

自然や生体のシステムに着想を得た複雑な流れの可視化と工学応用

細谷 和範*

Visualization of Nature-Inspired Complex Flows for Engineering Applications

HOSOTANI Kazunori

This study investigates the visualization of complex flows observed in natural and biological systems, with the dual goals of elucidating their underlying mechanisms and translating these insights into engineering applications. Case studies include: a fish-inspired actuator array, where wake interactions inform the design of a directional airflow fan; a jellyfish-inspired robot that exploits vortex rings and induced flows for underwater debris collection; the hydrodynamic behavior of azalea and rhododendron flowers during free fall, applied to the development of robust fluidic markers; and a pulsatile cerebrospinal fluid (CSF) phantom, visualized by MRI to clarify mixing mechanisms and support diagnostic modeling. Collectively, these examples highlight how flow visualization facilitates intuitive understanding, unveils fundamental fluid-dynamic structures, and bridges disciplines to advance innovative engineering solutions.

1. 緒 言

流体现象は自然界の至るところに存在する。屋内や屋外に目を向けると、送風機からの風の流れや河川を流れる水流の他、体内を拍動しながら循環する血流など、微小スケールの生命現象から地球規模の循環まであらゆる場面に流れは存在する。流れを生む液体や気体は、「流体」と呼ばれ、静止状態においてせん断応力が発生せず、外力を加えると容易に流れる連続体として力学的に定義される。この流体の流れを扱う水理学や流体力学は、古くからある学問分野で、古代における経験則に基づく理解から発展を続けている。現代では、これまでに多くの研究者が見出した法則¹⁾と高度な測定技術や数値解析の発展によって、より複雑な乱流現象や混相流等の理解が進んでいる。それとともに、目に見える形で把握できる可視化技術も発展を続けている。近年ではコンピューターグラフィックス (CG) を活用したリアルな流れの表現手法や人工知能 (AI) を援用した流動現象の推論も精力的に研究が進められている。このようなデジタル技術を駆使して複雑な流動現象の理解や洞察が進んでいる。また CG 作品の中には紙のキャラクター群が空中を華麗に舞う「ORIGAMI」(作者: Kanamori Kei 氏²⁾) など優れた表現力で見る者を圧倒するものもある。他方で歴史上の偉人たちの作品の中にも流れに対する優れた観察力や洞察力を垣間見ることができる。万能の天才

と言われるレオナルド・ダ・ヴィンチ (1452–1519) は水や空気の流れを詳細にスケッチし、複雑な流動現象の特徴を記載している³⁾ (図 1)。また、浮世絵で有名な葛飾北斎 (1760–1849) の「富嶽三十六景、神奈川沖浪裏」が描く大波⁴⁾は世界中で知られている。同図に描かれる波高や碎波の描写には物理的な裏付けはないと思われるが、見る者を惹きつけるのは、観察と表現力によってもたらされる魅力によるものだろう。さらにユニークな視点と物理学的手法で身近な自然現象の理解を試みた寺田寅彦 (1878–1935) は、椿の花が常に上を向いた状態で落花する挙動を観察し、空力による落下姿勢であることをモデル実験によって明らかにし、科学論文のほか



図 1 レオナルド・ダ・ヴィンチが描いた水流の様子³⁾
(流線のような軌跡により渦の形成が表現されている)

原稿受付 令和 7 年 8 月 20 日

*総合理工学科 機械システム系

文学作品にもこのユニークな落花現象の観察を織り込んでいる⁵⁾。物理学者で随筆家でもある寺田博士の視点は、分野横断的であり、現在における文理融合研究にあたる。優れた観察力と洞察力を持った偉人たちが残した作品は今なお魅力的であり、さまざまなレビュー記事のほか、解析研究の対象となっている⁶⁾。流れの可視化は複雑で理解しにくい流動現象を図画や言語化により理解しやすく、情報を伝達することを目的としている。さらに、隠れていた現象の発見の喜びやそこに宿る美しさを共有する一種の宝探しのような楽しみがあり、得られた発見が他分野に応用される発展性もある。筆者も生物が進化の過程で獲得した機能が、新たな工業製品の設計に示唆を与えることがあると考え、水生生物や植物の流動現象をヒントに新規の工学応用を試みてきた。本報告では、筆者らがこれまで取り組んできた、生物の機能に着想を得て開発した装置とその流れの可視化事例を紹介するとともに、観察者に強い印象を与える可視化が、科学研究において最も重要とされる客観性に及ぼす影響について考察する。本稿では、2.1 節で魚群推進器と圧電ファン、2.2 節でクラゲ型ロボット、2.3 節および2.4 節で花や生体内流れの可視化事例を紹介し、工学応用の観点から議論する。

2. 流れの可視化の効果と事例

複雑な流れの可視化は、現象の理解を深め、他者との情報共有を容易にするだけに止まらず、応用へのアイデア創出にもつながるきっかけにもなる。たとえば、魚やクラゲなどの水生生物は運動によって水を押し出して推力を発生するが、同時に放出渦や圧力場によって誘起流も生じる。こうした流れ特性は、水流ポンプのような機能や、流体を混合・攪拌するためのせん断流や旋回乱流を提供する。ただし生物が持つ複雑な動きや機能の一部を模倣して設計したポンプは、既往の軸流ポンプや遠心ポンプなどに比べてエネルギー効率が劣ることもある。しかしながら、目的に合致した生物の機能を利用することで、既往のポンプでは適用できない流体輸送を可能にする。たとえば、空気圧式の人工筋肉を用いて腸の蠕動運動を応用したポンプ機構⁷⁾は、異物や気体等が混入した混相流の輸送が可能であり、高粘度の流体の搬送にも対応できることが示唆されている。また、生命維持に極めて重要な心臓ポンプでは溶血や血栓の発生を抑える設計がなされているが、血球を破壊しにくい優れた特性を持つ心臓の機能から学ぶことが重要である必要性が示唆されている⁸⁾。筆者らも、クラゲの傘の開閉運動による吸引と吐出した流れを応用したバルブレスポンプ¹⁰⁾を提案している。本稿では以上の例のように、身近な動植物の動きをきっかけとして、層流から乱流にわたる遷移領域を含む低速域の流動を対象とし、流れ

の可視化から着想を得て工業製品への応用を試みた例について述べることにする。

流れの可視化手法には様々なものがあるが、筆者の所属する研究室では主に、水槽内に蛍光剤を滴下して拡散挙動を観察する方法や、パウダー状の粒子をレーザーシート光源で照射し、トレーサーの動きを観察する方法をよく用いている。また、流速ベクトル場のような定量的データの取得には熱線式流速計のほか、連続撮影された画像から流速ベクトル場を求める粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry, 図 2) も活用している。

2.1 魚群推進器のヒレ配置による後流場の可視化と風向制御が可能な圧電ファンの開発

複数配置された魚型のヒレ推進器による推進効率向上の研究を通じて、可視化されたヒレ後流の流れ場の特徴を応用し、送風機開発に発展した事例を述べる。これまでの研究によって、図 3 のような複数の魚体モデルのヒレが同期して駆動される場合、千鳥状に配置すると単体の魚体モデルに比べて抗力を何割か低減できることが知られている^{10,11)}。筆者らは図 4(a) に示す長さ 30 cm の魚型推進器を千鳥状に配置した際の推進効率を水理実験により評価した¹²⁾。この結果、千鳥配置のケースでは並列配置よりも推力効率がおおよそ 20% 向上することを確認した。さらに筆者らは後流場にも注目した。PIV 法によって計測された後流の平均流速分布 (図 4(b)) を見ると、同じ千鳥配置でも中央の魚体を前方に突出させる条件 (図中 F1R2 配置と記載) では噴流状の流れが卓越し、逆に後方に突出させる条件 (F2R1 配置) では帯状の流れが二方向に分岐することを発

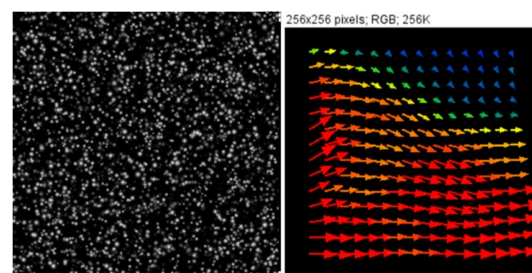


図 2 連続画像から流速ベクトル場を算出する PIV 法

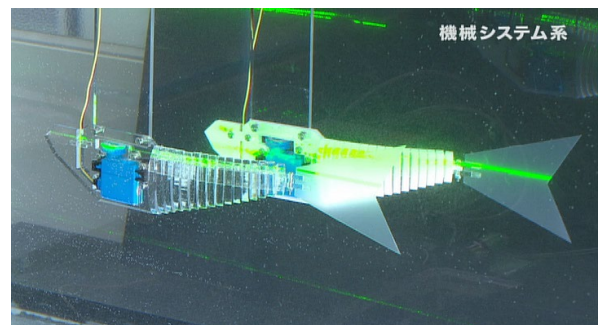
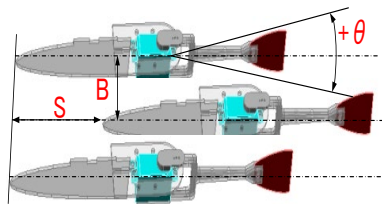
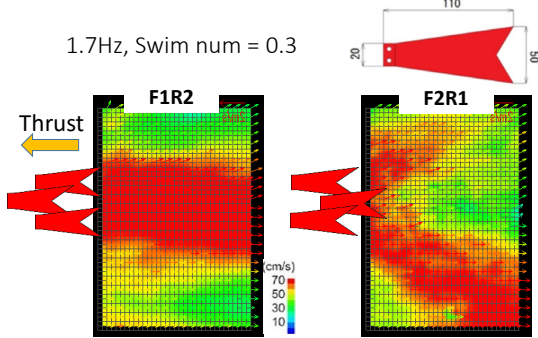


図 3 複数の魚ロボットによる配置と推力の計測シーン



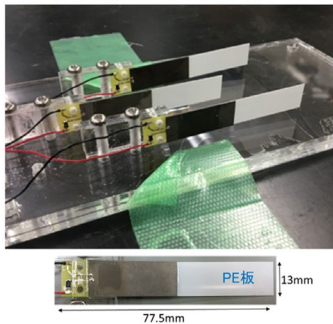
(a)魚体モデルの配置パラメータ(長さ 300 mm)

1.7Hz, Swim num = 0.3

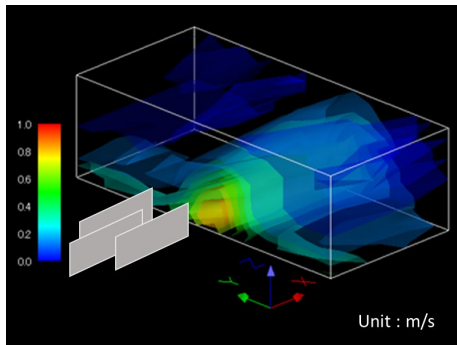


(b) PIV による後流の 2 次元平均流速分布($S=40$ mm, $B=50$ mm)

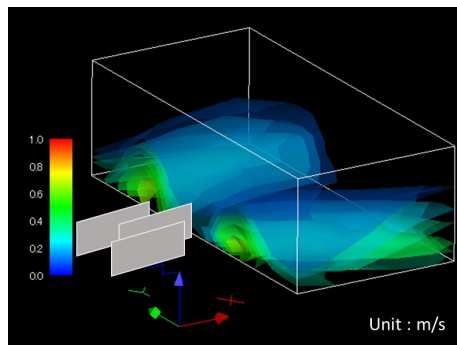
図 4 魚体モデルの配置パラメータと後流の 2 次元平均流速場



(a) 供試ファンユニット ($L=77.5$ mm, $S/L=0.1$, $B/L=0.3$)



(b)中央のファンが下流側に突出する F1R2 配置



(c)中央のファンが下流側に突出する F2R1 配置

図 5 PZT ファン後流における平均流速分布の等値面図

見した。このユニークな現象の応用として、筆者らは流向制御が可能な送風ファンを考案した。評価のための実験として、図 5(a)に示す長さ 77.5 mm の圧電ファン (PZT: Piezoelectric Transducer) ファンを千鳥状に配置し、その下流の平均流速分布を熱線風速計により測定した¹³⁾。配置パターンは魚型推進器と同様に、前方 1 枚・後方 2 枚の F1R2 配置、前方 2 枚・後方 1 枚の F2R1 配置、並列配置の三条件とし、平均流速分布を可視化した。図 5(b)および(c)は各配置条件での平均流速分布の等値面図を示す。図より、両配置とも床面に沿って移流する筒状の噴流と二方向に 80° 程の開き角で分岐した流れを確認することができる。このファンユニットが発生する流速はおよそ 1 m/s (ファン長さを基準とするレイノルズ数 (Re) はおよそ 5000) で、下流断面を通過する流量はおよそ 1000 cm^3/s である。本事例では、ファンの千鳥配置により、風向を制御することができ、流量が並列配置よりも 10% 向上することが確認された。現在、このユニークな流れを電子機器の基板冷却に応用するため実験を進めている。

2.2 クラゲ型ロボットによる渦輪や誘起流を伴う流れを利用した水中ごみ捕集装置の開発

湖沼や沿岸域を漂流するマイクロプラスチックや懸濁性のごみ回収を目的に、本研究ではクラゲの運動に着想を得た水中ごみ回収ロボットの開発を行った。水中でのごみを吸引するには、インペラを有するポンプがよく用いられるが、ごみによる閉塞やメンテナンス性の課題がある。これに対して、クラゲは図 6 に示すように、単純な傘の駆動によって周囲の水塊を吸引し、下方に噴流状の流れを吐出する。この水塊輸送はシンプルな一種のバルブレスポンプとみなすことができる。また図の根口クラゲ (*Rhizostomeae* 目) などの種は、傘下部に触手のような口腕を有し、プランクトンなどを捕え傘内部の口に輸送して採餌する。筆者らはこの機構をごみ捕集に応用し、二次元性の強い流れを発生する幅 15 cm のグリッパー型電動水中ロボット(図 7)と、直径が約 20 cm の空圧駆動型のクラゲ型ロボット(図 8)を開発した⁹⁾。これらのロボットはおよそ 3 秒周期で傘が開閉される。図 7(a)の二次元流モデルにおける傘の開閉運動により周囲の水を取り込む流れを可視化した結果を図 7(b)に示す。開傘時(図中"Opening")では傘内で双子状の渦を形成するとともに傘下部への流れが誘起されている。また閉傘時(図中"Closing")は下部に吐出される流れとともに、周囲の水塊が口腕を模した整流板の間に取り込まれるように流れが誘起していることがわかる。この研究では、吐出した流れを逆流させないよう口腕を模した整流板の設置条件を検討した。整流板の取

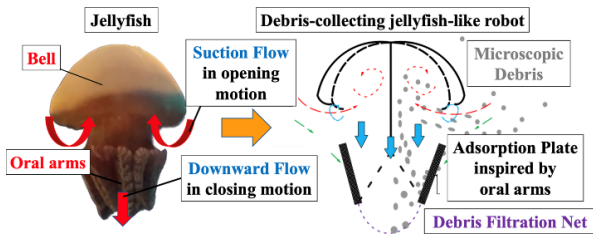
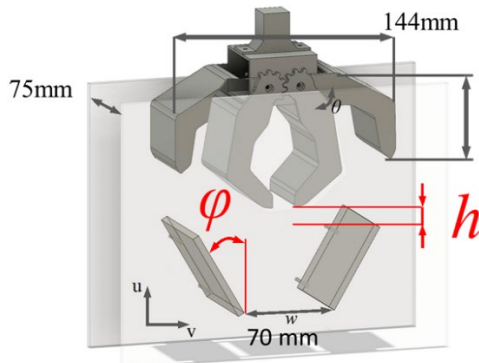
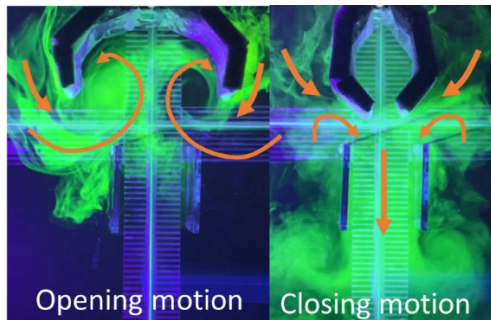


図6 クラゲをヒントにした水中ごみを捕集するメカニズム



(a) グリッパー型ロボットの構造



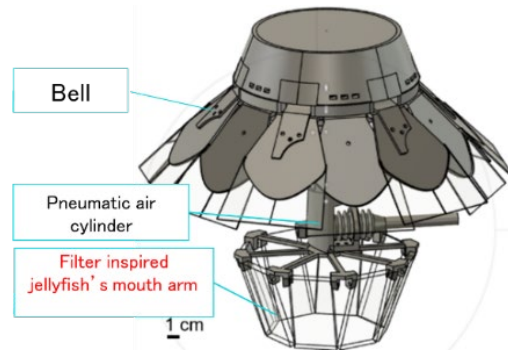
(b) 染料を使った流れの可視化

図7 二次元性の強い流れを発生するグリッパー型ロボット

付角度を 0° と 20° とするとともに、傘先端部の素材に剛体と弾性体とを用い、流れ構造や吐出流量に与える影響を2次元PIV計測により測定した。この結果、素材や整流板の設置角度によって渦形態や逆流の抑制能力、整流板まわりのよどみ領域の大きさや位置が大きく変化した。各条件を比較した結果、傘先端を弾性素材にし、整流板の設置角を 20° にすると上流側への逆流を抑制する流体ダイオードとして機能し、吐出流量が条件中最も大きくなった。ただし、整流板によどみ領域が発達するため、整流板上に付着したごみを吸着させる場合は、設置角を調整する必要がある。以上の成果に基づき、現在、図8(b)に示す遊泳しながら水中ごみを捕集するクラゲ型ロボットを開発中である。このロボットは口腕を模した整流板下端に捕集ネットを設置して、サイズの大きなごみの回収も行うことができる。

2.3 落花後のツツジ・サツキの挙動と飛ばされにくいマーカの開発

植物は花粉や種子の運搬に風や水流を利用する



(a) ロボットの構造



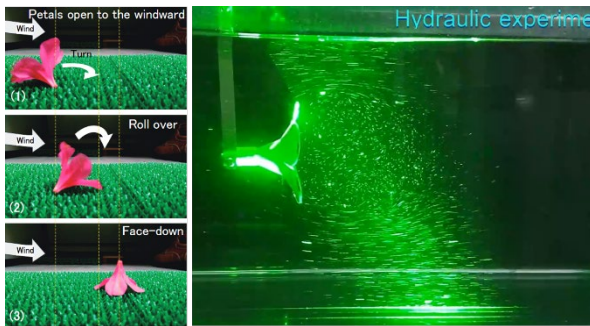
(b) 染料を使った流れの可視化

図8 空圧駆動のクラゲ型水中ごみ捕集ロボット

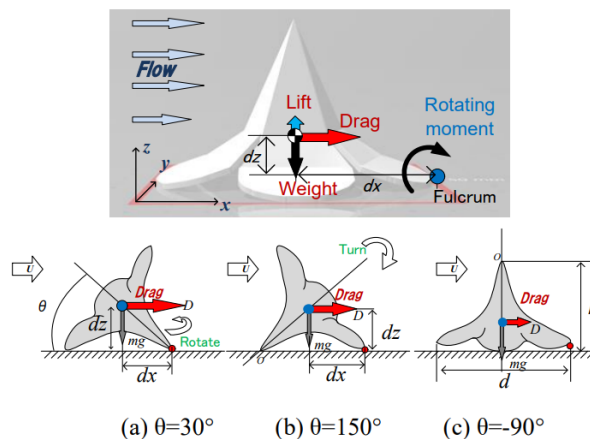
ことが知られているが、落花後の花冠の流体的な挙動に着目した研究は非常に少ない。この研究では、図9(a)に示す花冠直径が $5\sim 10\text{ cm}$ で 0.4 g 程度のツツジやサツキが落下後、図9(b)に示すように、風速 3 m/s 以上の風を受けると裏返しの姿勢となり、その場に留まる現象に注目し、流れの可視化による観察と水理模型による流体力の計測および図9(c)のモデル図に示す静力学的な視点での評価を行った¹⁴⁾。この結果、花の姿勢に対する揚力係数および抗力係数が、裏返しに転倒する際の重要なパラメータであることが明らかとなった。さらに裏返しになる条件として、花冠が五枚の合弁花であることも重要であることや、花冠直径と高さの比が約 $8:5$ であること、重心が高さの約 $1/3$ の位置にあることなどがわかった。現在、このユニークな現象の工学利用を検討しており、防災・減災用の軽量IoTセンサや発光マーカの試作を進めている¹⁵⁾ (試作例を図10(a)に示す)。花型のIoTセンサは状況に応じて花弁部を閉じることができる構造とし、3Dプリンターで製作したモデルの流体力学的特性を水理実験により評価した結果、抗力・揚力および回転モーメントはツツジ型モデルと類似していることがわかった。現在、老朽化する水路や暗渠の壁面変状を検出するロボットに花型マーカを搭載し、壁面の凹凸が大きい箇所にもマーカを落下させる実験を行っている(図10(b))。課題として花型モデルに発光体やセンサを搭載することによる重量増加があり、例え



(a) 落花後に花冠が伏せていたサツキ (*Rhododendron indicum*)



(b) 風による挙動の観察と水理実験による流れの可視化



(a) $\theta=30^\circ$ (b) $\theta=150^\circ$ (c) $\theta=90^\circ$

(c) 静力学モデル

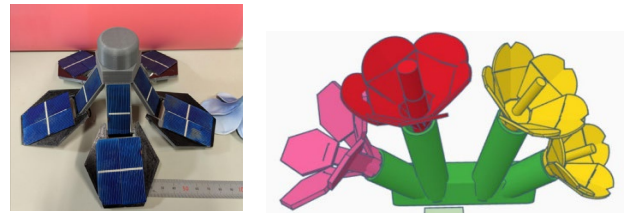
図9 ツツジやサツキ合弁花冠が落花後に示す流体挙動

ば直径 80 mm で質量 10 g のモデルでは、空気中で転回するには風速が約 6.5 m/s 必要となる。現在、軽量化対策の他、新たに椿の花をモデルとした研究を進めている。藪椿は寺田虎彦博士⁵⁾が示したように、10 g 程の花冠が落下時に受ける空力により、花冠を上に向けて落花するが、この仕組みを利用したセンサ開発を進めている。

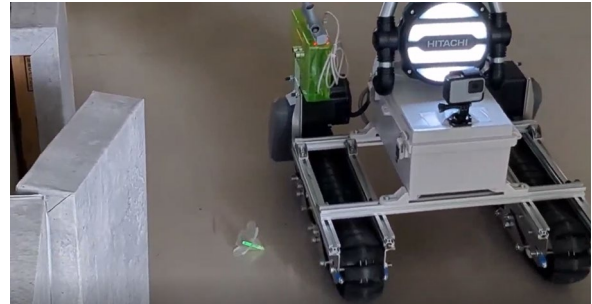
以上のとおり、落花に伴う流体力学的挙動はユニークなものがあり、自然現象の観察と工学的応用を結びつけるアプローチにおいて、筆者は自然の不思議さや美しさも重要な要素となると考える。

2.4 拍動する脳脊髄液ファントムによる流れの可視化と流体混合装置の開発

図 11(a)は脳と脊髄を取り巻くヒトの体の断面イメージである。本研究では、現在において不明な点



(a) IoT センサや落花型マーカの構想図 (必要に応じて落花)

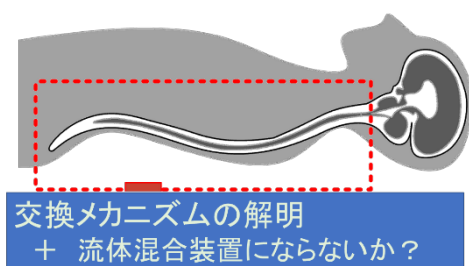


(b) 壁面変状検出ロボットに搭載された落花型マーカー

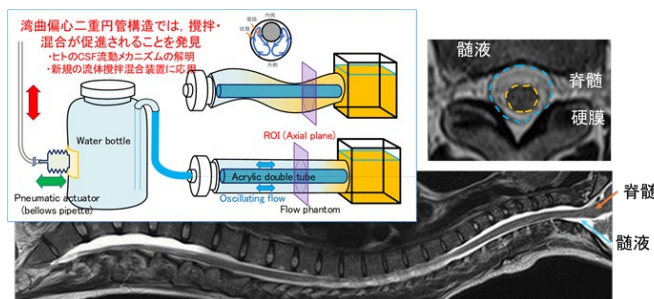
図10 ツツジやサツキの落花後の流体挙動を応用した研究例

が多い拍動するヒトの脳脊髄液 (CSF: Cerebrospinal Fluid) の流動メカニズムと新旧の CSF の交換過程を S 字状に湾曲する偏心二重円管モデルにより物理的な視点から調査するもので、流れの可視化が現象把握に大きく寄与している。無色透明で水様のヒトの CSF は、脳室で 1 日あたり 500 ml 産生され、主に頭蓋内のくも膜顆粒から静脈系へ吸収されるとされる¹⁶⁾。CSF は心拍や呼吸による圧力変動により脊柱管内を数 cm の振幅で往復流動するが、頭蓋内で産生された CSF がどのように脊柱管の末端までいきわたり交換されるのかは未だ十分に解明されていない¹⁷⁾。筆者らは図 11(b)に示すような長さ 50 cm の二重円管構造の弾性管による流動ファントムに 1 秒周期の拍動を与え、染料や核磁気共鳴画像診断装置 (MRI) による可視化を行った¹⁸⁾⁻²⁰⁾。この結果、湾曲部において二次流れが発生し、流体の乱流混合を示唆する様子が観察された。図 11(c)は、湾曲部での流れをより観察しやすいように透明のアクリル管 (長さ 250 mm, 内径 26 mm) を S 字状に加工し、内管に PVC 管 (直径 19.5 mm) を挿入した流路モデルである。可視化実験では、作動流体を水道水とし、内管の配置は同心および偏心二重円管構造とした。流路右側は紫外線で励起発光するフルオレセイン溶液の液溜りがあり、管の左側には 1 秒周期の往復流 (二重円管内の最大流速: 150 mm/s) を与える空圧ペローズアクチュエーターが接続される。以下に S 字管の軸管距離を 60 mm に設定した流路での結果を述べる。図 11(c)の各図は実験開始から 60 秒後経過後における染料の広がりを示す。内管のない単管では、往復流の流速が小さく、染料の混合はわずかであるが、二重円管構造では染料が上流側に拡散

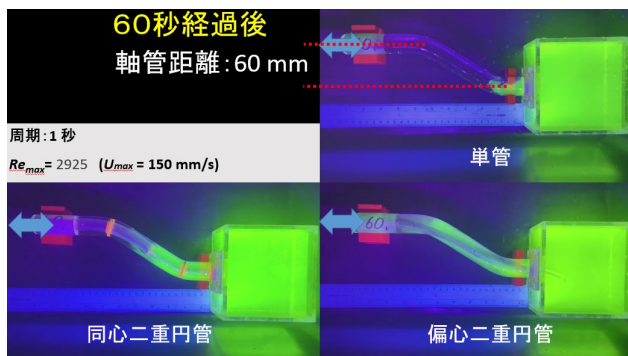
している様子がわかる。特にヒトの脊髄構造と同じ偏心二重円管では、染料が上流側の入り口にまで達しており、染料の動きをよく観察すると、湾曲する管内で内管を回り込むように流れる二次流れが発達し、同心構造よりも染料の混合が促進される様子が確認された。この実験は、ヒトの CSF 流動をヒントとした、インペラやプロペラなどの回転攪拌機構を持たない新規の流体混合装置として工学応用が期待でき、現在数値シミュレーションや PIV 計測、MRI 撮像を通じて流れのメカニズムをより詳しく調査している。併せて、脊髄疾患をモデル化した流路の MRI 撮像により、患部にかかる流動圧の推算や医師の診断を支援する資料としての活用を目指している。この例でも複雑に思われる流れを可視化することにより現象の理解を深め、臨床研究や工学応用につながっている。



(a) CSF 流動の課題と工学応用



(b) ヒトの脊髄構造をヒントにして設計した流動ファントム



(c) S 字状の円管内の水塊に拍動を与えた際の染料の混合状況
(レイノルズ数: 2900, Womersley 数: 24.4)

図 11 CSF 流動ファントムと流れの可視化

3. 考察

これまでに示した例から、可視化技術は流体の見えない動きを定量的かつ直感的に描写し、複雑な流体挙動を誰もが理解しやすい形で提示することで、研究者や技術者が現象の本質を捉える手がかりとなる。さらに、その視覚的なインパクトは分野の異なる人々との共感や価値の共有を可能にし、科学的理解に加えて強い印象や感動をもたらす可能性がある。ただし、美しさや感動に基づく感覚的評価は、エビデンスに基づく科学的な論理的評価とは対極に位置する。これらを混同したり、感覚的評価を優先して解釈を行うと、事実をねじ曲げる似非科学に陥る危険性があるため、注意が必要である。

また可視化により見えた流れは必ずしも現象の主要な構造とは限らない点にも注意が必要である。たとえば、図 5 に示した PZT ファン後流の可視化画像は時間平均化された流速分布を示しており、ファンの振動に伴う強い乱れや干渉の詳細は把握できない。現象の理解にあたっては、可視化条件や手法の限界を十分に認識する必要がある。特に、視覚的演出や感覚的な要素が含まれる場合には、流動現象の支配方程式や解析に基づく直観的理解を満たさない解釈は、誤解を招く危険性があるだろう。

4. 結 言

流れの可視化の魅力は、見えない価値あるものを探し出す宝探しのように、複雑な流れの中に秩序やパターンを見出すことで、別の現象や用途との関連を連想するきっかけとなる。本稿では、装置開発の着想につながった具体例を紹介した。興味を引く可視化画像は、現象の理解を促進するとともに、新たな応用や発展の可能性を想起させる力を持つ。一方で可視化はあくまで理解を補助する手段であり、理解の根拠そのものではないことを十分に認識する必要もある。

COI について

本報告事例において開示すべき COI はない。またヒトを対象とする CSF 流動ファントム開発については、本学研究倫理委員会の承認を受け実施した。

謝 辞

本報告で紹介した研究に対して、協働による研究を推進した広島大学の尾形陽一教授、大阪工業大学の谷口浩成教授、岡山医療センターの竹内一裕医師ほか、関係する全ての皆様に感謝申し上げます。また、卒業研究を通じて精力的に研究を進

めた細谷研究室の学生諸君の努力に敬意を表します。なお、本研究の遂行に際し、学術振興財団科研費（20K12636）、NSK メカトロニクス技術高度化財団、岡山工学振興会、中国電力技術研究財団、ウエスコ学術振興財団ほか、支援くださった皆様に対してここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄: 水理学・流体力学を創った人々, 水工学に関する夏期研修会講義集, 19 (1983), A.6.1-A.6.17.
- 2) Meet the 2024 Student Academy Awards Finalists (2024): <https://www.oscars.org/news/meet-2024-student-academy-awards-finalists> (参照 2025-08-26).
- 3) Wikipedia: Science and Inventions of Leonardo da Vinci, https://en.wikipedia.org/wiki/Science_and_inventions_of_Leonardo_da_Vinci (参照 2025-08-26)
- 4) Wikipedia: The Great Wave off Kanagawa, https://en.wikipedia.org/wiki/The_Great_Wave_off_Kanagawa (参照 2025-08-26)
- 5) 寺田寅彦: 寺田寅彦随筆集, 岩波文庫 (1910), https://www.aozora.gr.jp/cards/000042/files/2490_11025.html (参照 2025-08-26).
- 6) Okumura, O.: Structural Analysis of Hokusai's "The Great Wave off Kanagawa" Using the C4 model and PlantUML. 10.13140/RG.2.2.11363.87845 (2025).
- 7) Watanabe, N. et al.: Deformability of Red Blood Cells and Its Relation to Blood Trauma in Rotary Blood Pumps, *Artif. Organs*, 31, 5(2007), 352-8.
- 8) Suzuki, K. and Nakamura, T.: Development of Aperiastaltic Pump Based on Bowel Peristalsis Using for Artificial Rubber Muscle, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, WeCT3.4* (2010), 3085-3090.
- 9) Manakijisirisuthi, P. et al.: An Experimental Study of the Flow Structure Around the Oral Arms of a Jellyfish-inspired Pump Mechanism, *Artificial Life and Robotics*, 30 (2025), 107-117.
- 10) Kelly, J., Pan, Y., Menzer, A. and Dong, H.: Hydrodynamics of Body-body Interactions in Dense Synchronous Elongated Fish Schools, *Physics of Fluids*, 35 (2023), 031904.
- 11) Yoshida, K. et al.: Numerical Study of the Correlation Between Fish School Arrangement and Propulsive Performance, *Artificial Life and Robotics*, 28 (2023), 21-30.
- 12) Hosotani, K. et al.: Contracting Flow Pattern Induced by the Staggered Arrangement of Oscillating Fish-like Fin Propulsors – Time-averaged Flow Structure Obtained by 2D PIV Measurement, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (2016), 904-909.
- 13) Mizumoto, N. et al.: Three-dimensional flow structures of fish-school-inspired piezoelectric fans in a rectangular housing, *Proc. of the 30th AROB Conference* (2025).
- 14) Hosotani, K.: Hydrodynamic Characteristics of Azalea Flowers After Falling on the Ground, *Journal of Advanced Experimental Mechanics*, 7 (2023), 27-33.
- 15) 細谷和範: 風に飛ばされにくい落下後のツツジを模した花型ロボットの検討, 計測自動制御学会第 25 回システムインテグレーション部門講演会(SI) (2024), 3902-3905.
- 16) Cerebrospinal Flow Dynamics Flow and Transport in the Central Nervous System, <https://asanchez.ucsd.edu/research/cerebrospinal-flow-dynamics/> (参照: 2025-8-31)
- 17) Kulaczewski, S. D. et al.: Gärtner, J. Frahm, Identification of the Upward Movement of Human CSF In Vivo and its Relation to the Brain Venous System, *J. Neurosci*, 37, 9 (2017), 2395-2402.
- 18) 細谷和範ほか: 心拍と呼吸によって駆動される脳脊髄液の動きを想定した MRI 用流動ファントムの試作, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2- G05, 2022.
- 19) Yamamoto, R. et al.: Fluid Phantom with Curved Double Circular Tube Structure Modeled After the Spinal Cord, *International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers (IWAEM(2024))*, PS006 (A006).
- 20) 細谷和範ほか: 拍動する脳脊髄液の流れに着想を得た偏心湾曲二重円管における流体混合特性の可視化, 第 24 回日本生活支援工学会大会 (LIFE2025) , 177-180.