

流れにおける渦の生成

亀 本 喬 司*

Vortex Formation in Flows

Kyoji KAMEMOTO

1. はじめに

近年の科学技術の発展に伴い、最近の流体力学で取り扱われる流れの諸問題は、他分野におけるさまざまな課題と密接に関連しながらますます多種多様化しているが、この傾向が進むほど翻って基礎的でしかも本質的な現象に関する専門的な知見の蓄積が、多方面で要求されるようになってきている。このようなもののひとつが、流れにおける渦の生成のメカニズムに関する問題であり、流体力学上の最大課題のひとつとも言われる乱流メカニズムの解明や工学上の難問とされる機器・構造物の流体力学による振動や騒音の発生、さらに気象学上の台風やたつ巻の発生など、広い分野の諸問題に関連して盛んに研究が行われ、渦発生現象の本質的な部分がかなり明らかになってきている。

鉄鋼プロセスの分野においても、精錬における混合や介在物の巻込み問題などが、鉄の流れにおける渦の生成に大いに関係があると聞いており、この分野には全くの門外漢である筆者にとっても、これらの流路形状とフローパターンについて非常に興味深く感じられる。

本稿は、渦生成を伴う流れの諸現象を適切に理解する上で必要な渦に関する流体力学上の基礎的な特性について概説し、さらに基本的あるいは標準的な流れにおける渦生成の具体例の紹介とともに、近年進歩のめざましい渦を伴う流れの数値シミュレーションと可視化画像処理計測の実例を示すものである。

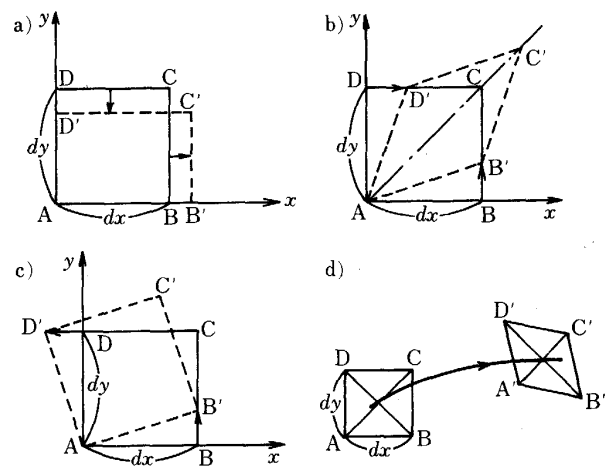
2. 渦の生成と渦運動

2.1 流れの渦度と渦の生成

一般に流体の運動は流路や物体形状によっていろいろな様相を呈する。たとえば、カップにコーヒーを注ぎ、しばらくしてコーヒーの動きが静まったところへミルクを一滴たらしたとする。動きの無いコーヒーの中ではミルクの一滴は急にはその形をくずさずコーヒーと混ざり

にくい、ひとたびスプーンでゆっくりとしかもミルクの一滴に直接接触することなくかき混ぜると、たちまちミルクの一滴は変形しはじめ糸を引くように回転し、さらにスプーンで不規則に混ぜると、ついには完全にコーヒーと混合してゆく。このように、コーヒーの中のミルクの一滴は、コーヒーの流動に伴って変形し回転しながら移動することがわかるが、コーヒーの中のコーヒー自身の一滴についてもその流動様式は類似のものと思像することができる。すなわち、流体の流れとは流体が変形や回転をしながら移動することにほかならないことが、ミルクの流動から理解できるわけである。

一般的に言って流体の運動は、流れの中の流体微小部分が流れとともにどのような形状変化をするかによって Fig. 1 に示したように a) 伸び運動、b) 滑り運動、c) 回転運動の3成分に分けられる。この図では、注目した流体微小部分 $\square ABCD$ が流れによって $\square A'B'C'D'$ に移動したものとし A' 点を A 点に重ねるように $\square A'B'C'D'$ を平行移動してその変形の様子を2次元的に示している。したがって一般の流れでは、伸びおよび滑



a) Elongation b) Slip c) Rotation d) Mixed motion
Fig. 1. Basic motions of a fluid element.

平成元年 8 月 25 日受付 (Received Aug.25, 1989) (依頼解説)

* 横浜国立大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

Key words: fluid dynamics; vortex formation; flow separation; free shear layer; numerical simulation; flow visualization.

りの変形を重ねつつ移動し、さらに回転運動が加わって複雑な動きとなるが、流れにおける渦の生成はこの回転運動成分の存在に深く関係づけられている。

流れの中の任意の位置における回転運動成分は、その位置での流速ベクトル V の回転 (Rotation または Curl) を求めることにより次式で表現される。

$$\omega = \text{rot } V \dots\dots\dots(1)$$

このように定義されたベクトル ω は渦度 (Vorticity) と呼ばれ、その大きさと方向はそれぞれその位置にある流体微小部分の回転角速度の2倍の大きさおよび回転軸の方向を表している。実際の流れの中で、固体壁面付近で粘性の作用による速度こう配の大きい境界層 (Boundary layer) と呼ばれる領域や、静止流体中の噴流のように速度差境界で粘性や乱流混合の作用による速度こう配の大きい自由せん断層 (Free shear layer) と呼ばれる領域では、回転軸の方向がそろった強い渦度が分布しておりこれらが流れ出してひとつかたまりになると、もはや微小部分の回転ではなく、それらの集約した流体塊の回転運動すなわち渦の生成ということになる。

なお、渦度の生成は上述のような粘性の作用のみでなく、流体中に密度こう配がある場合にも加速度の作用により渦度が生じ得ることは、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス (Navier-Stokes) の式から渦度の方程式を導くことにより容易に理解できる¹⁾。もちろん、粘性や密度差の作用により渦度が生成されるプロセスのみでなく、一般の流れの中ではこれとは逆に回転運動成分が粘性によって減衰し渦度が消散してゆくプロセスも存在する。Fig. 2 に示すように、一様な流れの中に置かれた円柱表面の境界層が剥離して流出し渦度の強い剥離せん

断層 (Separated shear layer) となり、それが円柱背後で巻き上がって集積し大きな渦となって交互に下流へ流れる。渦が下流にゆくにしたがって、渦中心部 (Vortex core) に分布している渦度はしだいに粘性によって減衰し、ゆっくりとではあるが渦の強さは衰えてゆく。このようなプロセスで柱状物体後流中には交互に渦が生成され、千鳥配列となって流下する。このような渦の列はカルマン渦列 (Kármán vortex street) と呼ばれ、流速を U 、柱状物体の幅 (太さ) を d 、流体の動粘性係数 (粘性係数を密度で割った値) を ν とすると、流れの粘性力に対する慣性力の割合を表すレイノルズ数 (Reynolds number, $Re = Ud/\nu$) が $Re \geq$ 約 30 であれば渦列形成が現れる。Photo. 1 は、静止水中を一定速度で右から左へ走行する外径 $d = 8 \text{ mm}$ の円柱後流を、円柱表面から水彩絵具をにじみ出させるトレーサー法により可視化撮影したもので ($Re = 662$)、カルマン渦列が明確に認識できる。このようなカルマン渦列の生成は、はるかにスケールの大きい流れ場においても現れ、季節風の吹く時期に比較的高い山を有する島の下流側に、およそ 100 km 程度の間隔の渦列が形成されることが、高度 2000 m 付近に浮かぶ雲がトレーサーとなって人工衛星から写真観察されている²⁾。

2.2 自由渦と強制渦

流れの中に渦が多数存在するとフローパターンは極めて複雑になるが、十分に広く静止した流体中に一個の渦が存在する場合には、渦のつくりだす流れは比較的明解である。とくに流れが2次元であれば、流体全体が中心 O のまわりに周速度 V で回転運動をしていることになる。Fig. 3 a) は、周速度 V が中心からの半径 r に反比例して変化している渦で自由渦 (Free vortex) と呼ばれる。自由渦の特徴は、流体全体としては周速度 V で回転運動をしているものの、流体微小部分を局所的に考えると、 V が r に反比例することから中心 O を除いていたところで渦度が零と成ることである。図中に示したように、自由渦中に舞う枯れ葉を考えると、枯れ葉自身は回転運動をしないことになる。一方 Fig. 3 b) は、周速度 V が半径 r に比例するもので強制渦 (Forced vortex) と呼ばれ、流体全体があたかも剛体のような状態で回転している。局所的な渦度は零でなくいたるとこ

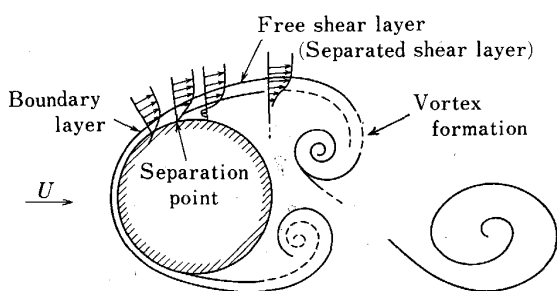


Fig. 2. Separation of boundary layer and formation of vortices.



Cylinder diameter : 8 mm $Re = 662$
Tracer : Water-color paint
Photo. 1. Formation of a Kármán vortex street behind a circular cylinder.

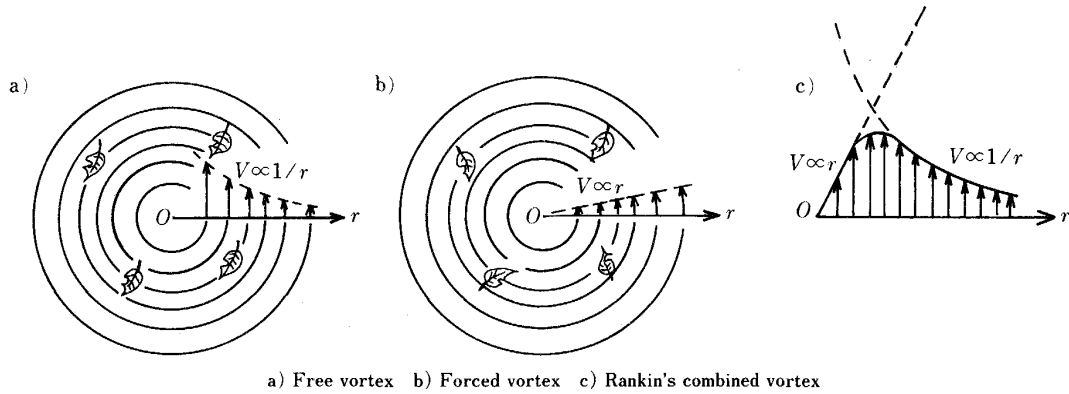


Fig. 3. Basic vortices.

る剛体回転角速度の2倍の値をとり、流体微小部分は渦の回転運動と同じ回転角速度となるから、図中に示したように枯れ葉が中心 O のまわりを大きく一回転すると枯れ葉自身も一回転することになる。

自由渦と強制渦は渦運動の最も基本的なものであり、自然界に存在する渦は、中心付近が流体の粘性の作用により強制渦状であり、それより外側の広い部分はエネルギー一定の自由渦状となっている。これら二種の組合せ渦の回転運動の周速度分布は Fig. 3 c) のようになり、ランキン渦 (Rankine vortex) と呼ばれる。台風は自然界に生成する巨大な渦であるが、台風の中心から十分遠いところでは風速は半径が大きいほど小さく、中心近くに最大風速域が存在し、さらにその内側には中心部ほど風速が衰える台風の目と呼ばれる領域があることなど、台風の回転運動が概略的にランキン渦に対応していることが理解できる。

このように実際の流体中では、粘性や密度差の作用によって生成された渦度が集約して大きな回転運動である渦が形成されるわけであるが、ひとたび形成された渦はあらたに渦度の供給が無くても、粘性によって消散するまでかなり長い間流れの中に存在し続ける。この性質は、粘性が無いと仮定された理想流体中では、渦はその強さを維持し決して消えることはない、という性質すなわちケルビンの渦定理 (Kelvin's circulation theorem) にもとづいている。台風やたつ巻のように強い渦が発生するとなかなか消えずに大きな被害をもたらすこともあるのはこのためである。また、渦は一般に強い渦度をもつ中心部分が渦糸 (Vortex filament) あるいは渦管 (Vortex tube) と呼ばれるひも状になっているが、理想流体中ではこの渦糸は流れの内部の空間で切断された状態であることはなく、渦糸端は必ず固体壁面や自由表面のような流れの境界上に存在し渦糸が境界から境界へ伸びてつながっているか、あるいは渦糸の両端が結合して閉じた渦輪状になっているかのいずれかである。台風やたつ巻の場合も渦糸の一端は海面や地表にあり、他端は気温の急変による上空の密度差境界面や大気の薄くなる上空にまで達する。また、たばこの煙による渦輪なども日常的に

見ることができる。

以上に述べた流れにおける渦の生成と渦運動の特性は、次のようにまとめられる。(1) 粘性や密度こう配によって生成された渦度が流れの中で集まると渦となって発達する。(2) ひとたび生成された渦は、とくに流れの条件を変えないかぎり急には消滅しない。(3) 渦中心部を構成する渦糸の両端は、流れの境界面上にあるか閉じて渦輪状になっている。ただし、(3) の特性については、境界の一部が無限下流である場合には渦糸は流れの流れて下流側に伸びているように見えるし、また、実際の流れの中では粘性や流速の乱れによって渦糸が切れて渦輪に変化したり、複数の渦輪が合体して新しい渦輪を形成したりする非定常なプロセスも見られることがある。

3. いろいろな渦の生成

自然界に発生する渦は多種多様であり、流体力学的特性もそれぞれ異なっている。工学上の諸問題に関連して取り上げられる渦も、流れの初期条件や境界形状に応じていろいろなフローパターンを形成する。ここでは、工学上の基礎的な渦をいくつか取り上げ、その特性について概説することにする。

3.1 カルマン渦列の性質と渦列干涉

2章で説明したように一様な流れの中に柱状の物体が置かれている場合や Photo. 1 に示したように静止流体中を一定速度で柱状物体が進行する場合、物体背後から下流に千鳥配列のカルマン渦列が形成される。いま、外径が d の円柱が流速 U_∞ の流れの中に置かれているとき、円柱片側からの渦放出周波数 f は d と U を用いて規格化されストローハル数 (Strouhal number) と呼ばれる無次元周波数 $S = fd/U_\infty$ で整理される。Fig. 4 は、円柱のストローハル数の逆数 ($1/S$) とレイノルズ数 (Re) の関係を、円柱に作用する流体抗力の無次元値である抗力係数 (C_D) とともに示したものである。カルマン渦列は $Re > 30$ で形成され、抗力係数 C_D がほぼ $1.0 \sim 1.2$ の一定値となるレイノルズ数範囲 ($10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$) では、ストローハル数もほぼ一定で $S = 0.18 \sim 0.2$ となっている。この性質を利用して管路内に柱状の

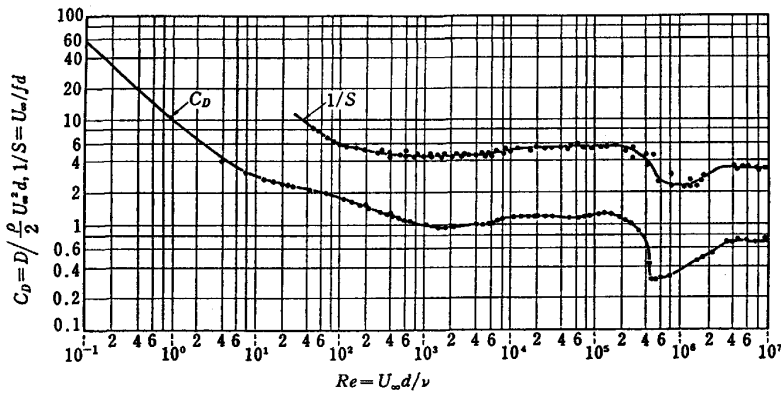
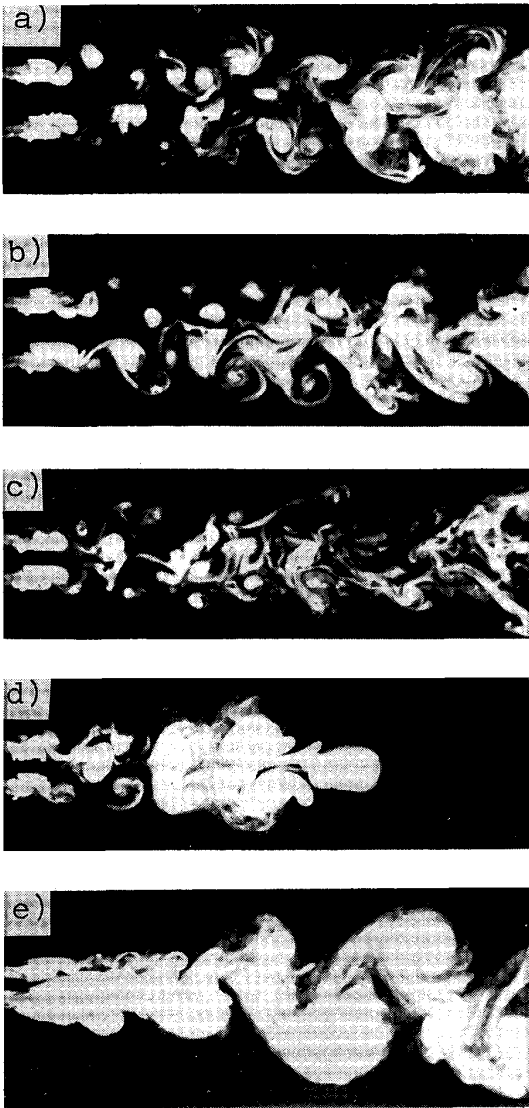


Fig. 4. Strouhal number S and drag coefficient C_D of a circular cylinder.



a), b) $g/d = 2.0$ c), d) $g/d = 1.05$ e) $g/d = 0.5$
 Cylinder diameters : 8 mm g : Gap between two cylinders
 $Re = 662$ Tracer : Water-color paint

Photo. 2. Wakes behind two parallel circular cylinders.

渦発生体を取り付け、渦発生にともなう流体力や流速の変動周波数 f をはかり、 $S = fd/U = \text{一定}$ の関係から流速 U を求め管路を通過する流量を計測することができ、渦流量計 (Vortex flowmeter) として工業的にかなり普及しており、渦流量計による流量測定方法を規定する JIS 規格も最近制定されている³⁾。

流れの中に柱状物体が複数存在すると、カルマン渦列も複数形成され、相互に干渉して独特の流れ特性を示すようになる。Photo. 2 は、静止水中で並列にならべた 2 本円柱を一定速度で走行させた場合の渦列干渉を、Photo. 1 の単独円柱と同じ条件で、2 円柱間のすき間 g を変化させ写真撮影したものである。写真 a) と b) は同一のすき間・直径比 ($g/d = 2.0$) であるが、渦放出の位相関係が相互に干渉し、2 対のカルマン渦列が対称配列および反対称配列となっている。写真 c) および d) はすき間が小さい $g/d = 1.05$ の場合で、それぞれ一定速度での走行時および出発時のフローパターンである。両円柱からカルマン渦が放出されてはいるものの、相互干渉が強く対称配列のみが観察される。写真 e) はさらにすき間の小さい $g/d = 0.5$ の場合で、もはや各円柱は同一の周波数で渦放出を行わず、すき間を通った流れが一方の円柱 (写真では上側の円柱) 側に偏り、円柱背後の後流幅に大小が生じるとともに放出渦の間隔にも極端な大小が現れている。Fig. 5 は上述の並列 2 円柱の無次元渦放出周波数であるストローハル数のすき間・外径比に対する変化の実測例であり、すき間が円柱外径より大きい $g/d > 1$ の場合には各円柱は単独の場合と同様な渦放出を行うが、すき間が円柱外径より小さく $g/d < 1$ となるとフローパターンが Photo. 2 e) のように劇的に変化し、ストローハル数も単独の場合の $S \approx 0.2$ とは大きく異なる。

カルマン渦列は円柱のみでなく三角柱や四角柱をはじめいろいろな断面形状の物体でも生成されることから、このような渦列の干渉現象は、予想外の共振による機器の振動や騒音の発生という工学上の問題を招くこともあり、これまでに多くの研究により干渉特性がかなり明ら

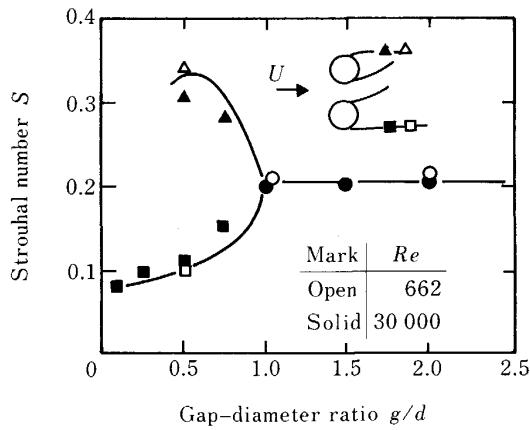
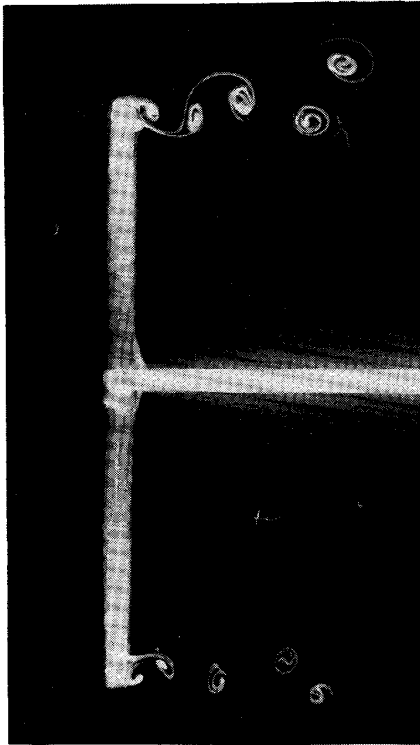


Fig. 5. Strouhal numbers of two parallel circular cylinders.



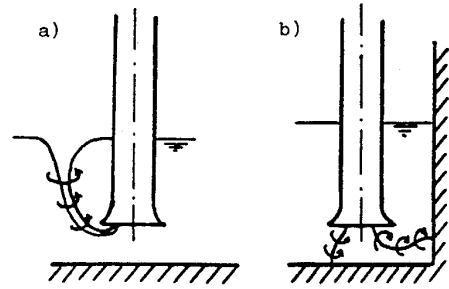
$d_i/d_o = 0.913$ $Re = 131$ Tracer : Water-color paint
 d_i, d_o : Inner and outer diameters of the ring body

Photo. 3. Formation of ring vortices in the starting flow behind a ring body.

かにされている^{4)~9)}.

3.2 リングから放出される渦輪列

一様な流れの中に内径 d_i , 外径 d_o のドーナツのようなリング物体を中心軸が流れと平行になるように設置すると, 内径側および外径側から境界層が剝離し, 渦度の回転の向きが互いに異なる円筒状の速度せん断層が放出され, それが交互に巻き上がってリング渦列を作ることが知られている^{10)~12)}. Photo. 3 は, 内外径比が $d_i/d_o = 0.913$, 断面が四角形のリングを静止水中で一定



a) Air entraining vortex b) Submerged vortex
 Fig. 6. Vortices formed in pump sumps.

速度で動かし始めて直後のリング渦断面を, リング物体表面から水彩絵具をにじみ出させるトレーサー法で可視化したものである. 中央の棒は, リングを傘の柄のようにして下流側から支持するためのもので, 流れに対する影響は少ない. 写真から明らかなように, リング渦列の断面はカルマン渦列と良く似て千鳥配列となっており, 渦放出周波数もカルマン渦列の場合とほぼ同一となることが知られている. しかし, 内外径比が 0.5 程度以下のリングでは, このようなリング渦列は形成されずに乱れた流れとなる¹⁰⁾.

リング渦列がカルマン渦列と同様なストローハル数特性を有していることから, 円形断面の管路中に中心軸を共有するようにしてリング状物体を組み込み, 流速や流量を計測する装置の試験的な研究も行われている¹³⁾.

3.3 ポンプ吸込み水槽に発生する渦

上下水道, 農地用排水, 雨水排水を始めとして, 発電所用循環水, 工場用冷却水などのために用いられるポンプは, 日常生活様式の変化や農業, 工業技術の進展にとともに, これまでにかかなりの大形化の傾向がみられるが, ポンプ吸込み水槽用地を十分に確保しにくいこともあって, 吸込み口付近に渦が発生しないような吸込み水槽の建設には, 高度な流体力学上の配慮が必要となってきている. Fig. 6 に示すように吸込み水槽形状が適切でないと, 渦糸の一端が水面にあり他端は吸込み口に吸い込まれていて水面から渦中心部に形成された気柱を通して空気を吸い込むいわゆる空気吸込み渦が発生したり, 渦糸の一端が水槽壁面上にあって渦中心部が低圧になることから気ほうが発生しているいわゆる水中渦が発生する. このような渦が生成して空気や気ほうとともに渦の他端が吸い込まれると大形のポンプが振動や騒音を発生し, ポンプ性能も劣化する. したがって, 複雑な形状をした水槽や部分的に流速が大きくなるような水槽形状を採用せざるを得ない場合には, あらかじめ模型試験を行ってこれらの渦が生成しないことを確かめる必要がある. もし渦発生が予想されれば, 形状変更や渦発生防止装置の設置などの対策を施すことになる. Photo. 4 は, 標準的な形状の模型水槽中で写真左上の水面から水中に没した吸込み口につながる空気吸込み渦が発生して



Photo. 4. Formation of an air entraining vortex in a pump sump.

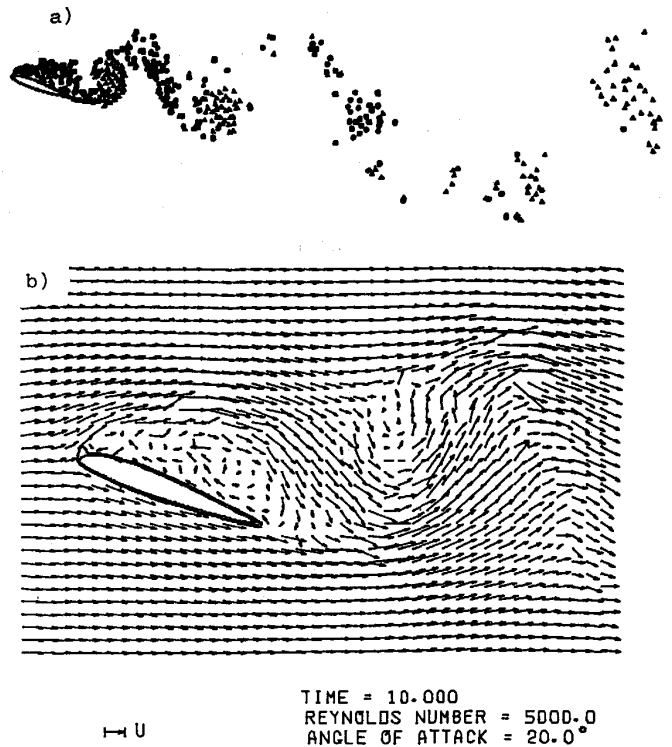
いる様子を示すもので、ジュージュウという激しい空気吸込み騒音を伴っている。

このような吸込み口を伴う水槽状の流路には概して渦が発生しやすいことは我々の日常の体験からもうかがわれ、洗面所や風呂桶の栓をぬいた後に水位が下がるほど空気吸込み渦が発生しやすくなるのもその例である。水槽形状や水槽上流側の条件によって、水槽内に渦度が流れ込んだり水槽内の構造物や吸込み管の壁面から境界層が剥離して流れの中に渦度を供給したりすると、吸込み口付近の流れ方によっては渦度が集約して流れることがあり、強い渦の生成という結果を招きやすい。吸込み口の位置が水面から十分に深い位置にあり、しかも水槽の底面や側壁面から十分に離れている場合には、上流側からの流入条件にもよるが概して渦は生成されにくくなる。

最近では、ポンプ吸込み水槽の模型試験方法を規定する基準作り¹⁴⁾¹⁵⁾や、数値計算による渦発生の予測の試み¹⁶⁾などが行われている。

4. 渦を伴う流れの数値解析と実験解析の例

最近の計算流体力学の進歩はめざましく、一方では流れの計測技術もハイテクノロジー化とともにますます多様化し、選択のメニューはかなりバラエティーに富んできている。しかしながら、本稿で取り上げている渦を伴う流れは、一般にはフローパターンが時間的に変化するいわゆる非定常流であり、定常流の数値計算に比べて多大な計算時間を要することや、流れ自体が複雑な乱流運動と深く関連をもっていることが多く、現在までの乱流モデルではこれらの流れを必ずしも的確にとらえること



a) Flow pattern by discrete vortices
b) Velocity vectors of the same flow as shown in Fig. a)

Fig. 7. Predicted flow around an airfoil of NACA 23012.

ができないことなどから、現在の先端的なスーパーコンピュータを駆使した流れ解析が経済的および時間的な面から研究目的に合致するかどうかについては、事前の評価が必要である¹⁷⁾。また、コンピューター援用のハイテク計測が、研究や開発のステップとしてはオーバースペックになることもある¹⁸⁾。このような背景から、必ずしも大規模計算や大がかりな計測によることなく、身近なミニコンやワークステーションクラスの計測機や安価な計測機器によっても“工学的精度”で流れ特性が求められるような、簡便な流れ解析法や計測技術の開発が期待されている。

ここでは、このような観点から開発が進められている数値解析法と画像処理計測法の実施例を紹介する。

4.1 パネル・渦法による非定常剥離流れの解析

簡便な実用数値計算法を開発するという目的に対して比較的計算機容量の使用が少ない境界積分法が注目に値するもののひとつであろう。一般に大型計算機の長時間使用を必要とする差分法が流れの領域型解法であるのに対し、境界積分法では基本的には境界面上のみに未知数が存在する境界型解法であることから、プログラム開発や計算実行にあたっては必ずしもスーパーコンピュータを必要とせず、非定常な初期流れの解析あるいは高精度を要求されない解析の場合にはミニコン程度でもかなりの解析が可能であることが最大の特長である。もちろんスーパーコンピュータを用いれば、より短時間で

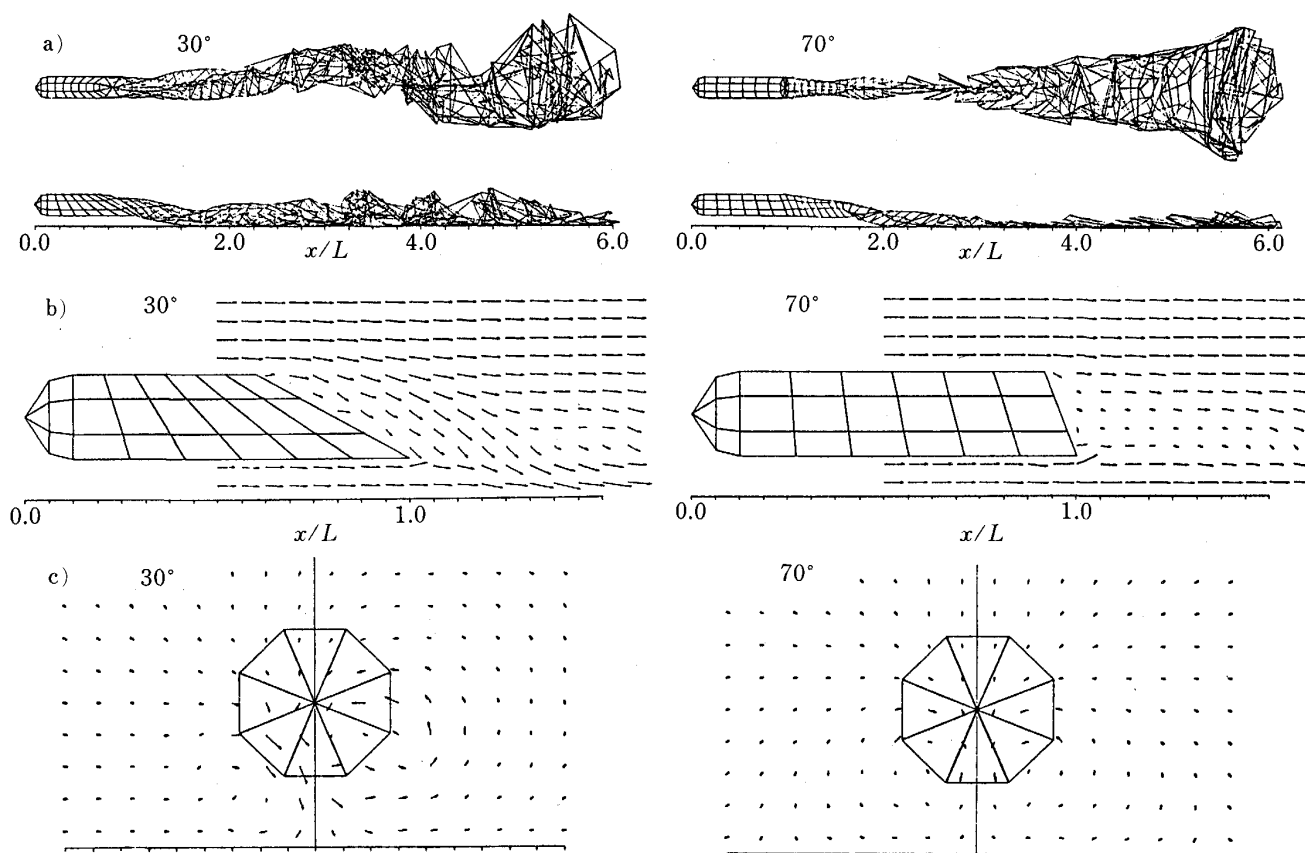
複雑な流れ解析が可能となり、とくに離散渦法(Discrete vortex method)による非定常剥離流れの解析は、ベクトル演算プロセッサに適した計算法でありいっそうの活用が期待されている¹⁹⁾。

境界積分法の基礎についてはテキスト²⁰⁾を参照していただくこととし、以下に比較的小規模な計算機を用いて計算された渦形成を伴う剥離流れを紹介する。

Fig. 7は2次元単独翼(NACA 23012)まわりの非圧縮粘性流れで、迎え角 20° で翼弦長を基準にしたレイノルズ数が5000の場合について、時刻 $t=0$ から突然一定速度 U で動き始めた出発流れの計算例である。この計算では、翼面上の境界層排除厚さ面を線型渦分布パネルで表し、境界層の流出を微小時間ごとの離散渦導入で表すことにより²¹⁾、境界層の発達、剥離の発生、渦度の放出と後流渦の形成が解析されている。Fig. 7 a)では、翼の前縁および後縁からの境界層剥離による渦度の流れ出しに対応して互いに回転の向きが異なる微小な渦点の流れ出し、それらが流下するにつれて同一回転の渦点どうしが局所的に集まって大きな渦を形成する様子が見られている。Fig. 7 b)は、a)と同一条件における翼近傍の流れを速度ベクトル分布図として拡大して示し

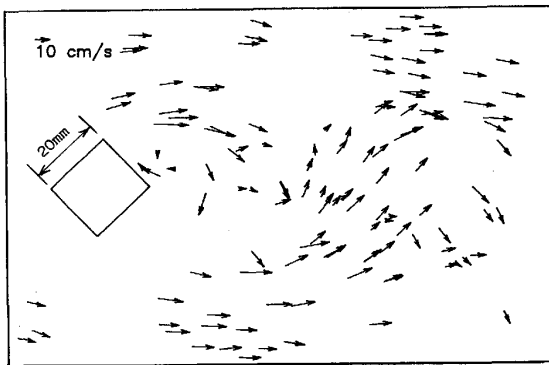
たもので、カルマン渦状の交互渦が形成されていることが明確に理解できる。この計算プログラムの開発および計算の実行は16ビットパソコンを用いて行われ、計算時間は無次元時間 $T=Ut/c$ (U は流速、 t は実時間、 c は翼弦長)の10までで約15hであり、ちょうど夕方にスタートして翌日の朝に結果が得られることになる。このように、境界層の発達や非定常剥離流れがパソコンによっても解析可能となる点は、差分法では得られない境界積分法の利点とも言えよう。

Fig. 8は半球状の頭部と傾斜した背面をもつ円筒状物体の地面近傍を走行する出発流れを解析した例である²²⁾。この計算では、物体表面を一様分布吹出しパネルによって表し、パネル枚数は16ビットパソコンを用いてプログラム作成および試験計算を行えるように極力少なく72枚とした。物体後端の傾斜面周囲からの速度せん断層の放出に対応して微小時間ごとに渦糸要素を導入し、一定速度 U で出発するレイノルズ数 $Re=UL/\nu=10^4$ (L は物体全長、 ν は動粘性係数)の非定常流れを解析している。この計算結果は、無次元時間 $T=tU/L=5.0$ の場合で、後部傾斜角 θ は 30° と 70° の二とおりであり、地面とのすき間 H は $H/L=0.1$ として



a) Flow pattern expressed by vortex elements b) Velocity distribution in the central section
c) Velocity distribution in a wake section ($x/L=1.5$)

Fig. 8. Predicted flow behind a three-dimensional bluff body moving close to a ground plane.



$Re = 1300$

Fig. 9. Velocity vectors in the wake behind a square cylinder measured by the twinkle laser sheet method.

ある。図中の a) は渦糸要素によるフローパターンの正面図および側面図である。b) は側面中央断面の速度ベクトルであり、c) は物体後端から $0.5L$ 下流の後流断面の速度ベクトルを表す。これらの図から、 θ が 30° の場合には物体後流中にあと引き渦 (Trailing vortex) が形成されら旋状に流下しているが、 θ が 70° の場合には渦の生成は弱く後流断面の速度ベクトル図には回転運動成分は認められない。この計算は HITAC の M240H により約 20 min 程度であり、3次元物体からの後流渦の生成などが比較的手軽に調べられている。

4.2 点滅するレーザーライトシートによる流速計測

レーザーを利用した流れの可視化法についてはいくつかの開拓的な研究が進められており²³⁾²⁴⁾、その具体的な計測にはそれぞれにノウハウが必要なようである。ここに紹介する流速計測法は、一定時間におけるトレーサーの軌跡から流体中の粒子速度を求め流速を計測するものであり、基本的には決して新しい方法ではないが、可視化用光源に点滅レーザーライトシートを用い、トレーサーの軌跡画像の記録に通常の CCD ビデオカメラ 1 台のみを使用して、計測技術の簡略化と経費の節減をはかったことに特徴がある²⁵⁾²⁶⁾。点滅レーザーライトシートは、回転数可変の回転シャ光機により点滅レーザービームを作り、ファイバーケーブルを介してシリンドリカルレンズに導いてビームをシート状に広げることにより、任意周波数の点滅光として簡単に得られ、流れの測定断面内のトレーサー軌跡を可視化することができる。Fig. 9 は、流速 12 cm/s の一様水流中に置かれた四角柱からのカルマン渦放流流れの計測結果で、各流速ベクトルは、ビデオ画像上のトレーサー軌跡長さをパソコンによって制御された画像処理装置を用いて読み取って求めたものである。この点滅レーザーシートを用いた画像処理流速計測法によれば、渦発生を伴う複雑な流れの任意断面内の流速ベクトル成分を、極めて容易に測定することが可能となり、いろいろな流れへの適用が期待

されている。

5. ま と め

流れの中に渦が発生するメカニズムは、流れの初期条件や境界条件によってかなり相違があるが、本質的には渦度がどのように供給され、それらがどのように流れるかによっていることは本文に説明したとおりである。自然界における空気や水の流れを見ても、渦を伴わないものはほとんど無いと言っても過言ではない。技術の粋を集めて作られた航空機でもひとたび設計条件からはずれると、Fig. 7 に示したような流れの剥離により失速状態に陥ることもあり、渦とはこれほど発生しやすいものと考えたほうが良さそうである。

流れにおける渦の生成を、さまざまな条件下で意のままにコントロールできたとすれば、それは正に人間にとって夢の実現に値するものである。鳥や魚のように、渦無しの流れと渦放出を巧みに使い分けることもできるし、台風やたつ巻の、発生や進路を自由に制御することもできるようになる。

流れにおける渦の生成に関する研究を行っているとき、流体が時として生き物のように感じられ、「流れは、自身の姿を自由に変え、常に流れやすいように流れている」ように見えてくる。要は、「流れの気持ち」が理解できるようになることであろうか。溶けた鉄の流れがどのような性質を持つ生き物なのかについては、ご専門の技術者や研究者の方々が解き明かしてくださるものと楽しみにしている。この分野の方々にとって、本文が多少なりともご参考になれば幸いである。

文 献

- 1) R. S. SCORER: Environmental Aerodynamics (1978), p. 44 [Ellis Horwood Limited]
- 2) R. S. SCORER: Environmental Aerodynamics (1978), p. 75 [Ellis Horwood Limited]
- 3) 日本工業標準調査会: 渦流量計による流量測定方法 JIS Z 8766 [日本規格協会] (昭和 64 年 1 月 1 日制定)
- 4) K. KAMEMOTO: Bull. JSME, **19** (1976), p. 283
- 5) 亀本喬司: ターボ機械, **4** (1976), p. 225
- 6) 亀本喬司, P. W. BEARMAN: 日本機械学会論文集, **46** (1980), p. 1229
- 7) 亀本喬司, 小沢直弘, 鈴木良治: 日本機械学会論文集 B, **49** (1980), p. 1619
- 8) 亀本喬司, 小沢直弘, 相沢政宏: 日本機械学会論文集 B, **50** (1984), p. 316
- 9) 機械工学便覧 A5 流体工学 (日本機械学会編) (1986), p. A5-70 [日本機械学会]
- 10) 八田健一郎, 亀本喬司: 日本機械学会講演論文集, **790** (1979), p. 109
- 11) M. TAKAMOTO: Phys. Fluids, **24** (1981), p. 1582
- 12) K. KAMEMOTO, A. MIZUKOSHI, K. MORIWAKI and M. AIZAWA: Bull. Faculty of Engineering Yokohama National Univ., **36** (1987), p. 19
- 13) 寺尾吉哉, 高本正樹, 亀本喬司, 浅田秀一, 大内秀樹: 計測自動制御学会論文集, **22** (1986), p. 812
- 14) 日本機械学会基準, ポンプの吸込水槽の模型試験法

- JSME S 004 [日本機械学会] (1984)
- 15) T. TOYOKURA and K. KAMEMOTO: Proc. IAHR Sympo. Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, F. R. G. (1984), p. 6.3-1
 - 16) 亀本喬司: 日本機械学会 RC 78 流れ解析プログラム開発研究分科会成果報告書 (RC 78 分科会編) (1989), p. 263
 - 17) 亀本喬司: 電業社機械 ((株)電業社機械製作所技報), 11 (1987), p. 3
 - 18) 亀本喬司: 自動車研究 (日本自動車研究所所報), 10 (1988), p. 349
 - 19) 桑原邦郎: 機械の研究, 40 (1988), p. 15
 - 20) 流れの数値シミュレーション (日本機械学会編) (1988), p. 206
 - 21) 鈴木俊貴, 亀本喬司: 日本機械学会シンポジウム講演論文集, 890 (1989), p. 29
 - 22) 中西裕二, 亀本喬司: 文部省重点領域研究「数値流体力学」実施グループ主催, 第2回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1988), p. 335
 - 23) 流れの可視化 (流れの可視化学会編), 7 (1987) 25
 - 24) 自動車研究 (日本自動車研究所所報), 10 (1988), p. 24
 - 25) K. KAMEMOTO, H. OKAMOTO, E. TANAKA and M. AIZAWA: Proc. 11 th Sympo. Turbulence, Missouri, USA (1988), p. A23-1
 - 26) 亀本喬司, 岡本秀伸, 斉藤 聡, 大平 聡, 田中栄二: 第23回ターボ機械講演会講演論文集 (1989), p. 49