

「ながれ」を言葉に

流体画像情報を数学的処理で文字列化する手法の開発

— 流体パターンに関わる経験知をコンピュータ上で再現・共有可能に —

要旨

京都大学の坂上貴之教授（大学院理学研究科）と京都教育大学の横山知郎准教授（教育学部）は、平面における非圧縮流れの全パターンを、数学（幾何学）の一分野であるトポロジーを用いて完全に分類し、各パターンに固有の文字列表現（極大語表現・正規表現）を割り当てる手法を開発しました。この文字列表現を用いれば、様々な流れのパターンの複雑な画像情報を、コンピュータ上で扱いやすい文字列情報に変換できます。たとえば言うなら、生物をDNAの塩基配列で表現するようなものです。

この手法は流体に関わる様々な場面で、幅広く応用できます。まずなによりも、複雑な流れパターンの大量の画像データを、わずかな文字列データへと変換することにより、情報の効率的な圧縮ができます。それによりコンピュータを使った解析が容易になり、もちろんビッグデータとして活用する時の効率も上がります。

また、医学・工学・環境・生命などの多く分野で今まで蓄積された、流れのパターン画像に関わる「経験知」を、誰もが理解できる「言葉」として表現することができるようになります。それにより、たとえば運輸や電力などの社会インフラの最適化設計において、あらかじめ「最適な流れ状態」をこの手法により文字列化し、そこに至る最適化経路を事前に把握しておけば、経験と勘に基づいた試行錯誤に頼らずともよくなり、設計が大幅に効率化されます。あるいは医療における病変診断への応用です。エコー検査など心臓や血液の流れパターン画像を用いた診断時に、専門医が経験的に着目してきた特定の部分をこの手法による文字列化により抽出できれば、他の医師・看護師や患者にも利用可能な情報として普遍化・共有することができるでしょう。

つまり、我々の開発した技術は日常会話における「こういう流れ」の「こういう」を厳密に定義する手法に他なりません。結果として与えられた文字列を見れば、誰もがその「流れ」の姿をいつでも正確に再現でき、各々が好きなように活用できます。まさにこれは複雑な現実に対して「言語」が果たしている役割であり、したがって今回我々はこの研究成果を「『流れ』の言語化」と銘打ちました。

本研究成果の技術は、出願特許（W02014/041917A1 および W02015/068784A1）として公開されています。また、英国の科学雑誌『*Proceedings of Royal Society A*』および米国の科学雑誌『*Physica D*』に掲載されました。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域：「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」

(研究総括：西浦廉政 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授)

研究課題名：「渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト」

研究代表者：坂上貴之 (京都大学大学院理学研究科 教授)

1. 背景

自動車・高速鉄道・航空機などの輸送インフラから風力発電のような電力インフラまで、現代社会インフラは新興国の経済発展に伴う急激な需要の高まりも相まって規模拡大の一途をたどっており、その研究・開発において流体力学の果たす役割はますます重要なものとなっています。ところが他方で、二酸化炭素排出量の低減や燃料費高騰による輸送コストの抑制といった社会的な要請もあり、現代の流体力学が関わるインフラの設計においては、「需要増への対応」と「エネルギー効率化」の相矛盾する要請に応えなければなりません。

そのような大規模・高効率なインフラを開発する要素技術のひとつとして、従来の流体力学では厄介者とされた「流体運動が生み出す『渦』」をエネルギー効率向上に活用することが検討されています。ところが、この「渦」という流れの構造を、刻一刻変化する状況に応じて「最適な流れ状態」に制御することは容易なことではありません。また、いまそこにある課題に対応する「最適な流れ状態」を曖昧さなく誰もが理解できる形で規定することも、簡単ではありません。

また、心臓や血管の流れ、海岸や港湾における流れなどの画像データから、病気や環境汚染の状態についての知見を得る、といったことも流れ情報の有用な活用法ですが、こうした流れ画像が近年の観測技術・機器の向上から非常に大規模・膨大なものとなり、そのデータ解析の効率化も求められています。さらに加えて、こうした流れパターンの解析から抽出される知識の多くは、現場の専門家の経験の蓄積から生み出される「経験知」であり、こうした言語化されていない「経験知」をどのように抽出し、人類の普遍的な知識として蓄積していくかは、情報量が爆発している現代社会における、ひとつの大きな課題でもあります。

我々はこうした状況において、任意の「流れの画像」に対して、誰もが共通に表現できる固有の「文字列」を与える、つまり「流れを言語化する」ことがとても有益であると考えました。多数の画像よりも文字列の方が、情報としての取り扱いがはるかに容易です。小さなメモリやストレージ、CPU パワーで大量のデータを作成・保存・通信・計算・解析でき、誰でもひと目で比較対照が可能になります。また、たとえば時間経過によってある文字列が別の文字列を経由してさらに違う文字列に到達する、という知見があらかじめあれば、その流れの設計や予測に大いに役立つでしょう。あるいはそのようにして専門家の経験知が言語化されれば、蓄積・共有・学習・研究そして発展にも貢献すると考えられます。

2. 研究手法と成果

本研究では、数学の持つ論理的厳密性、抽象性、普遍性という特質を活かして、こうした「流れ」パターンの画像情報を、幾何学の一分野である「トポロジー」により完全に分類し、それに対して固有の文字列を与える手法を開発しました。

具体的には、二次元空間（平面）における非圧縮流れ全体の集合の中から、小さな乱れやノイズを加えてもその流れ（流線）のパターンが変化しないようなもの（構造安定な流れといいます）を考え、それに対して固有の言語の文字列（極大語表現と正規表現）を与えるアルゴリズムを開発しました。

流れパターンの極大語表現とは、流れの中に含まれる特徴的な構造を文字として表現し、それを一列に並べたものです。また、流れパターンの正規表現とは、そうした特徴的な構造によって分割された平面内の領域、その領域間の隣接関係から生成される文字列表現です。図 a 左は、流体運動の数値シミュレーション結果です。左から右への一様な流れに対し、傾けて置かれた板の周辺で流れの起こす流体運動です。図 a 中央が、得られた流れから流線パターンを抽出したものです。赤く細長い長方形が流れの中にある板を表し、青や黒の曲線が（トポロジーとして特徴的な）流線を表現しています。図 a 右が、この流れに与えられた極大語表現と正規表現です。たとえば $t=5.5$ の時刻における流れには、

極大語表現：ICCB₀，正規表現： $\circ_{\emptyset}(\circ_2(-_2(-_0, -_0, +_2)))$

が割り当てられます。極大語表現の 1 文字目の「I」はこの流れの基本形が「I 型」であることを示し、その後の「CC」という文字列は「板の上に流れを閉じ込めるような流線構造」が 2 つあることを示しています。続く「B₀」で「8 の字形の流線構造」を示します。正規表現は、こうした特徴的な流線によって流れがいくつかの領域に分割された時に、隣接する領域に親子関係を（決めたルールに従って）割り当てることで得られます。

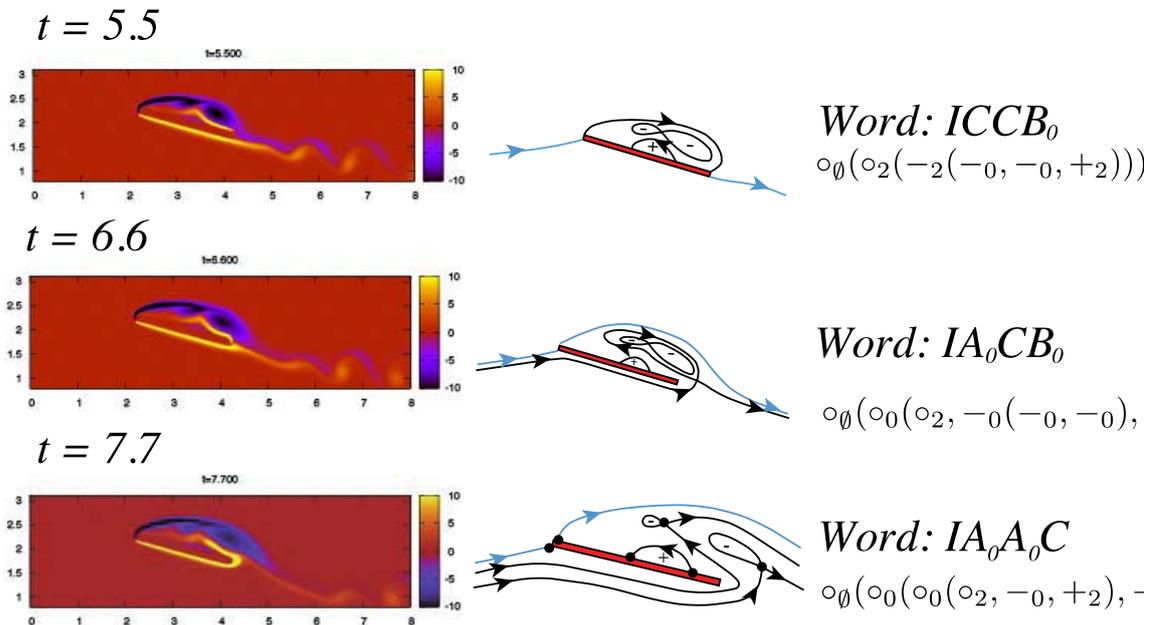


図 a. 流れの極大語表現と正規表現の例：(左)数値シミュレーション結果 (中央)シミュレーションから抽出された流れパターン (右)パターンの極大語表現(上)と正規表現(下)

この極大語表現における基本形には「I 型」「II 型」「O 型」の三種類しか存在せず、さらに特徴的な流線構造は「A₀」「A₂」「B₀」「B₂」「C」の五種類しかないことが数学的に厳密に示されています。こうして極大語表現は流れに含まれる流れ構造を

明確に表現します。ただし、同じ構造であれば個々の流れが違っていても同じ文字列になってしまいます。一方で正規表現は、その文字列からはどのような流れ構造があるかは確定できませんが、個々の流れに対してただ一つ対応します（これも数学的に証明されます）。つまり極大語表現と正規表現の両方を使うことで、流れの構造と個々の流れの完全な識別を両立させた文字列体系が構築されるのです。

いったん流れに固有の文字列が与えられると、様々な情報が数学的に抽出できます。例を挙げますと、ある流れパターンからある流れパターンへの変化が（時間発展やパラメータの変更によって）起こったときに、それがどのような中間状態を経て変化したかということが、計算で求められます。図bはその具体例です。図aの $t=5.5$ と $t=6.6$ における極大語表現と正規表現の文字列を比較するだけで、流れパターンが右のような状態を経て変化したことが、実際のパターン画像を見ることなく決定できるのです。

$$\begin{array}{l}
 t=5.5 \quad W_0 = ICCB_0 \\
 \circ_\emptyset(\circ_2(-2(-0, -0, +2))) \\
 \\
 t=6.6 \quad W_1 = IA_0CB_0 \\
 \circ_\emptyset(\circ_0(\circ_2, -0(-0, -0), +2))
 \end{array}
 \Rightarrow$$


図 b. 本技術により流れの極大語表現と正規表現だけから右にあるような中間状態を決定できます。これを使えば起こりえるすべての流れの可能性を表現できますので、その可能性にそって流れを最適化すればよいという「最適化経路」も得られます。

この新しい文字列体系は、流れの画像データ解析に以下のような様々な利便性を与えます。

- (i) データの圧縮：大規模な流れパターンの画像（写真やコンピュータシミュレーションの結果など）は、それだけで大きなデータとなります。しかしこの文字列体系を使えば、曖昧さなく画像を数文字の文字列に圧縮できます。画像データ1枚が数十キロバイトのものだとしても、文字列はたかだか数十バイトですから、1/1000 から 1/10000 のデータ圧縮になります。特に数百枚・数千枚の画像を扱う作業を効率化します。
- (ii) コンピュータへの実装性：画像データを文字列として表現することで、コンピュータでさらに容易に取り扱えるようになります。たとえば、与えられた流れが同じ流線パターンをもつかどうかを、単純な文字列比較で実現できます。これは流れ画像データ解析の高速化・効率化をもたらします。
- (iii) 分野をまたぐ共通言語：この文字列化は一定のルールに従って構成されるので、それさえ守れば誰でも実現できます。またその対応の正しさは数学によって完全に証明されています。したがってこの文字列を共通言語として使えば、流れについての知見をそれぞれの専門を越えて利用できます。
- (iv) 経験知の抽出：この文字列は流れパターンだけから構成できるので、流体力学に関係するものになら、工学・医学・環境・生命などどの分野であろうと汎用

的に利用できます。これにより、各分野の専門家が培ってきた、流れの画像診断・画像解析の経験知が適切に抽出・言語化されて、他分野の専門家やあるいは一般の人でも利用しやすくなります。

(v) 最適化の効率向上：流体力学が関わる社会インフラの開発において、それぞれの設計に応じて設定される「最適な流れ状態」が文字列化され、現在の流れ状態の文字列を見れば、この2つの文字列の間をつなぐ遷移過程を(図bのような手法によって)事前に書き下すことができます。つまり設計時にその最短経路を選んで設計ルートを確定できます。これまでは経験と勘に基づいて行われてきた流れの最適化問題を、数学的な確度をもってその設計方針を決定できるのです。これは「流れ最適化」に効率向上をもたらします。

3. 今後の期待

本研究の成果を活かせば、たとえば航空機やドローンといった飛翔物体の設計において、渦を活用した高効率な新しい翼デザインが可能になるでしょう。あるいは天気予報において、流れと天気の関係を文字列で表現することも考えられます。そうすれば「西高東低」といったこれまでの表現に換わる、もっと詳細を正確に表現する気象用語が生まれる可能性があります。今後の変化についても文字列だけからある程度予測可能になるかもしれません。

また、医師が患者の血液の流れなどから病変を診断する際に、特定の病変が特定の流れパターン（つまり文字列）に対応している、といったことが明らかになると考えられます。そうすれば、これまで専門医が勘や経験で「なんとなく」着目していた特徴のある流れの構造を抽出することが可能になり、それがさらに診断の精度や速度を上げるでしょう。

さらには、こうした流れ画像の文字列への変換が一般化すれば、ビッグデータとして蓄積・解析が現状より遥かに容易になり、そこからさらに新しい知見が次々に得られるかもしれません。

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）「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」（研究総括：東北大学・西浦廉政）における研究課題「渦・境界相互作用が創出するパラダイムシフト」（研究代表者：坂上貴之）の一環として行われたものです。

4. 論文情報

[1]

<タイトル> Word representation of streamline topologies for structurally stable vortex flows in multiply connected domains

<著者名> Tomoo Yokoyama and Takashi Sakajo

<雑誌> Proceedings of Royal Society A

<DOI> doi:10.1098/rspa.2012.05458

<発表日> 2012年12月5日

[2]

<タイトル> Transitions between streamline topologies of structurally stable Hamiltonian flows in multiply connected domains

<著者名> Takashi Sakajo and Tomoo Yokoyama

<雑誌> *Physica D*
<DOI> doi:10.1016/j.physd.2015.05.013
<発表日> 2015年7月1日

5. 特許情報

[1] 発明の名称：流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラム
出願番号：特願 2012-203601 号 PCT/JP2013/070939 号
出願人：科学技術振興機構（2015年12月現在）
発明者：坂上貴之、横山知郎
公開番号：W02014/041917A1
公開日：2014年3月20日

[2]

発明の名称：流体遷移経路取得装置、流体遷移経路取得方法、および、プログラム
出願番号：特願 2013-230678 PCT/JP2014/079512
出願人：科学技術振興機構(2015年12月現在)
発明者：坂上貴之、横山知郎
公開番号：W02015/068784A1
公開日：2015年5月14日

6. 補足説明

- [1] 非圧縮性……外部から力を加えてもその体積が変化しないような流体の性質。通常の水や空気などはこうした性質を持つと仮定して扱うことが多い。
- [2] 流線……流体粒子の移動する軌跡のこと。各時刻における軌跡の各点における接線が流体の速度に等しい。流体力学では、流れ関数と呼ばれる関数を使って、非圧縮性流体の性質を数学的に記述すると便利であることが多いが、本研究においてはこの流れ関数の等値線(等高線)の分類を与えている。
- [3] トポロジー……数学の幾何学における一分野。連続に変形して移りあう図形は同じと見なしても、図形的に異なる性質を研究する。例えば、通常幾何学では三角形や四角形、円といった形は異なる形とみなすが、これらの図形は輪ゴムとして角度の情報をみなければ同じ形互いに移り会えるので同じ形と見なすことができることから「柔らかい幾何学」とも言われる。結び目の分類などもトポロジーの研究対象である。
- [4] 渦……流れの回転要素を表す名称。渦の定義は学問的にはいろいろな流儀があるが、ここで考えている渦は流れの速度がある点を中心にして回転しているような流れを考えている。