

細長物体の大迎角コーニングとフラットスピンについて

吉 永 崇* 橋 篤 志*

流れに対して迎角のある翼断面を持つ風車が風を受けて回転することは当然のこととしてわれわれは受け入れている。ところがこのような回転のモーメントの原因となる揚力が発生しそうな円形断面や長方形断面の細長物体が気流の中で回転する場合がある(文献1)。いくつかの軸対称物体をヘリコプターから投下すると、それは初期には(1)タブリングと呼ばれる流れに垂直な軸のまわりに転がるような回転を始め、続いて(2)コーニングと呼ばれる流れに平行な軸の回りの味噌擦り回転に移り、最終的には(3)フラットスピンと呼ばれる流れに垂直な面内での平面回転を続ける。(文献2, 3, 4)。これらのそれぞれの現象の解明が最近の飛行体の性能向上の研究と深く結び付

ている。

フラットスピンを風洞で再現すると、円形断面の細長物体は臨界レイノルズ数付近で回転を始める。図1に円柱の場合の測定結果を示す。この一つの原因は、臨界レイノルズ数の狭い範囲(たとえば $3.7 \times 10^5 \sim 3.9 \times 10^5$)で円柱回りの片側の境界層が乱流境界層に遷移して剥離点が下流に移動するのに対し、反対側の境界層は遷移せず剥離点は逆に上流に移動するため乱流境界層側へ横力(揚力)が作用する(文献5, 6)ことから類推される。これと類似した力がフラットスピンをする有限円柱にも作用するためと考えられる(文献3, 4)。ところがこの推定では、臨界レイノルズ数よりも大きいところでも高速回転を持続すること

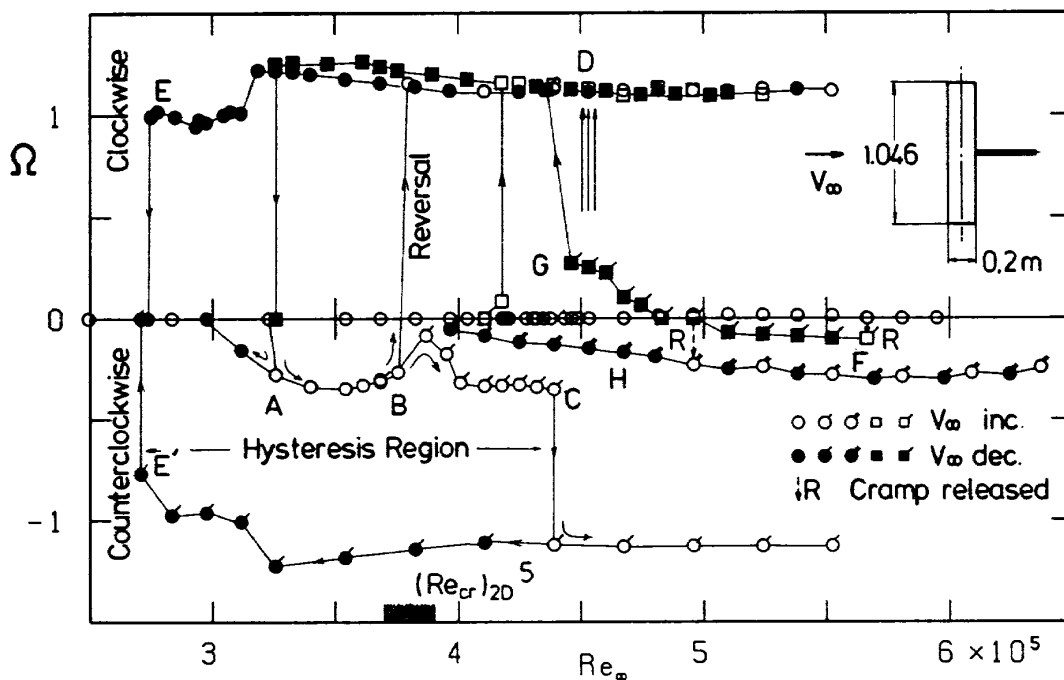


図1 円柱のフラットスピンにおけるレイノルズ数と無次元角速度の関係

$$(Re_{\infty} = DV_{\infty} / \nu, \quad \Omega = \pi Ne / V_{\infty})$$

が説明できない。この矛盾点を克服するため、この原因を臨界レイノルズ数付近の逆マグナス効果であるとする見方がある（文献7）。しかしフラットスピンのような流れに垂直な面内の有限円柱の回転においては円柱断面が流れに対して相対的に回転しない（ $\omega_0 \cos 90^\circ = 0$ ； ω_0 ：角速度， 90° ：迎角）ことから、この推定にも難点がある。現在のところ広いレイノルズ数の範囲で有限円柱がなぜ高速回転するかということに関して合理的な説明は見付かっていない。

フラットスピンという言葉は、軽飛行機や戦闘機などが誤って失速状態に入り、揚力を失ったままらせん状の軌跡を描きながら大迎角で下降を続ける現象に使われてきた。これは、左右の主翼、下反角を持つ尾翼、胴体などの回りの流れが非対称に剥離することが原因となって発生する。多くの場合、これらの飛行体が回転し始めると、それによってさらに流れの非対称性が強調され、ますます、回転から離脱しにくくなる。ここに見られる飛行体のフラットスピンは、迎角が必ずしも 90° ではないから、むしろ大迎角のコーニングと考えられる。円形断面の細長物体は大迎角でコーニングを起こすため飛行体の安定には不利な形状である（文献8）。この点に関して一つの飛躍的な進歩があった。丸み付き長方形断面の胴体を用いることにより臨界レイノルズ数以上ではコーニングモーメントが抑制されることが見いだされた（文献9）。この形状はすでに大迎角をとる飛行体（航空機やミサイルなど）に採用されている。

しかし、臨界レイノルズ数以下では丸み付き長方形断面の細長物体にはコーニングモーメントが作用して飛行体は動的に不安定となる。このように長方形断面の細長物体は興味深い現象を示す。コーニングとフラットスピンとはかなりその原因が異なるが、以前に測定を行った円柱のフラットスピンと比較するため、著者等は角のなる細長物体が臨界レイノルズ数以下でどのようなフラットスピンを行うかを実験で調べた。角柱模型を流れに平行な回転軸回りに自由に回転できるようにベアリングで支持し、回転中のロール角の時間的変化の検出を行う。円形断面の細長物体は臨界レイ

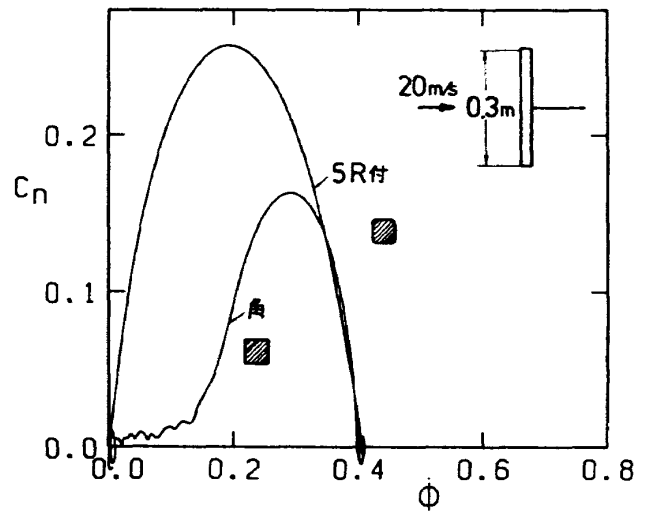


図2 角のある細長物体に作用する回転のモーメント係数 C_n
（ $\phi = \Omega$ は無次元角速度）

ノルズ数付近で高速のフラットスピンを始める（図1）のに対して、長方形断面の細長物体は低速からフラットスピンを始め、その回転数はほぼ風速に比例している（文献1）。また長方形断面の厚さを変えることにより無次元角速度を変えることができる。丸み付き正方形断面と正方形断面の細長物体を比較すると、どちらも無次元角速度はほぼ同じ値を示すのにたいし、静止から定常回転にいたる過程でのモーメントの変化は丸み付きの場合のほうが著しく小さい（図2）。落下物体を回転させたい場合には、このような板状の部材を物体に取り付けることにより一定の回転速度を与えることも可能となる（文献10）。また、流れに垂直な有限長さの正方形断面の角柱に作用する空力係数は亜臨界レイノルズ数でも超臨界レイノルズ数でもほとんど変化しないことが最近の実験で明らかになった（文献11）。

参 考 文 献

- 1) 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, 第377号, 1985年6月
- 2) 久保田弘敏 私信 1978年11月。
- 3) T. Yoshinaga, A. Tate and K. Inoue, “Approximate Calculation of Slender Bodies at 90 deg Incidence”, J. of Spacecraft and Ro-

- ckets, Vol. 19, No. 1, 1982.
- 4) H. Kubota, I. Arai and M. Matsuzaka, "Flat Spin of Slender Bodies at High Angles of Attack", J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 20, No. 2, 1983.
 - 5) P. W. Bearman, "On Vortex Shedding from a Circular Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 37, July 1969.
 - 6) N. Kamiya, S. Suzuki and T. Nishi, "On the Aerodynamic Force Acting on a Circular Cylinder in the Critical Range of the Reynolds Number", AIAA Paper 79-1475, July 1979.
 - 7) L. E. Ericsson, "Flat Spin of Axisymmetric Bodies in the Critical Reynolds Number Region", J. of Spacecraft and Rockets. Vol. 24, No. 6. 1987.
 - 8) T. Yoshinaga, A. Tate and K. Inoue, "Coning Motion of Slender Bodies at High Angles of Attack in Low Speed Flow", AIAA Paper 81-1899, 1981.
 - 9) G. V. Malcolm and M. H. Clarkson, "Wind-Tunnel Testing with a Rotary-Balance Apparatus to Simulate Aircraft Spin Motions", Proceeding of AIAA 9th Aerodynamic Testing Conference, Arlington, Texas, June, 7 - 9, 1976, pp. 143-156.
 - 10) P. Crimi, "Analysis of Sammara-Wing Decelerator Steady-State Characteristics", J. of Aircraft, Vol. 25, No. 1, 1988.
 - 11) 楯 篤志, 吉永 崇, "角のある細長物体に作用する空気力", 航空宇宙技術研究所報告TR-1035, 1989年9月。

