

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体现象

## 渦のマジック

\*同志社大学エネルギー変換研究センター 水島二郎†

### Magic by Vortices

Jiro Mizushima, Doshisha University Energy Conversion Research Center

#### 1 飛行機に働く抵抗に負けない推進力

ジャンボジェット機は地上およそ 10 km の一定高度を時速 900 km/h の一定速度で飛行します。この状態を巡航状態といいます。高度が高いほど空気抵抗が小さいので、燃費は良くなるのですが、ジェットエンジンで燃料を燃やすために空気が必要なのであまり高度を上げることができません。高度 10 km あたりがちょうど良いのです。

飛行機が一定の高度、一定の速さで巡航するためには、飛行機に働く重力と浮力が釣り合う必要があります。飛行機の重量は離陸時から着陸時まで燃料の消費による減量を除いてはほぼ一定なので、離陸時や高度を変更するときには浮力を変える必要があります。飛行機の浮力は翼の上下面に働く圧力差によって生じます。翼の上の面は空気の速さが速いので圧力が小さく、下の面は圧力が大きくて、圧力差が生じるのでした。このことを別の角度から見ることでもできます。翼は前方から来る空気を下の方へ押しやっ、下向きの流れを作ることにより揚力を得ていると考えます。翼が空気に下向きの速度を与えるときは下向きに力を加えています。このとき、作用反作用の法則によって、翼は空気から上向きに揚力をもらっているのです。このことは、自転車や台車に乗っているときに壁を押すと自分が反対側に押される経験がある人にはよくわかることでしょう。このことを整理していうと、空気に運動量を与えると自分は逆の方向に力を受けるといことです。運動量というのは質量と速度の積です。

飛行機が巡航しているときの上下方向の力の釣り合いはわかりましたが、水平方向の力はどのように釣り合っているのでしょうか。飛行機が同じ速度で巡航しているときは飛行機に働く空気抵抗と飛行機のジェットエンジン

による推進力が釣り合っています。飛行機的设计では空気抵抗を小さくすることが大切で、揚力と抵抗の比(揚力/抵抗)を揚抗比といいます。この揚抗比が大きいほど経済的にすぐれた飛行機なのです。なぜかという、飛行機に働く揚力は飛行機に働く重力と同じでなければならないので、機体を軽くする以外には自由に変えることは難しいですが、抵抗を小さくすると目的地まで到達するのに必要な燃料を節約できるからです。揚抗比はジャンボジェット機で 17 くらいです。最近開発されたボーイング 787 は炭素繊維を使って機体を軽くして、燃料を節約していますが、空気抵抗を小さくすることも燃料を節約することができます。

#### 2 飛行機に働く抵抗

飛行機に限らず、流れの中に物体があるときは流体から抵抗力を受けます。物体が流体から抵抗力を受ける原因は 2 つあります。図 1 のように物体表面を流れる流体が物体に摩擦力を及ぼすことが一つで、これは流体のもつ粘性という性質によります。もう一つは物体の前面には大きな圧力が働き、後面には小さな圧力が働くので差し引き流れの方向に物体は力を受けます。しかし、揚力の場合と同様に、物体が抵抗力を受けるのは物体が流体の流れと反対方向に押しているからだと考えることができます。このことは物体の後方での速度分布を調べればわかります。

実際、流速の分布を測定してみると、図 2 のようになっています。この図は一定速度で巡航している飛行機の翼を基準とした座標系から見た図なので、飛行機が止まっていて前方から一様な空気の流れがあります。飛行機の後ろでは流速が一部分遅くなっていて、飛行機は流れの方向に力を受けたことがわかります。

\* 〒 610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3

† E-mail: jmizushi@mail.doshisha.ac.jp

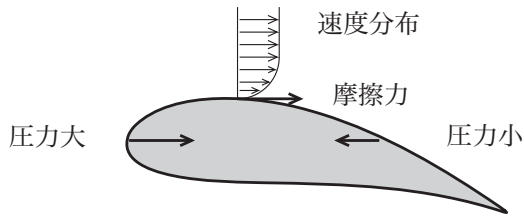


図1 翼が受ける抵抗力は摩擦力と圧力、翼を基準とした座標系から見た図。

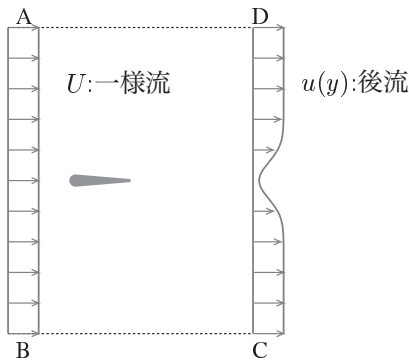


図2 翼が抵抗力を受けるとその後流は流速が遅くなる。

### 3 円柱後方にできる渦列

流れが物体に抵抗力を及ぼすと、反作用として流れが物体から力を受けて流速が遅くなります。このことを簡単な実験で確かめるには流れの中に円柱を入れてみるとわかります。あるいは、静止した流体の中で円柱を一定の速さで動かしても同じです。お風呂に入ったときに浴槽の水面に指を立ててゆっくりと動かしてみるといいですね。実際に実験をしてみると、図3のように円柱の後方には2列の渦列がきれいにできます。この2列の渦列のそれぞれの列では同じ向きに回転する渦がなっていますが、反対側の渦列では渦の回転方向が逆です。また、それぞれの渦の円柱からの位置は互いに向かい合う列の渦間隔の中心にくるようになっています。もう少しわかりやすく、渦の配列を図に描くと図4のようになります。カルマンは渦列がこのように千鳥配列となり、図の  $h$  と  $l$  の比がおおよそ 0.28 のときにこのような2列の渦列が安定に存在することを明らかにしたので、このような渦列はカルマン渦列と呼ばれています。カルマン渦列のそれぞれの渦は円柱の後流の外側から内側に流体を巻き込むように回っています。だから、渦が回る方向に流れが誘導されていると考えれば、円柱の後流はその両側の流れの流速よりも遅くなっています。このように流れが遅くなるのは円柱には抵抗力が流れの方向に働いている証拠でした。



図3 円柱後流の渦列写真(カルマン渦列)。

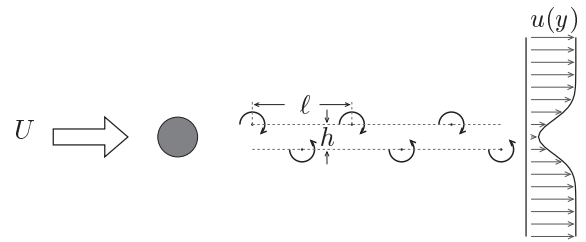


図4 円柱の後流には渦列ができる(カルマン渦列, 模式図)。

### 4 泳ぐ魚の後方にできる渦列

水の中で魚が泳ぐときは尾ひれをパタパタと動かして水を後ろに追いやります。このようにすると水が魚の尾びれから力を受けて流速が速くなります。逆に、魚は水から反作用の力を受けて前に進むことができます。このときの流れのパターンは図5のように、魚の後には円柱の後流でできたカルマン渦列とよく似てはいるのですが、それぞれの渦の回転方向が逆になった渦列ができます。渦は2列の渦列の中心で魚の進む方向と逆回りの流れを誘起していて、流速もそこだけ遅くなっています。

このように、渦を見ると流れの中で物体が抵抗を受けているのか、あるいは推進力を受けているのか判断することができます。しかし、渦ができないと抵抗や推進力が働いていないわけではありません。これまで見てきたように渦というのは流体がある点を中心として

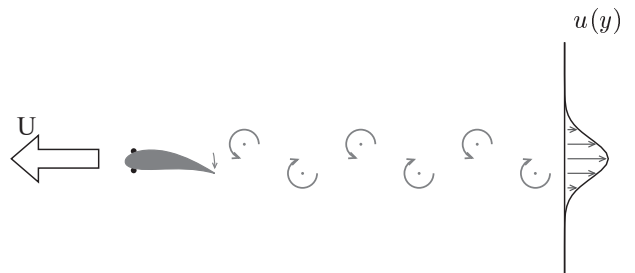


図5 魚が泳ぐときの後流にはカルマン渦列と逆回りの渦列ができる。

回転運動しているときの流れであり、ほぼ円形に近い流れのパターンになっています。船が動き出すときや、川の岸などにある障害物の後方には必ずといってよいほどに渦ができます。なぜこんなに渦ができるのでしょうか。それは流体が動くときにまわりの流体から受ける抵抗力に関係があります。ある小さな範囲の流体が動くときはまわりの流体も一緒に動かなければなりません。流体が一方向に動くときは、前方の流体を押し、後方の流体を引っ張り、両側面の流体を引きずって動く必要があります。しかし、円形の流体部分だけが回転するのであれば、その円形部分だけの流体を押し、あるいは引っ張って動かせばよいのです。もし、流体に粘性という性質がなければこのような回転運動は一度生じると永久に続きます。このとき、流体が回転運動するためには流体を円の中心に引っ張る力が必要です。そうでなければ運動は円運動とならず、直線運動になります。流体に働く遠心力と釣り合う力といってもいいです。この力は流体の中に分布する圧力によって生じています。したがって、渦があるとその中心は圧力が低いのです。このことは台風などでよく知っていますね。台風は熱帯性低気圧の一種なので、台風の中心の気圧は低く、その中心のまわりを空気や水蒸気や水滴が向心力を受けてまわり続けることができるのです。

## 5 流体の自転運動—渦度

これまでは流体の回転運動を渦と呼んできましたが、もう少し詳しく渦のことを知るためには「渦度」という量を考えなければなりません。渦度をわかりやすく理解するために、流体の円運動を簡単化して考えましょう。図 6(a) は原点  $O$  のまわりを回る流体粒子を描いています。ここでは、流れの中に小さなある領域を考えて、この領域内にある流体全体を流体粒子と呼んでいます。この図では小さな長方形領域にある流体を流体粒子と呼んでいます。この流体粒子は原点  $O$  のまわりを公転しているだけでなく、流体粒子自身も回転しています。図 6(a) の場合では 1 回公転する間に 1 回自転しています。地球のまわりをまわる月の運動と同じですね。月も地球のまわりを 1 回公転する間に 1 回自転するので、月の裏側は地上からは見えません。ハンマー投げのハンマーも同じです。このとき、自転運動の速さ、すなわち、1 秒間に自転する角度に相当するのが渦度で、正確には自转角速度の 2 倍を渦度と呼びます。これとは異なり、図 6(b) では長方形の流体粒子は公転している間も自身は自転せず、N 極は常に  $y$  軸の方向を向いています。

もう少し詳しくみてみましょう。図 6(a) の流れでは各流体粒子は自転をしながら、公転をしていて、流れの中のすべての流体粒子が 1 回公転する間に 1 回自転す

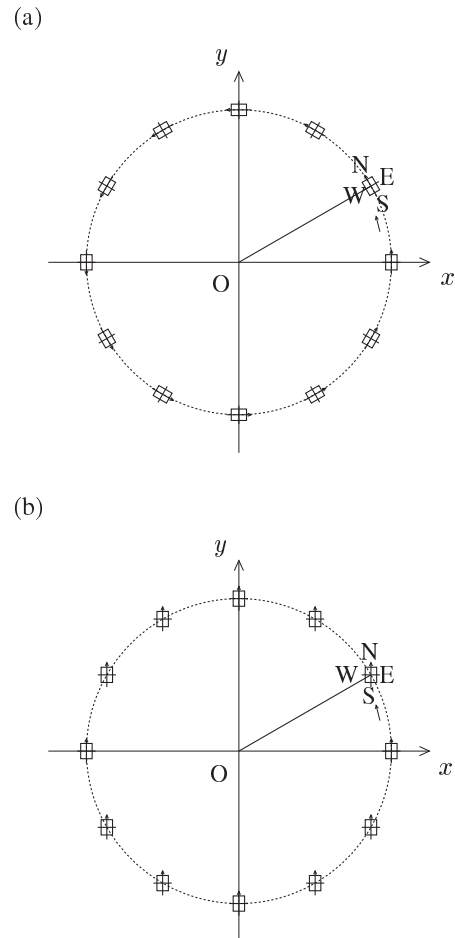


図 6 渦度をもつ渦ともたない渦。(a) 渦度をもつ渦、(b) 渦度をもたない渦。

るとすれば、その自転の速さである渦度はすべての粒子が同じ値をもっていることになります。この流れ場の特徴は、流体粒子の公転速度は原点から遠くなるほど速いという点です。実は、このような運動は流体でなくても私たちの身近に起こっています。変形しない物体がある軸のまわりに回転すると、その物体内の各点は 1 回公転する間に 1 回自転しているのです。だから、地球なども同じで、地球が 1 回自転する間に地球上のものはすべて 1 回自転しています。言葉が混乱してきましたね。ここでは、地球が 1 回自転するとき、私たち人間も大陸も大洋もみんな地球の自転軸のまわりに 1 回公転し、さらに自分の中心軸まわりに自転しているのです。特に、北極海や南極海の水の粒子は地球が 1 回自転する間に自分の中心軸まわりに 1 回自転しています。北極海を上空から見ると海の水は反時計まわりに地球の自転軸のまわりを公転していて、水の水の各粒子もまた反時計回りに自転しています。南極の海を上空から見ると、海の水は時計回りに公転していて、流体粒子も時計回りに自転しています。このような渦を簡単に見る方法は図 7(a) の

ように、円筒容器に水を入れて、水を容器ごと回転すればいいのです。

一方、図 7(b) では、流体粒子は自転をせずに公転だけをしていて、流体粒子は渦度をもたない流れです。しかし、この流れの中に全く渦度がないかといえば、そうではなく、図 7(b) の原点付近には小さな範囲の中では渦度があります。原点の小さな範囲に渦度があって、その範囲の流体が自転しながら公転していて、まわりの流体は中心部の流体の回転によって粘性によって引きずられて回転をしています。この流れ場では、中心から遠ざかるほど流体粒子の公転速度は遅くなることです。図 7(a) と逆ですね。この流れを見るには図 7(b) のように円筒容器の底の中心に小さな排水口を作って、そこから容器内の水を排水します。容器のある高さまで入っていた水は排水口に吸い込まれるようにして容器から出て行きますが、しばらくすると排水口の上方に弱い渦が生じて、水面も凹みができます。この凹みは容器全体を回転したときのように容器断面全体にわたるような曲面ではなく、表面の中心に限られたもので、水面が下がるとこの凹みが下へ長く伸びてやがて表面から排水口まで空気を巻き込んだ細長い渦に発展します。このような渦はバスタブ渦と呼ばれることがあります。お風呂に張った水を排水するとき日常的によく見られるからです。

バスタブ渦はどうしてできるのでしょうか。この渦は後に話題となる台風と同じように北半球では反時計方向に回り、南半球では時計方向に回るのでしょうか。このような疑問に答える前になぜバスタブ渦ができるのかを考えてみましょう。バスタブ渦のできる原因は一通りではありません。いろいろな場合があるので、しっかりと流れを分類しておく必要があります。まずは、最も単純な場合として、たった今見てきた図 7(b) の場合を考えます。容器は円形断面で、排水口は底面の中心にあるので、排水する直前に水が完全に静止していたとすれば、軸対称な流れが生じると考えられます。流れが軸対称であれば容器内の渦度を足し合わせた量は粘性による減少と排水口から流れでることによる減少するのみで、渦度が新たに誘導されることはありません。したがって、水を排水するときできる渦ははじめに静止していた水の中にわずかに含まれていた水の乱れがもつ渦度と地球の自転による渦度が原因であるとしか考えることができません。水中にある渦度が容器全体から排水口のある中心部に集まってきて、大きな渦を作ります。しかし、地球の自転による渦度は、非常に弱い水中の乱れに比べてもさらに小さいので、バスタブ渦ができる原因のほとんどは乱れによります。容器中に含まれている乱れがどのような性質かわからず、反時計回りなのか時計回りなのかもわかりませんので、バスタブ渦の回

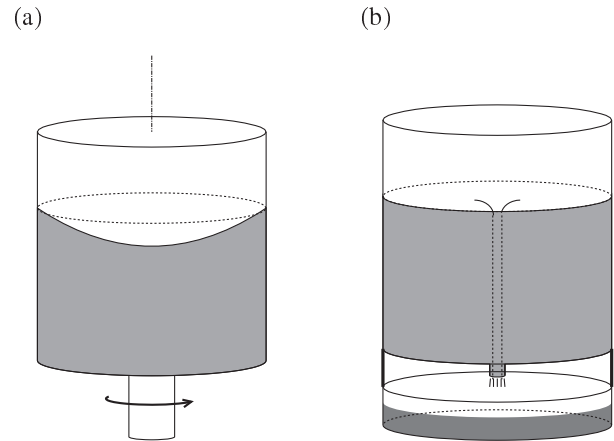


図 7 渦度をもつ渦ともたない渦の実験。(a) 回転する円筒容器中の水の中にできる渦。容器中の水はほぼ同じ渦度をもつ。(b) 円筒容器の底にある排水口より流れ出すときにできる渦。容器中央部の水だけが渦度をもつ。

転方向は予測できないというのが結論です。実際に、マサチューセッツ工科大学のシャピロ教授は約 2 m の直径をもつ円形容器を用いてボストンで実験をしました。容器に水を注入してから 24 時間放置し、注入時のすべての乱れがなくなったと思えるほど待つてから静かに排水口の栓を抜くと、しばらくしてから渦が生じたとのことで、その渦の回転方向は 10 回のうち 9 回までは反時計回りであったことから、水中の乱れを極力少なくして実験を行うと、バスタブ渦の回転方向は地球の自転の影響により、反時計回りに決まるとの結論でした。

普通の浴槽は円形断面でないことが多く、排水口も中心になくて、浴槽の隅にあることが多いですね。このような浴槽の場合にはバスタブ渦は、水中に含まれている渦度を集めなくても生じます。排水するときできる流れを排水口から見れば、排水口まわりに回転する成分もっています。このような水の運動を表す量は排水口まわりの角運動量と呼ばれます。ほとんどの場合にはバスタブ渦は水が角運動量もっていることにより生じるので、このときも地球の自転はほとんど影響がありません。円筒容器のように軸対称な場合と日常生活で使用する浴槽のように全く対称性のない場合とはバスタブ渦の発生メカニズムは全く異なっていて、その中間的な場合である長方形断面容器の底面の中心に排水口がある場合など、ある種の対称性があるときには流れの不安定性というメカニズムでバスタブ渦ができることがわかっています。

## 6 高気圧と低気圧

天気予報の天気図では、高気圧と低気圧がよく見かけられます。これらは数100 kmから1000 kmくらいの大きさの渦です。高気圧は中心がまわりよりも圧力が高い大気の領域のことで、高気圧の中心では上方から地表に向かって風が吹いています。空気の下降気流があるときは、空気が圧縮されるので、雲が発生しにくくなります。地表近くでは中心から周囲へ外側に風が吹きますが、地球が自転していることが原因で、コリオリ力によって北半球では進行方向から右へ曲げられて、時計回りの渦巻き状の流れとなります。低気圧は熱せられた空気が上昇することによって発達し、中心部がまわりよりも気圧が低いので、地表付近ではまわりから中心に向かって空気が流れ込んでいきます。中心部で上昇流が起ると空気が膨張したときのように冷却されて湿った空気が凝縮をして水滴となり雲が発生しやすくなります。低気圧でも外周部から中心に向かって流れる空気がコリオリ力を受けて北半球では右に曲がるため、反時計回りの渦巻きとなります。バスタブ渦では地球の自転による渦度は小さくて大きな渦を作ることができなかったのですが、高気圧や低気圧ほどの大きな規模の空気の流れでは地球の自転の影響を受けるのです。台風も低気圧の一種で、北半球では反時計回りの流れを作っていますが、竜巻などの数100 m規模の渦巻き流ではその空間規模が小さいので、もはやコリオリ力の影響は小さく、回転方向が台風のように決まっておらず、北半球でも時計回りの渦や反時計回りの渦にもなります。

## 7 渦潮

空だけでなく、海でもいろんな渦を見ることができます。その中でも代表的なものは鳴門の渦潮です。海に生じる渦潮は地形の影響や変化する海流の影響を受けて複雑な現象ですが、単純化して、渦ができる理由を考えてみましょう。瀬戸内海は内海で、西は豊後水道に通じ、東は淡路島の北にある明石海峡と南の鳴門海峡に通じるのみで、ほとんど陸に囲まれていて、大きな貯水槽のようになっています。また、明石海峡と鳴門海峡は紀伊水道につながっています。豊後水道と紀伊水道は太平洋にひらけていて、太平洋はおよそ12時間の周期で水位が上下します。太平洋の水位が上がり始めると瀬戸内海に通じる3つの海峡を海水が瀬戸内海に流れ込んで、瀬戸内海の水位が上昇します。約6時間かけて瀬戸内海の海面は最高水位に達しますが、そのときには太平洋の水位は下がっており、瀬戸内海から鳴門海峡を通過して大量の海水が太平洋側に川のように流れ出てきます。図8(a)のように、川のように流れる海水の両側にほぼ静止

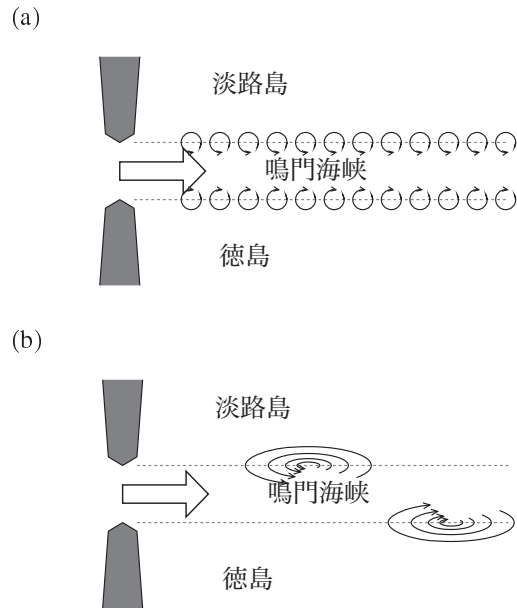


図8 鳴門の渦潮。(a)鳴門海峡では潮の満ち引きにより川のように速い流れが生じ、流速の急に変化する層は小さな渦の列と見なせる。(b)小さな渦の列は流れの不安定性により集合して大きな渦になる。

した海水があるので、その境界には速度が急に変化する層が生じます。このような速度が急に変化する層は、小さな規模で同じ向きにまわる渦の層があると見なせるのです。この渦の層と向かい合うように回転方向が逆の渦の層もできます。これらの渦の層は流れの不安定性という現象によって集合し、合体して大きな渦を形成します。こうしてできた大きな規模の渦が鳴門の渦潮です。バスタブの渦は容器内にあった小さな渦が排水口のある中心部へ集まって大きな渦となるのですが、鳴門の渦潮は渦列となった小さな渦が流れの不安定性という現象で集まるといって少し異なりますが、小さな渦が集まってできるという点では同じです。

鳴門の渦潮は時計回りにまわるのでしょうか。あるいは反時計回りでしょうか。もちろん、この程度の大きさでは地球の自転の効果は現れません。しかし、渦潮の写真を見ると圧倒的に時計回りの写真が多いですね。図8(b)のように大きな渦は時計回りにも、反時計回りにもできるのですが、徳島側の方が観潮に適しているのです。時計回りの渦が多いようです。淡路島側から見るとほとんどが反時計回りでしょうね。

## 8 渦のはたらき

流れの速さが速くなると、流れの不安定性という物理機構で流れの中に大小さまざまな渦が生じ、それらの渦の運動は予測不可能で、ランダムな位置でランダムな

運動をします。こうしてできた数多くの渦は、流れの中を攪拌し、温度や中に含まれる物質を一様な分布にします。このことは、コーヒーにミルクを混ぜるときにスプーンでかき混ぜて渦を作ると早くミルクが混ざることからもわかります。また、熱を伝える装置である熱交換機では流体とパイプや壁面との間の熱の交換効率を大きくします。お鍋の中の水を暖めるときは多くの場合中央部で上昇し、周辺部で下降する大きな渦ができて、渦がないときに比べて早くお湯が沸きます。飛行機の翼の表面付近には小さな凹凸を作って、表面付近に渦を生じさせることにより、流れを乱して、乱流という状態にすることもあります。翼の表面が乱流状態になると、流れの剥離という現象を抑制して、失速を防ぐことができるからです。特に、小型飛行機では翼まわりの流れを乱流にする工夫が行われます。このように、渦は私たちの身のまわりのいろんなところで活躍しているばかりでなく、私たちの目を楽しませ、想像力を掻き立てます。

## 9 おわりに

この原稿はおよそ中学高学年以上で、流体力学の基礎方程式などを学んだことはないが、流れの現象に興味をもっている読者を対象に書きました。この原稿を読んでいただいて、流れの現象に興味をもち、さらに詳しく知りたいときは、多くのすぐれた解説書が出版されています。私が何度も読み返した本に木村竜治著「流れの科学」<sup>1)</sup>があります。簡単な実験装置を作って実験を行い、流れの現象を考えるとこの本の思考法はこれまで私が行ってきた研究の方法にもなっています。もう少し基礎的な数学の知識をもつ人には木田重雄著「いまさら流体力学？」<sup>2)</sup>があります。この本では流れの現象を深く考えるきっかけにもなりますので、既に流体力学の授業を受けた人が読んでも、自分をもつ流体力学の知識を確かめるのに役立つことと思います。今回の原稿と同程度の入門書には、日本機械学会編・石綿良三・根本光正著「流れのふしぎ」<sup>3)</sup>という本があります。図や写真が多用され、中学高学年以上の予備知識があれば、流れのふしぎな現象を知って、理解することができます。今回の連載を通じて、流体力学を専門としない人達にも流れの現象に興味をもっていただき、正しい知識をもていただければと願います。この連載を企画された啓発書出版委員会の皆様にお礼を申し上げます。

### 引用文献

- 1) 木村竜治：流れの科学（改訂版）（東海大学出版会，1985）。
- 2) 木田重雄：いまさら流体力学？（新装復刻 パリティブックス）（丸善出版，2017）。

- 3) 日本機械学会（編），石綿良三，根本光正：流れのふしぎ（講談社，2004）。