

球および円柱の後流の可視化

木 村 雄 吉*・柳 川 聡 寛**

Visualization of Wake Flow after a Sphere and a Cylinder

Takeyoshi Kimura, Toshihiro Yanagawa

Many investigators have precisely carried out the measurements of drag forces on a sphere and a cylinder. However, it has been difficult to expound the theory of the drag forces, because of the pressure drag caused by a separation flow. The separation point changes according to Reynolds number, and follows a wake flow. This wake is formed Karman vortex street, which is caused a vibration force by its alternate wakes. In this paper, visualization experiments have been carried out to observe the separation point and Strouhal number of spheres and cylinders. A hydrogen bubble method and a dye injection technique have been applied to visualize the separation point and the wake flow in this experiment.

1. 緒 言

円柱や球のような鈍頭物体における抗力の流体力学問題は、非常に古くから多くの研究者によって研究されており、それらの抗力係数については極めて精緻な実験結果が示されてきた。しかし抗力に関する理論的な解明については未だに多くの未解決の問題が残されている。流線形物体の抗力については境界層理論によってある程度明らかにされているのに対し、鈍頭物体の抗力についての理論的解明は非常に遅れ、特に抗力の精確な数値的表現はコンピュータが出現するまで皆無であったといっても言い過ぎではない。その理由の一つは、抗力が摩擦と剥離に起因し、特に鈍頭物体には、剥離による圧力抗力が支配的であることによる。

剥離に対する流体力学的理論は、ダランベールのパラドックス以来、多くの研究者によって行われて来たが解析的手法による解決は、現在に至るまで出現していない。ただ、数値シミュレーションとしては、コンピュータの発達によって差分法・離散渦法など、極めて有効な手段がでてきた。これらによって鈍頭物体の抗力に重要な影響を与える剥離や後流の流れが数値的に確かめられ、これより抗力に関する理論的推測が可能となってきた。

円柱や球は鈍頭物体のなかでも最も基本的形状の物体であり、多くの実験結果があるが、その代表的なものとして、ワイゼルバーガーらの^{1) 2)} 球や円柱実験が有名である。ストークス流域、層流境界層域さらには乱流境界層域に至る抗力係数の実験から、抗力係数が激減する臨界レイノルズ数の存在を見出し、この減少の解明が剥離や後流の研究を促し、さらには剥離泡を見いだす発端となった。臨界レイノルズ数における抗力係数が激減する現象の原因解明に、ベアマンおよびハーベイ³⁾ は粗面の鈍頭物体と溝付き鈍頭物体の抗力値の実験を行い、明らかな抗力曲線の相違があることを見出し、表面粗さと溝による流れにおいて剥離に対する影響が異なることを示した。

* 機械工学科 ** 応用理化学専攻大学院生

また、木村⁴⁾らは溝付き円柱物体の研究を行い、抗力低減は乱流の影響でなく、溝によって生ずる剥離泡が原因であることを確かめた。

球模型における剥離泡、後流のなどの実験的研究は円柱模型のそれらに比べ比較的少なく、特に可視化研究については未だに多くの研究余地が残されている。本研究では、先ず円柱後流の可視化実験を行い、従来よく知られている剥離点位置、ストローハル数、溝付円柱の後流についての可視化実験を行う。実験は染料注入法および水素気泡法を用い従来の結果との比較を行う。その後、球模型についての同様の可視化実験を行い、円柱の結果との比較検討を行う。

2. 円柱の可視化実験

2. 1 円柱における剥離点

円柱は2次元における最も基本的な鈍頭物体であり、それらの周りの流れは流体力学における基本の流れとして古くから研究されてきた。^{1) 2)} そのうちでも円柱の抗力については多くの研究者によってなされてきた。^{3) 4) 5) 6)} レイノルズ数が 10^6 以下の範囲においてはワイゼルバーガー^{5) 7)} の測定値が一般的によく知られている。レイノルズ数 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ の間では C_D は 1.0 ~ 1.2 でほぼ一定であり、ロシュコ⁷⁾ はこの領域を亜臨界レイノルズ数領域と名づけている。 $Re = 5 \times 10^5$ で急減して 0.3 程度にまでなる。この抗力係数が急減少する領域を臨界レイノルズ数と呼ぶ。その後は再び増加し、超臨界レイノルズ数領域といい、そこでの抗力の測定はロシュコ、アーベンバッハ⁸⁾ 等によってなされている。これによると、レイノルズ数が 3.5×10^6 以上では抗力係数はほぼ 0.7 で一定となり、これ以上レイノルズ数が増加しても抗力係数は一定値を保つ。この部分は遷移臨界レイノルズ数と呼ばれる。さらに大きいレイノルズ数となる超音速領域では抗力係数は大幅に変化することはよく知られていることである。

亜臨界レイノルズ数領域においては円柱の前方の激み点から発達した層流境界層が $\theta = 82^\circ$ で剥離し、大きい剥離領域（後流域）が生じる。臨界レイノルズ数領域では層流剥離したが乱流に遷移し、円柱表面に再付着する。この乱流境界層は圧力上昇に耐え $\theta = 130^\circ$ 附近で剥離するまで表面に沿って流れる。超臨界レイノルズ数領域において層流境界層は、最低圧力点直後で剥離せず、すぐに乱流に遷移してしまい、このとき剥離点は 103° 附近にまで前進する。

流れが剥離した後は円柱後方の圧力分布が一定となる。なお、臨界レイノルズ数領域では範囲にして 5° ほど圧力値が一定となる部分が生じる。ここでは層流境界層がいったん剥離して渦を生じ、それが再付着して剥離泡と呼ばれる閉じた渦領域を作る。この渦領域内では圧力は大きく変化しないので圧力分布が平らになるのである。またこのときの後流の圧力回復は最も大きく、その結果抗力は最も小さくなる。

超臨界から遷移臨界への移行、即ちいったん抗力係数が小さくなった後、徐々に抗力が増し一定値 ($C_D=0.7$) に近づくのに、前述の剥離泡の消滅を伴う。この事実は円柱表面につけられた溝内の流れや、球表面につけられたディンプル内の流れの研究にとって重要な示唆となる。

2. 2 ストローハル数

剥離した後流において規則的な渦列が発生する。一般にカルマンの渦列と呼ばれており、渦発

生の周波数について、無次元数であるストローハル数が次式で定義されている。

$$Sr = \frac{n d}{U_{\infty}} \quad (n: \text{後流の周期、} d: \text{円柱直径、} U_{\infty}: \text{流速})$$

円柱においてはレイノルズ数が $6 \times 10^2 \sim 4 \times 10^4$ の範囲で $Sr = 0.21$ という一定値となる。

またロシュコは円柱抗力係数とストローハル数との間にも一定の関係があり、これは遷移臨界の流れにおいても存在すると報告している。なお、ロシュコの他にも、ゴールドスタイン⁶⁾も同様の研究をしている。レイノルズ数に対するストローハル数の逆数 $1/Sr$ の関係と、抗力係数 C_D の関係がほぼ全レイノルズ数範囲で相似関係が成立している。この事実については、まだ因果関係が明らかではないが、ストローハル数を制御することにより抵抗を減少させることが可能であるかどうかという研究へも発展させることが出来るかもしれない。

2.3 溝付円柱の流れ

円柱表面の粗さが抗力に及ぼす影響についても古くから研究がなされており⁶⁾、アーヘンバッハ⁸⁾ ⁹⁾、ギュベン、ファレルおよびバテル¹⁰⁾、中村ら¹¹⁾等の研究がある。しかし、まだ解明されていない部分も多い。管摩擦におけるニコラウゼ⁶⁾の曲線の形から見て、この粗さによる抗力の増加については摩擦抵抗による効果も大きいと思われる。

ゴルフボールのディンプルが抗力を減少させる効果を持つことはよく知られている。これは臨界レイノルズ数における剥離泡が抗力を大きく低減させる事実から、球表面に窪みを付け、その窪み中に剥離泡を発生させ抗力を低減させようとするものである。二次元円柱においてはディンプルでなく円柱表面に溝を付けた模型が用いられる。

2.4 実験装置および実験結果

本研究に使用した実験装置を図1に示す。水槽はアクリル製で、上流および下流部に貯水タンクを持ち、ポンプを用いて下流側のタンクから上流側のタンクへ水を循環させて水路に水を流すものである。水路幅は120mm、水路長さは500mmで、水路の上流側に有孔板、金網、整流格子を取り付けている。使用したポンプは出力0.31[kW]、流量2367[cc/s]、揚程6[m]である。

円柱実験における模型は直径5[mm]のアルミ管および直径22[mm]塩ビ管を用いた。

流速は四角堰によって測定した。

染料注入法による可視化実験において、染料としては以下の各色を用いた。

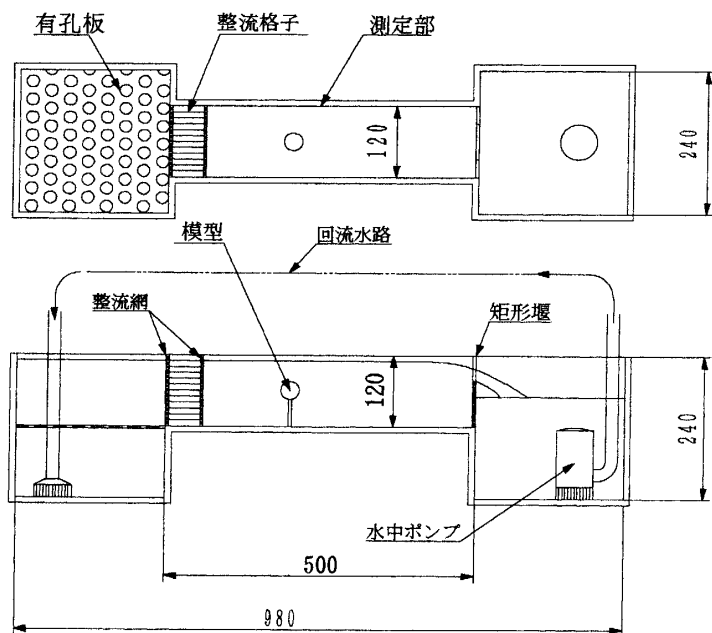


図1. 回流水槽

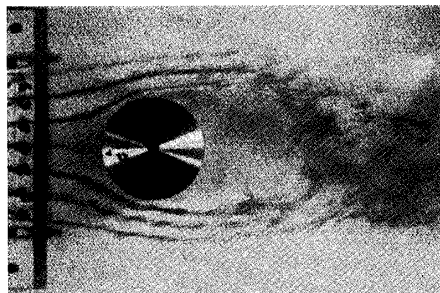
黒色はキャノンBCIブラックおよび墨汁、赤色はキャノンBCIマゼンタおよび赤インク、青色はキャノンBCIシアンおよび青インク、黄色はキャノンBCIイエローを使用した。

水素気泡法は、水の電気分解を行って陰極に発生した水素の気泡をトレーサーとして流れの可視化を行うものである。染料注入法は流線の観測に用いられるが、水素気泡法はタイムラインの測定を容易に行うことができる。また電気制御により気泡の発生間隔、発生持続時間、発生量などを容易に調整することが可能である。また、染料注入法のように流れを汚すことがない点、繰り返し長時間実験を行うことが出来る。さらに水素の気泡は染料に比べ拡散が少なく、細部の流れを調べるのに有効である。陰極電極としては直径0.05から0.1[mm]のステンレス線および銅線を用いた。

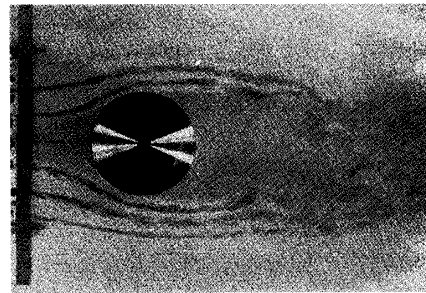
剥離点は染料注入法において澱み点を通る流線から測定することができる。図2の滑らかな円柱においては 80° 附近で剥離していることがわかる。円柱表面に幅6.81[mm]、深さ1[mm]の円弧溝をつけた場合の実験結果を図4に示す。この場合溝効果により剥離点は 120° 附近に後退し、従って後流の領域は滑らかな円柱に比べその幅は小さく、圧力抗力が減少することがわかる。

円柱後流のカルマン渦列のビデオカメラによる測定から一対の渦発生周波数を測定することによってストローハル数を算出することができる。直径5[mm]と22[mm]の円柱を用い、レイノルズ数を 6×10^2 から 3×10^3 の範囲で測定を行った結果、ストローハル数0.182~0.221の値を得た。図3に示すようにカルマンの渦列は比較的安定して発生していたが、周波数に若干のばらつきがあり、従来の測定値に対し $\pm 2\%$ 程度の誤差を生じた。

なお、円柱表面上につけられた溝内の流れは水素気泡法により可視化され、図5に示す速度分布の測定が可能であることが確かめられた。



(a) 滑らかな円柱 $Re=6 \times 10^4$



(b) 滑らかな円柱 $Re=1.2 \times 10^5$

図2 滑らかな円柱の後流



(a) 直径5 φ 円柱 $Re=1.5 \times 10^3$



(b) 直径22 φ 円柱 $Re=3 \times 10^3$

図3 円柱背後のカルマンの渦列

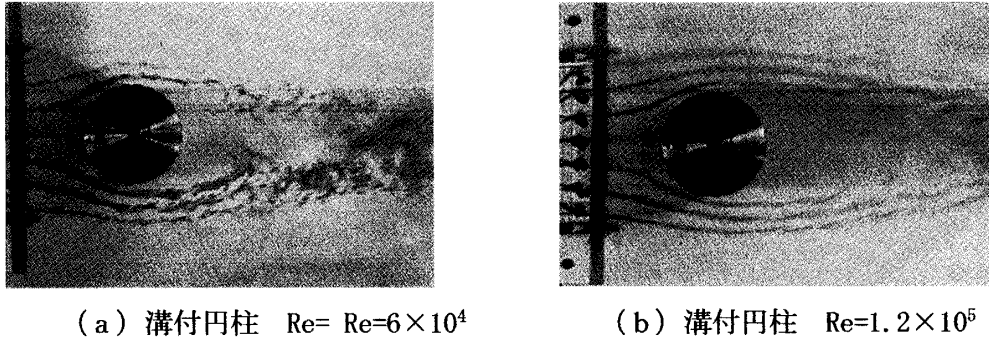


図4 溝付円柱の後流

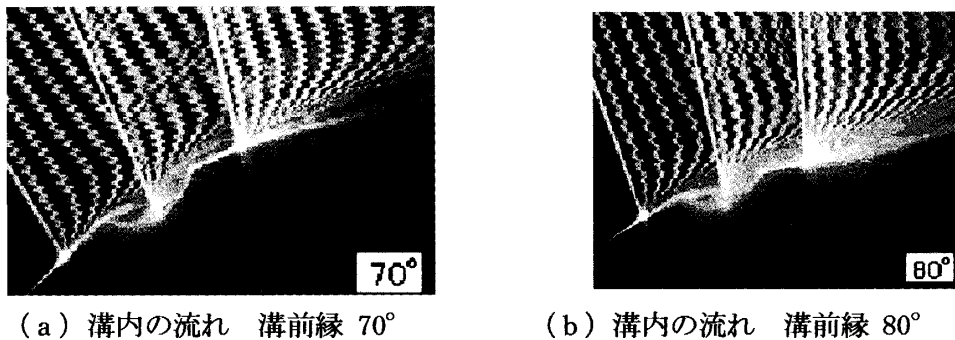


図5 円柱表面上の溝内の流れ

3. 球の可視化実験

3.1 球の抗力および後流

球に働く抗力については、レイノルズ数と抗力係数の関係に関しては定性的に円柱のそれと同じである。ただ抗力係数の値そのものは臨界レイノルズ数の前後で約 0.5 から 0.06 と変化し、遷移臨界の領域でも約 0.2 と円柱の場合に比べて約 1/2 から 1/3 の値をとる。

圧力分布は円柱の場合と同様、剥離泡が存在する。またレイノルズ数に対する遷移点と剥離点の変化はアーヘンバッハ¹²⁾によって測定されている。臨界レイノルズ数で剥離点は 83° 附近から 120 度附近まで後退するが、それ以上のレイノルズ数の領域でも円柱のように剥離点が前進してくることはない。このことは球の場合には超臨界および遷移臨界領域でも抗力係数の増加は円柱に比べてそれほど大きくないという事実に対応している。また彼は水槽を用いた可視化実験からレイノルズ数が 10^3 の場合の球の後流において境界層によるせん断層の巻き上がる様子を図6に示すような模式図に描いている。これによると後流は流れの方向に軸対称とはならず、3次元的に複雑な振る舞いをしている。

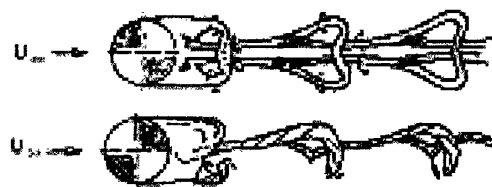


図6 球後流に発生する渦形状 (文献13より転載)

3. 2 粗さとディンプル

球の表面粗さの抗力等に対する影響については古くから多くの研究者によって研究が行われている⁶⁾。アーヘンバッハ¹⁴⁾の測定によれば表面の粗さが大きくなるに従い臨界レイノルズ数が小さくなり、最小の抗力係数は大きくなる。そして臨界領域での抗力係数は、滑らかな球におけるものよりもかなり大きい。また彼は羊毛のタフト法を用いて境界層の剥離点を調べており、その結果、滑らかな球の場合、亜臨界レイノルズ数において 82° 、超臨界レイノルズ数において 120° であり遷移レイノルズ数においてもこの角度は変わらないことを示している。一方、粗さの影響については臨界レイノルズ数は小さくなるが、剥離点角度はそれほど変化しないことを示した。これによると滑らかな球では臨界レイノルズ数を過ぎても、それほど剥離点が前進しないが、表面粗さのある球では剥離点の急速な前進が見られる。これは抗力係数の増加の大きさとも良く一致している。

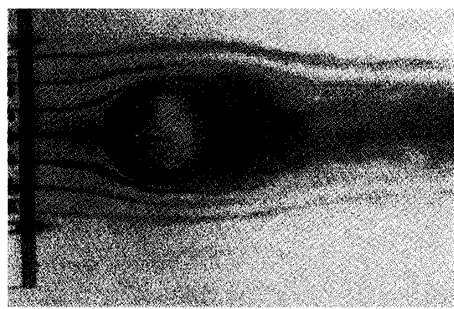
ディンプルについての研究は木村¹⁵⁾らの研究に詳述されているが、臨界レイノルズ数は粗さに比べて更に小さくなることを示した。ただし、抗力値はむしろ粗い球のほうが小さくなるという結果を得ている。

3. 3 球の可視化実験

剥離点は円柱実験の場合と同様、染料注入法によって渦み点を通る流線から測定を行った。図7の滑らかな球においては 80° 附近で剥離し、図8のディンプル球において剥離点は 120° 附近に後退している。



(a) 滑らかな球 $Re=6 \times 10^4$

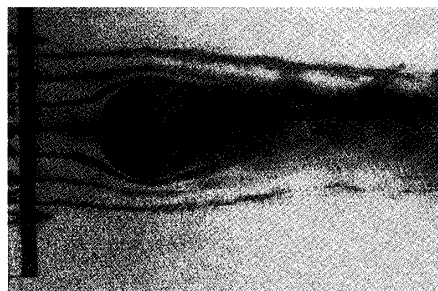


(b) 滑らかな球 $Re=1.2 \times 10^5$

図7 滑らかな球の後流



(a) ディンプル球 $Re=6 \times 10^4$

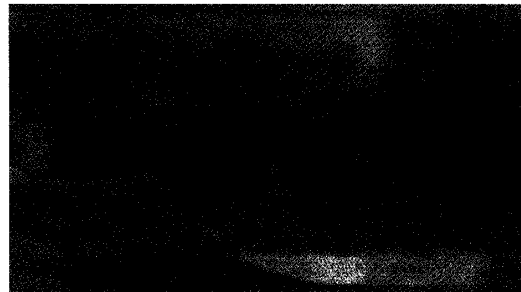


(b) ディンプル球 $Re=1.2 \times 10^5$

図8 ディンプル球の後流

球後流においてもカルマン状の渦列が発生することをビデオカメラによる撮影で確かめることができた。撮影に際し、ストップウォッチも同時に撮影し渦発生周波数を測定することによってストローハル数を算出する。直径12.5[mm]と25.5[mm]の球を用い、レイノルズ数を 1.5×10^3 から 3×10^3 の範囲で測定を行った結果、円柱の約2倍のストローハル数0.475～0.528の値を得た。

球の後流については、図9（a）の場合、図6に示すアーヘンバッハの実験結果に比較的類似した渦列を観測することができた。しかし、概ね渦列の発生パターンと周期は二次元カルマン渦列に比して不規則であり、常に彼の実験パターンが現れるとは限らない。渦の周期的な発生は常に生じているが、そのパターンは複雑であり、アーヘンバッハの場合のように同一方向に渦輪が発生することは稀であり、図9（b）の場合は渦輪の位置が不規則で側面から見た場合、渦列の幅は不規則で凹凸状の列をなす。また時には螺旋状の渦も観測された。



（a）直径12.5φの球 $Re=1.5 \times 10^3$

（b）直径25.5の球 $Re=3 \times 10^3$

図9 球の後流における渦列

4. 結 言

本研究では鈍頭物体の代表的な形状である球および円柱の後流の可視化測定を行った。円柱の研究については非常に精密な実験研究がすでに多くなされている。ここでは従来の実験結果との比較を主な目的とし、それにより本実験で行った可視化技術の妥当性を確認し、球模型への実験に適用しようとするものである。実験は剥離点位置の測定、ストローハル数の測定、球模型後流の観測に重点を置き、抗力などの定量測定は行わなかった。結論は次のとおりである。

- （1）染料注入法は流線測定に適しており、流線が物体から離れる位置によって剥離点が決定できるが、この他、剥離点において流れが逆流しているため、油膜法と同様に染料が剥離点位置で澱みを生じ、それによって剥離点に沿って濃い染料の線が現れる。この線による測定のほうが流線の剥離を観測するより精度が高い。
- （2）水素気泡法を用いて剥離点を測定する方法は、剥離点直後で球表面上の流れが逆流するため、気泡のタイムラインによって容易に剥離点を見出すことができる。 1.5×10^3 から 3×10^3 の亜臨界レイノルズ数範囲内で測定を行った結果、球模型の剥離点として 80° が観測された。
- （3）球模型後流にも規則的な渦列が生じることが見出された。これらの渦列は周期的ではある

が列形そのものは非常に複雑である。カルマンの渦列のように直線的な配列（アーヘンバッハの実験結果）の場合もあるが、これが捩れた形状を示すもの、あるいは螺旋状と思われるものなどが観測された。

- (4) 球のストローハル数の測定結果としては、かなりのばらつきがあったが、ストローハル数 $Sr=0.475\sim0.528$ で円柱の約2倍の結果を示した。

参考文献

1. 今井功「流体力学」、裳華房、1973
2. Wu, T., Y., "Inviscid Cavity and Wake Flows", Basic Development in Fluid Dynamics I, 1965, Academic Press.
3. Bearmann, P.W. and Harvey, J.K., "Golf ball aerodynamics", Aeronautical Quarterly, 1976, pp.112-122
4. 木村雄吉、葛原道久ら：「表面に円弧状の溝がある円柱まわりの流れ」、可視化情報、Vol.10, Suppl.No.1, p73-78, 1990
5. 藤本武助、「流体力学」、養賢堂、1974
6. Goldstein, S., ed., "Modern Developments in Fluid Dynamics", Vol.1, Dover, 1965
7. Roshko, A., "Experiments on the Flow past a Circular Cylinder at very high Reynolds Number", J. Fluid Mech., 1961, Vol.10, pp.345-356
8. Achenbach, E., "Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re=5\sim10$ ", J. Fluid Mech., 1968, Vol.34, part 4, pp.625-639
9. Achenbach, E., "Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder", J. Fluid Mech., 1971, Vol.46, part 2, pp.321-335
10. Guven, O., Farell, C., & Patel, V.C., "Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinders", J. Fluid Mech., 1980, Vol.98, part 4, pp.673-701
11. Nkamura, Y., & Tomonari, Y., "The effect of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers", J. Fluid Mech., 1981, Vol.123, pp.363-378
12. Achenbach, E., "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers", J. Fluid Mech., 1972, Vol.54, part 3, pp.565-575
13. Achenbach, E., "Vortex shedding from spheres", J. Fluid Mech., 1974, Vol.62, part 2, pp.209-221
14. Achenbach, E., "the effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres", J. Fluid Mech., 1974, Vol.65, part 1, pp.113-125
15. Kimura, T. and Sumiyama, M.: "A Statistical Study on Reduction of Drag Force for Golf Balls", 福井工大研究紀要第34号(第一部), pp99-106, 2004.3

(平成17年12月1日受理)