

# 2012 年度森基金報告書

政策・メディア研究科 後期博士課程 小柳 玲乃

## 概要：

フライングディスクは円盤状の遊具として広く知られており、速度及び迎え角が小さくともディスクを浮き上がらせる力である揚力を得ることができるため、誰でも簡単に飛ばすことが可能である。しかし、フライングディスクは、未だその飛翔ダイナミクス、メカニズムが完全に解明されていない。本研究ではフライングディスクのダイナミクスを風洞実験データと実飛翔における位置計測データとの比較、および飛翔シミュレーションにより動力的、運動学的パラメータの比較、検証を行う。さらに、粒子画像流速法によって、ディスクまわりの流れ場の振る舞いを可視化することでディスクに作用する空気力を量的、質的に明らかにすることを旨とする。

## 1. 研究背景

フライングディスクは回転を与えて飛翔させる円盤状の遊具として広く知られている。ディスクはその形状、重量などから翼面荷重が小さく、速度及び迎え角が小さくともディスクを浮き上がらせる力である揚力を得ることができる。そのため、フライングディスクは誰でも簡単に飛ばすことが可能である。フライングディスクの飛翔形態は他のスポーツにおける飛翔体と比較し、非常に特徴的であり、空中を滑るように飛翔する。このようなディスクの特徴的な飛翔形態はディスクに作用する流体力、すなわち空気の力により決定されている。飛翔中ディスクの振る舞いを決定する要因としてはディスクの上側と下側との空気の速度差から生じた圧力の不均衡により揚力を発生させる翼の効果や、ディスクの回転が流れに対して垂直方向の力を生じさせる現象であるマグヌス効果、ディスクの上面で空気の流れがディスクに引き寄せられ、ディスクに張り付くように動くことで流れの方向が変化し、その方向によりディスクに力が作用するコアンダ効果などが挙げられる。このような様々なメカニズムで空気の流れは飛翔中のディスクに作用し、結果ディスクの振る舞いを決定している。しかし、フライングディスクの飛翔ダイナミクス及びメカニズムが未だ完全に解明されていない。そこで本研究ではフライングディスクのダイナミクスを、風洞実験データと実飛翔における位置計測データとの比、および飛翔シミュレーションにより動力的、運動学的パラメータを比較、検証する。さらに、粒子画像流速法によって、ディスクまわりの流れ場の振る舞いを可視化することでディスクに作用する空気力を量的、質的に明らかにすることを旨とする。

## 2. 本研究の目的、関連研究

本研究は以下の三項目で構成される。

- ①：風洞実験データと計測データとの比較、検証
- ②：フライングディスクの飛翔シミュレーション
- ③：揚力とディスクの回転角速度の関係性の解明

項目①ではディスクの飛翔中の挙動を決定する空気力を比較検証する。比較、検証にはモーションキャプチャシステムで実測したディスクの位置座標を逆動力学計算し求めた動力学データと風洞実験データで取得した動力学データを用いる。項目②では、ディスクの飛翔シミュレーションを行い、風洞実験データで得た動力学データを順動力学解析し求めた運動学データとモーションキャプチャシステムで実測し、算出したデータとを比較、検証する。一方で項目③ではディスクの後部まわりの空気の流れ場を、粒子画像流速法を使用して観察することによってディスクの回転角速度とディスクに作用する揚力との関係を考察する。このように飛翔中のディスクの挙動を決定する空気力などの動力学データを項目①で、空気力の結果生じたディスクの挙動に関する運動学的パラメータについて項目②で、それぞれモーションキャプチャを使用した実測データと風洞実験データを用いて比較し、検証する。そして項目①及び②によって示された空気力のうち、特に揚力とディスクの回転角速度との関係に注目し、揚力の発生メカニズムを空気の流れ場から考察する。本研究ではこれら3つの項目から飛翔中ディスクに作用する空気力を量的（項目①、②）、質的（項目③）に解析し、ディスクの振る舞いを明らかにすることを旨とする。研究の概要については Fig. 2.1 に示す。

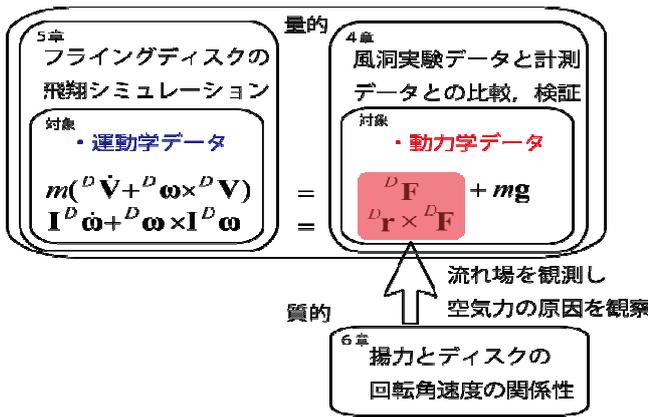


Fig. 2.2 : Schematic concept of this research

ここで関連する研究をいくつか挙げ、本研究との関係性や本研究の新規性について簡単に述べる。飛行中のフライングディスクの挙動に関する研究は Crowther and Potts[1]は風洞実験データから回転するディスクが直進しながら飛行する条件をシミュレーションにより求めた。Morisson[4]はジャイロ効果による飛行姿勢の安定性などを、風洞実験データを用いたシミュレーションから示した。一方で Hubbard and Hummel[2]は、高速度カメラを用いた実測データからシミュレーションを行い、ディスクの飛行距離を最大にする条件を求めた。これに対し本研究ではディスクの飛行ダイナミクスを調査するため、風洞実験データ、実測データ双方のデータを純動学的、逆動学的に比較、検証し、より正確なダイナミクスの再現を目指す。

一方でディスク周りの流れ場の研究に関しては Potts and Crowther[5], 加藤ら[3]が行っている。特に加藤らは流速が 3m/s 時のディスク周りの流れ場について観測、ディスクの回転角速度が上がるにつれ、空気の流れがディスクの後端に沿うように進むコアンダ効果がより顕著に現れていると示した。また加藤らは回転角速度と抗力との関係についても言及した。また Potts and Crowther は流速 6m/s から 20m/s までのディスクまわりの流れを観測し、ディスク後流の流れを再現した。しかし、加藤らは 3m/s という非常に低速な条件下での観測であり、実際の飛行では熟練者の場合ディスクの速さは 7 から 15m/s である。また、Potts and Crowther はディスクを回転させた実験をしておらず、双方ともに実際のディスクの

飛行を再現し、観測しているとは言い難い。そこで本研究では、ディスクまわりの流れ場を観察する粒子画像流速法を、実際に人間が投げる速度で行い、より実際の飛行に近いデータからディスクの回転角速度と揚力の関係を解明する。

本研究の新規性は以下の二点である。ひとつは風洞実験データ、実測データ双方のデータを使用したディスクの飛行ダイナミクスの検証、そしてディスクまわりの流れ場を実際の物理現象に近い環境下で観測、検証、この二点が本研究の新規性であるといえる。

### 3. 数理モデル

本研究では以下のように数理モデルを定義した。

#### 3.1 座標系

本研究では解析のため以下の3種類の座標系を定義した。定義した座標系をそれぞれ以下に記す。

##### 3.1.1 絶対座標系

絶対座標系は空間に固定した右手座標系であり、Z 軸方向は重力加速度と反対の方向、ディスクのリリース時の速度ベクトルを XY 平面に写像した方向ベクトルを Y 軸方向、Y, Z それぞれに垂直な軸を X 軸となるように各軸を定義した。

##### 3.1.2 ディスク固定座標系

ディスク固定座標系はディスクの重心と原点とを一致させた座標系であり、X 軸及び Y 軸をディスクの上面と並行となるように定義し、Z 軸を垂直となるように定義した。この座標系はディスクに固定した座標系であるため、ディスクの飛行中ディスク座標系は回転しながら移動する。ディスク座標系での表記は左上部に D と記載した。また、x, y, z 各軸の方向ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  と定義した。

##### 3.1.3 速度依存座標系

速度依存座標系は飛行中ディスクに作用する空気力成分である横力、抗力、揚力の方向ベクトルと座

標系の ${}^Vx$ ,  ${}^Vy$ ,  ${}^Vz$ 各軸を一致させた座標系である。速度依存座標系はディスクの飛行時ディスクの回転に依存せず、速度ベクトルに依存して方向が変化する。ディスク座標系で表記する際は左上部に $V$ と記載する。また、速度依存座標系の ${}^Vx$ ,  ${}^Vy$ ,  ${}^Vz$ 各軸の方向ベクトルをそれぞれ ${}^Vi$ ,  ${}^Vj$ ,  ${}^Vk$ と記述し、以下の式 4.1 から 4.3 のように定義した。

$${}^Vj = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \quad (\text{式 3.1})$$

$${}^Vi = {}^Vj \times {}^Vk \quad (\text{式 3.2})$$

$${}^Vk = {}^Vi \times {}^Vj \quad (\text{式 3.3})$$

絶対座標系、ディスク固定座標系、速度依存座標系、各座標系の関係を以下の Fig. 4.1 に示した。

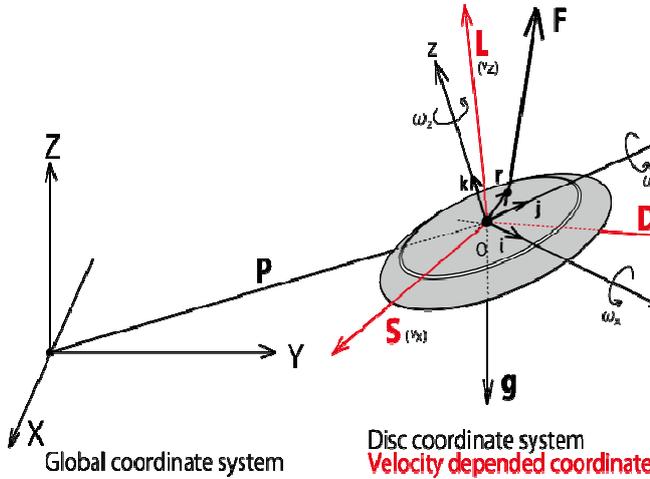


Fig. 4.1 : Coordinate System

### 3.1.4 空気力に関連する項目

本研究で扱う空気力を以下のように定義した。

- $\mathbf{D}$  : 抗力
- $\mathbf{S}$  : 横力
- $\mathbf{L}$  : 揚力
- $C_d$  : 抗力係数
- $C_s$  : 横力係数

- $C_l$  : 揚力係数

- $SP$  : スピンパラメータ

ここで抗力係数, 揚力係数, 横力係数, スピンパラメータは以下の式 3.4 から 3.7 のように定義した。

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (\text{式 3.4})$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (\text{式 3.5})$$

$$C_s = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (\text{式 3.6})$$

$$SP = \frac{2r\omega_z}{V} \quad (\text{式 3.7})$$

ここで $r$ はディスクの半径であり 0.135(m)である。また $\rho$ は流体, すなわち空気密度,  $A$ はディスクの代表面積である。ディスクの代表面積 $A$ は以下のように定義した。

$$A = \pi r^2 \quad (\text{式 3.8})$$

### 3.1.5 その他の物理量

- $\mathbf{F}$  : 力ベクトル
- $\mathbf{r}$  : 力の作用点ベクトル
- $\mathbf{P} = [P_x \ P_y \ P_z]^T$  : 位置ベクトル
- $\mathbf{V} = [V_x \ V_y \ V_z]^T$  : 速度ベクトル
- $\mathbf{g}$  : 重力加速度
- $\alpha$  : 迎え角
- $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  : 角速度ベクトル
- $m$  : ディスクの質量
- $\mathbf{I}$  : ディスクの慣性テンソル

## 4. 風洞実験データと計測データとの比較, 検証

フライングディスクに限らず飛行体に作用する流体力を観測するには風洞実験装置が広く使用される。観察対象のダイナミクスを細かく観察するため、例えばフライングディスクの場合には流速, ディスクの回転角速度, ディスクの仰角といった要素をわず

かに変化させて観測することが可能であるためである。現象の解明を目的とした場合、データは悉皆的に計測する必要がある。そのため、人間に投射させる実験ではこのような計測はできない。そのため、流体力の計測には風洞を使用することが多い。しかし、風洞実験装置で計測したデータは、実際に飛翔させたデータから算出したディスクに作用する力とのあいだに差異が生じる場合がある。例えば風洞実験では、ディスクを力計測を行う天秤に固定しなければならず、固定させるための支柱の存在が実際の飛翔の再現を困難にしている場合などが挙げられる。対象に作用する力を直接計測できる風洞実験であるが、このように短所もまた存在する。

上記のような短所が存在するため、風洞実験により得られた動力学データはディスクの実際の飛翔時に作用する空気力と比較する必要があると考えられる。そのため、本研究では風洞実験装置で計測した空気力のデータとモーションキャプチャにより計測した位置座標データから逆動学的に計算したディスクに作用する空気力とを比較、検証した。

## 4.1 実験

### 4.1.1 モーションキャプチャ実験

飛翔したディスクに作用する空気力を算出するため、Fig. 4.1 のようにフライングディスク上面に反射マーカーを貼り付け、被験者に投射させる実験を行った。反射マーカーは近赤外線を反射し、カメラ (Fig. 4.2) が反射した光からマーカーの位置座標を計測した。モーションキャプチャシステムのサンプリングレートは 500Hz に設定し、実験を行った。

試技内容は被験者にフライングディスクを投げてもらおうというもので、その際のマーカーの位置座標をモーションキャプチャシステムで撮影した。ディスクの飛翔距離は約 20m に設定し、その際のリリース時から約 10m のマーカーの軌跡を撮影した。実験の概略図については Fig. 4.3 に示した。



Fig. 4.1 : Marker Disc



Fig. 4.2 : Motion Capture system

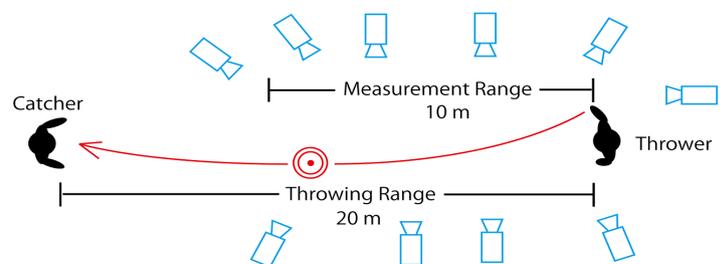


Fig. 4.3 : Schematic illustration of the Motion Capture experiment

### 4.1.2 風洞実験

ディスクの中心部に支柱を取り付け、ディスクを慣性主軸ここではディスク固定座標系の  $\omega_z$  まわりで 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13 rps (revolution per second, 回転数/秒) でそれぞれ回転させた。その際ディスクの迎え角を +90 deg から -10 deg まで変化させ、風速を 0m/s から 18m/s まで変化させた。この設定した計測範囲は先に述べたモーションキャプチャ実験

において、ディスクの飛翔中の速度，回転角速度，迎え角を算出し，飛翔期間中のそれらの変化を全て網羅したものである．設定した風速，ディスクの角速度，仰角時の抗力，揚力，横力及び三軸のモーメントをそれぞれ計測した．このように，計測した風洞実験の力及びモーメントは流速，回転角速度，迎え角の3つの要素により決定される．実験の様子については以下の Fig. 4.4 に示す．また実験の概要図については以下の Fig. 4.5 に示す．

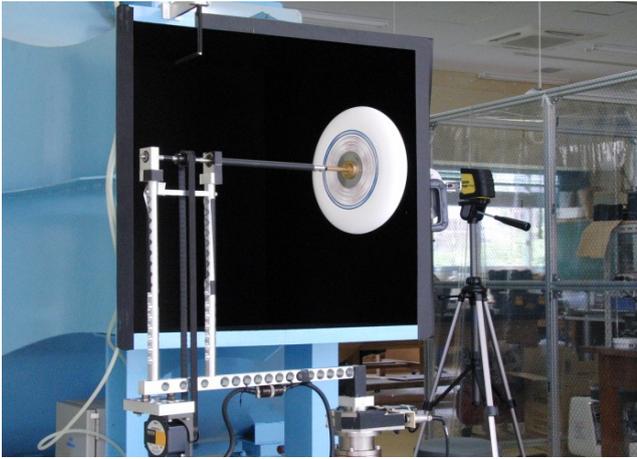


Fig. 4.4 : Wind tunnel test

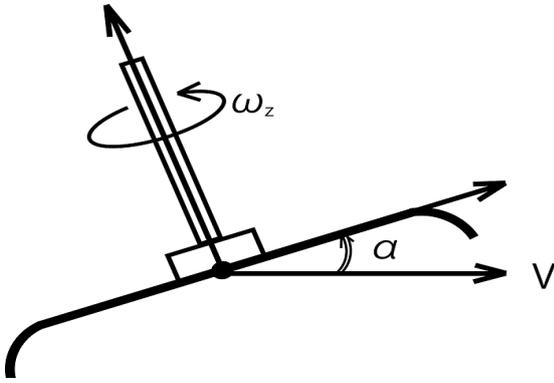


Fig. 4.5 : Schematic illustration of wind tunnel test

### 4.3 解析

モーションキャプチャシステムで得られるデータは位置座標データである．そのため採取したデータから逆動力学解析を行いディスクに作用する力を求め，比較した．

ディスク固定座標系では運動方程式は以下のよう  
に示される．

$$m({}^D\dot{\mathbf{V}}+{}^D\boldsymbol{\omega}\times{}^D\mathbf{V})={}^D\mathbf{F}+m\mathbf{g} \quad (\text{式 4.1})$$

$$\mathbf{I}^D\dot{\boldsymbol{\omega}}+{}^D\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{I}^D\boldsymbol{\omega}={}^D\mathbf{r}\times{}^D\mathbf{F} \quad (\text{式 4.2})$$

ここで，ディスクの質量  $m$  (kg)及び慣性テンソル  $\mathbf{I}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )は自ら計測したものを入力した．計測した質量及び慣性モーメントは以下の値である．

$$m = 0.175 \quad (\text{式 4.3})$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 0.004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.008 \end{pmatrix} \quad (\text{式 4.4})$$

ディスクの角速度は以下の式 4.5 から式 4.7 ように算出した．

$$\omega_x = \frac{d}{dt} \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} \quad (\text{式 4.5})$$

$$\omega_y = \frac{d}{dt} \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} \quad (\text{式 4.6})$$

$$\omega_z = \frac{d}{dt} \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} \quad (\text{式 4.7})$$

またディスクの迎え角  $\alpha$ は以下のように定義し，算出した．

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{{}^D V_z}{\sqrt{{}^D V_x^2 + {}^D V_y^2}} \right] \quad (\text{式 4.8})$$

### 4.4 結果

風洞実験データと，計測データとの比較は 10 試技で行った．

一試技を取り出し，抗力，横力，揚力を比較した図を以下の Fig. 4.6 から Fig. 4.8 に示した．またピッチング，ローリング，ヨーイングモーメントをそれぞれ Fig. 4.9 から Fig. 4.11 に示した．図中の赤線は飛翔中のディスクの速度，回転角速度，迎え角に対応した風洞実験データであり，青線はモーションキャプチャを使用して算出したディスクに作用する力及びモーメントである．風洞実験データはモーションキャプチャ実験により算出されたディスクの速度，回転角速度，迎え角に対応する力及びモーメントデータである．ここでピッチングモーメントは速度依存座標系の  ${}^V x$  方向，ローリングモーメントは  ${}^V y$  方向，ヨーイングモーメントは  ${}^V z$  方向のモ

ーメントである。

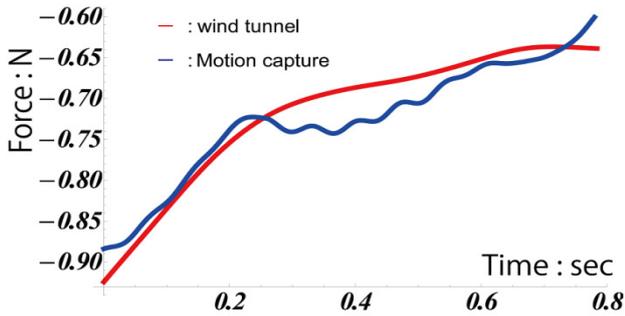


Fig. 4.6 : Comparison of the drag force between the wind tunnel and motion capture

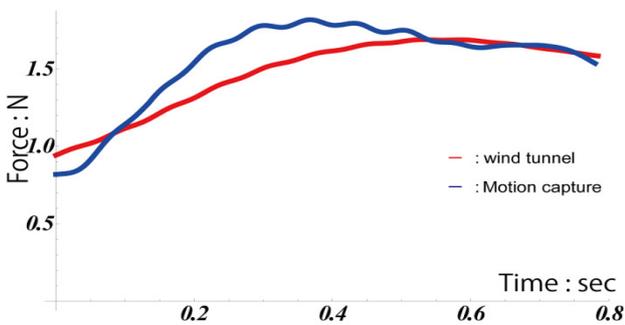


Fig. 4.7 : Comparison of the lift force between the wind tunnel and motion capture

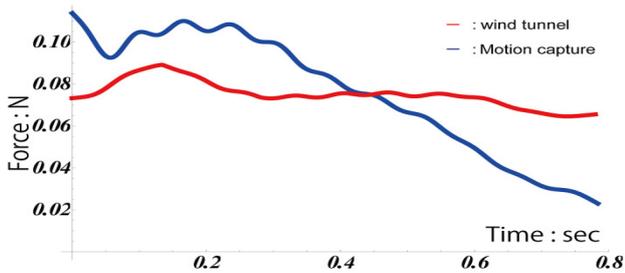


Fig. 4.8 : Comparison of the side force between the wind tunnel and motion capture

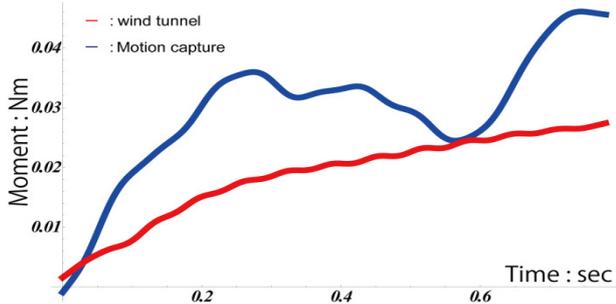


Fig. 4.9 : Comparison of the pitching moment

between the wind tunnel and motion capture

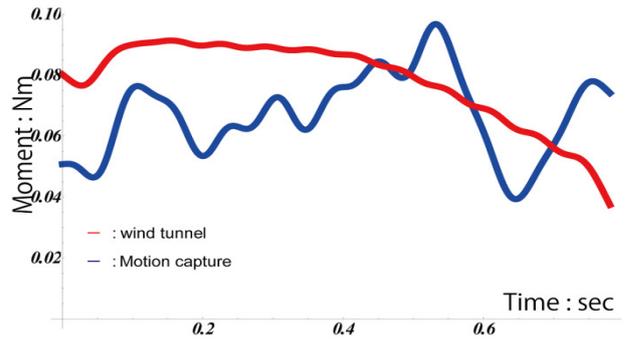


Fig. 4.10 : Comparison of the rolling moment between the wind tunnel and motion capture

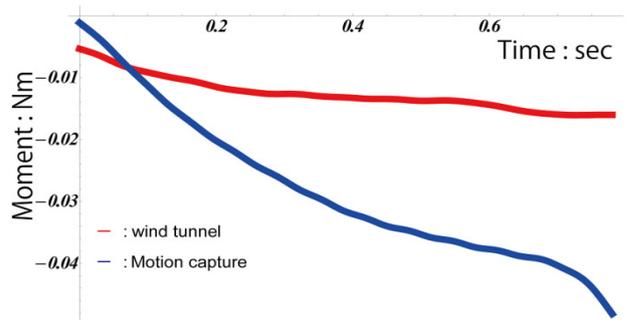


Fig. 4.11 : Comparison of the yawing moment between the wind tunnel and motion capture

上記の図より、抗力及び揚力については2つに実験データはほぼ一致した。しかし横力や各モーメントでは風洞実験データとモーションキャプチャにより算出したデータ間に偏差が観察された。

#### 4.5 考察

風洞実験により計測したデータとモーションキャプチャ実験により算出したデータの偏差は特にモーメントにおいて大きなものであった。偏差の要因としては以下のようなものが挙げられる。風洞実験データに関して、先に挙げたディスクを支える支柱の存在もあるが、取得した力データを処理する過程で引き起こされる可能性があるため、引き続き調査する必要がある。

#### 5. フライングディスクの飛翔シミュレーション

前章では風洞実験データとモーションキャプチャデータを使用してディスクに作用する空気力を検証した。その際モーションキャプチャで出力されるデータは位置座標データであるため、逆動力学解析を行うことで空気力を算出した。このように前章

では飛翔中のディスクの挙動の原因である動力学データを比較し、検証した。それに対し本章では力、モーメントの結果決定されるディスクの挙動を比較し、検証する。

本章では風洞実験データを使用して運動方程式を純動学的に解析することにより、ディスクの飛翔をルンゲ=クッタ法を使用したシミュレーションにより再現した。シミュレーションで再現した飛翔軌跡はモーションキャプチャデータを使用した算出値と比較した。シミュレーションにはディスクのリリース時の速度、角速度、迎え角、ディスク固定座標系の方向を入力し、飛翔を再現した。

### 5.1 シミュレーション方法

シミュレーションに使用した運動方程式は4章で示したものと同様のものである。

$$m({}^D\dot{\mathbf{V}}+{}^D\boldsymbol{\omega}\times{}^D\mathbf{V})={}^D\mathbf{F}+m\mathbf{g} \quad (\text{式 5.1})$$

$$\mathbf{I}^D\dot{\boldsymbol{\omega}}+{}^D\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{I}^D\boldsymbol{\omega}=\mathbf{r}\times{}^D\mathbf{F} \quad (\text{式 5.2})$$

上記の2つの式はディスク固定座標系で記述されたものである。そのため位置座標を比較する際には絶対座標系に変換する必要がある。

### 5.2 結果

次の Fig. 5.1 から Fig. 5.5 はシミュレーションにより算出したディスクの絶対座標系からみた位置、角速度、迎え角をモーションキャプチャデータと比較し、図示したものである。ここで赤線は風洞実験により計測した力及びモーメントを順動力学解析し、算出した値であり、青線はモーションキャプチャ実験により取得した位置座標から算出した値である。

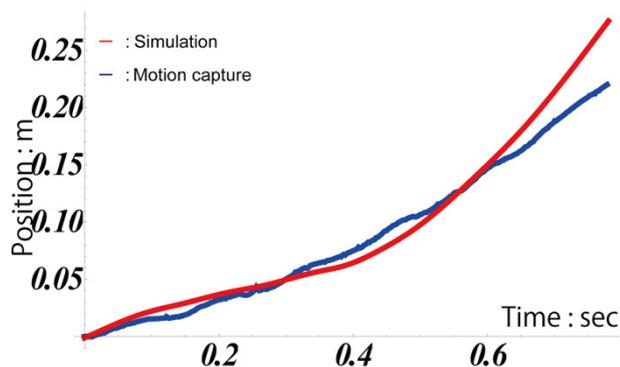


Fig. 5.1 : Comparison of the  $P_x$  between the simulation and motion capture

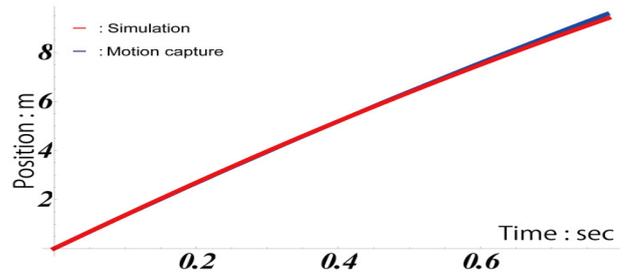


Fig. 5.2 : Comparison of the  $P_y$  between the simulation and motion capture

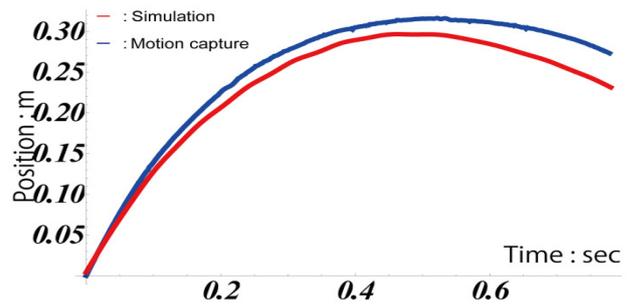


Fig. 5.3 : Comparison of the  $P_z$  between the simulation and motion capture

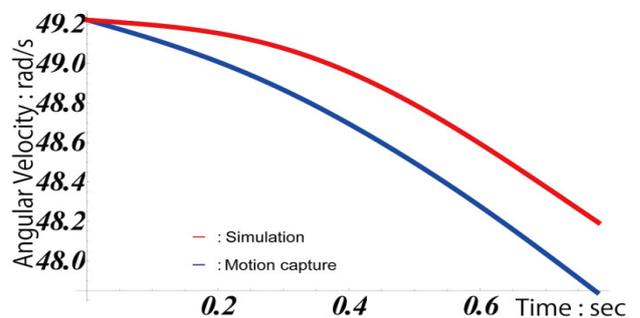


Fig. 5.4 : Comparison of the  $\omega_z$  between the simulation and motion capture

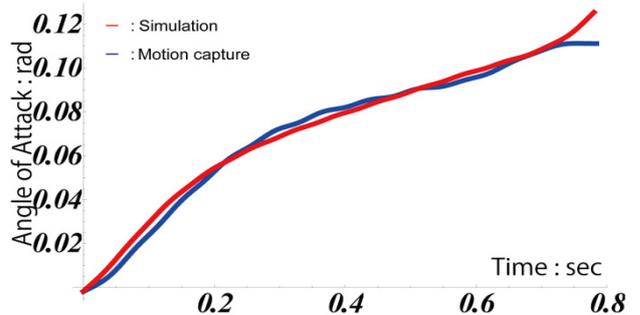


Fig. 5.5 : Comparison of the  $\alpha$  between the simulation and motion capture

位置座標  $P_y$  及び迎え角  $\alpha$  に関してはシミュレーションと計測データが一致していた。 $P_x$  についてはシミュレーション結果は計測したデータと比較して約 0.04m 程, また  $P_z$  については最大で約 0.05m 程の偏差が観測された. ディスクの回転角速度  $\omega_z$  に関してはシミュレーション結果は測定データと比較し減衰が小さかった.

### 5.3 考察

$P_x$  に関しては Fig.4.8 の横力の比較をした際, 飛翔期後半で, 風洞実験データと計測データの偏差が大きくなっている点が挙げられる. また回転角速度についても同様に Fig.4.11 に示した飛翔期後半での風洞実験データと計測データの偏差の増大がシミュレーション結果と計測データとの偏差となって出力したものと考えられる.

しかし, Fig. 4.9 から Fig. 4.11 に示したモーメントの偏差ほど比較した各値は変化していないので引き続き原因を調査する必要がある.

## 6. 揚力とディスクの回転角速度の関係性の解明

ディスクが流体中を移動する際ディスクには空気力が作用する. 空気力は空気の流れが変化することによって生まれるものである. ディスクに作用する空気力を生み出す流体の効果は様々に存在し, それらの効果は須くディスクまわりの流れ場が変化することによって生じている.

ディスクに作用する様々な流体による効果のなかで本研究では未だに解明されていない回転角速度と揚力との関係の解明を PIV と呼ばれる粒子画像流速法を使用し目指す.

### 6.1 空気力と回転角速度の関係

4.1.2 において紹介した風洞実験データを使用して回転角速度と抗力, 横力, 揚力との関係を示した. ここで回転成分についてはスピンパラメータという係数を使用し, 流体力については抗力, 横力, 揚力各係数の形で図示した.

迎え角が 0 (deg)時の空気力の各係数のスピンパラメータ依存性を以下の Fig. 6.1 から Fig. 6.3 に示す. Fig. 6.1 は抗力係数, Fig. 6.2 は揚力係数, Fig. 6.3 は横力係数である,

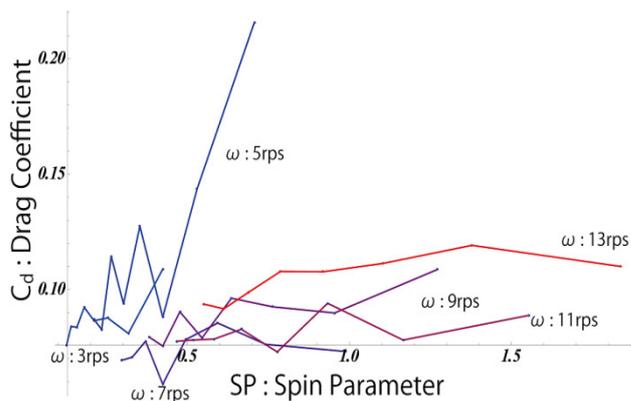


Fig. 6.1 : spin parameter dependency (Drag coefficient :  $\alpha = 0$  deg)

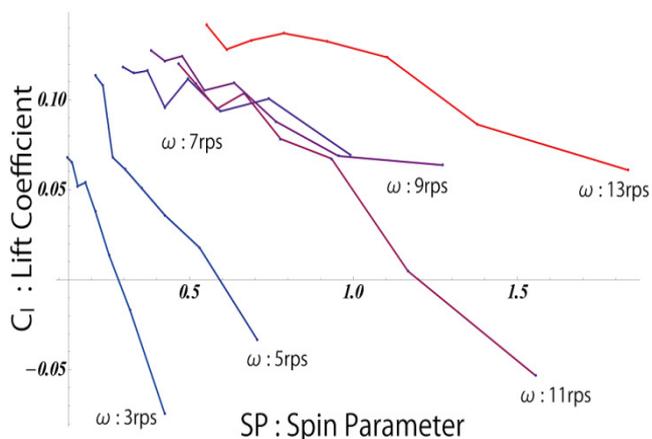


Fig. 6.2 : spin parameter dependency (Lift coefficient :  $\alpha = 0$  deg)

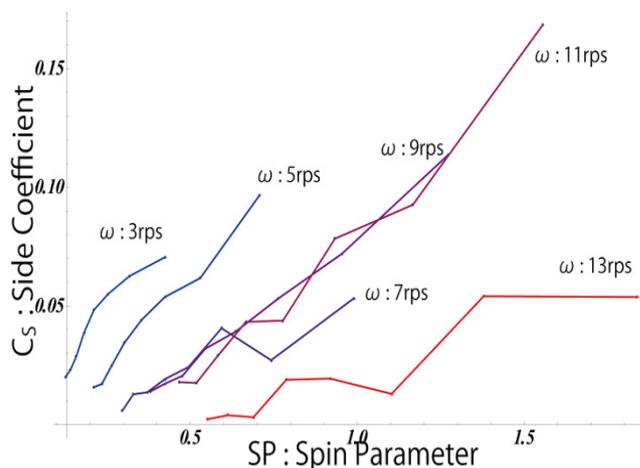


Fig. 6.3 : spin parameter dependency (Side coefficient :  $\alpha = 0$  deg)

上記の図より, ほぼすべての回転角速度のグラフの傾きが酷似し, かつ回転角速度ごとに分けた各線が重なっているため抗力に関してはスピン

パラメータ依存性はないと考えられる。一方で揚力及び横力に関しては各回転角速度のグラフの傾きなどよりスピンパラメータ依存性があると考えられる。このことはすなわちディスクの回転角速度が揚力と横力に関して何らかの関係があることを示唆している。本研究ではスピンパラメータ依存性の結果より、特に揚力に焦点を絞り、揚力係数のスピンパラメータ依存性の存在について検証する。

### 6.3 粒子画像流速実験

通称 PIV と呼ばれる粒子画像流速法とは流れに多数の粒子を注入し、その粒子の流れを高速度カメラにより撮影することで粒子の動きから流れを可視化、流体速度を計測する手法である。光源には一般にレーザーを使用し、レンズで拡張し光の膜を張ることで任意の位置の流れ場を観察することが可能である。この手法はディスクに特別な加工を施す必要がないためディスクを回転させることが可能である。そのため揚力係数のスピンパラメータ依存性を調査するのに最も適した実験であるといえる。

本研究では油を粒子として用い、実験を行った。流速は 15m/s に設定した、これは 4.1.1 において紹介したモーションキャプチャ実験で行った被験者のリリース時のディスクの速度に近いためである。またその際の迎え角  $\alpha$  を -2, 0, +5(deg) に変化させ、回転角速度を 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13 rps に変化させ、その際のディスク後部の流れを高速度カメラにより撮影した。レーザーの光の方向の流れと平行となるように設定しカメラを風光と垂直となるように設定した。実験の様子は Fig. 6.4 で示し、概略図は Fig.6.5 に示した。また、流れ場とディスクに作用する力との関係を観察するため、粒子の計測と同時に力測定を行った。

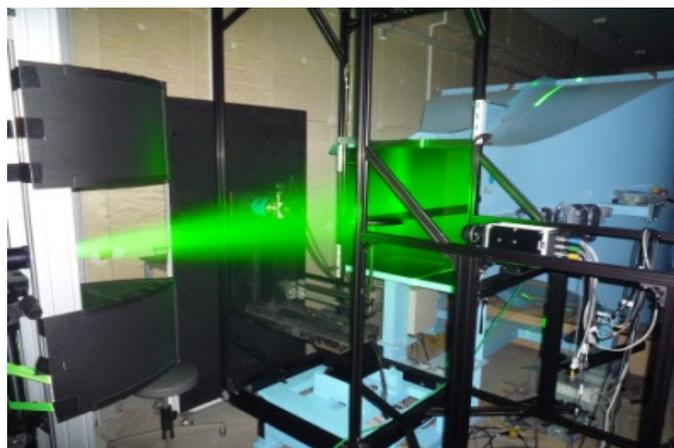


Fig. 6.4 : PIV experiment

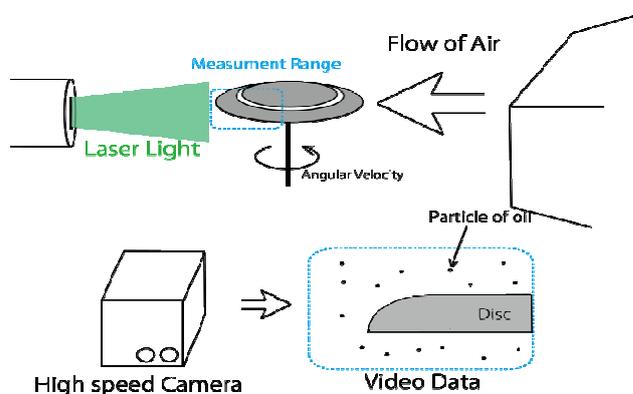


Fig. 6.5 : Schematic illustration of the PIV experiment

### 6.4 結果

下の図は迎え角が 0deg、回転角速度が 7rps でのディスク後部の流れを示したものである。赤の矢印は流速が大きく、黒くなるに従って流速は小さくなっていく。矢印の方向は流れの方向を表している。

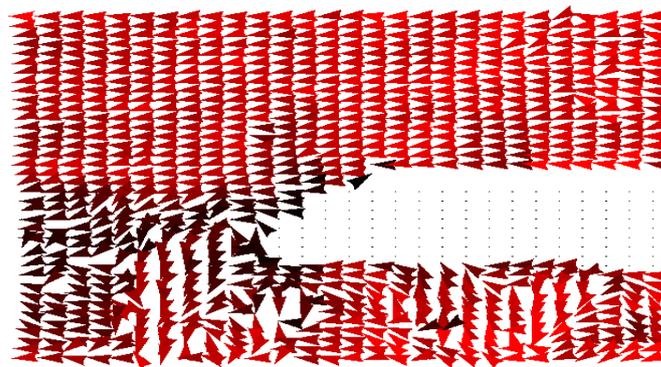


Fig. 6.6 : velocity vector of the flow of air

Fig. 6.6 よりディスクの後部においてディスクに張り付くような流れが観察された。また、ディスクの内側、すなわち凹面側に流れ込むような流れが観察された。

## 6.5 考察

Fig. 6.6 よりディスクの凸面側と凹面側との速度を比較すると全体的に上部の方が速度が速く、この速度差が翼の効果を生み出していると考えられる。

また、ディスク下部に見られるディスクの内側すなわち凹面側に流れ込むような流れは、今まで揚力の発生により重要だとされてきたディスク凸部の流れに対し、非常に興味深い流れ場の挙動である。この凹面部への流れ込みと吐き出しが揚力に影響を与えている可能性があるため、注意深く検証する必要がある。

## 7. 研究の進捗状況と今後

風洞実験データとモーションキャプチャデータとの比較及び飛翔シミュレーションに関しては数理モデルに関しては既に構築しているため今後は偏差

を評価する指数、例えばユークリッド距離などを使用し、両実験の動力学的データ、運動学的データを比較検証することを予定している。

また粒子画像流速法を使用したディスクの流れ場の観察に関しては同時に取得した力データと照合し、揚力の増減と流れ場との関係を解析する。具体的に注目する箇所はディスクの凸面側と凹面側の速度差、コアンダ効果により張り付くように流れるディスクの後端部の流れ場の挙動、ディスクの凹面部への流れ込みと吐き出しがディスクの回転角速度が変化することでどのように挙動が変化するかを解析する予定である。

本研究の進捗は以下の Fig. 7.1 に示す。赤く塗られている箇所は実験、解析が終了している箇所である。

## 関連文献

- [1] Crowther, W. J. and Potts, J. R. Simulation of a spin-stabilised sports disc. SPORTS ENGINEERING; 2009, 10-1, pp.3-21.
- [2] Hubbard, M. and Hummel, S. Simulation of Frisbee Flight. 5th Conference on Mathematics and Computers in Sport; 2000.
- [3] 加藤光輝, 伊藤慎一郎, 八江一至, フライングディスクの飛翔原理. スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, 12-39, pp112-113, 2012.
- [4] Morisson, V., R. The Physics of Frisbees. Electronic Journal of Classical Mechanics and Relativity 8:48; pp.1-11, 2005
- [5] Potts, J. R. and Crowther, W. J., VISUALISATION OF THE FLOWOVER A DISC-WING. Proceedings of 9TH. International Symposium on Flow Visualization, pp247-257, 2000.