

No. 20

臨界レイノルズ数における球に働く空気力の変化

神谷 信彦*, 渡辺 京司*, 田村 篤敬*, 岩崎 昭人**, 藤田 敏美**

On Change of Aerodynamic Force Acting
on a Sphere in the Critical Range of the Reynolds NumberNobuhiko KAMIYA, Kyoshi WATANABE, Atsutaka TAMURA
Nagoya UniversityAkihito IWASAKI, Toshimi FUJITA
NAL

It has been shown that the force acting on a circular cylinder changes discontinuously as the Reynolds number changes in the critical range of the Reynolds number. The force acting on a sphere, however, has so far been reported as to change continuously in this range. It was found for the first time that the force acting on a sphere also changes discontinuously by this experiment, where the flow speed of the windtunnel was varied very small step by step. Flow visualization was made by means of smoke method and the reason for the discontinuous change of aerodynamic force was investigated.

1. まえがき

臨界レイノルズ数においては、円柱に働く空気力はレイノルズ数の変化に伴い不連続的に変化することが知られている^{1),2)}。しかし、これ迄報告されている限りでは、球に働く空気力の変化は連続的である^{3),4),5)}。本実験においては、風速を慎重に極く僅かずつ変化させて測定した結果、球に働く空気力も臨界レイノルズ数において不連続的に変化することを初めて見出した。煙法による可視化を行い、空気力が不連続的に変化する理由を考察した。

2. 実験装置と実験法

航空宇宙技術研究所の突風風洞で実験を行った。球模型は直径300mmのアルミ合金製で、直径35mmの支持棒で下流側から支えられている。空気力は3分力内装天秤によって測定された。

煙法による可視化を行う場合には、支持棒には風洞外に置かれた煙発生装置から導いた外径9mmのビニールパイプ7本が、ビニールテープによりロケットのブースター状に気流に平行に取付けられている。煙発生装置か

ら発生した煙は、大気と球後縁の圧力差により、ビニールパイプを通して模型後縁より約10mm下流の位置から気流中に拡がり、球下流の剝離領域を可視化する。模型はつや消しラッカースプレーで黒色に塗られている。

風速は、臨界レイノルズ数に近い18m/s近傍で、空気力の不連続的な変化を捉える目的で、制御能力限界の0.1m/s刻みで変化させた。空気力のみ測定と、煙法による可視化と空気力の同時測定とを行った。

3. 実験結果

図1にレイノルズ数上げの場合の抵抗係数の変化と煙法による可視化写真を示す。白丸は可視化を行わず、煙発生用ビニールパイプもオイルフローもない場合の測定値を、黒丸は煙を発生させた場合の測定値を示す。周囲の可視化写真は引出線により実験値と対応がつけられている。前者の場合には $Re=3.5 \times 10^5$ で0.42の値を示していた抵抗係数が、レイノルズ数が変化しないまま突然0.33に変化した。従って0.42と0.33の間の、例えば0.38の抵抗係数を実験的に実現するレイノルズ数は存在しない。抵抗係数の変化が急激ではあるが連続的な場合には、任意の抵抗係数に対応するレイノルズ数が存在し、風速を十分小刻みに変化させれば、任意の抵抗係数を実験的に実現することが可能である。この意味で煙もオイルもない場合には抵抗係数が0.42から0.33に不連続的

* 名古屋大学工学部

** 航空宇宙技術研究所

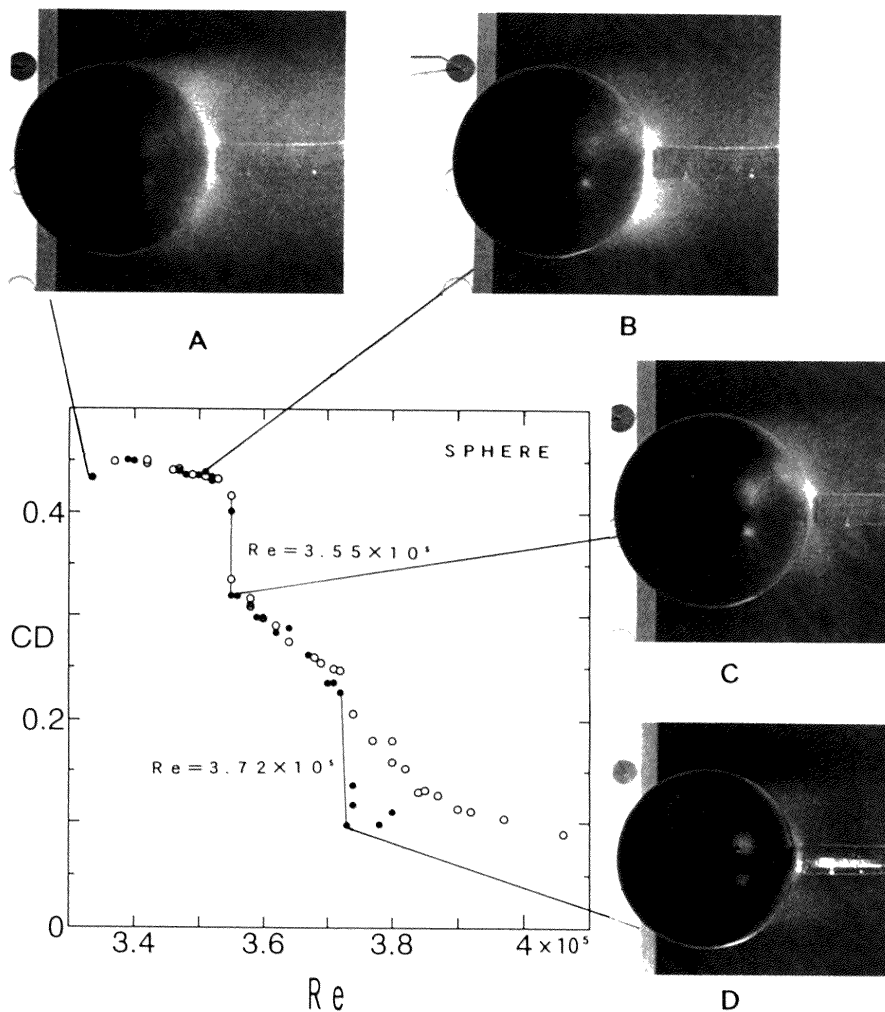


図1 抵抗係数のレイノルズ数による変化と可視化写真

○：可視化なし ●：煙による可視化

に減少したと言える。煙が発生する場合には同じレイノルズ数 $Re=3.55 \times 10^5$ で抵抗係数が0.40から0.31に不連続的に減少した。また、煙もオイルも無い場合にはその他のレイノルズ数では抵抗係数の変化は連続的であったが、煙発生の場合には、 $Re=3.72 \times 10^5$ で抵抗係数が0.23から0.10に不連続的に減少した。この $Re=3.72 \times 10^5$ より大きいレイノルズ数を除いて球の抵抗係数の値は両者に殆ど相違がない。

可視化写真においては、支持棒の球支持点近傍から遡った煙が剥離領域を白く表している。レイノルズ数が低いAに比べBでは僅かに剥離点が下流に移動しているが、上下の偏りはない。抵抗が不連続的に減少した後のCでは、図で上部の剥離点はBの場合と殆ど変わらないが、下部の剥離点は明らかにBに比べて後退しており、剥離領域は上に偏っている。Dの場合は下部の剥離点はCとあまり変わらないが、上部の剥離点も下部と同じ位置まで後退している。

球に働く抵抗係数と横力係数の関係を調べる目的で前者を縦軸、後者を横軸に取って図2にプロットした。

(a)には可視化を行わない場合の結果を示す。 $Re=3.55 \times 10^5$ において、抵抗係数が0.42から0.33に不連続的に減少すると同時に、横力係数が0.05から0.24に迄急激に増加していることが示されている。(b)には煙を発生させた場合の結果を示す。 $Re=3.55 \times 10^5$ においては、抵抗係数の不連続的な減少と共に横力係数は(a)の場合と同様に不連続的に増加するが、 $Re=3.72 \times 10^5$ においては、抵抗係数の不連続的な減少と共に横力係数は不連続的に減少する。

4. 考 察

一般に球については以下のことが知られている。亜臨界レイノルズ数においては流れは層流剥離をし、剥離点は比較的上流にあり、剥離領域が大きいので抵抗係数も大きい。超臨界レイノルズ数においては、層流剥離泡が形成され、その下流における乱流剥離点は層流剥離の場合より下流にあり、剥離領域は小さくなるので抵抗係数も小さい。

図1において、可視化写真A、Bは亜臨界レイノルズ

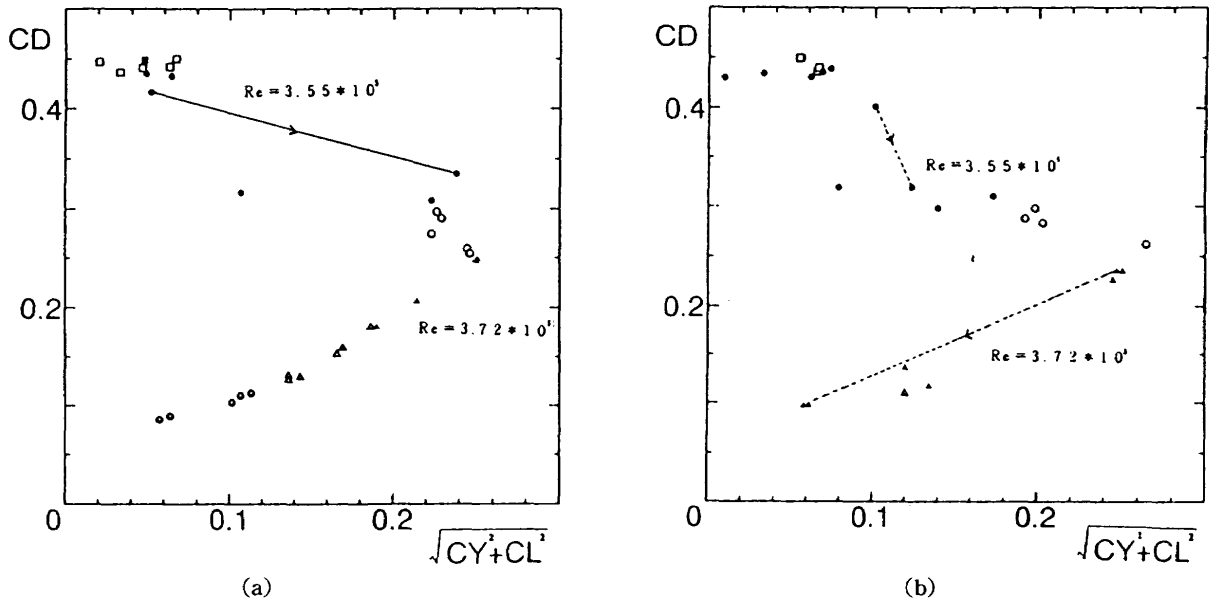


図2 抵抗係数と横力との関係

数に対応し、流れは層流剥離をされると考えられる。Cについては、下部に部分的に層流剥離泡が突然形成され下部の剥離点がBに比べ下流に移動したと考えると、可視化写真を良く説明することが出来るとともに、抵抗が小さいことも説明できる。また、部分的に層流剥離泡が形成されるため、流れの軸対称性が崩れ、横力が発生することも説明出来る。Dについては、層流剥離泡が全周に形成され、剥離点が全周にわたって後退したと考えると可視化写真を良く説明することが出来、抵抗が小さいことも説明できる。即ち、「レイノルズ数を上げていくと、まず下部に部分的に剥離泡が突然形成され、その後剥離泡の領域が次第に大きくなり、あるレイノルズ数で上部の残された領域で層流剥離泡が突然形成される」と考えると煙を発生した場合の可視化写真と抵抗係数及び横力係数の測定値の変化を良く説明することが出来る。

以下のように考えると上記括弧内の現象が起こることが良く理解出来る。図3の細線は上流から見た層流剥離点の軌跡を示す。何等かの理由で気流に偏りが生じ、澱み点が軸対称の場合のSからS'にずれた場合を考える。澱み点のずれの方位角 ϕ を0とし、方位角の領域をおおよそ0近傍（図3の上方太線円弧の領域）、 $\pm\pi/2$ 近傍（図3の太線の無い領域）、 π 近傍（図3の下方太線円弧の領域）に分ける。 π 近傍では澱み点から剥離点迄の距離を基準にしたレイノルズ数が大きく、また、このレイノルズ数は近似的に方位角によらずほぼ一定である。従って π 近傍で層流剥離泡がまず同時に形成され、その時に抵抗係数が不連続的に減少し、横力係数が不連続的に増加する。 $\pm\pi/2$ 近傍では澱み点から剥離点までのレイノルズ数は方位角によって異なる。従って、レイノルズ数の増加と共に層流剥離泡領域が徐々に拡大すると

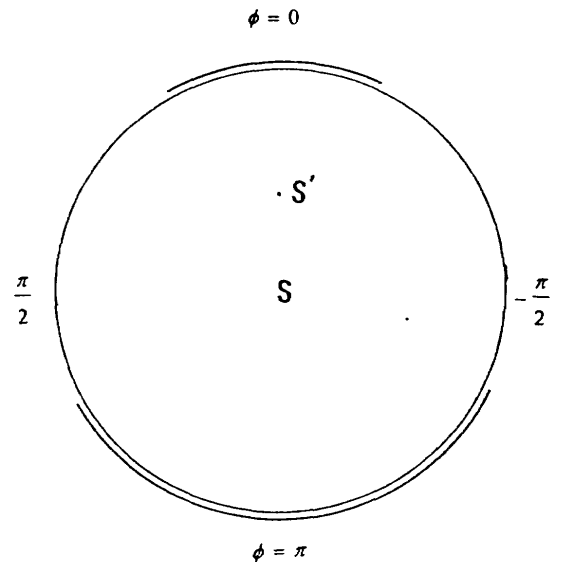


図3 上流から見た層流剥離点の軌跡と澱み点の模式図

ともに抵抗係数が徐々に減少する。方位角0近傍では、澱み点から剥離点迄のレイノルズ数は小さいが、 π 近傍と同様に方位角によらずほぼ一定なので、最後にこの $\phi = 0$ 近傍で層流剥離泡が同時に形成され、その時に抵抗係数が再び不連続的に減少し、横力係数は不連続的に減少する。

上記の説明が正しいかどうかを判定するには今後の実証を待つ必要があるが、一つの分かりやすい説明として提案した。可視化なしの場合には空気力の不連続的な変化を示すレイノルズ数が1ケースしかなく、 π 近傍の不連続的な変化は生じなかった。その理由の解明については、今後の研究が必要である。

5. 結 論

臨界レイノルズ数において、レイノルズ数の変化に伴う球に働く空気力の変化を測定し、可視化した結果、次の結論を得た。

- (1) 円柱と同様に、球の場合にも臨界レイノルズ数において、空気力が不連続的に変化することを初めて見出した。不連続的な変化が起こるレイノルズ数は、円柱同様 2 ケースの場合と 1 ケースの場合があった。
- (2) 上記の現象が起こる物理的な解釈を提案した。

6. 文 献

1. N. Kamiya et al., Some Practical Aspects of the Burst of Laminar Separation Bubbles. ICAS-80-10. 2, 1980.
2. 卯月英夫：二次元流中における円柱の揚力係数について、日本航空宇宙学会誌 28巻 322号, 1980年11月, pp.537-546.
3. C. B. Millikan and A. L. Klein, The Effect of Turbulence, Aircraft Engineering, August, 1933, pp.169-174.
4. A. Fage, Experiment on a Sphere at Critical Reynolds Numbers, R & M. no. 1766, 1936.
5. E. Achenbach, Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, J. Fluid Mech., vol. 54, part 3, pp.565-575.