

ストロボ効果を用いた局所的な流体運動可視化手法の開発

田原悟志^{†1} 長谷川雄大^{†1} 田邊匠^{†1} 永谷直久^{†1}

概要: 流体の可視化手法は様々な手法が確立されているが、風洞実験などに用いられているよう可視化手法は対象範囲が局所的な領域を対象とした事例が少ない。数センチ単位の領域の可視化を行うことにより昆虫などの小型生物に対する風洞実験において実際に気流が生物のどの部位に衝突しているかなどの詳細な特定が可能である。そこで我々はエアポンプとLEDライトを用いたストロボ効果での手法により流体の局所的な可視化を行った。ストロボ効果を利用することで流体の周期運動を観察しやすくなり、実際に物体に衝突させることで流体が拡散する様子の可視化を行った。

1. はじめに

水や気流といった流体はその性質から外力による影響で容易にその形状を変えてしまうため、制御するのが困難である。制御するためにはまず流体の運動特性を知る必要がある。その運動を把握するためには可視化を行う必要がある。流体の可視化研究は様々な手法が確立されており、対象の流れに多数の微粒子を懸濁させることで可視化を行う懸濁法や水の電気分解によって生じる水素をトレーサに用いる水素気泡法などの手法が例として挙げられる[1]。しかし、現在までで確立されている可視化手法は局所的な領域を対象とした汎用的な手法は少ない。数センチ単位の局所領域の可視化を行うことで次のような恩恵が考えられる。1つは昆虫などの小型生物に対する風洞実験において、実際に気流が生物のどの部位に衝突しているかなどの詳細な特定である。他には自動車などの模型に対しての風洞実験では実際の自動車に対する風洞実験のシミュレーションとして利用も期待できる。そこで我々は局所的な領域の可視化を行うためにストロボ効果を用いた手法を提案する。

ストロボ効果とは折り返し雑音の一種であり、連続的な動きが一連の短い瞬間的な標本列で表されるときに発生する視覚現象の一つである。車のタイヤや飛行機のプロペラが逆回転して見える現象もこれに含まれる。動く物体を連続ではない一連の標本で表したとき、その動きが回転や何らかの周期的動きで、かつその繰り返しの周波数とサンプリング周波数が近いときに現れる。本研究ではエアポンプにてスモークを周期的に小さな塊(ブルーム)として打ち出し、その周期に合わせて光源を点滅させることでストロボ効果を発生させるようにした(図1)。ストロボ効果を利用することで流体の運動を人間に可視化しやすい速度で観察することを可能にし、流体運動の周期的な法則性の発見に活用できる可能性があるかを調査する。光源を用いてストロボ効果を演出する際には光源の点滅に注意する必要がある。点滅の周波数によっては光感受性発作を引き起こす可能性がある。そのために人の目に対して発作を引き起こ

さない周期で光源を点滅させるためにはまず空気を噴出するの用にエアポンプの周波数とPWM制御を行う必要がある。

本研究では安定して周期的なブルームの噴出のためのエアポンプの制御を行なった後、噴出されたブルームに対して光源を当てることでストロボ効果を発生させることで流体の可視化実験を行なった。

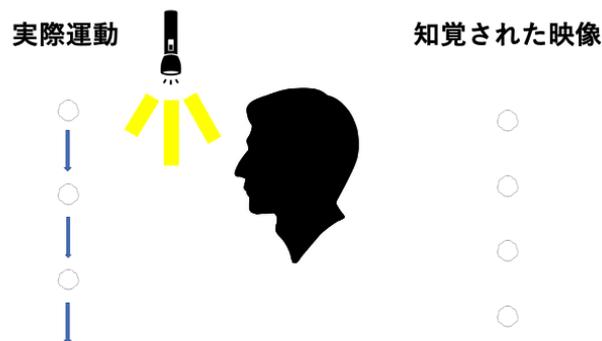


図1: 本研究で実装するストロボ効果のイメージ

2. 関連研究・事例

流体可視化・解析の事例としてはPIV解析[3]が主流となっている。PIVという名称は1984年に発表されたものであり、現在のPIVと同じものが1983年に発表されている。PIV解析は懸濁法の一つであり、添加する物質に分散粒子を使用して粒子画像を取得し、そこから粒子の位置の差分と移動時間を取ることで流体の速度を計測することができる。しかし、PIV解析では動画や画像などの取得が必要であるため、リアルタイムに流体の動きを観察することは難しいと考えられる。よって見かけ上の速度を調整できるストロボ効果はリアルタイムな観察の新たな手法として期待できる。

ストロボ効果を用いた研究例として Stop Motion Goggle[2]がある。これは運動する物体を見る人の感覚器(眼

^{†1} 京都産業大学大学院先端情報学研究所

球)の直近にシャッターを置くことで視覚情報の標本化を行い、被験者の視覚知覚を拡張するものである。Stop Motion Goggle では時間軸上で微小時間の視覚情報や周期的な情報を観察する被験者の視覚を拡張することを実現していた。本研究でもこれを参考に肉眼では捕捉できない時間軸上の流体の動きを観察することをストロボ効果により目指す。

また、観察する流体に水を利用した Time Fountain[4]では LED とモーターによってストロボ効果を発生させることで、上から降下する水滴が停止しているように見えたり、逆流して上昇していくような視覚演出を発生させている。本研究ではこの Time Fountain を参考に流体にスモークを使用したシステムを構築した。

3. 実装

3.1 システム構成と概要

本実験で使用するシステムの構成は図2のようになる。円形アクリルを出力先としてエアポンプからスモークをチューブを通して送り込む。送り込まれたスモークに対して光源装置で発光させる。そしてエアポンプと光源装置はそれぞれ外部電源から電力を共有し、マイコンから PWM で制御する。マイコンに対しては制御用 PC からプログラムを書き込む。

図2のシステム構成を実装したものが図3のようになる。ボトルに溜めたスモークをエアポンプでチューブを通して円形アクリルに上部中央から送り込む。なお今回はストロボ効果による視覚現象を視認しやすくするため、エアポンプは PWM でスモークを小さな塊として連続的に射出するように制御する。そして射出したスモークに対して周期を合わせて円形アクリルの外側から光源を当てられるように実装を施した。エアポンプと光源装置は外部電源がそれぞれ違う電圧値を必要とするため、物理的なショートを防ぐためにそれぞれの専用回路を構築している。円形アクリルはブルームが外気の影響を受けるのを防ぐための密閉空間として本研究では採用している。

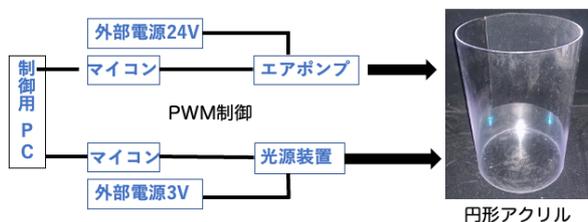


図2: 実験装置システム構成図

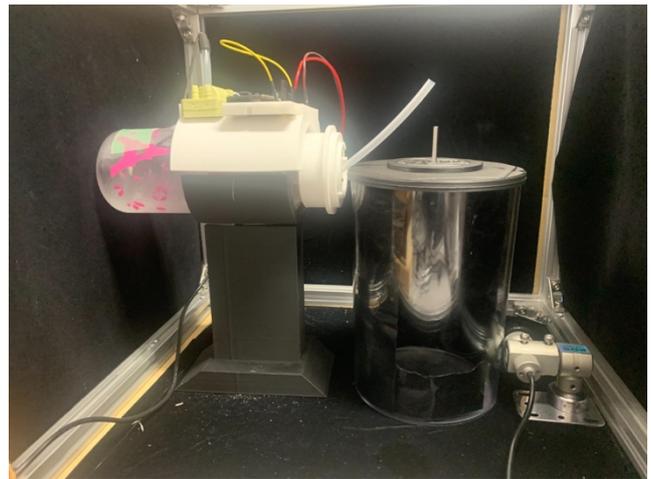


図3: 作成した実験装置

3.2 ハードウェア構成

スモークを噴射するための噴霧器には Look Solutions 社が開発しているハンディタイプの小型フォグマシンである TINY CX を使用している。専用液として使用されるタイニーフロッドは非危険物として証明されているほか、発生するスモークが水蒸気や二酸化炭素と違い滞留しやすくないなどの性質などから本実験に適していると判断したため、採用している。

エアポンプとして使用しているのは榎本マイクロポンプ製作所が販売している直流式モータである CM-15-24 を採用している。チューブからスモークをブルームとして連続的に出力できているため現在はこちらを採用しているが、PWM 制御で 30Hz で出力した際に実際には 10~15Hz の周期でしか塊の出力ができていないため、より高い周波での出力を必要とする場合は新たなポンプの検討が必要である可能性がある。

光源装置にはムラテック KDS 社が販売している LLP-5RGC という緑色のレーザーシート光出力装置を採用した。3V での低電圧出力が可能であり、さらに出力されたブルームを鮮明に観察しやすいという利点がある。また、可視化手法の一つである PIV 解析でもシート光が用いられていることが多いということからこちらを光源装置として選択した。

制御用 PC とマイコンには Macbook Air と ESP32-WROOM-32 を使用している。ESP32 からエアポンプと光源装置を PWM で制御できるように駆動回路には MOSFET とダイオードを組み込んでいる。PC と ESP32 はシリアル通信を行い、PC の方からエアポンプとレーザーシートの周波数や duty 比のパラメータを調整できるように Arduino IDE 環境でプログラムを作成した。

また、円形アクリルに取り付ける蓋と射出口は PLA を素材として 3D プリンタで作成し、射出口の直径が可変になる

ように設計している。また作成した射出口以外にも極細の射出口として利用とするためFlash Forge社の販売している3DプリンタであるCreator3に使用されている直径0.6mmのノズルも取り付けることが可能である。

3.3 実験環境

本研究ではブルームの噴射先である円形アクリルにLED光が反射して観察の妨げになることを防ぐために実験環境としてミニ暗室を作成した。作成した暗室は図4であり、アルミフレームで作成した骨格の各面に対して段ボールを取り付けて作成した。内側の各面に対して光陽オリエントジャパン社の無反射植毛布を貼り付けることで暗室内でのLEDの反射を抑えている。また、この無反射植毛布はスモークを噴射する円形アクリル内部や噴射口にも貼り付けている。反射を抑えることでスモークを撮影する際にカメラの焦点がスモーク以外に取られることを防ぎやすくすることが可能である。図5は無反射植毛布を噴射口に巻いた状態とそうでない状態の比較であり、使用している右図の方が噴射されるスモークが濃く捉えられていることがわかる。

実験の際にはミニ暗室の内部に図2の実験装置を内包し、外部からの光を完全に遮断する。実験の様子はiPhoneを撮影用カメラとして撮影することで記録する、また1面を開閉することで肉眼で射出の様子を観察することも可能である。



図4：作成したミニ暗室(390×370×310[mm])

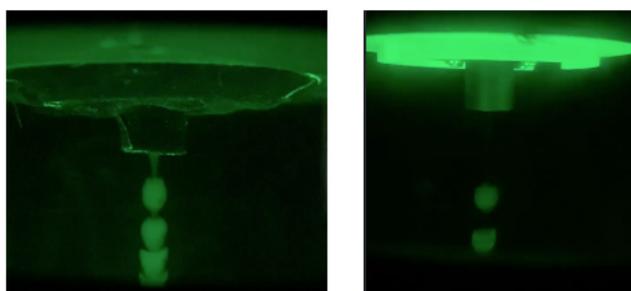


図5：無反射植毛布の反射の差

4. 実験

本実験では噴出したブルームに対して光源を常時点灯さ

せる場合と点滅させた場合を記録・比較することでスモークに対してストロボ効果を発生させることができるのかを調査した。

さらに記録されたブルームの流速等の解析も行うことで射出口から降下していくまでの平均流速を計測した。流速解析の目的としては平均流速の計測を行うことで現在使用している実験環境がブルームに与える空気抵抗などによる速度の変化などを調査することが目的である。

4.1.1 実験条件

本実験ではエアポンプからブルームを安定して出力できかつ、ストロボ効果が認知しやすいようにブルームの出力が断続的になるように周波数をまず調査した。その結果上記の実験を満たす周波数を5Hz、デューティ比を18/255[%]とした。設定したポンプの値に合わせて点滅時のレーザーシートの周波数とデューティ比の値はそれぞれ5Hz、50/255[%]とした。また、常時点灯する場合はデューティ比を255とすることで値を設定した。

実験環境は上述したミニ暗室内で行い、噴出口には0.6mm口径の3Dプリンタノズルを使用した。なお、実験の記録にはiPhoneをカメラとして使用することで動画を撮影した。

4.1.2 実験結果

撮影された常時点灯時の動画と点滅時の動画を比較した結果、点滅時の動画では噴出されるブルームが停止している様子が観察できた。この結果から流体としてスモークを利用した場合でもストロボ効果を発生させることは可能であることがわかった。

4.1.3 考察

ストロボ効果を発生させることはできたが、今回の実験のなかでいくつかの問題点が発見できた。まず、光源の点滅がちらつきを覚覚してしまうため、今後はより高い周波数での値の設定を目標としていきたい。次はポンプの値を設定していた際に噴出されたブルームが一つ前に噴射されたブルームと衝突してしまい、流速が変更されてしまっていたというものである。これらの改善策としては現在使用しているポンプをより高周波でより制御のしやすいものに変更することがまず考えられる。さらには実験装置のチューブ径などの各条件を変更していくことで実験装置全体の圧力などをコントロールすることでブルームの噴出を変えていくことなどが改善案として考えられる。

4.2 動画解析

本実験で得られた常時点灯時の動画に対してPIV解析を行うことで、噴射されているブルームの平均流速を調査した。

4.2.1 解析条件

動画の解析にはカトウ光研株式会社が提供している PIV ソフト Flow Expert2D2C を使用した。解析に使用した常時点灯の動画は 24FPS で撮影されているため、解析の範囲としてはフレーム間隔を約 42ms(1000ms/24 \div 41.66667)として合計で 336 フレームに設定し、合計で 14 秒間の解析を実行した。解析時のフレームの 1 部を図 6 に示す。図 6 右側は左側の実験映像の 1 フレームを切り取り速度ベクトルを表示したものである。速度ベクトルは格子という領域内で表され、本実験では射出口から煙の濃度が下がるまでの範囲で合計 156 の格子で解析を行なった。格子は射出口を上として 1 行毎に 6 個割り当てられ、27 行まで表示されている。

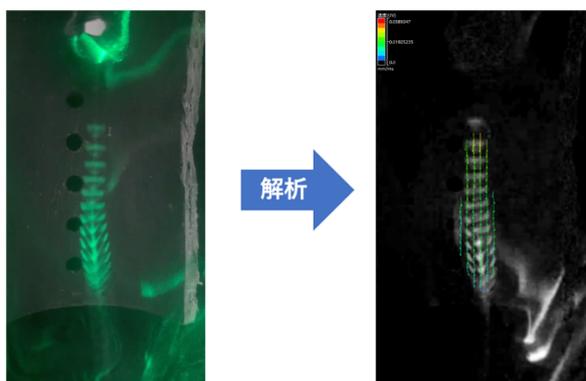


図 6 : 解析時の様子

4.2.2 解析結果

各フレームにおける流体の平均速度の推移をグラフ表示したものを図 7 に示す。実験時におけるプルームの平均流速は約 17.24 [mm/s]であった。

次に射出口部分から降下していく毎の平均流速を図 8 に示す。なお、図 8 のグラフは 1 行毎の平均速度を算出したものを表示している。図 8 から射出口付近から下降していく際に流速は増していることが読み取れる。

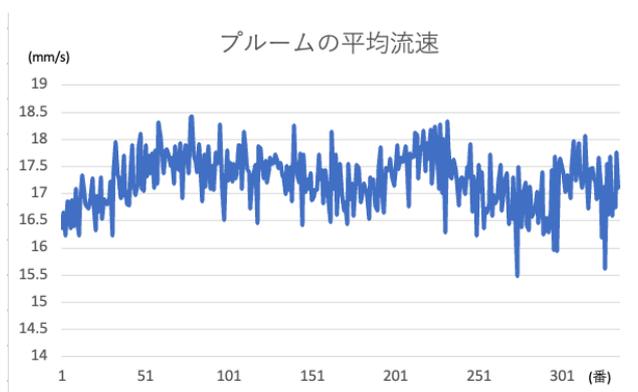


図 7 : 流速の解析結果

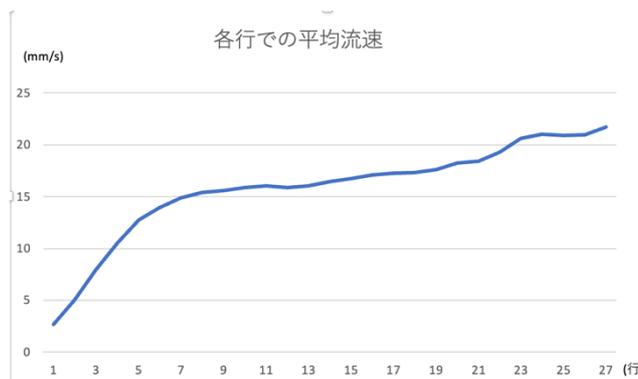


図 8 : 各行毎の平均流速

4.2.3 考察

図 7 の結果から今回はノズル径を 0.6mm とした場合のプルームの平均流速がわかった。今回の結果を基準値としてノズル径を変化させていった場合の流速の変化を比較していく方針とする。図 8 のグラフからは上述したように射出口から下降していく毎に速度が増していくことが読み取れたが、この結果は実験開始時の予想と反していた。予想では射出口から放たれたプルームが空気抵抗を受けることで徐々に速度を落としていくと仮定していた。この原因としてはプルーム間の距離が短いためにプルーム同士の衝突が起きることによって下にプルームを押し出しているのではないかと考えられる。今後の方針としてはプルーム間の距離を長くした際に同様の結果となるのかの検証が必要である。

5. まとめ

本研究では局所的な流体の可視化手法の提案としてストロボ効果を利用した可視化手法を提案した。今回、流体にスモークを使用した場合でもストロボ効果を発生させることで観察者が知覚する流体運動の速度に影響を与えられることが可能であるとわかった。

現状の課題点として一つはプルーム自体が気流の影響を受けて射出口から真下方向に対して逸れていくという現象がみられたことである。これの改善としてはプルーム自体の速度を上昇させる、または円形アクリル内を真空に近い状態にすることで気流の影響を減らすという案が考えられる。もう一つの課題点としては本実験でも挙げられていた光源の点滅周期が 5Hz と低い周波数で行なっていたため、光感受性発作の危険性があった点である。人間に害がない周期で点滅を行うためにはまずプルーム自体の噴射を高周波で行う必要があり、そのためには現在使用しているポンプ以外の種類のもので実験を行う必要がある。ポンプ自体をより最適なものにしていくことでより高い周波数での実験ができる可能性があり、かつ実験でも見られたようなプルーム同士の衝突などの現象も抑えられると期待できる。

スモークに対してストロボ効果を行うことで視覚的な演出材料としての利用が期待でき,さらにプルームを障害物と衝突させた際に発生するカルマン渦の発生の様子をリアルタイムで観察するといった流体運動の理解という部分での貢献が期待できる.今後の方針としては上記の課題点を改善しつつ,まず円柱などの小型オブジェクトに対してプルームを当てることでカルマン渦の発生の様子を肉眼で可視化できるのか調査してそこからより複雑なオブジェクトに衝突させた際の拡散の様子の可視化などを行なっていく.

参考文献

- 1) 流れの可視化技術のまとめ,石井幸治,
- 2) Stop Motion Goggle :高速液晶シャッターを用いた視知覚の拡張,永谷直久, 上間裕二, 古川正紘, 杉本麻樹, 稲見昌彦
- 3) Particle Image Velocimetry(PIV)の基礎, 石間経章, 日本燃焼学会誌,Vol.61,No.197(2019),224-230
- 4) Time Fountain-Optical illusion(最終閲覧日 2022 年 7 月 27 日)
<https://www.youtube.com/watch?v=rvY7NGnCgU>