

ラグビーボールの短軸まわりの自励回転運動

高橋 直子^{*1}・小林 修^{*2}・瀬尾 和哉^{*3}

Auto-rotation around Short Axis of Rugby Ball

by

Naoko TAKAHASHI, Osamu KOBAYASHI and Kazuya SEO

(Received on Sep. 4, 2007 & accepted on Jan. 10, 2008)

Abstract

It has been observed that a rugby ball, which is set to be able to rotate freely around its short axis in a wind tunnel, starts to rotate automatically when air flows through the wind tunnel. The rotation speed increases to about 600 rpm at airspeed of 25m/s. The purpose of this paper is to clarify the mechanism of auto-rotation of a rugby ball. In order to examine this phenomenon, wind tunnel tests were carried out to measure rotation speeds and static aerodynamic forces, and oil flow test was used to visualize the flow on the surface of a rugby ball. The results of the experiment revealed that the seam lines on a rugby ball are a major factor in inducing the boundary layer transition, and the resulting asymmetrical flow pattern is attributable to the auto-rotation phenomenon. In addition, it is estimated that the distortion of the cross-section shape of rugby ball and another blow-off area on the separation flow region contribute to the complicated aerodynamic characteristics.

Keywords: Rugby ball, Auto-rotation, Wind tunnel test

1. はじめに

ラグビーボールには Fig.1 に示すように太い縫い糸のレースと、4つの外皮面を繋ぎ合わせている細い溝のシームが4本ある。Fig.2のようにレース部を前面にして、ボールの中心を通る短軸まわりに自由回転できるようにし、これに前方から風を送るとボールが自然に回転を始めるという現象が発生することが確認された。一度回転を始めると風速の増加に伴い回転数は増加していき、一定の回転数に落ち着く現象が認められた。例えば風速 25m/s での自励回転運動は一秒間におよそ 10 回転(600 rpm)という高速回転であった^{1, 2)}。

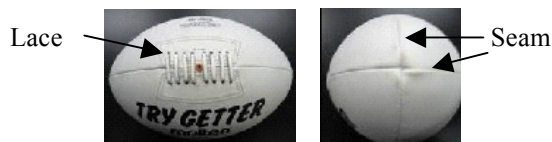


Fig.1 Rugby ball



Fig.2 Experiment for auto-rotation in short axis

このラグビーボールの自励回転運動の発生メカニズムについて仮説を立て、いくつかの風洞実験を行い、それらのデータからこの自励回転現象仮説の成立性について検討を試みる。なお、こうした自励回転現象は風車などへの応用も考えられる。

2. 自励回転運動を発生し得る揚抗特性

2.1 回転運動に対する空気力の寄与

ラグビーボールが自励回転運動を起こすとしたら、どのような揚抗特性を持っているのかを推測し、仮説を立てる。

短軸周りに回転（以下、短軸回転）し得る状態のラグビーボールが、短軸回転軸に平行な風が風洞から吹いてくるように、風洞内に回転しない状態で設置されているとする。Fig.3はそのときのラグビーボールの長軸に垂直で、回転軸から離れた任意の断面であり、風洞前方からの風による一様流に対してレース部のシームがなす角を取り付け角 θ とする。なお、この回転しない状態でのボールのレース部シルラインを基準軸とする迎え角 α はすべての任意の断面で θ に等しい。

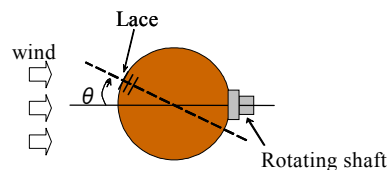


Fig.3 Rugby ball and uniform wind in wind tunnel

* 1 東日本旅客鉄道(株)
* 2 工学部航空宇宙学科教授
* 3 山形大学地域教育文化学部准教授

ラグビーボールが短軸回転をすると、ボールの各断面には風洞内一様流の風の他に、ボールの短軸回転による風が当たること

になる。両者を合成した風がボールに向かってくるので、各断面での迎え角は変化する。その変化量を $\Delta\alpha$ とすると、短軸回転中のボールのレース部シルを基準とした迎え角 α は次式で表される。

$$\alpha = \theta + \Delta\alpha \quad (1)$$

この $\Delta\alpha$ の値は各断面の短軸回転中心から距離に比例し、短軸回転中心を境にして符号も変わる。

回転中のラグビーボールの短軸回転中心から離れたこうした各断面にその回転方向に向かう空気力成分が発生すれば、さらに短軸まわりに回転を促進させるモーメントが得られ、自励回転が生じるはずである。ラグビーボール全体の短軸回転中心まわりのモーメントはこうした断面の回転方向の力成分とその断面の短軸回転中心からの距離を乗じたものの積分で表される。つまり自励回転運動について検討するためには、各断面での空気力の特性、即ち揚抗特性を知る必要がある。

Fig. 4 (a)~(c)は、取り付け角 $\theta = 0$ の状態、風洞風上側から見て時計回りの短軸回転しているラグビーボールを長軸方向から見たものであり、短軸回転軸よりも手前の断面を図示している。この断面は回転によって図の下方への速度を有し、下から上への風を受け、一樣流との合成風は $\Delta\alpha$ だけ斜め下方から向かってくることになる。

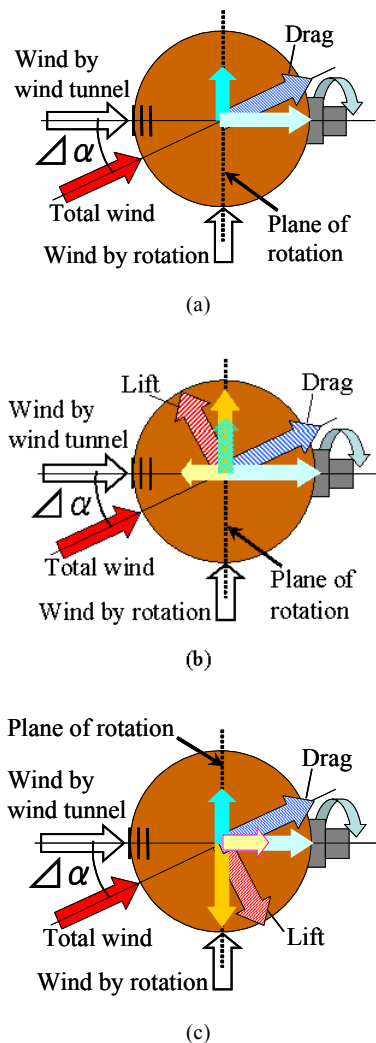


Fig.4 Wind and aerodynamic forces

以下に、Fig.4 (a)~(c)を用いてに空気力(揚力と抗力)が発生し得る3種のケースを想定して、それぞれのケースと自励回転発生との関係を考えてみる。

ケース①: ラグビーボールに、Fig.4 (a)のように、抗力のみが働くとしたケースである。この抗力を分解して回転面方向(図の上下方向)成分の力を求めると回転運動を抑制する方向の力となる。即ち、図では下方に動く断面に上向きの力成分が発生し、回転運動を抑制する力となる。従って、抗力だけではラグビーボールが自励回転運動を起こすことはない。

ケース②: 抗力以外に揚力も発生するが、回転による迎え角 α の増大とともにその揚力が正符号方向に増加するケース。即ち、迎え角に対する揚力勾配が正であるケースを想定する。この場合は、Fig.4 (b)に示すように、回転運動に伴い発生する揚力の回転面方向成分は上記の抗力と同じように回転運動を抑制する力となる。このように、揚力勾配が正の場合も、ラグビーボールが自励回転することはない。

ケース③: 抗力に加えて、前記ケース②とは逆に、迎え角に対する揚力勾配が負(逆勾配)となる”負の揚力”が発生するケースを想定する。この場合はFig.4 (c)に示すように、その揚力を分解すると、回転を促進する力成分が作用することがわかる。この揚力による回転促進力が抗力による回転抑制力よりも大きい場合、この断面は短軸回転中のボールをさらに回転させるモーメントを生じ、自励回転を発生させる。従って、自励回転が発生し得るかどうかはこのように断面の揚力勾配が負(逆勾配)となるかどうか依存するといえる。

2.2 自励回転運動を誘起する断面空力特性の条件

前節の検討により、迎え角に対する揚力勾配が負で、かつ揚力の回転促進成分が抗力の回転抑制成分よりも大きくなるラグビーボール断面は自励回転を誘起することがわかった。本節では、ラグビーの回転運動に伴い局所迎え角変動を考慮に入れて、自励回転を誘起する断面空力特性の条件式を求める。

Fig.5 (a)に取り付け角 θ がゼロでない一般的なケースを示す。図のように、長軸に垂直な任意の2断面(AとB)の組み合わせを考える。Fig.5 (b)および(c)はそれぞれFig.5 (a)で矢視の方向から見たときのA断面とB断面を示す。ボールの回転方向はどちらでも良いが、Fig.5では風洞前方からみて時計まわりに回転している場合を示している。なお、AとBの断面は短軸回転中心を挟んで対称な位置にある。

無回転状態で風洞からの風を受けているときのラグビーボールに働く揚力をL、抗力をDとする。また、回転運動によって発生する局所的迎え角 $\Delta\alpha$ による揚力と抗力の変化分をそれぞれ ΔL および ΔD とする。なお、Fig.5 (b)および(c)に示す揚力の矢印は揚力の正符号方向を示している。

短軸回転することによって、Fig.5 (b)に示すA断面では迎え角変化 $\Delta\alpha$ の発生して、揚力が $L + \Delta L$ に、かつ抗力が $D + \Delta D$ と変化する。また、Fig.5 (c)のB断面ではA側と逆符号の $\Delta\alpha$ が発生して、揚力と抗力はそれぞれ $L - \Delta L$ および $D - \Delta D$ となる。これらの力を分解し、各断面での回転を促進する方向の力成分(回転力)を求めると、それぞれ式(2)と(3)になる。

$$A \text{の回転力} = -(L + \Delta L)\cos\Delta\alpha - (D + \Delta D)\sin\Delta\alpha \quad (2)$$

$$B \text{の回転力} = (L - \Delta L)\cos\Delta\alpha - (D - \Delta D)\sin\Delta\alpha \quad (3)$$

従って、AとBの両断面に働く回転力は次式となる。

$$A \text{ と } B \text{ の回転力の和} = -2\Delta L \cos \Delta\alpha - 2D \sin \Delta\alpha \quad (4)$$

この回転力に回転中心から断面までの距離を乗じれば、A と B の両断面に働く空気力による回転モーメントとなる。即ち、回転力が正符号であれば、回転モーメントも正符号となり、回転を促進させることになる。

ここで、回転運動による局所迎え角が小さいと仮定すると

$$|\Delta\alpha| \cong 0 \quad (5)$$

となり、式(4)の回転力が正となるためには、条件式「 $-2\Delta L - 2D \cdot \Delta\alpha > 0$ 」が満足されねばならない。よって

$$\frac{\Delta L}{\Delta\alpha} < -D \quad (6)$$

式(6)は、回転運動によって発生する各断面の迎え角変化 $1rad$ あたりの揚力変化が $-D$ (抗力 D は常に正符号) より小さくなるという逆揚力勾配(迎え角増加に対して揚力減少)のときに、回転を促進する力がラグビーボールに働くことを示す。即ち、回転運動の静安定性が不安定になることを示す。従って、この条件がボール全体で満たされる場合は、ボール後方の剥離流の時間的変動による空気力変動などによって発生する回転運動擾乱をきっかけとして、ダイバージェンス運動、即ち自励回転運動が自然発生する。なお、自励回転運動の方向は定まっているわけではなく、偶然にそのきっかけを作った回転運動擾乱の方向になる。

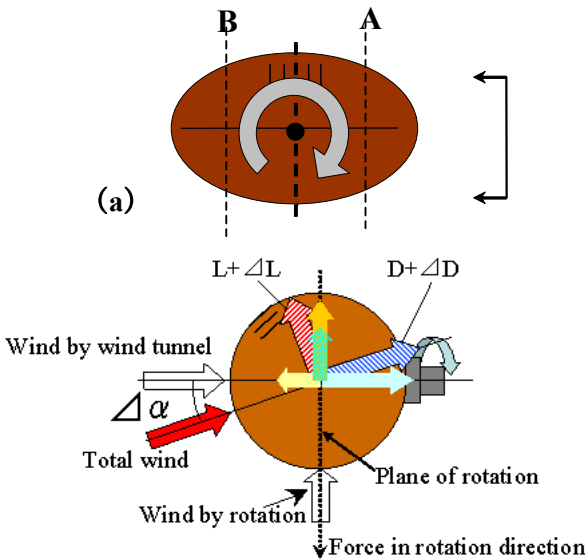


Fig. 5 Aerodynamic force of rugby ball on auto-rotation

ラグビーボールの回転中心からの距離の異なる各断面の迎え角変化に対する揚抗特性は同じではないであろうが、全体を概略把握するためには、いささか強引であるにしても、各断面での揚抗特性が全て同じパターンになるとみなして検討を進めていくことができよう。

3. ラグビーボールを用いた風洞実験

自励回転の発生メカニズムについて考察を行うため、実物のラグビーボールを用いて空気力測定、自励回転の回転数測定、オイルフローによる流れの可視化の三種の風洞実験を行った。風速は高回転の自励回転運動が確認された風速 $25m/s$ とし、レイノルズ数の違いによる影響については今回の研究対象から外した。実験には航空宇宙学科所有のゲッチング型大型低速風洞装置を使用し、空気力測定はストラット型六分力天秤装置を用いた。なお、レイノルズ数算定におけるラグビーボールの代表長さには短径 $185mm$ を用いている。

3.1 風洞実験内容

3.1.1 空気力測定

ラグビーボール全体の揚抗特性は各断面の揚抗特性パターンと大筋で相等しいとの仮定のもとで、Fig.6 (a)に示すように、ラグビーボールをその長軸が風洞一様流に垂直になるように風洞内に取り付けて、ラグビーボールの長軸まわりの取り付け角度を変えることにより各迎え角での静的な揚力と抗力の測定を行う。なお、Fig.6 (b)はこのラグビーボールを上から見た図であり、レース部シールと風洞一様流のなす取り付け角 (= 迎え角 α) を $2deg$ 刻みで $0deg \sim 180deg$, $0deg \sim -180deg$ の範囲で変化させ、揚力と抗力を測定する

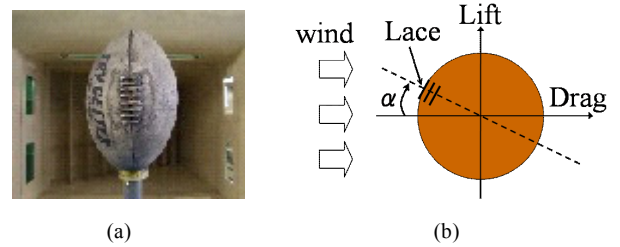


Fig. 6 Experiment for measuring lift and drag of rugby ball

3.1.2 回転数測定

ラグビーボールの短軸まわりにおける自励回転運動の回転数を測定する実験である。Fig.7に示すように、ラグビーボールを短軸まわりに自由回転できるように幅 $50mm$ の布製の面ファスナーを用いて固定する。そして取り付け角 θ を長軸まわりに $10deg$ 刻みで $0deg \sim 180deg$, $0deg \sim -180deg$ の範囲で変化させ、各角度 θ での自励回転運動の回転数をストロボスコープで測定する。なお、布ファスナーによるボール表面の変化による影響が気になるが、該当部分が短軸回転中心に近いことから、そこで空気力が変化してもそれによる回転モーメントとしてはそれほど大きくなく、検討への影響は小さいと見込んでいる。

3.1.3 オイルフローによる流れの可視化

ラグビーボールの表面近傍における流れ特性について情報を得

るため、ラグビーボールを第 3.1.1 項での空気力測定実験と同様の方法で風洞内に固定し、オイルフローによる流れの可視化実験を行う。ラグビーボール表面に満遍なく塗布した「流動パラフィンに酸化チタンを混合したもの」が風洞一様流によって表面上に描く模様を写真に撮影する。



Fig.7 Experiment for measuring revolution rate

3.2 実験結果と考察

空気力測定実験の結果を Fig.8 に示す。横軸は迎え角 α で、縦軸は空気力（揚力と抗力）である。迎え角変化に対して揚力は大きく変動し、抗力はほぼ一定の値となっている。

また Fig.9 に回転数測定実験を示す。横軸は取り付け角 θ であり、縦軸は1分あたりの回転数である。この実験結果からはボールの取り付け角に応じて自励回転が発生するところと発生しないところがあることが確認できる。なお、Fig.9 にて背景色を変えている取り付け角 $\theta = \pm 180 \text{deg}$ 付近の部分については、実験装置の都合上回転軸の確実な保持が困難であるため測定不能となった領域を示す。

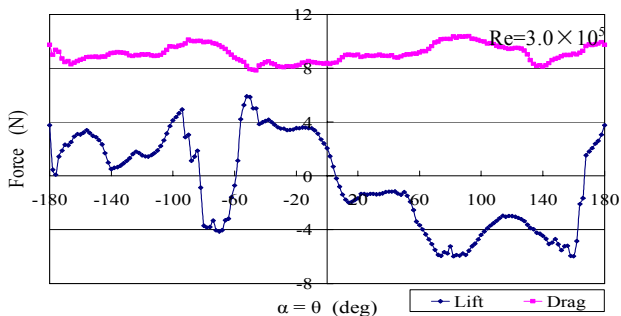


Fig.8 Lift and drag vs. $\alpha (= \theta)$ (Rugby ball)

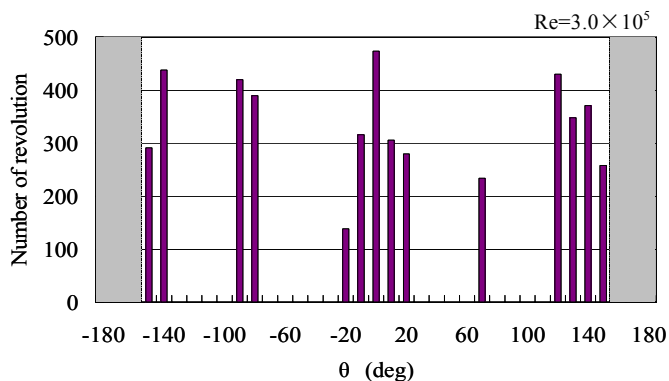


Fig.9 Revolution rate vs. θ

Fig.8 と Fig.9 を照らし合わせてみると、完全に一致しているわけではないが大まかには、揚力勾配が負かつ式(6)の条件を満たす角度周辺で自励回転運動が起きているのがわかる。

Fig.10 にオイルフローによる可視化実験の結果を示す。これらは風洞一様流と垂直な方向からのラグビーボール側面の写真であり、風洞一様流は写真左方から吹いている。

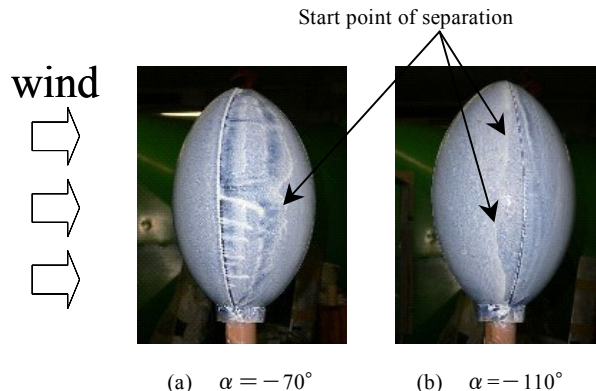


Fig.10 Result of oil flow experiment (rugby ball)

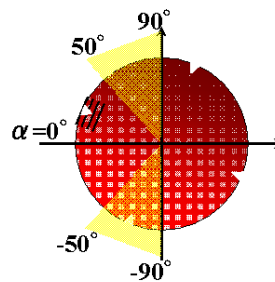


Fig.11 Area of boundary-layer transition by seam

Fig.10 (a)は、手前側のシーム位置が Fig.11 に示す $\alpha = -70^\circ$ 位置にある場合の写真である。これを見ると、シームを境に、それまで次第に厚くなってきた表面のオイルが急に吹き払われるように変化することから、シームによって層流境界層から乱流境界層へ強制遷移され、剥離点が後退しているのが確認できる（乱流剥離）。これに対して、流れに対するシーム位置が Fig.11 での $\alpha = -110^\circ$ になる場合の写真を Fig.10 (b)に示す。この場合、境界層遷移の発生はみられず、シーム位置よりも前でオイルを塗った刷け目があるまま残る領域が現れることが、即ち層流境界層のまま剥離することがわかる（層流剥離）。こうしたシームによる強制的な境界層遷移は4本のシームのうちいずれか1本が Fig.11 に示す範囲に、即ちボールの風上側先端から $\pm(50 \sim 90) \text{deg}$ の範囲に位置する場合に起こることが、オイルフロー実験で確認された。この範囲に同時に複数のシームが存在し得るのはある一本のシームが $\pm 90 \text{deg}$ の位置にある場合のみである。逆に一本のシームも存在しないのはいずれかのシームが $\pm(45 \sim 50) \text{deg}$ にあるときのみであり、それ以外は $\pm(50 \sim 90) \text{deg}$ の範囲のどちらか一方にシームが存在する。従って、ほとんどの迎え角範囲でボール片面でのみ剥離点後退が起これ、その非対称流れによる圧力差によって、剥離点後退側の半面方向の揚力が生じる。短軸回転中心を境にして回転運動により発生する迎え角変動 $\Delta \alpha$ の符号は逆になるため、Fig.5(a)での A 断面と B 断面では式(1)に示す迎え角 α の値が異なることになる。これにより、A 断面側と B 断面側では、シームが一方で迎え角範囲+

(50~90) deg に、他方は-(50~90) deg に入るなど、非対称な揚力を発生する状態が生じ得る。この非対称揚力が自励回転を促進あるいは抑制する役割を果たす。以上のプロセスが、オイルフロー結果から得られる自励回転の発生メカニズムである。

しかしながら、シームによる強制的な境界層遷移が短軸まわりの自励回転現象の主因であるとする、4本のシームがほぼ等間隔に存在しているので、揚力の発生パターンは迎え角変化に対して周期的、かつレース部が最前面に位置している原点まわりに点対称に近い形になるはずである。それにも拘らず、空気力測定実験の結果である Fig.8 に示される揚力パターンは迎え角 α 変化に対して非周期的かつ非対称となっており、非常に複雑である。空気力測定実験と回転数測定実験の結果から負の揚力勾配であり、かつ式(5)が満たされる範囲で自励回転運動が起こることが明らかにされたが、ラグビーボールの空力特性が何故 Fig.8 のようになるのかはオイルフロー実験の結果だけでは説明できない。ボールの断面がきれいな円形ではないこともその要因かもしれないし、他にも影響を与えるものがあるかもしれない。そこで、ボールの空気力特性に影響を与える他の要因を探るために、次章に述べるように、円柱と楕円球とにシールに相当する溝を付けた供試体を作成して風洞実験を行い、ラグビーボールの空気力特性と比較検討する。

4. 円柱と楕円球を用いた風洞実験

表面に 90deg おきに計 4本の溝（シーム）を持つ円柱および楕円球を用いて空気力測定を行う。溝は幅と深さともに約 1mm とした。また、楕円球ではラグビーボールと同様に流れの可視化も行う。ラグビーボールとの大きな相違点としてレース部がないことおよび断面がほぼ円形であることがあげられる。

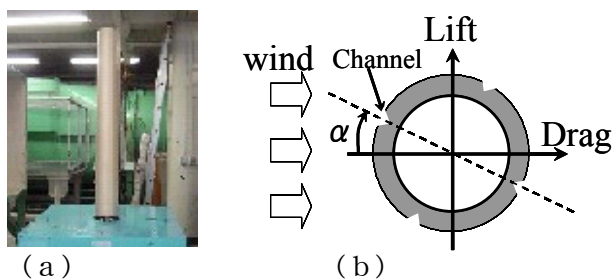


Fig.12 Experiment for measuring lift and drag of cylinder



Fig.13 Wind tunnel model based on elliptic shaped body

4.1 風洞実験の内容

4本の溝を有する円柱を用いた実験では空気力測定のみを行う。円柱は Fig.12 (a)のように風洞吹出し口の高さ 1000mm に対し 1300mm の長さがあり、直径は 156mm である。Fig.12 (b)に

示すように一様流とある特定した一本の溝がなす角を迎え角 α とし、ラグビーボールと同様に揚力と抗力を測定する。

楕円球を用いた風洞実験ではラグビーボールとほぼ同じ大きさで、短径が約 185mm、長径が約 300mm である (Fig.13 参照)。ここでも迎え角 α の定義および空気力測定の方法は前述の円柱の場合と同様である。また、オイルフローによる流れの可視化も空気力測定実験と同様の固定方法を用いて実施する。実験内容はラグビーボールと同様の方法を用いる。

4.2 実験結果と考察

レイノルズ数算定などの円柱の代表長さには直径の 156mm を、楕円球の代表長さには短径の 185mm を用いている。

Fig.14 と Fig.15 に円柱と楕円球における揚力と抗力の測定結果を示す。円柱の結果 (Fig.14) からは、40deg~50deg おきに揚力がほぼ周期的に変化しているのが確認できる。これはラグビーボールのオイルフロー実験で認められたシームによる強制的な境界層遷移の発生パターンとよく合致するもので、発生メカニズムはほぼシーム効果だけで説明できる。

楕円球の結果 (Fig.15) からは3つの特徴が認められる。第1の特徴は、迎え角が負の領域では周期的な揚力変動がみられるのに、迎え角が正の領域では周期性が相当に乱れている。推定される原因としては模型の製作誤差の他には考えられない。このように僅かな断面形状の違いによってでも揚力発生周期性を大きく崩すということは、断面形状の乱れがずっと大きい実物ラグビーボールにおいて揚力発生パターンに非周期性および非対称性を発生させる主因の有候補となり得る。

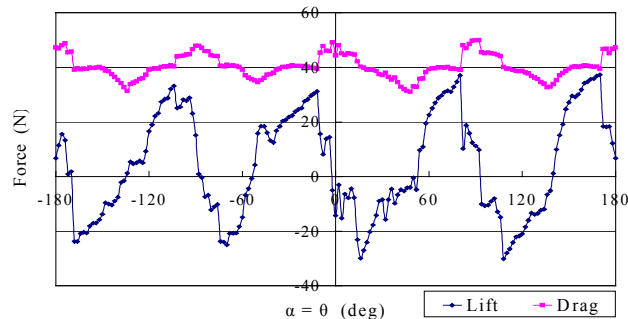


Fig.14 Lift and drag vs. $\alpha (= \theta)$ (cylinder)

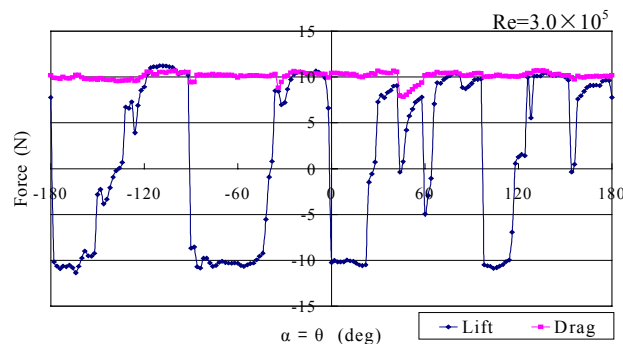


Fig.15 Lift and drag vs. $\alpha (= \theta)$ (ellipse)

第2の特徴は、円柱での揚力パターンが三角波に近いのに、楕円球では矩形波（パルス波）に近い形状であることである。また、第3の特徴は楕円球における抗力変動が円柱の場合に比

べて著しく小さいことである。これらの特徴を発生させる原因は不明であるが、次に述べるオイルフロー実験で見出された現象と関わりがあるかもしれない。

楕円球のオイルフローによる可視化実験の結果を Fig.16 に示す。Fig.16 (a)および(b)から、楕円球においてもラグビーボールと同様に、特定の迎え角領域において、溝（シーム）によって層流境界層から乱流境界層へ流れが変化し剥離点が後退することは明らかである。剥離点の後退は4本の溝のうちいずれか1本が風上最先端点から±(45~85)degの範囲にあるときに、ラグビーボールの場合とほぼ同じ領域である。

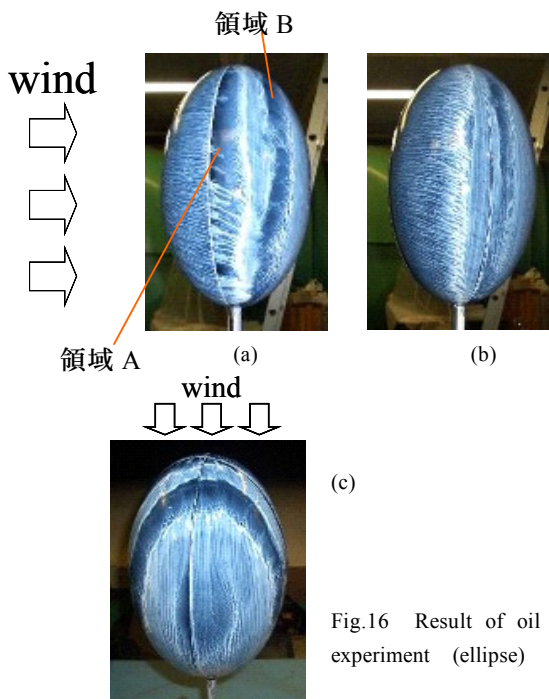


Fig.16 Result of oil flow experiment (ellipse)

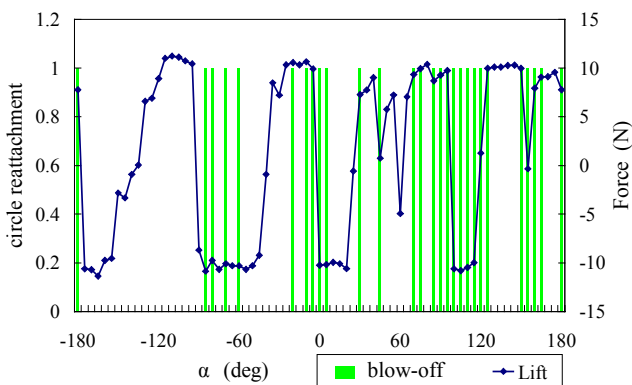


Fig.17 Lift pattern and crown-shaped blow-off of flow (ellipse)

さらに Fig.16 (a)を観察すると、溝によって乱流境界層へ強制遷移された領域 A で示した吹き払いとは別に後流側にもう一つの吹き払い領域 B の存在が確認できる。この現象は Fig.10 (a) にも確認できるように、ラグビーボールにおいても発生している。この吹き払い領域 B は迎え角域によっては、後流側の斜め上方から観察した Fig.16 (c)のように、冠状に発達したりする。この吹き払い領域は剥離流内に固定的な渦（カルマン渦のように後方に流出しない渦）が形成されていることを示すと推察される。剥離領域内に吹き払い渦が出現するかどうか、それが冠

形状に発達するかどうかは、吹き払い部分の居所的な圧力分布だけでなく、後流全体の形状や大きさに、延いては楕円球やボールまわりの流れと揚坑特性に影響を与える筈である。しかし、冠状の領域が確認できる迎え角 α を棒グラフで示して揚力パターンと比較した Fig.17 をみても、冠状の吹き払い領域と揚力パターンとの規則性／関連性は必ずしも明確に見出せない。この領域の効果について詳細に調べことは今後の課題の一つである。

5. まとめ

ラグビーボールを短軸周りに回転自由な状態で取り付けて風を当てると、自励回転をするという現象を見出した。この現象発生メカニズムを探るために、長軸に垂直な断面の揚坑特性が自励回転を促進する条件式を導くとともに、いくつかの風洞実験を実施した。

(1) ラグビーボールの長軸に垂直な断面の揚力勾配が負符合（いわゆる逆勾配）で、迎え角 1 radian あたりの揚力変化の絶対値がそのときの抗力値よりも大きいときに、自励回転運動が促進される。

(2) ラグビーボールの空気力測定の結果と回転数測定結果から、自励回転運動はその揚力勾配が負であり、かつその勾配が上記(1)項の条件をほぼ満たすときに起こるということが明らかになった。

(3) ラグビーボールでのオイルフロー可視化実験の結果から、強い逆揚力勾配を発生させ主要因の一つが溝状のシームによる強制的な境界層遷移であろうということが示された。しかし、シームのみが要因であれば、迎え角に対する揚力パターンなどは周期的な変動を示す筈なのに、ラグビーボールの空気力特性は複雑なパターンを示している。

(4) 4本の溝がある円柱および楕円球を用いて、それぞれの空気力（揚坑）特性を測定してラグビーボールのそれと比較検討した。その結果、ラグビーボールの断面形状の歪みとその揚坑特性の周期性／対称性を崩す要因であろうことが推察される。

(5) 4本の溝の楕円球を用いたオイルフロー可視化実験の結果から、溝による強制遷移による乱流境界層部分の吹き払い部分とは別に、その乱流境界層が剥離したあとの後流域表面にもう一つの吹き払い部分が発生するがわかった。この吹き払い部分は迎え角によっては剥離域を冠状に連なる。この剥離域の吹き払い領域が揚坑特性に影響を与えることは間違いないが、どのような効果をもたらすかはまだ不明である。

以上のように、ラグビーボールの自励回転は、シームによる強制的な境界層遷移を主因としており、それに加えてラグビーボールの断面形の歪みと剥離領域にできるもう一つ別の吹き払い部分が現象の複雑化に関わっているであろうという大まかなメカニズムが浮き彫りになった。一方では、ラグビーボールの空気力特性の複雑さについては今後の課題として残された。

参考文献

- 1) 大賀雄貴, 高橋直子, 三山雄平, 小林修, 瀬尾和哉: ラグビーボールの自励回転運動の発生とそのメカニズム, 日本フットボール学会 3rd congress 抄録集 (2006) p.49
- 2) 高橋直子, 小林修: ラグビーボールの短軸周りにおける自励回転運動, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol.2 流体工学 (2006) pp.123-124