

自転車等機械工業振興補助事業

平成 23 年度（研究補助）

自転車集団走行技術解析補助事業  
成果報告書

平成 24 年 3 月

国立大学法人 筑波大学  
文字秀明

## 1 はじめに

自転車ロードレースでは走行スピードが速いため、タイヤの路面抵抗より空気抵抗が自転車走行の主な抵抗となる[1]。集団走行する場合の空気抵抗を考えると、集団の先頭付近は空気抵抗が大きく、その位置にとどまるには、空気抵抗に抗するため多くのエネルギーを要する。集団中ほどに位置すれば、空気抵抗は小さくなり、一定の速度で進むとき多くのエネルギーを要しない。しかし、自分より前の選手がアタックをかけ、先頭から飛び出した時にはそれについていけず、後れを取る。また、前方で落車があった場合、それに巻き込まれる恐れもある。これらを回避するためには集団前方に位置するのが良い。従って、戦術的には自分より前方でアタックや落車の起こる確率と空気抵抗を考慮して集団のどのあたりに位置するかを決める必要がある。本研究では、これらの要因の内、物理的に推測できる集団中の自転車（選手）が受ける流体抵抗を明らかにすることを目的とする。

従来の研究では、空気抵抗を低減するため、風洞試験等を介して車体形状や走者の姿勢、ヘルメット、リム形状に改良が加えられている[2]。しかし、これらは単一の自転車に対して調べられており、集団になった場合の空気抵抗に関する知見は、自転車選手は経験的にわかっているが、系統的な研究はされていないようである。

そこで本研究では、集団走行中の個々の自転車（選手）にかかる流体抵抗を明らかにするため、1台の走行自転車を球でモデル化し、球を複数組み合わせた集団走行モデルを回流水槽中に置き、球にかかる流動抵抗を計測する実験的研究を行う。球周りの流れの可視化も同時に行い、集団中の位置による流動抵抗の違いを明らかにする。

## 2 実験装置および実験方法

### 2-1 実験装置

実験には、幅 300mm、高さ 200mm、長さ 1100mm の矩形試験部をもつ回流水槽を使用した。試験部管壁はアクリルでできており、PIV 計測や流れの撮影などが可能になっている。また、回流水槽には可変抵抗器により出力を変えることができるポンプが取り付けられており、試験部の主流速度はポンプ出力を変化させ調整した。

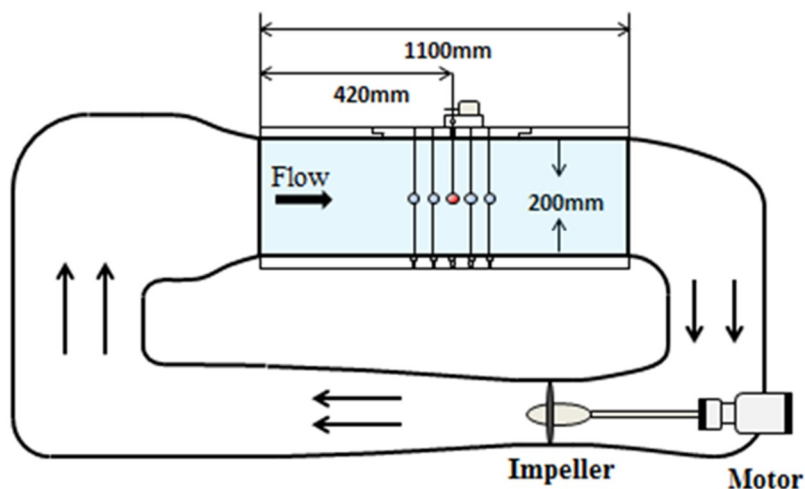


Fig.2.1 回流水槽概略図

## 2-2 試験球

実験では、アクリル球（直径 20 mm）を用いて自転車をモデル化し、流体抗力を測定した。Fig.2.2 に流体抗力を計測した試験球の固定方法を示す。配列中にある 1 つの球にかかる流体抗力を測定するために、試験球は外径 2mm のステンレス棒によって固定されている。このステンレス棒がロードセル下の台に取り付けられている軸を通り、ロードセルに接続されている。ロードセル下の台に取り付けられている軸は、両端をベアリングによって支持されており、なめらかに回転する。この軸を支点として、主流方向に球が押されるとロードセルには主流方向と反対方向の力がかかり電圧が出力される。この電圧を基にモーメントのつり合い式より計算し、試験球にかかる抗力を評価する。

Fig.2.3 に球を 5 列配列した場合の試験部の模式図を示す。青く塗られている球が抗力を測定する試験球であり、試験球以外の球の固定には直径 0.205 mm の PE ラインを使用している。

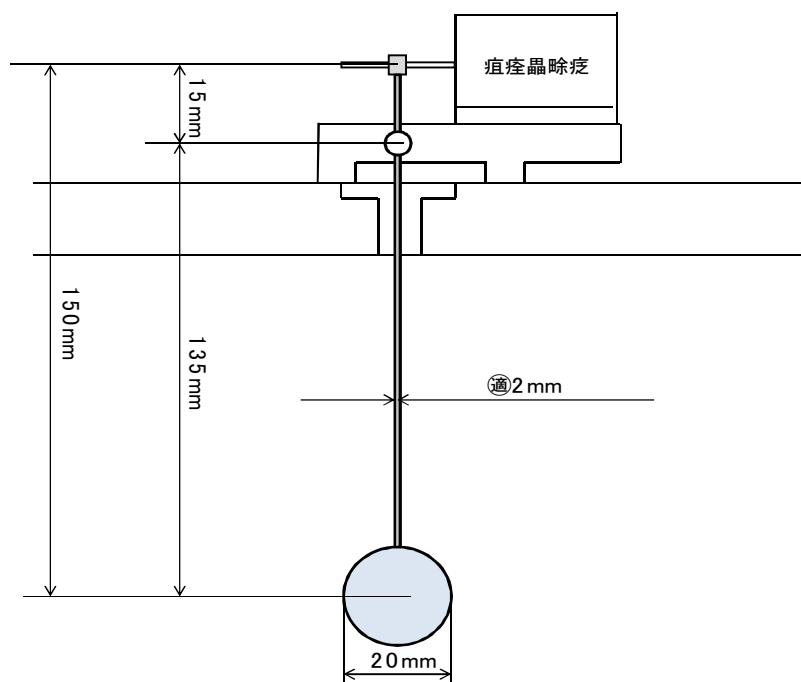


Fig.2.2 試験球の固定方法

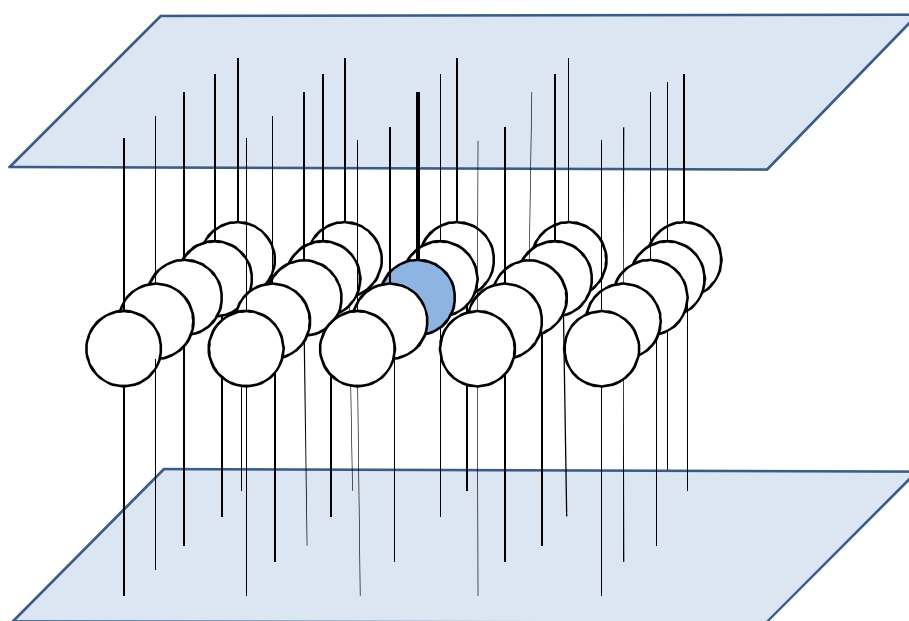


Fig.2.3 試験部立体図

## 2-3 実験方法

Fig.2.4 に計測部の概略図を示す。計測には抗力計測装置を用いる。試験球の抗力を微小荷重用ロードセルが電圧として出力し、その電圧を動ひずみ測定器によって増幅させる。そして、増幅させた電圧を、データ収集システムを介してパソコンに保存する。また、抗力計測装置からの同期信号を用いて、球の周りの流れ場を P I V 計測し、流れ場と抗力の同時計測を目指す。

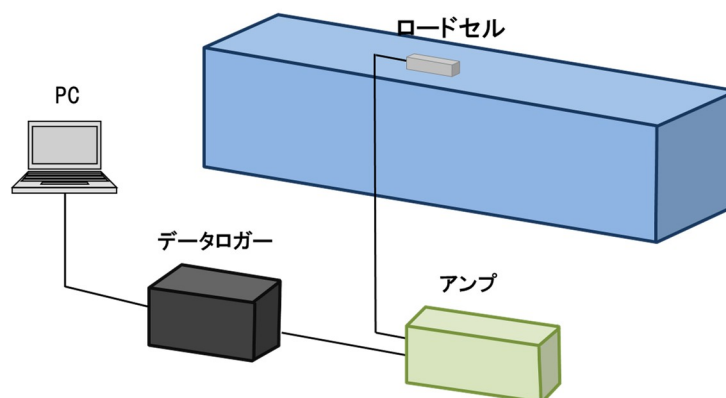


Fig.2.4 抗力計測の概略

## 2-4 実験条件

Table1.1 に実験条件を示す。

Table1.1 実験条件

作動流体	水道水
水温 T [°C]	20±2
動粘度	$1.0038 \times 10^{-6}$
試験球代表長さ D [m]	0.02

試験部の一様流速は、0.1 m/s から 0.4 m/s に設定した。このとき、球レイノルズ数は 1500～8600 となる。このレイノルズ数は自転車選手の速度と大きさに基づくレイノルズ数より 2 桁程度小さい。従って、本研究結果を直接、ロードレースに適応することは難しいが、抗力の傾向は推定できるものとする。

抗力測定は球を 1 列、2 列、5 列配列させた場合を測定する。Fig.2.5, Fig.2.6, Fig.2.7 に示す球番号 1～5 の位置に試験球を設置し、順番に試験球を移動させながら抗力を測定した。

測定は 100 Hz で 100 s 間行い、10000 個の抗力の電圧データを計測し、その平均を求めることにより、その配列および球番号における抗力を評価した。

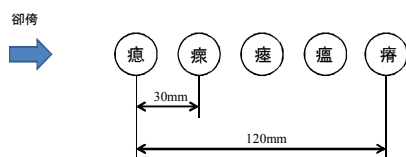


Fig.2.5 1列-試験部上面図

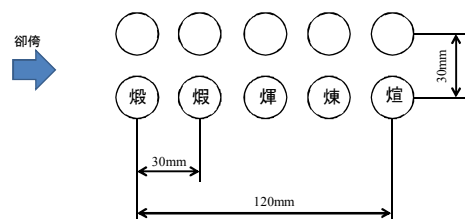


Fig.2.6 2列-試験部上面図

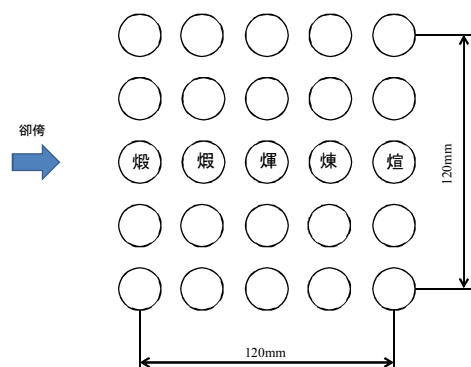


Fig.2.7 5列-試験部上面図

### 3 速度場計測

#### 3-1 PIV 計測

物体にかかる流体抗力には、物体のまわりの速度場が影響するため、球まわりの PIV 計測を行う。

PIV とは Particle Image Velocimetry の略であり、流れの中に多数のトレーサ粒子を入れ、流れを可視化し、粒子の運動が局所の流体運動と同一であることを仮定して流体速度を計測する方法である。粒子像流速計ともいい、検査領域内の粒子群の移動を解析する方法である。

Fig.3.1 に試験部と計測装置の概略図を示す。実験装置下部より照射される Nd:Yag レーザー(Litoron 社製)を、ミラーを介しシリンダカルレンズを用いてシート状にして照射する。液相中のトレーサ粒子を可視化し試験部側面のハイスピードカメラ(Redlake 社 MotionProHs-5)によって撮影をする。トレーサ粒子にはローダミン B を塗った粒子を使用した。この粒子は平均粒子径  $10\mu\text{m}$ 、密度は  $1500\text{kg/m}^3$  である。またローダミン B は YAG レーザの波長  $532\text{nm}$  のレーザー光を吸収し、波長  $580\text{nm}$  の光を発する。そこでハイスピードカメラのレンズに波長  $560\text{nm}$  以下の光を遮断するハイパスフィルタをカメラに取り付け

レーサ粒子の励起光のみを撮影できるようにした。レーザはダブル発信器システムとして設計されており、短い時間 でレーザ光を 2 度照射し、それぞれの励起光をカメラで連続して撮影することによりトレーサ粒子の移動量を測定している。撮影間隔は 0.02s で、  $t$  は主流速度  $U$  に応じて Table2.1 に示す値にして、撮影を 10 秒間行い 1000 枚の画像データを得た。

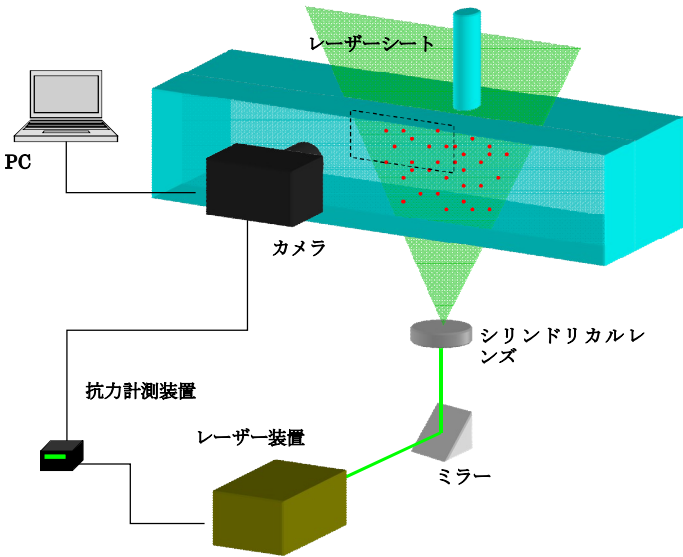


Fig.3.1 PIV の概略

Table2.1

主流速度 $U$ [m/s]	0.073	0.163	0.253	0.343	0.433
時間間隔 $t$ [s]	0.0080	0.0030	0.0022	0.0018	0.0016

### 3-2 実験結果

1 列、2 列、5 列の場合において、それぞれの球まわりの速度場を下記に示す。各速度場の主流速度  $U$  は 0.252 m/s である。

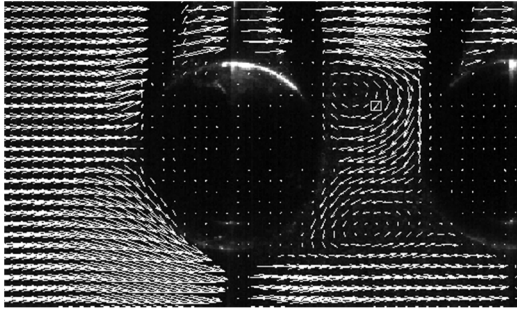


Fig.3.2 1列の場合の1球目まわりの速度場

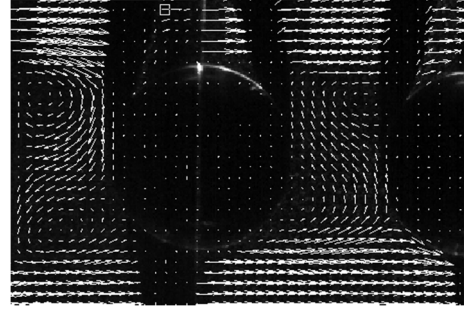


Fig.3.3 1列の場合の2球目まわりの速度場

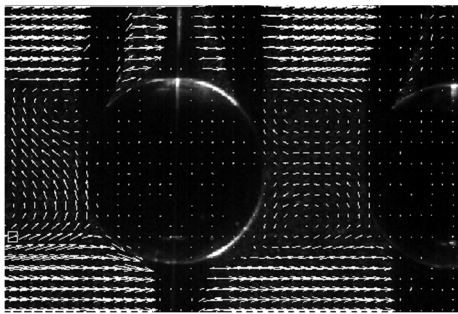


Fig.3.4 1列の場合の3球目まわりの速度場

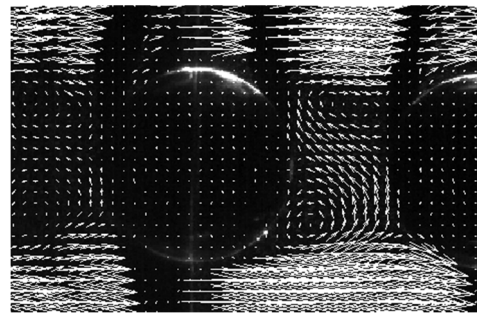


Fig.3.5 1列の場合の4球目まわりの速度場

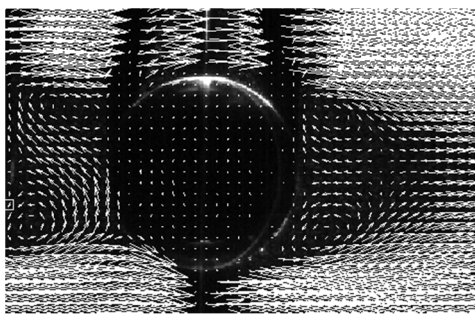


Fig.3.6 1列の場合の5球目まわりの速度場



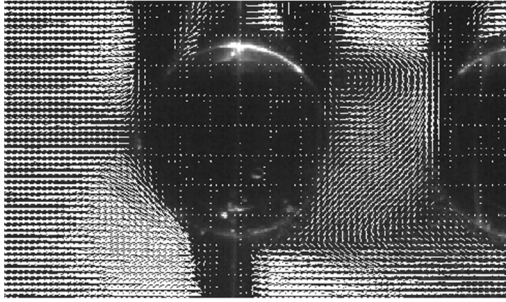


Fig.3.7 2列の場合の1球目まわりの速度場

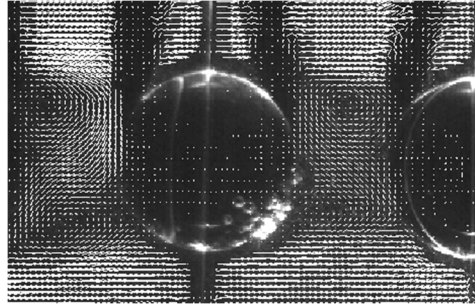


Fig.3.8 2列の場合の2球目まわりの速度場

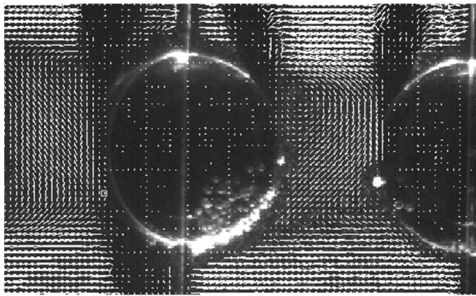


Fig.3.9 2列の場合の3球目まわりの速度場

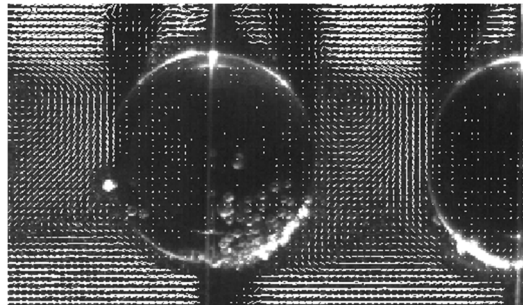


Fig.3.10 2列の場合の4球目まわりの速度場

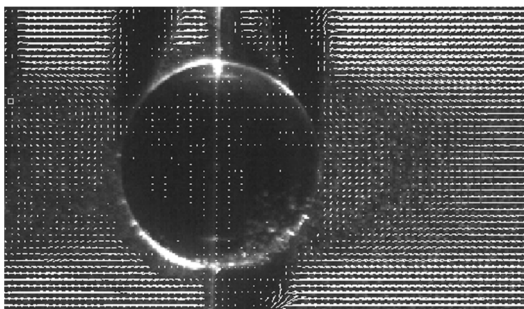


Fig.3.11 2列の場合の5球目まわりの速度場

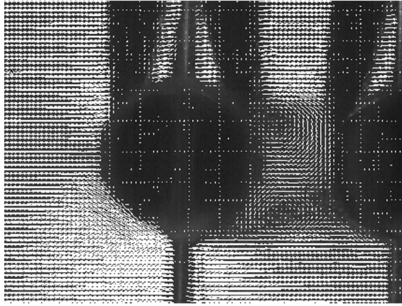


Fig.3.12 5列の場合の1球目まわりの速度場

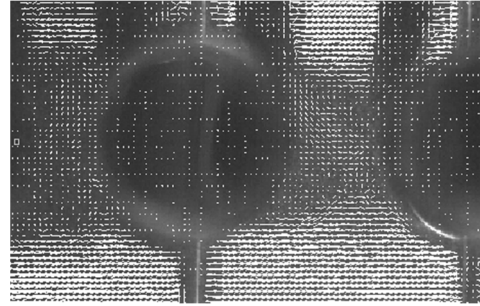


Fig.3.13 5列の場合の2球目まわりの速度場

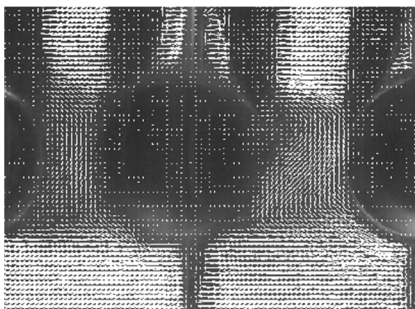


Fig.3.14 5列の場合の3球目まわりの速度場

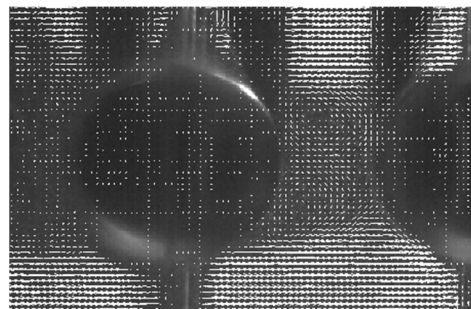


Fig.3.15 5列の場合の4球目まわりの速度場

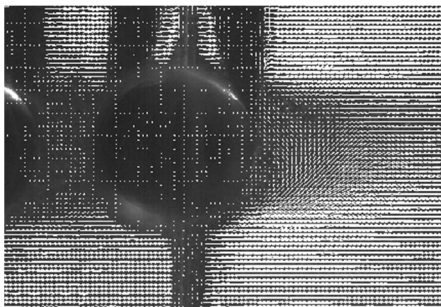


Fig.3.16 5列の場合の5球目まわりの速度場

### 3-3 考察

撮影した1列の場合の1000枚の画像データから500枚の速度場のデータが得られる。その500枚の速度場の平均をとる。球番号1の球の中心から前方に15 mmの点を原点とし、主流方向に $x$ 軸をとる。また、鉛直下方向に球の中心を原点とする $y$ 軸をとった。そして、平均の速度場からFig.3.17の赤線で示した $x$ の位置の主流方向の平均流速 $U$ をプロットする。Fig.3.18は横軸に $y$ 、縦軸に主流方向の平均流速 $U$ をとったグラフである。

Fig.3.18から $x=30$ での $y=0\sim 20$ 、 $y=40\sim 60$ 付近での流速 $U$ が他の位置の流速よりも大きくなっていることがわかる。球の後方である $y=-10\sim 10$ では流速は小さくなっており、 $y=0$ 付近で最も小さい値を記録している。 $x=60\sim 150$ の位置での流速はほとんど同様の値を示している。

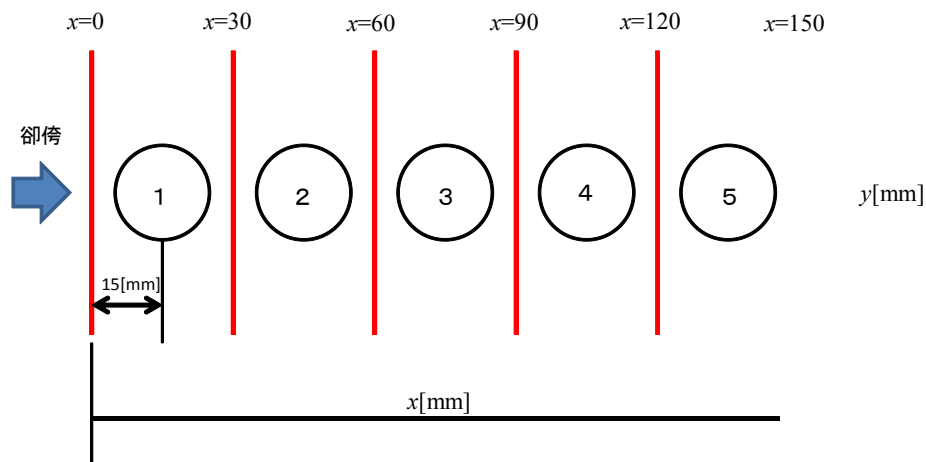


Fig.3.17 主流方向の流速測定位置

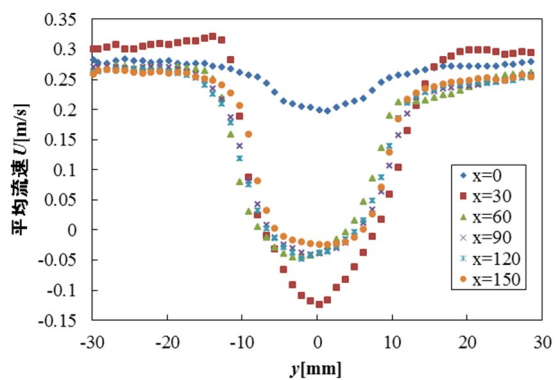


Fig.3.18 各位置での主流方向の平均流

## 4 抗力測定

### 4-癒 卻傍 𪗇𪗇𪗇

主流方向に球を並べた場合の、球番号 1～5 の位置での流体抗力を調べる。

Fig.4.1, Fig.4.2 に球を 1 列に並べた場合の測定結果を示す。Fig.4.1 は回流水槽の主流流速  $U$  を横軸、抗力  $D_I$  を縦軸とした。Fig.4.1 から、抗力は流速に対して、2 次関数的に増加しているようにみえる。これは、一般的に流体抗力  $D$  が下記の式(4.1)で表されるように、流速の 2 乗に依存するためと考えられる。

$$D_{Li} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (4.1)$$

ここで、 $C_D$ は抗力係数、 $\rho$ は流体の密度、 $S$ は物体の代表面積、 $V$ は物体と流体の相対速度をそれぞれ示す。

また、Fig.4.2は、横軸に測定した球番号、縦軸に抗力 $D_{Li}$ をとった。Fig.4.2をみると、抗力 $D_{Li}$ は1番目 $D_{L1}$ で最も大きい値をとり、その後、2番目 $D_{L2}$ 、3番目 $D_{L3}$ と小さくなっているが、4番目 $D_{L4}$ で3番目 $D_{L3}$ と同じかそれより大きくなっている。Fig.3.3より3番目と4番目の球の前方と後方の流速分布はほぼ同じであるので、圧力抵抗がほとんど同じになり、近い値を示したと考えるまた、5番目 $D_{L5}$ は3、4番目の抗力 $D_{L3}, D_{L4}$ より大きくなっており、 $U=0.118, 0.208 \text{ m/s}$ と流速の小さいところでは、2番目 $D_{L2}$ よりも大きな値を示している。5番目の球にかかる抗力が大きくなるのは、5番目の球の後方には球がなく、後流は単一球の後流と近い流れができるため、放出される渦により大きく引っ張られることが要因と考えられる。

上記に示したことが主流速度の変化によるものなのか検討するために、横軸に球番号、縦軸に各球番号でかかる抗力 $D_{Li}$ を単一球にかかる抗力 $D_S$ で割った値をとったグラフをFig.4.3に示す。また、単一球にかかる抗力 $D_S$ をFig.4.4に示す。

Fig.4.3から、 $D_{Li}/D_S$ がどの主流速度でもほとんど同じ値をとっている。これは今回の実験を行ったレイノルズ数域が1500～8600と狭く、あまり流動の変化が起きる領域ではなかったために試験部の主流速度の変化が抗力の低減に影響を与えなかったと考えられる。

また、抗力の大きさは1→2→5→4→3番目という順番になった。

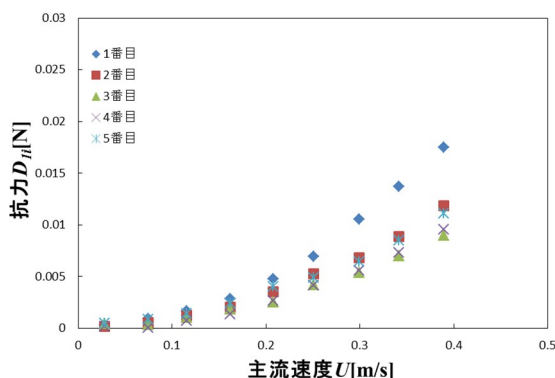


Fig.4.1 1列-主流速度 $U$ による抗力 $D_{Li}$ の変化

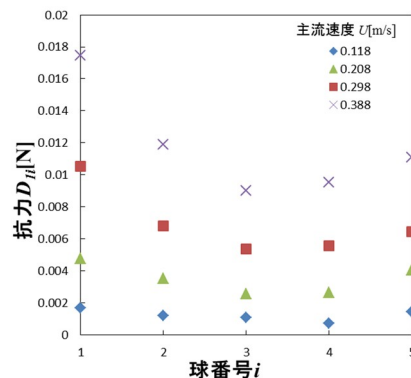


Fig.4.2 1列-球番号による抗力 $D_{Li}$ の変化

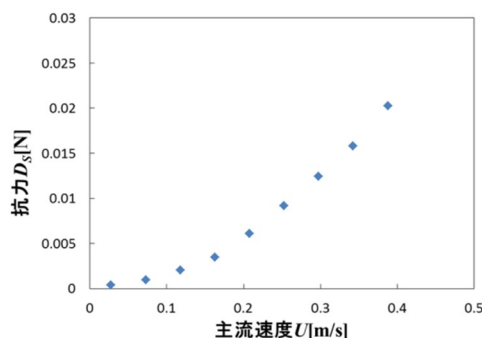
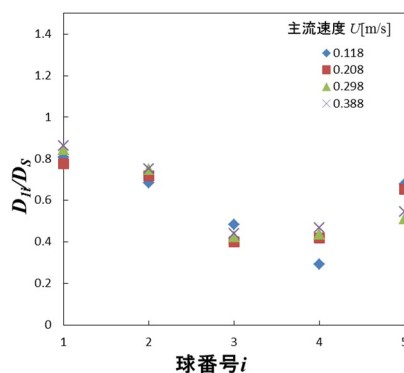


Fig.4.3 1列・球番号による  $D_{1i}/D_{2i}$  の変化 Fig.4.4 単一球の場合の主流速度  $U$  による抗力  $D_S$  の変化

## 4-2 横方向の影響

流体の流れに対して、横方向に球を配置した場合の流体抗力への影響を調べるために、球を2列並べた場合と5列並べた場合の抗力を測定した。

Fig.4.5, Fig.4.7 は2列並べた場合、Fig.4.6, Fig.4.8 は5列並べた場合の主流速度  $U$ 、抗力  $D$ 、球番号  $D/D_S$  をそれぞれ示している。Fig.4.10 は1列と2列の抗力、Fig.4.11 は1列と5列の抗力、Fig.4.12 は2列と5列の抗力を各球番号で比較したグラフである。

Fig.4.5, Fig.4.6 とともに先頭である1番目  $D_{21}$ ,  $D_{51}$  は、Fig.4.1 の1列の場合と同様に主流速度の2乗に比例して増加しているのがみてとれるが、2番目以降は1列の場合と比べて、いくつかの流速で値が上下している。これは、球まわりの流れ場に乱れが生じるためと考えられる。

また、Fig.4.7 をみると、すべての主流速度で1番目の  $D_{11}/D_S=1.2$  程度となっている。5列の場合の Fig.4.8 でも1番目の  $D_{51}/D_S=1.2$  程度とほとんど同じ大きさになっており、単一球の抗力よりも大きくなっている。また、Fig.4.10, Fig.4.11 で抗力  $D_{11}$  との比をとっても、2列、5列どちらも1番目では1.5程度の値をとっており、1列の場合よりも大きくなっていることがいえる。

Fig.4.9 は過去に行われた実験で、流れ方向と垂直をなす横方向に球を2つ並べた場合の抗力に対する球間距離の影響のグラフである。横軸に2つの球の中心間距離  $I_z$  と球の直径  $D_{sp}$  の比  $I_z/D_{sp}$  をとり、縦軸に試験球の抗力係数  $C_D$  と単一球の抗力係数の  $C_{D0}$  の比  $C_D/C_{D0}$  をとっている。今回の実験では中心間距離  $I=30$  mm、球の直径  $D=20$  mm と変化させないので、 $I/D=1.5$  である。Fig.4.9 で  $I_z/D_{sp}=1.5$  のあたりをみると、 $C_D/C_{D0}$  は1よりも大きな値を記録しており、単一球にかかる抗力よりも大きくなることがわかる。これは2つの球を並べることにより、球の間の流速が大きくなり、抗力が大きくなったと考えられる[3]。

Fig.4.10 では1番目の  $D_{21}/D_{51}=1.0$  程度になっており、2列と5列の1番目の球にかかる抗力の大きさはほとんど同じといえる。また、1番目の球以外では  $D_{2i}/D_{5i}$  は1より小さくなっており、2列の場合よりも5列の場合の方が個々の球にかかる抗力は大きくなっている。このことも、2列と5列の場合で先頭の球の抗力が大きくなった要因と同じく、球を5列配列させることにより、球の間の流速が大きくなったことにより抗力が大きくなったと考える。

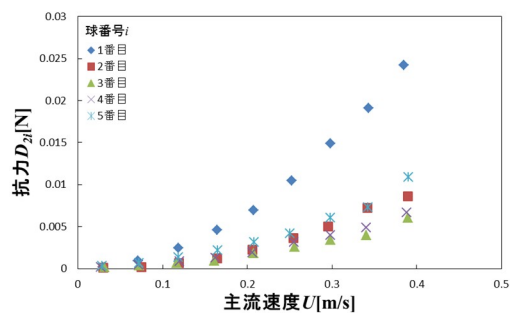


Fig.4.5 2列-主流速度  $U$  による抗力  $D_{2i}$  の変化

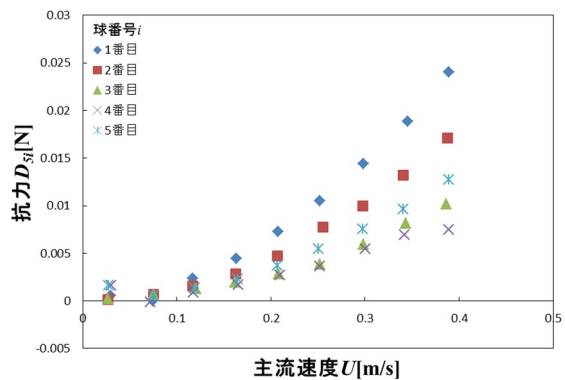


Fig.4.6 5列-主流速度  $U$  による抗力  $D_{5i}$  の変化

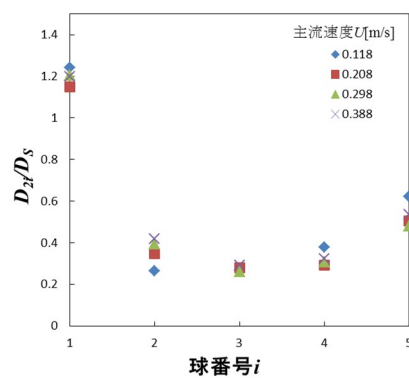


Fig.4.7 2列-球番号による  $D_{2i}/D_S$

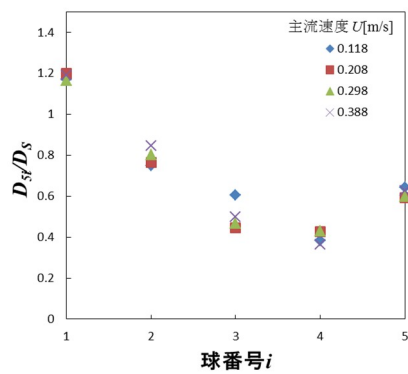


Fig.4.8 5列-球番号による  $D_{5i}/D_S$  の変化

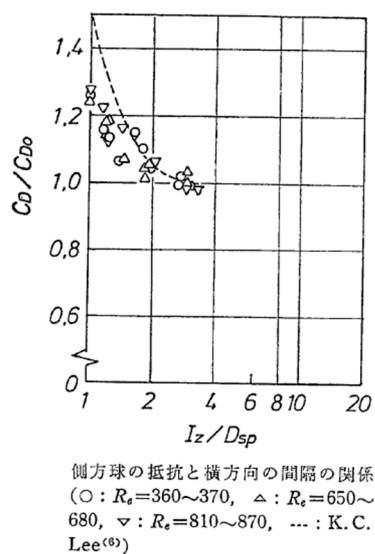


Fig.4.9 過去に行われた横方向においた球の抗力への影響[3]

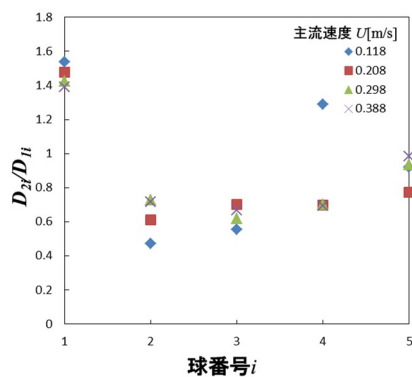


Fig.4.10 各球番号における1列と2列の抗力の比較

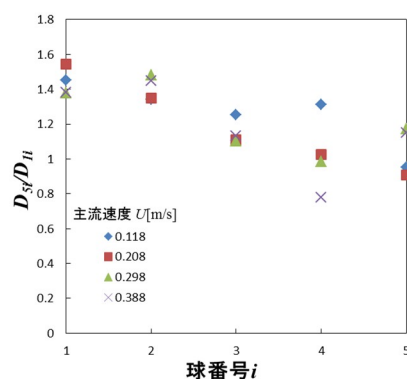


Fig.4.11 各球番号における 1 列と 5 列の抗力の比較

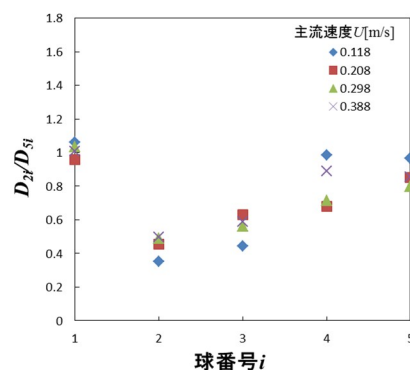


Fig.4.12 各球番号における 2 列と 5 列の抗力の比較

## 5 封沢

本研究は、配列された個々の球の抗力を測定することによって、1つの球の抗力に対する配列の影響について調べ、以下の結果を得た。

- (1) 球を主流方向に 1 列並べた場合、個々の球にかかる抗力は、単一球の場合の抗力よりも小さくなる。また、抗力の大きさは 1→2→5→4→3 番目となった。
- (2) 球を主流方向に対して並列に 2 列、5 列並べた場合、先頭の球は単一球の場合よりも同様に大きくなった。これは、球を横に置いたため、球の間の流速が大きくなることが要因と考えられる。
- (3) 最後尾である 5 番目の球の抗力は、3 番目と 4 番目の抗力に比べ大きくなる。この原因としては、5 番目の後方には球がないことにより、放出された渦に大きく引っ張られるためと考えられる。

上記の研究結果をサイクルロードレースに当てはめると、以下のことが推定される。

- ・自転車列の最後尾は必ずしも流体抵抗が小さいとは限らないので、列の中ほどに位置するのが良い。
- ・一列で走行する方が、複数列で走行するより流体抵抗が少ない。
- ・前方からの風だけでなく、体の後ろの渦も影響を与える。

ただし、本研究と実際のロードレースでは流れの相似性が保証されていないので、高流速下の実験が望まれる。

## 嶂佯噲

- [1] Mariot J. -P.: Mechanics of Cycling, Revue Phys. Appl, 19(1984), 349-357.
- [2] 杉山勝昌：自転車の風洞実験，自転車技術情報，72(1997), 1-9.
- [3] 辻裕，森川敬信，寺島幸三，白神隆文，二宮一：二つの球の流体力学的干渉に関する実験，機論B，47-423(1981), 2103-2110.