

平成 29 年度

# 卒業論文

題 目

ホイールハウス内のタイヤに生じる

揚抗力に関する実験的研究

学籍番号 14123041

提出者 田中 真央

指導教員 村田 滋 教授

京都工芸繊維大学 工芸科学部

機械システム工学課程

木イールハウス内のタイヤに生じる  
揚抗力に関する実験的研究

平成  
29  
年  
度

田  
中  
真  
央

## 概要

本研究では、ホイールハウス内のタイヤに働く力の理解を目的とし、モデルによる実験を行った。タイヤの回転状態・ホイールハウス及び地面の存在・タイヤ踏面溝のそれぞれについて条件を変えてタイヤ単体に働く揚抗力を測定した。その結果、地面が存在するとタイヤ回転時に抗力が減少すること、ホイールハウスが存在するとタイヤ回転時に揚力が上昇すること、溝形状によって揚抗力双方が変化することを確認した。これらの結果について、同モデル周りの流れをトレーサにより可視化し、流れとの関係を考察した。流れがタイヤによって搔き分けられる接地面前方で受ける力が揚抗力に支配的であり、この領域の流れが回転するタイヤの摩擦によって変化したために、揚抗力の変化が起きたのではないかとの推論に至った。この推論は、タイヤの表面性状による抗力制御の可能性を示唆している。

# 目次

1. 序論	1
2. 実験手法	3
2.1 モデル化	3
2.2 実験装置	3
2.3 測定原理	6
3. 装置の信頼性評価	9
3.1 入出力線形性	9
3.2 測定値の正確性	9
4. 供試体に働く揚抗力	11
4.1 実験条件	11
4.2 地面効果と回転状態による影響	11
4.3 供試体の溝形状による影響	16
5. 結論	18
謝辞	19
参考文献	20
付録 A. 地面の境界条件の妥当性	22
付録 B. 実験に供した部品	23

# 1. 序論

自動車は、乗用・旅客・貨物等幅広い用途を持ち、現代生活には欠かせない工業製品である。また、エネルギー資源の大量消費が危惧されて久しい現代、自動車のランニングコストを削減しようとする試みは数多く為されている。例としては、車体の軽量化による慣性抵抗の低減<sup>(1)</sup>、エンジンの直噴化やダウンサイ징による熱効率の向上<sup>(2)</sup>、ボディ形状による空気抵抗の低減<sup>(3)</sup>、発熱を低減するタイヤ材質による転がり抵抗の低減<sup>(4)</sup>などが挙げられる。特に空気抵抗の低減は内燃機関の種類に関わらず全ての自動車に有効であるため、重要性が高い。こうした試みの一つに、タイヤの空気抵抗の低減がある。走行中の自動車に働く空気抵抗の内、約 25~40%がタイヤに働くものだと言われている<sup>(5)(6)</sup>。この抵抗を低減することで、自動車のランニングコスト削減が見込める。そのため一般的な乗用車を対象とした分野では、ホイールハウス内のタイヤに関する研究がなされている。

これらの研究の目的は 2 つに大別される。1 つは抗力を主眼に置いたもので、タイヤ及びタイヤ周辺の形状・寸法等の条件を変え、その結果として抗力に差異が生じる際のメカニズムを理解することである。もう 1 つは流れ場を主眼に置いたもので、タイヤ周りの流れの特性を説明することである。

前者の研究例として、Fabijanic<sup>(7)</sup>は風洞を用いて、簡単な車体モデルにホイールハウスと回転するタイヤを追加した際の車両全体の揚抗力の増減を調べた。Regert ら<sup>(8)</sup>は RANS を用いて、タイヤ中心から車体後面までの距離をパラメータとして車両の揚抗力の変化を計算した。Cederlund ら<sup>(9)</sup>は RANS を用いて、スポーツカーのリム形状が車両の揚抗力にどう影響するか、ディフューザやウイングとどう相互作用するかを調べた。Harmain ら<sup>(10)</sup>は RANS を用いて、ホイールハウスの半径と奥行きの寸法が抗力係数にどう影響するかを調べた。Hobeika ら<sup>(11)</sup>は RANS 及び風洞を用いて、タイヤのプロファイル及びトレッドの寸法が車両の空力に与える影響を調べた。Schnepf ら<sup>(12)</sup>は BMW の実車を用いた風洞試験及び RANS によって、車高の変化が車両の揚抗力に与える影響を調べた。

後者の研究例として、Thivolle-Cazat ら<sup>(13)</sup>は 2D-2C PIV と分力計を用いて、車両モデルの抗力に影響を与える流れの特性を分析している。Krajnovic ら<sup>(14)</sup>は初めて LES を用いてタイヤ周りの流れ場を計算し、今まで確認されていなかった渦構造を発見した。Gluyas<sup>(15)</sup>らは 2D-2C PIV を用いて、車両モデルにおけるタイヤ周りの流れの統計的特性を論じている。

ホイールハウス内のタイヤに関する研究は、近年では数値計算が多数を占めている。しかしながら、計算結果の信頼性を保障するためには実験測定は不可欠である。

本研究の目的は、ホイールハウスや地面の存在、タイヤの回転、及びタイヤの溝形状がタイヤに働く揚抗力にどのような影響を与えるのか実験的手法を用いて理解すること、また数値計算のための指標となることである。本研究では、考察のためにトレーサ法を用いて任意断面の流れを可視化している。

本文中で使用した記号を以下に示す。

[記号表]

- $C_D$  : 抗力係数 [-]
- $C_L$  : 揚力係数 [-]
- $D$  : 供試体に働く抗力 [N]
- $d$  : 円柱の直径 [mm]
- $E$  : PC に記録される出力電圧 [V]
- $F$  : 供試体に働く力 [N]
- $F_i$  : 供試体に働く力の各 ch への分力( $i = 1,2,3$ ) [N]
- $k$  : ロードセルのバネ定数 [N/m]
- $L$  : 供試体に働く揚力 [N]
- $l$  : 円柱の水没長さ [mm]
- $l_1$  : ピボット点から供試体の中心までの距離 [m]
- $l_2$  : ピボット点から重りによる着力点までの距離 [m]
- $R^2$  : 決定係数 [-]
- $Re$  : レイノルズ数 [-]
- $T$  : 計測装置ピボット点周りに生じるトルク [N m]
- $T_{all}$  : 供試体がある場合にピボット周りに生じるトルク [N m]
- $T_{cal}$  : キャリブレーション時にピボット周りに与える既知トルク [N m]
- $T_{sha}$  : 供試体がない場合にピボット周りに生じるトルク [N m]
- $T_{test}$  : 供試体のみ水中にある場合にピボット周りに生じる仮想トルク [N m]
- $U$  : 円柱の抗力測定時の一様流速 [mm/s]
- $u$  : 自動車の並進速度 [m/s]
- $u_m$  : 回流水槽の一様流速 [mm/s]
- $W$  : キャリブレーション時の既知荷重 [N]
- $\alpha$  : 電圧・トルク間の比例定数 [N m/V]
- $\alpha_i$  : 各 ch の電圧・トルク間の比例定数( $i = 1,2,3$ ) [N m/V]
- $\Delta f_i$  : 軸がロードセルから受ける圧縮力の増分( $i = 1,2,3$ ) [N]
- $\delta s$  : シャフト先端の微小変位 [m]
- $\nu$  : 作動流体の動粘性係数 [ $m^2/s$ ]

## 2. 実験手法

本研究で行った実験の手法を以下に説明する.

### 2.1 モデル化

実験に当たって行った自動車のタイヤ周りのモデル化の概要を Fig. 1 に示す. 現実の状況では静止した流体中をタイヤが回転しながら速度  $u$  で並進するため, タイヤ上部では静止流体に対して  $2u$  の速度で, タイヤ下部では速度 0 で運動するが, 本実験では並進速度  $u$  に相当する速度  $u_m$  の一様流れの中に, 周速度  $u_m$  で回転する円板を配置することで同様の力学的状況を再現している. 但し, 地面に見立てた板は静止しているために正確な再現とはなっていない. そこで板に撥水加工を施し, 境界層流れの影響を低減している. この妥当性については付録 A で述べる. なお, タイヤ外径を基準とした現実の状況でのレイノルズ数が  $6\sim 8 \times 10^5$  程度であるのに対して, 本実験でのレイノルズ数は  $1.2 \times 10^4$  である. これは実験装置の性能の限界によるものである.

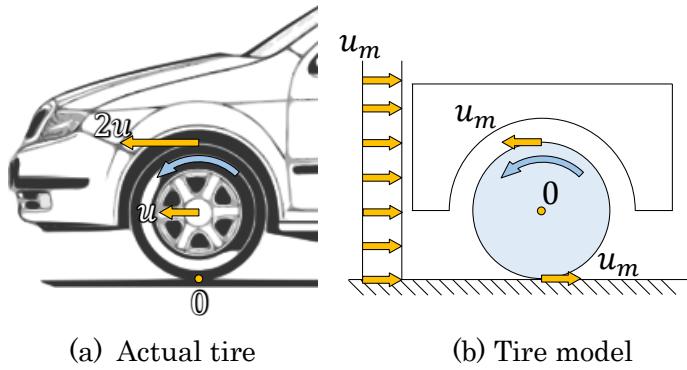


Fig. 1 Modeling of a wheel in a wheel-well.

### 2.2 実験装置

本研究において製作・使用した実験装置の写真を Fig. 2 に示す. Fig. 3 はその CAD 図, Fig. 4 はその見取り図である. 実際のタイヤの回転軸は水平であるが, 実験装置では供試体の回転軸は鉛直に設置されている. 実験装置は大きく 2 つの部分に分けられる. 可動部とフレーム・PC 部である. 可動部は Fig. 3a に示すように, 全体として一本の軸であり, 上部にやじろべえの支点のような突起を設けている. 突起の下方には供試体を回転させるためのモータ, モータと供試体を繋ぐシャフト, そして供試体が配置されている. フレーム・PC 部には可動部の突起を受ける窪みが用意されており, この箇所がピボットとして機能する. フレーム・PC 部は Fig. 3b に示した可動部を懸架するためのフレーム, フレームに機械締結されたロードセル及びホイートストンブリッジ, そしてストレインアンプと DAQ デバイス, PC から成る.

データ収録の流れは以下の通りである. まず, 流れから供試体及びシャフトの水没した部分が力を受け, ピボットを中心に可動部は微小に回転する. この微小回転によって, フレームに締結されているロードセルにひずみが生じる. ロードセルはひずみの増減に比例してひずみゲージの電気抵抗を変化させ, ホイートストンブリッジが抵抗の変化を電圧として出力する. 出力電圧はストレインアンプによって大きさを調節され, DAQ デバイスを介して数値データに変換され, 計測ソフトウェア LabVIEW によって PC に時系列データとして収録される.

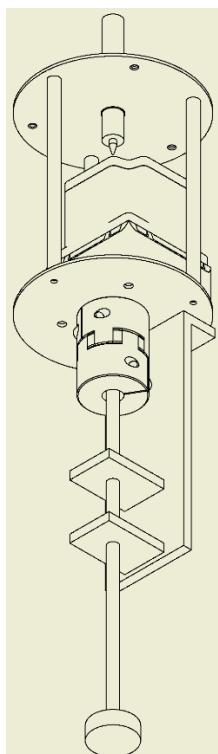


(a) Mobile part & frame

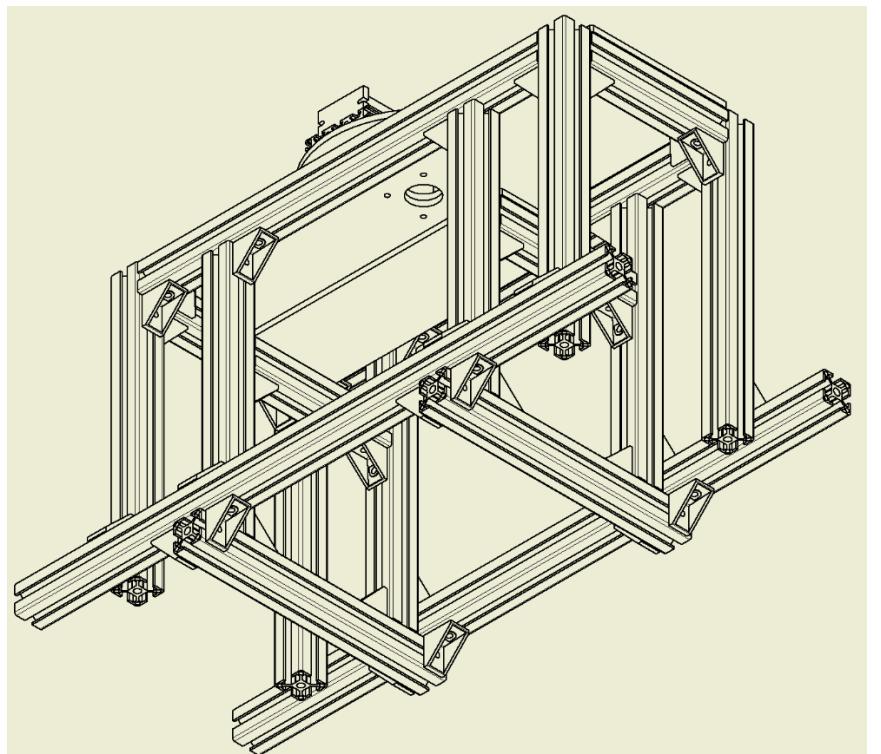


(b) PC part

Fig. 2 Photographs of measurement system.



(a) Mobile part



(b) Frame

Fig. 3 CAD models of measurement system.

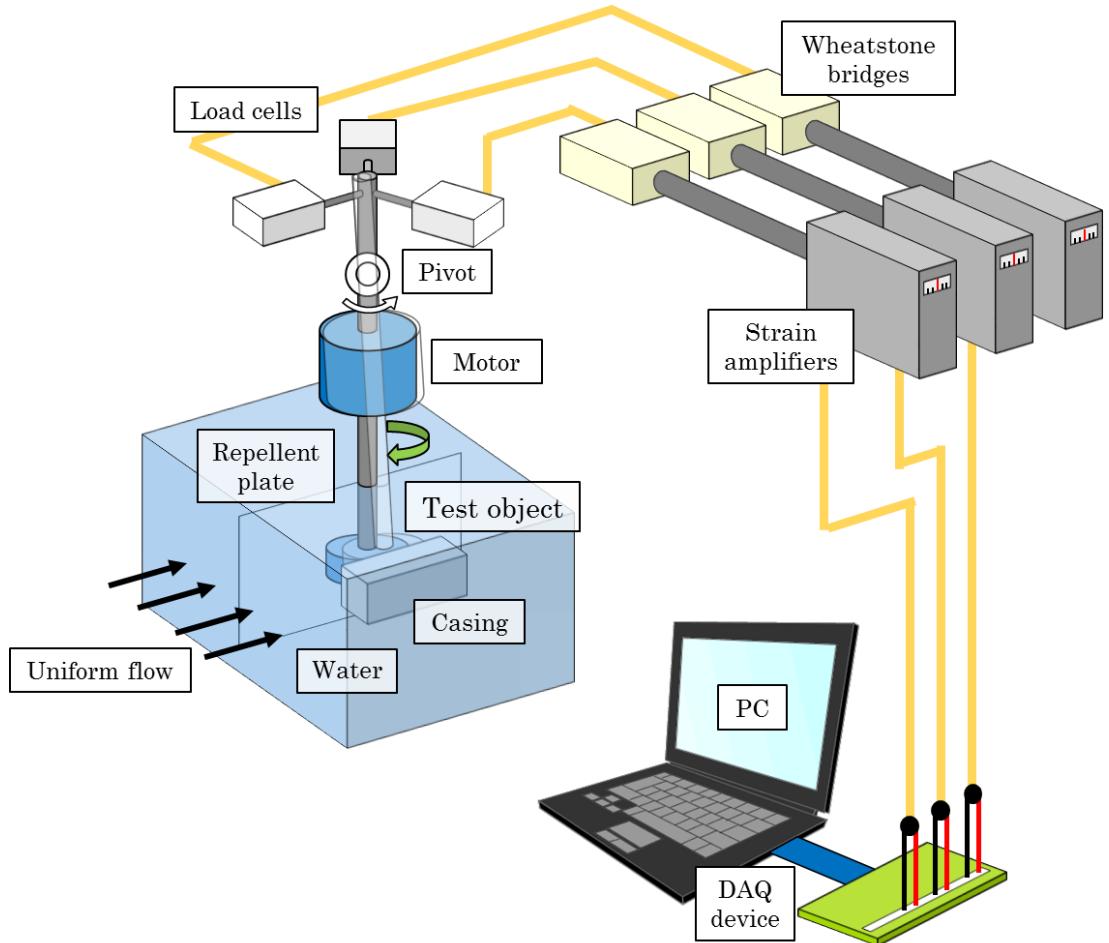


Fig. 4 Overview of the measurement device.

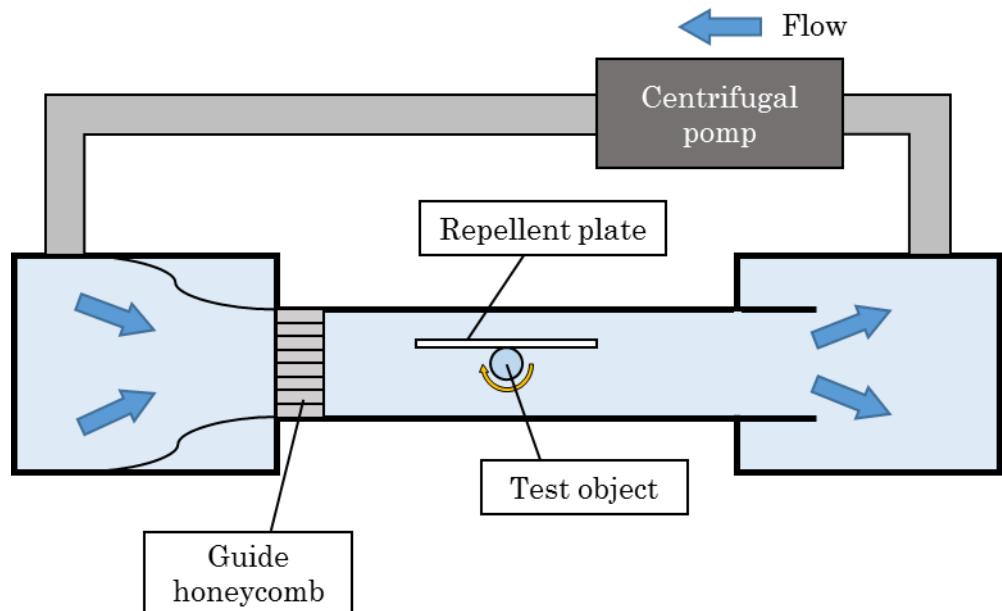


Fig. 5 Overhead view of circular water tank for generating uniform flow.

なお、ロードセルにはミネベア製 UTA-100GR を、ストレインアンプにはミネベア製 DSA-605C 型自動平衡式動ひずみ測定器を使用している。データ収録時間は 20.5 秒、サンプリング周波数は 200 Hz としているため、一度の測定で 4100 点の時系列電圧を取得することになる。また、一様流れを実現するために Fig. 5 のような回流水槽を用いている。水流の駆動には荏原ポンプ製の渦巻きポンプ 125×100FS4JC を使用している。運転時は、一様流速が 0.25 m/s になるよう流量を調節する。流速の測定にはケネック製プロペラ流速計 VR-301 を用いる。測定点は供試体前方である。供試体を回転させるモータには、Oriental motor 製の BLF620A-10S-1 を使用する。供試体の周速度が一様流速と等しくなるように回転数を 95.5 rpm に設定している。供試体及びケーシングの図面については、付録 B にまとめてある。

### 2.3 測定原理

まず揚抗力の検出の大まかな原理を説明する。Fig. 6 に示すのは装置可動部周辺の簡略図である。可動部の水中にある部分は流れにより力を受け、結果としてピボット周りにトルク  $T$  が生じる。このトルク  $T$  は、流体が静止している場合 0 であると定義する。実際的には、流れがある際のトルクから流れがない際のトルクを差し引いたものを  $T$  としている。ピボット点からロードセルまでの距離は一定だから、ロードセルに掛かる圧縮力は  $T$  に比例する。従って出力電圧  $E$  も  $T$  に比例し、 $T = \alpha E$  と書ける。ここで、 $\alpha$  は比例定数を表す。本研究では既知の出力電圧から未知の入力トルクを推定するので、係数を  $E$  に掛けている。なお本実験装置では、圧縮荷重の場合に正の電圧が出力されるようにしている。次に、供試体のみに働く力  $F$  の算出方法を Fig. 7 に示す。シャフトの先に供試体が設置された状態でのピボット周りのトルクを  $T_{all}$ 、供試体を除いたシャフトのみの状態でのピボット周りのトルクを  $T_{shaft}$  とすると、供試体単体に働く力によるトルク  $T_{test}$  は  $T_{all} - T_{shaft}$  と近似される。厳密には、流れ場の中の物体が受ける力について線形性は成り立たないが、シャフトは十分長いためシャフト側面周りの流れは同じであり、またシャフト端面近傍での流れの差異によるトルクへの寄与は無視できる程に小さいと判断した。加えて、ピボット点から供試体の中心までの距離を  $l_1$  とすると、供試体単体に働く力  $F$  は

$$F = \frac{T_{test}}{l_1} \approx \frac{T_{all} - T_{shaft}}{l_1} = \frac{\alpha_{all}E_{all} - \alpha_{shaft}E_{shaft}}{l_1} [N] \quad (1)$$

と推定される。

実際には揚抗力はタイヤ側面に平行な面内で自由な方向を取るため、最低 2 つの方向成分を検出しなくてはならない。本研究では Fig. 8 のように 3ch での測定となっているが、これは本実験装置の都合上、ロードセル先端と接触部を締結できない、つまりロードセルで圧縮方向の成分しか検出できないためである。予め全ての ch を圧縮状態にしておくことで、ロードセルの引張方向にトルクが生じた際にもひずみがトルクに追従できるようにしている。各 ch について、それぞれが受け持つトルクを基に供試体単体に生じる力を算出する。この力をそれぞれ  $F_1, F_2, F_3$  とすると、その方向は Fig. 9 に示す通りになる。そして抗力及び揚力の向きを同 Fig. 9 のように定めれば、抗力  $D$  及び揚力  $L$  は以下の式で表される。

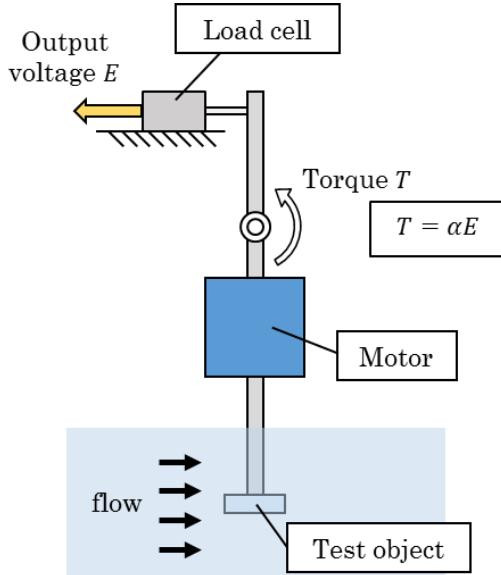


Fig. 6 Proportional relationship between input torque and output voltage.

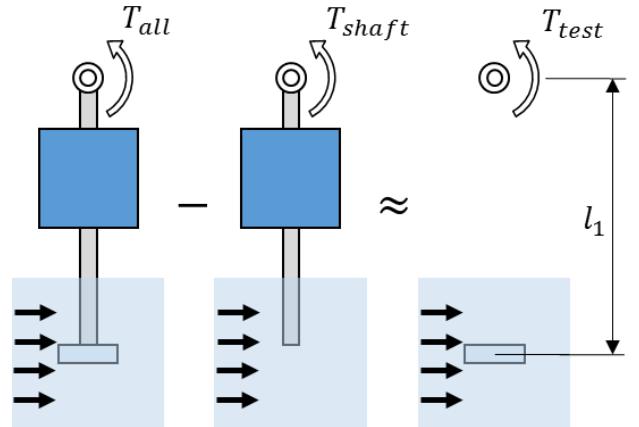


Fig. 7 Estimation of the force acting on a test object only.

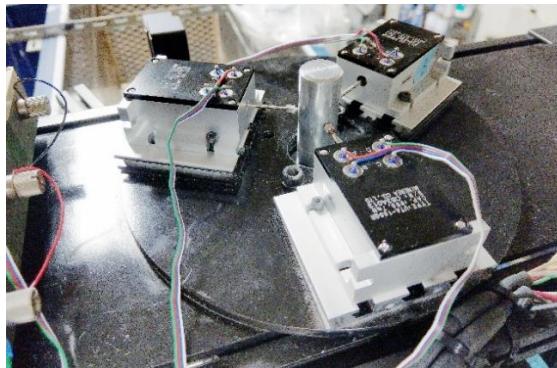


Fig. 8 Three load-cells on the top of the measurement system.

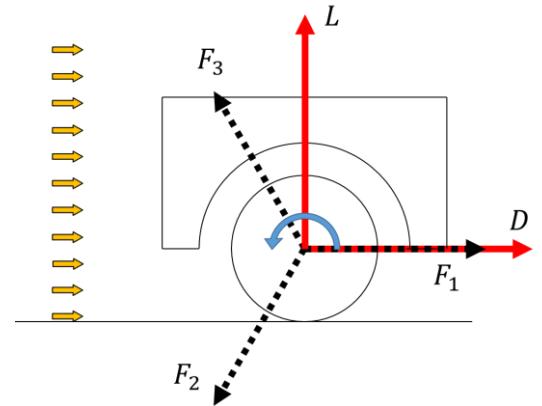


Fig. 9 Definitions of  $F_i$ , drag, and lift.

$$D = F_1 - \frac{1}{2}(F_2 + F_3) \text{ [N]} \quad (2)$$

$$L = \frac{\sqrt{3}}{2}(F_3 - F_2) \text{ [N]} \quad (3)$$

上記の 3ch 計測に当たって予め必要な値は、各 ch における入力トルク-出力電圧間の比例定数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  である。この比例定数を求めるために、Fig. 10 に示すようなキャリブレーションを行う。可動部にテグスを繋ぎ、滑車を介して分銅を吊るすことでトルクを掛ける。分銅は 0~50g まで 10g 刻みに荷重・抜重する。テグスの張力の向きは流れに平行であり、これは ch1 のロードセルの向きでもある。このトルク  $T_{cal}$  は分銅の重量  $W$  と腕の長さ  $l_2$  より求められる。

$$T_{cal} = l_2 W \text{ [N m]} \quad (4)$$

トルク  $T_{cal}$  により可動部は微小に回転し、ロードセルと接触する箇所では微小変位  $\delta s$  が生じる。この変位によって各 ch のロードセルに生じる力を Fig. 11 に図解する。3 つのロードセルは  $120^\circ$  每に配置されているので、軸の変位  $\delta s$  によって ch1 では  $\delta s$  の伸び、ch2, 3 では  $\delta s/2$  の縮みが生じる。ロードセルのバネ定数を  $k$  とすれば、軸がロードセルから受ける圧縮力の増分  $\Delta f_i$  は、

$$\Delta f_1 = -k\delta s \quad [\text{N}] \quad (5)$$

$$\Delta f_2 = k \frac{\delta s}{2} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

$$\Delta f_3 = k \frac{\delta s}{2} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

となる、これらの合力は  $\Delta f_1$  と同じ向きで、大きさは  $(3/2)k\delta s$  である。従って、1 本のロードセルがトルク  $T_{cal}$  を全て受け持った場合の圧縮力の増分に比べると、ch1 にはその  $-2/3$ 、ch2, 3 にはその  $1/3$  の増分しか生じない。以上を踏まえると、各 ch の比例定数  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は次のように表せる。

$$\alpha_1 = -\frac{2}{3} T_{cal} / E_1 \quad [\text{N}] \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{3} T_{cal} / E_2 \quad [\text{N}] \quad (9)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{3} T_{cal} / E_3 \quad [\text{N}] \quad (10)$$

ここで、 $E_1, E_2, E_3$  は各 ch の出力電圧である。 $T_{cal}/E_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は、実際には最小二乗法を用いて計算する。即ち、横軸に電圧  $E_i$ 、縦軸にトルク  $T_{cal}$  をとり各荷重における点をプロットした場合の、点群に最も良く沿う直線の傾きを  $T_{cal}/E_i$  とする。こうして得た  $\alpha_i$  を基に  $D, L$  を導出する。

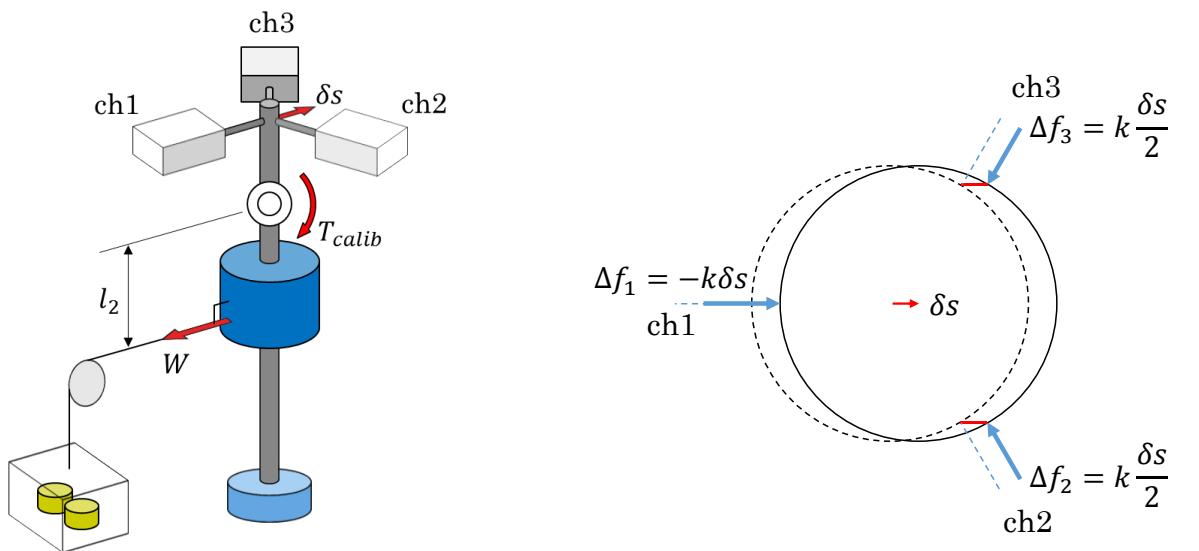


Fig. 10 Overview of calibration.

Fig. 11 Forces from each load cell caused by displacement of shaft.

### 3. 装置の信頼性評価

今回製作した測定装置が信頼できるものか確かめるために、2つの実験を行った。

#### 3.1 入出力線形性

本測定装置は、入力トルクと出力電圧が線形関係にあることを前提としている。このことについて検証を行った。実験内容は、2.3節で述べたキャリブレーションである。ただし本検証で重視するのは、最小二乗法により求めるトルク・電圧直線の傾きではなく、回帰直線がデータ群にどれほど良く一致しているかを表す決定係数 $R^2$ である。

Fig. 12にキャリブレーションをした際の電圧・トルク間の関係を示す。これを見ると、データ点が回帰直線に良く沿っていることが確認できる。Table 1にこのときの各chの回帰直線の決定係数 $R^2$ を示す。いずれも1に極近い値となっている。このことから装置の入出力線形性は十分に高いと結論した。

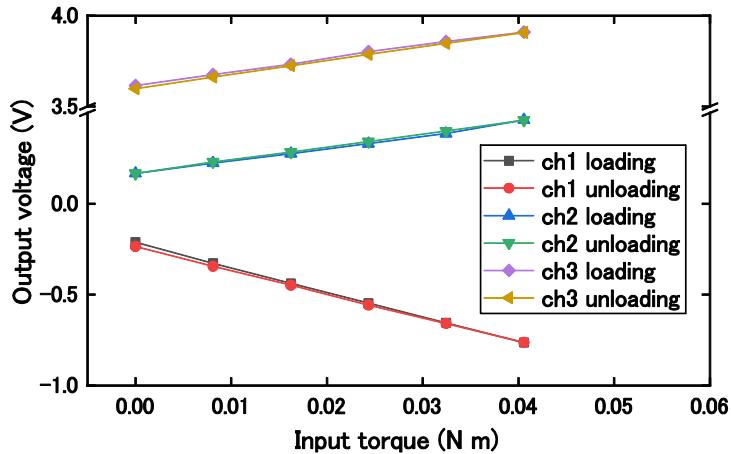


Fig. 12 Relationship between input torque and output voltage.

Table 1 Coefficients of determination  $R^2$  of each channel.

ch1	ch2	ch3
0.9986	0.9970	0.9960

#### 3.2 測定値の正確性

次に、計測される値そのものが正確かどうか確かめるために、Fig. 13のように円柱の抗力係数を測定し、Fig. 15に示す既存の研究結果<sup>(16)</sup>と一致するかを検討した。実験条件をFig. 14に示す。一様流速 $U = 370 \text{ mm/s}$ 、動粘性係数 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の水中で、直径 $d = 25 \text{ mm}$ 、水没長さ $l = 125 \text{ mm}$ の円柱が力を受ける。レイノルズ数は $Re = Ud/\nu$ と定義する。実験結果をTable 2に示す。先行研究の結果が $Re = 8 \times 10^3$ 、アスペクト比5において $C_D = 0.7\sim0.8$ 程度の値を示しているのに対して、本実験装置を用いた測定結果は $Re = 8 \times 10^3$ において $C_D = 0.84$ と、良好な一致を見せている。このことから、本実験装置は正確な測定を行っていると判断した。

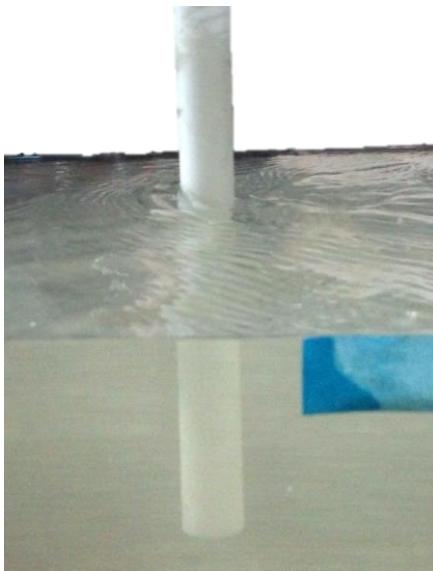


Fig.13 A finite cylinder set in flow for drag measurement.

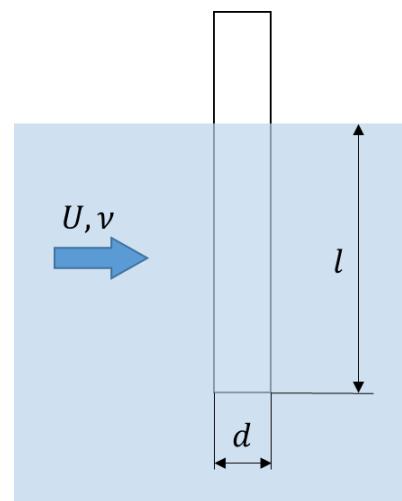


Fig. 14 Geometry of the experiment

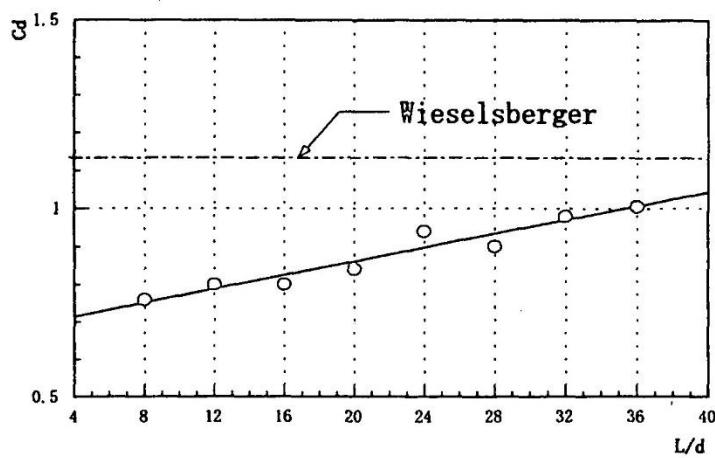


Fig 15 Drag coefficients measured in previous works<sup>(16)</sup>.

Table 2 Drag coefficient and setting parameters in drag measurement.

Reynolds number [-]	$8 \times 10^3$
Aspect ratio ( $l/d$ ) [-]	5.0
$C_D$ [-]	0.84

## 4. 供試体に働く揚抗力

### 4.1 実験条件

本実験ではケーシング内の供試体に生じる揚抗力を測定するが、その大きさが何に起因するものか調べるために、2セットの対照実験を行った。

まず、供試体周りの状況について、Fig. 16 のように3種類の条件を設定した。

- ①地面板なし。空中にタイヤだけが浮いている状態。
- ②地面板あり。オーブンホイールカーのように剥き出しの状態。
- ③地面板・ケーシングあり。タイヤがホイールハウスで覆われた状態。

これらの状態で、溝のない供試体を用いて揚抗力を計測した。供試体の溝については後述する。

次に、供試体表面の溝形状について、Fig. 17 のように3種類の条件を設定した。

- ①溝なし。
- ②溝 A. 踏面に周方向の溝が3本彫られている。
- ③溝 B. 周方向の溝3本に加えて、軸方向の溝が36本彫ってある。

詳細な寸法については、付録Bの図面を参照されたい。

なお、測定する揚抗力の正の向きはFig. 9に示す通りである。揚抗力係数算出に用いた代表断面積は、主流方向に投影された供試体の面積である。

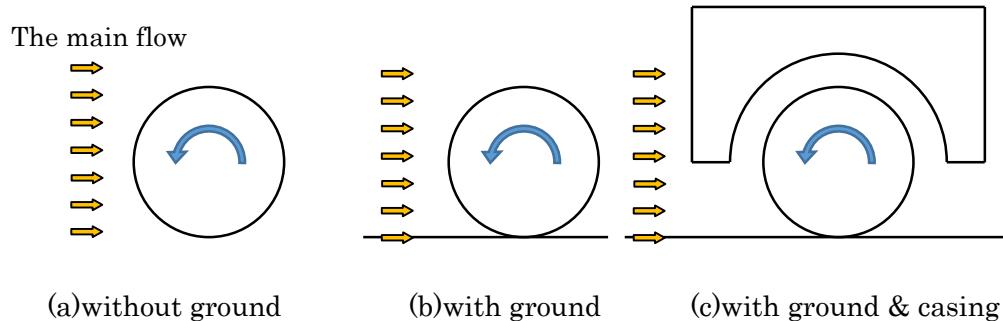


Fig. 16 Three conditions of the environment of a test object.

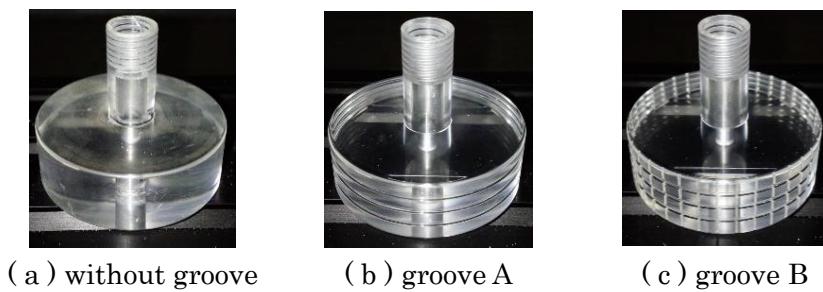


Fig. 17 Three different types of a test object.

### 4.2 地面等の条件による揚抗力係数の違い

Fig. 18に、供試体周りの3条件での測定結果を示す。横軸が抗力係数、縦軸が揚力係数を表す。まず「地面板なし」の条件について見ると、供試体が静止している場合、揚力はほぼ0である。

これは流れ場の境界条件が対称となっていることを考えれば当然の結果であり、測定装置の正確性を裏付けている。また、供試体が回転している場合、揚力が負の方向に働いているが、これはマグヌス効果の表れと考えられる。

次に、「地面板あり」の条件について見ると、供試体が回転している場合の方が揚力・抗力共に小さい値を示している。

さらに、「地面板・ケーシングあり」の条件について見る。抗力は供試体が回転している場合の方が小さく、揚力は供試体が静止している場合の方が小さかった。

最後に、3種類の条件における結果の関係について見る。まず分かることは、「地面板・ケーシングあり」の条件において、抗力が著しく小さいことである。これは、ケーシングが風除けの役割を果たしたためと考えられる。次に、地面板が存在する2条件では、揚力がいずれも正の値をとっている。

但し、この揚力の値には正方向のバイアスが生じているのではないかと考えられる。根拠としては、先行研究に「地面板有り」と同じ状況で行われたもの<sup>(17)</sup>があるが、Table 3 に示したその研究の結果と比べると、抗力に対して揚力が特に大きいことが確認されたことが挙げられる。なお、Table 3 に2つの値があるのは、2つの異なる乱流モデルを用いた際の結果だという。レイノルズ数が異なるために揚抗力係数の値こそ一致しないものの、供試体が回転している場合の方が揚力・抗力共に低下するという傾向、特に抗力の低下する割合が約1割と良く一致しているため、揚抗比を本実験結果と比較することは適切と考えている。2.3節で説明したように、本研究における揚抗力は、流れのある状態での出力から流れのない状態での出力を差し引くことで求めている。これは地面板が流れによって変形しないことを前提としている。しかし結果を見るに、地面板は Fig. 19 のように流れによって変形し、供試体に力を与えていたものと思われる。現段階では、バイアスの大きさは各条件で同じであったと仮定して、揚力の大小関係を考察していく。

以上の結果を統合すると、次のような相関関係が言える。

1. 地面板が存在すると、供試体回転時の抗力は供試体静止時に比べて低下する。
2. ケーシングが存在すると、供試体回転時の揚力が増加する。

第一の関係について考察するために、「地面板・ケーシングあり」の条件における供試体中央断面での流れの様子を撮影した。ここでいう中央断面とは、Fig. 20において斜線によって示された面である。それを Fig. 21 に示す。図は、それぞれの流れ場の 1/60 秒分の流跡線をトレーサによって可視化したものである。これを見ると、回転時と静止時との流れとで、流れの様子が異なっていることが確認される。その違いを模式的に表現したものが Fig. 22 である。

まず供試体の回転と静止での違いについて考える。回転時は供試体の表面にせん断による渦が見られるが、静止時は見られない。また、流跡線の長さを見ると、その後方の流れは回転時の方が遅くなっていることが分かる。この2つの特徴①回転時に供試体表面の剥離点後方でせん断による渦ができる、②回転時の方が後流の速度が小さい、は Fig. 23 に見られるように「地面板あり」の場合でも確認される現象である。直感的には、供試体が回転している場合の方が、供試体後部の流れが遅く、より流体の運動量が失われていることになるため、供試体に掛かる力は大きくなるのではないかと思われるが、実際にはそうはない。

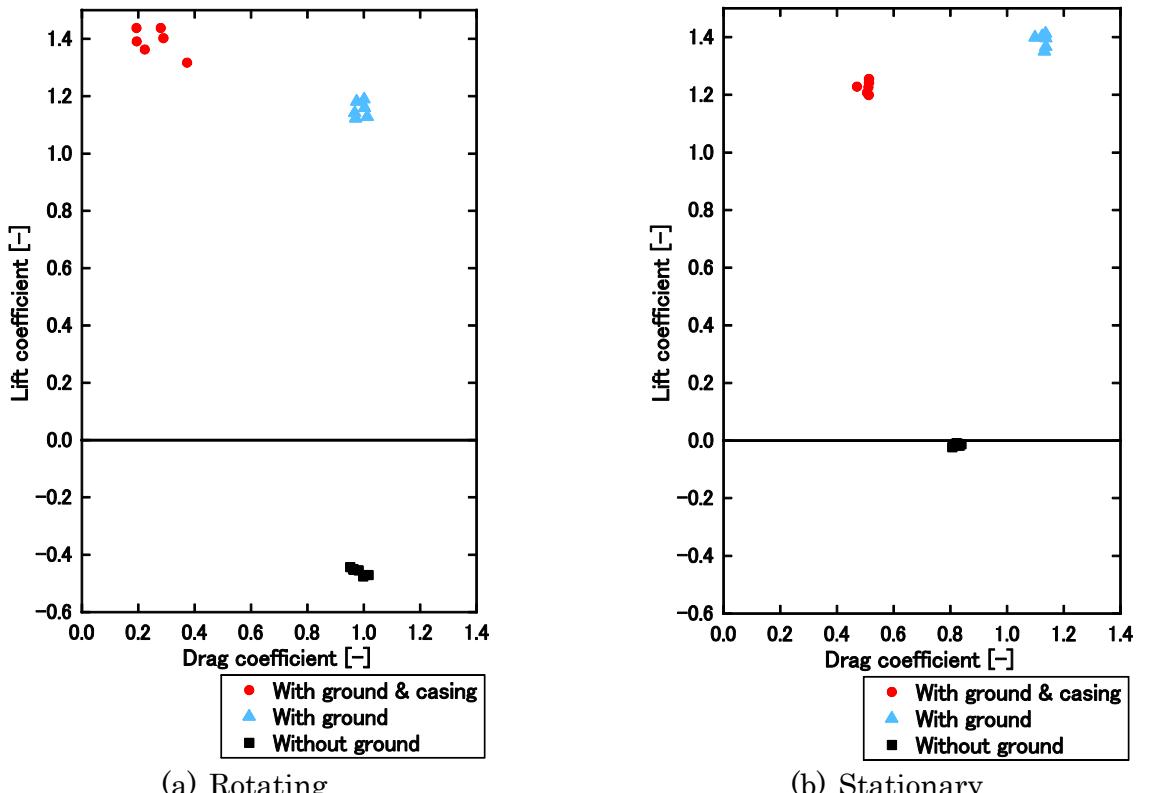


Fig. 18 Drag & lift coefficients of the test object without groove under 3 environmental conditions.

Table 3 Drag & lift coefficients under the condition with ground effect in previous work<sup>(17)</sup>.

	rotating		stationary	
	$C_D$	$C_L$	$C_D$	$C_L$
S-A(Fine)	0.475	0.152	0.523	0.349
RKE(Fine)	0.434	0.156	0.482	0.357

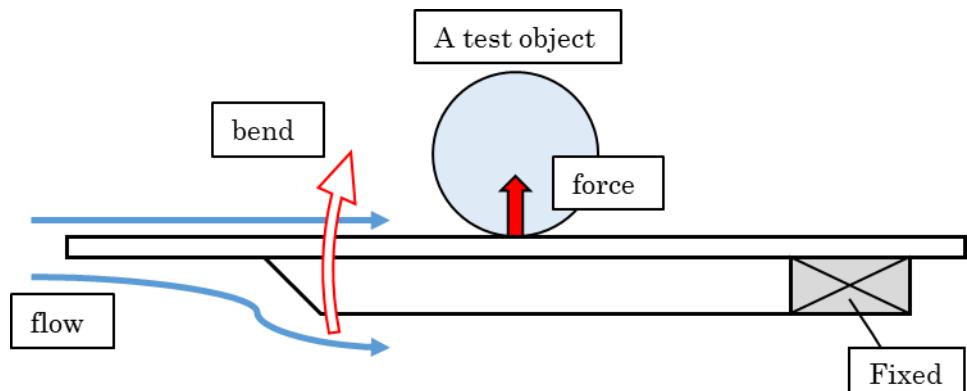


Fig. 19 Force acting on a test object from a ground plate.

この説明として1つ考えられるのは、接地点前方の流れによる圧力である。Fig. 22, Fig. 24 で描いた流れを表す線は厳密には流線ではない。接地点前方の流れを表す線は接地点に向かって収束しているが、これは流体が圧縮されているのではなく、面外に流出していることを示している。つまり、線が密になっていく箇所では流体は面外へ流出し、疎になっていく箇所では面外から流入していることになる。接地点前方では、流体が面外に流出することで生じる流体の運動量変化を実現させるための力を供試体が流体に与えているはずである。この力の主流方向成分の差が抗力の違いとして表れているのではないかと考えられる。接地点前方の流れを表す模様は、供試体回転時には粘性摩擦により全体的に地面側へ移動する。その様子を Fig. 24 に簡単に示した。そのため、線が密になる変化率が大きい箇所、即ち流体の流出の激しい箇所が静止時に比べ接地点に近づく。接地点に近い箇所では、供試体表面に生じる圧力の主流方向成分は小さくなる。この主流方向の力の差が、後流の運動量の差を上回ったのではないか、と考えられる。

第二の関係についても、同様の理論で説明することができる。供試体が回転する場合の方が、供試体前面の圧力集中箇所が接地点に近づくならば、その圧力の合力の揚力方向成分は供試体静止時より大きくなるはずだからである。

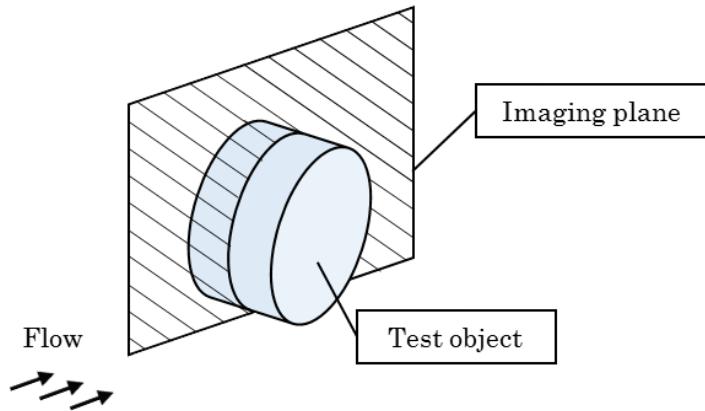
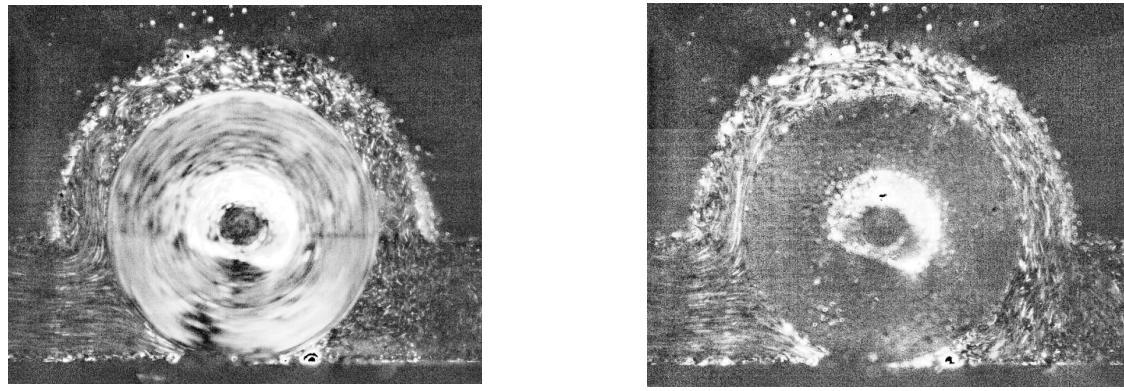


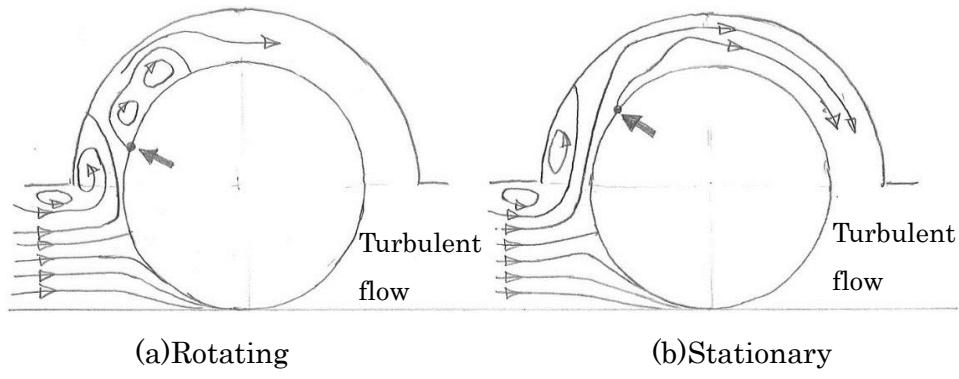
Fig. 20 Imaging plane for flow visualization.



(a) rotating

(b) stationary

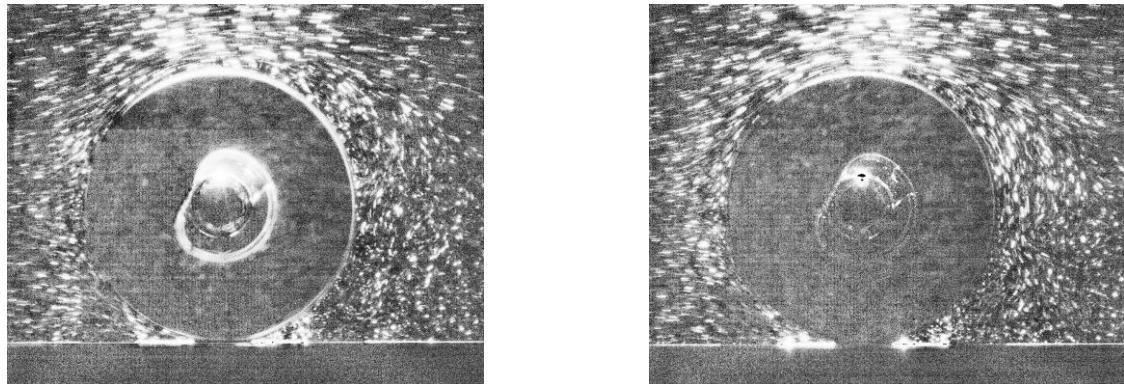
Fig. 21 Pathlines around a test object with ground & casing.



(a)Rotating

(b)Stationary

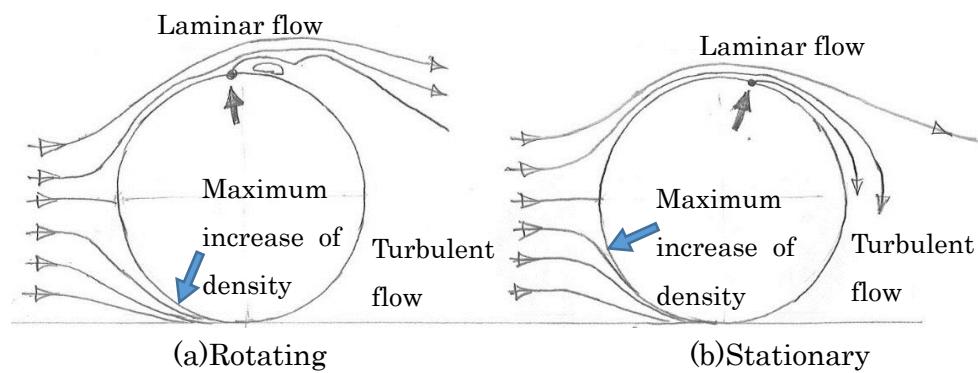
Fig. 22 Flow patterns with ground & casing.



(a) rotating

(b) stationary

Fig. 23 Pathlines around a test object with ground.



(a)Rotating

(b)Stationary

Fig. 24 Flow patterns with ground.

#### 4.3 供試体の溝形状による揚抗力係数の違い

Fig. 25 に、3種類の供試体を用いた測定結果を示す。横軸が抗力係数、縦軸が揚力係数を表す。外部の条件は、「地面板・ケーシングあり」で統一した。4.2節の結果と比べると、各条件ごとの差異は小さいが、供試体が回転している場合も静止している場合も、溝Aが最も大きい抗力を示している。また、溝形状による抗力の変化と揚力の変化の間には、負の相関があるようである。

Fig. 26 に、各供試体を用いた際の中央断面流れ場を示す。溝の種類による流れの様子は、互いに良く似通っている。今後、流れの様子の差異を判別することが課題である。

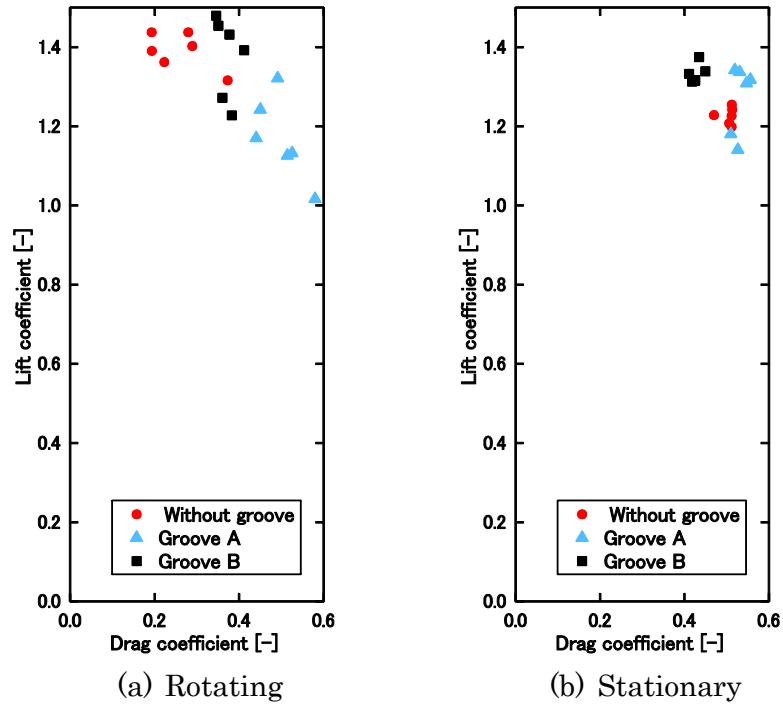
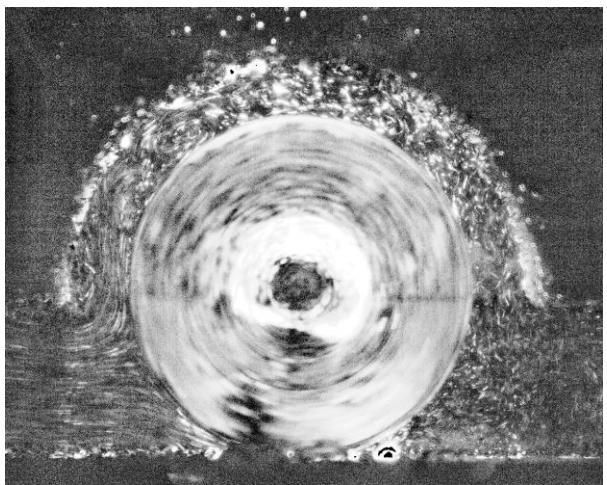
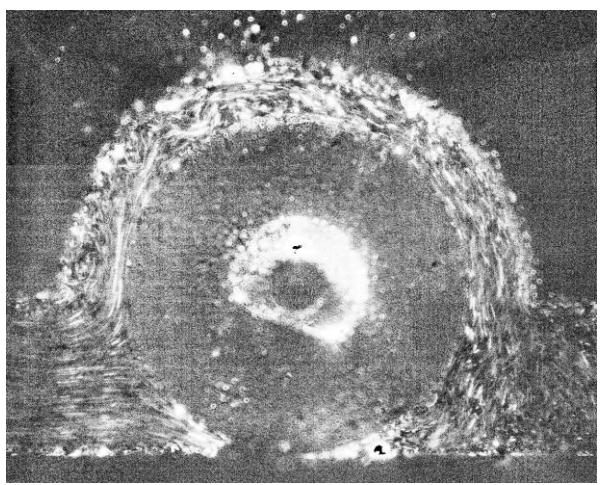


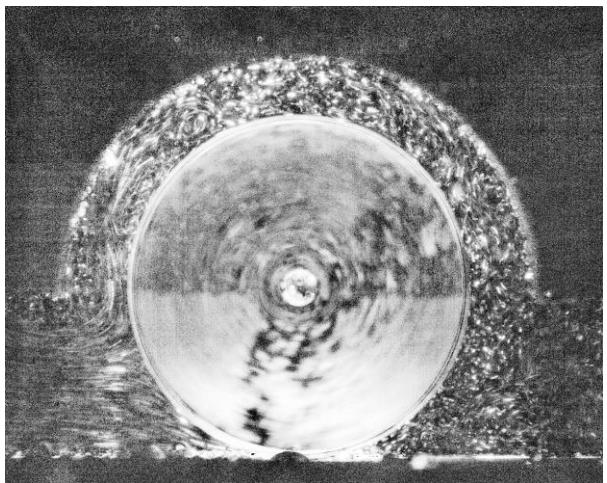
Fig. 25 Drag & lift coefficients of three test objects under the condition with ground & casing.



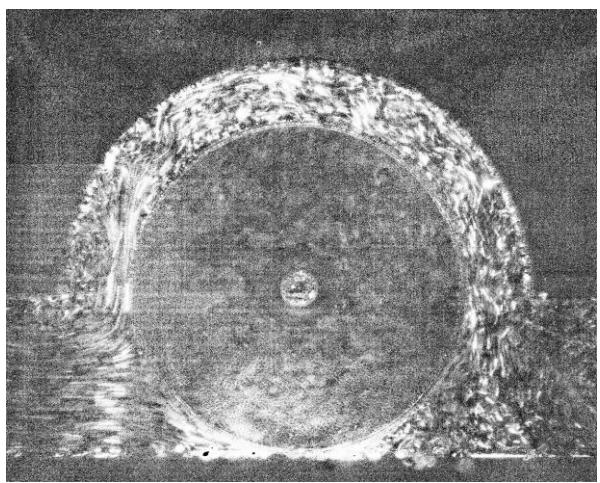
(a) Without groove, rotating



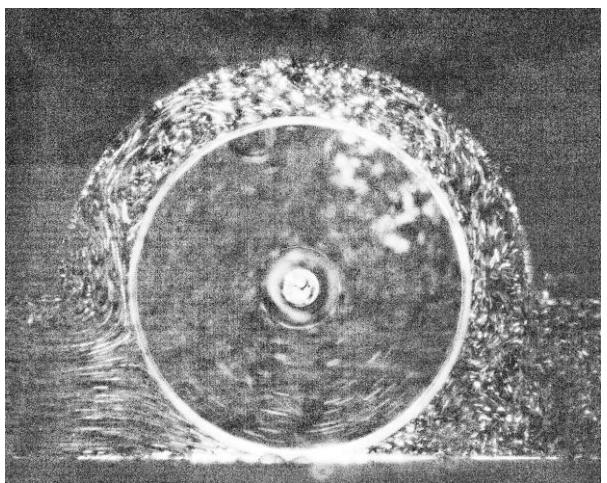
(b) Without groove, stationary



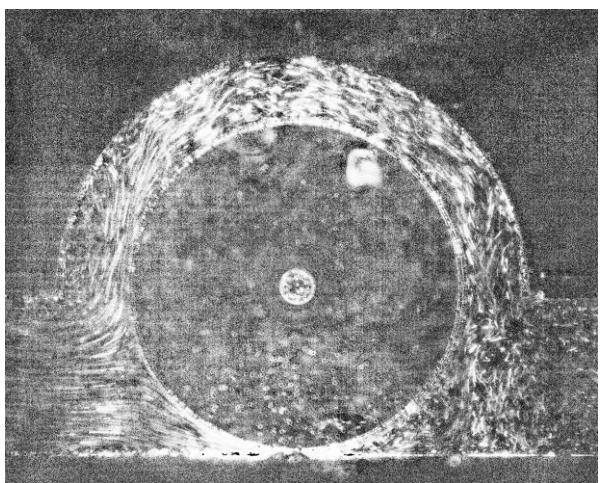
(c) grooveA, rotating



(d) grooveA, stationary



(e) grooveB, rotating



(f) grooveB, stationary

Fig. 26 Pathlines around a test object with ground & casing.

## 5. 結論

本研究では、ホイールハウス内のタイヤに働く力を求めるためにモデルによる実験計測を行った。回転状態・ホイールハウス及び地面の有無・タイヤ踏面溝の状態によってタイヤ単体の揚抗力がどう変化するかを確かめた。その結果、以下のような知見を得た。

1. 地面板が存在すると、供試体回転時の抗力は供試体静止時に比べて低下する。
2. ケーシングが存在すると、供試体回転時の揚力が増加する。
3. 供試体踏面溝の形状は、揚抗力双方に影響を与える。

1, 2 の説明として、ケーシング内の供試体に働く力は、接地点前方で流れが搔き分けられる現象が支配的に影響を及ぼしていて、供試体回転時には踏面の摩擦によりこの領域の流れが変化するために、力の方向が変化したとする仮説を立てた。この仮説が正しければ、供試体回転時の表面の摩擦を増大させることで、抗力を低減させることが可能かもしれない。この仮説の検証を今後の課題としたい。

## 謝辞

本研究を進めるに当たって、ご多忙の中装置の設計・計測の手順・計測の補助・測定データの解釈等、数々のご指導を戴いた村田滋教授、並びに定期報告会等、折に触れてご助言を戴いた田中洋介助教授に心より感謝を申し上げる。共同研究に当たって、大変参考になるご意見や研究成果を提供戴いた、東洋ゴム工業株式会社の名塩博史様や竹澤宏典様を始めとする関係者の皆様に厚く感謝申し上げる。実験装置の製作にあたって協力頂いた、ものづくり教育研究センターの赤井純様、川崎晃様に深く感謝申し上げる。日頃直面する種種の技術的課題について快く相談に応じて戴いた計測システム工学研究室の先輩諸兄姉、同輩諸兄に感謝申し上げる。とりわけ、研究方針・実験補助・結果の解釈等、多大なお力添えを戴いた修士1年生の遠藤佑樹さんに深く感謝申し上げる。

## 参考文献

- (1) 保谷敬夫, 自動車の燃費向上のための軽量化(<シリーズ>身近な材料・商品とGSC-持続可能な社会を目指す化学技術の過去・現在・未来), 化学と教育, **54**(4), (2006), 228-231.
- (2) 大聖泰弘, 自動車用エンジンの高効率化の可能性, 日本燃焼学会誌, **53**(163), (2011), 37-41.
- (3) 高木通俊, 乗用車の空気抵抗はどこまで下がる?, 日本機械学会2007年度年次大会講演資料集, **8**, セッションID W07(2), (2007).
- (4) 石川泰弘, 低燃費タイヤ, 化学と教育, **39**(6), (1991), 633-637.
- (5) Wickern, G., Zwicker, K., and Pfadenhauer, M., Rotating Wheels—Their Impact on Wind Tunnel Test Techniques and on Vehicle Drag Results, SAE Paper No. 970733, (1997).
- (6) Elofsson, P., and Bannister, M., Drag Reduction Mechanisms Due to Moving Ground and Wheel Rotation in Passenger Cars, SAE Paper No. 2002-01-0531, (2002).
- (7) Fabijanic, J., An experimental investigation of wheel-well flows, SAE Paper No. 960901, (1996).
- (8) Regert, T., and Lajos, T., Investigation of flow field past rotating wheels of cars, In *Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF), Budapest*, (2003), 387-394.
- (9) Cederlund, J., and Vikström, J., The Aerodynamic Influence of Rim Design on a Sports Car and its Interaction with the Wing and Diffuser Flow, Chalmers University of Technology, (2010), Master's Thesis.
- (10) Harmain, G. A., Mirza, A., and Ahmad, S. N., Computational Analysis of Flow in Wheelhouse of a Simplified Car Body, *International journal of advanced scientific and technical research*, **5**(2), (2012), 721-732.
- (11) Hobeika, T., Sebben, S., and Landstrom, C., Investigation of the Influence of Tyre Geometry on the Aerodynamics of Passenger Cars, *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, **6**(1), (2013), 316-325.
- (12) Bastian, S., Gregor, T., and Thomas, I., On the Influence of Ride Height Changes on the Aerodynamic Performance of Wheel Designs. *International Journal of Automotive Engineering*, **6**(1), (2015), 23-29.
- (13) Thivolle-Cazat, E., and Gilliéron, P., Flow analysis around a rotating wheel. In *13th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon*, (2006), 26-29.
- (14) Krajnović, S., Sasan S., and Branislav B., Numerical investigation of the flow around a simplified wheel in a wheelhouse, *Journal of Fluids Engineering*, **133**(11), Paper ID 111001, (2011).
- (15) Gulyás, A., Bodor, Á., Regert, T., and Jánosi, I. M., PIV Measurement of the Flow Past a Generic Car Body with Wheels at LES Applicable Reynolds Number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **43**, (2013), 220-232.
- (16) 山田英巳, 前田貴寛, 円柱の表面圧力分布に及ぼすアスペクト比の影響, 日本機械学会九州支部講演論文集, (2001), 151-152.

- (17) Mcmanus, J., and Zhang, X., A computational study of the flow around an isolated wheel in contact with the ground, *Journal of Fluids Engineering*, **128**(3), (2006), 520-530.

## 付録 A. 地面の境界条件の妥当性

2.1 節で、本実験では地面板が主流と同じ速度で後方へ移動しない代わりに、地面板に撥水加工を施すことで地面境界層の影響を低減していることを述べた。このモデル化の妥当性をシミュレーションによって確認する。Fig. A.1 は共同研究を行っている東洋ゴム株式会社様より提供戴いた、本実験と同一のジオメトリ・主流速度での流線を数値計算により求めたものである。但し、

- (a) 地面が主流と同じ速度で運動する。流体は表面に固着する。
- (b) 地面は運動しないが、流体と表面との摩擦はゼロ。
- (c) 地面は運動せず、流体は表面に固着する。

という 3 つの地面境界条件をそれぞれ適用している。本実験では、撥水効果により表面にすべりが生じる状態なので、(b)と(c)の中間的な条件となる。

Fig. A.1 を見ると、いずれの条件も似通った流れの様子を示している。特に、(a)に見られる接地点近傍の渦構造は(b), (c)にも同様の規模のものが見られることから、本実験装置の地面境界条件が実車の場合と異なることによる流れ構造への影響は無視できると判断した。

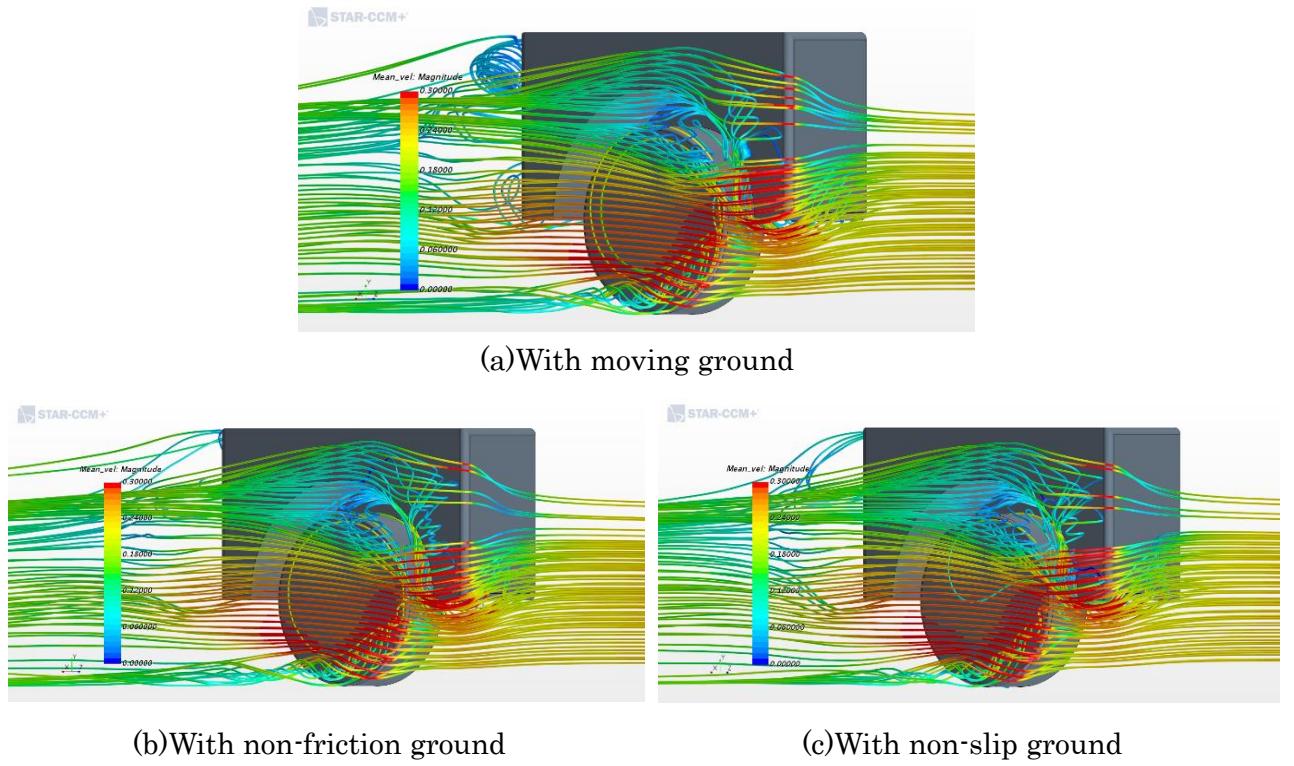


Fig. A.1 Streamlines around a test object calculated by CFD

## 付録 B. 実験に供した部品

Fig. B.1~B.7 に本実験で使用した供試体及びケーシングの図面を掲載する。これらの図面は、共同で研究している京都工芸繊維大学大学院 博士前期課程機械設計学専攻修士 1 年生 遠藤佑樹によるものである。

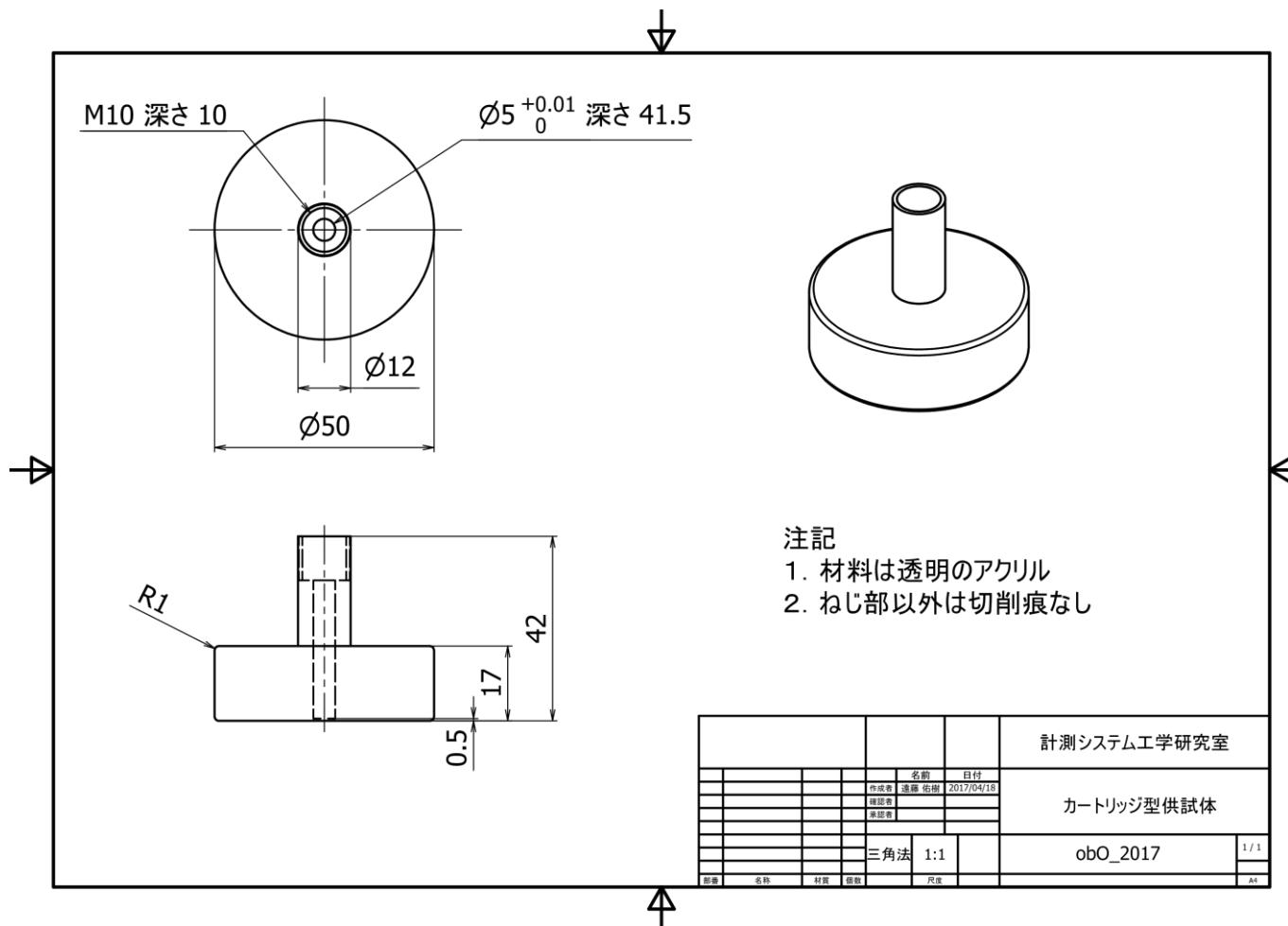


Fig. B.1 Test object without groove

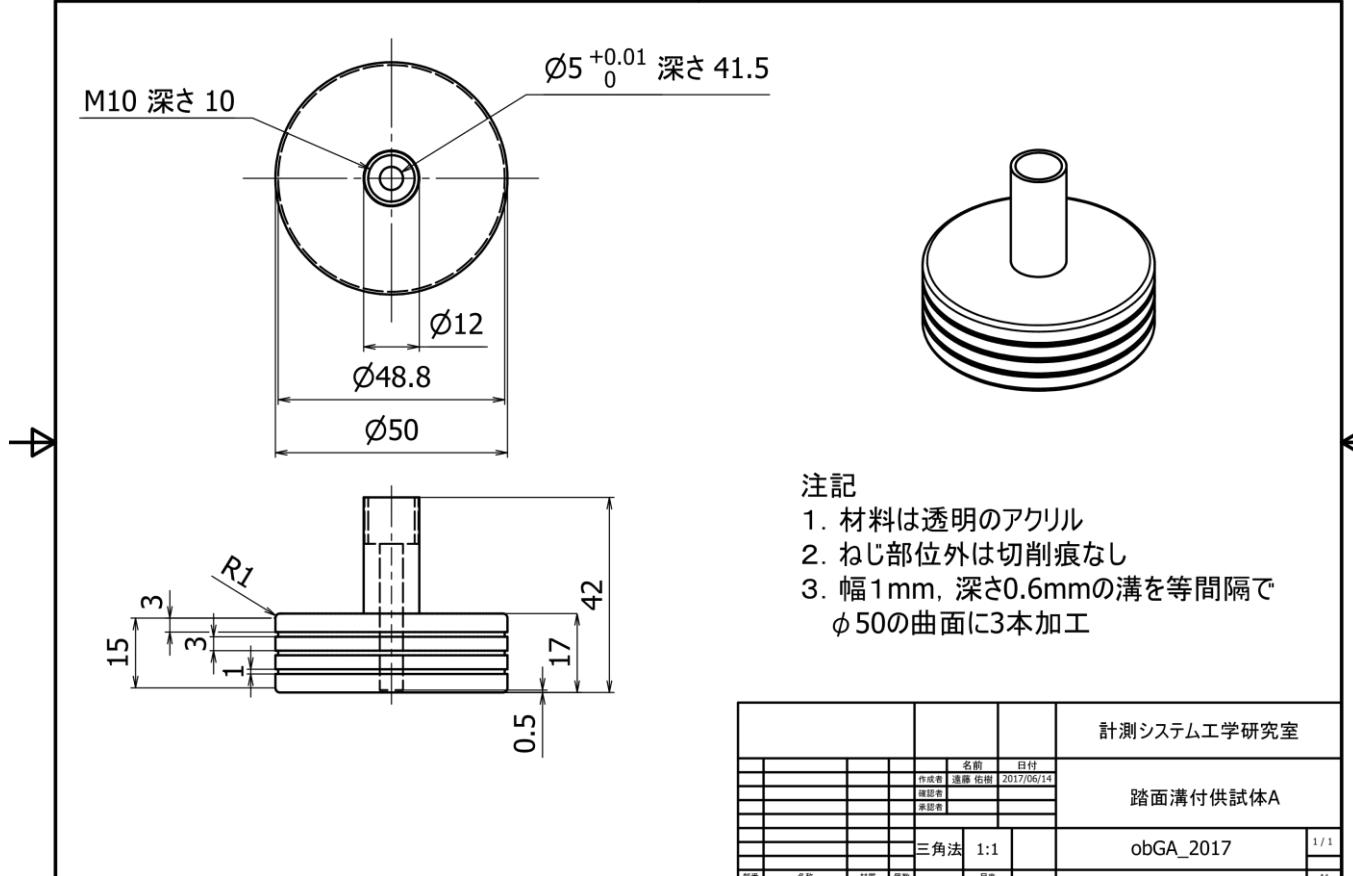


Fig. B.2 Test object with groove A

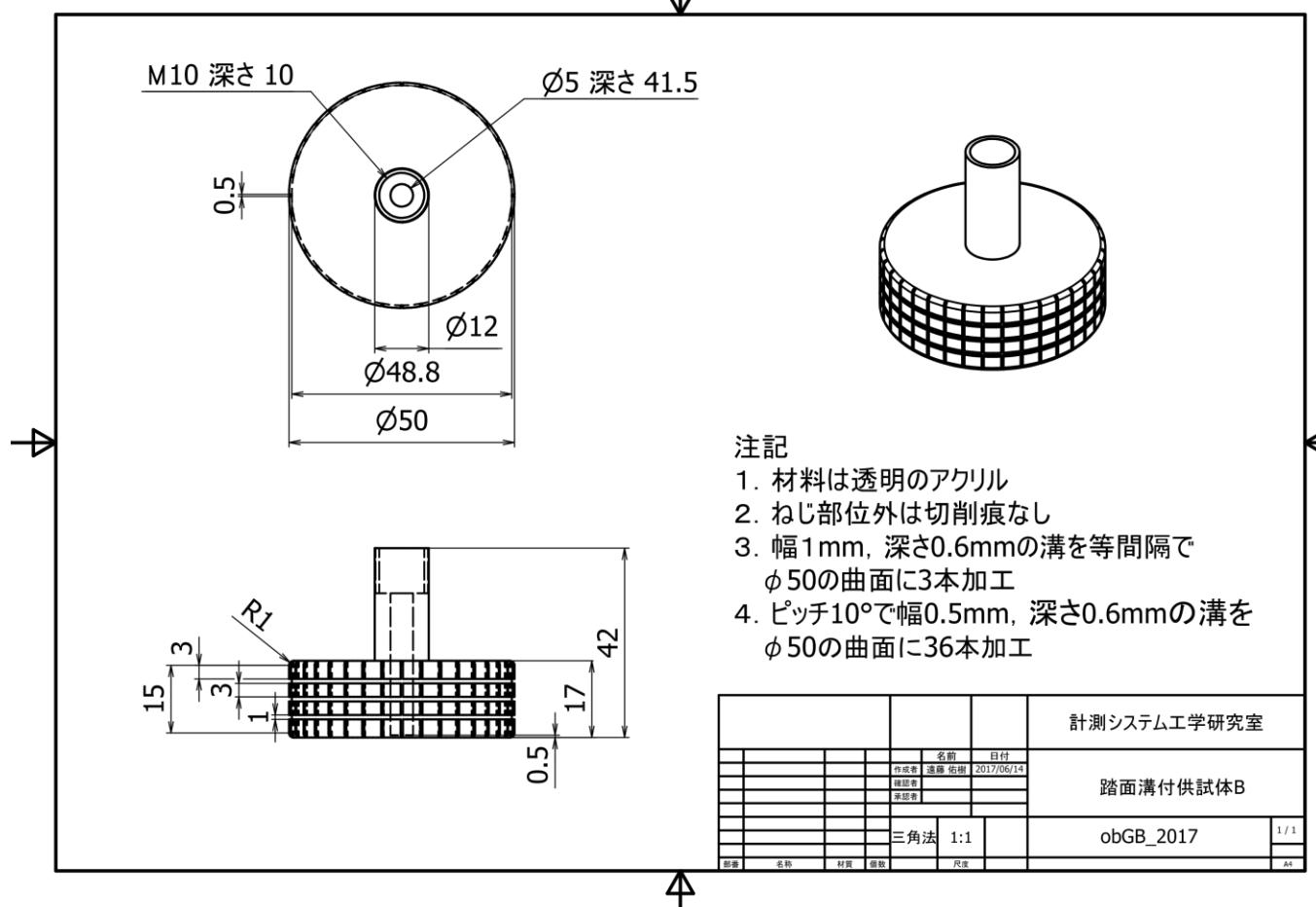


Fig. B.3 Test object with groove B

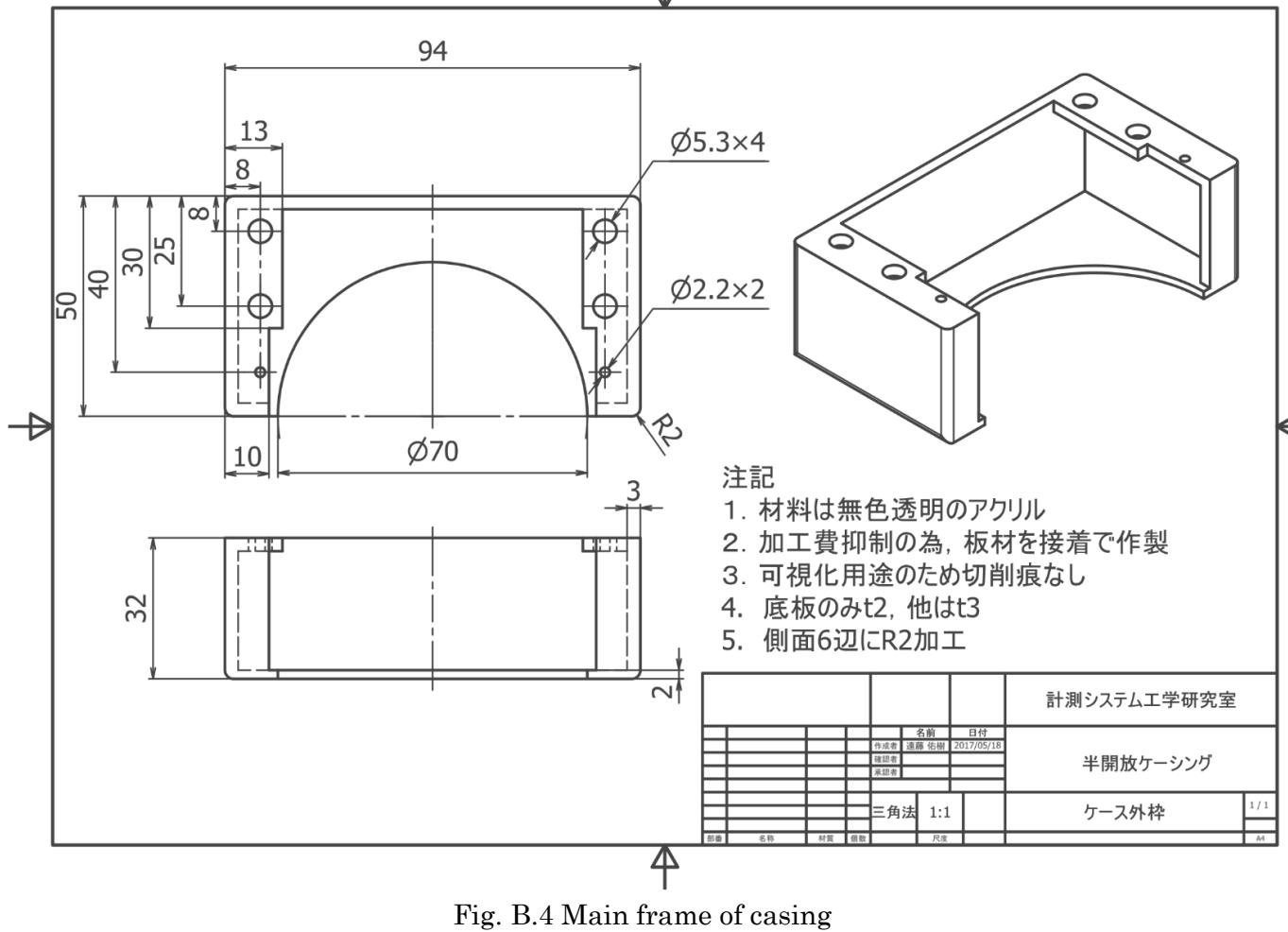


Fig. B.4 Main frame of casing

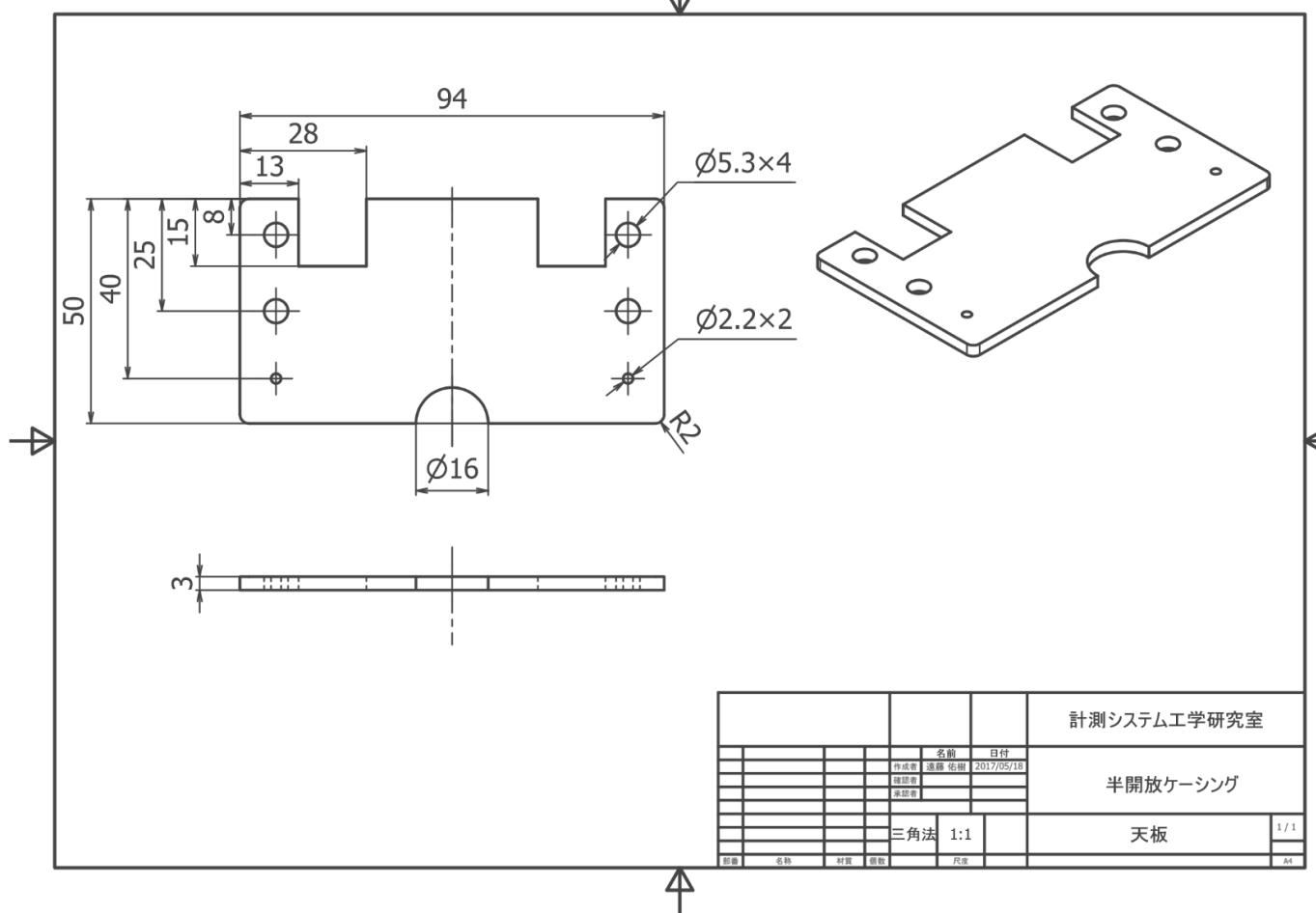


Fig. B.5 Upper plate of casing

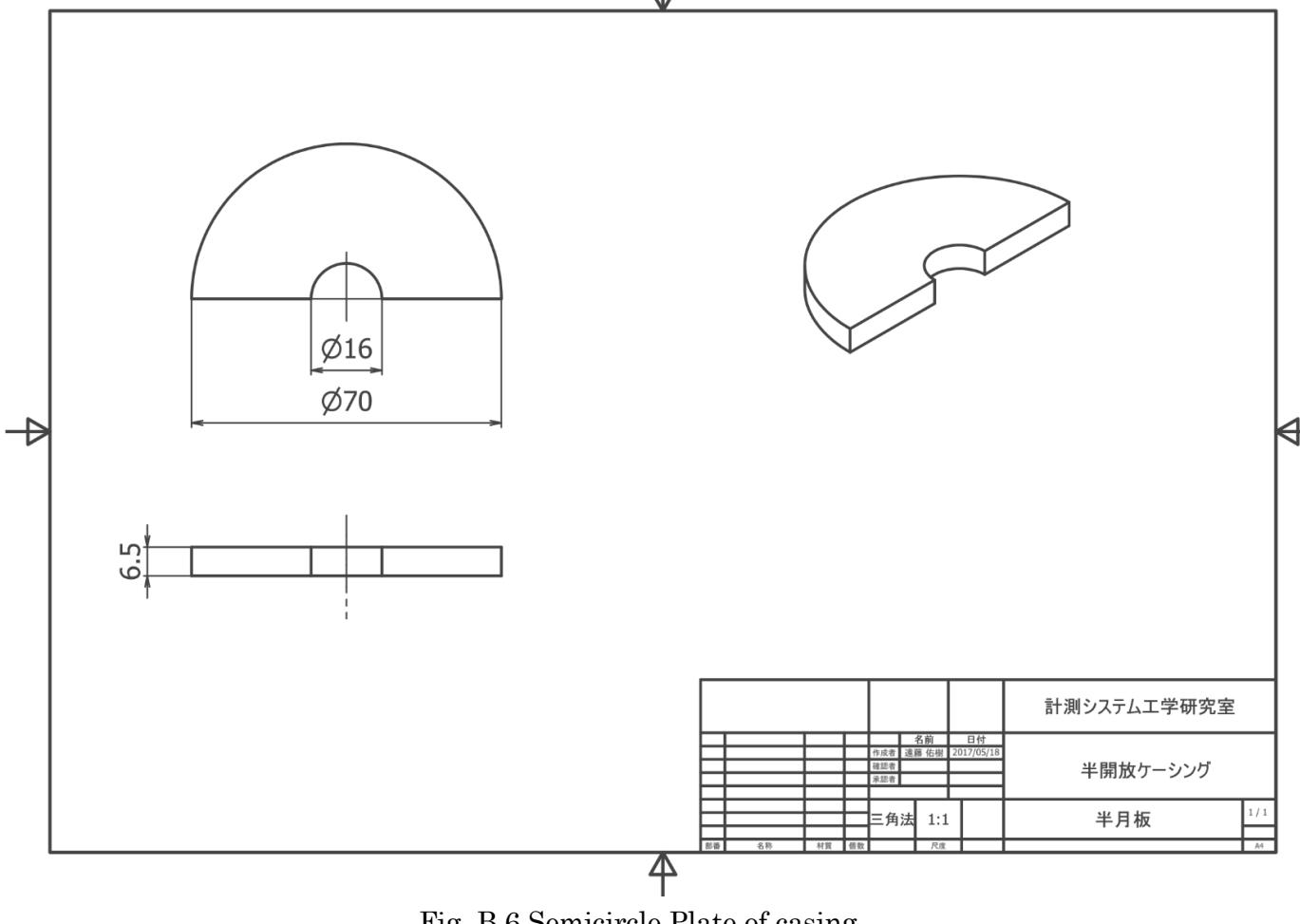


Fig. B.6 Semicircle Plate of casing

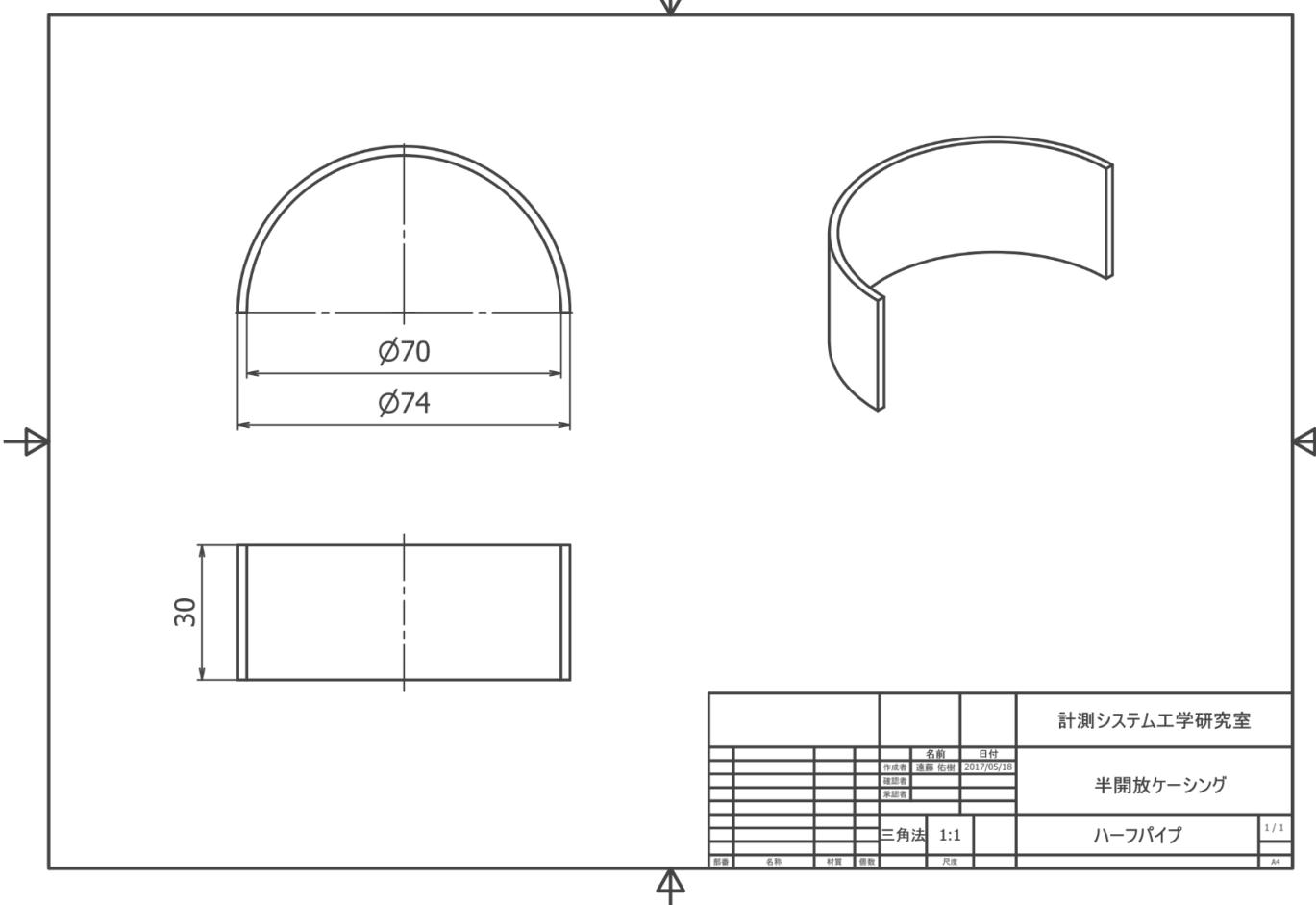


Fig. B.7 Semi-cylindrical shell of casing