした物の見方をしている。そのレベルであれば数学的に保証された言語表現や状態表現ができるということが、今回このようなトポロジカルデータ解析につなげた背景である。お互い持ってはいるが言い表し難い、流れに関する知識をきちんと概念化する、何らかの共通言語で概念化するというツールがたくさんできることが望ましい。今までは速度場などの物理量で語っていたが、それ以外の何かの視点を出していくということが必要だと思う。特にデータサイエンスの時代には多数のデータがあり、物理量ではなかなか分かりにくいいため、そのようなツールが出来るとよいと考える。

C：私もそう思う。個別分断化されたプロジェクトというのは流体に関して幾つもある。飛行機を造ろう、ロケットを造ろう、何とかの機械を造ろうというのがあるが、そうではなく、語れるということが非常に大切と思っている。

4 | 第二部

4.1 航空宇宙分野における 流体科学研究と将来のイノベーション創出に向けた試み

河合 宗司（東北大学大学院工学研究科 教授）

今回のテーマが出口ニーズとイノベーション創出であるため、航空機開発で望まれる点を簡単に紹介する。航空機開発では空力や流体が設計の最上流に位置している。換言すれば、航空機開発では流体は非常に重要な一つの学術分野になっている。航空機開発の現状としては、設計・製造後の下流段階での実機フライト試験でなければ正確に予測評価不可能な設計上の空力課題が未だ存在している。代表例としては、離着陸性能に効くような最大揚力、パフェット境界（飛行限界）である。これらにより、設計下流段階での重大な手戻りの発生や、開発の遅延や、形状が異なる航空機の製造時に開発リスクが生じている。

我々のグループでは、富岳の成果創出加速プログラムなどにおいて、国内航空機メーカーなどと一緒に研究開発している。イノベーション創出、出口ニーズとしては、高忠実な数値シミュレーションによるこれらの空力課題の予測評価である。実機フライト試験への依存度を大きく減らし、設計初期段階での予測精度を抜本的に上げることができれば、航空機設計にイノベーションが起こせると考えている。将来的に航空機のデジタル設計やデジタル化された段階での型式証明まで視野に含め研究開発を実施している。

次に上述した工学的な重要空力課題を流体科学の観点から考察すると、非線形性の強いマルチスケールな流体現象がキーとなっている。特にレイノルズ数が高く、圧縮性流れであることが重要な要素である。これらは世界的に見ても、特に剥離流れなどの高レイノルズ数の高忠実なデータベースはほとんど存在せず、普遍的な現象理解や理論、モデル構築なども困難なのが現状である。航空宇宙工学分野に限れば、日本国内にはこれらを高忠実に計算できる基盤ソフトが一つも存在しない。世界的にもそのような基盤ソフトが確立された国は今のところ存在していない。従って、各国が総力を挙げて研究開発をしている状況である。

先ほど世界でもと述べたが、一例として、ドイツの航空宇宙センター（DLR; Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt）が挙げられる（図4-1-1）。DLRも同様なことを考えており、デジタルデザイン、バーチャルテストなどをして、バーチャルサーティフィケーション（認証）まで行いたいとしている。デジタルツインまで視野に含めた研究開発が行われている。ご関心があれば、研究開発の詳細についてウェブサイト参照されたい⁶。

以上が工学的なアウトプットであり、この非線形性の強いマルチスケール現象がイノベーション創出に関わる出口ニーズのキーとなっている。理論が発達していない高レイノルズ数流れの剥離現象が大きなキーとなっている。スケール比を概算的に紹介する⁷。まず機体スケールを1とすれば、対象とする先ほど示した重要な空力現象というのは、時間スケールで10倍や20倍といったスケールになる。長さスケールで表せば100 mオーダーの現象に相当する。

6 DLR Webページ, <https://www.dlr.de/content/en/articles/aeronautics/aeronautics-research/virtual-product-house.html> (2021年3月1日アクセス)

7 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 河合研究室 Webページ, http://www.klab.mech.tohoku.ac.jp/research/index_jpn.html (2021年3月1日アクセス)

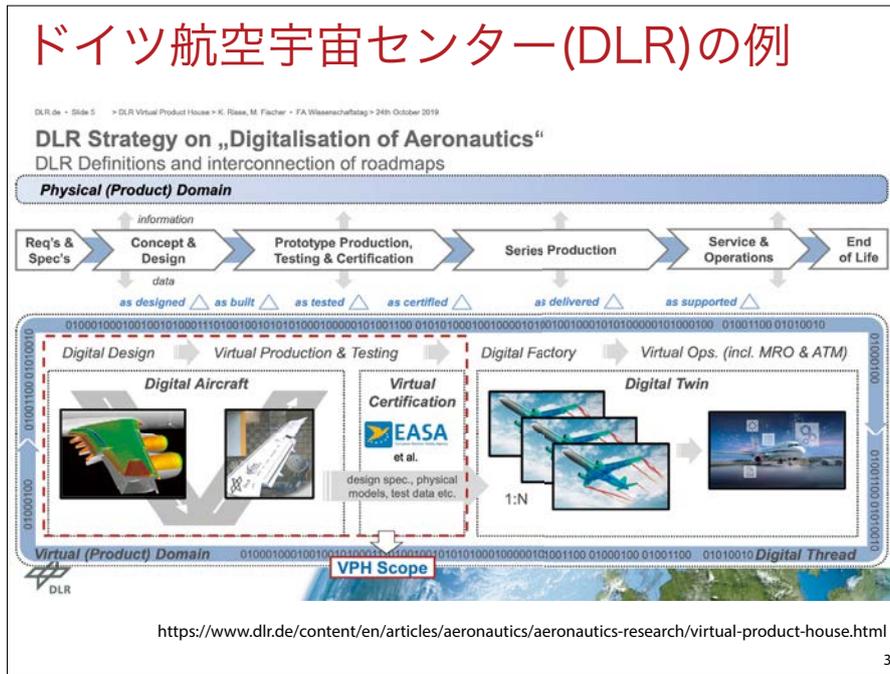


図4-1-1 ドイツ航空宇宙センター (DLR) の例¹

これらの現象を支配しているのは、基本的に壁面に沿う乱流境界層であり、乱流境界層は内層乱流と外層乱流の2つのマルチスケール現象であることが知られている。

まず1つ目の境界層の外層乱流スケール δ を見ると、おおよそレイノルズ数 Re_{L_c} の $1/7$ 乗のオーダーで長さスケールの比がある (式4-1-1)。これは航空機の機体スケール L_c に対して2桁または3桁小さいスケールになっている。

$$\frac{L_c}{\delta} \approx 6.25 Re_{L_c}^{\frac{1}{7}} \quad \text{(式4-1-1)}$$

また、この乱流境界層のエネルギー生成を司るものに内層乱流があり、そのスケールは δ_v である。この内層乱流はスケール比が最も厳しくレイノルズ数 Re_τ に比例するような関数になる (式4-1-2)。

$$\frac{\delta}{\delta_v} = Re_\tau \quad \text{(式4-1-2)}$$

航空機の飛行条件ではレイノルズ数が高いので、内層乱流のスケールは外層乱流と比べ4桁程度オーダーが異なる (航空機の機体スケール L_c に対しては 10^{-6} から 10^{-7} 程度)。すなわち航空機周りの流体現象という観点から見ると、おおよそ μm や数十 μm オーダーの現象からおおよそ100 mスケールまでである。基本的にはこれら全てのスケールを扱わなければ先ほどのイノベーションは起こせない。今後、例えば20年や30年のスパコンの進化を考えても、全て計算することはできないであろう。

本発表では、データ科学やデータベースを用いてマルチスケール現象の詳細に迫るアプローチの例を紹介する。1つ目の話題は、スケール比が4桁も変わる内層乱流をモデル化したLES (Large Eddy Simulation) で、富岳を用いれば航空機全機形状周りの流れが解くことが可能になりつつあるという紹介である。高レイノルズ数・剥離流れでは高忠実なデータベースがないため、モデル構築が困難となる。また理論もなく詳細な現象理解もなされていないため、モデル構築のハードルが高い。データベースが不十分な場合に、自ら高忠実なデータベースを構築し、理論とデータ科学の両面からモデル開発している例を紹介させていただく。

2つ目は、それができると式4-1-2においてレイノルズ数の4桁の依存性を解消できる。このモデリングと富岳を使うことで、近年、航空機全機形状周りの高忠実なLES解析が可能となってきた。ここでもう一つ重要な点は、これらの解析が学術的なコードで可能となっても、イノベーションを起こすためには企業の方々などが使えるようなソフトが必要になる点である。広く使える基盤ソフトの構築・維持は、さらに大きなエフォートがかかる現状もある。

さらに言えば、先ほどから指摘があるように、このような詳細な流体现象について私たちは非常に興味があり、一部の企業の研究者の方も興味がある。しかし設計という観点からすれば、大事な現象を抽出して（低次抽出して）、データ科学によってCapability Computing（大規模単一問題型計算）からCapacity Computing（多重ケース処理型計算）への移行が望まれる。

次にそれぞれの内容を一つずつもう少し紹介する。まず複雑流体现象のモデリング方法に関して簡単に紹介させていただく。

1つ目に理論的アプローチがある。付着乱流境界層であれば、レイノルズ数が高くても、ある程度理論が構築されているので理論ベースでモデリングができる。しかし剥離乱流境界層となると普遍的な理論も確立されておらず困難で、詳細なデータも乏しい。我々が今まで研究してきた経験から、高忠実で詳細な流体データベースは非常に強力で、過言かもしれないが、モデル構築には不可欠との所感がある。簡単な実施例として、2020年から稼働し始めた富岳を用いた計算では、2次元翼型形状であるが実機レベルの高レイノルズ数条件での内層乱流まで解像する解析が可能となり、ようやく航空宇宙分野でも詳細なデータベースが取得できつつある。そうなれば古典的なアプローチかもしれないが、理論と高忠実なデータベースを使い、これまで理論のみでは構築できなかったような、対流項など剥離現象に伴うモデリングの構築にも非常に強力である。

さらに先ほどから話題に上がっているように、現象が理論で未解明であれば、データに教えてもらうというデータ駆動的アプローチによるモデリングも成功している。ここでも高忠実なデータベースは非常に強力であるという利点がある。一方で欠点もあり、機械学習はデータを入力すれば何でも可能なわけではない。我々が物理法則に基づき適切に考えると、機械学習は良い結果を返してくれる。私たちのデータ駆動型のモデリング研究に関して言えば、我々が物理法則に基づき教えてあげることで、機械学習による計算ができていたのが今の状況と認識している。

したがって先ほど梶島教授の話が非常に印象深かったが、現状では、データ駆動科学と理論が相補的に進展する段階には至っていないと考えている。実際は我々が一生懸命教えて、結果を取得できている段階との認識である。データ駆動的アプローチから何かを教えてもらうこと（法則性などが得られること）が次の課題であると考えている。その観点から、個人的にはフィジックスインフォームドではなくてデータベースドのアプローチの実現を目指して研究開発を進めている。

大規模解析とデータ科学の部分について、先ほどの内層乱流モデルを使うことで航空機全機のLES解析が富岳の成果創出加速プログラムで可能になりつつある。ここでもう一つ指摘しておきたいこととして、丸田教授から燃焼分野では基盤ソフトを10年、20年かけてみんなで作っていくとの御紹介があった。基盤ソフトというのは一研究室の手に負えるようなものではなくてきており、十分にサポート支援しながら成長させていくような仕組みが肝要と考えている。

最後に大規模データを解析する方法で、データ駆動的ではないが応用数学的なアプローチでレゾルベント解析というのに着目し、開発を進めている。これは非線形項を含めた因果関係を示すような解析法である。もっとも興味深かったことは、この方法は因果関係、すなわち何が原因(Input)になって、何が結果(Output)かを解析する手法である。この非線形性の強い流体现象において、その因果関係を明示的に示すのは、これまでの解析法では困難なところが多く、流体解析における次の一つのキーアイテムになると期待している。

4.2 分散混相流のマルチスケール問題

高木 周（東京大学大学院工学系研究科 教授）

環境・バイオ関係という内容で、分散混相流のマルチスケール問題について述べる。東京都の下水道局のホームページを見ると、下水をどのように処理するかという水処理のシステムが表示されている。例えばマイクロバブルなどの微細気泡は、同じ体積の気体の塊があったら、大きな気泡1個よりも小さな気泡が多数あったほうが表面積が大きいので、物質輸送、ガスの溶解特性がよくなる。図4-2-1のプロセスの中を見ても、反応槽というのは、微生物の入った泥の中に空気を吹き込んで微生物を活性化させるもので、微生物はすごい速さで大量の酸素を消費して汚れを分解していく。その時に、既存のシステムで十分機能してはいるものの、これをいわゆるマイクロバブル、ファインバブルと言われる微細な気泡にすると、圧倒的に小さくコンパクトなシステムで水処理システムをつくるのが可能になると考えられる。

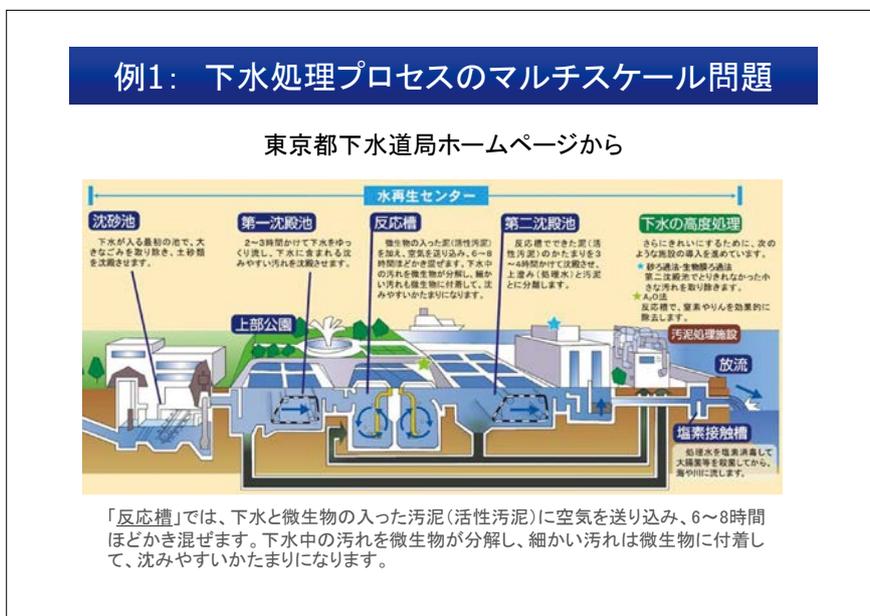


図4-2-1 例1：下水処理プロセスのマルチスケール問題

既によく開発されたシステムなので、現状を大きく変えていくという動きはなかなかつけれない。しかし、少なくとも大学レベルでやっている研究から、もっと社会を変えるようなところまでイノベーションを起こすにはどうしたらいいかは、この事例はそれを考える重要な問題になっている。マイクロバブル、ファインバブルについては、お風呂やシャワーなど日常生活に非常に近いところにそれを利用した商品もあるが、サイエンスとしてどのくらいきちんとしたことが分かっていて、その結果、どのくらい効率がかわるかということに関しては、まだまだ未知な部分が多い。たった1個の気泡が上昇する現象でも、ほんの僅か、水中に入っている不純物、特に表面活性剤みたいなものがあるとその振る舞いが大きく変化し、微量の表面活性剤の影響で気泡流全体の挙動が全部変わり、水処理のシステムも大きく効率が変わってくる。

例えば、具体的に我々の実験室で持っている実験装置を説明する。回流水槽を用いて下から上に水が流れている状態で、下のほうから気泡を出し、気泡吹き出し部から1.6メートルぐらいのところを観測する（図4-2-2）。

このタンクに、水道水と小さなおちょこ1杯分ぐらいのアルコール、3-ペタノールを入れると、劇的に流れ

の様子が変わる (図4-2-3)。気泡吹き出し部分ではすべての気泡が直径1ミリ程度の気泡として径が揃っている状態にある。観測視点1.6メートル程度の部分で見ると、水道水であると気泡が合体してサイズがばらつく (図4-2-3右上) のに対して、微量の3-ペンタノールを入れるだけで、気泡クラスターと言われるようなクラスター構造が出る (図4-2-3右下)。

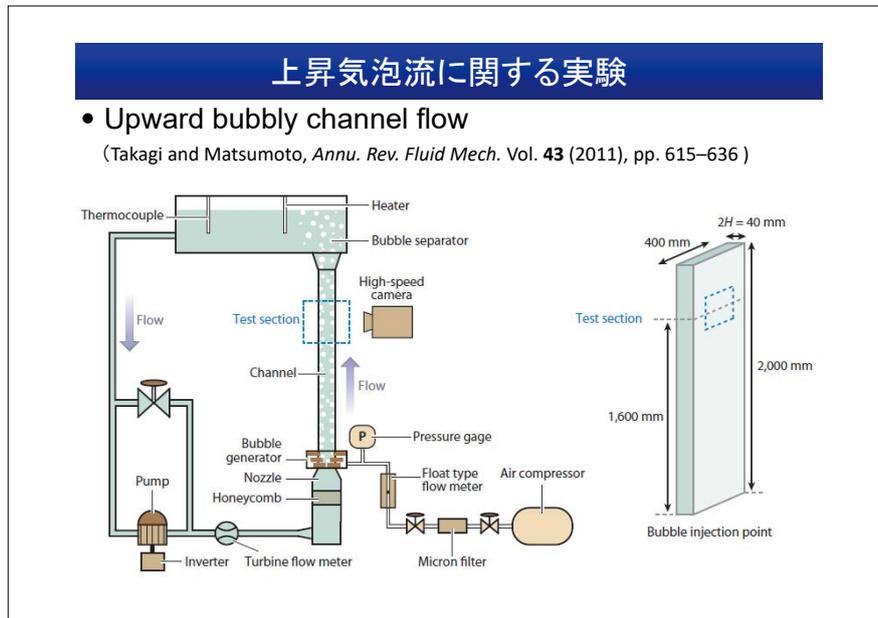


図4-2-2 上昇気泡流に関する実験

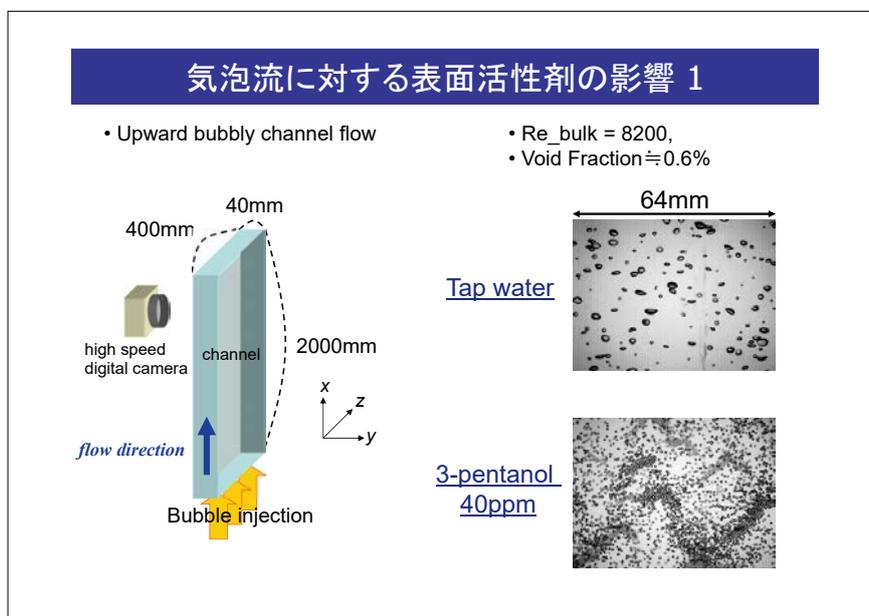


図4-2-3 気泡流に対する表面活性剤の影響1

さらに、3-ペンタノールをおよそ4杯分程度まで入れると、クラスターが消える (図4-2-4右中)。もしくは表面活性の大きいTriton X-100という表面活性剤を使うと、やはりクラスターが消え (図4-2-4右下)、ある特殊な条件ではクラスターが出たり、さらに量を増やすと出なかったりする。また、同じサイズのたった1個の気泡を超純水、水道水、ちょっとずつ表面活性剤を入れたもので比較すると、水道水は超純水に近い上

昇速度を示すが、それ以外では表面活性剤の濃度の上昇とともに上昇速度が大幅に低下する。これは表面に吸着する表面活性剤がもたらすマラゴニー効果で説明でき、分子レベルの表面活性剤吸着現象から、気泡一個の上昇速度が劇的に変わり、さらに大規模な乱流構造まで変わってくる。

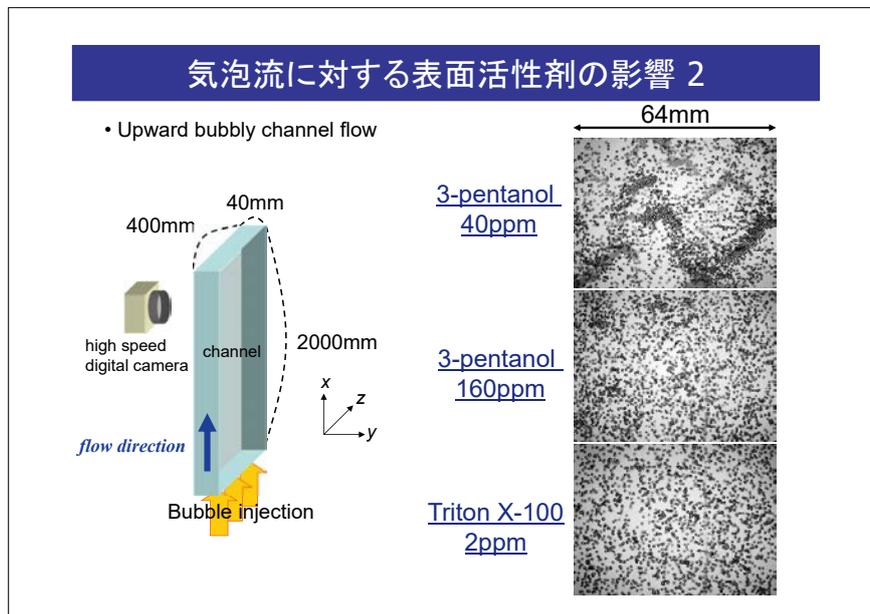


図 4-2-4 気泡流に対する表面活性剤の影響 2

この現象がなぜ起きているかという、水が汚れてくるにしたがって上昇速度が低下するだけではなく、気泡が壁面に寄ってくる挙動が大きく変わってくる。表面活性剤が微量に入ると壁面近傍に気泡が集まってきて、三日月状のクラスターを形成する。表面活性剤の濃度が上がるにつれ壁面に寄ってくる傾向がなくなり、気泡は流路全体に一様に分散するようになる。表面活性剤濃度が低いときに壁面近傍にできた気泡クラスターが、実は乱流構造を劇的に変化させて、乱流の大規模渦というのを消滅させる。流れ場を計測するLDV、PIVという手法を使って計測して流れの構造を見てみると、実際に渦構造が気泡クラスターの通過時に消失し、層流化のような現象が起きていることを確認できる。この現象はいわゆる乱流構造の制御そのものに繋がっていて、乱流の大規模渦が消失し、流れが穏やかになり、層流化してくることになる(図4-2-5)。

流れを層流化させるには、この気泡クラスターが頻繁に通過する必要はなく、壁面から成長しようとする大規模渦の源である小さな渦を壁面近傍で消し去ることで、しばらくそのまま放っておいても、その安定した状態が続く。プラズマアクチュエータを使った乱流制御でも境界層の制御すると、しばらくその効果が持続するという研究報告があり、その現象とも関連する。自分の研究を通しながら、人の研究ともつながっていき、いろいろな理解が深まっている。たった1個の気泡の上昇速度減少から、大規模な乱流構造の変化のようところまで繋がってくる話になる。

具体的には、このような技術は、先の水処理技術だけではなく、船底から気泡を吹き出して抵抗低減を図る技術として実用化されている。いろいろな条件によって抵抗が下がったり上がったり、またその日の条件によっても違い、統一的にこの効果が重要というのはまだよく分かっていない。壁面近傍に気泡の集まり、クラスターのようなものができてくると効果が非常に出てくるということまでは村井らにより報告されている。

それ以外には、深海底からの資源開発がある。レアアース泥やコバルトリッチクラストなど、日本の近海には結構資源があり、これを揚げるときに、通常のポンプリフトでは海深くに沈めなければならずメンテナンスが大変である。エアリフトポンプというのは、気泡を入れるとその気泡の入った分だけ密度が低くなる効果で、ポンプとしての機能を発揮する。しかし、水深3,000メートル、5,000メートルになると、深海底から小

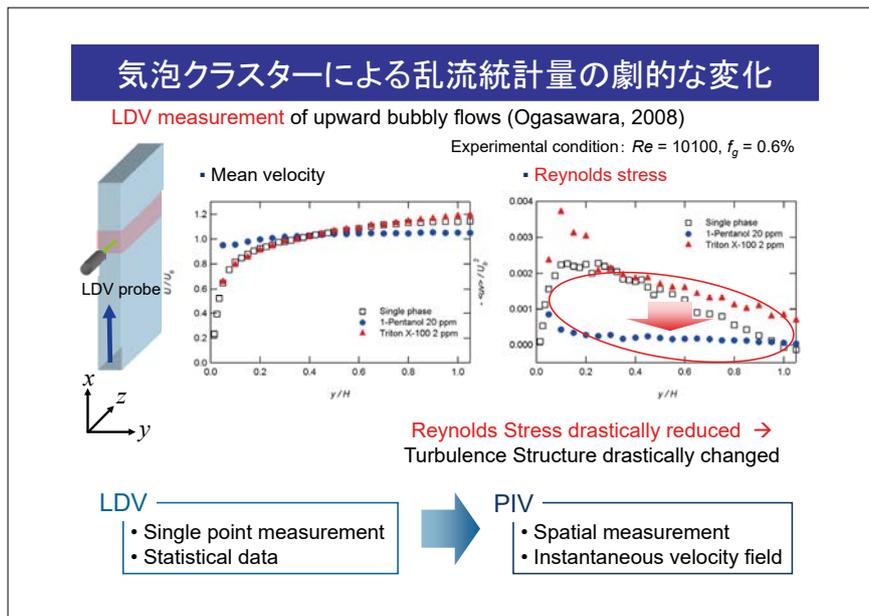


図 4-2-5 気泡クラスターによる乱流統計量の劇的な変化

小さな気泡を入れても地上に来るまでに静水圧の違いで膨張し大きな泡になってしまう。大きな気体の塊になると、気体だけ筒抜けてしまい液体を持ち上げないので、揚水できず、海底の資源が持ち上げられない。そこで、例えば、石油掘削の分野では、全体を圧縮して高圧にすることでこの問題を解決している。1気圧から3,000メートルの300気圧まで300倍の違いがあると体積膨張が大きい、例えば全体を30気圧に加圧すると、30気圧から330気圧という圧力の変化が10倍程度の違いとなり、体積膨張も10倍程度で済み、気泡流は気泡流のまま環状流とはならず、利用できるという話になる。もう少し発想の転換をして、今までのエアリフトとは違い、もっと小さい1ミリメートルぐらいのバブルを点滴のような状態でぽつぽつと入れることを考える。その後大きく膨張してきたものを有効に活用すると、全体を加圧しなくても上手くエアリフト機能をつくり出すことができるのではないかと発想の展開である。このようなところも、既存の技術に対する大きな転換になってしまうため、大学のようなところでやっていくことが重要ではないかと思う。

他にも、キャビテーション現象というものがある。流体機械の破損など、悪さをすることで嫌われる現象である。東大のスーパーカミオカンデが大破損事故をして、光電子増倍管が壊れたときの画像を示す。光電子増倍管というのは、中が真空に近い状態になっていて、そこにある1個に傷が入り割れる。割れたときに流れ込んでくる水が大きな衝撃圧をつくり、その衝撃波でとなりの増倍管が破壊され、それが連鎖的にさらにとなりを破壊し、結果として多数の増倍管が破損し、いわば、キャビテーション現象のチェーンリアクションにより引き起こされている。大きな破壊力を持っているキャビテーション現象を、上手く使えと、医療応用にて結石の破碎などをもできるという話もある。

医療分野でのマルチスケール問題というと、やはりタンパク質レベルの分子の挙動がマクロなレベルでの病態にまでつながることが挙げられる。分子生物学的な知見と、心筋梗塞、脳梗塞もしくは脳疾患といったいろいろな重要疾患を、いかにつなげられるかというのはとても複雑な階層問題である。このような疾患の中で血流を介す現象に関しては、流体力学の本質的な貢献が必要とされる。

最後に、図4-2-6にまとめを示す。様々な時空間が含まれるマルチスケール・マルチフィジックス現象で、実験は事実なので正しいとよく言われる。しかしマイクロスケール、ナノスケールになると、実験対象そのものも直接見ることが難しいことが多く、結局のところ、シミュレーションも実験も両方の信頼できる部分を利用して、断片的に見られているところをいかにつなぎ合わせて全体を統合していくかという作業が必要である。実験と計算、理論の連携が大変重要で、機械学習などの情報科学の研究者も含め、密に連携を取っていく体制を取ることが極めて重要である。

結言

様々な時空間現象が含まれる複雑なマルチスケール・マルチフィジックス問題に対しては、実験もシミュレーションも種々の困難を伴い、絶対に信頼できるデータを提供するのは極めて難しい。そのような問題を解析するためには、実験、シミュレーション、理論を相補的に駆使し、全体像をつかんで行く方法が有効である。

従来は、現象を明らかにするための精緻な実験が何よりも優先される場合が多かったが、マイクロ・ナノスケールの現象では、直接観察が極めて難しくなるため、シミュレーション結果と照らし合わせることができる実験系を組んでいくことがより重要となる。すなわち、実験屋と計算屋の協力が極めて重要となる。

最近では、データ同化や機械学習などのデータサイエンスに基づく手法の導入が積極的に行われてきているが、複雑な階層性を持つ現象に対しては、流体力学の分野ではまだ広くは適用されていない。(乱流モデルや流動制御、二相流計測の分野などでは一部進んでいる。)

実験・シミュレーション・理論・情報科学の研究者が“密”に連携をとって研究を推進する体制を構築するのが重要。

図4-2-6 結言

4.3 AI融合シミュレーションによる 微気象予測の実現と未来社会サービスの創出

大西 領（東京工業大学学術国際情報センター 准教授）

私は流体力学の観点から気象の現象を研究している立場から話題提供する（図4-3-1）。雲微物理は雲粒子の成長や運動を扱う研究分野だが、私は乱流が雲の成長や運動にどのように影響を与えるか、流体力学の観点で研究している。都市微気象は、都市の建物、人間活動の影響を強く受ける地表から高度100メートル程度までの気象を扱う研究分野だ。微気象は、通常の気象研究よりもマイクロなスケールの気象を扱う。水平方向では、通常の気象のスケールは例えば、関東地方一円、100kmのようなスケールだが、微気象のスケールは、おおよそ2 km四方よりも細分化したものが対象だ。このスケールで解析すると、日射や建物の影、都市の人口排熱といった情報を加味することができる。高レイノルズ数の流れ、非定常、非平衡の現象を解析することに繋げられる。街区を人が歩いている時の、人体の温熱応答などが定量的に評価できる。

シミュレーションとデータ科学については、基礎研究を深める立場よりも、データ科学の力を社会につなげることに注力している。機械学習を活用して、最新物理シミュレーションを新しい未来社会サービスの実現のために利用しようとする立場である。

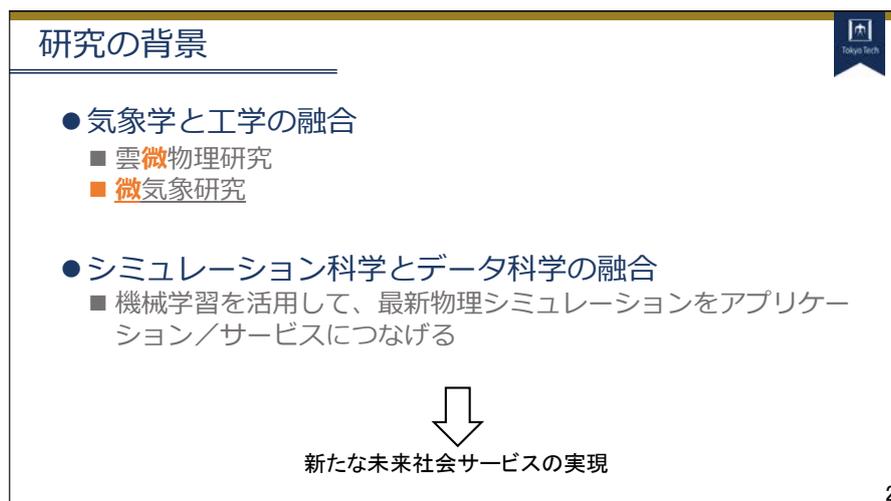


図4-3-1 研究の背景

気象と気候が異なるように、都市微気象は都市気候とは異なる（図4-3-2）。都市微気象は扱いが難しく、流れの観点でいえば、複雑、非平衡、高レイノルズ数の流れになる。従来、気象研究でシミュレーションを行うには小さすぎて対象とされてこなかった。地形は解像度を数メートルまで高めて表現できても、建物までは表現できなかった。一方、従来の土木工学や建築工学の研究でも、このレベルで現実的な非定常風の表現ができないなど、対象になっていなかった。予測の実現は特にチャレンジングだ。新しい観測網として、このレベルになると電柱それぞれに観測機器を付けるようなことが必要になる。実際に電柱一本一本に観測機器をとりつけたいかといえば、やりたいとは誰も思えない。何らかの社会サービスのために備えたセンシング機器から、気象データをセットで得る解決策の方が実現可能性がある。予測を行うための計算についていえば、30分先の都市微気象を行うには、1分毎の予測計算出力が必要になる。これは最先端のスパコン富岳を使っても困難だ。もし、ワークステーションレベルのコンピュータで行うなら、今の1千倍ほどの高速化が必要に

なる。これはAIを融合させて解決させる手段の方が実現可能性がある。このように微気象予測技術開発を通して、基礎と応用、異分野融合、産学連携を進めたいと考えている。

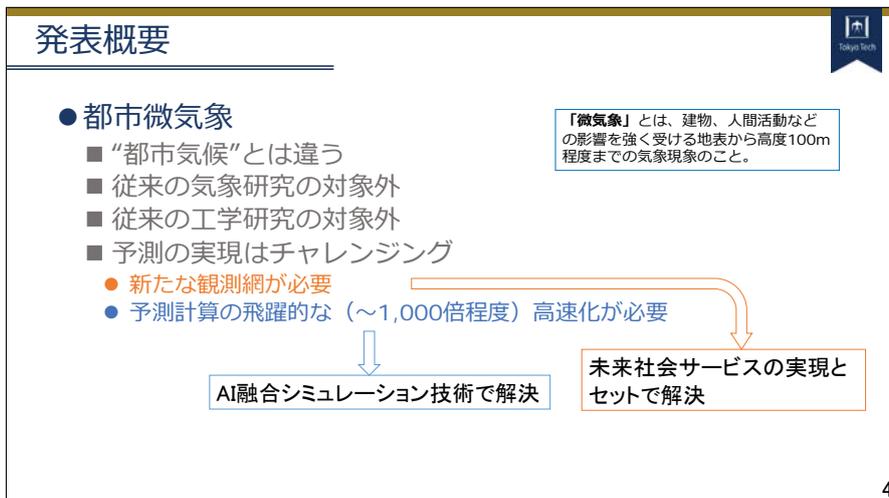


図4-3-2 発表概要

語れる、ということが重要だ。気象分野で有名なリチャードソンの夢で、気象予測の数値計算が1922年になされ、それからほぼ100年たった今、気象数値予測は身近なものになってきている。そのようなチャレンジで気象研究も流れの研究も発展した歴史がある。今こそ、微気象というチャレンジに向かう時期だと考える。

Society5.0の中で未来社会サービスという項目が挙げられている。従来は気象予測が入力で、社会サービスという出力を得るためのものだった。今後、それだけではなく社会サービスから得られるセンサー情報を入力として、微気象予測システムを出力として得ていきたい。すると、社会サービスも微気象予測も循環的に良くなっていく関係だ (図4-3-3)。

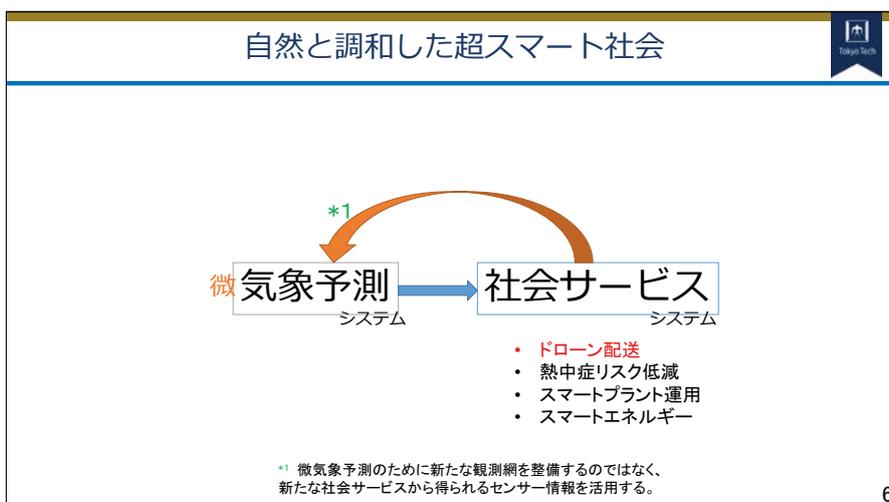


図4-3-3 自然と調和した超スマート社会

これまで、Society5.0のなかで語られてきているデジタルツインは、社会空間をデジタル空間を再現しようという試みが多かった。自然環境も含めてデジタル融合を進めていくことで、微気象予測も高めていけないかと考えている（図4-3-4）。このような目的で図4-3-5に示す科研費「微気象制御学」領域において、本格的に研究を進めている。ご関心頂ければ、図に記したURLで詳細をご参照頂きたい。

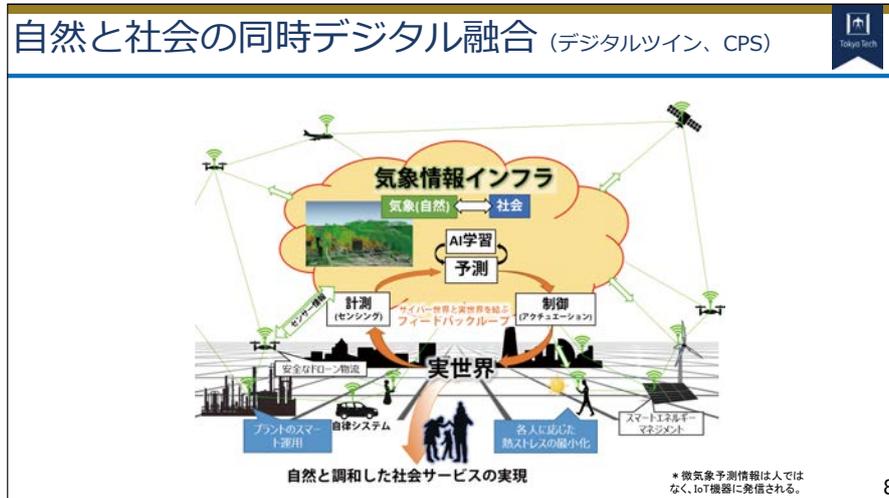


図4-3-4 自然と社会の同時デジタル融合

科研費 学術変革領域(B)「微気象制御学」領域 (FY2020-FY2022)
<https://www.turb.gsic.titech.ac.jp/mmc/>

領域代表: [Logos] 計画班代表: [Logos] 分担・連携: [Logos]

微気象予測を世界に先駆けて実現し、その予測情報に立脚した新たな社会サービスの実現可能性を示すことで、自然科学と社会に新たな変革をもたらす。

想定する社会サービス

1. 【熱ストレス低減】街区内の群集全体と各歩行者が受ける熱ストレスを同時に最小化するルートを実タイムに提案する。
2. 【スマートプラント運用】 Hot Air Recirculation (HAR)発生予測情報を活用して大型プラントを効率的に運用する。
3. 【ドローンの安全運航】
4. 【スマートエネルギー】
etc...

「微気象」とは、建物、人間活動などの影響を強く受ける地表から高度100m程度までの気象現象のこと。

図4-3-5 科研費「微気象制御学」領域で目指すもの

予測シミュレーションの高速化について紹介する（図4-3-6）。私はMSSG（Multi-Scale Simulation for Geoenvironment, メッセージ）という大気・海洋シミュレーションモデルの開発をJAMSTEC在籍時から続けている。MSSGでは都市の街区スケールを立体的にシミュレーションで再現できる。これを使って、図4-3-7や図4-3-8のレベルを目指していきたいが、そのためには高速化しなければならない。深淵教授の講演でも紹介されていたが、我々も超解像技術を使ったシミュレーション技術の開発を進めている。

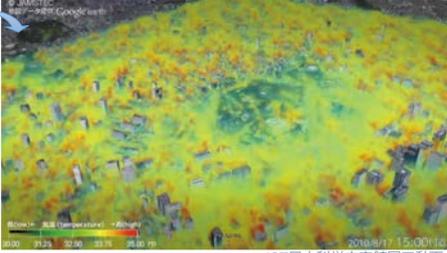
マルチスケール大気・海洋モデルMSSG

Tokyo Tech

MSSG (Multi-Scale Simulator for Geoenvironment) の特徴

- ▶ 全球、領域、都市街区に至る大きくスケールの異なる現象をシームレスに(統一的に)一つのモデルで扱うことができる。
- ▶ 階層・分散型データ同化手法(特許申請技術)に基づく現業予測システムを開発済み。 計算格子幅1~5m

	全球気象現象	領域気象	都市街区気象
空間スケール	10,000km	100~1,000km	1~10km
空間解像度	10~100km	100m~10km	1~10m
時間スケール	1週間~	数時間~数日	数10分~1時間



気象庁による予報の行先
本課題の行先

衛星観測データ
アメダスデータ
IoT観測データ

MSSGの強み

建物、樹木や人間活動の影響を考慮できる建物・樹冠解像微気象シミュレーションが可能

JST日本科学未来館展示動画
(編集加工により全5分を40秒に短縮)

10

図4-3-6 マルチスケール大気・海洋モデルMSSG

想定する“微気象予測”情報

Tokyo Tech

📦 水平 2 km四方、高度200mまでの領域に対する

📐 5mメッシュでの

🕒 30分先までの

🌬️ 気象変数(風、気温など)に関する予測情報

❓ 予測の時空間粒度? 精度?

11

図4-3-7 想定する“微気象予測”情報

【機械学習とCFDの融合を目指した研究開発】 街区微気象のリアルタイム予測

Tokyo Tech

5年後を想定し、計算機性能が10倍程度高速化することを想定した上で、加えてリアルタイム予測の実現には、現状比100~1,000倍高速化が必要

↓

AI・シミュレーション融合技術による高速化

- 深層学習を用いた超解像技術
 - 4倍超解像⇒256倍高速化

予測シミュレーションとAIの協働により、AIが内包する「内挿的」という弱点を克服しつつ、リアルタイム性を確保できる。

12

図4-3-8 街区微気象のリアルタイム予測

4.4 コメントーターからのご意見

藤森 俊郎（株式会社IHI技術開発本部 技監）

本日は、弊社に関わるものづくりと流体、工学、そしてその背後にある科学について話題を提供する。

弊社で扱っている製品には、航空エンジンやターボの回転機械等、流体が設計の根幹に関わる製品が非常に多い。例えば、ロケット推進系では、燃焼やプラズマが関係する。また、火力と船用の内燃機関においては、燃焼、相変化等非常に複雑な燃焼を扱っており、こういった部分の設計には、シミュレーションを使った解析が用いられている。橋に関しても、台風的设计等で流体が関係してくる。海外の長大橋の設計では、風況が100メートルぐらいでも安定に耐えるようなものを造る必要があり、その制御が非常に重要となっている。他には、小型の気象計測装置などを活用して、気象予測のサービスも始めている。

流体が性能に直接影響する製品として、ジェットエンジンが典型的な例として挙げられるので、詳細に紹介を行いたい。

ジェットエンジンの設計においては、燃費、騒音、信頼性等、流体が全てに関わっている。また、ジェットエンジンは、離陸から着陸まで非常に多様な条件を有しており、その全てにおいて限界の設計が求められることから、設計の難易度も非常に高いという特徴がある。

ビジネス上の話になるが、現在の民間のジェットエンジン開発においては、国際共同開発が主流となっている。共同開発という聞こえはいいが、技術競争の世界であって、技術がない企業はシェア獲得が難しい。したがって、企業は、常に最高の技術レベルを追求しなければならない。この分野において、日本は残念ながらプライムではない。国際的に見ると、欧米、ロシア、中国は、基礎から一貫した研究体制が充実していると言える。我々も、国内の研究機関の方々と、大学も含めて一緒に研究を実施しているが、日本で足りないところは海外と共同研究を実施しているというのが実情である。これらは、まさに国の総合力が問われる世界である。

実際に流体に関わる部分としては、空力設計、冷却設計、空力と構造の連成として翼振動等が非常に重要である。また、ジェットエンジンの空力騒音の抑制設計も非常に重要で、マイクロスケールでの現象が大きく影響する。

一つの例として、翼の設計を挙げると、層流翼で乱流遷移の制御が重要であるが、この場合、実機条件での予測精度が重要で、実条件での遷移をしっかりと予測する必要がある。

また、ファンの設計においては、大規模な剥離を防ぎつつ、なおかつ層流翼においては、なるべく層流で抵抗を減らしていく必要があり、この部分で、非常に高度な流体の解析技術が要求される。そのためには、実験の計測データが重要で、この計測データがないと解析精度は上がらない。したがって、実条件に近い場の計測データの取得やシミュレーション検証についても、今後の流体研究に期待したいところの一つである。

機械学習に関しては、翼型設計などへの適用も進みつつある。翼の空力設計は、翼型を設定してCFD（Computational Fluid Dynamic、数値流体力学）解析を行い改良していくのが通常の設計プロセスであるが、非常に多くの例を解析して、逆にCFD解析を行わずに機械学習を用いて、ある程度最初から所定の設計条件を満たす翼型を設計するもので、幾つか成功例がある。このように、流体工学と機械学習の組み合わせも、非常に重要な分野となっている。

もう一つ、流体の計測データの例を挙げる。先ほどの長大橋の橋げたを2次元の断面として、PIV（Particle Image Velocimetry、粒子画像流速計）のデータを取得しているが、この現象を理解するのは非常に難しい。目的は橋の振動を抑えることであるが、従来の平均的な手法では、なかなか現象を捉えることが難しい。そこで、POD（Proper Orthogonal Decomposition、固有直交分解）を使用して、特徴的な流れ場を捉えることで、どういうフラップを造ればどういうことが起こるかというのが大分分かるようになってきた。ただ、こ

れも現状はまだ十分ではなく、こういうデータの解析技術の高度化も、非常に重要となってきている。

反応複雑系の例を挙げると、濡れ性を実際に考慮して、CO₂の回収装置のリアクターの設計を行っている。これは、濡れ性を考慮して、CO₂の吸収液の滞留時間を伸ばして吸収性能を高めるかという制御設計である。充填剤に合う吸収塔の設計を行うことから、マイクロ現象が、全体の大きなプラントのシステムを制御しているという例となる。

燃焼器の開発においても、設計では、燃焼噴霧特性から、燃焼器内の強い乱流場の現象までを考慮する必要がある。燃焼器開発は比較的実験に依存するが、最近のデジタル技術の進歩を活用する設計の進展に期待した。非常に膨大な要素試験の繰り返しを、いかに短縮するかが大きな課題となっているが、こういった部分の設計にデジタル化をどのように取り入れていくかということも、今後の流体研究に期待したい。

現象として流体研究に期待したいところは、やはり非線形の強い流体現象である。特に遷移剥離、非等方性、複合的な現象が挙げられる。対象としては、限界設計、例えばジェットエンジンなどの回転機械と燃焼とか、こういうものに特化してやるというのも一つの方法であると思っている。

データ分析も、現在非常に重要な分野となっているので、今後の流体研究に期待したい。

最後に、流体研究のサイエンスを技術に転化できるような人材が、実際のプロジェクトで出てくればいいなと思っている。

【質疑応答】

C：産業界とアカデミアがどうやって連携していけばいいか、人材育成という視点も含めて、また後ほどの総合ディスカッションの際にいろいろコメントいただきたい。

茨木 誠一（三菱重工業株式会社総合研究所 部長）

本日は、コメンテーターとして、まず企業のニーズについて話したい。先ほど河合教授から紹介があった研究（航空機開発における空力課題の研究）は、我々も参画している。この研究はテーマが非常に具体的で、かつ、出口をかなり意識して内容を計画しているので、非常にいい取組だと思っている。

企業としては、物理現象や基礎原理の解明の部分について、アカデミアの力を借りたいと思っている。特に、解析技術と実験技術が大事だと思っているので、我々が使えるような形で、アカデミア側から技術を提供していただければ、企業にとって一番メリットがあると思う。

欲を言えば、製品の高性能化、信頼性向上等に関して、流体制御に関連するアイデアをアカデミア側から提示いただければ、そのアイデアを形にするのが我々の役目であると思っている。

先ほど話に出た我々が所有している船舶の省エネ運航を実現するMALS（Mitsubishi Air Lubrication System、三菱空気潤滑システム）について言えば、空気潤滑、乱流境界層と気泡の干渉等のメカニズムの詳細は不明な点も多く、エンジニアリング的に検討して、設計に適用している。そういった現象解明に流体研究が繋がれば、企業としては非常にありがたいと思う。

ただし、企業としては、さすがに富岳の解析は直ぐに実設計に使えるレベルではないので、低コストで高速な解析ツールの開発を望んでいる。

また、流体問題だけではなく、流体と熱、流体と構造といったマルチフィジックスの問題や、解析でいえば連成解析が、今後の設計の高度化には不可避であると考えている。それから、各種流体機械製品は、デザイン点、オフデザイン点で運転しており、運転条件の変動や製作誤差などの個品差に伴う不確かさを考えた性能が重要になる。我々としてはUQ（Uncertainty Quantification、不確かさ定量評価）等の分野についても、流体研究がトライするところと考えている。

大規模計算においては、データ転送やデータ処理に負荷がかかるので、そこにインフォーマティクスを使って、的確に注目すべき情報を取り出す技術に我々のニーズがある。

解析コードについて言えば、高精度な流体の解析コードの開発が望まれるが、そういったところを補完するという意味では、データ同化技術や機械学習を使用して、高精度でかつ計算時間が短縮できるような解析手法の開発にも期待したい。特に、時間スケールの長い不安定現象の場合には、高精度な解析コードを使用すると非常に時間がかかるので、低次元のモデルと組み合わせた手法等、時間を短縮できる技術も求められている。

最近の国内の大学の様子を見ると、やはり実験に比べて解析の方が主力になっているのではないかと感じている。しかし、高精度の解析コードを検証するためには、設備面の課題はあるが実験技術にももっと注力すべきであると感じている。

最後に、研究の体制に言及したい。午前中の講演で紹介のあったSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の高効率の内燃機関の開発に関して、熱効率50%を達成したというものであるが、これを成功事例と言うのであれば、これがなぜ成功したのかといったところを振り返ってみてはどうかと思う。やはり具体的な課題に対し、強力なプロモーター、プロジェクトマネジャーがいて、そして、そのプロジェクトをアカデミアが興味を持てるような技術まで細分化して、それぞれで分担していくような、そういったテーマがうまく設定できれば、日本も欧米に近いコンソーシアムのようなものができるのではないかと感じている。

【質疑応答】

C：シミュレーション解析の低コスト化や、富岳を利用したシミュレーション解析は、民間ではなかなか使用できず、一般的なPCでも可能なアルゴリズムの開発や解析手法が必要との重要な指摘をいただいた。

西村 浩一（大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所 マネージャー）

本日は、産業界、特にエネルギー事業者という立場でコメントさせていただきたい。最初のJSTの資料にもあったが、いろいろな社会的な背景の中で言うと、エネルギー業界としては、2050年までに脱炭素社会を実現するという国の目標が設定されたことが非常に大きいと思っている。特に、我々ガス事業者や石油会社は、炭化水素、化石燃料を売ることになりわいにしているので、ビジネスモデルそのものがひっくり返るような話だと思っている。その脱炭素をどうやって実現するかということに関しては、まだいろいろ議論がされているところで、多分何か一つだけではなく、いろいろなものを組み合わせていくというのが答えになると思っている。ただ、その一つとして、再生可能エネルギーをたくさん取り入れていくというのは間違いなくあると思っている。

多分、固定価格の買取制度等で、ここ10年ぐらい、再生可能エネルギーの普及が急速に進み、新幹線に乗っていても太陽光パネルがあちこちにあったり、車で走っていても、大きな風車が立ち並んでいたりというようなことがよくある。しかし、そういう風力や太陽光を大量に導入する際に一番問題になるのは、発電量が天候任せで不安定であり、電気を貯めることができないことから、需要と供給のバランスを取るのが難しくなることだと思っている。実際、電力会社によっては、発電設備に蓄電池を設けて、出力変動を緩和するようにとか、週末は需要が少なくて天気がよさそうなので太陽光の発電をやめるようにとか、そんな要請を実際に出したりしているという状況がある。

したがって、今後は、再生可能エネルギーの発電量を事前に予測することが非常に重要であり、そういう技術を使って出力調整可能な電源を制御することも重要になってくる。我々はエネルギー事業者として、風力や太陽光を保有して運用しているので、そのあたりも取り組んでいる。

例えば風力で言うと、気象庁やヨーロッパの中期予報センターから入手した20キロ解像度の全球モデルのデータを初期条件や境界条件にして、解析エリアを絞って、ダウンスケーリングするというようなシミュレーションを実施し、発電量を予測することを実施している。しかし、これが、実際と予測ではなかなか合わないという実情がある。風力を対象にしているので、実際にうまく再現できていない部分は、おそらく山と谷のような場所であろうと思われる。特に急峻な山岳地の場合、シミュレーションの予測結果が、いろいろな角や複数の角の影響を受けたような、多様なモードが組み合わさったような流れになっていて、現在の技術では、こういった地形の影響を受けた風の流れもきちんと予測できていないということを感じている。どのように予測ができていないかということ自体も、なかなか理解できていない状況にある。

午前中に講演があった深淵教授のCNN（Convolutional Neural Network）を用いた低次元モード分解という技術をこういった部分に適用できると、状況の理解や、それをベースにした予測精度の向上にも生かせるだろうし、計算時間の短縮にもつながって、リアルタイムでの予測も現実的になってくるのではないかと考えている。

大西准教授が先ほど説明されていた微気象モデルについても、まさに気象学と工学の融合という分野で、このあたりと関係してくるところだと思っている。

風力に関して言うと、最近では陸上の適地が減ってきていて、今後日本でも洋上が進んでくると思うが、ヨーロッパと違って日本の海岸は遠浅がほとんどないので、日本では意外と風力発電の居場所が少なさそうである。したがって、日本では、洋上といっても比較的陸地から近い場所で始まるのだろうと思っている。そうなると、今度は陸地地形の影響を受けるので、このあたりも、やっぱり流体力学が活躍するところだろうと思っている。

先ほど、風力の予測を解析すると、うまくいかないと申し上げたが、太陽光の発電の予測も、気象モデルを毎日回して機械学習を組み合わせるという方法で解析を行っている。例えば大阪府内の発電所を幾つか束ねて予測するのは、大体うまくいきそうであるという感触は得ている。しかし、例えば大きな発電所をピンポイントで当てにいくようなことは、まだまだ難しい状況で、この辺は、予測モデルの発展に期待するところである。

もう一つ気象関係でいうと、省エネというのはこれからもますます進められていくことは間違いのないと思う

が、自然採光や自然環境を積極的に取り入れたゼロエミッションビル、ゼロエミッションハウスには、先ほどの微気象モデルの話がすごく関係してくると思っている。

これまで、再生可能エネルギーの話を中心に述べたが、脱炭素に関連するのは再生可能エネルギーだけではない。エネルギー密度や、既存のインフラの活用ということも考えると、代替燃料という話もあるかもしれないと思っている。ガス業界でいうとメタネーションである。水素とCO₂から天然ガスの主成分であるメタンを合成することを検討しているが、これは、再生可能エネルギーで作った水素と回収したCO₂からメタンを作ろうとしているもので、実質カーボンニュートラルというところを目指している。これは、原理としては確立されているが、実際にはこれからスケールアップや効率化のような、新しいプロセスを創成していくエンジニアリング部分に入るので、そういう所にもいろいろと流体解析が活躍してくるだろうと考えている。

今まで、エネルギー関係で流体研究と関係しそうなことを話してきた。これらの経済効果がどのくらいであるか算出するのは少し難しいが、波及効果自体はとても広く、脱炭素へ向けての社会的意義は非常に大きいと考えている。

【質疑応答】

- C : 流体分野の研究を社会システムにどう組み込んでいくかはエネルギーの問題とも共通すると考えている。基礎研究の実用化を目指すに当たっては、どのように社会システムの中に組み込んでいくかを見据えながら、プロジェクトとして推進していく必要があると感じた。

大島 まり（東京大学生産技術研究所 教授）

私からは、医療、特にバイオ分野についてコメントしたい。

本日のWSの話題は流体が中心であるが、医療、バイオの部分も流体が関わっている。医学の分野を考えると、臨床の視点として、部位や機能で分かれていることを考える必要があり、疾患の視点では、その治療に関して経験が中心になって決まることが多い。

一方、研究者の立場で言うと、生体现象はマルチスケールであるということ、現象論が存在すること、例えば、拡散、輸送、移流等に対してきちんとした理論がベースになっていることを考える必要がある。そういうサイエンスがベースになっているということで、日本では、比較的ボトムアップのアプローチが多い。

最近の流れとしては、コンピューターシミュレーションや実験において、医用画像から得られたデータを用いたデータ同化やデータサイエンスの技術が加わっていることが挙げられる。また、臨床から反対にサイエンスということを考えていく流れも最近出始めている。（図4-4-1）

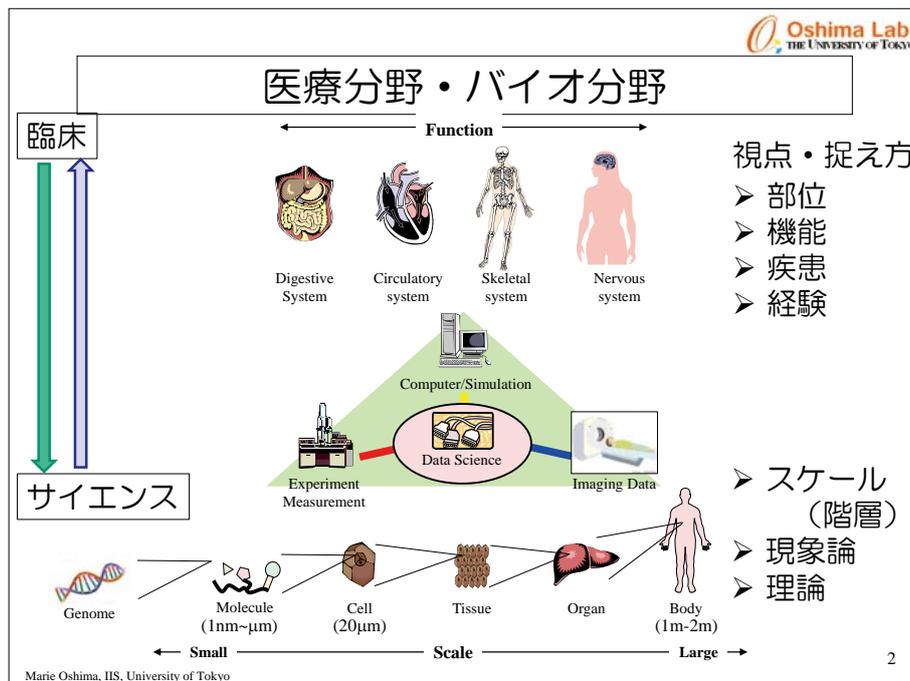


図4-4-1 医療分野・バイオ分野

生体機能を維持するためには酸素や栄養が重要であるが、これらは流体を通して運ばれるので、医療、バイオでは必ず流体が関わることになる。流体としては、血液、脳髄液、リンパ液が挙げられる。例えば脳髄液は、脳圧のコントロールいわゆる血圧コントロールを行っており、制御が複雑に絡んでいる。また、血管が一番大きいもので直径が25ミリ、一番小さいものは5マイクロメートルで、大体9万キロメートルにわたって私たちの体の中に存在している。したがって、血液は、非線形的なマルチスケールであると言える。

また、人体は血液や流体だけで閉じているわけではなく、ここに流体構造や輸送現象、メカノトランザクション的な生理学的なものも関わっており、マルチフィジックス性の特徴を有している。

この分野の課題は、まず第一に明確な理論がないことである。つまり、現象は存在するが、その原理原則が明らかになっていないということである。特に、シミュレーションの一番大きな課題は、シミュレーションを行うにあたり、どのような物性がよいかということもわかっていないことである。一方で、昔から疫学的な調査は行われており、統計的な傾向というのは得られている。

その他の難しい点としては恒常性が挙げられる。例えば心臓は一定の心拍によって伸縮して、血液が送り出し、一定の生理状態を保とうとする調整機能が働く。また、スケールを通した共通性も見られる。例えばドラッグデリバリーシステムでは、ミクロのスケールの輸送現象は、がんや脳動脈瘤など部位に関わらず、現象という面では共通性が高い。一方、血管形状が異なったり、疾患の様子も異なるなど特異性もある。こういった、共通性と特異性を統計的にどう処理するかということも大きな問題となっている。(図4-4-2)



医療・バイオは必ず流体が関わる

- 様々な流体現象が複雑に関連している
 - 血液・脳髄液・リンパ等
 - 非線性なマルチスケール性
 - マルチフィジックス性（流体のみで閉じていない）
 - メカノトランスダクション
- 課題：明確な理論がない（現象の原理・原則が明らかでない）
 - シミュレーションに必要な物性が得られない。
 - 統計的な傾向
 - 疫学調査から特長の把握
 - 恒常性
 - 共通性
 - DSSにおけるミクロスケールでの輸送現象は疾患・部位にかかわらず共通性が高い
 - 個別（血管形状、等）
 - 特異性（疾患の発症、進展）

3

Marie Oshima, IIS, University of Tokyo

図4-4-2 医療・バイオは必ず流体が関わる

部位や疾患を横串で刺してみると共通しているところもある。例えば、袋状の動脈瘤というのは脳にできる。あまり知られていないが、別の部位に、腓アーケードというところがあって、ここにも瘤ができる。これらは環状になっていて、血管の大きさや血流のスケールも、ほぼ一緒であり、曲率も高い。病気になるときは、一部に狭窄が生じて一部の血流に偏りが見られた場合などに、血管に動脈瘤ができやすい。そういう特徴は疫学調査で分かっている。血管の形状に関しても、曲がりの強い人に疾患が起こりやすいこと、それによって起こる流体現象、例えば血流と細胞の関係や血管形状を決める遺伝子も分かっているが、それらはいわば点である。それを全体を見通して横串的に点をつなげていくアプローチする研究というのが、世界的にもまだ進んでおらず、今後どのように俯瞰していくかというのが非常に大事であり、面白い研究につながると思う。

最近、臨床応用が、特に米国を中心としてシミュレーションを通して進んでいる。医用画像から必要な情報を抽出し、シミュレーションを行う際には、データおよび用いている数理モデルより、どうしても不確かさが存在し、不確かさの定量化・不確かさ解析が着目されている。そのような不確かさ解析をすることによって、いわゆる決定論ではなくシミュレーション結果を確率分布で得て、これを診察や手術計画、治療計画に役立てるという手法が新しい解析手法のアプローチとして見られる。

医療、バイオ分野では、医用画像やイメージングデータを多用している。これらの分野における今後の展開としては、分析や画像処理技術をデータ同化として流体に適用していくことが重要になってくる。米国や英国と比較して、日本はこういった部分が少し弱いのではないかと考えている。

また、in vitroやin vivoに関しては、実験データやセンサー情報をどのように使用していくのかも重要である。画像から抽出できるものとできないものがあり、それらを含めてどのように数理モデル化するかという

課題がある。機械学習を使用することにより感度解析が可能となるので、主要なパラメーターを抽出し、それを粗視化したりや低次元化の解析にフィードバックすることで、個別の疾患の診察や手術計画に生かせるのではないかと考えている。

さらに、部位の共通性の抽出と理論化によって、臨床にフィードバックすることも可能である。例えば、ある部位で行っている手術を別の部位に生かすことによって、医療費の軽減につなげることも可能であると思っている。

以上述べた中で、やはり一番大きい課題は臨床応用だと思う。ハイパフォーマンスコンピューターによって、サイエンス的に重要な原理現象を研究することも重要ではあるが、臨床応用を考えたときには、やはり経済性、効率化、ビジュアル化が重要となり、必要な情報を素早くわかりやすく提示することが必要である。

そして、予測やリスク評価も重要である。完全に治る患者さんに関しては、それほどシミュレーション解析やデータは必要ないが、そうでない場合は、安全性を考えた場合のグレーゾーンはどこなのか、この患者さんにはどういいうリスクがあるのかを、データを組み合わせ流体解析に活かしていくことによって解析し、臨床応用へ発展させることも可能であると考えている。(図4-4-3)



医療・バイオにおける今後の展開

- 医用画像およびImagingデータの利用
- in vivo およびin vitroの実験データの利用
- センサー情報
 - 使用可能なデータのデータベース化
 - 画像からの特長抽出
 - 画像から得られない情報
 - ⇒数理モデル化(逆解析、トポロジー、等々)
 - 感度解析 ⇒ 粗視化、低次元モデル化
 - 統計的な特長 + 個別の特長
疾患の特長
 - スケール・部位における共通性の抽出・理論化
- 臨床応用
 - HPCからPCへ(効率化・Visualization)
 - 予測(グレーゾーン、リスク評価)

Marie Oshima, IIS, University of Tokyo
6

図4-4-3 医療・バイオにおける今後の展開

【質疑応答】

C : 医療画像という、今まで触れていなかった視点にコメントいただいた。HPCで詳細な現象を見極めていくことも重要であるが、そこをどうやって一般的に使うのか。その2つの方向を考慮してプロジェクトを進めていく必要があると感じた。

5 | 総合討論

5.1 社会的・経済的効果および研究開発の基盤要素

Q：ここから総合討論に入りたい。我々の資料の中で社会的・経済的効果として3つの社会を想定し、ここに流体分野が非常に貢献してくるのではないかと考えている。午前中に話題提供があったように、抽象化という概念が非常に重要ではないかという点や、クロスポイントをどうやって設定していくのかという点が重要かと思う。例えば、生体内での渦を可視化していくことに対し数学的アプローチが非常に有効であり、気象分野など他の分野への波及効果が高いという話があった。例えば、このような研究開発課題として進めていくべきだというコメントをお願いしたい。

A：数学の立場から言うと、どの分野にも課題はある。例えば、本日はUQという共通のキーワードが出てきたが、数学の研究者が言うUQと現場で扱っているUQは、同じ言葉だけでも違うことを指している場合があり、それがどうやって上手く溶け込むかというところが恐らく課題であった。どういう問題を解くというより、数学は理論提供側であり、数学的なアイデアを提供し、摺り合わせが上手くできる仕組みができるとよいかと思っている。

産業や気象への応用でも、今まで専門家が見ていないところを見る、という見方を変えるところに数学的アプローチの強みがあると思う。流体の専門家が今まで大事だと思っていたところではないところに、実は大事なポイントがあるという発見ができたことが実はトポロジカルデータ解析の一つ肝になっている。客観性がある部分は数学の売りでもあり、同じものを見ているが、違う目で見える場が用意できるとよいと考える。

C：UQと言っても、流体側から見ると、数学側から見ると、チームとして一体的に取り組む必要がある点は具体的な研究開発課題として記載していきたい。

Q：海外の大学の応用数学研究者と共同研究を実施されているということで、例えば国際協力あるいは共同研究の必要性についてコメントいただきたい。

A：何か国際的な共同研究ができないか、という問い合わせは様々な研究者から結構ある。日本でプロジェクトを実施したときに、海外の研究チームとも共同研究できる枠組みがあってもよいかと思う。

国内だけで研究が閉じているという点は、やはり言語の問題が大きいと思う。サイエンティフィックあるいはテクニカルなものにおける言語の問題というより、いろいろな書類仕事における言語の問題が大きく、そこまで研究者が対応するには時間的な制約もある。具体的なアイデアはないが、何か上手く仕組みを考えなければいけない。例えば、海外のプロジェクトは、レビューの段階で海外の研究者に依頼する。私自身も何回か引き受けたことがあるが、英語で全部できないというハードルをどうにか上手くやらなければいけないという感じがする。個人研究者レベルではできると思うが、国のプロジェクトレベルとしてもその点の検討は必要かと思う。

C：我々も何か拠点を作った際に、それが入口となって海外機関との連携を進めていかなければならないと考えている。しかしその受け皿になるようなプロジェクトが日本側にはない点は、ひとつ大きな問題かと考えている。

C：補足すると、今は状況として難しいが、海外の研究室から博士課程の学生を受け入れて、何年か一緒に研究を実施するという形があると、研究が加速する。今日紹介した研究内容も、修士課程の学生が1年間アメリカへ行き、それによって進んだところがある。いろいろな知見を得て研究が進むだけでなく、ネットワーク的にも広がり、人的交流も非常に大事であると思う。

Q：拠点を作り、プログラムディレクターを配置しなければならないという点も、本日ご指摘いただいた。この分野を長期的に、俯瞰的に見る立場の方がまず必要であろうということ。そうすることによって、流体分野に閉じた形ではなく、その周りに広がる関連分野の研究者たちと共同研究が進展することがあると思うが、その点にコメントをお願いしたい。

A：先生方がおっしゃられるキーワードを伺って感じた点としては、例えば燃焼のDNSについて、計算ができる場所で全部解析をするというのは、研究室ではやり切れないところが出てくる。例えば、本当に吟味したDNSであれば、もう標準データと言える。例えば医療の側から出てきた、あるいは実験で出てきたデータはプロジェクトの中で共有するという形で、プロジェクトメンバーがアクセス出来るようにし、共通のプラットフォームを作る。HPCなどでは、経産省も含めてオープンソースが進んでおり、コードを国際間で交換しながら研究者間で進めている。このようなことを非常に複雑な流体という分野にも広げることによって、例えば、気象の分野だと非常に少ないデータでこういうことが処理できるといったような、いろいろな分野で発達している方法が違う分野に適用できるようなことができるのではないか。そういうプラットフォームはなかなかないと思っている。

C：何らかの共通のプラットフォームを作っていかなければならないという点をご指摘いただいた。

C：プログラムディレクターを中心とした姿の話で、プログラムディレクターに期待されるものは皆さんが議論された通りでよいと思うが、人がアサインされて単に行うのでは多分難しい。HPCIの富岳のプロジェクトでも文科省と相談をしているが、課題が孤立しているのも、それを横断的に見て、外積（クロス）みたいなことを考えるにはやっぱり人が必要であるということ。そこに立場だけではなくて人を付け、予算を付けるという形を作らないといけないと思う。一方で、ここに優秀な研究者をアサインすることはもったいない気もする。片手間ではできないので、専念もしくはクロスアポイントでかなりの時間を費やさなければ、期待したような成果が出てこないのではないかと思うところが難しい。

Q：拠点の中に産業界、あるいは学会という言葉も書かせていただいたが、学会、大学、産業界を有機的に繋げていく仕組みが必要かと考えている。この点について、産業界の方からコメントをいただければと思う。

A：この仕組みで、産業界は少し外側に書かれているが、一番先端の分野を扱っている。先程聞いた話の中でも、相当感度の高い技術者であれば興味が高いテーマもある。そのようなところにも産業界が入ることができる仕組みの方がよいのではないかと思う。また、拠点の中に書かれている風洞プラットフォームについては、日本はバリデーションのデータが極めて少なく、これをきちんと取る体制の構築が必要である。例えば噴霧燃焼と噴霧のような、バリデーションになるようなデータは、相当なりソースをかけないと取れない。これは分散してできないため、どこかに集中して、日本でもきちんとしたバリデーションデータを取る。それがあって、周辺の解析などのレベルがぐっと上がると思う。そういう集中させるところに上手く産業界も交えた体制を作るとよいと思う。

- A : 産業界ももちろんいろいろ関わっていけるような形で進めていただけたらと思う。午前中のコメントのところで、最終的に産業界でも利用可能なものを構成則に落とし込んでというご発言があったと思う。そのような活用先のイメージも含めて、産業界から早い段階で入っていくことが大事かと思う。
- Q : 先のイメージを、アカデミアと企業で共有していくことが非常に重要である、とのご発言だが、今はなかなかそのような場がないということか。
- A : 個別にはいろいろと取り組んでいるが、本日も話を聞かせていただいて、知らない話も多くあることを改めて思った。流体分野は関わっている研究者の先生方も多く、このような機会に産業界も含めて議論できる場があるというのはとてもよいと感じた。
- A : 拠点のイメージについて、今ひとつ理解できていない部分がある。特定のプロジェクトを作って、このような体制でやるというのか、それとも流体力学の研究プラットフォームを常設するイメージなのか。
- C : その点は説明していなかったが、永続的というよりも、ある程度の期間限定で、ただしかなり長いスパンで何か設置できればと考えている。まず一つとしては、今示しているような体制が取れないかという点、またその中で人を集めただけではうまく動かないという点が本日これまでの話を伺いながら思ったところである。そのため、具体的な研究開発課題案をいくつか挙げている。例えば、乱流だけでなく複雑流体等にも合わせて進めていくことやマルチスケールの問題など、いくつかまとまった形で取り組む必要があるのではないかと我々として考えている。
- A : 企業はどうしても製品開発をして事業を実施していくところが目的になる。基礎研究と企業の応用研究や製品開発とがあまりにも離れてしまうと、先程の体制の中に企業はなかなかうまく入り込めないのではないかという印象を持つ。企業にもメリットや魅力のある具体的なテーマ設定が必要ではないかと考える。また、その上で、やはり企業側から拠点側に人材を派遣するなどの工夫が必要かと思った。プロジェクトマネジメントという意味では、企業の人間の方が、もしかするとうまくマネジメントできるかもしれない。
- C : いわゆる競争領域と非競争領域、非競争領域をうまく線を引くことは結構難しい。例えば乱流モデルなどであれば、共通のリソースという形で非競争領域としてつくり、企業がこれをどのように応用させていくかに取り組む。企業が参画するには、この辺の作り方が結構重要になると思う。
- C : ご指摘のように協調領域をどのようにセッティングしていくかは非常に重要な視点である。例えば、乱流と複雑流体の話で、最初にお話しいただいた反応性流体についても、気体側で研究の蓄積があり、それを液相側にも広げていくことが必要だということ、個別にお話ししたこともある。このような部分の協調領域、もしくはアカデミアが主体となって進める課題など、何かコメントいただけないか。
- A : 燃焼工学と、例えば化学工学といった分野との対比も有用かと思う。両分野の特性が違うので、今のところあまり一般的ではないような感じがする。化学工学の場合、プラントだとプラントに特化された方法があり、その中でも特定の問題について技術が最適化している感じがする。燃焼の場合、例えば、ノッキングや噴霧という大きな課題があり、それぞれ異なる問題を抱えている。しかし、スケールを本当に小さくすると、店橋教授が行われているように、音まで全部含めて、気体燃焼の場合は完全にもう解けているものがある。これらを出し合うと言うことが可能であれば、非常に意味がある形で共有できることもある感じがする。また、今回の話では、HPC自体のハードあるいはソフトウェアの話はあまり出てこなかったと思う。午前中に梶島教授がおっしゃったラグランジュ的ということがずっと引っか

かっている。量子計算機がアメリカではもうかなり使われ始めていて、プロジェクトも進んでいる。例えば、燃焼における化学反応を解くとき、化学反応機構を作るわけだが、基本的にアレニウスの式で作られている。しかし第一原理で化学反応機構を作ってくるグループがどんどん伸びてきている。これと同時に、量子計算機による計算も大事になってきている。量子計算機を使っている例として、Gaussianという市販ソフトの中には既に量子計算機用プログラムが入っている（IBMQ⁸等による計算が始まっている）。そうすると、確かにオイラー的な方法にはなじみが悪いのだが、ラグランジュ的な方法を採用することも考えると、流体分野の研究者も「量子計算機、まだできていないよね」というスタンスだけでは、もういられないのではないかという感じがしている。

C：企業の方は気を悪くするかもしれないので、あらかじめ断っておくが、製品や技術としての国際協力を保つため、リードするためにやることは山ほどあると言われても、完成度の高い段階から大学で基礎研究に取り組むことは、労多くして得るものはそれほど多くないと思われる。例えば、乱流モデルがまだまだだと言われても、我々大学は学生や若い人を育てながらの研究であり、大学院生を乱流モデル研究の最前線のスタート台に立たせるのは難しい。また若い研究者にこの研究だけで30年いけるとは言えない。やはり我々は人材育成が使命であるので、その目的が達成されるようなプロジェクトでなければならないと思う。

過去の代表的なプロジェクトとして上手くいった例は、1980年代半ばに始まった数値流体力学の重点領域研究であった。それはスーパーコンピュータの発達ぶりを横で見れば、この分野はこの先まだまだいけるなという段階であり、背景としてそういう環境があった。今の状況を考えると、量子コンピューターなどはまだまだ海のものとも山のものも分からず少しリスクがあるかもしれないが、これから発達するようなハード、あるいはソフトでいえば機械学習かもしれないが、そういう方向とリンクしたようなプロジェクトがよいのかと思う。

C：大学としては学生を育てることが第一使命ではあるが、乱流モデルに今さら挑戦するよう学生には仕向けていくという点については、先ほどの文脈からいけば十分あり得るのかなと私自身は思っている。乱流モデルは一回停滞したけれども、今こそできることがあるかと考えている。

C：少し訂正すると、スタート台までのハードルが高いのは単相乱流の研究のことを指している。

Q：何か2つの軸をつくってクロスポイントをつくるというのも、まさに大事な点である。皆さんから出てきたように、データベースをつくるというのは、今まで日本の弱みでもあったと思う。せっかくなのでシミュレーションがたくさんあっても、なかなかそれが表に出てこなかった。ひとつには、一生懸命つくられたコードをなかなか外に出したくないということもあったのではないかと思う。これからは、もうそういう時代ではないと思っている。非常に優秀な混相流のコードがあり、我々がそれをまねしようと思うと、つくだけで数年かかり、学生は卒業してしまう。その辺を思い切ってシェアしていくという時代の流れになるのではないか。

A：個人的には、論文化したらもうオープンなので自作コードを研究室に囲っておくつもりはないのだが、やはりこれまでの国プロでつくったようなコードは難しい。事業として継続するには、幾つか試みられたことはあったが、メンテナンスなどの問題がある。また、世界でメジャーになっているようなコードは、やはり商売の仕方が違う。学術的な意味でのコードの共有とは違い、やはりビジネスモデルの問題で

| 8 IBM Quantum, <https://quantum-computing.ibm.com/> (2021年3月1日アクセス)

はないかという感じはする。

- C : ジョンズ・ホプキンス大学のデータベースも、データ側にサイエンティストが参画し、彼らは彼らの仕事となっている部分があるのでうまく進んでいる部分があると思う。HPC側からの試みはどの程度進んでいるのかは分からないけれども、今このチャンスで、富岳を契機にして、そういう人を巻き込んで、シミュレーションしている側の人々とデータ管理している人々が一緒になり進めることが必要ではないかと思う。我々もデータを出してもいいけれども、メンテナンスまでは多分難しいので、そのような問題をクリアすることによって、人のつながりも生まれ、分かりやすい目標になるのかと思った。
- C : アメリカも、ドイツやフランス、イギリスも、そのデータセットをきちんと持っていることが、ある意味での自分たちの国力や産業競争力となっている。また、産業として、飛行機などいろいろなものを造っており、そのバックデータをきちんと持っていることの重要を認識している。ところが日本の場合は、国としてそれをきちんと維持するという姿勢がなく、各大学の先生方任せになっている。また、国のプロジェクトがあっても、その後、つくったコードを維持しないという問題が出ているのではないかと思う。これは流体分野だけではなくて、他の分野でも起きている問題で、それについても今回取り組みができればと思う。アメリカの商業用ソフトなども、基本的に国が買い上げて、そのバックグラウンドがしっかりしている。それ以上の深いデータについては、それに基づいていろいろなソフトができており、公開しない。その辺を打破したいと思っているが、大学の先生方は、これまで自分たちで進めてきて、自分達が持っているコードなどに対してどうお考えか。
- C : 私が使っているようなコードは大したコードではないが、そういう体制があれば、もちろんやりがいにもつながるかと思う。
- C : 私の方でもソースのオープン化やデータのオープン化を考えてはいるが、メリットとデメリットを考えたときに、なかなか前に進めないというところがある。デメリットとしては、もちろんメンテナンスもあるし、また自分自身らがせっかくなつくたものを出して、それをそのまま取られて、さらに発展させられて、どんどん抜き去られていくというのが心配であるということもある。公開して、知らない間にどこか知らない人が勝手に取って、自分のものだと何か言い始める可能性もある。アメリカのジョンズ・ホプキンス大学など有名な大学の先生が出したら、それはそれだけで価値があり、ちゃんとクレジットも残っていくかもしれない。しかし、それほど有名じゃない人が出したものは、クレジットが埋もれていってしまうという心配もあり、なかなか出しづらいのではないか。そういうときに、何かしらのプラットフォームがあり、それを公開しても身近なところで開発を続けてくれる人材であったり、使ってくれる企業があったりすると公開しやすいのではないかと思う。
- C : データベースとしてのプラットフォームをどのようにするか、オープン化しておく部分と、クローズドで進めていく部分とが必要であり、燃焼学会のプラットフォームと近い形かと思う。
- C : 私は、京のプロジェクトで、世界最速の流体構造連成手法の開発に携わった。それを臨床現場など様々な用途に使えるようにしたいと思って研究をしてきた。一方プロジェクトでは、国の方からどんどんソフトウェアを公開して、みんなが使うようにするよう言われ、一生懸命コードの説明などを書き、公開して使えるようにした。しかし、メンテナンスが大変であり、開発した現場の人たちが博士研究員からいろんな大学へと移って行って、結局、作成したソフトを実際に役立つものとする仕事よりは、プログラムを改良していくだけの下働きのような仕事ばかりが増えていった。例えば、ヨーロッパのオー

プラットフォームなどはそのようなソフトを維持するためのしっかりした体制や組織があり、企業が組んで維持できるような形になっている。研究者任せで維持をしてくださいというのは無理がある。自分たちでつくったコードを使ってもらうのはいいが、使った後に対して細かく対応することは難しいので、そういったところから考えなければならぬ気がする。

それから、もう一つついでにコメントすると、明らかに世の中が脱炭素だとなっている中で、本当に全て燃焼がなくなるのかどうかということを考えてときに、燃焼そのものが、二酸化炭素のイメージに結びついてしまって、研究としてその方向の研究は必要ないようなイメージを持たれてしまっている。脱炭素へ向けて取り組みとしても、まさしくその部分は、流体を使った応用技術として本質的に重要な部分であり企業の方も参画するのであれば、機械工学の熱流体系の研究テーマとしては、脱炭素社会に向けた燃焼技術のあり方こそが極めて重要だと考える。世の中一般的に少しネガティブな雰囲気を持っている燃焼で、本当に何ができるのかということの本気で議論して、企業も組んで取り組んでいく。本当にこれから日本は何をやっていかなくてはいけないのか、世界の見かけ上の潮流に流されないようなきちっとした議論を流体関係者と一緒にやっていくというのが一番重要なことではないだろうか。

- C : データベースに関しては、国レベルで買い上げて、きちんとメンテナンスしてくれるような枠組みができるということであれば、それはよいと思う。もちろんデータの質にもよると思う。例えば、データだけ見てすぐ使えるようなデータというのであれば、そのような形は合っているのではないかと思う。私自身も、恩師（故人）が1990年ぐらいに集められたデータベースを今、管理しているが、ほとんど管理する時間がなく、更新も止まっている。そのため、そういう仕組みがあるとよいと思う。一方、ただ単にデータだけがあってもなかなかうまくいかないものもあり、例えばDNSコードなどでありこれは公開していない。かなりの勉強、経験が必要というものに関しては公開していない。また、それらの中間にあたるのが、例えば、機械学習のPythonコードなどである。勉強している人であれば少し読めば分かるようなコードは今、公開している。データやそのコードの性格にもよると思う。
- C : 燃焼プラットフォームは私も少し絡んでいた。コード自体はFrontFlow/redという国のプロジェクトで開発されたもので、それをベースにソフト会社が、いろいろな大学の先生が開発された燃焼モデルなどを組み込んでいった。そのプロジェクトのメンバーだけが使える、商業化したコードをどう扱うか（お金を取る・取らない等）、著作権自体は先生の方にある、などを分けした。基本的には、コード自体のメンテナンスはそのソフト会社がやっていくので、コード自体は存続するという状態がしてくれる。そのような方法もあるかと思う。
- C : 燃焼学会のプラットフォームは、非常に参考となる部分かと考えている。
- C : プラットフォームで他分野と一緒に議論する場をつくるといったときに、何か一つターゲットを決めると、その分野だけに偏ってしまい難しいとも思う。マルチスケール現象の難しいところは、やはり計算・実験も含めて高精度な参照データがないということである。マルチスケール現象の高精度なデータベースとデータ科学の融合で、自分たちが今までの経験で、統計的に理解していたり構造的に理解していたりするものを、また違ったアプローチで理解できないかということが探求できないだろうか。そこから、例えばモデリングや簡易モデルができると、いろいろな分野の人が話をする場にはなるのかと思う。具体的なターゲットを与えてしまうと、同じ方向にしかベクトルが向かない印象を持った。
- C : いろいろな分野で研究している人が一緒になることはとても大切だと思う。しかし自分自身もマルチスケールという単語を使っているが、マルチスケールという言葉だけが躍っているように思う。もっとい

いろなタイプがあり、マルチスケール・マルチフィジックスという物理的な話だけではなく、いろんなレベルで階層の統合というのがある。それをやることはとても大切であるが、もしきちんとやるとするならば、流体研究者がコアとして本当に何か一つ貫いたほうがいいのではないかと思う。特にマルチスケールや階層の複雑な問題になると、標準プラットフォームの上に付け足したものが結局、それぞれの問題で特有の問題になっていく。共通プラットフォームをつくるだけだと、なかなか実際にフィードバック、社会に還元できるようなものになっていかないと思う。やはり具体的なターゲットを決めて、そのターゲットに向けて「本気でやる人たち、手を挙げて」と言って進める方がよいと考える。その中でもシステムとしてつくろうと思うと、マルチスケール性や階層性は必ず出てくる問題である。

C：フレームワークとしては共通という話があったので、具体的な研究課題を乱流に偏らず、流体自体が複雑な場合も含めていった方がよいと考える。

C：個人的には、その辺は今後かなり進む分野だということは確信がある。分子シミュレーションの方も、全分子で解くような計算がされている。我々がマクロからやってきたものと、ようやく本当の意味でつなぐ時代がやってくるのではないかと感じている。

C：乱流と並ぶような形で複雑流体を書いていくことが重要かと考える。

C：私自身、医用系・バイオ系を中心としている。乱流、レイノルズ数が大きい部分の研究は進んでいると思うが、いわゆる層流から乱流への遷移領域（トランジション領域）はあまりない。例えば、乱流モデルもトランジションを扱っているものがあまりなく、医療分野でも信頼性の高い数理モデルがない状態である。トランジションや非ニュートン流体、粘弾性なども流体と結構関わっているが、そういうものの実験もあまりない。CFDとEFDの融合は記載されているが、そういうのも少しあると、バイオ方面の発展にも繋がるのではないかと思う。

もう一点追加して、検証と妥当性の確認（V&V）について、以前はよく標準データとセットで、ベリフィケーション・バリデーションができた。最近の問題自体が複雑になっていることもあるが、あまりやられていない。例えば、生体の場合には、乱流でなくても非常に複雑な形状によって生じる剥離や渦構造がどうなっているか、そしてそれらが壁面せん断応力などにどのような影響を与えているか、比較的大きな観点となってきた。それに使えるような、検証データや標準データというのはあまりない。そういうのも少し含めてもよいかと思う。

C：日本は実験に強みが明確にあると思っている。例えばSIPやその後のAICEで研究している自動車のエンジンのことだが、例えばノッキングということを取り出す際にも、実際にエンジンの形で研究を行うと競争領域になる。しかし、ある種簡単な形状の入れ物の中でノッキングを見るところについては、そろそろ本当に可能となってきた。そうすると、これが標準の実験、標準のDNSということがそろそろ言える状態になってきている。その背景として、HPCを研究している若手研究者は、マイクロソフトのGitHubでどんどんコードを交換して、それを使っていることがある。仕組みづくりがやっぱり早いし、驚くほどオープンである。日本でやろうとすると、安全をきっちり考えて、問題が絶対に起きないように形になる特徴がある。世界的な潮流や自然発生的にそういう生態系が発展していく状況、あるいはフランスのAVBPなどの運営方法は参考になると思う。

必ずしも全部の分野ではなく、ターゲットの基準データが設けられるところは設ければよい。そうでなければ、逆に何か標準的なDNSを1つ出して何かを見ていく、あるいはそれを適応できるかどうかのために題材を募ることがあってもよいかと感じた。

5.2 研究開発の推進方法および研究開発の時間軸

- Q：ここから議題を変えて、研究開発の推進方法および時間軸を議論する。長期的な形での人材育成とデータベース構築が2本の大きな柱かと考える。また、推進方法としてはこのような拠点を設定し、他の大学ともネットワークを組みながら進めていくことが非常に重要かと思う。まず日本流体力学会の座談会～流体力学の未来 Fluid Mechanics2030～に関連して、コメントをお願いしたい。
- A：人材育成は大事であるということは将来ビジョンにも議題としてたくさん挙がっている。違う観点から述べるとワーキンググループでは、流体というものがビジブルに名前として外部に出てきていないところが大きな問題と捉えている。また、人口減少する中で留学生や男女関わりなく学んでもらえるように、人材育成を柱として掲げるのであれば、プロジェクトレベルでよいのでアウトリーチしていくことが、この分野の維持とか発展に最終的には繋がるのではないかという話があった。
- C：ご意見は、狭義の人材育成委ではなく、広義の人材育成や社会との接点が重要なことと捉えた。
- A：留意点として人材育成にはいろんな観点がある。今までのJSTの人材育成の対象はポストドクが中心だったと思う。他方で学部生や小中高まで広げる、他の観点ではアカデミアに閉じず、リカレント教育や企業も含めるということもある。今回はどの層を対象にした人材育成であろうか。
- Q：ご指摘については、我々のチームで明確にできていなかった。まずは研究者・技術者育成につながる博士課程の学生がターゲットとなるだろうが、産業界、さらには小中高も含めていく必要があると考える。
- A：その場合には、文部科学省の数学分野における人材育成が参考になるであろう。数学は、一時期、人材も含めて日本が非常に遅れているということで、産業界も交えて数学の人材育成を検討した。
- C：ご意見は今後の技術戦略プロポーザル作成において参考にする。なお、今回の趣旨説明で応用数学との連携の必要性を示した。
- A：ただ、数学には純粋数学や応用数学があり、それぞれディシプリンが異なる。今ここで議題になっている流体分野も、理学系や機械系、航空や産業界とあり、やはりディシプリンが違うところもあるので、そこを含めてどうやって人材育成していくかというのは一つ重要な観点と思う。
- Q：補足すると、JSTではアウトリーチを一定程度行っている。CREST、未来館などでシンポジウムや一般向けのイベント等を実施している。また海外では、NSFがアウトリーチに注力している。学部生への教育に対してファンディングの一部を割く、中高の先生に対してリテラシー教育を行う、技術者に対しての教育など。これらがファンディング採択の際の評価基準になっている例もある。人材育成としてここを押さえるべきというコメントがあれば、ぜひお願いしたい。
- A：問題点として日本の数学教育が優れているのは大学受験までである点。重要なことは応用数学によって分野が活性化される側面もある。しかし、現状では学部づくりが対応していない。例えば昔は英国で応用数学といったら流体力学というぐらいに近い分野なので、流体科学を介しながら、産業界と

基礎的な研究者が非常につながりやすい領域となっている。日本の今の大学システムでは新規に学部を設立することは困難である。そのため、その分野の拠点作り、そこをベースに人材育成することが考えられる。一つの大学という狭い組織ではなく、卓越した研究者が大勢集まる拠点においてオンラインで講義を行い、単位認定もできるようにすると、各大学の著名な先生方に応用数学の講義をしてもらうというのも可能である。ここまで含めた取り組みができれば、もっと違った展開があると思う。

- C：参考として海外での取り組み事例（英国）でも、人材育成は3大学が大きな責任を担っている形である。
- C：討論内容を含めて総括するならば、流体力学の（広義）概念を適用できるような、普遍的な考え方、または考え方が広がるよう立案してはどうか。教科書的には、流体とは気体や液体の総称であって、固体とは区別されるというような書き方をしているが、流体力学をやっていれば誰でも知っているように、氷河や地殻ですら流体力学の対象になっている。ということは、流体というのは、気体や液体に限らず、それらを含む物質の挙動を力学的に記述するためのひとつの概念であり、物質や状態のことではないと私は理解している。例えば人の流れも流体力学として扱おうと、感染源を特定するような全く新しい方法、有効なものができるかもしれない。気体、液体という意味での流体が関わっている対象を探すばかりではなく、流体力学の概念を適用できるような対象を探していくというような広げ方、つまり物質の捉え方を記述する概念が、気体、液体に限らず、もっと普遍的な考え方であることを意識しておく、もう少し流体力学そのものが広がるようなプロジェクトになると考えている。
- C：EPSRCのプロジェクトでもそこまでフォーカスされているように捉えている。包括していくプロジェクトのつくり方が非常に重要だと思い、ご意見に感謝する。

6 | まとめ

本ワークショップでは、複雑な流れ現象に関わる流体科学分野（流体工学・流体力学およびその周辺分野）を俯瞰し、我が国における研究状況や今後進めるべき研究開発課題・推進体制について、次の2点をテーマとして議論を行った。

- ①複雑な流れ現象の普遍的な原理等の解明、高度な予測、統合的制御を可能にする、実験・シミュレーション・理論・機械学習を連携した研究推進体制の構築と研究要素
- ②サイエンスとしての流体科学とエンジニアリングとしての流体工学を統合させ、イノベーション創出や出口ニーズに繋がる研究開発課題とそれらの社会的・経済的インパクト

第一部では①のテーマに対し、本対象領域でどのようなアプローチ・体制で研究開発を進めるべきか、今、挑戦すべき課題について発表・議論が行われた。主な論点は以下の通りである。

- ・複雑な流れ現象は以下の2つに大きく分かれる。

(A) 流体自体は単純だが流れが複雑なもの（乱流）

(B) 流体自体が複雑なもの（複雑流体：混相流、非ニュートン流等）

これらに対しては、大型コンピューターによる高解像度の乱流シミュレーションや分子シミュレーションによるデータ取得、高解像度実験によるデータ取得などが進み、いずれも研究の質的転換期にあると言える。今後数年で、機械学習等のデータ駆動型アプローチとの融合により、複雑な流れ現象の本質的な理解が進展することが予想される。今、まさに取り組むべき課題である。新しい学理の創成と産業応用への基盤となるモデル構築とが両輪で進展する形が理想的である。

- ・流線トポロジー解析という数学的アプローチと機械学習を用いたアプローチについて具体的な事例共有があった。機械学習を用いたアプローチに関しては、先駆的な研究からいくつかの成果が得られており、より本格的かつ一体的な取り組みが必要であることが確認された。またその際に、機械学習が適応できない部分を、数理モデルで補完することや、流れの中の情報を共通言語化する数学的アプローチの有効性が確認された。

- ・トポロジカルデータ解析とその流体解析への応用

画像データから意味ある情報を抜き出すことと、流れの中にある潜在的な知識を抽出することが、データ科学のボトルネックとなっている。流線トポロジー解析（TFDA）は“トポロジー”を利用した新しいデータ解析手法で、絵でしか説明できなかったものを「共通言語」として表現できる。文字列表現は数学的に証明されており、遷移予測が可能である。「流れ」は流体だけのものではなく、ベクトル場として表される対象であればよく、医療・気象・海洋・産業方面への共同研究に繋がったことから、適用例はかなり広い。

- ・機械学習を乱流に適用した研究成果事例

機械学習で低次元化した流れのダイナミクスの予測、オートエンコーダによる低次元化によるモードの解釈、低解像度データから高解像度データへの補完、限られたセンサ情報から場全体を推定など、様々な適用事例が紹介された。今回紹介した事例は、基本的にフィッティングであるが、機械学習は単なるフィッティングを超えて、①本質的な物理現象の理解、②流れ予測のための計算コスト・データ量削減、③制御理論・

最適化理論との融合による流れ制御の最適化、これらを達成する強力なツールとなる可能性が非常に高い。現時点では基本的に限られた流れを対象にしており、混相流・非ニュートン流体・複雑な流れ等で検証する必要がある。

- ・二つの異なる方向性をもつ外積的な考え方である「クロス」という概念を用い、どこに「クロスポイント」を設定するかが重要である。その際に、明確なターゲット設定と学術的新規性を見出しが重要である。今、本対象領域で設定すべき「クロスポイント」はAI（情報科学）であるが、AIの使い方をよく考える必要がある。
- ・具体的な数多くの研究成果の個別目標実現にとどまらず、具体的な応用や個別の流れ現象を対象にする研究と、そうした現象や事例を数多く包含する研究とに分類できる。本対象領域において、「具体」研究と「抽象」研究の両者と、それらの相互作用を促す制度設計が肝要である。

第二部では②のテーマに対し、本対象領域における航空・環境・バイオ・気象分野の研究動向等について以下の知見を得ることが出来た。

- ・内層乱流モデリング（理論的アプローチ、データ駆動型アプローチ、融合アプローチ）、「富岳」を用いた航空機全機壁面モデルLES解析（航空）
- ・気泡流の多重スケール構造解析（応用先：下水道処理プロセス、船舶の抵抗低減技術、エアリフトポンプによる揚鉦・揚泥技術、心筋梗塞のメカニズム解明と薬効評価）（環境・バイオ）
- ・AI融合シミュレーションによる微気象の調和的予測技術の開発とドローンを用いた微気象の能動的観測技術の開発との連携（気象）

総合討論では、普遍的な現象理解・理論が確立されていない非線形性の強いマルチスケール現象が、イノベーション創出・出口ニーズのキーとなることが確認された。そのためには高忠実かつ詳細な流体データベース構築が不可欠であることが指摘された。データベースを構築し、それを共通リソースとした非競争領域を設定し、乱流モデルの構築を目指すことは、産業界にとっても参画しやすい形である。ただし、価値のあるデータベースを構築するためには、幅広い流体分野に渡る研究者を束ねる力量が求められる。またデータベースの構築と管理や維持は、研究者が片手間で担える業務ではなく、専任の技術者など専門のチーム体制を組み、継続的に運用していく必要性が指摘された。

推進方法としては、各大学・学会・産業界との分野横断的なネットワークを形成することが、まず取り組むべきこととして挙げられた。当該分野は裾野が広いが、細分化している現状があり、本分野の転換期を迎えた今がネットワークを形成する最良の時期である。関連分野との接点や社会問題との接点を意識した対話を重ねながら、ネットワークを活性化させていくことが重要である。そのネットワークの中では、実験・理論・数値計算・機械学習に一体的に取り組むこと、「豊富なデータから構成則の構築」という抽象化したテーマに取り組むことや、そのための高忠実かつ詳細な流体データベース構築と人材育成を2本柱とすることが必要であるとの共通認識を得ることが出来た。また、機械学習を単なるツールとして利用するだけでなく、機械学習の発展への貢献や、さらには数学分野の発展への貢献を意識して取り組む必要がある。拠点化もしくはコンソーシアム化については、5年程度後の実現を見据えながら推進することに対し、一定の共感を得ることができた。

最後に、本領域は2050年カーボンニュートラル社会実現や安全安心な社会の構築に向け、国としての中長期的な視点からの支援が不可欠であるとともに、本領域を長期的に俯瞰できるプログラムディレクターの必

要性も指摘された。

本ワークショップを通じて得られた各種の知見・情報や議論内容については、戦略提言を目指す今後の調査活動の参考にするとともに、その他のCRDSの各種活動にも最大限活用していく予定である。

付録

付録1 プログラム

(敬称略)

時間	内容
10:00-10:20	開会挨拶、趣旨説明 JST-CRDS
10:20-12:00 (100min.)	<p><第一部></p> <ul style="list-style-type: none"> ●テーマ: 複雑な流れ現象の普遍的な原理等の解明、高度な予測、統合的制御を可能にする、実験・シミュレーション・理論・機械学習を連携した研究推進体制の構築と研究基盤要素 ●話題提供者 (ご発表10分+質疑応答5分): 75分 <ol style="list-style-type: none"> (1) 東北大学流体科学研究所 丸田薫 所長・教授 (2) 大阪大学大学院基礎工学研究科 後藤晋 教授 (3) 東京工業大学工学院 店橋護 教授 (4) 京都大学大学院理学研究科 坂上貴之 教授 (5) 慶應義塾大学理工学部 深湯康二 教授 ●コメンテータ (コメント5分): 15分 <ul style="list-style-type: none"> ・東京理科大学工学部 藤井孝藏 教授 ・大阪大学大学院工学研究科 梶島岳夫 教授 ・東京大学生産技術研究所 長谷川洋介 准教授 ●全体を通じた質疑応答: 10分
12:00-13:00	<休憩>
13:00-14:00 (60min.)	<p><第二部></p> <ul style="list-style-type: none"> ●テーマ: サイエンスとしての流体科学とエンジニアリングとしての流体力学を統合させ、イノベーション創出や出口ニーズに繋がる研究開発課題とそれらの将来の社会的・経済的インパクト ●話題提供者 (ご発表7分+質疑応答3分): 30分 <ol style="list-style-type: none"> (1) 東北大学大学院工学研究科 河合宗司 教授 【航空宇宙】 (2) 東京大学大学院工学系研究科 高木周 教授 【環境・バイオ】 (3) 東京工業大学学術国際情報センター 大西領 准教授 【気象】 ●コメンテータ (コメント5分): 20分 <ul style="list-style-type: none"> ・株式会社IHI 技術開発本部 藤森俊郎 技監 ・三菱重工業株式会社総合研究所 茨木誠一 部長 ・大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所 西村浩一 マネージャー ・東京大学生産技術研究所 大島まり 教授 ●全体を通じた質疑応答: 10分
14:00-15:30 (90min.)	<総合討論>
15:30-15:35	閉会挨拶 JST-CRDS

付録2 ワークショップ参加者リスト

<WS参加者> (敬称略、五十音順)

茨木 誠一	三菱重工業株式会社総合研究所 部長
大島 まり	東京大学生産技術研究所 教授
大西 領	東京工業大学学術国際情報センター 准教授
河合 宗司	東北大学大学院工学研究科 教授
梶島 岳夫	大阪大学大学院工学研究科 教授
後藤 晋	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
坂上 貴之	京都大学大学院理学研究科 教授
高木 周	東京大学大学院工学系研究科 教授
店橋 護	東京工業大学工学院 教授
西村 浩一	大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所 マネージャー
長谷川 洋介	東京大学生産技術研究所 准教授
深淵 康二	慶應義塾大学理工学部 教授
藤井 孝藏	東京理科大学工学部 教授
藤森 俊郎	株式会社IHI技術開発本部 技監
丸田 薫	東北大学流体科学研究所 所長・教授

<JST-CRDS 検討チームメンバー>

佐藤 順一	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット 上席フェロー	※チーム総括責任者
長谷川 景子	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	※チームリーダー
東 良太	JST-CRDS 連携担当/ICTユニット フェロー	
小林 容子	JST 戦略研究推進部ICTグループ 主任調査員	
竹内 良昭	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	
徳永 友花	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	
福井 弘行	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー	
松村 郷史	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	
山神 成正	JST 監査・法務部 研究公正課 調査員	

<傍聴登録> ※2021年1月7日時点 (敬称略、順不同)

對崎 真楠	文部科学省 研究開発局環境エネルギー課 専門官
三村 麻智	文部科学省 研究開発局環境エネルギー課 専門職
穂谷野 訓子	文部科学省 研究開発局環境エネルギー課 係長
辻本 吉廣	文部科学省 研究開発局環境エネルギー課 行政調査員
中田 希衣	文部科学省 研究開発局環境エネルギー課 行政調査員
粟辻 康博	文部科学省 科学技術・学術政策局 企画評価課 新興・融合領域研究開発調査戦略室
嶋林 ゆう子	JST 戦略研究推進部 調査役
高橋 邦明	JST 戦略研究推進部 副調査役
中神 雄一	JST 戦略研究推進部 副調査役
安藤 利夫	JST 戦略研究推進部 専門職
黒木 彩香	JST 戦略研究推進部 主査

西岡 大輔	JST 戦略研究推進部	主査
勝田 博志	JST 戦略研究推進部	主任調査員
勝又 康弘	JST 戦略研究推進部	主任調査員
土屋 朋信	JST 戦略研究推進部	主任調査員
中村 亮二	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット	ユニットリーダー・フェロー
尾山 宏次	JST-CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
沼澤 修平	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
眞子 隆志	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
宮下 哲	JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
チームリーダー	長谷川 景子	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
チームメンバー	東 良太	フェロー	(連携担当/ICTユニット)
	小林 容子	主任調査員	(戦略研究推進部ICTグループ)
	竹内 良昭	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	徳永 友花	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	福井 弘行	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	松村 郷史	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	山神 成正	調査員	(監査・法務部 研究公正課)

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2020-WR-14

複雑な流れ現象の解明と統合的制御

令和3年3月 March 2021

ISBN 978-4-88890-728-6

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>