



令和3年6月17日

流れの渦が情報処理能力の鍵 ～バーチャルな物理リザバー計算で実現～

金沢大学理工研究域数物科学系の野津裕史教授，東京大学大学院情報理工学系研究科情報理工学教育研究センターの中嶋浩平准教授の共同研究グループは，**新規情報処理技術である物理リザバー計算（※1）を，数値シミュレーションを用いてバーチャルに再現することにより，円柱周りの流れ現象における渦が情報処理能力の鍵であることを明らかにしました。**

近年，新規情報処理技術のひとつである物理リザバー計算が注目されています。これは，リカレント・ニューラル・ネットワーク（RNN，※2）の学習法的一种であるリザバー計算の物理実装版で，物理系を巨大な RNN と見立てて計算を実装し，主要な演算を物理リザバーである物理系のダイナミクス（重力，風力といった物理的な現象で生じる物体の動作）にアウトソースします。通常の学習で用いられる逆伝播による重みの最適化は不要で，少ない計算資源かつ瞬時に最適化可能という長所を持っています。ただし，その情報処理能力は物理リザバーの能力次第であるため物理リザバーの調査・最適化が重要です。更には，高い情報処理能力を持つ物理リザバーの設計の際には，数値シミュレーションによる実験コスト（物理実験の試行回数，条件の数，設備材料費など）の低減が期待されます。水や空気などの多様で複雑なパターンを示す流れ現象は興味深い物理系ですが，数値シミュレーションによるバーチャルな物理リザバー計算や情報処理能力の調査は，その比較的高い数値計算コスト（数値計算に要する時間，メモリなど）から実現されていませんでした。それゆえ，流れ現象で生じる渦と情報処理能力の関係も未知でした。

本研究では，流れ現象のひとつで，物理系で伝統的によく研究されている円柱周りの流れを空間2次元の数値シミュレーションによってバーチャルに実装し，流速と圧力のダイナミクスを物理リザバーとして用いました。流れの特徴を示すパラメータであるレイノルズ数（※3）の値を変化させた結果，円柱後方に形成される双子渦が大きくなるに従って情報処理能力が高くなること，および，渦が最も大きくなり，渦が交互にできるカルマン渦へと遷移する直前のレイノルズ数において最も高い情報処理能力を持つことを明らかにしました。また，カルマン渦はそのままでは情報処理能力が低いこともわかりました。

今回得られた流れの渦と情報処理能力に関する知見は，将来，流れを用いた物理リザバーの情報処理能力を引き出す際に活用されることが期待されます。

本研究成果は、2021年6月17日（日本時間）に英国物理学会出版局（IOP Publishing）から発行されている『*New Journal of Physics*』のオンライン版に掲載されます。

【研究の背景】

近年、新規情報処理技術のひとつである物理リザバー計算が注目されています。これは、RNNの学習法的一种であるリザバー計算の物理実装版で、物理系を巨大なRNNと見立てて計算を実装し、主要な演算を物理リザバーである物理系のダイナミクスにアウトソースします。線形で時間に依存しない出力部分（リードアウトの結合部分）の重みを調節するだけでよく、いわゆる逆伝播による重みの最適化は不要なため、少ない計算資源かつ瞬時に最適化可能という長所を持っています。ただし、その情報処理能力は物理リザバーの能力次第であるため物理リザバーの調査・最適化が重要です。さらに、高い情報処理能力を持つ物理リザバーの設計の際には、数値シミュレーションによる実験コストの低減が期待されます。

物理リザバー計算のよく知られた例としては、ソフトマテリアル、フォトニクス、スピントロニクス、量子などが挙げられますが、近年、「波」が注目されはじめ、非線形波を用いることで脳の働きを模擬したニューロモーフィック・デバイスが提案されています（参考文献 [1-3] 参照）。水や空気などの流れは身近にありながら多様で複雑なパターンを示す物理系であり、高い情報処理能力を潜在的に持っていると考えられていました。しかしながら、数値シミュレーションを用いた流れ現象のバーチャル物理リザバー計算や情報処理能力の調査は、その比較的高い数値計算コストから実現されていませんでした。それゆえ、流れの渦と情報処理能力の関係も未知でした。

【研究成果の概要】

本研究では、物理系として流れ現象、特に伝統的によく研究されている円柱周りに生じる流れを考えました。この物理系は、流れを扱う上での方程式である非圧縮ナビエ・ストークス方程式（※4）によって支配されることが知られており、また、系の特徴を示すパラメータであるレイノルズ数を含んでいます。安定化ラグランジュ・ガレルキン法（※5）を用いた空間2次元の数値シミュレーションによってこの物理系をバーチャルに実装し、円柱後方に選んだ点における流速と圧力のダイナミクスを物理リザバーとして使い、NARMAモデル（※6）などで情報処理能力を評価しました（図参照）。なお、上流からの流れの摂動を入力として与えました。

円柱周りの流れでは、レイノルズ数の値が大きくなるにつれて、円柱後方に形成される双子渦が徐々に大きくなり、やがて渦が交互にできるカルマン渦へと遷移することが知られています。本研究において、双子渦が最も大きくなり、カルマン渦へと遷移する直前のレイノルズ数において、最も高い情報処理能力を示すことを明らかにしました。つまり、カルマン渦に遷移する前においては、双子渦の大きさが大きくなるに従って、情報処理能力が高くなります。一方で、カルマン渦に遷移すると、リザバー計算の再現性を保証するエコ・ステート・プロパティ（※7）が破れるため、カルマン渦はそのままでは計算に使えないことが明らかとなりました。

【今後の展開】

今回得られた流れの渦と情報処理能力に関する知見は、近年報告された波を用いたニューロモρφック・デバイスが拡張された場合など、将来、流れを用いた物理リザーバーの情報処理能力を引き出す際に活用されることが期待されます。本研究では、流れ現象は比較的数値計算コストが高いにもかかわらず、空間2次元の数値シミュレーションによってバーチャルに物理リザーバー計算を実装したことによって、物理的にわかり易い巨視的な渦を扱うことを可能とし、渦と情報処理能力の関係を明らかにしました。これまでは1次元系によって記述される物理系が比較的多かったバーチャル物理リザーバー計算ですが、空間2次元以上の物理系に拡張されました。本研究成果をきっかけに、より広範囲の物理系について、その情報処理能力がバーチャルに調査されることが予想されます。また、渦が情報処理能力の鍵であることを明らかにしたため、渦を作り出す、あるいは維持するための研究がより推進されることが期待されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「数学・数理科学と情報科学の連携・融合による情報活用基盤の創出と社会課題解決に向けた展開」研究領域（研究総括：上田修功）における研究課題 JPMJCR2014「力学系理論に基づく物理リザーバー計算能力の強化」（研究代表者：野津裕史）、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」研究領域（研究総括：國府寛司）における研究課題 JPMJPR16EA「界面をもつポリマー流体の3次元挙動の数理解析」（研究者：野津裕史）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業 基盤研究（B）JP18H01135「粘弾性流体に特有な渦の数理解析」（研究代表者：野津裕史）、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発/次世代コンピューティング技術の開発」における研究課題「未来共生社会にむけたニューロモρφックダイナミクスのポテンシャルの解明」※東京大学のみ の支援を受けて実施されました。

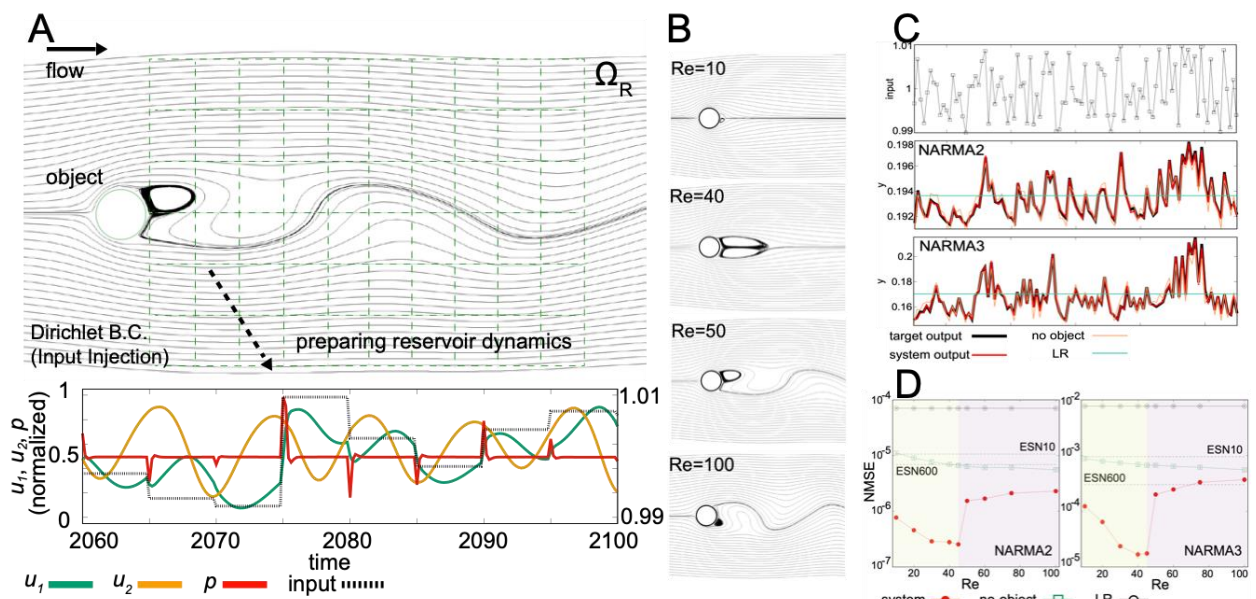


図. (A) 本研究の概要図。(B) 各レイノルズ数の典型的な流れ。(C) 時系列の入力および NARMA2, NARMA3 モデルの結果。黒：ターゲットの値, 赤：渦を用いたバーチャルな物理リザバー計算による値。(D) NARMA2 および NARMA3 モデルでの, 各レイノルズ数に対する誤差 (NMSE) の値。レイノルズ数が 40 前後で誤差が最も小さい。

【掲載論文】

雑誌名 : New Journal of Physics

論文名 : Twin vortex computer in fluid flow
(流れの双子渦コンピュータ)

著者名 : Ken Goto, Kohei Nakajima, Hirofumi Notsu
(後藤健, 中嶋浩平, 野津裕史)

掲載日時 : 2021 年 6 月 17 日 (日本時間) にオンライン版に掲載

DOI : 10.1088/1367-2630/ac024d

【用語解説】

※1 物理リザバー計算

リカレント・ニューラル・ネットワーク (RNN, ※2) の学習法の一つであるリザバー計算の物理実装版。物理系のダイナミクス (物理リザバー) を巨大な RNN と見立て, これを用いて主要な演算を行う。演算をアウトソースするため, 少ない計算資源かつ瞬時に最適化可能という長所を持つ。

※2 リカレント・ニューラル・ネットワーク (RNN)

回帰型ニューラル・ネットワーク, すなわち, 中間層の出力がそれ自身あるいは別の層の入力にもなっているニューラル・ネットワーク。

※3 レイノルズ数

ν を流体の動粘性係数 [m^2/s], U を速度 [m/s], L を代表長さ [m] として $\text{Re} = UL/\nu$ [-] で定められる流れの慣性力と粘性力の比を表す無次元数。

※4 非圧縮ナビエ・ストークス方程式

膨張・収縮しない流れの速度と圧力に関する (偏微分) 方程式。

※5 安定化ラグランジュ・ガレルキン法

有限要素法の数値解法のひとつ。非圧縮ナビエ・ストークス方程式に対して、慣性項にラグランジュ座標を用い、流速と圧力の近似に区分線形要素を用いて離散化し、圧力安定化を施した陰的な有限要素法。移流に関して強靱、比較的少ない数値拡散、対称行列という特徴がある。

※6 NARMA モデル

入力を伴う非線形の時系列モデルで、非線系移動平均自己回帰モデルの略称。NARMA2 では、現在と1つ前の時刻の値および入力値によって次の値が定まる。NARMA3 では、もう1つ前の時刻での値および入力値にも依存する。

※7 エコ・ステート・プロパティ

現在のリザーバーの内部状態が、過去の入力のみ依存する関数として表現されるという性質（初期値に依存しない）。結果として、この性質を持つリザーバーは、異なる状態からスタートしたとしても、同じ入力を与え続けるとやがて同期する。

参考文献：

- [1] Marcucci, G., Pierangeli, D., Conti, C., Theory of neuromorphic computing by waves: Machine learning by Rogue Waves, Dispersive Shocks, and Solitons, *Phys. Rev. Lett.*, 125, 093901 (2020).
- [2] Silva, N. A., Ferreira, T. D., Guerreiro, A., Reservoir computing with solitons, *New Journal of Physics*, 23, 023013 (2021).
- [3] Hughes, T. W., Williamson, I. A., Minkov, M., Fan, S. Wave physics as an analog recurrent neural network. *Science Advances*, 5, eaay6946 (2019).

【本件に関するお問い合わせ先】

■ 研究内容に関すること

金沢大学理工研究域数物科学系 教授

野津 裕史 (のつ ひろふみ)

TEL : 076-264-5645

E-mail : notsu[at]se.kanazawa-u.ac.jp

東京大学大学院情報理工学系研究科情報理工学教育研究センター 准教授

中嶋 浩平 (なかじま こうへい)

E-mail : k_nakajima[at]mech.t.u-tokyo.ac.jp

■ J S T 事業に関すること

科学技術振興機構戦略研究推進部 I C T グループ

館澤 博子 (たてさわ ひろこ)

TEL : 03-3512-3526

E-mail : crest[at]jst.go.jp

■ 広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係

米田 一宣 (よねだ かずのり)

TEL : 076-234-6826

E-mail : s-somu[at]adm.kanazawa-u.ac.jp

科学技術振興機構広報課

TEL : 03-5214-8404

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp