

流れと振動現象

横浜国立大学大学院工学研究院 教授

松井 純 *Jun Matsui*

1. はじめに

流れが構造物と干渉して振動が発生する現象はしばしば観察され、その振動が共振するなどして重大な事故に至ることもある。本稿では流れ、特に流体機械の中での流れと振動の現象について、いくつかの興味深い事例を紹介する。珍しいものばかりではなく、教科書等に書かれている常識的な事例も含めて紹介しているが、構造物自体が振動する場合には触れていない。また多数ある振動事例のほんの一部であることを、あらかじめお断りしておく。

2. 流れから直接に生じる振動の例

図1および図2は、幅1 mの流路を平均流速1 m/sで流れている流体の中に一辺0.25 mの四角い柱をおいたときの流れのシミュレーションの結果の例である。図は流路の一部を拡大していたものであり、図の左側から一様な流速の流れが流入し、右側から流出している。図中の正方形の部分角柱であり、流速ベクトルを赤い矢印で示している（見やすくするために、計算している流速ベクトルを間引いてある）。計算開始から8.1秒後の状態が図1である。角柱の下流側に上下にほぼ対称な2つの渦が見られ、流れはこの状態でしばらくの間、安定している。これは実際に

図1 角柱を有する流路内部の流れ (Re=500, t=8.1 sec)

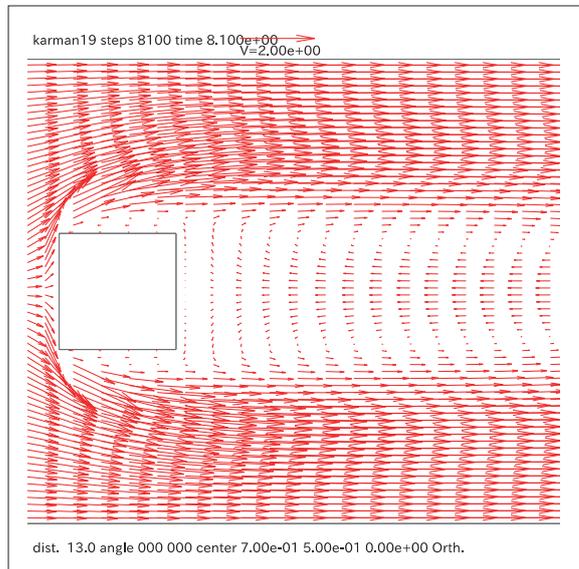
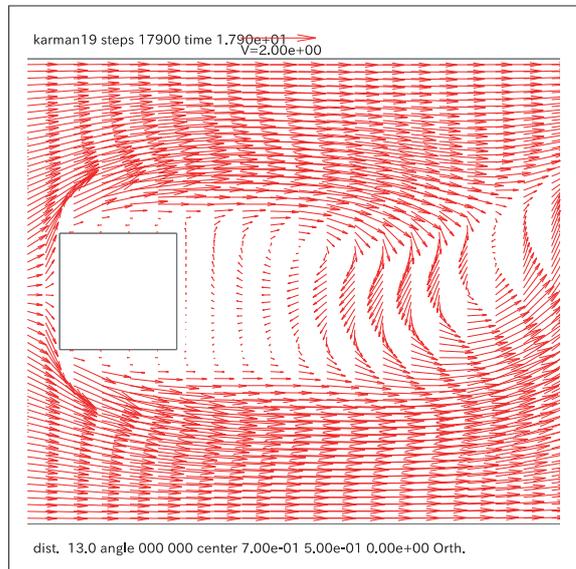


図2 角柱を有する流路内部の流れ (Re=500, t=17.9 sec)



も存在する「双子渦」と呼ばれる流れパターンであって一見正しそうに見えるが、この時点で計算を終了してしまうと重大な間違いを犯すことになる。この流れは実は不安定で、計算を続けて時間を進めると別の流れパターンに移行する。そうなった後の状態の例を図2に示す。これは計算開始から17.9秒後の時刻での流れで、時間とともに渦が次々に下流側へ放出される、いわゆる「カルマン渦」の状態を再現している。カルマン渦は不動の構造物が流れの中にあるだけで、流れが非定常になり、固体物体にも周期的な変動力が加わる例として非常に有名である。なお物体自体が動く場合には、また別の流れや振動状態が見られることがある。

これに似たものとして、流れに接している壁面に凹みがあるだけで自励音が発生する「キャビティ・トーン」と呼ばれる現象も、よく知られている。

3. 旋回失速による振動

流れが旋回しながら軸対称な流路を流れるだけで圧力振動を生じることがあり、その一つに旋回失速 (rotating stall) として知られる現象がある。空気が装置の下方から流入し、羽根車 (impeller) で回転させられた後、二枚の円盤の間の diffuser 部を通って出て行く、図3のような装置の断面模式図で説明する。図の水色の部分が回転部であり、紫色の部分は静止部である。diffuser 部の流れは、もし流れが周方向と軸方向に一様であると仮定すれば簡単な理論解が存在し、流れは対数らせんと呼ばれる曲線に沿って流出する。このような理論解に近い流れを実験でも観察することができる。しかし

impeller の回転数や空気の流速次第では、全く異なる流れパターンになり、壁面に周期的な圧力の変動が発生することがある¹⁾。このとき流れは非定常なものとなり、周方向に不均一な状態となっている。この状態をシミュレートした結果の例を図4に示す。ある時刻の流速ベクトルを可視化したもので、回転軸の方向 (図3の上方向) から流れを見ており、図の時計方向に impeller が回転している。最も外側の白い円が diffuser の外端にあ

図3 旋回失速実験装置の模式図

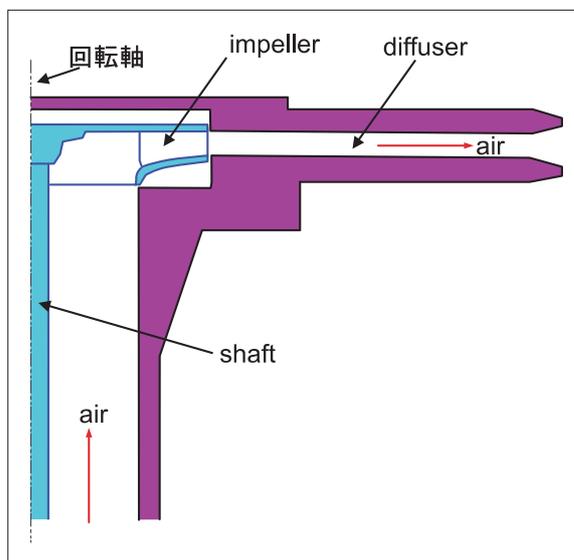
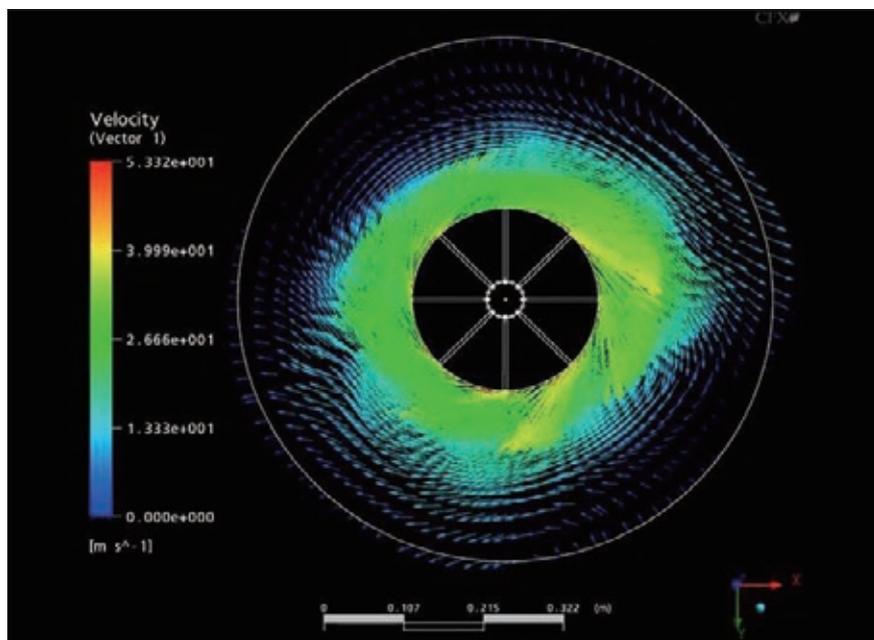


図4 旋回失速シミュレーション結果



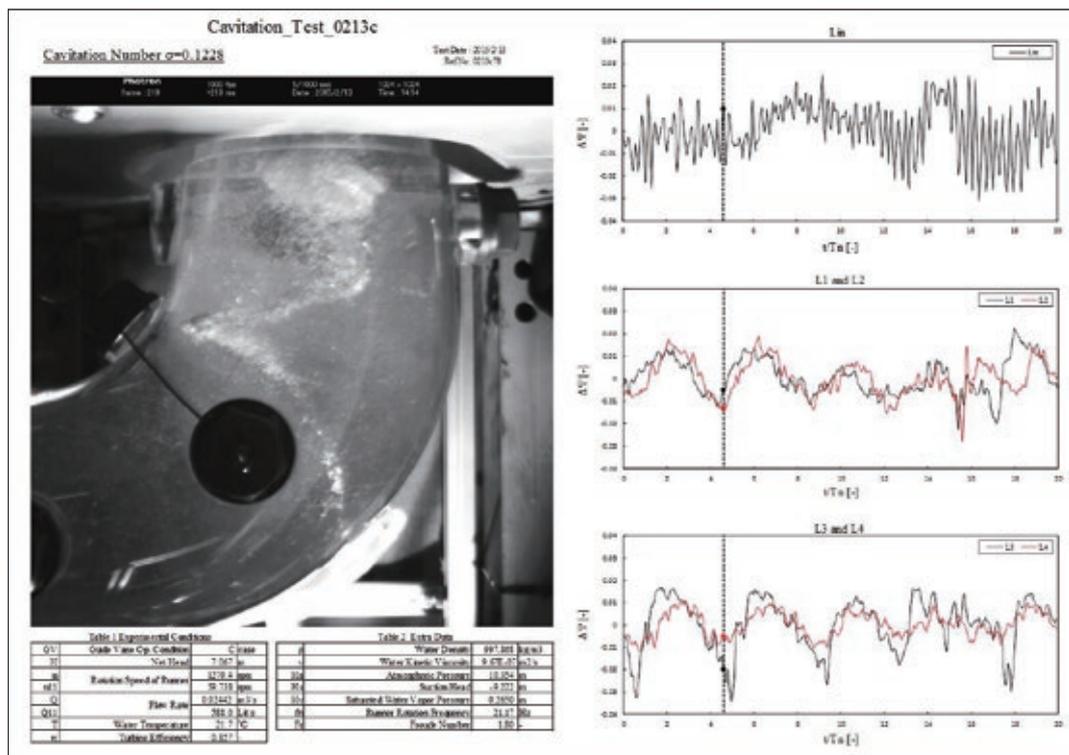
る。この外端では、図の左下と右の2ヶ所からだけ流れが流出している。シミュレーションでは、このような流速の分布が時計方向にゆっくりと旋回する様子が見られ、その旋回は羽根車の回転よりもずっと遅い。これらの状況から図4は旋回失速現象を再現していると考えられる。流れが流出していない部分は「失速コア」とよばれ、このコア部が通過するたび、壁面圧力が変動する。タービンなどのように翼が多数並んだ装置でも、原理はやや異なるが、失速コアがゆっくりと旋回することがあり、これも旋回失速と呼ばれる。この流れでは下流側が高圧になるため、流れは均一に流出するよりも小さな領域にまとまって流出するほうが流れやすいものと解釈できる。流出しない部分には、圧力差によって周囲から装置内部への流入が生じている。

4. キャビテーションによる振動

「水は摂氏100度で沸騰する」という知識

は良く知られているが、そこに「一気圧の下で」という重要な前提条件があることは見過ごされがちである。流体機械の内部などでは水の圧力が飽和蒸気圧以下になって常温でも沸騰が始まることもあり、キャビテーション(cavitation)現象と呼ばれている。この水蒸気の小さな泡が高圧部に移動して潰れるときに衝撃的な圧力が発生し、付近の壁面を強く侵食することがある。また、この水蒸気による空洞部が伸長したり旋回したりすると非常に強い振動が発生することがある。後者の例をフランス水車※1の模型試験装置において再現した例が図5である。図の左側の写真の上方には模型水車があり、その下流側のドラフトチューブと呼ばれるL字形の管の中を高速カメラで撮影した水蒸気泡の様子が写っている。渦の中心の低圧部に気泡があり、その渦がらせんのような形状で回転していることがわかる。図の右側は壁面3ヶ所での圧力変動の測定値で、縦の点線が写真の時刻を示している。(写真の中に黒い大きな丸に写っているものがセンサーの保持部である。) キャビ

図5 水車ドラフトチューブ内のキャビテーションと壁面圧力振動



※1
フランス水車
フランス水車は遠心型の羽根車を用いる水車であり、現在の日本の水力発電所の多くで採用されている。羽根車の外周側から半径内側へ水を導き、羽根板で水からの力を受けることで発電機等を回転させる。効率が90%を超えるものも実用化されている。

テーションを伴う強い渦の旋回によって圧力変動が発生するが、この運転条件では圧力波形は同じ位相で振動しており、「一次元的振動」と呼ばれる一種の共振状態になっている。

5. サージングによる振動

ポンプや送風機、圧縮機などの流体機械では「サージング」と呼ばれる自励振動^{※2}が発生することがある。その振動周期は0.1秒から数秒程度のことが多いが、機械とそれに接続された配管全体で圧力と流速の変動が生じるため、システムのどこかで共振すると、そこで破損が生じることがある。サージングが生じているときは非常に大きな騒音も発生し、建屋が地震のように揺れることもあるという。サージングの詳細については文献²⁾などを参照していただきたいが、ここではポンプを例にして概略を説明する。

ポンプを一定回転数で運転しているとき、その通過流量 Q に応じて揚程 H (ポンプが流体に与えているエネルギーを高さの単位で表したもの) が変わる。この関係あるいは関数が揚程曲線 $H(Q)$ と呼ばれる。

図6に示すような簡単なポンプを含む管路の流量が Q 、その微小な時間変動が q であったとする。この q についての運動方程式を立てると

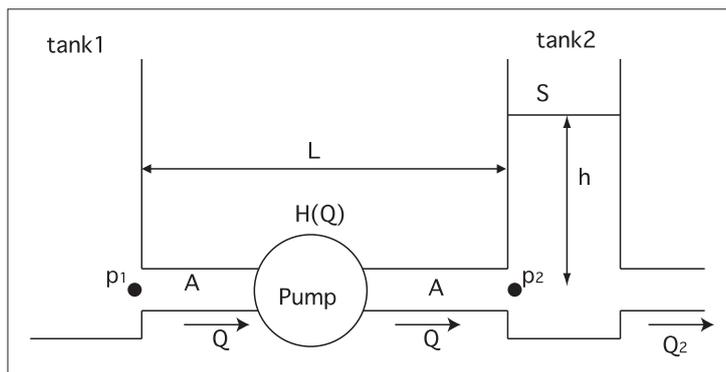
$$C_1 \frac{d^2q}{dt^2} - C_2 \frac{dq}{dt} + C_3 q = 0$$

$$\text{ただし } C_1 = \frac{L}{Ag}, \quad C_2 = \frac{dH(Q)}{dQ}, \quad C_3 = \frac{1}{S}$$

と表すことができる。 C_3 は流量を安定させるためのタンクの断面積 S から計算される。 C_1 は管路の長さ L や断面積 A および重力加速度 g で決まり、 C_2 は揚程曲線の傾きにあたる。

上の方程式は機械分野や電気分野での必須項目である、単振動の式になっている。機械分野ではバネ-質量-ダンパの連成系、電気分

図6 ポンプのサージングのモデル



野ではコイル-抵抗-コンデンサの連成系であり、このような系の特徴は理論的によく知られている。 $C_1 > 0$ かつ $C_3 > 0$ のとき、この系は $C_2 < 0$ なら安定であり、変動量である q はすみやかに減衰する。しかし $C_2 > 0$ の場合には dynamic instability となり、わずかな q の変化が発達して自励振動が発生する。この自励振動が実際に生じてしまうのがサージング現象である。

この例ではサージングが生じる理由は C_2 つまりポンプの特性によるものであるので、利用される流量 Q の全範囲で $C_2 < 0$ となるように羽根車等の形状を変更すれば回避することができる。ポンプの設計においては、この条件を満たすように羽根車の形状を決めることが一般的である。また羽根車に近い壁面に浅い溝を掘り、その中を流れてくる流体によってポンプの揚程曲線を変更することなどの回避策も提案されている³⁾。

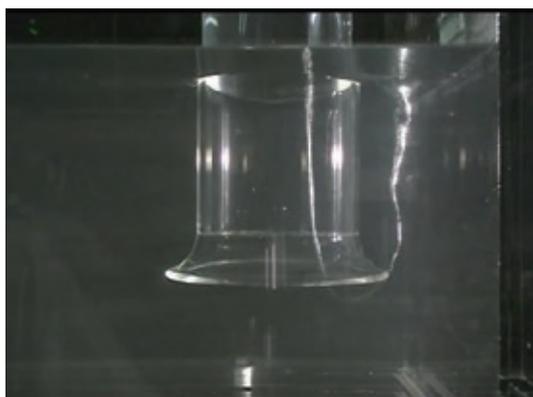
上の例では振動系のバネ要素は(本来は振動を抑えるための)タンクであったが、これが無い管路系でもサージングが発生することがある。たとえば先に示したキャビテーション現象が流体機械の内部で発生すると、水に比べて容易に体積が変動しうる水蒸気の空洞部が形成され、これがバネの役割をはたすことによって自励振動を生じることがある。この現象は「キャビテーション・サージ」と呼ばれている。

※2
自励振動
自励振動とは、ごくわずかな変動をきっかけとして振動が発生し、その振幅が徐々に大きくなり成長する現象である。有名な Tacoma 橋の崩落事故も自励振動が原因とされている。

6. 吸込渦による振動

排水機場や水力発電所の取水部など、大量の水を流体機械に取り込むときに、渦が発生することがある。この渦が強いときは渦心部が空気あるいは水蒸気の柱状の空洞部となって、流体機械の羽根がそれを横切るたびに大きな振動が発生する。また空気や水蒸気が渦によって水車やポンプの羽根車に流入するだけでも、機械の性能は低下する。これを抑制するために排水機場ではポンプ入口側に吸込水槽と呼ばれる流路を設置して流れを均一に整えることが多いが、それでも流量と水位によっては機械の運転を阻害する渦が発生することがある。図7は模型実験でそのような渦を再現した例である。図の左側から（ほぼ）一様な速度で流入してきた水は、図の中央のベルマウス（ラッパのような形状の管）から真上に吸い上げられている。図の右側は吸込水槽の終端部で鉛直な壁面があるが、その近くに水面が窪み、そこから白く見える空気の柱が生じている。これが空気吸込渦と呼ばれる渦で、時間とともにその位置と強さが変わる。渦が強くなると図のように渦の窪みが長くなってベルマウスを回り込み、水面から空気をポンプ側へと運ぶような渦になる。この渦は浴槽の栓を抜いたときに見られるバスタブ渦と構造的には類似している。図8は水位

図7 吸込水槽における空気吸込渦



をさらに下げた状態で、空気吸込渦が常時発生しているが、水槽の底面から竜巻のような渦が発生し、その中心でキャビテーションが発生して白く見えている様子である。この渦も常に移動し、強さも時間的に変化し続ける。図8は底面からの渦が特に強くなった瞬間のものである。

7. 配管系での振動

長い管路の中を水が満たしているとき、管路にある弁を急に閉めたり、管路に接続されている水車やポンプを急停止したりすると、高い圧力の波が管路内を往復する。これが水撃（water hammer）と呼ばれる現象である。

図9のような簡単なモデルで、この水撃の大きさを計算してみよう。図9の左側にある大きなタンクに断面積 A の管路が接続されており、その中を流速 v_0 で水が流れていたとする。また水の密度を記号 ρ で表すことにする。この管路の端の弁を時刻 $t=0$ で急激に閉めたとき、遮断後の時刻 t では、弁から上流へ向かって長さ at の部分の水が静止する。ここで a は管路の中での水の音速である。この長さ at の水の塊は $\rho atAv_0$ の運動量変化をしたことになり、それは弁部付近に $\Delta p = \rho av_0$ だけの圧力上昇を発生させる。 $a = 1000 \text{ m/s}$ 、 $v_0 = 1 \text{ m/s}$ のとき、この圧力上昇 Δp は約 1000 kPa

図8 吸込水槽における水中渦

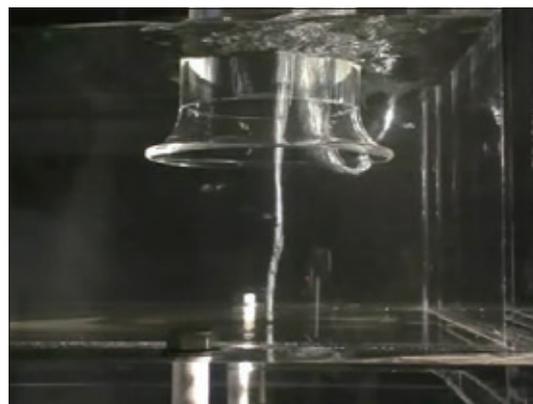
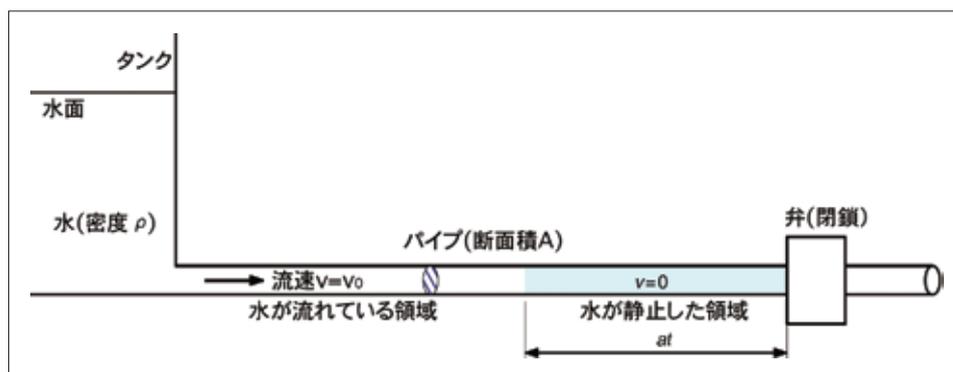


図9 水撃現象のモデル



となり、水の高さに換算して100 m 相当になる。このような高い圧力の波が管路の中を伝播すると、管路や弁の弱い部分が破損することがある。なお水撃のような管路の流体振動現象を考えると音速は重要なパラメーターとなるが、管路の中での流体の音速は管路材料の厚みやヤング率等の構造的なパラメーターや、管路内部の気泡の有無によって大きく影響を受けることに留意する必要がある。

8. まとめ

流れと振動が関係したトラブルの原因究明は難しいといわれている。流体を専門とする技術者には「これは振動のことだから」と言われ、振動の専門家には「これは流体のことだから」と言われて忌避されてきたきらいもある。しかし最近では構造物の振動と流れの非定常な動きを連成してシミュレートすることが容易になってきており、現象を解明するための重要なツールとなりつつある。一方で、知識の引き出しの中に振動発生の変因のキーワードを複数もっておくことも技術者としては大切と考えている。本稿がその一部となれば幸いである。

- 速, 日本機械学会論文集 B 編, 61 (591), 3842-3847, 1995.
- 2) ターボ機械協会編: ターボ機械入門編 新改訂版, 98, 日本工業出版, 2005.
- 3) 黒川淳一, S.L. Saha, 松井純, 今村博: J グループを用いた斜流ポンプの不安定性能の抑制法の開発, 日本機械学会論文集 B 編 66 (642), 460-467, 2000.

まつい しゅん

東京大学工学部卒業。東京大学大学院博士課程修了。横浜国立大学工学部講師、助教授、准教授を経て、現在は横浜国立大学大学院 工学研究院 教授。専門は流体工学、ターボ機械。

参考文献

- 1) 松井純, 黒川淳一, 養道治, 広木英治, 北洞貴屋也: 半径比の大きなベーンレスディフューザにおける特異な旋回失