

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1271

臨界レイノルズ数付近の軸対称物体のフラットスピン

楯 篤志・岩崎 昭人  
藤田 敏美・吉永 崇

1995年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. はじめに .....	2
2. 記号 .....	3
3. フラットスピンの原因と考えられる二次元円柱に作用する揚力と抗力 .....	3
4. 模型と実験装置 .....	4
5. 実験結果と準二次元解析法による推定値との比較 .....	5
5.1 一様流のレイノルズ数に対する模型の回転速度の変化 .....	5
5.1.1 長さ $l = 1.046$ (1.035) m の円柱模型 .....	5
(1) 前回の実験 .....	5
(2) 今回の実験 .....	7
5.1.2 長さ $l = 0.806$ m 円柱模型 .....	7
(1) 前回の実験 .....	7
(2) 今回の実験 .....	7
5.1.3 長さ $l = 0.606$ m 円柱模型 .....	8
(1) 前回の実験 .....	8
(2) 今回の実験 .....	9
5.2 円柱模型の細長比に対する最大の回転速度 .....	9
5.3 円柱模型上の乱流くさび .....	9
5.4 円柱模型の定常回転速度 $\Omega$ ( $Re_x$ ) のまとめ .....	10
5.5 円柱模型の回転速度の準二元解析法による推定 .....	10
5.5.1 フラットスピンの推定法 .....	10
5.5.2 準二次元解析法 .....	10
5.5.3 実験値との比較 .....	11
5.6 超臨界レイノルズ数領域でのフラットスピンの原因 .....	11
5.7 円錐円柱模型 .....	13
5.7.1 円錐円柱模型と準二次元解析法との比較 .....	13
5.8 両頭円錐円柱模型 .....	14
5.9 ストレークの効果 .....	15
6. 結論 .....	16
7. 謝辞 .....	16
8. 文献 .....	16

# 臨界レイノルズ数付近の軸対称物体のフラットスピン\*

楯 篤 志\*<sup>1</sup> 岩 崎 昭 人\*<sup>2</sup>  
藤 田 敏 美\*<sup>2</sup> 吉 永 崇\*<sup>1</sup>

## Flat Spin of Axisymmetric Bodies Near the Critical Reynolds Number Region

Atsushi TATE, Akihito IWASAKI, Toshimi FUJITA, Takashi YOSHINAGA

### ABSTRACT

A series of flat spin experiments for recovering reentering bodies have been conducted in a wind tunnel with cylinder, cone-cylinder, and bicone-cylinder models in the critical and supercritical Reynolds number regions. Using the free rotation method, the steady state spin rate was measured as a function of the freestream Reynolds number. Two modes of flat spin, a high spin mode, and a low spin mode were found to exist. The high spin mode was initiated in a fairly narrow freestream velocity region near the critical Reynolds number and continued in the supercritical Reynolds number region. During the high spin mode, the circumferential velocity of cylindrical models reached the magnitude of the freestream velocity. In the case of the bicone-cylinder, the spin rate was shown to be erratic, appearing sensitive to small irregularities in the nose shape. Slim triangular prisms on these cylinder surfaces, aligned with the body axis, are effective to reduce the steady state spin rate.

**Keywords** : Falling body, Flat Spin, Recovery, High Angles of Attack, Axisymmetric Body

### 概 要

ロケット頭胴部やブースターを回収する場合に障害となる、臨界レイノルズ数付近における物体のフラットスピン（落下方向に垂直な面内での物体の回転）を研究するため、円柱、円錐円柱、両頭円錐円柱模型を用いて風洞実験を行った。模型を流れに平行な回転軸の回りに自由に回転させ、軸対称模型の定常回転速度を測定した。有限長さの円柱の三次元的な流れが、どの程度回転速度に影響するかを調べるため、長さの異なる円柱模型の実験を行った。その結果次のことが明らかになった。(1)軸対称物体のフラットスピンには、高速度の回転と低速度の回転の二つのモードが存在する。(2)高速回転のフラットスピンは、臨界レイノルズ数付近の狭い領域で発生し、臨界レイノルズ数を越えた領域でも高速回転のフラットスピンは持続する。(3)円柱物体の端部の回転の周速度は一様流の風速にほぼ等しい。また、(4)断面が三角形のほそい角柱ストレークを、円柱、円錐円柱模型の円柱部の表面に軸方向と平行に等間隔に取り付けると、フラットスピンの定常回転速度を減少させることが出来た。(5)フラットスピンは軸対称細長物体の表面のわずかな汚れや静電気による粉塵の付着に敏感で、汚れを除去するほど回転し始めるレイノルズ数、回転速度等の不確かさが少なくなる。

\* 平成7年1月27日受付 (received 27 January 1995)

\* 1 空気力学部 (Aerodynamics Division)

\* 2 新型航空機研究グループ (Advanced Aircraft Research Group)

## 1. はじめに

ロケット頭胴部や、多段ロケットの切り離されたブースターのように、重心が物体の中心付近にある軸対称物体が、人工的な制御なしに大気中を落下するとき、これらの軸対称物体はさまざまな角運動を行う。ロケット頭胴部やロケットブースターを回収しようとする際には、これらの角運動を事前に十分に把握しておく必要がある。落下するロケット頭胴部の運動を調べるため、久保田等は、軸対称の細長物体（ロケットの模型）を3,500 m上空から落下させる一連の実験を行った。それによると多くの細長物体は、落下速度の増加とともに高速のフラットスピン（落下方向に垂直な面内での回転運動）を起こした<sup>1, 2)</sup>。今後、日本でもロケットブースターやロケット頭胴部を高速のフラットスピンを避けて安全に回収する要請が出て来ると考えられる。そのためには、フラットスピンの運動を明かにすることとフラットスピンを制御することが重要である。しかし、現在のところフラットスピンの報告例は多くはない。

風車の翼のようにねじれ角を持つ形状の物体が風の中で回転することは、われわれは当然の事として受け入れている。しかし、ねじれ角を持たない軸対称の円柱物体が平面内で回転するフラットスピンはかなり例外的な現象である。フラットスピン以外にねじれない物体が回転する現象はいくつかの例がある。たとえば、角柱の中央を垂直に貫いて回転出来るように気流の中に支持すると、角柱はフラットスピンを始める。この現象は、角柱の角で流れが剥離することにより負の揚力が発生し、これによりフラットスピンが起きることが分かった<sup>3)</sup>。また、円錐円柱が大迎角を取ると、物体背面に非対称な渦が配置されることにより、偏った力が物体に作用しコーニング運動を行う<sup>4, 5)</sup>。

久保田等は、落下実験のうち軸対称の細長物体（円柱および円錐円柱）を用いて亜音速風洞でフラットスピンの実験を行い、臨界レイノルズ数付近で高速フラットスピンが起り、回転している円柱の周方向の圧力分布が非対称に分布することを報告している<sup>6)</sup>。そこでは、高速のフラットスピンは臨界レイノルズ数付近で発生し持続するが、臨界レイノルズ数領域を越えると回転速度は低下すると述べている。また、このフラットスピンを低減する方法として、物体表面に人工的なラフネスとして細いトリッピングワイヤを着けることを提案している。

久保田等の実験では<sup>6)</sup>、臨界レイノルズ数領域付近（二次元円柱の層流剥離バブル（バブル）ができる領域）に限って円柱や円錐円柱のフラットスピンが起っていると報告している。

しかし、文献2の落下試験データをよく調べると、二次元円柱に遷移バブルが現れる領域を越えても回転しているデータが見られた。著者等は、臨界レイノルズ数付近で一度回転が起きると、落下速度が増加しレイノルズ数が臨界レイノルズ数を越えても、何か別のメカニズムでそれらの回転が持続するのではないかと考えた。

そこでまず、臨界レイノルズ数を越えた領域でも軸対称の円柱や円錐円柱が回転を持続するか確認するために、航技研の2 m × 2 mの低速風洞（突風風洞）を用いて実験した<sup>7, 8)</sup>。その結果、(1)予想通り、一度円柱や円錐円柱模型に高速のフラットスピンが起きると臨界レイノルズ数を越えた領域でも高速回転が持続すること、(2)臨界レイノルズ数付近でかなりランダムにフラットスピンが発生すること、(3)どちらかに回転しやすい癖があることなどを見出した。しかし、その時に行った実験の範囲では、(1)同じレイノルズ数でも実験ごとに定常回転速度が多少異なること、(2)フラットスピンを開始するレイノルズ数は必ずしも一定しておらず比較的広いレイノルズ数の範囲に分散していること、(3)久保田等の実験<sup>6)</sup>に比べて大きいレイノルズ数で高速回転を始めることなど、他の実験とは一致しない点があることについて疑問を持った。フラットスピンの現象を明らかにして行くためには、本質的にフラットスピンは不確定要素が多く、広い臨界レイノルズ数の範囲でランダムに起きる現象なのか、それとも、条件を整えればさらに狭い条件で起きる現象なのかを知る必要がある。

そこで、上に述べた前回の実験<sup>7)</sup>の不確実な点を少しでも明確にするために一部の模型を新たに作り、特に、模型表面の傷と汚れの付着を可能な限り減らすように留意して再実験を行った。

本論文では、亜臨界レイノルズ数から超臨界レイノルズ数までの範囲で、円柱、円錐円柱、両頭円錐円柱がフラットスピンを行う場合について、従来の実験結果と再度実験した結果とを比較して報告する。明かに汚れや表面の傷等に原因があると思われる無意味なデータは取り除いた。この実験は、文献6で報告されている実験のレイノルズ数より高い領域を含んでいる。

ロケット頭胴部の回収の立場からは、円錐円柱模型の特性が最も重要である。ロケット頭胴部模型には片側に円錐円柱、他の側に円柱が回転軸に非対称に取り付けられている。円柱部分の影響を調べるため、円錐円柱模型とは別に、円柱模型の実験を行った。また、模型の円錐部と円柱部が組合わされた影響を知るために、回転軸に対して両側に円錐円柱を持つ、対称な両頭円錐円柱模型についても実験を行った。

2. 記号

- $c_d$  : 単位長さ当たりの二次元円柱の抗力係数  
( $= 2Dr/\rho_x V_x^2 D_l$ )
- $c_l$  : 単位長さ当たりの二次元円柱の揚力係数  
( $= 2L/\rho_x V_x^2 D_l$ )
- $C_n$  : ヨーイングモーメント係数  
( $= 2n/\rho_x V_x^2 S \cdot l$ )
- $D$  : 模型直径 (m)
- $Dr$  : 抗力
- $D_0$  : 模型最大直径 (m)
- $I$  : 慣性モーメント ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
- $L$  : 揚力
- $l$  : 模型全長, 二次元円柱の全長 (m)
- $n$  : ヨーイングモーメント
- $q$  : 動圧 ( $= \rho_x V_x^2 / 2$ )
- $Re_x$  : 主流レイノルズ数 ( $= V_x D_0 / \nu_x$ )
- $Re_{cr}$  : 臨界レイノルズ数 ( $Re_{c1} < Re_{cr} < Re_{c2}$ )
- $Re_{c1}$  : 臨界レイノルズ数の下限値
- $Re_{c2}$  : 臨界レイノルズ数の上限値
- $Re_x$  : 超臨界レイノルズ数 ( $Re_x > Re_{c2}$ )
- $S$  : 基準面積 ( $= \pi D_0^2 / 4$ )
- $t$  : 時間 (s)
- $V$  : 合成速度 (m/s)
- $V_c$  : 模型の周速度 (m/s)
- $V_x$  : 一様流風速 (m/s)
- $X_g$  : 模型先端から重心までの距離 (m)
- $\gamma$  : 一様流とクロスフローとのなす角 (rad)
- $\nu_x$  : 空気の動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\rho_x$  : 空気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\phi$  : 回転角 (rad)
- $\phi'$  : 回転速度 (rad/s)
- $\phi''$  : 回転加速度 ( $\text{rad}/\text{s}^2$ )
- $\Omega$  : 無次元回転速度 ( $V_c/V_x$ )
- $\psi$  : 円錐部頭部方位角 (deg)

3. フラットスピンの原因と考えられる、  
二次元円柱に作用する揚力と抗力

軸対称の細長物体がフラットスピンを行うとき、物体には横力が作用している。一般にはフラットスピンは臨界レイノルズ数付近で起こり、非対称な剥離流が横力を引き起こしていると推察されている。その一つの横力の原因と考えられるのが、二次元円柱に作用する臨界レイノルズ数領域での揚力である。以前は二次元円柱には図1に示すような『抗力バケツ』と呼ばれる力だけが注目されていた<sup>9)</sup>。

図2に、その後に行なわれた二次元円柱に作用する臨界レイノルズ数付近の抗力係数 $c_d$ と揚力係数 $c_l$ の測定例を実線で示す<sup>11)</sup>。二次元円柱の遷移領域の実験<sup>10-12)</sup>によれば、一様流のレイノルズ数を増していくと、臨界レイノルズ数 $Re_{cr}$ と呼ばれる狭い領域に、 $Re_x = Re_{c1}$ と $Re_x = Re_{c2}$ の二つの特徴的な臨界値が現れる。図2に示すように、 $Re_x < Re_{c1}$  (A) のときには、円柱の両側から流れが層流剥離をする ( $c_l \doteq 0$ ,  $c_d \doteq 1.2$ )。  $Re_x = Re_{c1}$  のとき、円柱の片側だけに、一度円柱上で剥離した流れが乱流に遷移し再付着する層流剥離バブル (バブル) が発生する (B)。再付着した流れが円柱の反対側の流れよりも下流で剥離するために、再付着面側に大きな揚力 (あるいは横力) の発生 ( $c_l \doteq 0 \rightarrow 1.0$ ) と、抗力の減少 ( $c_d \doteq 1.2 \rightarrow 0.4$ ) が起きる。ここで、 $c_l$  と  $c_d$  はそれぞれ二次元円柱の揚力係数および抗力係数である。一様流のレイノルズ数 $Re_x$ がさらに臨界レイノルズ数の上限値 $Re_{c2}$ より大きくなると (C), 層流剥離バブルは円柱の両側に発生し、

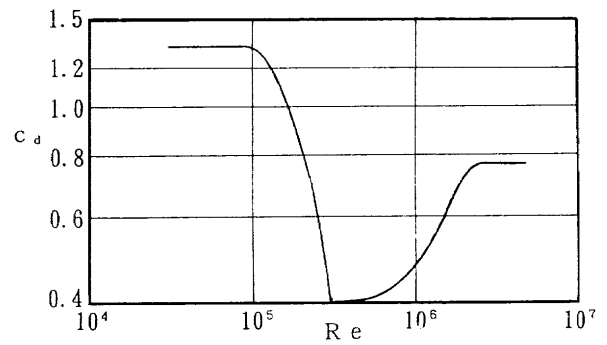


図1 二次元円柱に作用する空気力 (文献9)

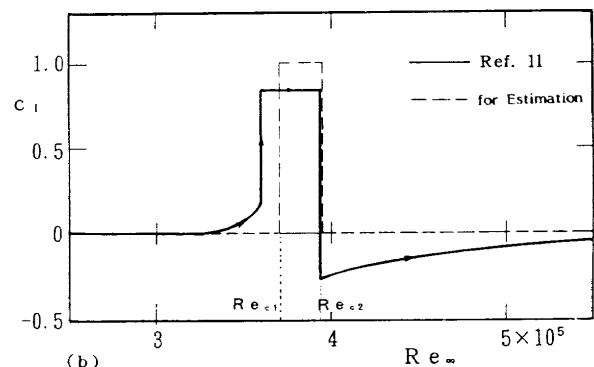
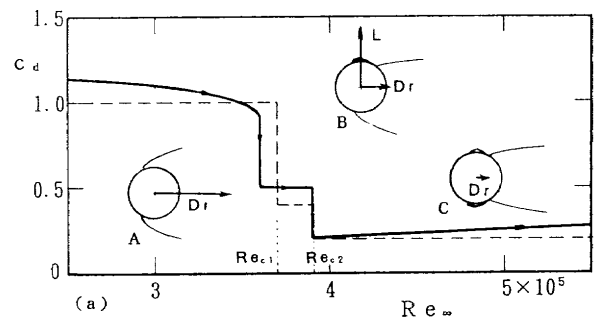


図2 臨界レイノルズ数付近の効力係数 $c_d$ と揚力係数 $c_l$

両側の剥離点が円柱側面の下流側に移動するため、揚力係数は小さくなる ( $c_l \sim 0$ )。また抗力係数は  $c_d \sim 0.2$  程度までさらに減少する。

#### 4. 模型と実験装置

図3にフラットスピンの実験に使用した模型とそれらの大きさを示す。

ロケット頭胴部などの軸対称な物体の円柱部分のフラットスピンへの寄与を知るために円柱模型を準備した。直径  $D_0 = 0.2$  m の円柱で、有限長さ、端部の影響を知るため、3種類の長さ(1)  $l = 1.046$  m ( $l = 1.035$  m), (2)  $l = 0.806$  m, (3)  $l = 0.606$  m の円柱模型を製作した。材質はアクリルで厚さは5 mm である。

図4(a)に全長  $l = 1.046$  m の円柱模型を風洞に取り付けた写真を示す。3種類の円柱模型には、模型重量を軽減するためと表面の滑らかさを確保するため厚さ5 mm のアクリルパイプを使用した。模型表面は他の耐食アルミニウム合金製模型よりも円滑である。模型の両端は耐食アルミニウム合金のふたが取り付けられている。このふたは、模型が高速で回転した時の遠心力(最大約300G)に耐えられるように、模型の中心部の回転支持部に張力をかけたロッドで連結されている。模型の中心部にはディスク型をした耐食アルミニウム製の回転支持部があり、2

個のボールベアリングを介して直径40 mm の支持棒に模型が取り付けられている。ベアリングのグリースを軽質油に取り替えて摩擦力を減少させた。この回転支持部により模型は水平の支持棒の回りを気流に垂直な面で自由に回転出来る。ふたと回転支持部を連結しているロッドに重りを装着している。その重りの位置を調節することにより、回転の中心と模型の重心を一致させることができる。今回の実験では、長さ1.046 m のアクリル製円柱模型は表面の粗さを少なくするために作り直した(前回の模型は、全長  $l = 1.035$  m であった)。

ロケット頭胴部の落下中のフラットスピンを知るため、(4)  $l = 1.095$  m, (5)  $l = 1.086$  m の円錐円柱模型を準備した。それらの直径は、 $D_0 = 0.199$  m であり、重量を軽くするため耐食アルミニウム合金で製作した。半頂角  $15^\circ$  の円錐部分は厚さが3 mm, 円筒部分は厚さが4.5 mm である。図4(b)に、円錐円柱模型を風洞内に取り付けた写真を示す。円錐部分の先端の影響を調べるため、円錐部先端が半径25 mm の球面の場合(図3(4))と、円錐部先端を平面にした場合(図3(5))とについて実験を行った。先端部を平面にした位置は、円錐部と先端の球面部との交線である。円錐円柱模型の回転中心位置は、模型全長の中心とは一致していない。

円錐部分の影響を知るため、円柱の両側に相似の円錐頭部の付いた(6)  $l = 1.213$  m の両頭円錐円柱模型を用意し

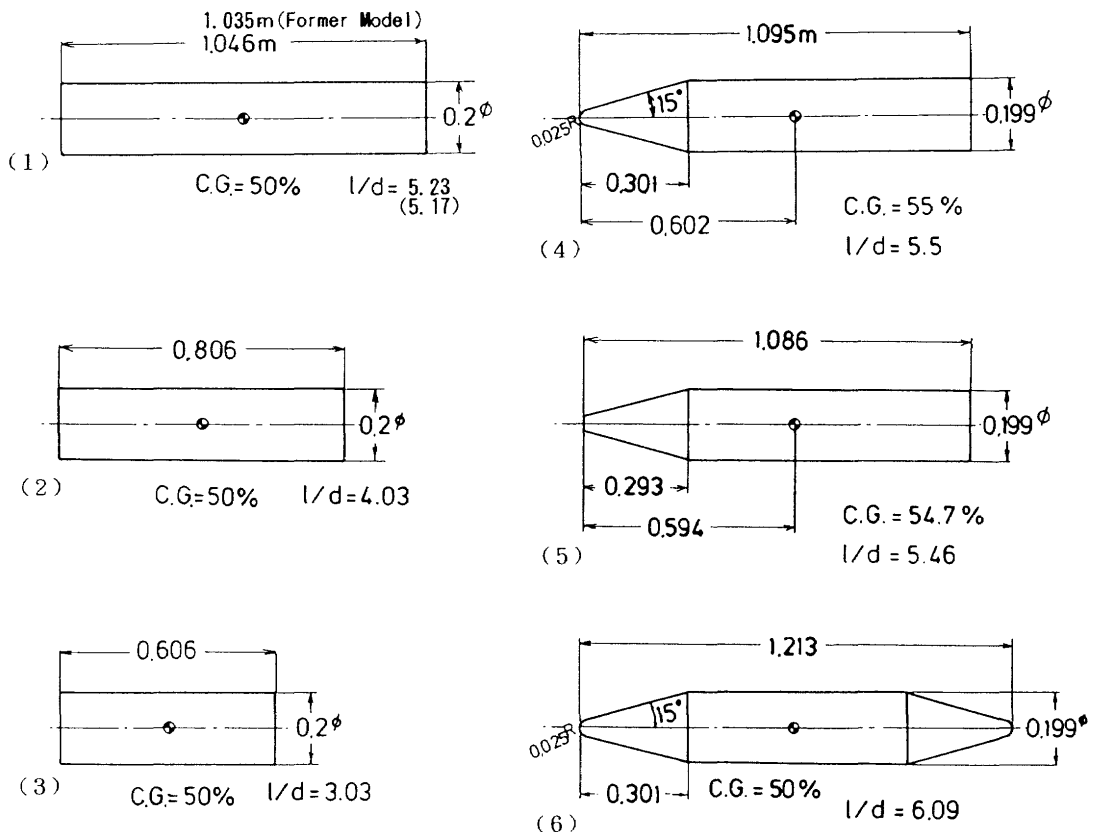


図3 実験に使用した模型とその大きさ

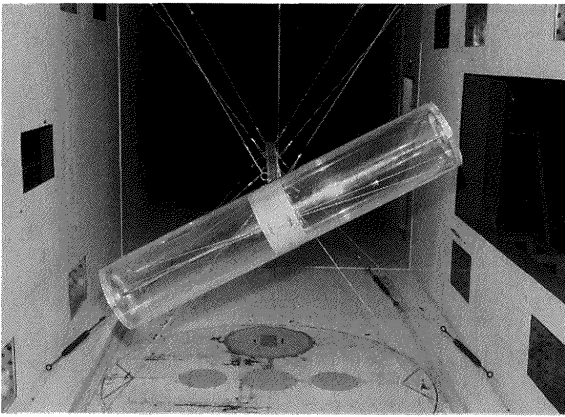


図4 (a) 風洞内に設置された円柱模型 ( $l = 1.046$  m)

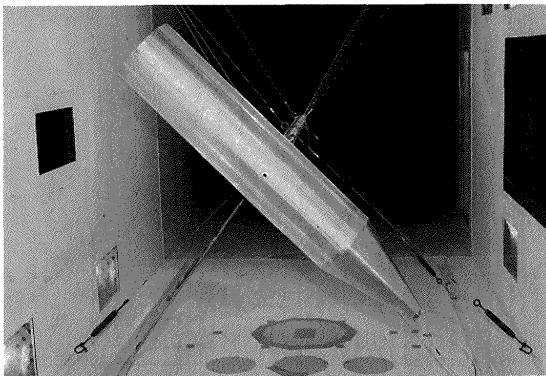


図4 (b) 風洞内に設置された円錐円柱模型 ( $l = 1.095$  m)

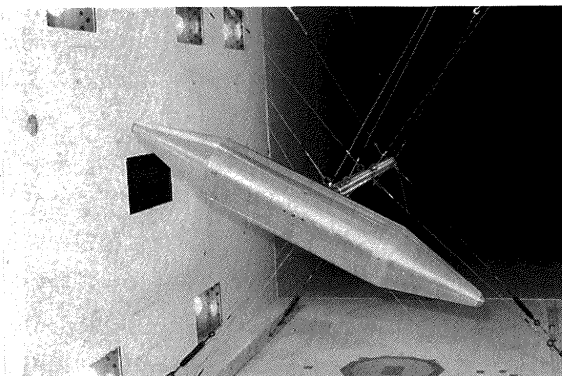


図4 (c) 風洞内に設置された両頭円錐円柱模型 ( $l = 1.213$  m)

た。図3(6)に示す両頭円錐円柱模型（全長  $l = 1.213$  m, 直径  $D_0 = 0.199$  m）には、円柱の両側の端面に円錐円柱模型と同じ材質で、同じ形状の球面鈍頭の円錐部を取り付けている。図4(c)に、この模型を風洞内に取り付けた写真を示す。この両頭円錐円柱模型の先端から中心までの形状は、円錐円柱模型の円錐部と同じである。また、この両頭円錐円柱模型の円柱部の長さは、一番短い円柱模型 ( $l = 0.606$  m) に近い。

模型の定常回転速度  $\phi'$  は、回転角  $3.6^\circ$  ごとに1パルスを出す小型のロータリーエンコーダーからの出力の時間

間隔を測定することにより求めた。ロータリーエンコーダーの摩擦力モーメントは  $5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$  以下であり、ベアリングの摩擦力モーメントや、模型に作用する空気力によるモーメントよりも小さい、したがって、始動時を除けばロータリーエンコーダとベアリングの摩擦力はほとんど無視出来ると考えられる。

フラットスピンの風洞実験は、航空宇宙技術研究所の突風風洞で行った<sup>13)</sup>。この風洞は回流型の連続式風洞で、測定部の断面は  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  の正方形でその長さは  $4 \text{ m}$  である。風速は、 $3 \text{ m} \sim 67 \text{ m/s}$  の範囲で変えられる。この風洞の乱れ度は  $0.06 \%$  と報告されている<sup>13)</sup>。この風洞の二次元円柱（直径  $D_0 = 0.260 \text{ m}$ ）の剥離バブルが片側にだけできる臨界レイノルズ数の範囲は、多少の変動はあるが、 $3.7 \times 10^5 < Re_x < 3.9 \times 10^5$  である<sup>11)</sup> ( $Re_{c1} = 3.7 \times 10^5$ ,  $Re_{c2} = 3.9 \times 10^5$ )。フラットスピン模型と風洞測定部断面との面積比は  $5.2 \%$  以下である。スティングとそのスティングを支えているスティングホルダーは、直径  $2 \text{ mm}$  のステンレス製のより線ワイヤ  $16$  本により風洞中央に水平に支持されている。それぞれのワイヤは風洞の壁に強固に張られている。

今回のフラットスピンの実験に先だって、円柱模型表面に境界層の非対称な遷移を作り出す目的で人工的なラフネスを取り付けて、臨界レイノルズ数以下の領域でフラットスピンの風洞実験を行った<sup>14)</sup>。これにより、最大の無次元回転速度は  $\Omega \approx 1.0$  オーダーに達することが分かった。無次元回転速度は、模型の先端の周速度  $V_c$  と一様流速度  $V_\infty$  との比で、 $\Omega = \phi' l / (2V_\infty)$  ( $\approx V_c / V_\infty$ ) である。以下の実験では、一様流のレイノルズ数  $Re_\infty$  に対する無次元回転速度  $\Omega$  の値を示す。

## 5. 実験結果と準二次元解析法による推定値との比較

### 5.1 一様流のレイノルズ数に対する模型の回転速度の変化

#### 5.1.1 長さ $l = 1.046$ m ( $1.035$ m) の円柱模型

##### (1) 前回の実験

すべての模型について、風洞の一様流速度を  $3 \text{ m/s}$  ( $Re_\infty \approx 4.2 \times 10^4$ ) から徐々に増加させながら、円柱模型の定常回転速度を測定した。 $Re_\infty < 10^5$  では、ほとんど回転は起きないので以下の図では  $Re_\infty > 10^5$  について述べている。

図5は、最も長い円柱模型 ( $l = 1.035 \text{ m}$ ,  $D_0 = 0.200 \text{ m}$ ) の一様流レイノルズ数  $Re_\infty$  と無次元回転速度  $\Omega$  の関係を示す。数回の実験を繰り返して行ったため、シンボルにフラッグを付けて区別した。また、不安定な回転やヒステリシスを確認するため、一様流速度の上昇時 (○, □等の白抜き, Increased) と下降時 (●, ■等の黒塗り,

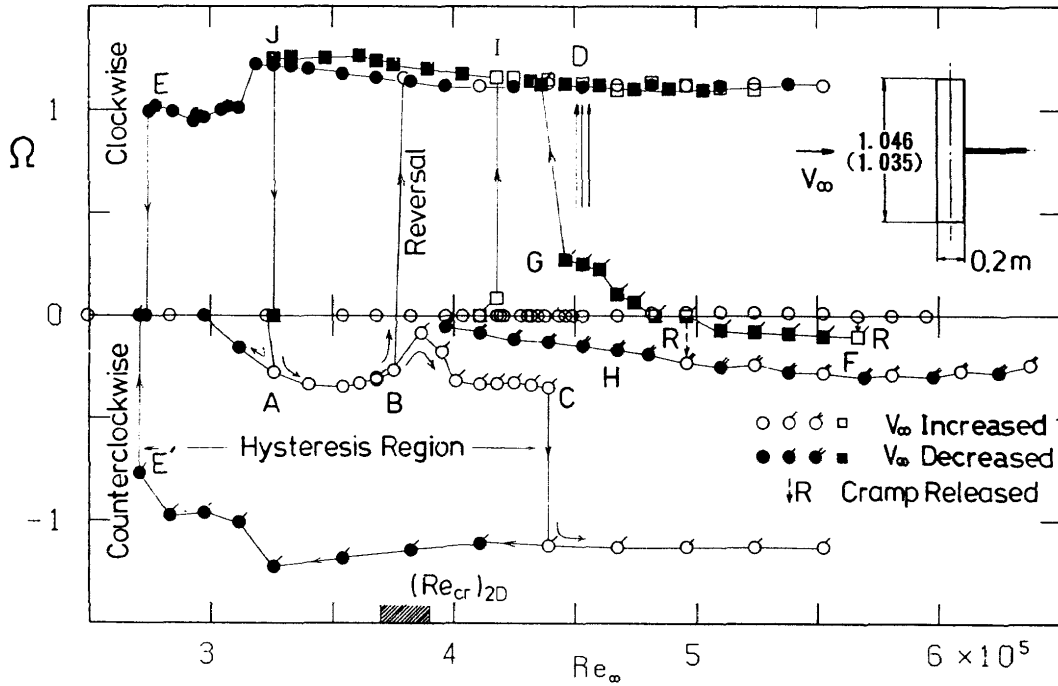


図5 円柱模型 ( $l = 1.046 \text{ m}$ ) の一様流レイノルズ数  $Re_x$  と定常回転速度  $\Omega$   
 今回の実験 (□, ■, D の矢印)

Decreased) のシンボルの区別をした。

一様流レイノルズ数  $Re_x$  を  $4.2 \times 10^4$  から  $3.2 \times 10^5$  まで増加してもこの模型は回転しない。レイノルズ数  $Re_x \approx 3.2 \times 10^5$  付近から模型は反時計方向に低速の回転を始め (A), その無次元回転速度は  $\Omega \approx 0.3$  であった。この低速回転モードは  $Re_x \approx 3.75 \times 10^5$  付近まで続いた。このレイノルズ数に達すると, 図5のB点に示すように, 突然回転の方向が逆転し, 時計回りに  $\Omega \approx 1.16$  の高速回転を行った。また, 他の場合 (○) では, 低速回転モードはさらにレイノルズ数を増加させても継続し,  $Re_x \approx 4.35 \times 10^5$  付近で急激に反時計回りの  $\Omega \approx 1.12$  の高速回転が起きた (C)。しかし, いつも同じレイノルズ数で高速回転が起きるわけではなく, 実験ごとに高速回転に入るレイノルズ数は異なっていた。全体として見ると, これらの結果から, 円柱模型は臨界レイノルズ数付近で高速の回転が始まること分かる。このことは文献6, 15に指摘されている。またある実験の場合には, 図5の  $\Omega = 0$  の線上に○印で示すように, レイノルズ数を  $6.0 \times 10^5$  付近まで増加してもほとんど回転しない場合もある。

しかし, 意外なことに模型がいったん高速の回転モードに入ると, 模型は  $\Omega \approx 1.0$  の回転を保ち, 二次元円柱にはほとんど揚力が作用しない臨界レイノルズ数を越えた領域の  $Re_x \approx 5.5 \times 10^5$  でも高速回転を継続した。このような結果は文献6には示されていない。今回の実験では,  $Re_x > 6.4 \times 10^5$  の領域では実験装置が破壊するおそれがあったので行わなかった。

図5に示すように, 高速回転が起きたあと一様流のレ

イノルズ数  $Re_x$  を超臨界レイノルズ数  $Re_x > Re_c$  まで増加し, そこから高速回転が始まったレイノルズ数まで減少させてきたとき, 回転速度  $\Omega$  の軌跡は  $Re_x$  を増加して行くときほとんど同じである。また, 一度高速回転が起きたあと, 一様流速度を臨界レイノルズ数以下に減じても高速回転は  $Re_x \approx 2.7 \times 10^5$  まで持続し, この点で突然回転が停止した。この時の円柱模型先端部周速度に基づくレイノルズ数は,  $V_c D_0 / \nu_x \approx 3.8 \times 10^5$  である。この値は, 二次元円柱の臨界レイノルズ数に近い, また, ある場合には円柱模型は  $Re_x \approx 3.25 \times 10^5$  まで風速が下がったとき回転が停止する場合もあった。このように模型の高速回転が始まるレイノルズ数と停止するレイノルズ数の間には大きなヒステレシスが存在する (Hysteresis Region)。この現象は文献6と15でも指摘されている。この理由は次のように説明できる。一度高速回転モードに入ると, 一様流の風速  $V_x$  と円柱直径  $D_0$  に基づくレイノルズ数が臨界レイノルズ数以下でも, 回転軸から離れた円柱模型上のローカルな横断流速度  $V$  は, 一様流  $V_x$  と回転による周速度  $|x - x_0| \phi'$  が合成されてローカルなレイノルズ数が臨界レイノルズ数に達するため, 円柱模型の上の一部で横力が作用する。この結果, ヨーイングモーメントが模型に作用する。この高速回転の角速度  $\Omega$  は, 回転の方向にはあまり関係なく, 同じレイノルズ数に対して右と左の回転でほとんど同じ値を示す。コーニング実験でも同様の報告がされている<sup>4, 5)</sup>。高速の回転を行うとき, 円柱の側面の回りにはそれぞれ非対称な流れが形成されており, 逆方向の回転ではこの非対称性が下流側から見て入



れ替わるものと考えられる<sup>16)</sup>。

また、最初は一様流中で回転しないように模型を拘束しておき、臨界レイノルズ数以上になったF点(図5に示す)で模型を解き放つと、模型は高速の回転には移らず $\Omega \approx 0.1$ の低速の回転を行う(□)。この状態からレイノルズ数を減少させると、 $Re_x \approx 4.8 \times 10^5$ 付近で逆転し、 $Re_x \approx 4.4 \times 10^5$ 付近で突然高速のフラットスピンに入る(G)。無次元回転速度 $\Omega$ ( $\approx 1.0$ )は、 $Re_x = 3.2 \times 10^5$ 付近で最大値を取る。高速回転モードの $\Omega$ の値は左右の回転の方向に対してほぼ対称に変化する。迎角を $90^\circ$ に固定した円柱の自由回転の実験では、臨界レイノルズ数付近で必ずしも高速回転に入るとは限らない。たとえば、ある場合(●)には、レイノルズ数を超臨界レイノルズ数から下げて来ても、臨界レイノルズ数付近でも高速回転には移らなかった。以上の結果は、前回の実験(文献7, 8)で観測された、

(2) 今回の実験

これまでのデータを見ると、(1)高速回転に引き込まれるレイノルズ数がかなり不確定であること、(2)高速の回転速度が安定しないことがあり、これらは実験上の問題によるものなのか、フラットスピんに共通に見られる現象なのか明らかでなかった。これらの点について今回の実験で明かにしようと考えた。

著者等は、この不確定さは模型表面の汚れ、回転中に付着するほこり、模型表面のきずなどによるもので、これらが模型表面で粗さとしての役割をして、低いレイノルズ数の範囲から模型が回転を始めたり、逆転したりするのではないかと推測した。そこで、前回用いた模型とほぼ同じ $l = 1.046$  mの新しいアクリル製の模型を製作し、

表面を清潔に保ち静電気防止スプレーで実験中にほこりが付着しないように保って実験を行った。その結果、(1)前回に比べてフラットスピンは起こりにくくなった。また、(2)IとDに示す狭いレイノルズ数の領域で高速回転に入る傾向が目立った(□, ■)。(3)逆転して高速回転に入る現象や、高いレイノルズ数まで低速の回転が持続することはなくなった。また、(4)Jで高速回転が停止し、EJ間の回転は観測されなかった。このことは、模型表面のきずや汚れ、粉塵の付着を減らすと、この模型は $4.15 \times 10^5 < Re_x < 4.5 \times 10^5$ の狭い範囲で高速の回転に入ることを示す。この点については、今回は次の $l = 0.806$  mの円柱模型でさらに詳しく調べた。

5.1.2 長さ $l = 0.806$  mの円柱模型

(1) 前回の実験

図6は、 $l = 0.806$  mの円柱模型の一様流レイノルズ数 $Re_x$ と定常回転速度 $\Omega$ の関係を示す。この模型は、前回までの実験<sup>3, 7, 8)</sup>で通常は臨界レイノルズ数付近で高速回転を開始するが、AやA'のように $Re_x < (Re_{cr})_{2D}$ で開始する(□)場合や、また、ヒステレシス領域もDにまでおよぶ(■)場合があった。

(2) 今回の実験

今回の実験では、模型表面をきれいに磨き、静電気によるほこりがつかないように静電気防止スプレーを模型表面に塗布して繰り返し実験を行った。図6では図5のように必ずしも実験ごとに異なった記号を用いて実験結果の区別をしていない(○, ●で表わしている)。この実験で次の特徴が明らかになった。

(a) この風洞で測定された円柱の臨界レイノルズ数よりも大きい狭い範囲の $4.15 \times 10^5 < Re_x < 4.4 \times 10^5$ で

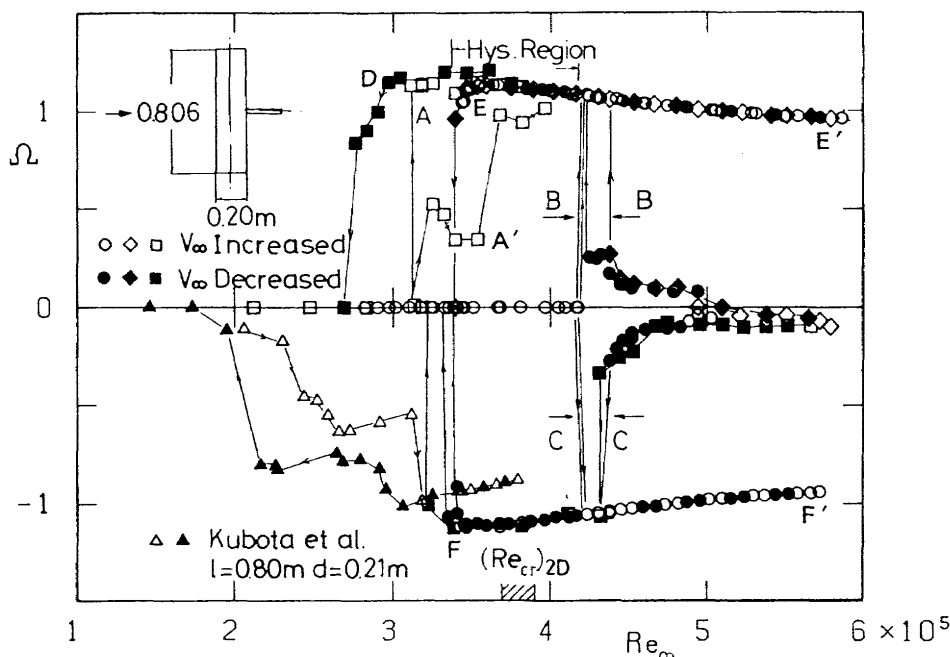


図6 円柱模型 ( $l = 0.806$  m) の一様流レイノルズ数 $Re_x$ と定常回転速度 $\Omega$

だけ円柱模型は  $\Omega \approx 1.0$  の高速回転に移った (BB または CC)。

(b) 臨界レイノルズ数よりも大きい範囲のレイノルズ数領域でも  $\Omega \approx 1.0$  の高速回転が持続した。

(c) 臨界レイノルズ数よりも大きい領域では高速の回転モードと低速回転モードがある。

(d) また、高速の無次元回転速度  $\Omega$  は、レイノルズ数  $Re_x$  が増加する時も、減少する時も図の FF', EE' に示すように横軸  $\Omega = 0$  の線にほとんど対称な変化を示した。

この実験から、模型表面のほごりによる汚れや、表面の傷はフラットスピンの高速回転モードが始まるレイノルズ数に敏感な影響を与えることが分かる。前回の一連の実験で観測された AA' や D など今回の実験と比較すると特異な例で、これはおそらく模型の表面に汚れが付着したりして十分滑らかでなかったためと思われる。

また、図 6 に、久保田等<sup>61</sup> が行った塩化ビニール製の円柱模型 ( $l = 0.800$  m,  $D_0 = 0.210$  m) の実験結果を  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  で示す。これらと今回の実験結果とを比較すると、今回の実験結果よりかなり低いレイノルズ数でフラットスピンの始まり、回転速度は 20% 程度小さい。これらの原因も、表面の粗さなど遷移を早める要因が作用したのではないかと推定される。また、それらの実験結果では、レイノルズ数の  $Re_{cr} < Re_x$  の領域での実験は行われていないが、今回の実験では、その領域では、高速と低速の両

方の回転モードがあることを明瞭に示している。

### 5.1.3 長さ $l = 0.606$ m の円柱模型

#### (1) 前回の実験

図 7 は、長さ  $l = 0.606$  m の円柱模型について測定したレイノルズ数  $Re_x$  と無次元角速度  $\Omega$  の関係を示す。

臨界レイノルズ数付近の測定については、ここでもいくつかのシンボルを用いて実験の違いを区別している ( $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\square$ ,  $\blacksquare$ )。この  $l = 0.606$  m の円柱模型は、これまでの二つの円柱模型とほぼ同様の変化を示す。すなわち、 $4.0 \times 10^5 < Re_x$  で高速回転に入る領域がある。また、一度高速回転が起きると高速回転は  $Re_x$  に対してヒステリシスがあり、低いレイノルズ数まで風速を下げるとフラットスピンの止まる (Hys. Region)。

しかしこの模型では、あらかじめ模型を回転しないように拘束しておき、風速を増加して超臨界レイノルズ数領域に達したときに模型を自由に回転できるように解き放つと、低速回転のあと模型は回転を停止することもあるが、ほとんどの場合図中の M で示すように、ある一定の時間を経過すると、高速回転のフラットスピンに入る。この図から、模型の細長比 ( $l/D_0$ ) が小さくなると、レイノルズ数が  $Re_x > Re_{cr}$  ではほとんどの場合高速回転モードへ移り、長い模型 ( $l = 0.806$  m と  $l = 1.046$  m) のように臨界レイノルズ数付近の狭い範囲で高速回転に入るといふ制限はなくなる。例外的に  $Re_x > Re_{cr,2}$  の領域で  $l =$

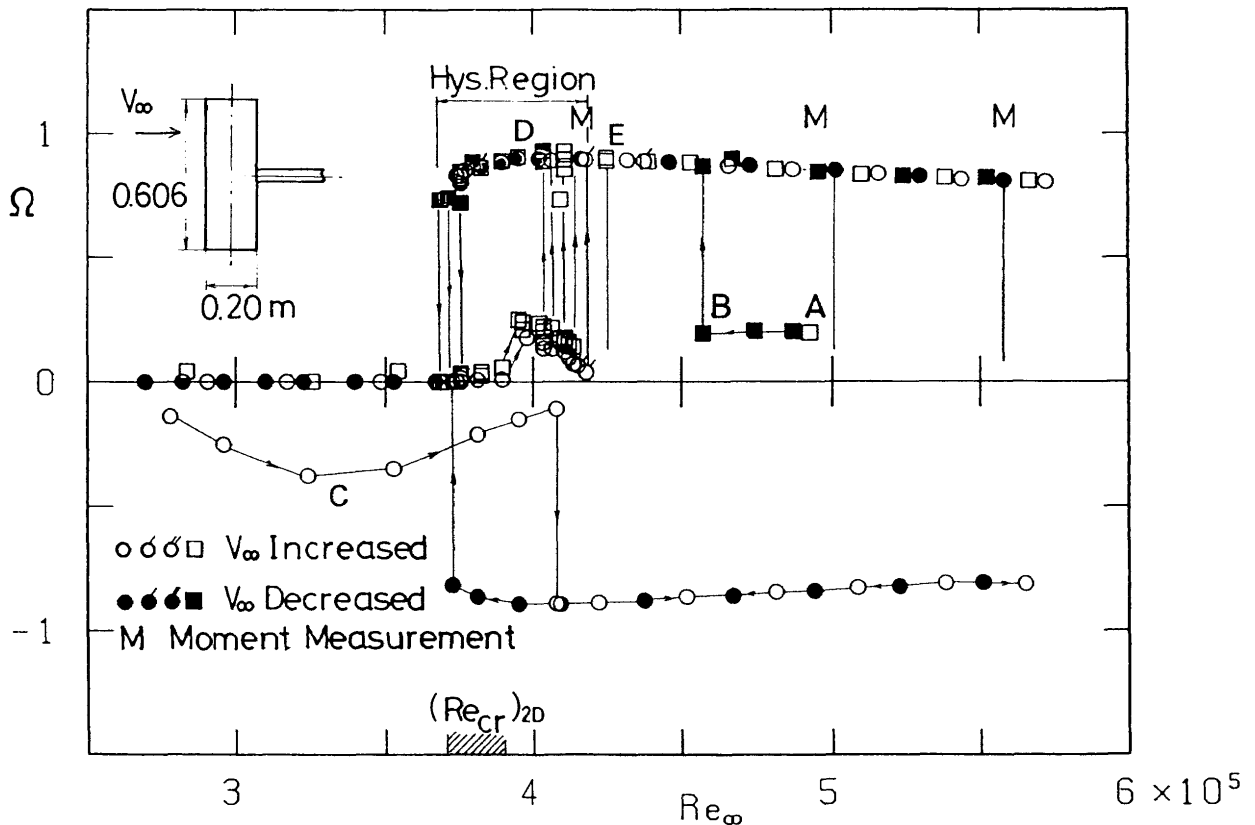


図7 円柱模型 ( $l = 0.606$  m) の一様流レイノルズ数  $Re_\infty$  と定常回転速度  $\Omega$

0.606 m の模型が他の長い円柱模型と同じように、低速回転モードで回転しているときでも (A)、一様流のレイノルズ数が  $Re_{cr}$  付近まで減少すると高速回転モードに入る (B)。レイノルズ数が  $Re_{cr} < Re_{\infty}$  の領域では、この模型の場合も高速の定常回転速度  $\Omega$  は横軸 ( $\Omega = 0$ ) に対して対称になっている。A, B を結ぶ付近には回転のモーメントがほとんど 0 となる領域がある。たとえば、模型の回転を止めておいて  $Re_{\infty} = 5 \times 10^5$  付近で模型を解放すると、模型は回転を開始する。模型が回転を始め、加速されて高速回転に至る過程の角加速度の変化からモーメントの変化を調べると、モーメントは回転し始めると一度は大きくなるが A 付近では小さくなりその後再び加速されて、高速回転に到達する<sup>8)</sup>。

(2) 今回の実験

今回模型の表面にごみが付着しないように注意して、 $Re_{\infty} < 4.3 \times 10^5$  で高速回転へ入る領域での不確定さについて数回繰り返し実験した (○, ●)。D, E で示されるように高速回転に入る領域は狭く限られることが分かった。また、図中 C に示すように  $2.8 \times 10^5 < Re_{\infty} < 4 \times 10^5$  の範囲で低速回転を行う現象は、今回の一連の実験に観測された特異な例である。この現象は、 $l = 1.046$  m の図 5 でも見られるので、何らかの意味のあるものと思われる。

5.2 円柱模型の細長比に対する最大の回転速度

フラットスピンの原動力となる横力は、二次元円柱に作用する揚力ではないかと、この報告の最初に推定した。実際の落下物体を模擬している模型は有限の長さの円柱であるから、当然その影響が実験値にも現れるものと考えられる。そこで、図 8 に、円柱模型の細長比 ( $l/D_0$ ) に対する最大の回転速度  $\Omega_{max}$  を示す。 $l/D_0 = 3.03$  のとき  $\Omega_{max} \doteq 0.9$  であり、 $l/D_0$  の増加とともに  $\Omega_{max}$  は増え、 $l/D_0 = 4.03$  のとき  $\Omega_{max} \doteq 1.25$  の値を示す。しかし、 $l/D_0 > 4.03$  では変化の割合は減少して、 $l/D_0 = 5.17$  のとき  $\Omega_{max}$  は 1.3 となり、有限の長さの影響は小さくなってい

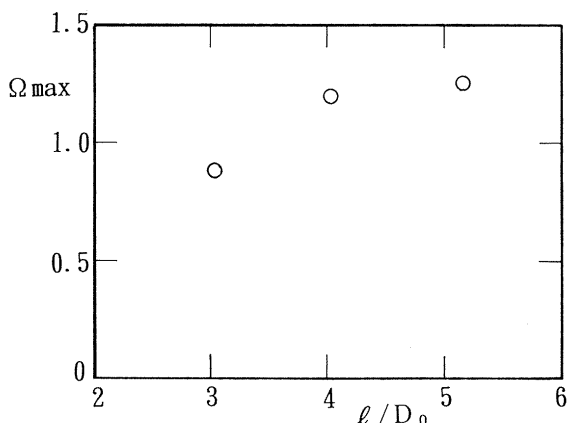
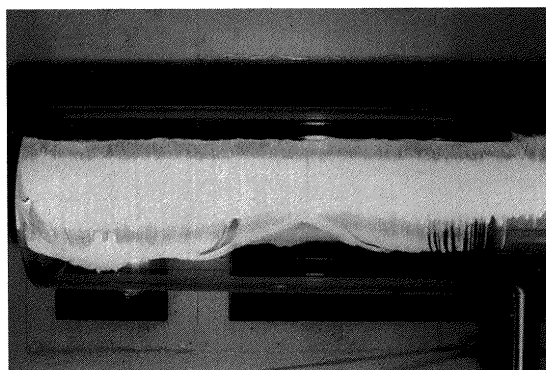


図 8 円柱模型の細長比  $l/D_0$  と最大回転速度  $\Omega_{max}$

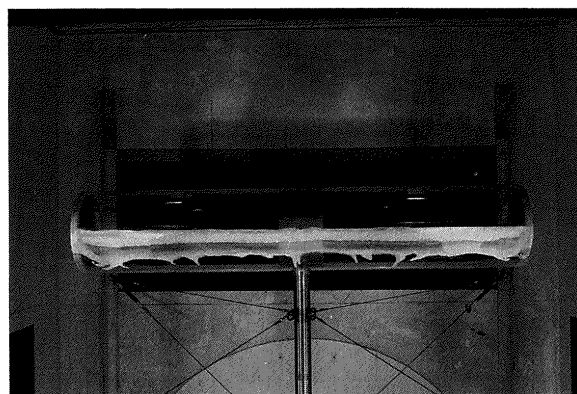
る。

5.3 円柱模型上の乱流くさび

前回に行った円柱模型を用いた臨界レイノルズ数付近のフラットスピンの実験から、フラットスピンにもいくつかの回転の傾向があることが分かった。模型が非常に低い回転速度を持続する場合や、制止したまま回転しない場合がある。また、時には静止の状態から突然高速回転に移る。これは突然に模型に不均衡な力が作用することにより、回転が開始すると思われる。この奇妙な突発的な回転の開始の現象を解明するために、 $l = 1.046$  m の円柱模型を水平に固定した状態で、模型表面のオイルフローによる流れの可視化実験を行った。臨界レイノルズ数付近で、時々図 9 (a) に示すような乱流くさびが現れ、持続する場合もあるが消えてしまうこともある。さらに、模型表面のわずかな汚れを除去しないで可視化実験を行うと乱流くさびが現れた。このことは、スピンを起こす不均衡な力は模型上のわずかな凹凸や汚れやごみの付着などが原因で発生すると考えられる。しかし、このことは実験上の不整備とだけで片付けられない理由がある。実際のロケット胴体などは、アクリル製のように表面が滑らかではなく、リベットなどの凹凸によってむしろ乱流くさびが現れ、横力が作用し易いものと考えられる。



(a) 乱流くさびが現れている



(b) 乱流くさびは生じていない

図 9 円柱模型 ( $l = 1.046$  m) 表面の流れの可視化

今回、模型表面を特に注意して清潔にし、静電気防止剤を塗布し実験中の静電気の発生によるごみの付着を防止したところ、まず前回の実験に比べて全般にフラットスピンの起こりにくくなった。この場合には、図9 (b) に示すように乱流くさびが生じにくい。これは一つは理想条件を作って実験したことによる。

#### 5.4 円柱模型の定常回転速度 $\Omega$ ( $Re_x$ ) のまとめ

図5～図7の測定値で気付くことは、有限円柱の場合には臨界レイノルズ数の範囲を二次元円柱の値よりも大きく取る (たとえば、 $4.2 \times 10^5 < Re_x < 4.5 \times 10^5$ ) と、実験値と推定値の高速回転開始のレイノルズ数のずれが小さくなるように考えられる。この風洞の臨界レイノルズ数の測定<sup>11)</sup>がアルミニウム製の円柱によって行なわれており、今回の円柱のフラットスピンの実験がそれよりも平滑なアクリル円柱模型で行なわれていることから、このような臨界レイノルズ数を取ることは合理的である。このように考えると、図5～図7までの模型表面に汚れやごみの付着しないように注意して実験を行った結果に特に注目すると、図10のような模式的なレイノルズ数  $Re_x$  と定常回転速度  $\Omega$  の単純な関係が得られる。

#### 5.5 円柱模型の回転速度の準二次元解析法による推定

著者等は、臨界レイノルズ数付近で円柱に作用する揚力が、円柱や円錐円柱のフラットスピンの原因と考えた<sup>15)</sup>。次に、著者等の行ったフラットスピンの回転数の推定法を示す。

##### 5.5.1 フラットスピンの推定法

軸対称物体の定常回転速度を推定するために、円柱の断面を小さな円柱要素に分け、それぞれの円柱要素に作用する空気力を積分する準二次元 (Q-2-D) の解析方法に基づいたいくつかの近似理論がある。フラットスピンの回転速度は、臨界レイノルズ数付近では、円柱要素に作用する局所的な揚力係数  $c_l$ 、抗力係数  $c_d$  と、動圧 ( $\rho_x V_x^2/2$ ) を用いて積分し計算することができる<sup>7)</sup>。この方法に基づいて、吉永等<sup>15)</sup>は、久保田等<sup>6)</sup>が行った風洞実験で観察された臨界レイノルズ数  $Re_{cr}$  付近のフラット

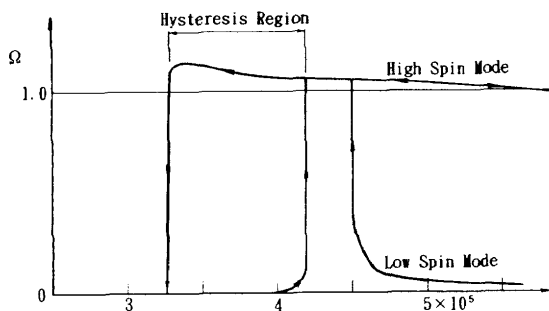


図10 一様流レイノルズ数  $Re_x$  と円柱模型の回転速度  $\Omega$  の関係の模式図

スピンの回転速度を概算して比較し、最大角速度については概ね良好な一致が見られた。また、高速回転のヒステリシス現象の存在も予測できた。

久保田等<sup>6)</sup>は、円錐円柱模型の定常回転速度を概算するのに、静的な抗力と、静的な揚力が模型全体に作用するとして、準二次元解析法に基づいて計算している。

Ericsson<sup>17), 18)</sup>は、円柱のフラットスピンの回転速度を推定するのに、Moving wall という考え方をフラットスピンの導入し、文献15と同様に準二次元の計算式を用いている。この計算では、臨界レイノルズ数付近での Moving wall 効果を基礎として、有限の円柱の各部分要素の全部について  $c_d$  や  $c_l$  の値が一定であるとしている。推算方法は簡便であるが、推算結果は今回の実験結果と比較すると、臨界レイノルズ数の広い範囲で、吉永等の方法<sup>15)</sup>よりもよく一致している。

##### 5.5.2 準二次元解析法

今回の実験結果と、準二次元解析法<sup>15)</sup>による推定値を比較するために、この解析法の概要を述べる。この準二次元解析法は、軸対称物体が大迎角を取るときクロスフローが大きくなり<sup>19)</sup>、このレイノルズ数領域で、流れに垂直な二次元円柱に作用する大きな揚力 ( $c_l \sim 1.0$ ) が物体要素円柱にも作用するという仮定に基づいている。

図11に、全長  $l$  の軸対称の細長物体が、迎角  $90^\circ$  に置かれ、そのとき、物体の要素円柱に揚力と抗力が作用している様子を示す。ここで、物体はその重心  $x_g$  の回りを角速度  $\phi'$  で回転しているとする。模型先端から  $x$  離れた場所の要素円柱は周速度  $\phi' |x - x_g|$  を持ち、この点での流れの合成速度  $V$  は、一様流  $V_\infty$  と  $\phi' |x - x_g|$  のベクトルの和で表される。抗力は  $V$  の方向に、揚力は  $V$  と直角方向にそれぞれ作用する。この要素円柱に作用するヨーイングモーメント  $dn$  は、揚力係数  $c_l$ 、抗力係数  $c_d$  を用いて次のように表される、

$$dn = 1/2 \rho_x V^2 D(x) |x - x_g| (c_l \cos \gamma - c_d \sin \gamma) dx \quad (1)$$

ここで、 $c_l$  と  $c_d$  は軸対称物体が  $V$  の速度で回転しているときの、局所揚力係数と抗力係数である。 $\rho_x$  は空気密度、 $D(x)$  は物体の直径である。 $\gamma$  は次式で定義される。

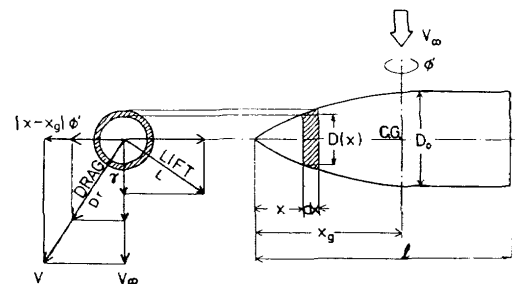


図11 準二次元推定法による軸対称物体の要素円柱に作用する空気力

$$\gamma = \tan^{-1} |x - x_g| \phi' / V_x \quad (2)$$

(1)式を、物体全体にわたって0からlまで積分すると全体のヨーイングモーメントnが求まる。ここでそれぞれを次式を用いて無次元化する。

$$C_n = n / (1/2 \rho_x V_x^2 S l), \quad \bar{D}(x) = D(x) / l, \quad \bar{x} = x / l, \quad \dot{\phi} = \phi' / V_x \quad (3)$$

$S = (\pi/4) D_0^2$ は代表面積、 $D_0$ は最大直径、 $l$ は模型全長である。

ヨーイングモーメント係数 $C_n$ は

$$C_n = (4/\pi) (l/D_0)^2 \int_0^1 \bar{D}(\bar{x}) |\bar{x} - \bar{x}_g| (1 + \dot{\phi}^2 |\bar{x} - \bar{x}_g|^2)^{0.5} \times c_d (c_l/c_d - \dot{\phi} |\bar{x} - \bar{x}_g|) d\bar{x} \quad (4)$$

この計算では、軸対称物体が回転する場合には、回転軸の両側の要素円柱に、回転軸の回りに同じ方向の回転モーメントが生じるようにバブルが生じ揚力が作用すると考える。この物体のそれぞれの要素円柱に、二次元円柱の $c_l$ と $c_d$ の値をその場所でのレイノルズ数の関数として適用し、上の式を一方の端から他端まで数値的に積分する。先に述べた二つの臨界レイノルズ数 $Re_{c_l}$ と $Re_{c_d}$ の間で揚力が発生するという事実は、臨界レイノルズ数付近でのフラットスピンのモーメント係数を算出する鍵になる。今回の計算では、臨界レイノルズ数付近の $Re_{c_l}$ と $Re_{c_d}$ に対する $c_l$ ,  $c_d$ の値として、神谷等<sup>11)</sup>の実験結果に基づいて図2に示す実線の値を単純化して破線で示す値を用いた。実際にはヒステレシスがあるがここでは無視している。文献11の値を得る実験には、われわれがフラットスピンの実験を行った同じ突風風洞が用いられた。単純化した値を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{亜臨界領域 } Re_x < Re_{c_l}, c_l = 0, c_d = 1 \\ \text{臨界領域 } Re_{c_l} < Re_x < Re_{c_d}, c_l = 1, c_d = 0.4 \\ \text{超臨界領域 } Re_{c_d} < Re_x, c_l = 0, c_d = 0.2 \end{aligned}$$

ここで

$$Re_{c_l} = 3.7 \times 10^5, Re_{c_d} = 3.9 \times 10^5$$

とする。

揚力による全回転モーメントが、抗力による制動モーメントと等しくなるところで物体は定常回転を続ける。与えられた一様流速のなかで、この定常回転角速度を計算するためには、 $C_n = 0$ のときの $\phi'$ の値を見つける必要がある。このため、任意の $\phi$ の値を(4)式に代入して $C_n = 0$ となる $\phi'$ を求める。一様流のレイノルズ数 $Re_x$ を変えて計算した定常の角速度 $\phi'(Re_x)$ を実験結果と比較した。

### 5.5.3 実験値との比較

図12 (a)~(c)に、前述の図5~図7に示した円柱模

型実験による定常回転速度と、準二次元解析法によって推定した回転速度との比較を示す。臨界レイノルズ数領域( $Re_{c_l} < Re_x < Re_{c_d}$ )で $c_l = 1.0$ 、それ以外では $c_l = 0$ と仮定した計算結果を実線で示す。臨界レイノルズ数領域とヒステレシス領域では、実験から得られた高速の定常回転速度と、推定値とはオーダーは一致している。しかしながら、推定値では臨界レイノルズ数領域の上限で回転が停止している。その理由は、臨界レイノルズ数領域を越えると模型に作用する揚力は小さくなるため0として計算しているからである。実験では、これに反して臨界レイノルズ数を越える領域でも、高速の回転が持続している。この領域では、(4)式に示すように回転速度は $c_d \approx 0.2$ のように小さくなると、 $c_l$ の大きさよりもむしろ $c_l/c_d$ に依存する。したがって、二次元円柱の $Re_x < Re_{c_d}$ の領域でも観測されているように<sup>11)</sup>、 $c_l = 0$ としないで $c_l$ の小さい値を計算に入れて回転速度を概算する。この計算方法によると、破線で示されるように、臨界レイノルズ数付近で計算値は実験値に近づく。しかし、超臨界レイノルズ数領域で模型は低速回転を持続するが、実験で観測される高速回転を行う可能性は出てこない。 $3.2 \times 10^5 < Re_x < 3.7 \times 10^5$ の範囲で“UNSTABLE”と示した曲線は、不安定な回転数を示す( $n = 0, dn/d\Omega > 0$ )。すなわち、この線は低速側と高速側へ移行する分岐線であって、何らかの方法でこの角速度を超える角速度にまで回転数を上げることができると、ここからは加速されて定常な高速回転に至ることを表している。したがって、図12 (b)に示すような“UNSTABLE”の曲線付近にシンボル□の点が点在する(そこが安定である)可能性はないにもかかわらず、現実には点在している。これは、フラットスピンのメカニズムの複雑さを示している。

図12 (a)~(c)に示すように、準二次元解析法による $Re_x$ と $\Omega$ の関係は、円柱の長さには依存せず、どの模型でも同一曲線となる。

### 5.6 超臨界レイノルズ数領域でのフラットスピンの原因

以上のことから、臨界レイノルズ数付近( $Re_x \sim Re_{c_d}$ )での高速回転は、二次元円柱の境界層がその領域で非対称に剥離し揚力が作用するという結果を用いた準二次元推定法で推算できる。しかし、臨界レイノルズ数よりも大きいレイノルズ数の領域(超臨界領域 $Re_x > Re_{c_d}$ )で高速回転が持続する現象に関しては、他の流れの機構を考える必要がある、たとえば、Moving wall効果<sup>17)</sup>によるEricssonの推定法はレイノルズ数の広い範囲にわたって高速回転の値を導いている。

Ericsson<sup>16, 17)</sup>は、Moving wall効果の考え方を有限長さの円柱模型の定常のフラットスピンを推定する方程式に導入し、定常回転速度 $\Omega$ は $0.95 < \Omega < 1.3$ の間に存在す

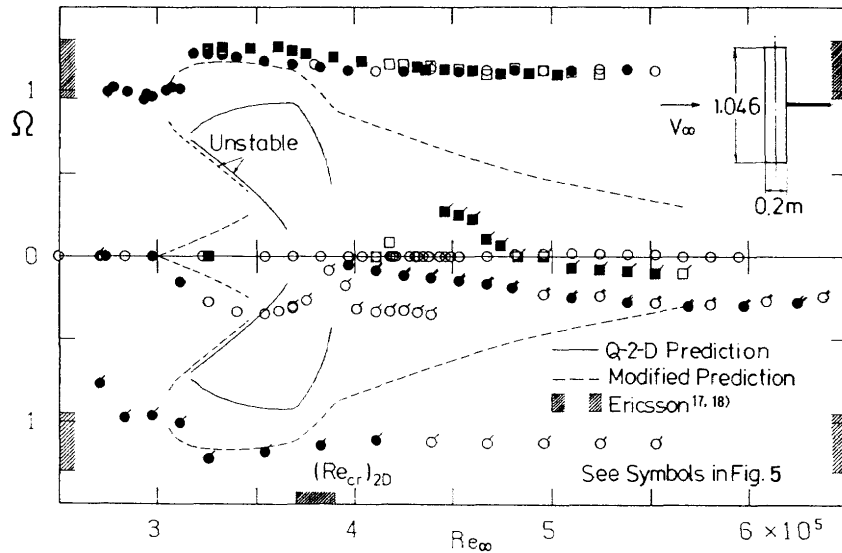


図 12 (a) 円柱模型 ( $l = 1.046$  m) の実験値と推定値との比較 (シンボルは図5と同じ)

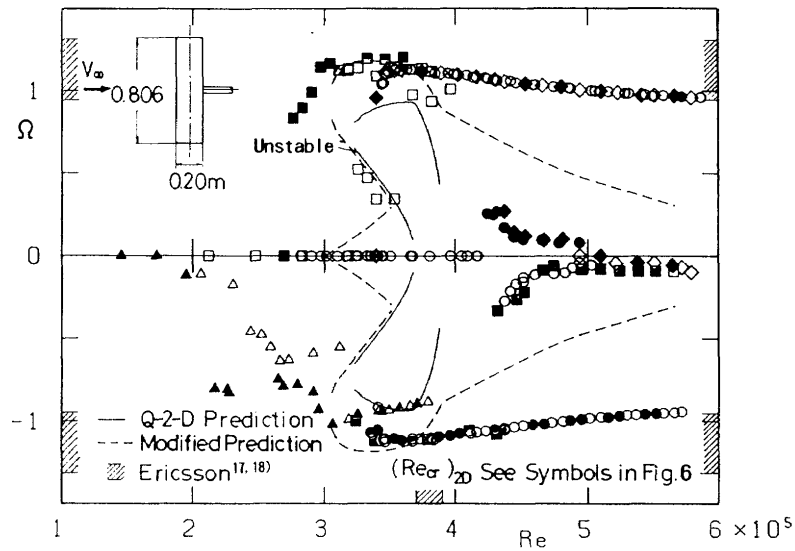


図 12 (b) 円柱模型 ( $l = 0.806$  m) の実験値と推定値との比較 (シンボルは図6と同じ)

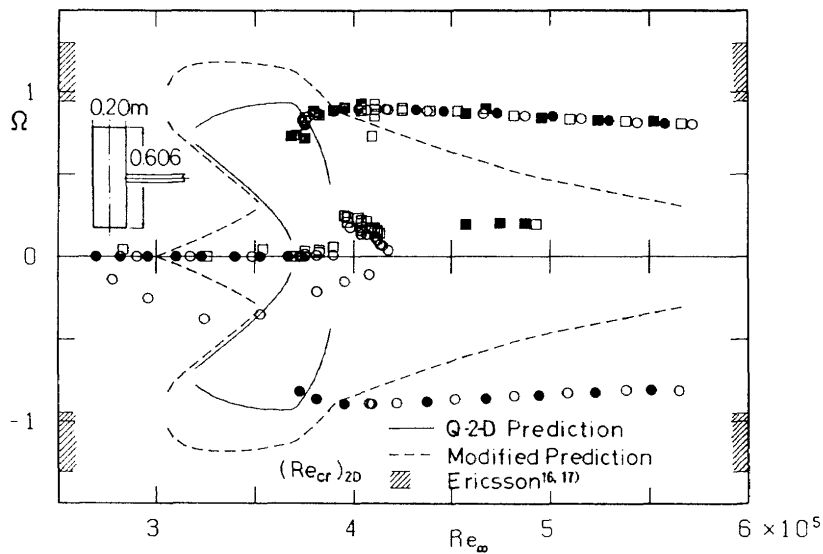


図 12 (c) 円柱模型 ( $l = 0.606$  m) の実験値と推定値との比較 (シンボルは図7と同じ)

ることを示した。この不等式はレイノルズ数に関係なく、無次元回転速度は1のオーダーであること、あるいは表現を変えると、模型の周速度  $V_c$  は  $V_c \cong V_\infty$  のオーダーで  $Re_x$  に比例することを示している。この領域は図12 (a)~(c) 内に縦軸に斜線で示されており、実験結果とよく一致している。この式が示す  $\Omega$  の領域は、二次元円柱の臨界レイノルズ数  $Re_{cr}$  よりも広い範囲であるが、流れに垂直な面内で回転する円柱に Moving wall 効果を適用する考え方は、著者等には十分には理解できない。その理由は、円柱模型の機体軸が流れに対して  $\alpha$  傾いている場合、流れに平行な軸の周りに  $\omega$  で回転している模型は、横断流成分  $V_\infty \sin \alpha$  に対して、 $\omega \cos \alpha$  の角速度を持つ。ところが、フラットスピンのように  $\alpha = \pi/2$  のとき  $\omega \cos \alpha = 0$  となり、横断流に対してマグナス効果を生じさせる回転速度が生じないからである。

この現象を理解するには、この他に、有限長さの模型の影響、すなわち三次元流れ場と物体の運動との関連などで説明付ける研究が必要である。

### 5.7 円錐円柱模型

回収を目的とするロケット頭胴部は鈍頭円錐円柱形状をしている。この形状の落下中のフラットスピンを調べるため、図3(4), (5)の円錐円柱模型の実験を行った。

図13 (a) に、 $l = 1.095$  mの鈍頭円錐円柱模型と、鈍頭円錐の先端付近の球面頭部を平面に切った円錐円柱模型の、一様流レイノルズ数  $Re_x$  と定常回転速度  $\Omega$  の関係を示す。これらの模型に見られる一般的な特性は、(1)臨界レイノルズ数付近で高速の回転が起きること、(2)  $Re_x > Re_{cr}$  の領域 (この場合は  $Re_x > 4.3 \times 10^5$ ) では高速と低速の回転モードが存在すること、など円柱模型の場合に類似している。これら二つの円錐円柱模型の一様流レイ

ノルズ数  $Re_x$  に対する定常高速回転速度  $\Omega$  の変化は類似しているけれども、定常回転速度  $\Omega$  が小さいときには  $\Omega$  に対する  $C_n$  の変化は一様ではない<sup>8)</sup>。図13 (a) に示すヒステリシスの現れる領域 (Hys. Region,  $Re_x < Re_{cr}$ ) は円柱模型に比べて狭い。臨界レイノルズ数付近で、高速回転へ移行する入口は  $3.8 \times 10^5 < Re_x < 4.8 \times 10^5$  に限られている。この図には、久保田等<sup>6)</sup>による鈍頭の円錐円柱 ( $l = 0.800$  m,  $D_0 = 0.210$  m) の実験結果 ( $\Delta$ ) も示す。臨界レイノルズ数  $Re_{cr}$  付近で、高速のフラットスピンに入る結果は今回の実験結果と類似しているが、久保田等の実験において、レイノルズ数が増大すると回転速度が減少しはじめ低速モードに移る変化は、今回の高速回転を維持する結果とは異なる。今回の実験では、このようにレイノルズ数の増加とともに定常回転速度が急に減少する場合は観測されなかった。模型の形状の違いによるものと考えられる。

この模型はアルミニウム合金で作られているため、表面はアクリル製の円柱模型よりも粗い。模型表面の粗さの改善はできないので、今回は再実験を行っていない。円柱模型よりも低いレイノルズ数でフラットスピが始まるのは、表面の粗さが原因と考えられる。

#### 5.7.1 円錐円柱模型と準二次元解析法との比較

図13 (b) は、図13 (a) に示した定常回転速度の実験結果と、準二次元推定法で計算した推定値とを比較したものである。ここでは、(1)  $Re_{cr}$  領域では  $c_l = 1.2$ 、領域外では  $c_l = 0$  と仮定して計算を行う場合 (Q-2-D) と、(2)  $Re_{cr}$  以外の領域でも揚力が少し作用するという二次元円柱の実験結果を取り入れて計算した場合 (Modified) の二通りの方法による推定値を示す。 $Re_{cr}$  の付近では、最大の回転速度は、計算からの推定値と実験値とはおおよそ一致している。推定に用いた準二次元解析法によれば、円錐

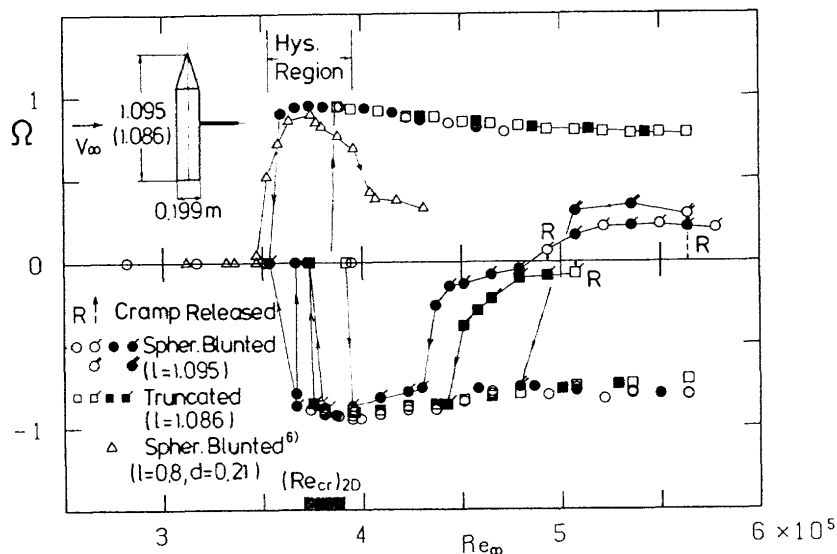


図13 (a) 円錐円柱模型 ( $l = 1.095$  m) の一様流レイノルズ数  $Re_x$  と定常回転速度  $\Omega$

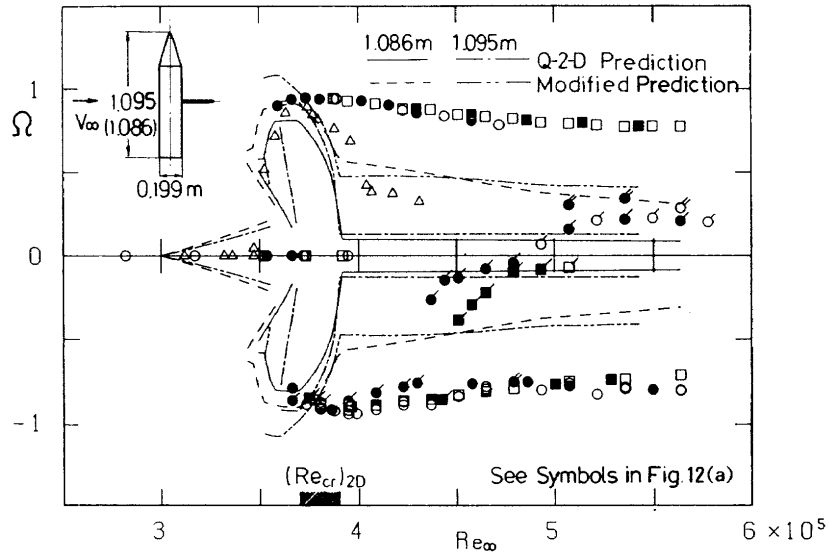


図 13 (b) 円錐円柱模型 ( $l = 1.095 \text{ m}$ ) の実験値と推定値との比較 (シンボルは図 13 (a) と同じ)

部分の機体軸に垂直な断面の直径は機体軸方向に線形に変化しているから、 $Re_{cr} < Re_x$  領域でも模型の円錐部分のどこかが必ず臨界レイノルズ数の領域になっているはずである。その結果として、小さい揚力（横力）が円錐部分に作用し、そのモーメントによって低速回転が持続される。超臨界レイノルズ数  $Re_{sc}$  の領域では、Modified 準二次元解析法で推定した値は、準二次元解析法による推定値よりも高速の回転速度になっている。しかし、この場合も  $Re_x > Re_{cr}$  の領域で  $\Omega \approx 1.0$  の高速回転が持続する理由の説明はできない。大迎角におけるオジャイブ模型の実験<sup>20)</sup>、 $90^\circ$  に置かれた鋭い先端頂角の円錐円柱模型の実験<sup>21)</sup> では、模型頭部の流れ場は、準二次元解析法で仮定しているように単純ではない。鋭い円錐部分において揚力の作用する領域がレイノルズ数の増加に対して円錐部分の先端部分に向かって線形に移動するのではなく、階段状に移動している<sup>21)</sup>。

### 5.8 両頭円錐円柱模型

円錐円柱模型の円錐部分がフラットスピンの与える影響を調べるため、回転軸に対称な両頭円錐円柱模型（図 3 (6)） ( $l = 1.213 \text{ m}$ ,  $D_0 = 0.199 \text{ m}$ ) を用いてレイノルズ数  $Re_x$  に対する定常回転速度  $\Omega$  を調べる実験を行った。この形状は、落下するロケット先端部だけではなく燃料タンク形状の物体の角運動を予測するためにも役立つ。

図 14 は、この両頭円錐円柱模型のレイノルズ数  $Re_x$  に対する定常回転速度  $\Omega$  の関係を示す。図 14 (a) に見られるように、他の模型と異なり正と負の回転方向によって回転速度の変化が異なり、 $Re_x$  軸に対して非対称で、また非定常な変化を示した。この模型の円錐部の小さな非対称性や凹凸の影響を調べるため、模型の両側の円錐部分

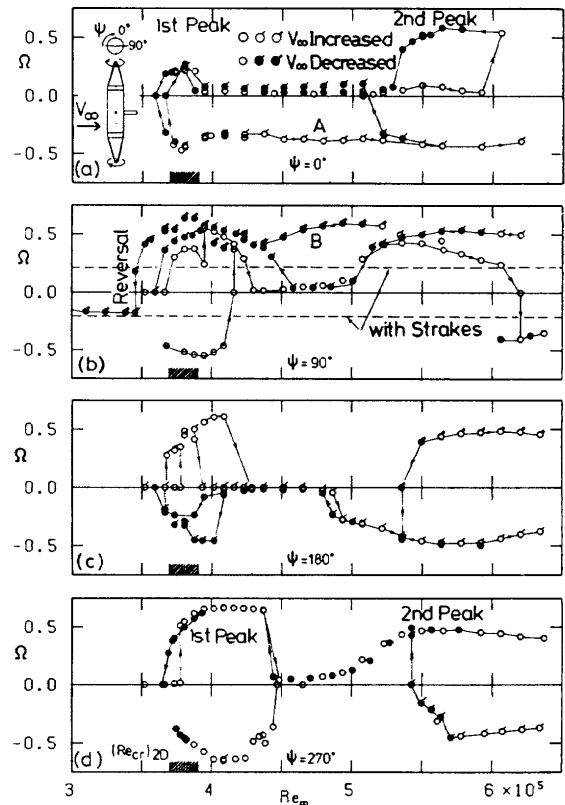


図 14 円錐部ロール角を変えた場合の両頭円錐円柱模型 ( $l = 1.213 \text{ m}$ ) の一様流のレイノルズ数と定常回転速度  $\Omega$

を同じ方向に方位角  $\psi$  を  $90^\circ$  ずつ回転させて実験を行った。その結果を図 14 (b), (c), (d) に示す。レイノルズ数を増加（白抜きシンボル）あるいは減少（黒塗りシンボル）させる実験を、同じ模型について繰り返して行った結果、レイノルズ数を変化させるごとに同じレイノルズ数でも回転速度  $\Omega$  は異った値を示した。両頭円錐円柱



模型は、円錐部の方位角 $\Psi$ にかなり敏感である。この模型の場合は、円錐部分の先端付近の凹凸などによる小さな不規則性と、両側の円錐円柱部分の干渉がこのような非対称の回転現象を引き起こしているものと推定される。

いくつかの例外はあるが、図14から全般的に次に示す特性が認められる。(1)どの先端の方位角 $\Psi$ の場合にも、回転速度の最大値 ( $\Omega = 0.5 \sim 0.7$ ) はレイノルズ数が  $3.7 \times 10^5 < Re_{\infty} < 4.4 \times 10^5$  の範囲に見られ、ここに第1のピークが存在する。図5から図12に見られるように、円柱も円錐円柱模型も、このレイノルズ数の領域で高速回転を開始している。(2)図14でレイノルズ数がさらに増すと、定常回転速度 $\Omega$ は、 $4.4 \times 10^5 < Re_{\infty} < 5.0 \times 10^5$  の範囲で急激に減速する。(3)さらにレイノルズ数を増すと再び回転速度が増加し第2のピークができる。このようなモードの外に、図14 (a) のAと図14 (b) のBのように模型が $\Omega = 0.3 \sim 0.5$  の高速回転を行うモードが存在する。このような現象は、レイノルズ数が  $4.4 \times 10^5 < Re_{\infty} < 5.5 \times 10^5$  の範囲で起きている。文献6での実験で、円錐円柱模型は一様流が臨界レイノルズ数を越えると回転速度が減少する(図13 (a))という事実と、この両頭円錐円柱模型が、臨界レイノルズ数 $Re_{cr}$ を越えると回転速度が減少するという共通の現象であり、模型の円錐円柱部分が影響しているものと考えられる。

図13に示す円錐円柱の模型の実験と、図14の両頭円錐円柱の実験、および、図7の短い円柱の実験に共通に見られるヒステレシス領域が狭いという事実は、円柱部分が短いことの影響を受けていると思われる。

### 5.9 ストレークの効果

落下する細長物体が高速のフラットスピンをを行うと、本体や搭載物の破損が起きるなどの不具合が生じる可能

性がある。また一方、全くフラットスピんが起きないと、不規則な落下運動となり落下方向が定めにくくなる。フラットスピンを抑制するため、細長物体の頭部の側面にトリッピングワイヤを模型軸と平行に並べて取り付けたり<sup>22, 23)</sup>、頭部の表面にアンテナを取り付け<sup>24)</sup>て、横力を減少させ高速のフラットスピンを阻止できる可能性が報告されている。久保田等<sup>6)</sup>は、トリッピングワイヤを円錐円柱の円周方向に取り付けることにより、層流境界層を乱流境界層に変化させ、回転速度を抑制できることを示した。

今回の実験では、断面が丸いワイヤのかわりに、アクリル製の細い三角柱のストレーク(高さ2mm)を模型の円柱部分に取り付けて、高速のフラットスピンを抑制する実験を行った。細い三角柱ストレークは、模型の円柱部に $30^\circ$ 間隔で円柱の機体軸に平行に接着されている。円柱模型に、三角柱ストレークを取り付けた様子を図15に示す。

図16に、長さ $l = 0.606\text{ m}$ と $1.046\text{ m}$ の円柱と、両頭円錐円柱の三つの模型に、三角柱ストレークを接着した場

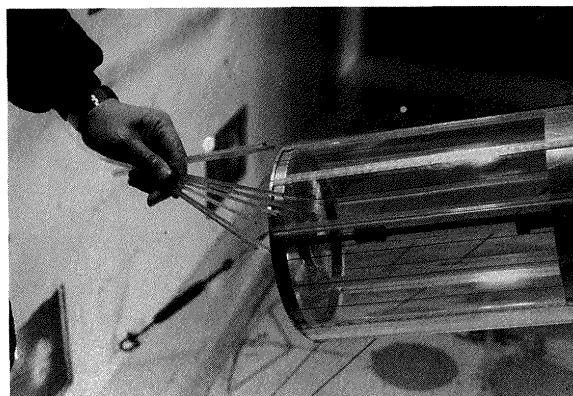


図15 円柱模型に取り付けた三角柱ストレーク

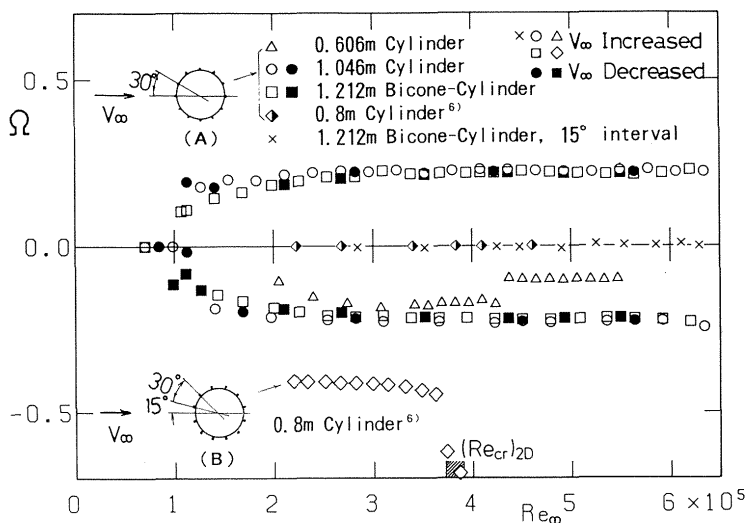


図16 三角形ストレークを取り付けた場合の一様流レイノルズ数 $Re_{\infty}$ と定常回転速度 $\Omega$

合の臨界レイノルズ数  $Re_x$  と角速度  $\Omega$  の関係を示す。三角柱ストレークは、図中 (A) に示すように  $30^\circ$  間隔で接着されている。最も短い  $l = 0.606$  m の円柱模型 ( $\Delta$ 印) は、 $Re_x > 2.0 \times 10^5$  で回転し始め、 $2.5 \times 10^5 < Re_x < 4.2 \times 10^5$  で  $\Omega \approx 0.17$  の低速で回転を行う。 $Re_x \approx 4.3 \times 10^5$  で突然に  $\Omega \approx 0.1$  に減少する。 $Re_x \approx 5.5 \times 10^5$  まで  $\Omega \approx 0.1$  の低速回転が持続し、三角柱ストレークのない場合の約 11% に回転速度が減少している。最も長い  $l = 1.046$  m の円柱模型 ( $\circ$ ,  $\bullet$ 印) と、円柱部分にだけ三角柱ストレークを取り付けた両頭円錐円柱模型 ( $\blacksquare$ ,  $\square$ 印) は、 $Re_x \approx 10^5$  付近で回転し始め、 $2.0 \times 10^5 < Re_x < 6.5 \times 10^5$  の範囲で、正と負の回転方向に対して対称にほぼ  $\Omega \approx 0.2$  の回転 (一様流速度に比例した角速度の回転) を行う。両頭円錐円柱模型の円柱部に三角柱ストレークを  $15^\circ$  間隔で接着して実験を行うと、模型の回転は停止した ( $\times$ 印)。

図 14 (b) に、両頭円錐円柱模型に三角柱ストレークを  $30^\circ$  間隔に取り付けた場合の無次元回転速度を比較のため破線で示す。実験を行ったレイノルズ数の範囲では、三角柱ストレークが円柱周囲の流れ場の剥離点を規制する効果が大きいことを示している。

図 16 には、 $l = 0.8$  m,  $D_0 = 0.21$  m の円柱模型の表面に、直径 1.5 mm のトリッピングワイヤを  $30^\circ$  間隔で取り付けて行った実験<sup>6)</sup> の、レイノルズ数  $Re_x$  と定常回転速度  $\Omega$  の関係を  $\blacklozenge$  印で示す (トリッピングワイヤ取り付け位置は今回の実験と同様の図中 A)。図から明らかなように、 $2.2 \times 10^5 < Re_x < 4.5 \times 10^5$  の範囲ではこの模型はほとんど回転しない。しかし、同じトリッピングワイヤを図中 B の位置に取り付けた場合には、 $\diamond$  印で示されるように、この模型は、 $2.0 \times 10^5 < Re_x < 3.6 \times 10^5$  の範囲では  $\Omega \approx 0.4$  の回転を行うが、臨界レイノルズ数付近で突然高速回転へ移っている。回転速度の低減効果は、トリッピングワイヤの取り付け位置に大きく依存することを文献 6 は示している。

図 16 によると、三角柱ストレークを取り付けた場合には、円柱はほとんどレイノルズ数に関係なく一定の低速の無次元角速度で回転している (0.606 m の円柱は、 $Re_x = 4.2 \times 10^5$  で回転速度はさらに低下している)。このことから、三角柱ストレークは境界層を乱流に変えることによって高速のフラットスピンを抑制しているのではなく、風速に関係なく円柱上の一定の領域で模型表面の流れを剥離させることによって抑制していると著者等は推定する。

## 6. 結論

落下中に起きる細長物体の高速フラットスピン現象を

調べるため、自由回転法を用いて円柱、円錐円柱および両頭円錐円柱模型の臨界レイノルズ数付近でのフラットスピンの実験を行い、他のデータ、前回の実験結果と比較した。その結果次のことが明らかになった。

(1) 細長比が 5 程度の円柱、円錐円柱模型は、二次元円柱の片側に剥離バブルが発生する臨界レイノルズ数付近の狭い範囲で、急激に高速回転モードに移る。

(2) 高速回転が始まると、二次元円柱の両側面に剥離バブルのできる超臨界レイノルズ数に風速を増加しても高速回転は持続する。

(3) 臨界および超臨界レイノルズ数領域付近では、フラットスピンには高速回転と低速回転の二つのモードが存在する。

(4) 一度軸対称模型が高速回転モードに入ると、亜臨界レイノルズ数領域でも、超臨界レイノルズ数領域でもその回転は  $V_c/V_x (= \Omega) \approx 1$  の角速度で持続する。

(5) 臨界レイノルズ数付近で高速回転が起きると、その風速よりも低い風速まで一様流の速度を下げないと高速回転は停止しない、というヒステレシス現象が存在する。

(6) 模型表面に機体軸と平行に、三角柱ストレークを等間隔に取り付けると、定常の回転速度を低減させることができる。低速の無次元回転速度はレイノルズ数に関係なくほぼ一定であることから、円柱上の境界層の遷移を早めるというよりむしろ、剥離位置を固定するためと推定される。

(7) 細長物体の表面の粗さ、傷、汚れなどがフラットスピンの始まるレイノルズ数や回転速度に大きな影響を与える。

## 7. 謝辞

本実験に当たり、新型航空機研究グループの藤枝郭俊グループリーダーに突風風洞での実験の御支援を戴いた。管理部工作課 (当時) の納谷理憲工作係長 (当時)、井上育三氏、山崎亀義氏、坂本健氏に実験に使用した模型を製作して戴いた。

## 8. 文献

- 1) 久保田弘敏氏私信 1978 年。
- 2) 宇宙材料実験用ロケット回収研究チーム, “宇宙材料実験用ロケット頭胴部の大迎角空力特性に関する研究その 3. 高空落下試験でのフラットスピンについての解析”, 航空宇宙技術研究所資料 TM-426, 1980.
- 3) 吉永崇, 楯篤志, “細長物体の自励回転”, 日本航空宇宙学会誌, 第 33 巻, 1985 年, pp. 367-374.
- 4) Yoshinaga, T., Tate, A. and Inoue, K. ;” Con-

- ing Motion of Slender Bodies at High Angles of Attack in Low Speed Flow," AIAA Paper 81-1899, 1981.
- 5) 楯篤志, 吉永崇, 井上建二, "大迎角における細長物体のコーニング運動", 航空宇宙技術研究所報告, TR-1059, 1990年3月.
  - 6) Kubota, H., Arai, I. and Matsuzaka, M.; "Flat Spin of Slender Bodies at High Angles of Attack," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 20, 1983, pp. 108-114.
  - 7) 吉永崇, 楯篤志, "臨界レイノルズ数付近の細長物体のフラットスピン", 日本航空宇宙学会第14期年会講演会講演集, 1983年4月, pp. 140-141.
  - 8) 吉永崇, "The Study of the Angular Motions of Slender Bodies at High Angles of Attack (大迎角における細長物体の角運動の研究)," 学位論文, 1985年4月.
  - 9) Achenbach, E.: "Influence of Surface Roughness on the Cross-Flow around a Circular Cylinder," J. Fluid Mechanics, Vol. 46, Part 2, 1971, pp. 321-335.
  - 10) Bearman, P. W.; "On Vortex Shedding from a Circular Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime," J. Fluid Mechanics, Vol. 37, 1969, pp. 577-585.
  - 11) Kamiya, N, Suzuki, S. and Nishi, T.; "On the Aerodynamic Force Acting on a Circular Cylinder in the Critical Range of the Reynolds Number," AIAA Paper 79-1475, 1979.
  - 12) Uzuki, H.; "On Lift-Coefficient of Circular Cylinder in Two Dimensional Flows," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 25, 1982, pp. 63-64.
  - 13) 広末健一, 北村清美, 村上義隆, 進藤重美; "航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備試験", 航空宇宙技術研究所報告, TR-335, 1973年3月.
  - 14) Yoshinaga, T., Tate, A. and Inoue, K.; "Flat Spin of Circular Cylinders Induced by Artificial Roughness," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 21, 1984, pp. 411-413.
  - 15) Yoshinaga, T., Tate, A. and Inoue, K.; "Approximate Calculation of Aerodynamic Coefficients for Rotating Slender Bodies at 90 deg Incidence," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 19, 1982, pp. 84-86.
  - 16) Ericsson, L. E. and Reding, J. P.; "Dynamics of Forebody Flow Separation and Associated Vortices," J. Aircraft, Vol. 24, 1985, pp. 329-335.
  - 17) Ericsson, L. E.; "Flat Spin of Bodies with Circular Cross-Section," AIAA Paper 83-2147, 1983.
  - 18) Ericsson, L. E.; "Flat Spin of Axisymmetric Bodies in the Critical Reynolds Number Region," J. Spacecraft, Vol. 24, 1987, pp. 532-538.
  - 19) Allen, H. J. and Perkins, E. W.; "Characteristics of Flow Over Inclined Bodies of Revolution," NACA RM A50L07, March, 1951.
  - 20) Lamont, P. J.; "The Complex Asymmetric Flow Over a 3.5D Ogive Nose and Cylindrical Afterbody at High Angles of Attack," AIAA Paper 82-0053, 1982.
  - 21) Kamiya, N. Suzuki, S., Nakamura, M. and Yoshinaga, T.; "Some Practical Aspects of the Burst of Laminar Separation Bubbles," ICAS-80-10.2, 12th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 1980.
  - 22) Pick, G. S.; "Investigation of Side Forces on Ogive-Cylinder Bodies at High Angles of Attack in the  $M = 0.5$  to  $1.1$ ," AIAA Paper 71-570, 1971.
  - 23) Ericsson, L. E. and Reding, J. P.; "Alleviation of Vortex Induced Asymmetric Loads," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 17, 1980, pp. 546-553.
  - 24) Abe, T. and Funabiki, K.; "Active control of asymmetric vortex effects in circular cylinder," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 23, 1986, pp. 136-140.

---

## 航空宇宙技術研究所報告1271号

平成7年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

**Printed in Japan**