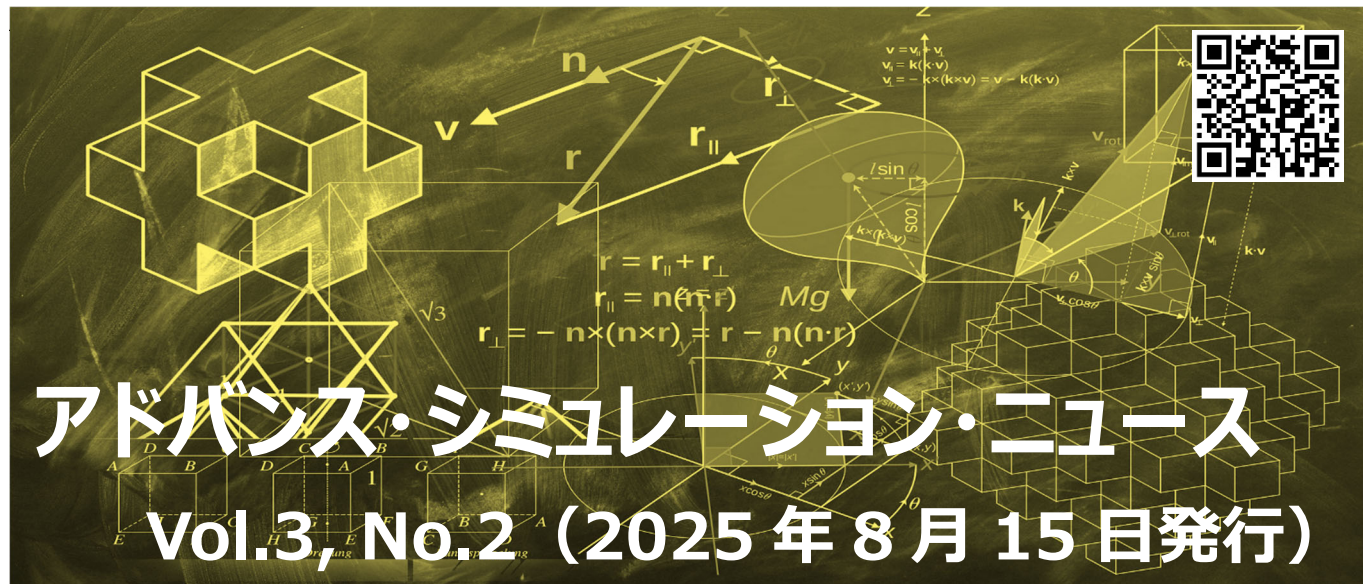




第2回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告

東京理科大学 理学部 第一部 応用数学科

准教授 犬伏 正信 様

「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」

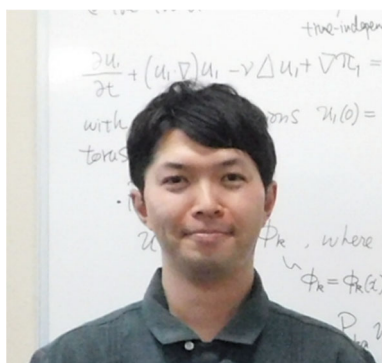
アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2025年6月13日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

流体乱流の理解と予測・制御は、幅広い工学分野において重要である。近年の研究動向の一つとして、乱流中の小規模構造が大規模構造の運動に隸属する「同期現象」が注目されている（Inubushi et al., 2023）。この現象は、数値シミュレーションを用いた予測の精度向上のために観測データを活用する「データ同化」手法によって調べられており、乱流の数値シミュレーションや機械学習モデルにおいても重要な役割を果たす（Matsumoto, Inubushi, and Goto, 2024）。本講演ではこれらの研究動向を紹介し、今後の展望について議論したい。



本稿は、2025年6月13日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2025」において、犬伏 正信 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. データ駆動と同期現象による数理的説明

本研究の根底には、流体シミュレーションに代表される、極めて高い計算コストを要する科学技術計算上の課題がある。特に、無数の渦が複雑に絡み合う乱流現象の直接計算は、スーパーコンピュータをもってしても膨大な時間を必要とする。このコストを、計算精度を維持したまま劇的に削減することは、工学的な応用はもちろん、学術的にも「非線形問題のロージャージャー問題」として知られる根源的な難問に挑むことと等しい。この課題解決のアプローチとして、近年目覚ましい発展を遂げているのが、機械学習やデータ同化に代表される「データ駆動型手法」である。しかし、これらの手法は強力である一方、なぜうまく機能するのか、そしてその性能の限界はどこにあるのか、といった原理的な理解は未だ十分に進んでいない。本研究では、このブラックボックスに「力学系

理論」、特にカオス理論の視点から光を当てることを目指す。具体的には、一見すると無関係に見える複数のシステムが、互いに影響し合い、あたかも一つのシステムのように振る舞う「同期(シンクロナイズーション)」という現象を、統一的なキーワードとして用いる。

例えば、冒頭で示された動画は、本研究の射程を象徴している。これは、観測によって得られた解像度の粗い乱流のデータから、データ同化という手法を用いて、本来の姿である高精細な渦構造をリアルタイムで復元するデモンストレーションである。これは、観測可能な大きなスケールの情報が、観測不可能な小さなスケールの情報を決定づける、一種の「スケール間同期」が起きていると解釈できる。本稿では、この同期現象という数学的な枠組みが、リカレントニューラルネットワークによる時系列予測や、乱流のデータ同化といった異なる問題の核心に共通して存在することを示していく。

1.2. RNN と一般化同期

時系列データの予測やモデル化に強力な性能を発揮するリカレントニューラルネットワーク (RNN) の動作原理を、同期現象の観点から解き明かす。ここでは、RNN の特定フレームワークである「リザーバーコンピューティング (RC)」を具体例として取り上げる。RC は、入力層から中間層 (リザーバー)、およびリザーバー内部の結合重みをランダムに生成・固定し、リザーバーから出力層への結合重みのみを学習対象とする点に特徴がある。学習が出力層の線形回帰のみで完結するため、計算コストが極めて低いにもかかわらず、しばしば高い性能を示す。

この RC の成功の背景を説明する上で、「一般化同期」という概念が極めて重要となる。一般化同期とは、二つの力学系、ドライブ系 (駆動系) とレスポンス系 (応答系) が存在し、レスポンス系がドライブ系から一方的に駆動される状況を考える。このとき、十分な時間が経過した後、ドライブ系の状態 x が決まると、それに応じてレスポンス系の状態 y が関数 $y = \varphi(x)$ のように一意に定まる現象を指す。つまり、二つの系の間に安定した関数関係が構築される状態が一般化同期である。これを RC の文脈に当てはめてみる。予測対象である物理現象 (例: 乱流) のダイナミクスをドライブ系、その観測データを入力として受け取る RC の内部状態 (リザーバーの状態) をレスポンス系と見なす。このとき、両者の間で一般化同期が成立していると仮定する。すると、予測対象の現在の状態 x_t と、リザーバーの内部状態 r_t との間に、 $r_t = \varphi(x_t)$ という関数関係が成立していることになる。RC の学習とは、まさにこの未知の関数 φ を介して、入力 x_t から望みの出力 (例えば、未来の状態 $x_{t+\tau}$) を得るための変換を、出力層で近似するプロセスに他ならない。RC が機能する根源には、このような力学系としての同期メカニズムが存在するのである。

1.3. 同期理論に基づくニューラルネットの改良

前章で述べたように、リザーバーコンピューティング (RC) の学習プロセスは、予測対象の系とリザーバー状態との間に同期によって生じる関数関係を、

出力層で近似する行為と解釈できる。従来の標準的な RC では、出力層はリザーバー状態の線形和で表現される。これは、近似対象である複雑な非線形写像を、テイラー展開における定数項と 1 次の項のみで近似していることに等しい。しかし、この写像が真に線形である保証はなく、むしろ非線形であるのが一般的である。したがって、線形近似は RC の表現能力に原理的な限界を課していると考えられる。

この理論的考察に基づき、本研究ではより高次の近似を可能にする手法を提案する。具体的には、出力層の計算にリザーバー状態の 2 次の項 (二次形式) を導入する。これにより、近似対象の写像をテイラー展開の 2 次まで捉えることが可能となり、表現能力の向上が期待できる。重要なのは、学習パラメータ (重み) に対しては依然として線形であるため、学習は線形回帰の枠組みで高速に実行できるという RC の利点は維持される点である。

この提案手法の有効性を検証するため、カオス力学系の代表例であるローレンツ方程式の時系列予測タスクで数値実験を行った。その結果、従来法と同じ、あるいはより少ないニューロン数のリザーバーであっても、提案した二次形式 RC は予測誤差を大幅に低減した。短期的な予測精度のみならず、長期的な軌道が描くアトラクタの形状 (統計的性質) の再現性においても、従来法を圧倒する性能を示した。これは、同期現象という力学系的視点からの考察が、ニューラルネットワークのアーキテクチャ設計に有効な指針を与えうることを実証するものである。

1.4. 乱流のデータ同化とスケール間同期

本稿の後半では、テーマを乱流現象に移し、データ同化の背後にある同期現象を解析する。データ同化とは、気象予報などで実用化されている技術であり、物理法則に基づく数値モデル (方程式) と、まばらで不完全な観測データを逐次的に融合させることで、システムの真の状態をより正確に推定する手法である。乱流における中心的な課題は、観測によって捉えることが可能な大きなスケールの流れの情報から、直接観測することが困難な小さなスケールの無数の渦構造をいかにして再構成するか、という点にある。この問題は、大きなスケールの流れが小さなスケールの流れの振る舞いを支配している、という一種の同期現象として捉えることができる。大きな流れを「ドライブ系」、小さな流れを「レスポンス系」と見立てるのである。

この仮説を検証するため、「連続的データ同化 (Continuous Data Assimilation)」という手法を用いた。これは、シミュレーションを行う際に、観測データが得られている低波数 (大きなスケール) の成分を、常に観測値で上書きし、残りの高波数 (小さなスケール) 成分をナビエ-ストークス方程式に従って時間発展させるというものである。

三次元乱流の数値シミュレーションを用いた実験の結果、極めて興味深い事実が明らかになった。それは、データ同化の成否が、観測データの解像度、すなわちどこまで細かいスケールの情報を観測できるかという「観測窓」の広さに依存するという点である。この観測窓がある臨界値よりも狭い場合、再構成誤差は減衰せず、同化は失敗する。しかし、観測窓が臨界値を超えて広がると、誤差は劇的に、かつ指数関数的に減少し、やがて観測不可能なはずの微細な渦構造までが正確に復元された。この臨界点の存在は、大きなスケールが小さなスケールを一方

的に決定づける「スケール間同期」が、ある条件のもとで成立することを明確に示している。

1.5. 同期の理論的解明とモデル構築への応用

データ同化における同期現象の成功が、観測解像度の臨界値に依存することが示されたが、なぜその臨界値で成否が分かれるのか、そのメカニズムを理論的に説明する必要がある。この問いに答えるため、本研究では「条件付きリアプノフ指数」という指標を計算する理論的フレームワークを構築した。リアプノフ指数は、カオス系において初期値のわずかなズレが時間とともにどれだけ指数関数的に増大するかを示す指標であり、正の値は予測不能性を意味する。条件付きリアプノフ指数は、観測データという「条件」のもとで、誤差がどのように振る舞うかを定量化するものである。

提案したフレームワークを用いて乱流のナビエ-ストークス方程式からこの指数を計算したところ、観測窓が狭い領域では指数は正の値を取り、誤差が増大して同化が失敗することを示した。一方で、観測窓を広げていくと、ある点で指数が負に転じる。これは誤差が指数関数的に減衰し、同期が成立することを意味する。そして、この理論計算によって得られた指数がゼロを横切る臨界点が、前章の数値実験で観測された臨界値と極めてよく一致した。これにより、データ同化の成否を、力学系理論に基づいて定量的に予測・説明することが可能となった。

さらに、この同期の知見は、機械学習を用いた乱流の低次元モデル構築にも重要な示唆を与える。少ない計算コストで乱流をシミュレートするモデルを構築する際、どこまでのスケールを正確に解き、どこからモデル化するかというカットオフの決定が重要となる。実験の結果、このカットオフを同期の臨界点付近に設定すると、モデルが数値的に発散することなく安定し、かつ物理的にも妥当な結果を生成する確率が劇的に高まることが判明した。これは、スケール間同期が成立する領域でモデルを閉じることが、安定なモデル構築の鍵であることを示唆している。結論として、RNN と乱流データ同化という異なる応用分野の問題が、「一般化同期」という共通の数学的構造によって統一的に理解され、その理解が手法の改良や性能限界の解明に直結することが示された。

1.6. 聴講における感想（アドバンスソフト）

昨今、AI は万能の技術であるかのような錯覚を伴った希望的な発言を耳にすることがある。本講演では冒頭に、AI や機械学習は決して万能ではないが、技術そのものは年々着実に進歩していることが強調された。そのような限界を正しく認識し、完全な再現が困難であるという前提に立ったうえで、「ではどこまで可能なのか」「どの程度の精度が期待できるのか」を把握することが重要であるという指摘は、極めて本質的である。

内容は非常に高度であったが、今後これらを的確に理解し、自社ソフトへの応用を通じて日本のモノづくりに貢献していきたいと強く感じた。

【ご経歴】

2008 年 東京工業大学 工学部卒、2013 年 京都大学 大学院理学研究科 数学・数理解析専攻 博士課程修了（博士（理学））。NTT コミュニケーション科学基礎研究所 研究員、大阪大学 大学院基礎工学

研究科 助教を経て、2021 年より現職。東京大学 生産技術研究所 リサーチフェロー、ケンブリッジ大学 応用数学理論物理学科 客員研究員（2024–25 年）などを兼務。

【ご研究内容】

専門は、流体力学・力学系理論・データ科学。

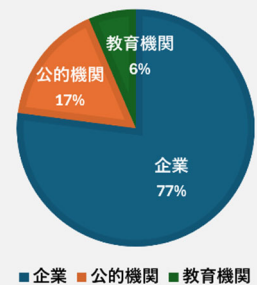
参加者のご意見

申込者は 163 名、当日の参加者（視聴者）（社外）は 109 名でした。参加者（視聴者）の内訳は、企業が 84 名、公的機関が 18 名、教育機関が 7 名でした。主な業種は、「自動車/自動車部品」、「電機/精密機器/IT 機器」、「材料/素材」でした。

主な職種は、「研究/開発」でした。

セミナー後のアンケートは、67 名からご回答いただきました。満足度の平均値は 10 点満点中 7.7 と高評価をいただいております。「関連論文を読んで理解を深めたい」という前向きなコメントも寄せられ、参加者に新たな視点や知見を提供し、研究や実務における今後の探究に大きなヒントを与える貴重な機会となりました。講演資料や参考文献のご提供についても多くの要望が寄せられており、今後の学びの一助となることを期待しています。

参加者の所属機関



公開資料

今回のご講演の YouTube 動画は非公開です。

ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧ください。



2024 年度に開催したセミナーの各記事を一つにまとめて、24 ページの冊子として発行いたしました。全 10 回分の記事を一度にご覧いただけますので、ぜひお手元にてご一読いただけますと幸いです。



2025 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2025 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/33224/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	5 月 30 日 (金) 終了	「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授 堀田 英之 様	磁気流体力学 ・ HPC
第 2 回	6 月 13 日 (金) 終了	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 東京理科大学 理学部 第一部 応用数学科 准教授 犬伏 正信 様	データ同化、 機械学習
第 3 回	7 月 18 日 (金) 終了	「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様	火災・爆発 災害現象
第 4 回	8 月 1 日 (金) 終了	「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」 文部科学省 研究振興局 参事官 (情報担当) 付 計算科学技術推進室 室長 栗原 潔 様	政府の 科学技術政策
第 5 回	9 月 12 日 (金) 受付中 お申込みはこちら 	「量子技術を活用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」 九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門 准教授 久谷 雄一 様	流体理工学、 量子演算
第 6 回	10 月 17 日 (金) 受付中 お申込みはこちら 	「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 桑名 一徳 様	火災科学、 燃焼理論
第 7 回	11 月 7 日 (金) 受付準備中	「(準備中)」 東京科学大学 情報理工学院 情報工学系 准教授 大上 雅史 様	調整中
第 8 回	12 月 19 日 (金) 受付準備中	「(準備中)」 東京大学 情報基盤センター スーパーコンピューティング研究部門 教授 中島 研吾 様	調整中

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目 3 番地 新お茶の水ビルディング 17 階西

TEL : 03-6826-3971 FAX : 03-5283-6580 E-mail : office@advancesoft.jp

<https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

Copyright © 2025 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.