

ゴルフボールのディンプル数 に対する飛翔特性と流れ

大池 敦夫*¹・青木 克巳*²・山口 清大*³

Effect of Dimple Number on Flying Characteristics and Flow Pattern of Golf Ball

by

Atsuo OHIKE, Katsumi AOKI and Kiyonaga YAMAGUCHI

(Received on Sep. 28, 2001 & accepted on Dec. 19, 2001)

Abstract

The flying distance of a golf ball is known to be affected by the initial velocity and the spin given at the time of impact, the aerodynamics resistance during flying time. As far as the flight of the golf ball is concerned, the studies of the aerodynamics characteristic and the spin rate decay have been reported. However, there is no study to make clear the relation between the flying characteristics and the number of dimples; they are the important factors for decreasing the aerodynamic resistance and increasing the flying distance. The aim of this study is to clarify the relation between the flying characteristics and the changes of the number of dimples, the depth of dimple. The number of dimples is changed from 0 (smooth) to 728 using the test ball. The drag and lift acting on a ball in a uniform airflow are measured by changing Reynolds number. From these results, it is found that the critical region tends to shift toward the lower Reynolds number, as the number of dimples increases. The flow around the ball is also visualized, and it is found that the separation point and flow pattern are made clear.

Keywords: Golf Ball, Number of Dimples, Drag and Lift Coefficient, Aerodynamics Characteristics, Visualization

1. はじめに

ゴルフボールの飛距離（弾道）は、インパクト時に得られる初期条件（ボールの初速度・スピン・打ち出し角）や、打撃後の初期条件に起因する空力特性および風などの環境条件により決まる⁽¹⁾とされており、これまでにゴルフボールの空力特性に関する研究としては、Bearman and Harvey⁽²⁾や Smits and Smith⁽³⁾などによって、実際のゴルフボール等を用いた場合の揚・抗力特性や回転数の減衰などについての報告はある。しかし、ボールの表面に施されているディンプル構造が飛翔特性にどのように影響を及ぼすか関連付けを行った報告は見当たらない。

ゴルフボールのディンプルは、空気抵抗を減らし、飛距離を増加させることで知られている。これはボールのような非線形の物体では、主として圧力抵抗が支配的で、球体や円柱表面に溝などの表面粗さを付けることにより、表面上の境界層が乱され、層流から乱流へと遷移し、表面上の剥離点が後退し、物体後方の後流領域が小さくなる結果として、抗力が減少する効果があると言われており^{(4),(5)}、著者らの実験結果においても明らかである⁽⁶⁾。

また、ボールの進行方向に対して直交方向に働く揚力に関しては、回転が伴った場合マグヌス効果により発生することは知られているが、回転していない場合における揚力発生メカニズムは、まだ完全に究明されたわけではない。

本研究ではゴルフボールの飛翔特性の基礎研究として、まず非回転時におけるディンプルの数および深さに対する飛翔特性を明らかにするため、球体表面に104~728個のディンプルを規則的に配列させ、一様流中においてレイノルズ数を変化させたときの抗力と揚力を測定し、これらの揚・抗力特性時における流れ様式や剥離点を、PIV並びに可視化実験により明らかにする。

2. 実験装置および方法

2.1 供試球体

供試球体は塩化ビニル製で、実際のゴルフボールと同様である直径42.6 mmの球体表面に、Fig.1に示すようなディンプルを規則的に配列させている。本研究では、滑面球とディンプルの幅に対する深さの比 k/c (0.096) を一定としてディンプル数 N_D を104~728まで変化させた球体と、 $N_D=328$ においてディンプルの深さ k だけを変化させた球体 [$k/c = 0.183$] を設計・製作した。また、これらのディンプル付き球体における主要諸元はTable 1に示している。なお、ここでの b はディンプル間距離、 c はディンプルの幅を示す。

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期

* 2 工学部機械工学科教授

* 3 横浜ゴム株式会社

Table 1 Specifications of Spherical Surfaces

| N_D | b [mm] | c [mm] | k [mm] |
|---------|----------|----------|----------|
| smooth | | | |
| 104 | 3.897 | 3.528 | 0.338 |
| 184 | 2.043 | | |
| 328 | 0.650 | | |
| 408 | 0.446 | 3.268 | 0.311 |
| 504 | 0.297 | 3.046 | 0.292 |
| 728 | 0.260 | 2.526 | 0.242 |
| 328deep | 0.650 | 3.528 | 0.646 |

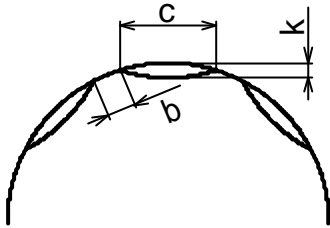


Fig. 1 Sectional-view of Dimple

2.2 実験装置

実験装置は Fig. 2 に示すように、風洞は空気力学的測定および流れの可視化を行う目的で製作された吸い込み型風洞を使用し、抗力・揚力測定装置は、この風洞のテストセクション中央部にフレームが覆い被さる二重構造になっており、供試球体はピアノ線を介してテストセクションの中央に配置させ、両固定端にテンションを加えたピアノ線が張られている。これにより球体そのものに働く抗力 D と揚力 L を、中軸型 3 分力検出器により測定した。なおピアノ線の直径は、1/16 inch [1.58 mm] であり、抗力測定における干渉効果が無視できる範囲のピアノ線を使用した⁽³⁾。

2.3 測定方法およびデータ処理

実験では風洞の流速 u [m/s] を約 10~45 m/s (レイノルズ数 $Re=ud/\nu$ $0.29 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$) の範囲で変化させて測定を行った。測定方法としては中軸型 3 分力検出器により、サンプリング周期 1.25 ms として、1,600 個の歪みを測定し、この歪みは電気信号に変換され、A/D コンバータを介してコンピュータで処理し、得られた歪みデータの平均値より D と L を算出する。そして算

出された D, L を次式にそれぞれ代入することにより、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L を求める。このとき、実験装置で説明したように本研究ではピアノ線の干渉効果は無視できるが、 C_D や C_L の測定値には多少影響が出るので、予め測定を行ったピアノ線だけの測定値を引いた値を実験値として算出した。

$$D = C_D \cdot A \cdot r \cdot \frac{u^2}{2} \text{ [N]} \dots \dots \dots (1)$$

$$L = C_L \cdot A \cdot r \cdot \frac{u^2}{2} \text{ [N]} \dots \dots \dots (2)$$

なお、この式における A [m²] は球体の投影面積、 ρ [kg/m³] は空気密度である。

2.4 PIV 並びに可視化実験

PIV 計測手法 PIV (Particle Imaging Velocimetry) では、風洞の吸い込み口から流したトレーサ粒子 (スモークオイル) にテストセクション側面から YAG レーザ (30mJ, Double YAG, 150Hz) を照射し、CCD カメラで捕らえた粒子画像から速度ベクトルや渦度を計算することにより、球体後流域の流れの解析を行った。

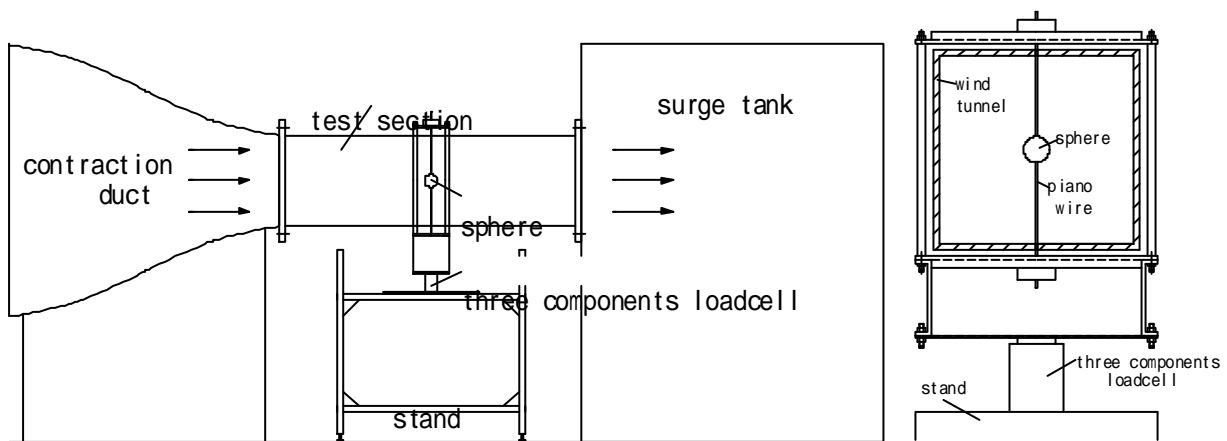
可視化実験 (油膜法) 油膜法では、油として流動パラフィンとアマニ油、顔料に二酸化チタン、分散材にはオレイン酸を用いて、これらの混合液を、球体表面に刷毛を用いて薄く一様に塗布した。

3. 実験結果および考察

3.1 抗力係数

Fig.3(a) は、滑面球およびディンプルの大きさが等しい $N_D=104\sim328$ の球体 ($c, k = \text{const.}$) における Re の変化に対する C_D の関係を比較している。

はじめに、本実験の Re 範囲における滑面球の測定では、 C_D 値が 0.4 ~ 0.5 の間で安定する亜臨界領域であることが分かり、これは他者の実験結果⁽⁵⁾ともほぼ一致している。一般に滑面球は $Re=3.5 \times 10^5$ 前後で臨界領域に達して C_D は 0.1 以下に減少し、さらに高い Re になると C_D が 0.2 に漸増・漸近する超臨界領域になると言われている。



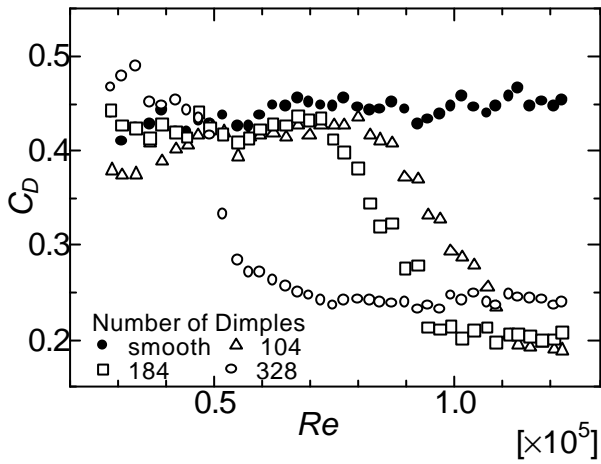
(a) Outline
(b) Sectional-view
Fig. 2. Measuring Equipment of Drag and Lift

これに対し球体表面にディンプルを施した場合，何れの球体であっても滑面球の結果と同様に Re の変化に対し C_D 値が 0.45 付近で安定する亜臨界領域， C_D 値が急激に減少する臨界領域， C_D 値が 0.2 付近で再び安定する超臨界領域の存在が確認できる．そして滑面球とディンプル付き供試球体を比較すると，滑面球

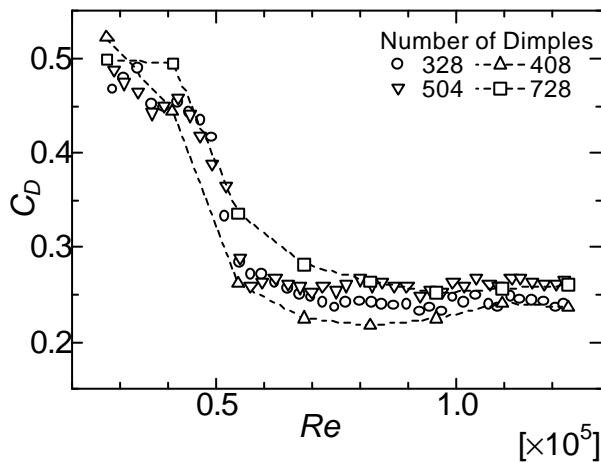
に比べて臨界領域が低 Re 側に移動することが分かる．しかも $N_D=104\sim 328$ においては N_D が増えるに従い，臨界領域はより低 Re 側に移動することも分かる．またそれだけではなく，亜臨界領域や超臨界領域での C_D 値が同一 Re において大きくなる傾向を示しており，さらに臨界領域の Re 範囲が狭くなる (C_D が減少する傾きが大きくなる) 傾向があることも推察できる．ここで，臨界領域が滑面球に比べ低 Re 側に移動することは，ディンプルの影響により球体表面の境界層が乱され乱流遷移することにより，剥離点が後方にずれ込むためと考えられる⁽⁵⁾が， N_D の影響により臨界領域が移動するメカニズムなどについては，今後の究明が必要である．

Fig.3(b) の $N_D=328$ 以上においては， Re に対する C_D の変化の傾向がほぼ一致するが，値に関しては N_D を増やしすぎると C_D 値が大きくなるのが推察できる．これらのこともメカニズムについては，まだ明白ではない．

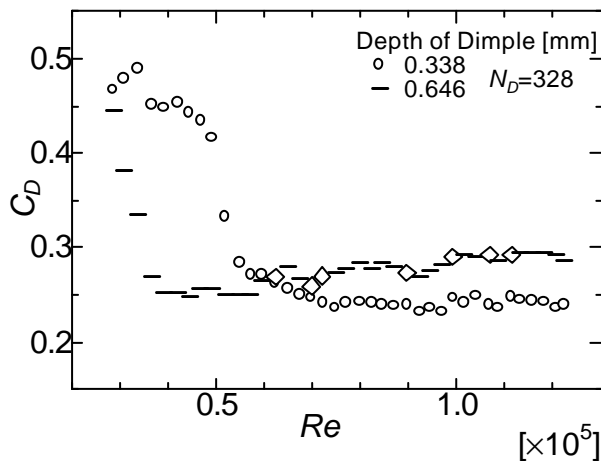
Fig.3(c) は， $N_D=328$ において深さだけを変化させた場合は，ディンプルを深くすると臨界領域は低 Re 側に移り，また超臨界領域における C_D 値は大きくなるのが分かる．これはディンプルが深いほどディンプル内の流れの影響が大きく，比較的 low Re 側において乱流遷移する傾向があり，また浅くなるとその影響が少なくなるため，超臨界領域で C_D 値がより小さくなると考えられる．



(a) Effect of Number [$c, k = \text{const.}$]



(b) Effect of Number [$k/c = \text{const.}$]



(c) Effect of Depth [$N_D=328$]

Fig. 3 Change of Drag Coefficient to Reynolds number

3.3 揚力係数

Fig.4 は， $N_D=184$ における Re に対する C_D と C_L の変化を示したもので， C_L 値は亜臨界領域である $Re 0.6 \times 10^5$ 以下の場合と，超臨界領域である $Re 0.9 \times 10^5$ 以上の場合には， $C_L=0$ と見なせるのに対し，臨界領域内で特に領域の変わり目では C_L 値の変動が大きくなり，中でも亜臨界から臨界領域への変わり目である $Re 0.7 \times 10^5$ で C_L がピーク値を示し，揚力が発生していることが考えられる．これは臨界領域内の Re 範囲では，流れの剥離が層流剥離から乱流剥離に遷移する不安定な領域であり，ピアノ線を軸とした場合の左右のどちらか片側の面では層流剥離であるのに対し，反対側では乱流遷移が起こり，剥離泡が生成されて乱流剥離をなし，左右非対称な流れになるため〔定常〕揚力が発生すると考えられる．

また以上に記したことは， N_D が 184 以外の場合でもほぼ当てはまることが確認できた．

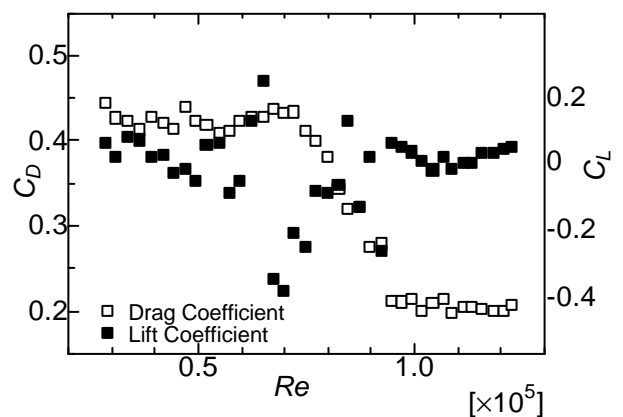


Fig. 4 Comparison of Drag and Lift Coefficient to Reynolds number [$N_D=184$]

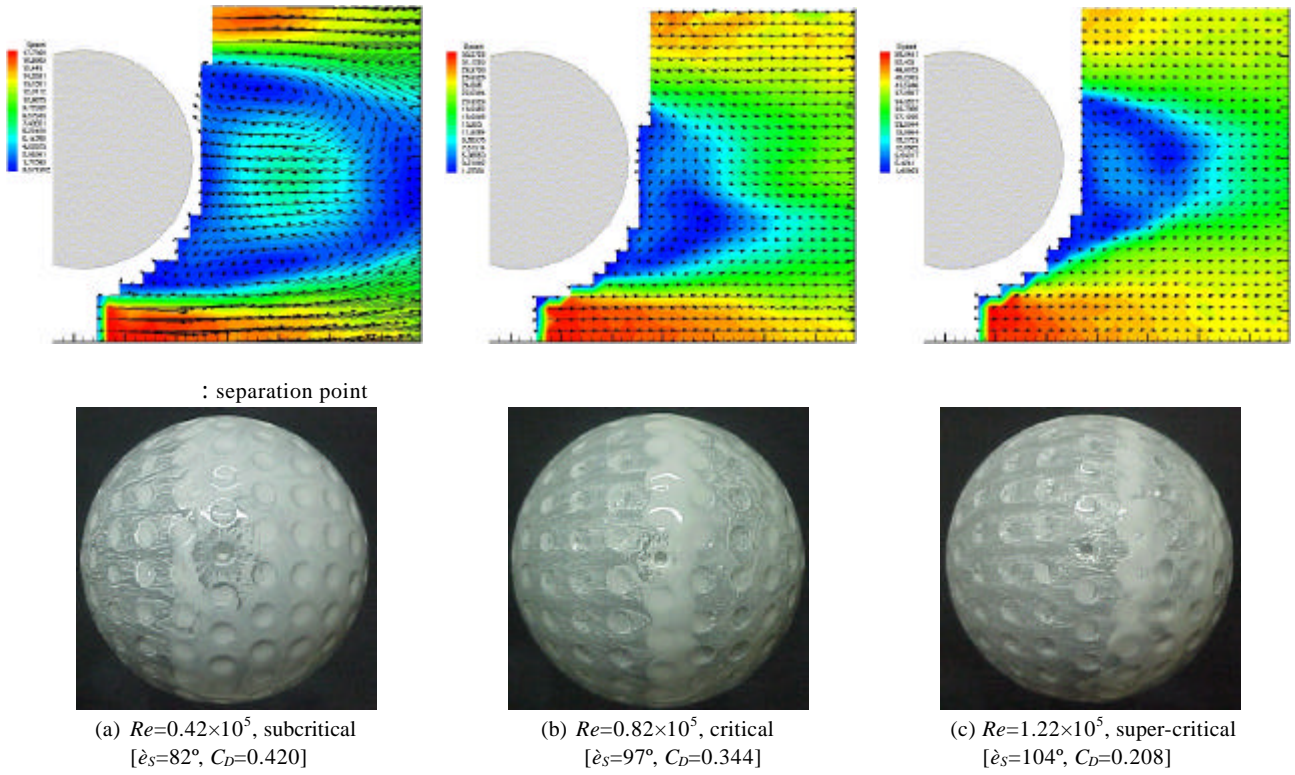


Fig. 5 Visualization around Sphere by PIV and Oil Film Method [$N_D=184$]

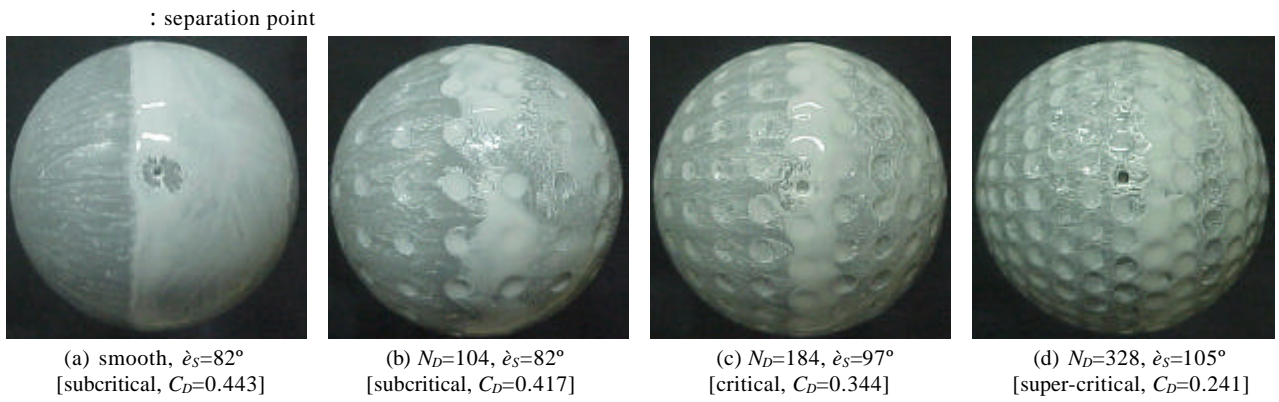


Fig. 6 Visualization of Separation Point by Oil Film Method [$Re=0.82 \times 10^5$]

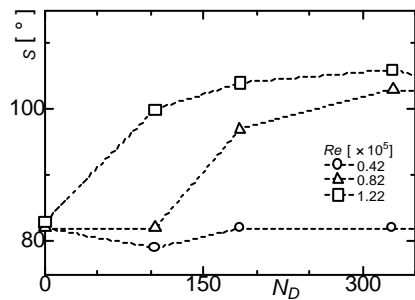


Fig. 7 Separation Point to Number of Dimples

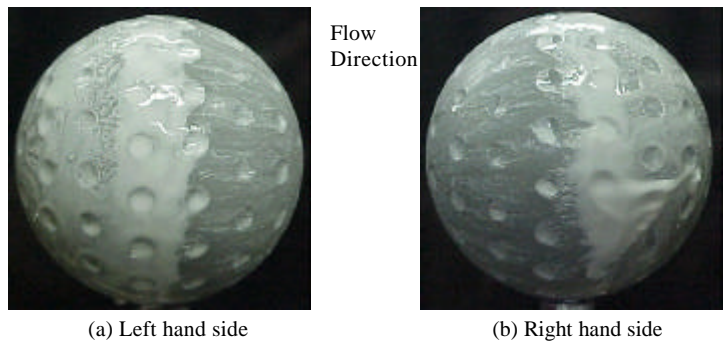


Fig. 8 Visualization of side-view of Sphere by Oil Film Method [$N_D=184$, $Re=0.82 \times 10^5$]

3.4 PIV 並びに可視化実験による観察

Fig.5(a)~(c)は $N_D=184$ において $Re=0.42, 0.82, 1.22 [\times 10^5]$ と変化させたときの, PIV による速度分布の解析結果と油膜法による剥離点の観察結果であり, Fig.3(a)と合わせて比較すると以下のことが分かる. まず球体の表面まわりの流れや剥離点を観察した油膜法においては, 亜臨界領域のとき剥離角 θ_s (剥離点 separation point の角度) が約 82° であるのに対し, 臨界領域では θ_s が 97° 付近まで後退しており, さらに超臨界領域になると θ_s は 104° 付近までずれ込んでいることが分かる. 次に速度の大きさをカラー分布, 方向をベクトルで表示した PIV による流れ解析においては, 以下に記すようになる. なお, カラー分布の赤色は最大流速を示し, 青色に近づくにつれ流速は遅くなる. このことを踏まえると, 亜臨界領域では逆流領域である後流領域の長さ (x 方向の大きさ) は球体直径 d_s の $1.5 \sim 2$ 倍程度の大きさとなり, 幅 (z 方向の大きさ) は d_s と同程度の大きさになることが分かり, 臨界領域では後流領域の長さともども d_s の半分程度の大きさまで小さくなり, これに加えて後流分布の形が崩れていることから, 3.2 で記したように流れの剥離が不安定であることも分かる. また, 超臨界領域では後流領域の大きさは臨界領域のときとあまり変わらないが, 後流は安定にしていることが分かる. 以上のことより, N_D が同じ球体においても領域が変わると剥離点は後方に移動し, その結果として後流領域の範囲が減少するために, C_D が減少することが確認できる.

Fig.6(a)~(d)は $Re=0.82 \times 10^5$ において滑面球と N_D を $104, 184, 328$ と変化させたときの油膜法による剥離点の観察結果であり, Re が同一の場合でも N_D の変化により θ_s に違いが生じることが分かる. また $Re=0.82 \times 10^5$ 以外の観察結果も含めて, N_D に対する θ_s の変化についてまとめた図が Fig.7 である. この図より θ_s は, 亜臨界領域では 82° 前後であり, 臨界領域のとき 82° から 100° 付近となり, 超臨界領域では 105° 前後となることが分かる.

Fig.8 は $N_D=104$ での臨界領域における油膜法の観察において, 流れの上流から見て左側から撮った(a)の写真と右側から撮った(b)の写真を比較したもので, 油膜の剥がれ方が左右で異なることが確認でき, 剥離点も(b)のほうが後方にずれていることも分かる. これらのことより 3.2 で記したように, 臨界領域では非対称な流れになり, その結果として揚力が発生すると考えられる. この流れの非対称性については, 球を下流側から支持棒で支えた神谷らの報告⁽⁷⁾でも, 煙法の実験によって気流に偏りが生じることが論じられている.

4. まとめ

- 一様流中において Re を変化させたときの供試球体の揚力・抗力測定, 可視化実験を行った結果, 以下のようなことが分かった.
- (1) 規則的なディンプルを施すことにより, 臨界領域が滑面球に比べて低 Re 数側に移動する.
 - (2) N_D が $104 \sim 328$ の球体においては, N_D が増えるに従い, 臨界領域は低 Re 数側に移動する.
 - (3) $N_D=328$ 以上の球体においては, Re に対する C_D の変化の傾向がほぼ一致する.
 - (4) ディンプルを深くすると, 臨界領域は低 Re 数側に移り, また超臨界領域における抗力係数 C_D は大きくなる.
 - (5) 臨界領域内, 特に領域の変わり目では, C_L の変動が大きくなり揚力が発生する.
 - (6) N_D が同じ球体においても領域が変わると, 剥離点は後退し, その結果として C_D が減少する.
 - (7) θ_s は, 亜臨界領域のとき 82° 前後であり, 臨界領域では 82° から 100° 付近, 超臨界領域になると 105° 前後となる

参考文献

- (1) 力石利生, ボールのあたりと飛び, 日本機械学会誌, Vol. 95, No. 888, (1992), 997-1000
- (2) P. W. Bearman and J. K. Harvey, Golf Ball Aerodynamics, Aeronautical Quarterly 27 (1976), 112-122
- (3) A. J. Smits and D. R. Smith, A new aerodynamics model of a golf ball in flight, Science and Golf (1994), 340-347
- (4) 沖真・末廣益三・青木克巳・中山泰喜, 溝つき円柱まわり流れの数値シミュレーション-溝なし円柱との比較-, 可視化情報, 13-48 (1993), 44
- (5) 岡本史紀, 流体力学 (1995), 森北出版, 167-170
- (6) A. Oike, K. Aoki, K. Yamaguchi and Y. Nakayama, Flying Characteristics and Flow Pattern of a Sphere with Dimples, PSFVIP-3, (2001), F3098
- (7) 神谷信彦・渡辺京司・田村篤敬・岩崎昭人・藤田敏美, 臨界レイノルズ数における球に働く空気力の変化, 「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集 (第 17 回・第 18 回), 航空宇宙技術研究所特別資料 33 号, 89-92