

コンパクトシリーズ 流れ

流れの話

河村哲也 著

インデックス出版

Part I

流体力学入門

流体力学の話をはじめます。

流れの科学入門

— 流体力学の初歩 —

放送大学客員教授 河村哲也

■ 流体力学とは.....

流体力学とは

- 流れの力学的な性質を解明する分野
- 主に気体と液体のマクロな運動に関連
- 気体と液体は類似の力学的性質をもつため、
まとめて「流体」という
 - 決まった形をもたない
 - 力を加えると容易に変形
 - 流れる

流体力学とは流れの力学的な性質を解明する学問分野で、主に気体と液体のマクロな目に見える運動に着目します。しかし、気体や液体に限らず、微小な粒子の集まりである粉体のマクロな流れやマグマの運動についても流体力学が用いられます

し、さらに車の流れや人の流れの解析も流体力学の守備範囲です。

さて気体と液体は力学的な性質に着目した場合、両方とも類似しているため、まとめて**流体**と称します。具体的には、気体も液体もそれ自身では決まった形をもたず、どのような形状の容器にも隙間なく満たすことができます。また、少しの力を加えるだけで容易に変形し、その結果、流れが生じます。これに反して固体はそれ自身、決まった形を持ち、大きな力を加えてもなかなか変形しません。なお、微小な固体粒子は1つ1つに着目した場合には固体としてふるまいますが、多く集めて集団として見た場合には流れます。車や人の流れといった場合に流体力学では集団としての流れを指します。逆に流体を解析する場合にも流体を微小な塊の集団とみなすこともしばしばあります。

流体力学の関連分野

・関連分野

工学: 土木, 建築, 機械, 航空, 船舶...

理学: 物理, 数学, 気象, 海洋, ...

生物学・医学, 環境科学, 情報科学, ...

われわれは気体である空気や液体である水に取り囲まれて生活しているため、流体自身の運動や流体による物質の輸送などを解析することは、日常生活をおくる上で非常に重要であり、またそのため、ほとんどの科学分野や産業分野は流体力学と

密接に関連しています。

まず工学の分野についていくつか例をあげます。土木工学につきましては、河川の流れの解析や治水、橋脚の設計、ダム設計はもちろんですが、防波堤や波消しなど海という流体とのかかわりに関した分野も土木工学です。

建築に関しては、ビル風の解析、風圧の見積もり、屋上緑化の効果の検討といった建物の外側の話のほか、冷暖房の効果といった室内気流に関するものも流体力学がカバーします。

機械工学については、自動車の抵抗軽減、新幹線の車両の騒音対策、エンジン内の流れ、自然エネルギーの利用で近年注目されている風車や水車といった流体機械など流体にかかわるものには枚挙にいとまがありません。

航空では飛行機が中心ですが、翼やジェットエンジンの設計、騒音軽減、燃費の向上等々流体力学の知見が必須ですし、もちろん船舶は水の上を走行するので流体そのものを相手にし、また波も大きな解析対象です。

一見、流体とは関係なさそうな化学工学もパイプライン内の流れや効率のよい攪拌など流体とは切り離せません。

次に理学分野について見てみます。そもそも流体力学は物理学とともに発展してきました。ニュートン力学が流体力学の基礎になりますが、ニュートン以前にもパスカルやガリレオの弟子トリチェリなど流体力学に関して名前を冠する業績があり、さらに遠くギリシャ時代にもアルキメデスがアルキメデスの原理を発見しています。

ニュートン以後、オイラー、ラグランジュ、ベルヌーイ、ストークスなどによって流体力学が大いに発展しました。そもそも19世紀ごろまでは物理学と数学は現代ほど分離されておらず、これらの人たちは著名な数学者でもありました。流体力学は物理学の諸分野の中でも数学を最も駆使する分野で

もあり、数学とは切っても切れない関係にあります。流体の運動は複雑な微分方程式で表されるため、それを解くのが問題になりますが、それだけではなく乱れた流れを扱うには統計学の手法も重要になります。

地球科学、特に気象学を含む大気科学は流体力学の大きな活躍分野です。気象現象は、いってみれば水蒸気を含む空気の大規模な運動ととらえることができます。また、気象は海洋と分けて考えることはできません。海水の運動である海流や海の温度分布、塩分濃度分布などは流体力学の理解のもととはじめて議論できます。

医学や生物学分野でも流体力学は大きな働きをします。医学では例えば血管内の流れの解析により動脈瘤ができたときの血管に及ぼす影響が評価できますし、血管のバイパス手術の効果、心臓内の血液の動きなど流体力学が答を出してくれます。生物では血管や細胞内の流れのほか、昆虫の飛行の仕組みや魚の泳法の解析、鳥の編隊飛行の効果も流体力学の守備範囲です。

環境科学においては、工場排水による水質汚染や、排気ガスによる大気汚染といった環境アセスメントを行う上で流体力学は主要な役割を果たします。また地球環境問題に対する流体力学の役割は大きなものとして、温暖化に対する気候変動の予測とかオゾンホール生成のメカニズムの解明などがあります。

情報科学と流体力学との関係は以下のとおりです。先ほど述べたように流体力学の基礎方程式は複雑な微分方程式で、これを解けばいろいろな問題が解決しますが、現象が複雑であればあるほど数式を使った解析はほとんど不可能になります。そのとき威力を発揮するのがコンピューターを使って基礎方程式を数値的に近似的に解くという方法です。こういった考え方は 20 世紀初頭からありましたが、1960 年代以降、コンピューターが実用に耐えるようになってから急速に発展しました。そして、現在ではコンピューターを使って流体を解析する CFD (Computational Fluid Dynamics: **数値流体力学**) が流体力学の主流になっています。CFD では、解析する領域を格子や要素とよばれる小さな網目にわけて計算するのがほとんどです。この網目が細かいほど精度がよくなりますが逆に計算量が膨大になるため、たとえば気象のシミュレーションでは天気予報の確度をあげるためスーパーコンピューターとよばれる計算能力の高いコンピューターを用いるのがふつうで

す. このように大規模計算という意味で流体力学と情報科学はつながります. さらに計算結果の解析では膨大なデータが得られるため, そこから有益な情報を取り出すことも重要になります. そういった場合にはCG (コンピュータグラフィックス) など可視化技術やAI (人工知能) が応用できます.

目標(以下の工学的疑問を解決)

- なぜ油圧ジャッキで重いものが持ち上げられるのか?
- 飛行機は速度はどうやって測るのか?
- なぜボールを回転させるとカーブするのか?
- なぜ重い飛行機が飛べるのか?
- なぜゴルフボールに凹凸があるのか?

今回は以下に示す流体に関連する5つの身近な疑問を取り上げ, 流体力学的な見地から, 疑問に答えながら流体力学への入門的な知識を得ること目標とします. 具体的には

①なぜ油圧ジャッキで重いものを小さな力で持ち上げることができるのか? (⇒ 5 ページ)

油圧ジャッキを見たことがあるでしょうか? 重いものを持ち上げるとき, たとえば自動車のタイヤを交換するとき何トンもある自動車を持ち上げる必要があります. そのとき使うのがジャッキで, それほど力を加えなくても重いものをたやすく持ち上げることができます. いろいろな種類がありますが, 力を増幅するのに油を用いるのが油圧ジャッキです.

②飛行機は速度はどうやって測るのか? (⇒ 19 ページ)

自動車や電車ではタイヤや車輪は接地しています. したがって, たとえば1分間にそれらが何回転したかを計測すれば, その回数にタイヤや車輪の周の長さをかければ, 1分間に進んだ距離, すなわち分速 (60 倍すれば時速) が得られます. 一方で, 飛行機は空中を飛んでいて接地していません. どのようにして飛行速度を測っているのかという疑問です.

③なぜボールを回転させるとカーブするのか? (⇒ 20 ページ)

野球ボールに回転をかけて投げたり, サッカーボールを回転するように蹴ったり, ラケットでピンポン玉を回転させたりすると普通の軌道に比べて上下左右に曲がります. どの方向に曲がるのかは回転の向きによりますが, そもそもどうして曲がるのでしょうか?

④なぜ重い飛行機が空を飛べるのか? (⇒ 21 ページ)

鳥や昆虫が空を飛ぶとき羽を動かします. 飛行機には動かない翼がついて

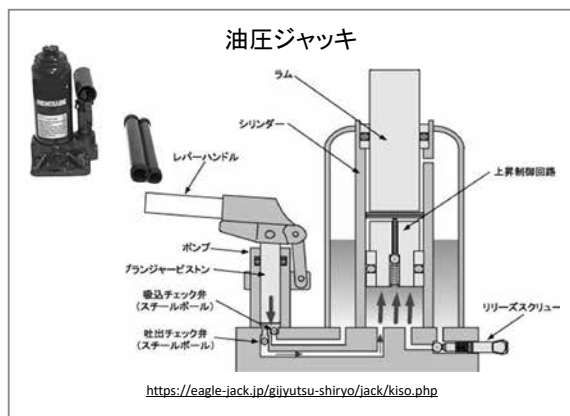
いるだけなのに空を飛ぶことができます。どうして重力にさからって飛び続けることができるのでしょうか？

⑤なぜゴルフボールに凹凸があるのか？（⇒ 32 ページ）

ゴルフボールはゴルフをしない人でも見たことがあると思いますが、つるつるした球ではなく表面に小さな凹凸があります。実はこの凹凸は飾りではありません。その理由について考えてみます。

II 静水力学.....

①重いものを小さな力で持ち上げる



疑問について詳しく考えてみます。油圧ジャッキを簡単にモデル化した図が左のスライドです。ポイントは密閉された丈夫な容器に流体（ここでは容器を腐食させないため油）が入っている点と、

力を加える側の面積が小さく、持ち上げる側の面積が大きくなっている点です。あとは押し下げたあと、もとにもどすとき油が常に供給されるように弁の働きをするボールがついていて、何回も押し込めるようになっています。また、持ち上げる側の油もある程度たまると押す側に排出されるようになっています。

静水力学

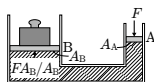
- 流体が静止している状態（流速＝0）の力学
- 力の釣り合いが基本
- 圧力と密度が関係
- 圧力：流体中に平面を考えたとき面に垂直に働く単位面積当たりの力（押す方向に働く）
- 静止流体中で微小部分に働く圧力は一定

流体力学は主に運動する流体の解析を目的としていますが、特に静止した流体を扱うときには静水力学といます。静水力学では力の釣り合いが問題となります。油圧ジャッキは静止した流体の性質を用いています。流体が静止している場合は、流

体の圧力と密度が問題となります．ここで**圧力**とは，流体中にひとつの面を考えたとき，その面を垂直に押す方向に働く「単位面積あたりの力」のことです．

パスカルの原理

- ・ 密閉された静止流体のある面で圧力が増加すればすべての面において同じだけ圧力が増加する．（パスカルの原理）
- ・ 図のA面（面積A）で圧力が ΔP 増加すればB面（面積B）でも ΔP 増加する．
 - 力に換算するとA面での力の増加は $A\Delta P$
B面での力の増加は $B\Delta P$
 $B\Delta P = (B/A) \times A\Delta P$
 - B/A倍になる
（油圧ジャッキの原理）

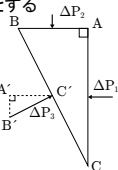


油圧ジャッキで大きな力が働くのは，**パスカルの原理**を使えば容易に理解できます．パスカルの原理とは，
“密閉された静止流体において，ある面で圧力が増加すれば，流体中のすべての面において同じだけ圧力が増加する”

というものですが，この原理が成り立つ理由はあとで考えることにして，油圧ジャッキにパスカルの原理をあてはめてみます．上のスライドでA面（面積A）で圧力が ΔP 増加したとします．このときパスカルの原理からB面（面積B）においても圧力は同じ ΔP 増加します．それぞれ力に換算すると，A面での力の増加は， ΔP に面積Aをかけた $A\Delta P$ ，B面での力の増加は $B\Delta P$ です． $B\Delta P = (B/A)A\Delta P$ なのでA面の力はB面では (B/A) 倍されたことになります．もし，B面の面積がA面の10倍だったら，力は10倍に増幅されたことになります．ただし，油の量を考えると，たとえばB面を5cm持ち上げるためにはその10倍の50cm押し下げる必要があります．なお，このとき油は圧縮されないということを使っています．

横方向の力の釣り合い

- ・ 微小直角三角形ABC(奥行1)において，辺ACで ΔP_1 ，斜辺BCで ΔP_3 増加したとする
- ・ AC面:力の増加は $AC \times \Delta P_1$
- ・ BC面:力の横方向の増加は
 $(BC \times \Delta P_3) \times (A'C'/B'C')$
 $= (BC \times \Delta P_3) \times (AC/BC) = AC \times \Delta P_1$
- ・ 力は釣り合うため $\Delta P_3 = \Delta P_1$
- ・ 縦方向も同じ



それでは，パスカルの原理が成り立つ理由を考えてみます．図（以下の記述で図とは，特に断らない限り，一番近くにあるスライドの図のことです）に示すように静止した流体内に微小な三角形を考えてみます．実際は3次元なので紙面に垂直な方向

にも長さをもちますがその長さを1とします．この三角形は運動をしていないので力は釣り合っています．さて，この三角形の縦の辺ACに新たに圧力 ΔP_1 が加わり，同様に横の辺ABと斜辺BCにそれぞれ ΔP_2 と ΔP_3 が加わっ

て静止状態を続けたとします．増加した力も釣り合うため，以下では増加分だけを考えます．

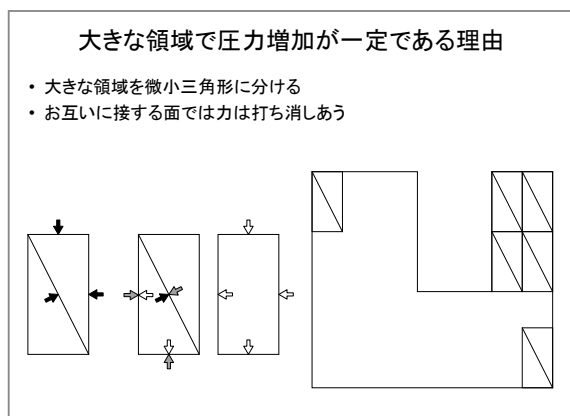
このとき横方向の力の釣り合いを考えてみます．圧力は単位面積当たりの力なので， AC を通して $\Delta P_1 \times AC$ ，斜辺 BC を通して $\Delta P_3 \times BC$ の力が働きます．後者の横方向成分は図から

$$\Delta P_3 \times BC \times (A'C'/B'C')$$

となりますが，図の大小2つの直角三角形は相似であるため $A'C'/B'C' = AC/BC$ が成り立ちます．このことを考慮すれば，斜辺に働く力の横方向成分は

$$\Delta P_3 \times BC \times (AC/BC) = \Delta P_3 \times AC$$

です．これと横方向の力 $\Delta P_1 \times AC$ が等しいため $\Delta P_3 = \Delta P_1$ が結論されます．同様に，縦方向の力の釣り合いから $\Delta P_3 = \Delta P_2$ となるため， $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3$ ，すなわちすべての面の圧力増加は等しくなります．以上は説明を簡単にするため直角三角形を用いましたが，圧力増加が各辺で等しいことは任意の微小三角形でも成り立ちます．



次に2つの微小直角三角形を，図に示すように斜面をはさんでくっつけたとします．上の三角形の横の辺の圧力が ΔP 増加した場合，縦の辺も斜辺も ΔP 増加しますが，斜辺に着目すると下の三角形

の斜辺の圧力も ΔP 増加します（力の釣り合いと考えることも，作用反作用の法則と考えることもできます）．下の三角形の斜辺の圧力が ΔP 増加したので，横の辺や縦の辺の圧力も ΔP 増加します．このようにして流体内の圧

力増加は同じだけ次々と伝わっていきます。任意の領域は、図の右に示すように小さな三角形に分けて考えることができます。

このことからパスカルの原理

“ 密閉された静止流体において、ある面で圧力が増加すれば、流体中のすべての面において同じだけ圧力が増加する ”

が成り立つことがわかりました。

まとめ: 油圧ジャッキ

- 圧力は面に垂直に働く単位面積当たりの力
- パスカルの原理(圧力増加は均等)を利用
- 面積が10倍になれば押す力も10倍になる(ただし、10cm持ち上げるには1m押し込む)

ここで、1 番目の疑問(油圧ジャッキの原理) に関して学んだことをまとめおきます。

- (1) 圧力とは流体内の面を垂直に押す方向に働く単位面積あたりの力である。
- (2) 油圧ジャッキはパスカルの原理(圧力増加は静止流体内で均等)を利用している。
- (3) たとえば、持ち上げる方の面積が押す方向の面積の 10 倍だと、押す力が 10 倍増幅される。ただし、10cm 持ち上げるためには合計 1m 押し込む必要がある。

PartⅢ

最終講義 (令和2年3月10日)

(司会：椎尾先生 *)

それでは時間となりましたので、始めさせていただきます。私、理学部情報科学科の今年学科長をさせていただいております椎尾と申します。ここに来ていらっしゃる皆さん、河村先生と長い長いお付き合いの方ばかりなので、私などはここに招んでいただくときに、たぶん12年位前ですかね、お話を伺ったときが最初ですので、全然、長さからいったらもっと長い方がいいいらっしゃると思うので、とても僭越なんですけど、今年学科長、うちの学科は1年交代でやっているの週番みたいなものなのですが、今年当たっているの、ここで司会をさせていただく栄誉を賜ったというところです。

それで今日は、河村先生、どうもご苦勞様でした。ありがとうございます。では、今日は河村先生の最終講義ということで、皆さんお集まりいただきありがとうございます。本当に私も12年前にこちらに招んでいただいたときにお話伺って、とても温和な先生でしかも頭の切れる素晴らしい感じの人だな、というそういう感じでしたんですけども、今の情報科学科のありようをかたちなんかを、増永先生と河村先生でどんどん作ってらしたという、そんな印象を受けました。その後も河村先生は大学の運営とかものすごくたくさんお茶の水女子大学に貢献されていて、理事をされていていろいろ活躍されてたんですけども、今年で定年ということで、今日の最終講義ということで皆さん集まっていただくことになりました。

あまり長く話してもあれなので、では河村先生、よろしく願いいたします。

(河村先生)

椎尾先生、丁寧なご紹介ありがとうございます。今日は皆さま多数このコロナウィルスの脅威の中集まりいただきましてありがとうございます。命がけ、ということでもないでしょうけれども(笑)

* 椎尾一郎：お茶の水女子大学理学部情報科学科教授

40年の教員生活を振り返って —CFDとともに—

若い世代へのメッセージ

情報科学科 河村哲也

今回の、こういう最終講義の準備をしてくださった、研究室の皆さんとか情報科学科の皆さんにまず感謝したいと思います。

それでは今日は、こういう題（40年の教員生活を振り返って—CFDとともに—）でもって、与えられた

最終講義

- ・何を話そうか？
- ・まさか、微分積分のような講義をするわけにもいかない
- ・これまで、何回か最終講義を拝聴したが、多くの先生方が、自分の過去を語っておられた
- ・それでは、慣例に従う（＋少し専門の話）
- ・結果的に今まで、ほとんど過去を振り返ることがなかったのでよい機会でした

聴しましたが、多くの先生方が自分の過去を語っておられたので、それでは自分も話しやすいので、それに従うということと、それに専門の話を少し加えて、お話ししたいと思います。結果的に、今までほとんど自分の過去を振り返っていなかったもので、ちょうどよい機会になったと思います。

それで、最初に学科から最終講義をしてくれないかという話があったときに、何を話そうか、ちょっと迷いました。まさか1年生に行っているような微分積分のような講義をするわけにもいきません。これまで何回かいろいろな先生の最終講義を拝

Personal History (10年ごと)

- ・I (20代)1976—1985 東大(学生、院生の時を含めて)
- ・II (30代)1986—1995 NASA・鳥取大・千葉大
- ・III (40代)1996—2005 お茶大前期
- ・IV (50代)2006—2015 お茶大中期
- ・V (60代)2016～現在 お茶大後期

自分の過去を振り返るときに、たいていの人もそうかもしれないのですが、10年ごとに区切ると分かりやすいので、第1期として20代、第2期として30代というふうに区切ってみました。

第1期の20代というのは、学生、院生の時代も含めて、東大にご厄介になっていました。

それで第2期の30代になりますと、東大を休職してNASAのほうに研究

留学しまして、そのあと、鳥取大学とそれから千葉大をまわりました。

そして40代の最初の頃にお茶大に移ってきまして、現在に至ってるのですが、期間が長いので、40代を前期、50代を中期、それから60代を後期というふうに分けてお話ししたいと思います。

大学教員の役割

- 1 教育
- 2 研究
- 3 社会貢献(活動)
- 4 大学運営(雑用)

理想

40 : 40 : 10 : 10

このように、私は長年大学教員をやっております。表題は40年、実は26歳のときに就職したので正確にいうと39年なんですが、その前も非常勤講師をやっていたので、それを含めると40年やってるということになります。大学教員は何をし

なければならないかということ、教育・研究・社会貢献・大学運営ということになると思うのですが、今はやりのエフォート率で言いますと、大体40% 40% 10% 10%くらいというのが理想かなと思っています。

話の流れ(80分とした場合)

- 1 研究 40分 (経歴を含めて)
- 2 社会貢献 10分 (啓蒙活動)
- 3 大学運営 10分 (苦労話)
- 4 教育 10分 (学生の研究紹介)
- 5 思い出アルバムとまとめ 10分

それで今日の話の流れとしましては、教育を後に持ってきてまして、全体を80分としたときに、研究の話を40分、といいましても自分の経歴を含めたもので、難しい話はしませんので、研究の話を40分くらい、全体の半分くらいとりまして、その

後社会貢献、それから大学運営の話をして、最後に学生さんがよい研究をいろいろしてくれましたので、研究紹介を兼ねて教育ということにします。あと時間が余りましたら、いくつか写真をお見せして、それでまとめにしたいと思っています。これが今日の話の流れです。