渦：剥離渦研究の動向について^{*1}林 正 徳^{*2}・麻 生 茂^{*3}

Key Words: Separation, Vortex, Separated Flow, Shear Layer

1. はじめに

航空機のみならず、自動車、船および地上の構造物等は多少とも剥離流れを伴っており、その構造や性質を調べることは、物体の空力特性を把握しそれを設計に役立てるとともに安全性を高めるためにも重要である(第1図)。また、近年急速に宇宙開発が進められており、さまざまな形状の宇宙往還機の開発が進められている。このような超音速および極超音速飛行をする航空機においてもさまざまな剥離現象が存在する。剥離渦は、これらのさまざまな剥離流においてその主役を果たしており、剥離渦のふるまい、性質を調べることは非常に重要な問題である。また渦は流体が剛体のように回転したものと考えられる場合、渦度の集合体として表される場合、および速度の差または速度の不

連続面で表される場合などに分けて考えることができる。

渦度と渦については、第1回数値流体力学シンポジウムにて特別講演が大島によってなされている¹⁾。ここでは紙面の都合上、低速流における剥離渦の性質についていくつかを著者らのこれまでの研究を交えて紹介する。さらに、今後の剥離渦に関する研究の動向についてその概要を述べることにする。

2. いくつかの剥離渦の例について

2.1 矩形柱まわりの流れ 第2図は矩形柱の形状パラメータ d/h (d は矩形柱の流れに平行な長さ、 h は流れに垂直な長さ) に対する抵抗の変化を示したものである^{2,3)}。図から明らかなように $d/h=0.66$ のあたりで C_D は最大となる。これまでの研究により、このことは矩形柱角部より形成された強い剥離渦が物体背面に比較的長く留まっていることによるものであることがわかっている。第3図は $d/h=0.66$ における矩形柱の角部からの剥離せん断層の生成過程を可視化したものである⁴⁾。このように生成された剥離せん断層は物体後方においてしだいに巻き込み、大きい剥離渦を形成し、第4図に示すような大きい剥離渦に成長する⁵⁾。

2.2 台形柱まわりの流れ 第5図に台形柱の形状パラメータ b/h に対する抗力の変化を示す⁶⁾。R型模型では、 C_D は一様に大きく $b/h=1.0$ で最大となる。F型模型では、 b/h の増加とともに C_D は減少し、 $b/h=0.75$ で最小となった後急増する。

第6図に、抗力が最も大きいF型の $b/h=1.0$ の台形柱と、抗力が最小であったF型の $b/h=0.75$ の台形柱の約半周期分の瞬間煙写真を示す。 $b/h=1.0$ における流れ場の状況は、矩形断面柱での $b/h=0.6$ に相当することから、第4図と非常によく類似しているが、 $b/h=0.75$ においては、剥離せん断層は物体のかなり後方で弱く巻き込み、物体近くでの剥離渦の形成は見られず、また剥離せん断層の上下振動もほとんど見られない。つまりこの流れ場は比較的安定であり、物体の背圧も高く抗力が小さいものと考えられる。その他

著者紹介

林 正徳 (正会員)

大正14年生。福岡県出身。昭和22年九州帝国大学工学部応用力学卒業。昭和24年同大学院特別研究生前期修了。同年九州大学勤務。同46年教授。同63年3月停年退官。同年西日本工業大学教授。九州大学名誉教授。航空流体力学の研究に従事。工学博士。日本機械学会、日本流体力学会、流れの可視化学会、AIAA学会各会員。

麻生 茂 (正会員)

昭和29年生。佐賀県出身。昭和51年九州大学工学部航空工学科卒業。昭和56年同大学院博士課程修了。同年九州大学工学部航空工学教室に勤務。助手をへて、昭和60年助教授。現在に至る。航空流体力学の研究に従事。工学博士。日本流体力学会、流れの可視化学会、AIAA学会各会員。

^{*1} 昭和63年4月5日、日本航空宇宙学会第19期年会講演会において講演。昭和63年9月1日原稿受理 Vortex: Recent Researches on Separation Vortex

^{*2} 西日本工業大学 Masanori HAYASHI

^{*3} 九州大学工学部航空工学教室 Shigeru ASO

第1図 剥離渦の例

第2図 矩形柱の d/h による C_D の変化

第3図 矩形柱 ($d/h=0.66$) からの流れの剥離

第4図 矩形柱 ($d/h=0.66$) まわりの剥離流

の模型については、この両者の中間の性質を有するが、一般に R 型模型では渦の巻込み位置が物体に近く、剥離流の上下の振動が大きいが、F 型模型ではその逆である。

第5図 台形柱の b/h による C_D の変化 (a) $b/h=1.0$ (b) $b/h=0.75$ 第6図 台形柱 ($b/h=1.0$ および 0.75) まわりの剥離渦 第7図 スカート部を有する円弧形状の C_D の変化

2.3 円弧形状物体まわりの流れ 第7図はパラシュートの基本形状としてスカート部を有する2次元円弧形状について、その形状パラメータに対する抵抗の

(a) $k'/d=0.2$ (b) $k'/d=0.3$

第8図 スカートを有する円弧形状物体まわりの流れ

変化を示したものである^{7,8)}。スカート部を有する円弧形状では、形状パラメータ $k'/d=0.2$ で抗力は極大値をとり、 $k'/d=0.4$ で極小値をとることが見いだされた。このことは第8図に示す煙写真からの物体後方の剥離流の巻き込む状況の違いからもうかがえる。また、この特性については第7図の破線で示すように著者らの行った離散渦法による数値計算⁹⁾でもほぼ同じ傾向が得られている。

2.4 並列平板列まわりの流れ^{10,11)} 一様流中に並列配置された複数枚の垂直平板まわりの流れにおいて最も特徴的なことは、平板間のすきま間隔が小さい場合、そのスリットを通過する流れ (gap flow) が上下いずれかに偏り、偏ったまま安定することである。第9図は2平板列、3平板列および4平板列の偏り流れについてのフローパターンをまとめたものである。このスリットを通過する流れの偏りは、平板列の発生する剥離渦と平板背後の圧力との関係によって維持されていると考えられる。第10図はこのことをより明確にするために、並列2平板列の一方の厚みを増したり、平板の一方の端にスプリック板をつけて各平板の渦形成と偏り流れの関係を調べたものである。これより小さい隙間比 s/d (s はスリット幅、 d は平板の高さ) においては gap flow は、盛んに渦形成をしている

第9図 2平板列から5平板列までの偏り流れのフローパターンのスリット比 s/d による変化

第10図 2平板列の煙写真（スプリット板や厚みを変えた例）

- (a) $s/d=0.2$ （スプリット板つき平板列），
 (b) $s/d=1.0$ （スプリット板つき平板列），
 (c) $s/d=0.2$ ($b/d=0.2$ および 0.66 の矩形柱列)，
 (d) $s/d=1.0$ ($b/d=0.2$ および 0.66 の矩形柱列)

側へ偏ることが明らかとなった。

2.5 剝離した翼まわりの流れ これまでは剝離点があらかじめ定まっている物体についての剝離渦について論じてきた。ここでは翼のように剝離点があらかじめ定まらないものについて調べてみる。第11図は、翼（Göttingen 623）上面における流れの剝離形状をとらえたものである⁴⁾。このように翼からの剝離流は、ある一定の剝離角で遠ざかっていく。また、物体から離れた直後から剝離渦の形成が見られる。第12図は剝離した翼（NACA 4412）まわりの流れを離散渦法で求め、実験結果と比較したものである¹²⁾。このように

第11図 翼からの剝離渦の生成の例（シュリーレン法， $\alpha = 20^\circ$ ）

第12図 剝離した翼（NACA 4412）まわりの C_p 分布の計算結果（離散渦法）と実験値との比較

比較的簡単なモデルで、実験値とよい一致を見ることができる。

2.6 円錐体まわりの流れ 円錐体のような3次元物体からの流れの剝離はより複雑である。円錐体の場合、迎角によってかなり剝離の状況が異なり、小さい迎角のときは主流方向の渦がおもに発生するのに対し

て、迎角が直角に近くなると主流に垂直方向の渦がおもに発生する。その中間の迎角では、その両方の渦が観察される。第13図は迎角 45° の場合の流れを模式的に示したものである。円錐体背後に主流方向

の渦が発生 (第14図)、さらにその外側に主流に垂直方向の渦が発生する (第15図) といった2重構造を有している¹³⁾。

2.7 三角翼まわりの流れ 有翼飛翔体等で用いら

第13図 $\alpha=45^\circ$ の円錐体まわりの流れの模式図

第14図 円錐体背後の主流方向の渦

第15図 円錐体背後の主流に垂直方向の渦

(a) $\alpha=4^\circ$

(b) $\alpha=8^\circ$

(c) $\alpha=16^\circ$

第16図 二重三角翼の前縁剥離渦の相互干渉

(a)

(b)

第17図 Forward facing flap の概念図

第18図 (a) Forward facing flapの三角翼への応用例, (b) 実験に用いた模型

第19図 Forward facing flapの前縁剝離渦への影響

第20図 フラップの有無による空力特性の変化

れている二重三角翼は、前部および後部の三角翼からそれぞれ発生した前縁剝離渦が互いに干渉しあうため、迎角が増すにつれて複雑な変化を示す。第16図は、その状況をとらえた煙写真である¹⁴⁾。迎角が増すにつれて前部および後部からの剝離渦がしだいに重なっている様子がわかる。またこのような現象では互いの前縁剝離渦の相互運動が起きて、渦の崩壊 (break down) を早めることもある。また前縁剝離の通る尾翼などがある場合にも、渦が崩壊することがある¹⁵⁻¹⁷⁾。

一般に、Forward facing flap は、本来第17図に示すように剝離渦を安定させて厚翼型の効果を狙っているものであるが、デルタ翼にもこうした効果を狙った提案がなされることがある (第18図(a))¹⁸⁾。しかしながらこの三角翼の場合には背面に生じる前縁剝離渦による圧力降下が揚力を生ぜしめており、この場合のForward facing flapはこの前縁剝離渦を壊すように作用してしまうことがある。第19図はこのことを示したオイルフロー写真であり、迎角が大きくなり前縁剝離渦が強くなるにつれて前縁剝離渦が壊されていることがわかる。

第20図はそのときの揚力を調べたものであり、Forward facing flapが揚力を減少させる効果をもつことがわかる¹⁹⁾。

3. そのほかの剝離渦の研究について

剝離渦の研究は第2章であげた例のほかにもいろいろな場合が考えられる。ここでは紙面の都合上、重要と考えられる課題について言及するに留める。

ロケットのような物体のフラットスピンの問題は、物体から生じる剝離渦のふるまいから生じるものであり、低速および高速の場合について研究がなされている^{20,21)}。

超音速流および極超音速流で生じる剝離渦は、空力加熱にも重要な影響を与えるものであり、その複雑な構造や空力加熱率への影響が調べられている^{22,23)}。

パラシュートの開傘時には、大きな剝離渦が発生し、その開傘時の荷重、流れの安定性に対して重要な影響を与えるが、そのことについても現在研究が進められている^{24,25)}。

翼の迎角が変化するときその C_L 値があるヒステリシスを示すことは、ダイナミックストールとしてよく知られている。この現象については、翼から生じる剝離渦の強さ、配列の仕方による依存性などが調べられているところである^{26,27)}。

また類似した問題として、剝離した翼表面の渦流れの問題がある。このことはNavier-Stokes方程式の解との関連として議論されており、実験および数値実

験の両面から研究が進められている^{28,29)}。

このほかにも二つの速度の不連続面での渦の生成に関する研究、3次元物体から生じる剝離渦が物体の運動安定性に与える研究、渦輪の合成についての研究が行われている。

4. む す び

剝離渦に関する研究は非常に古くから行われてきたが、現在でもいろいろな流れ場の中でその研究が続けられている、いわゆる古くて新しい問題ということがいえよう。

今後しばらくはこの傾向が続くものと考えられるが、これらの研究において最も重要なことは、現象をまず正確にとらえ、そのメカニズムを解明していくことであろうと考える次第である。

参考文献

- 大島耕一：渦度と渦の方法，第1回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1987)。
- 中口 博，橋本貴久裕，武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験，日本航空宇宙学会誌，16 (1968)，pp. 1-5。
- 林 正徳，大屋裕二，岩崎直道，横本 隆：二次元柱の抗力及び後流に関する一実験，九州大学工学集報，50 (1977)，pp. 767-773。
- 林 正徳，桜井 晃，麻生 茂，大串良昭：Surface Hot Film による剝離を伴う翼の可視化実験，日本航空宇宙学会誌，31 (1983)，pp. 690-695。
- 林 正徳，桜井 晃，大屋裕二：一樣流中に置かれた二次元矩形柱の変動特性，九州大学工学集報，54 (1981)，pp. 137-144。
- 林 正徳，桜井 晃，森田直弘，榊 和幸：台形断面柱の臨界形状に関する研究，九州大学工学集報，54 (1981)，pp. 151-158。
- 林 正徳，桜井 晃，麻生 茂，天広慎一：二次元及び三次元弧状物体の空力特性について，九州大学工学集報，57 (1984)，pp. 137-142。
- 林 正徳，麻生 茂，天広慎一，中矢裕之：パラシュートの基本形状の抵抗について，九州大学工学集報，57 (1984)，pp. 463-470。
- 林 正徳，麻生 茂：パネル法と離散渦法を用いた剝離流の数値シミュレーション，日本航空宇宙学会誌，34 (1986)，pp. 350-355。
- 林 正徳，桜井 晃，大屋裕二：一樣流中に並列配置された垂直平板列の後流干渉，日本航空宇宙学会誌，30 (1982)，pp. 504-515。
- Hayashi, M., Sakurai, A. and Ohya, Y.: Wake Interference of a Row of Normal Flat Plates Arranged Side by Side in a Uniform Flow, J. Fluid Mech., 164 (1986), pp. 1-25。
- 林 正徳，麻生 茂，二ツ寺直樹：二次元翼回りの剝離流の離散渦法による数値計算，九州大学工学集報，61 (1988)，pp. 287-292。
- 林 正徳：円錐体を生ずる後流渦の水槽実験，九州大学工学集報，32 (1959)，pp. 145-150。
- 林 正徳：(未発表)。
- Uchida, S., Nakamura, Y., Zhang, Z. and Sagawa, N.: An Experiment on a Spiral Type of Vortex Breakdown of a Swirling Flow in a Pipe, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 30 (1987)，pp. 38-44。
- Sarpkaya, T.: An Inviscid Model of Two-Dimensional Vortex Shedding from Transient and Asymptotically Steady Separated Flow over an Inclined Plate, J. Fluid Mech., 45 (1971)，pp. 545-559。
- Erickson, G. E. and Brandon, M.: On the Non-Linear Aerodynamic and Stability Characteristics of a Generic Chine-Forebody Slender-Wing Fighter Configuration, AIAA Paper 87-2617 (1987)。
- Hurley, D. G.: Boundary Layer and Flow Control, Vol. 1, Pergamon Press, Oxford, 1961。
- 林 正徳，麻生 茂：デルタ翼の Forward Facing Flap について，飛行体まわりの剝離流の解析シンポジウム前刷集 (1988)，pp. 49-52。
- Kubota, H., Arai, I. and Matsuzaka, M.: Flat Spin of Slender Bodies at High Angles of Attack, J. Spacecraft Rockets, 20 (1983)，pp. 108-114。
- Yoshinaga, T., Inoue, K. and Tate, A.: Determination of the Pitching Characteristics of Tumbling Bodies by the Free-Rotation Method, J. Spacecraft Rockets, 21 (1984)，pp. 21-28。
- 村上 哲，相原康彦：衝撃波と境界層との3次元干渉に関する研究，第18回流体力学講演会講演集 (1986)，pp. 112-115。
- Hayashi, M., Sakurai, A. and Aso, S.: Measurements of Heat-Transfer Coefficients in the Interaction Regions between Oblique Shock Waves and Turbulent Boundary Layers with a Multi-Layered Thin Film Heat Transfer Gauge, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 30 (1987)，pp. 102-110。
- 辛島桂一，佐藤 清，森戸俊樹：パラシュートの開傘衝撃特性，第18期年会講演会講演集 (1987)，pp. 87-88。
- Hinada, M.: Experiment of Improved Recovery System for S-520 Rocket Using a Balloon, Proc. 15th ISTS (1986)，pp. 1511-1520。
- Moore, D. W.: A Numerical Study of the Roll-Up of a Finite Vortex Sheet, J. Fluid Mech., 63 (1974)，pp. 225-235。
- Fink, P. T. and Soh, W. K.: A New Approach to Roll-Up Calculations of Vortex Sheets, Proc. R. Soc., A, 362, pp. 195-209。
- 信太良太，桑原邦郎：大迎角の翼をすぎる遷音速流，第3回航空機計空気力学シンポジウム論文集 (1985)，pp. 175-184。
- 中村佳朗，石黒満津夫，保原 充：二次元翼まわりの非圧縮性流れ，第3回航空機計空気力学シンポジウム論文集 (1985)，pp. 217-227。