

タフト法を用いた後流の可視化実験

－流体の速度依存性、物体の形状依存性に注目して－

増井壮太

(奈良教育大学 教科教育専攻 理科教育専修)

中村元彦

(奈良教育大学 理科教育講座 物理学)

Visualization Experiment of Flow behind Objects Using Tuft Method:

Focusing on the velocity dependency of the fluid and the shape dependence of the object

Sota MASUI

(Graduate School of Education, Nara University of Education)

Motohiko NAKAMURA

(Department of Physics, Nara University of Education)

要旨：後流とは、流体中に置かれた物体の後方にできる流れのことであり、境界層がはく離することによって形成されるものである。後流に関して様々な研究が行われているが、未知の現象が多い分野である。本研究では、タフト法を用いた風洞実験により、後流構造における流体の速度依存性、及び物体の形状依存性について考察した。その結果、速度が大きいほど後流において乱流が生じる範囲が大きくなることがわかった。また、その範囲は物体の形状にも依存しており、円柱が一番小さく、次いで四角柱（ひし形）、立方体が同じくらいの大きさであることがわかった。また、本研究で行った実験において、高校生への実践を通して、学校教育への応用について考察した。

キーワード：タフト法 Tuft method
可視化実験 Visualization experiment
風洞装置 Wind tunnel device

1. はじめに

1. 1. 物体の後流構造

流体中に障害物が存在すると、その障害物の後ろの流れ（後流）には乱れが生じる。後流は境界層がはく離することによって形成されるものである。まだまだ未知の現象が多い後流に関する研究として、実験的、及び数値解析、シミュレーションなど様々な研究がなされている。例えば、渦放出（渦形成）機構や渦列後流中の乱流構造に関する研究⁽¹⁾、円柱の後流渦に及ぼす主流の速度こう配の影響⁽²⁾などがある。長年航空学の分野では、飛行機の翼がつくる後流の研究がなされてきた。また、2018年の冬季オリンピックで金メダルを取り、脚光を浴びた女子パシュートにおいて、如何に空気抵抗を減らすかという点で、後流の研究は注目を浴びている。その後流構造は、流体の速度や障害物の形状により変化する。

1. 2. 流れの可視化

流体の流れを可視化するために、様々な方法が存在する。油と顔料の混合物を物体表面に塗布して、流れの状態を観

察する「油膜法」、タフトと呼ばれる糸などを用いて風向を観察する「タフト法」、煙やミストを流体中に流して流体の流れの変化を観察する「トレース法」、あらかじめ流れ場全体に粒子を混入させておき、その挙動から流体の流れを観察する「懸濁法」などが可視化方法として代表的なものである。⁽³⁾その中でも、本研究では後流の空気の流れを観察するため、低速から高速まで手軽に利用可能である特徴を持つタフト法を用いた。煙を用いたトレース法も流れ場全体の空気の流れを可視化できるが、煙が広がるため、詳細な物体の後流における乱れの様子を観察することが困難であった。一方、タフト法は流れ場中の任意の位置にタフトを配置でき、その場の流れを観察することができる。

タフト法には、物体表面にタフトを貼りつける「表面タフト法」、タフトを風向に対して垂直な方向に格子状に配置する「タフトグリッド法」、物体表面にポストを立て、表面から離れた位置の流れを観察する「デブスタフト法」などが存在する。しかし、本研究ではタフトグリッド法を応用し、後流の流れをみることに特化するために、タフトを風向に対して水平方向に格子状に配置することを提案する。このようにすることで、トレース法同様、風向に対して水平方向の流れ場全体の空気の流れを可視化するこ

とができた。

また、例えば小学校におけるコンクール⁴⁾や、高等学校における自由研究⁵⁾などでは、風向の可視化実験が行われており、児童生徒にとって関心の高い分野である。また、教材への応用として、高等学校においてトレース法を用いた可視化実験の実践⁶⁾は報告されているが、タフト法を用いた実践はみられない。

1. 3. 本研究の目的

流体中における物体の後流構造については様々な研究がなされているが、後流における流体の速度依存性、また、物体の形状依存性について、タフトを風向に対して水平方向に格子状に配置するタフト法を用いて可視化させた研究はみられない。そこで本研究では、タフト法を用いて、後流における流体の速度依存性および、物体の形状依存性を明らかにすることを目的とする。

また、手軽に作成できるタフト法を用いた可視化実験の学校教育への応用について、高校生に対する実践を通して検討することを目的とした。

2. 風洞実験による後流構造の観察

2. 1. 実験方法

実際に空気中で物体を運動させ、物体の後流における乱れの様子を観察することは非常に困難である。そこで今回は風洞装置を用いて疑似的に観察することにした。風洞装置から発生させる風の速度を段階的に変化させ、後流の乱れにおける流体の速度依存性を観察する。また、流体中に設置する物体の形状を変え、後流の乱れにおける物体の形状依存性についても観察する。図 1 に実験の様子を示す。

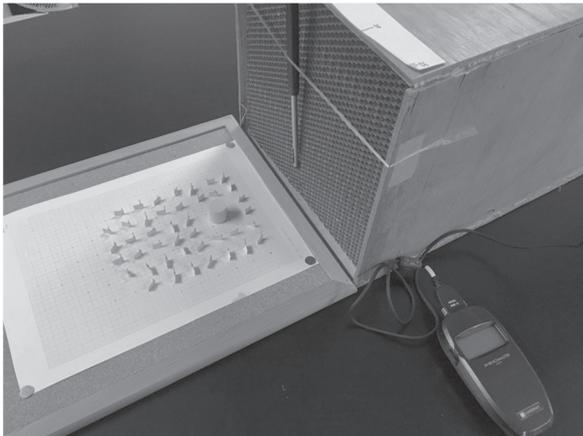


図 1. 後流の乱れを観察する実験の様子

<実験器具>

- ・ 風洞装置
- ・ タフト
- ・ コルクボード
- ・ 携帯型風速計(カノマックス社製 ANEMOMASTER)
- ・ 物体 3 種類

また、今回実験に使用した (a) タフトと (b) タフトを配置した様子を図 2 に示す。今回用いたタフトは針金と紙を用いて製作した。タフトの長さは 1 cm になるようにした。そして、方眼紙を敷いたコルクボードにタフトを刺し、直立させるようにした。コルクボードを用いた理由としては、任意の位置にタフトを立てることができるためである。図 2 (b) のように 2 cm 間隔でタフトを配置し、物体を置いて流れ場全体の風向や乱れの観察を行うが、複数のタフトを配置することでタフト同士のわずかな影響は避けられない。そこで、より厳密な流れを観察したい地点においては、その地点以外のタフトを取り去って観察を行うことにした。

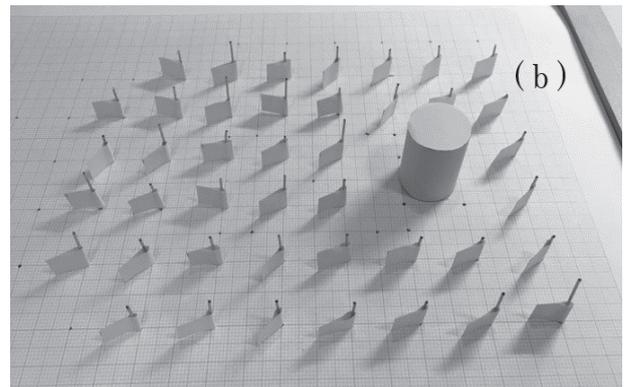
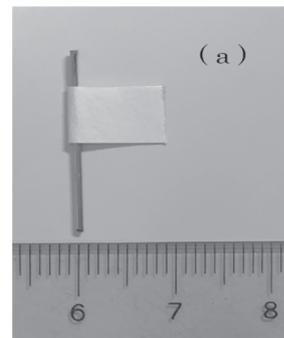


図 2. (a) タフトと (b) タフトを配置した様子

今回用いた物体を図 3 に示す。物体の形状によって後流の様子に違いが生じるのか観察するために、断面が丸、ひし形、正方形の 3 種類の形状の柱で観察を行った。それぞれ風が横切る代表長が 2 cm になるようにしてある。

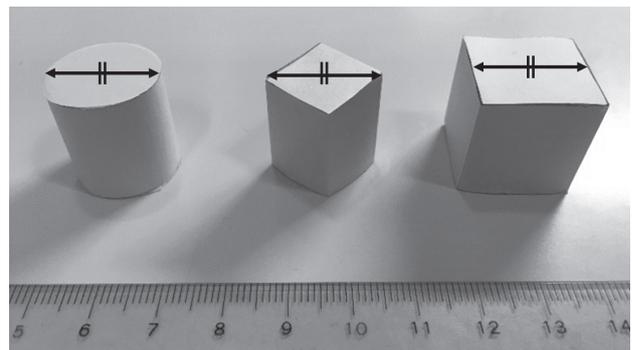


図 3. 実験に用いた 3 種類の物体

また、風速を変化させることに関して、図4のように風洞装置の吹込口側に亚克力板を設置し、吹込口との距離を変化させることで、風速を制御できることを見出した。

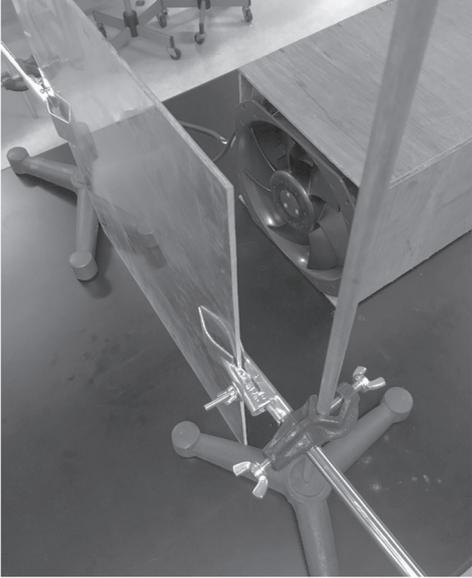


図4. アクリル板を用いて風速を制御する様子

今回の実験では、風速を 6 m/s、及び 3 m/s となるように亚克力板の位置を調節した。風速計で風速を測定した結果、誤差がそれぞれ±0.05 m/s であったことから、均一な風速の風ができていることを確かめた。

2. 2. 風洞装置

今回使用した風洞装置は、私が所属する研究室で過去に製作されたものである。風洞装置とは、人工的に整流された風を発生させ、実際の流れの場を再現するための装置である。実際に空中を飛行する、すなわち流体の中で運動する物体について詳細な観測や解析を行うことは困難である。そこで、物質を固定した状態で周りの流体を動かすことで、局所的な風速や圧力分布、はたらく力や流れの可視化を詳細に観測しよう、というものである。図5に今回使用した風洞装置の模式図を示す。

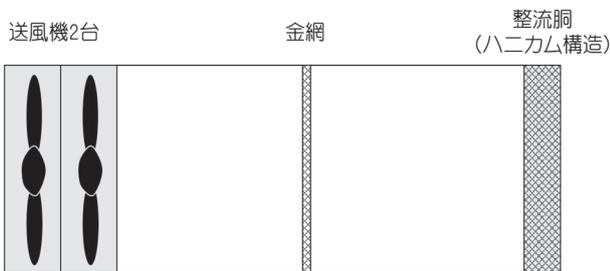


図5. 風洞装置の模式図

風洞装置を用いる目的は様々で、飛行機の翼周りの風の流れの観測⁽⁷⁾や建物の耐風性の検証⁽⁸⁾、自動車にかかる空気抵抗低減技術の開発⁽⁹⁾などが主な用途として挙げられる。実際に 2018 年の冬季オリンピックで活躍した女子バ

シュートの練習にも、風洞装置を用いていたという報告もある。今回は物体の後流における乱れの様子を観察する目的で使用した。

3. 実験結果、考察

3. 1. 物体の形状依存性

流体の速度を 6 m/s としたときの円柱、四角柱（ひし形）、立方体の 3 種類の物体の後流の様子を図6に示す。

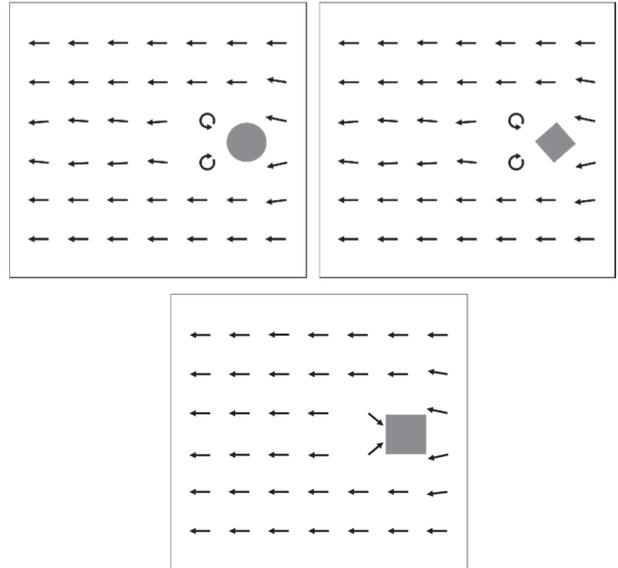


図6. 流れ場の風向 (6 m/s)

図6より、円柱と四角柱（ひし形）は概ね同じように双子渦ができてることがわかる。また、立方体においては逆風が生じていることがわかる。しかし、3種を通してあまり大きな乱れが見られなかった。その原因として、物体の上方を通過し、物体の後ろに回り込んだ風が、物体の左右から回り込んだ風に影響を及ぼしている可能性が考えられる。そこで、左右から回り込んだ風のみその後流への影響を見るため、コルクボードとの間に物体と同じ高さの隙間を開けるように透明の亚克力板でふたをした。その様子を図7に示す。

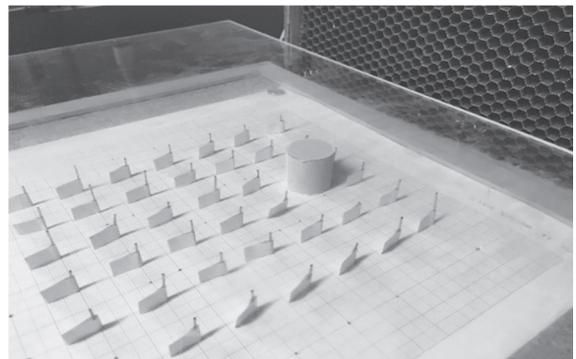


図7. アクリル板でふたをした様子

このようにすることで、物体の上方を通過する風はなく

なり、左右から回り込む風のみを見ることができ。流れ場にアクリル板でふたをした状態で、先程と同様に速度 6 m/s の風を送ったときの後流の様子を図 8 に示す。

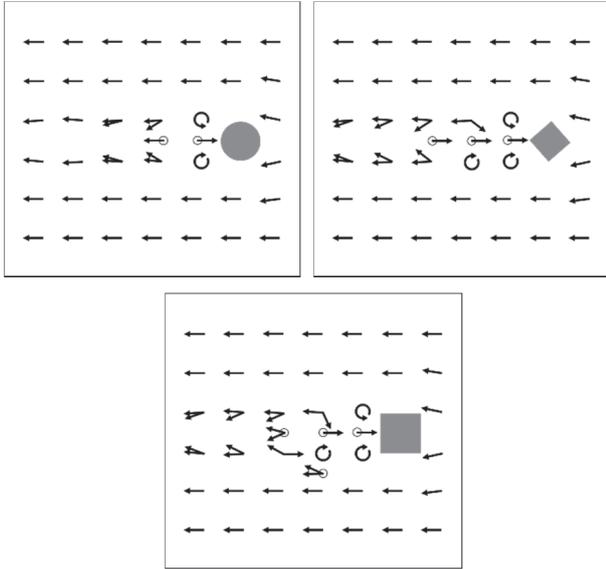


図 8. 流れ場の風向 (アクリル板でふた、6 m/s)

図 8 において、矢印の付け根に○がある地点は、その地点以外のタフトを取り去り、一つのタフトで観察を行った。図 8 より、3 種類とも後流の乱れの範囲が大きくなったことがわかる。このことから、やはり物体の上方を通過した風が物体の後ろに回り込み、左右から回り込んだ風に影響を及ぼしていたことがわかった。円柱においては、後流の乱れの範囲が後ろに広がっていたが、渦のできる位置はアクリル板でふたをする前後で変化しなかった。このことから、円柱は物体の上方を通過した風が後流に与える影響は少なかったことがわかる。四角柱 (ひし形) においては、渦ができる範囲や後流の乱れの範囲が後ろに広がり、さらに逆風が発生していることがわかる。このことから、四角柱 (ひし形) は物体の上方を通過した風が後流に与える影響が比較的大きかったことがわかる。また、円柱の結果と比較すると、後流に見られる渦や乱れの範囲が大きかったことから、後流を乱れさせる影響力は四角柱 (ひし形) の方が大きいことがわかる。立方体においては、渦が発生し、後流の乱れの範囲も後ろへ広がり、さらに逆風を観察することができた。アクリル板でふたをする前後で比較すると、3 種類の形状の中で一番後流の流れが変化していることがわかる。このことから、立方体は物体の上方を通過した風が後流に与える影響が大きかったことがわかる。また、ここで注目すべきは風上側から見て、物体の左右で後流の乱れの様子が異なっていることである。四角柱 (ひし形) でもわずかな違いが見られたが、立方体では顕著に見られた。その原因としては、風洞装置やタフトの性能、及び物体のわずかな非対称性などが考えられる。

ここで、レイノルズ数により結果の妥当性について検討する。レイノルズ数 (以下 Re) とは、 $Re = v\rho L/\eta$ で表さ

れる。ここで v (m/s) は流体の速度、 ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) は空気の密度、 L (m) は物体の大きさ、 η ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) は空気の粘性率を表している。条件より、 $v = 6.0$ 、 $\rho = 1.2$ 、 $L = 0.020$ 、 $\eta = 1.8 \times 10^{-5}$ とすると、 $Re \cong 8.0 \times 10^3$ となる。タフト法による先行研究はなかったため、数値シミュレーションによる先行研究を参考とした。安藤ら (2009) によると、 Re が 8000 より大きい場合、後流には定期的な渦は発生せず、乱流状態になることが報告されている。⁽¹⁰⁾乱流の及ぶ範囲までは明言されていないため、範囲については検討できないが、定期的な渦は発生せず、一定範囲で乱流状態になっているという点で、概ね実験結果と合致している。

以上より、3 種類の形状の中で円柱が一番後流への影響が小さいことがわかった。また、四角柱 (ひし形) と立方体を比較すると、後流にできる乱れの範囲の長さはおおよそ同じだが、立方体は乱れが左右非対称になることがわかった。

3. 2. 流体の速度依存性

流体の速度を 3 m/s としたときの円柱、四角柱 (ひし形)、立方体の 3 種類の物体の後流の様子を図 9 に示す。今回ははじめからアクリル板でふたをして観察した。

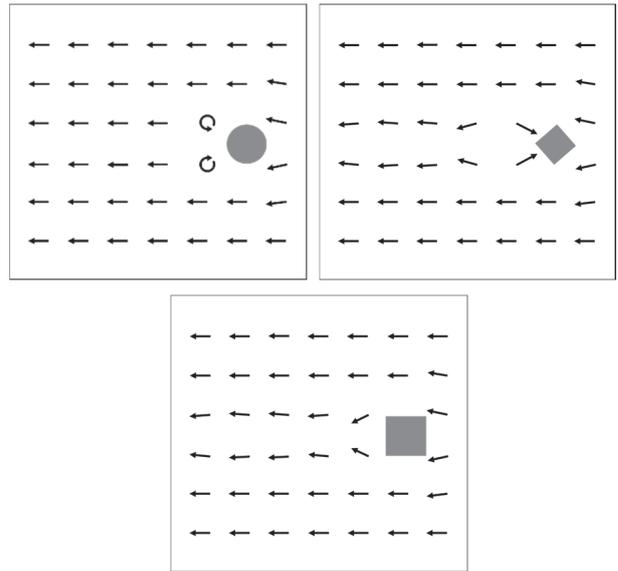


図 9. 流れ場の風向 (アクリル板でふた、3 m/s)

図 8 と図 9 を比較することで、後流の乱れの速度依存性を観察することができる。円柱においては、6 m/s のときと比較すると、乱れの範囲の長さは短くなっているものの、3 m/s の時にも渦の発生が見られ、流れ場全体的には概ね変化が見られないことがわかる。このことから、後流への影響において、円柱はあまり速度に依存していないことがわかる。四角柱 (ひし形) においては、6 m/s のときと比較すると、ほとんど乱れが見られなくなり、また渦も見られなくなっている。このことから、後流への影響において、四角柱 (ひし形) は速度に大きく依存し、速度が小

さくなると後流への影響も著しく低下することがわかる。立方体においては、6 m/s のときと比較すると、四角柱（ひし形）と同様にほとんど乱れが見られなくなり、渦や逆風も見られなくなっている。このことから、後流への影響において、立方体は速度に大きく依存し、速度が小さくなると後流への影響も著しく低下することがわかる。

風速が 3 m/s の場合、 $Re \cong 4.0 \times 10^3$ となる。安藤ら (2009) によると、 Re が 4000 程度の場合、後流にはヘアピン状渦が発生することが報告されている。⁽¹⁰⁾ 実験結果を見ると、物体のわずか後方にのみ渦が発生していることから、風速が 3 m/s の場合においても、概ね実験結果が妥当であることを示している。

後流への影響において、流体の速度依存性、また物体の形状依存性について見てきた。円柱はあまり速度に依存せず、3 種類の形状の中で一番後流に与える影響が少ないことがわかった。また、四角柱（ひし形）は円柱よりも後流に与える影響が大きいことがわかった。さらに、速度に大きく依存し、6 m/s のときは広範囲の乱れや渦、逆風を観察することができたが、3 m/s のときは乱れや渦は見られなくなった。また、立方体も円柱よりも後流に与える影響が大きいことがわかった。そして、四角柱（ひし形）ではあまり見られなかった左右非対称な後流の乱れを観察することができた。さらに、四角柱（ひし形）と同様に速度に大きく依存し、6 m/s のときは渦や逆風を観察することができたが、3 m/s のときは見られなくなった。

4. 学校教育への応用に関する実践と考察

現在、学校教育の中で「流体」という分野を取り扱っているのは、小学校の理科の「ものの温まり方」という単元の中の「熱対流」のみである。同じ流体である「風」に関しては、我々が日常的に感じているものの、「高気圧から低気圧に向かって吹く」という原理を学習するのみである。物体に風がぶつかったとき、その後の風の流れはどうなるか、という問いは、身近なものを科学的に考察する機会を与えることができると考えられる。「風」というテーマを取り扱って実験を行うことで、児童生徒の想像力や思考力、考察力などを育むことができるのではないかと考える。

そこで、公立高校理数科の 2 年生 5 名を対象に、以下のような実践を行った。まず、物体に風があたったとき、その後にはどのような風の流れができるか予想させた。つづいて、風の流れを目に見えるようにするにはどうすればよいか考えさせた。そして、タフト法と風洞装置を紹介し、今回のようなタフト法を用いた風洞実験を行い、物体の後ろにできる風の流れはどうなるか観察させ、物体の形状を変化させるとどうなるかを考察させた。実験後にアンケート（今回の実験について分かりやすかったか、興味関心が持てたか、学校教育で実践することについてどう思うか、可視化実験を利用して今後どのようなことを調べてみたいか、の計 4 項目）を実施した。実践後、このアンケート

の意味、アンケートの内容は成績に関連しないこと、及び個人的なデータとして利用しないことを説明した後に、アンケートを実施し、回収した。その結果、5 名全員から「目で見ることができ、分かりやすかった」、また、「この実験を通して「流体力学」に興味関心を持つことができた」という意見が得られた。

流体力学は理論的な考察や正確なシミュレーションなどを行うのが困難な部分も多い。そのため、この分野を中学校や高等学校で教えるのは難しいと考えられる。しかし、「風」について今回のような実験を通して取り扱うことは、身近なものを科学的に考察するという点では、適当なテーマなのではないかと考える。また、風の可視化方法の中でも本研究で行った実験で用いたタフト法は、コルクボードや針金、紙など身の回りにあるものから簡単に製作することができ、一度に流れ場全体を視覚的に捉えられるため、学校教育で用いやすいと考えられる。

5. まとめ

今回提案したタフトを風向に対して水平方向に格子状に配置するタフト法を用いた風洞実験により、速度が大きいほど後流において乱流が生じる範囲が大きくなることがわかった。また、その範囲は物体の形状にも依存しており、円柱が一番小さく、次いで四角柱（ひし形）、立方体と同じくらいの大きさであることがわかった。立方体においては、後流に左右非対称な乱れが見られた。しかし、後流構造については、現象自体が非常に複雑であり、理論的な考察や正確なシミュレーションなどを行うことは困難である。今後は、現時点で確立されている理論的考察やシミュレーションを用いて今回の実験と同条件にした場合の結果と、今回の実験結果と比較することで、タフト法を用いた風洞実験による可視化精度のさらに詳細な評価ができればと考えている。特に、流体の速度を 6 m/s としたときに立方体の後方に見られた左右非対称な乱れの発生原因について、明らかにしていきたい。

また、高校生に対し、今まで学校教育での実践例が報告されていないタフト法を用いて風を可視化するという実践を行った結果、「この実験を通して「流体力学」に興味関心を持つことができた」という意見が得られた。本研究で行ったようなタフト法を用いた流れの可視化実験を、児童生徒の科学的な視点の育成の一環として、学校教育へ応用していければと考えている。

参考文献

- (1) 松村昌典 (2005), 後流渦形成時における渦度・循環の消失現象, ながれ, 24, P.161-P.16.
- (2) 加藤榮二, 安達勤 (1976), 円柱の後流渦に及ぼす主流の速度こう配の影響, 日本航空宇宙学会, 24, 270, P.333-P.341.

- (3) 中山泰喜, 青木克己 (編)(1998), 可視化技術の手ほどき, 朝倉書店.
- (4) 瀧口涼葉 (2011), 空気って何だろう partIV, 第 52 回自然科学観察コンクール入賞作品 (小学校の部) 継続研究奨励賞.
- (5) 群馬県立高崎高等学校 (2008), 渦を巻く風を作り出し、目に見えない動きを可視化, *Nature Asia-Pacific, High School SCIENTISTS*, June 2008, volume5, P.32-P.33.
- (6) 荒賀浩一, 村田圭治 (2015), 教育用小型可視化風洞の製作と基礎データ測定, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要(9), P.1-P.3.
- (7) 中谷輝臣, 野中修, 室田勝一, 近藤洋史, 林良生 (2000), 大型低速風洞の動力付模型試験システム, 航空宇宙技術研究所報告.
- (8) 由井陸粹, 山本修司, 森川陽介, 中垣毅, 森越健二(2013), 新湊大橋の鋼桁耐風対策について, 沿岸技術研究センター論文集, No.13.
- (9) 石原裕二 (日産自動車 (株)) (2002), 自動車の空気力学, *ながれ*, 21, P.62-P.67.
- (10) 安藤正恵, 阿部伸之, 田代伸一 (2009), 種々のレイノルズ数に対する三次元角柱後流の渦形成機構, 数値流体力学シンポジウム, 23, B7-4.