

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

July. 2021 Vol. 52 No. 4

特集「スポーツ分野における流体力学」

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目 次

特集「スポーツ分野における流体工学」

【巻頭言】

「スポーツ分野における流体工学」発行にあたって	栗林 直樹	138
-------------------------	-------	-----

【解説】

サッカーボールの高性能化を支えるCFD技術	浅井 武	139
水泳の流体力学～抵抗力を減らし推進力を増やす	中島 求	143
自転車用エアロヘルメットの空力検証技術	大田 浩嗣	147
スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学	溝田 武人	149
スキージャンプと流体解析技術	山本 敬三, 坪倉 誠	157
エアタービンを用いた空圧式ボール発射装置の研究事例	加藤 友規	162

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る 一機器メーカーで働く魅力について一	賀集頭太郎	166
笑顔で活躍一お仕事フルードパワー便		
一理系進路選択の動機と学生生活を振り返って一	高橋 奏美	169

【研究室紹介】

長岡技術科学大学 レスキュー工学研究室	木村 哲也	171
---------------------	-------	-----

【企画行事】

2020年度オースタムセミナー開催報告 「自動車におけるフルードパワー技術」	亀田 幸則	172
2020年秋季フルードパワーシステム講演会報告	高岩 昌弘	174

【会告】

理事会・委員会報告		176
2020年度 学会賞表彰		177

2021年度（第40期）通常総会終了	178
日本フルードパワーシステム学会論文集52巻（2021）1号 発行のお知らせ	178
共催・協賛行事のお知らせ	179
会員移動	181
次回予告	182

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷株

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Fluid Engineering in the Field of Sports"

[Preface]

On the Special Issue "Fluid Engineering in the Field of Sports"	Naoki KURIBAYASHI	138
---	-------------------	-----

[Review]

CFD Technology for Improving Performance of a Soccer Ball	Takeshi ASAI	139
Fluid Dynamics of Swimming ~ Decrease Drag and Increase Thrust	Motomu NAKASHIMA	143
Aerodynamic Verification Technology for Bicycle Aero Helmets	Hiroshi OTA	147
Aerodynamics of Strange Behavior of Sports Ball Flight	Taketo MIZOTA	149
Ski Jumping and Fluid Analysis Technology	Keizo YAMAMOTO, Makoto TSUBOKURA	157
Research on Pneumatic Baseball Ball Launching Device Using Air Turbine	Tomonori KATO	162

[Topics]

Senior talks to students -The Appeal of Working at an Equipment Manufacturer-	Kentaro KASHU	166
Active with a smile ! - Report on Fluid Power's work		
-My University Days and Career Path Choice-	Kanami TAKAHASHI	169

[Laboratory Tour]

Rescue Engineering Laboratory, Nagaoka University of Technology	Tetsuya KIMURA	171
---	----------------	-----

[JFPS Activities]

2020 Autumn Seminar Report [Fluid Power Technology for Automobiles]	Yukinori KAMEDA	172
Report of 2020 Fluid Power System Autumn Symposium	Masahiro TAKAIWA	174

[JFPS News]

176, 177, 178, 179, 181, 182

巻頭言

特集「スポーツ分野における流体力学」発行にあたって

著者紹介



くりばやし なおき
栗林直樹

川崎重工業株式会社 精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ディビジョン
技術総括部
〒651-2239 兵庫県神戸市西区檀谷町松本234
E-mail: kuribayashi_n@khi.co.jp

1989年川崎重工業株式会社に入社、航空機、船舶搭載型視軸安定ジンバルを始めとする各種電動サーボシステムの開発に従事。近年は東京大学との共同研究において波力発電システムの開発にも従事。計測自動制御学会会員、日本フルードパワーシステム学会フェロー

前回の東京オリンピックは、1964年であった。私事ではあるが、4歳の時のことである。4本脚のブラウン管画面に、カチカチと回転させるチャンネル切替えつまみのついたモノクロテレビの画像を見ながら応援したことが薄っすらと記憶に残っている。ほぼすべてがアナログの時代であった。あれから半世紀以上経過した今年、コロナ禍でまだ不透明ではあるが再び日本での開催に、人生で2度の国内でのオリンピックが経験できることは非常に感慨深いことである。今回はこの記念すべきオリンピックイヤーにちなんで、スポーツと流体の関係の紐解きをテーマとして企画した。

この半世紀の間の技術の進歩はめざましく、アナログからデジタルへと革新ともいえる発展を遂げた。当然スポーツの分野においても大きく影響が及んでおり、感や経験で積み重ねられた選手のトレーニング方法から成果評価方法や計測に至るまでが、現代では正確に状態を数値化され、またタイムを競う競技では、今や1/1000秒の分解能で計測される時代である。このほんのわずかな時間差で勝敗が決まる厳しい世界において勝利するために、工学的見地から選手の運動姿勢や力の配分、時間応答などの定められた目標に対し、選手の能力をむだなく最大限に引き出せるトレーニングメニューの構築や選手が着用するウェアや使用器具などにおよぶまで開発研究者はしのぎを削って改良を重ねている。そしてその成績を左右する大きな要因のひとつが流体力学である。選手が受ける水や空気の流体抵抗や、球技であれば

空気力に対するボールの挙動など、これらを制して初めて勝利できるといっても過言ではない。

そこで本特集では、ボールに関する解説3編、水泳、自転車、スキーに関する解説各1編の計6編で記事を構成し、関連分野で研究開発に従事される大学および企業のみならず最新の技術情報をご提供いただくことにした。

浅井武氏（筑波大学）には、ワールドカップ公式球となったサッカーボールパネルデザイン5種のCFD解析による基礎的空力特性について解説いただいた。

中島求氏（東京工業大学）には、水泳の泳動作最適化について、水の抵抗力と推進力の統一的扱いの中で人体の骨格関節および筋肉により発生する関節トルク動特性と流体力の相関モデルを用いたシミュレーション事例について解説いただいた。

大田浩嗣氏（オーギーケーカブト）には、自転車用ヘルメットの空力低減に関し風洞実験およびCFD解析を用いた開発事例について解説いただいた。

溝田武人氏（福岡工業大学）には、スポーツボールの魔球的飛翔軌跡についてゴルフ、硬式野球、サッカーの各ボールを対象に風洞実験および流体理論にもとづきわかりやすく解説いただいた。

山本敬三氏（北翔大学）、坪倉誠氏（神戸大学）には、スキージャンプを対象とし、特に踏切、初期飛行、安定飛行の各工程に関し、IMUやGPSなど最新の飛翔計測技術や風洞実験、CFD解析を適用し空力特性を可視化することで、選手の飛行姿勢やスーツの最適化を図る事例について解説いただいた。

最後に加藤友規氏（福岡工業大学）には、空気式のピッチングマシンについて、安定飛球を生み出す進行軸まわりの回転と変化球を生み出す傾斜軸まわりの回転を、それぞれエアタービンとスピンパッドの適用で実現された事例を機構および空気力学的観点から詳しく解説いただいた。

末筆ながら、ご多忙のなかご寄稿いただいた執筆者の皆さま、そして本特集を作るにあたり各方面にご尽力いただいた編集事務局および委員の皆さまに深く感謝するとともに厚くお礼申し上げたい。

（原稿受付：2021年6月29日）

解説

サッカーボールの高性能化を支えるCFD技術

著者紹介



あさ い たけし
浅井 武

筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
E-mail: asai.takeshi.gf@u.tsukuba.ac.jp

1981年筑波大学大学院修士課程体育研究科修了、山形大学助手、助教授を経て、2009年筑波大学体育系教授。スポーツ工学、スポーツバイオメカニクス、スポーツコーチングの研究に従事。日本バイオメカニクス学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

近年、サッカーボールの開発スピードは上昇の一途であり、ワールドカップなどの大きな大会では、必ず、ボールパネルデザインなどのメジャーチェンジがなされている。また、カラーリングなどのマイナーチェンジは、毎年のように実施され、さまざまな大会や試合で公式使用球として使用されてきている。それらのサッカーボールは、材料科学の発展や生産技術の向上により、機能や性能も進歩してきている。それらの機能や性能をデザイン、評価する重要な観点として、その空力特性がある。従来、空力特性の検討や評価は、実験風洞やフリーフライトテストなどを用いて行われてきた。しかし、最近では、Computer Fluid Dynamics (CFD) 技術を適用し、ボールのデザインや評価、企画に活用しようとする機運が高まってきている。また、国際サッカー連盟 (FIFA) でも、マテリアルレギュレーションチームが、ボール評価の一部をCFDで実施することを模索し始めている。ここでは、サッカーボールの基礎的空力特性をCFDで検討した事例を紹介したい。

2. サッカーボールの空力特性

サッカーボールの基礎的空力特性として、風洞実験などにより、風速 (U) と抗力 (D)、あるいはレイノルズ数 (Re) と抗力係数 (C_d) などの関係が検討されることが多い。ここでは、歴代サッカーワールドカップ使用球である、ボールパネル数が

32枚 (サッカーボールA, 1970年メキシコワールドカップ)、14枚 (サッカーボールB, 2006年ドイツワールドカップ)、8枚 (サッカーボールC, 2010年南アフリカワールドカップ)、6枚 (サッカーボールD, 2014年ブラジルワールドカップ)、6枚 (サッカーボールE, 2018年ロシアワールドカップ) の5種類のボールを対象として、その抗力係数を比較してみた (図1)。

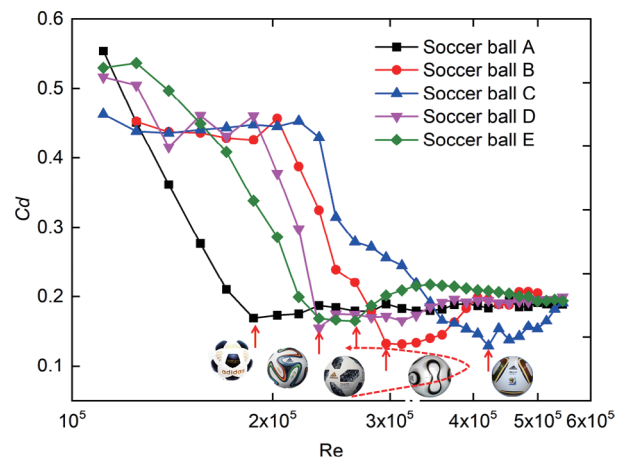


図1 歴代サッカーワールドカップ使用球である、ボールパネル数が32枚 (サッカーボールA)、14枚 (サッカーボールB)、8枚 (サッカーボールC)、6枚 (サッカーボールD)、6枚 (サッカーボールE) の5種類のボールにおけるレイノルズ数と抗力係数の関係

まず、レイノルズ数と抗力係数の関係をみると、どのボールも、低いレイノルズ数領域では、0.5程度の抗力係数を示し、レイノルズ数が大きくなるにつれて急激に抵抗係数が0.1-0.2程度に低下する傾向を示している。この急激な抗力係数の低下は、ドラッグクライシスと呼ばれることもあり、球体やボールの流体力学的性質の一つと考えられている。このドラッグクライシスが生起する主な原因は、ボール表面の境界層 (ボール表面近傍の流れで急激に流速が変化する、せん断層) が、層流境界層から乱流境界層へ遷移することとされている。そして、この境界層遷移によってもっとも抗力係数が低下したレイノルズ数は、臨界レイノルズ数と呼ばれてお

り、球体やボールの抗力特性を示す重要な指標の一つになっている。

たとえば、近年の代表的6枚パネルボールのサッカーボールDと、8枚パネルボールのサッカーボールCを比較すると、サッカーボールDの臨界レイノルズ数は、約 2.7×10^5 （～17m/s）であり、8枚のサッカーボールCの臨界レイノルズ数は、約 4.2×10^5 （～27m/s）となっている。抗力係数を比較すると、中速領域（～ $15 < U < \sim 22$ m/s）ではサッカーボールCの方がサッカーボールDより大きな抗力係数を示している。しかし、シュートのような高速領域（～ $22 < U < \sim 35$ m/s）では、サッカーボールDの方が大きな抗力係数となっている。これは、中速領域ではサッカーボールCよりサッカーボールDの空気抵抗が小さく、高速領域では、サッカーボールCよりサッカーボールDの空気抵抗が大きいことを示している。したがって、サッカーボールDはサッカーボールCより、中速領域において比較的空気抵抗が小さく、その領域のボールスピードに適合したボールであると思われる。また、高速領域でのサッカーボールDとサッカーボールCの空気抵抗の差は、中速領域におけるそれと比較して小さく、全体的には、サッカーボールDは、よく飛ぶボールであるといえよう。

これらが示すように、臨界レイノルズ数は、ボールの抗力特性を示す重要な手掛かりとなるが、同じFIFA（国際サッカー連盟）公式球であっても、多種多様な材質やパネル形状で構成されており、その臨界レイノルズ数も少しずつ異なっている。近年の公式サッカーボールの臨界レイノルズ数は、ボールパネル数が32枚（サッカーボールA）、14枚（サッカーボールB）、8枚（サッカーボールC）と減少するにつれて、大きくなる傾向を示している。これは、ボールパネル数が少なくなるにつれて、ボール表面の粗さ（ラフネス）が減少し、平滑球に近づくことが原因の一つになっていると考えられる。また、その後のワールドカップ使用球では、パネルの数がより少ない6枚（サッカーボールD）、6枚（Telstar2018）となったが、臨界レイノルズ数は、逆に大きくなり、32枚パネルボールに類似の抗力特性に回帰傾向を示している。

この抗力の他にも、横力や揚力、モーメント、あるいはその変動傾向が、ボールの振る舞いに大きく影響を与えられ、それらの特性の把握や流れの可視化などのため、数値流体解析手法（CFD）もよく用いられている。

3. サッカーボールのCFD

サッカーボールに関する空力特性の検討には、風洞実験などが使用される場合が多いが、同時に数値流体解析手法（CFD）により、特性の把握や流れの可視化、分析などを行うことが少なくない。ここでは、無回転、および回転したサッカーボール周りの流れの可視化と横力、揚力特性の検討例を示す。

解析方法として、まず、ブラジルワールドカップ公式5号ボール（サッカーボールD）を対象に、3次元レーザースキャナー（AICON 3D；Breuckmann GmbH）を用いて、3次元サッカーボールモデルを作成した。解析空間は、直交座標系の直方体形で $20\text{m} \times 20\text{m} \times 40\text{m}$ （ $W \times H \times L$ ）とし、計算格子は約5億であった。解析空間における流入口の流速は、レイノルズ数で 4.25×10^5 （28m/s）に設定し、ボール回転数は、25.1、50.2、75.4rad/s（4、8、12rps）の3ケースとした。回転サッカーボール解析と比較するため、無回転サッカーボール解析を、レイノルズ数で 1.25×10^5 （8.2m/s）、 2.8×10^5 （19.0m/s）、および 4.0×10^5 （27.0m/s）の3ケースを実施した。

解析計算は、格子ボルツマン法にもとづく、汎用流体解析ソフトウェア（PowerFLOW 5.1, Exa Inc.）を用いて実施した。回転サッカーボール解析では、スライディングメッシュ法を適用して境界層を記述した。本回転サッカーボール解析における乱流モデルは、Very Large Eddy Simulations（VLES）モデルを用いた。無回転サッカーボール解析では、乱流モデルを用いず、Direct Numerical Methods（DNS）を用いた。

流体解析における抗力係数（ C_d ）、揚力係数（ C_l ）、横力係数（ C_s ）は、抗力（ D ）、揚力（ L ）、横力（ S ）より求めた（式(1)、(2)、(3)）。

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (1)$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3)$$

ここで ρ は空気密度（ 1.2kg/m^3 ）、 U は流速（m/s）、 A はサッカーボールの断面積を示す。また、ボールの回転数と空力特性を検討するため、スピンパラメータ（ Sp ）を用いた（式(4)）。

$$Sp = \omega R / U \quad (4)$$

ここで ω は、角速度（rad/s）、 R はボールの半径

(0.11m) を示す。

CFDにおける無回転ボールの平均 C_d は、先行研究¹⁾における風洞実験値と類似の値を示しており、ある程度、妥当な計算が実施されていると考えられる(図2)。また、CFDにおける回転ボールの平均 C_s は、風洞実験による先行研究¹⁾の平均 C_s よりわずかに大きい値を示しているが、 Sp の増大にともなって C_s も増加するという傾向は示されている。回転ボールの C_s は、 Re の増大にともなって、 C_s も増加するという報告もあり²⁾、その C_s の速度依存性を考慮すると、ほぼ、許容範囲の計算が実施されていると思われる。これらのことから、本論における回転、および無回転ボールのCFDの結果は、風洞実験の結果と大局的に類似傾向が得られ、ある程度、妥当な結果が示されていると考えられる。

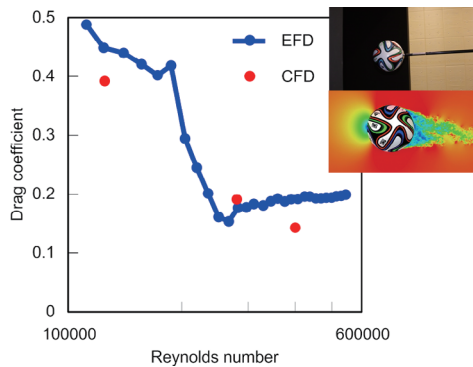


図2 風洞実験とCFDにおける抗力係数の比較

無回転ボール ($\omega = 0 \text{ rad/s}$, $Re = 2.80 \times 10^5$) における境界層の剥離点(ライン)と圧力分布は、不規則に変動しており、それにともなって、ボール後流のストリームラインも、偏向する傾向を示した(図3a, 3b)。また、ボール後流には大規模渦対が非常にしばしば形成され(図3c)剥離点や圧力分布の変動にともなって、位置が変化していた。他の無回転のケースも同様の傾向を示した。

一方、回転ボール ($\omega = 50.2 \text{ rad/s}$, $Re = 4.25 \times 10^5$) における境界層の剥離点と圧力分布は、回転の影響で偏向しており、それにともなって、ボール後流のストリームラインも、偏向する傾向を示した(図4a, 4b)。ボール後流には無回転ボールのケースと同様の、大規模渦対が観察されるが、無回転ボールのような大きな位置変動はみられず、ほぼ同じ位置に留まっていた(図4c)。他の回転ケースも同様の傾向を示した。

これらのボールの境界層における剥離点(ライン)の、流れ方向に対する非対称性は、圧力分布や

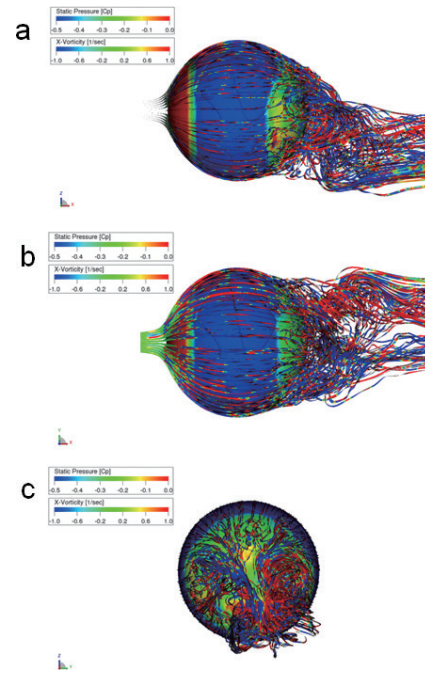


図3 無回転ボール後流の可視化例 (a: 側面, b: 平面, c: 後面)

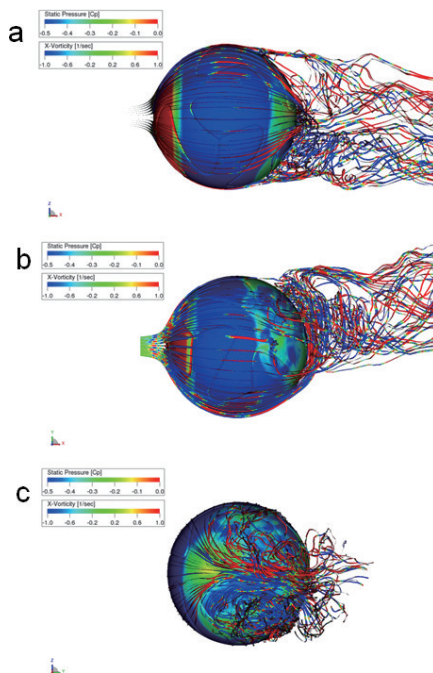


図4 回転ボール後流の可視化例 (a: 側面, b: 平面, c: 後面) (回転は上から反時計回り)

渦構造に影響を与え、ボールの横力や揚力を生み出す原因のひとつになっていると考えられる。また、この大規模渦対は、剥離点と圧力分布の偏向の痕跡を示していると考えられ、翼端渦と類似の渦構造であると思われる。

無回転ボールと回転ボールの C_s , Cl を比較すると、両ケースとも細かい変動はあるものの、無回転ボールの方は、2～3 Hzのラージスケールでの変

動がみられるが(図5a), 回転ボールでは, そのような変動はみられない(図5b). この無回転ボールにおける2~3 Hzの C_s , Cl の変動は, 平滑球におけるストローハル数のローモードより, より低いモードのように思われる. 以上のことから, 回転サッカーボールは, 無回転サッカーボールより, 不規則な横力, 揚力の変動が小さく, 飛翔軌跡に関して, 精度を高くしやすい球種であると考えられる.

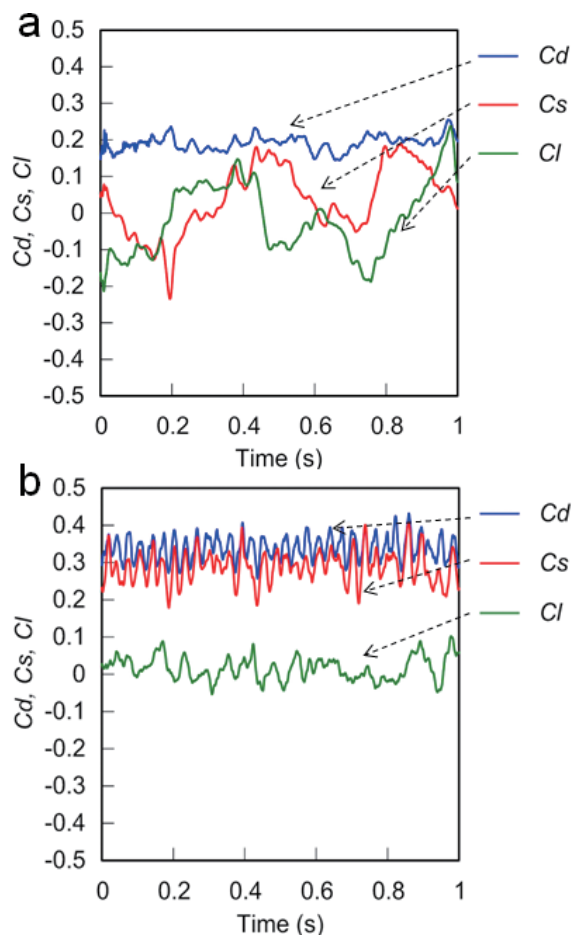


図5 無回転ボール(a), および回転ボール(b)における時間と C_d , C_s , Cl の関係

4. おわりに

ボール表面のラフネス等を高細精度に記述して, CFDにより, 境界層の剥離点や圧力分布, およびその変動を正確に予測することは, まだまだ, 難しいと考えられるが, 計算資源の増大や, 計算スキーム, 計算手法の発展により, いずれ, 機能評価やデザイン企画に活用される日が来ると推測される. スポーツ関連企業はもちろんのこと, 国際サッカー連盟, アジアサッカー連盟, 日本サッカー協会などの競技団体も, それに対する準備が求められるかもしれない.

参考文献

- 1) Asai, T.; Seo, K.; Kobayashi, O.; Sakashita, R. Fundamental aerodynamics of the soccer ball. *Sports Eng.* 2007, 10, 101-109; DOI : 10.1007/BF02844207.
- 2) Passmore, M.; Spencer, A.; Tuplin, S.; Jones, R. Experimental studies of the aerodynamics of spinning and stationary footballs. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C : J. Mech. Eng. Sci.* 2008, 222, 195-205; DOI : 10.1243/09544062JMES655.

(原稿受付 : 2021年 4 月 6 日)

解説

水泳の流体力学～抵抗力を減らし推進力を増やす

著者紹介

なか しま もとむ
中 島 求東京工業大学
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1
E-mail: motomu@sc.e.titech.ac.jp1995年東京工業大学大学院理工学研究科博士
後期課程修了。同大学助手、助教授、准教授を
経て、2014年同大学教授。スポーツ工学、バイ
オメカニクス、バイオロボティクス、福祉工学
の研究に従事。日本機械学会などの会員。博士
(工学)。

1. はじめに

水泳は、物理的に見て非常に複雑な現象である。スイマーの身体の多くの部分は水中、一部は空中であり、スイマーは多自由度の三次元運動を行い、水中の流れは高レイノルズ数の乱流となる。よって力学的な研究対象としては大変チャレンジングであり、逆にいえば研究しがいのある対象である。筆者は20年近く水泳を対象として研究を行っている。本稿ではまず水泳の流体力学の特異性について述べ、つぎにそれを踏まえて筆者らが開発した水泳の力学モデルを紹介し、さらに開発したモデルによる応用事例のうちのいくつかを紹介したい。

2. 水泳の流体力学の特異性

水泳においてはスイマーが水中を推進する。ここでスイマーが一定の平均泳速度で推進している状況を考えよう。このとき、スイマーの身体には推進方向と逆方向に、水からの抵抗力、いわゆる流体抵抗が作用している。よって、より速く推進するためには、抵抗力を低減させなければならず、いかにして流体力を低減するかテクノロジーがキーとなる。これは本特集全体のタイトルにも表れており、他のスポーツ、たとえば自転車やスキーなどでも同様に見られることである。水泳の場合、スイマーが身に着けることができるのは水着、ゴーグル、キャップのみであるから、もっとも面積の大きい水着によって、抵抗力を減らそうという試みがこれまでに行われてきた。最も有名なもの

は、2008年の北京オリンピックの際に一世を風びした、Speedo社のレーザー・レーサー (LZR Racer) である。レーザー・レーサーについての技術的な論点は文献¹⁾に詳説されているが、本水着の着用により明らかにパフォーマンスが向上することから、オリンピック前には契約上着用が許されていなかった日本選手が着用できるように変更されるなど、世間的に大きな注目を集めた。レーザー・レーサーにおける流体抵抗低減の原理は、硬質のパネルを水着中の各所に配置したことによる、人体軟組織の流体関連振動低減と、強い締め付け力による人体の凹凸の低減と考えられている。実際、トップ選手の泳速度は秒速2メートルにも達するので、身体がそれだけの高速流にさらされることになる。すると、たとえば大腿部裏側の筋肉や脂肪層からなる軟組織はブルブルと振動してしまい、これが抵抗力の増加を招く。よってこの振動を抑えてやれば抵抗力の低減が見込めることになる。ここで、水泳における抵抗力の成分としては、圧力抵抗、摩擦抵抗、造波抵抗があげられる。このうちもっとも成分として大きいのは圧力抵抗である。圧力抵抗は文字通り圧力の高低差により発生するものであるため、圧力差の元となる流れの乱れを誘発するような人体軟組織の振動は抵抗力を増加させるわけである。

なお、その後、競技規則が改定され、現在の規則ではレーザー・レーサーのようにパネルを埋め込んだり、ラバー素材のような通常の生地以外の素材を用いたり、また全身を覆うタイプも水着としては禁止されてしまい、現在の規則の中で抵抗力を大幅に低減させることはほぼ不可能になってしまった。そのため水着開発メーカー各社は、筋のサポートなど、他の方法によってパフォーマンスを向上させる機能を持たせることに腐心しているようである。

ここまでは流体抵抗低減についてであったが、ここからが水泳ならではの特異な話となる。水泳においては、抵抗力に逆らって(一定速度の推進では抵抗力と釣り合っ)て、推進力がスイマーに作用しているわけであるが、この推進力の出所も流体力なのである。考えてみれば当たり前の話であるが、このようなスポーツは他に例が見当たらない。より速く泳ぐ、すなわちよ

り高速で水中を推進するためには、推進力は抵抗力とは異なり低減させてはならず、増加させる必要がある。言い換えれば、水泳においては一概に流体力を「低減」させれば良いわけではないのである。同じ流体力である抵抗力と推進力に対して、抵抗力を減らし推進力を増やす、両面からの追求が必要となるのである。

抵抗力と推進力がともに流体力由来であることは、思ひのほか問題を複雑化する。たとえば水泳研究の世界ではactive dragという概念がある。これは、スイマーがけのび姿勢を取って一定速度で水中を推進させた場合の抵抗力をpassive dragと呼ぶのに対応した概念であり、スイマーが関節を動かして泳いでいる最中の抵抗力を指している。ここでpassive dragは、けのび姿勢を取ったスイマーを別途なんらかの方法で水中を牽引するなどして、そのときに牽引するロープの張力を計測すれば測定することができる。しかしactive dragの場合には、一定速度でスイマーが泳いでいるときには、抵抗力は推進力と釣り合っているので、スイマーにロープのようなものを取り付けても、抵抗力と推進力の合力としてゼロの値しか計測できない。そのため水泳研究の世界では、active dragを何とかして計測して定量化しようという試みが続けられている²⁾。

さて抵抗力についてはこれぐらいにして、もう一方の推進力についても述べたいが、実は推進力を増加させるには、工学的なテクノロジーとしてはできることはほとんどない。たとえばトレーニング用に手にパドルを付けたり、足にフィンを付けたりすることはあるが、そのような用具は競技では使用できない。よって推進力を増加させるには、上肢のストロークや下肢のキックの動作を変更する、すなわち、より適切な動作を見つけていくことが何より重要となる。

3. 水泳人体シミュレーションモデルSWUM

以上述べたように、水泳においては、スイマーの推進の源となる推進力も、推進の妨げとなる抵抗力も、同じ流体力により発生する。よって水泳の解析手法としては、スイマーに作用する流体力を推進力、抵抗力と分けることなく統一的に扱うことができることが必要となる。このような考えにもとづき、筆者らが開発した水泳の解析ツールが水泳人体シミュレーションモデルSWUM（スワム）である³⁾。

SWUMにおいては、スイマーはあくまで一つの剛体として考える。すなわち、スイマーの身体の相対運動が関節角として与えられ、一つの剛体としての全身の6自由度（並進3自由度、回転3自由度）の絶対運動が、身体についての剛体の運動方程式により求められる。よって、泳速度、身体の浮き具合、さらには身体全体のロール・ピッチ・ヨーの回転運動

などが計算結果として求まる。スイマー身体に働く外力としては、浮力を含む非定常流体力および重力が考慮される。スイマーの身体は21個の体節に分割される。さらに各体節は楕円錐台（長手軸方向に沿って径が一次的に変化する楕円柱）として表現される。スイマーの身体各部に働く非定常流体力は、身体各部位の局所運動状態（位置、速度、加速度、向き、角速度、角加速度）から求められると仮定されている。悪くいえば近似計算、良くいえば流体力のモデル化である。より具体的には、各セグメントの楕円錐台長手軸を離散分割し、長手軸上の各分割点での局所運動状態から、各分割点での流体力を算出する。具体的には浮力以外の流体力は、法線方向抵抗力、接線方向抵抗力、流体の付加質量による慣性力、の三つの成分の和として表現されている。法線・接線方向抵抗力は、速度の2乗に比例して発生する抵抗力であり、圧力抵抗や造波抵抗、さらには表面摩擦抵抗などのもろもろの速度の2乗に比例する成分を、楕円錐台長手軸に対しての法線方向と接線方向に分解して表現している。さらに、加速度に依存する成分として、流体の付加質量の慣性力も考慮されている。これらの流体力の具体的な計算式は紙面の都合上割愛するので、詳細は文献³⁾を参照されたいが、ここで重要なこととして、スイマー身体に作用する非定常流体力は、抵抗力と推進力に分けられているわけではない。その瞬間に身体がどのような向きで、速度および加速度を持って運動しているか、そしてそれが推進方向なのか抵抗方向なのかが、結果として求まるモデルとなっているわけである。

以上はあくまで概念としてのモデルであるが、この概念モデルを筆者らだけでなく世界中多くの水泳研究者に利用してもらうことを目指して、GUIを備えたソフトウェアの形とし、フリーソフトウェアとして公開した⁴⁾。解析ソフトウェア（Swumsuit）のスクリーンショットを図1に示す。

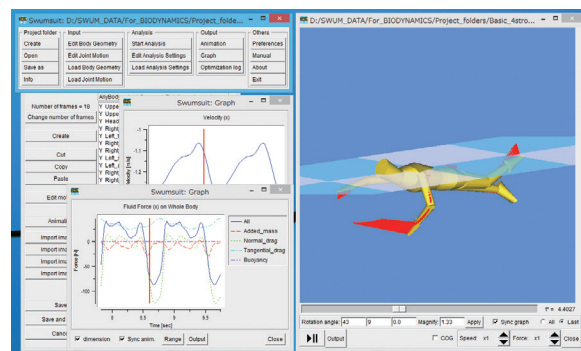


図1 開発した水泳解析用ソフトウェアSwumsuit

4. SWUMIによる解析の応用事例

4.1 泳動作の最適化シミュレーション

SWUMIによる解析の応用事例をいくつか紹介したい。まず泳動作の最適化について述べる。SWUMIにおいては、スイマーの泳動作（関節運動）は入力として与えられ、泳速度はシミュレーション結果として、出力として求まる。よって、泳動作をさまざまに変化させれば、どのような泳動作が速い泳速度となるかのパラメータスタディが行えることとなる。そしてそのパラメータスタディを最適化計算のアルゴリズムに乗せれば、自動的に泳速度を最大化するような泳動作を求める大規模計算も可能となる。

ここで問題となるのは、何が制約となるかである。スイマーがいくらでも関節トルクを発揮できるのであれば、いくらでも速く泳げることになる。しかし実際には泳法ごとに世界記録があり、これ以上速くは泳げないというポイントがある。著者らの研究では最大発揮関節トルクに限界があると考え、これを制約条件として最適化のシミュレーションを行っている。ここでさらに問題を複雑にさせるのは、人体の場合、関節運動はロボットのようなモータではなく、複雑に人体内を張り巡らされた筋肉によって実現されていることである。よって、力の出しやすい姿勢があることからわかるように、最大発揮関節トルクはその関節角度（場合によっては他の関節の関節角度）に依存する。さらに当然のことながら、動かし速度が上昇すればするほど発揮できる関節トルクは減少する。すなわち関節角速度依存性も有している。このような人体の特性を筋力特性（関節トルク発揮特性）と筆者らは呼んでいるが、この筋力特性を定量化して、動的に変化する制約条件として最適化計算に課す必要があるわけである。そのため、まず図2左のように計測装置を用いて実際のスイマーの最大発揮筋力を測定した。ただしこの測定だけでは計測できる条件が限られているため、さらに図2右のような上肢筋骨格モデルを構築し、筋骨格解析を行うことにより不足分の条件の最大発揮力を計算により求めた。筋骨格モデルとは、人体を剛体セグ

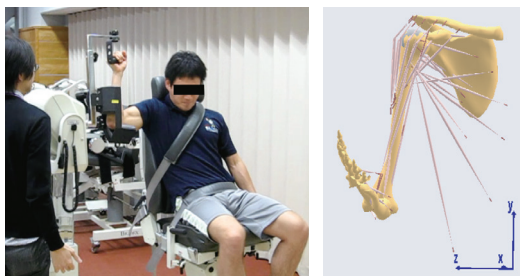


図2 スイマーの最大発揮筋力測定実験（左）と筋力計算用の上肢筋骨格モデル（右）⁵⁾

メントの連なりとしてモデル化したもので、筋は始点、終点（場合によっては経由点）を結び、張力を発生する単純なワイヤーとしてモデル化される。そして身体の運動（身体各部を表す剛体セグメントの運動）および身体に作用する外力が筋骨格モデルへ入力され、解析結果として各筋の筋力や筋活動度が出力される。以上の上肢筋骨格解析により求めた結果をデータベースの形にし、データベースを最適化シミュレーション中で参照するように設定した。自由形（クロール）についての最適化シミュレーションの結果を図3に示す。泳速度最大化の場合であり、得られた泳動作、泳動作の周期、泳速度について、現在のエリート水泳選手のものに近いリーズナブルな結果が得られ、計算の妥当性が確認された⁵⁾。

最近ではこの手法をパラスイマー（障害を持ったスイマー）に拡張する取り組みも行っている。図4には片麻痺（右半身麻痺）のスイマーのための最適化計算結果を示す。実際に片麻痺の選手に遊泳してもらい、その動作を初期値として泳速度を最大化する泳動作を求めている⁶⁾。図5には片前腕欠損のスイマーのための最適化計算結果を示す。こちらも片麻痺の場合と同様に、実際のスイマーの泳動作を初期値として泳速度を最大化する最適化シミュレーションを行っている⁷⁾。得られた結果は選手やコーチにフィードバックされ、トレーニングに活用されている。今後は、健常スイマー、パラスイマー問わず、より簡単に選手個々の筋力特性に合わせた最適化シミュレーションを実現したいと考えている。

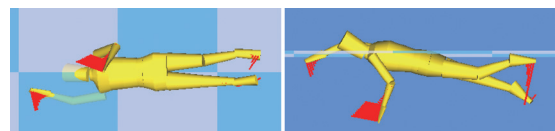


図3 泳速度最大の最適化シミュレーション結果⁵⁾

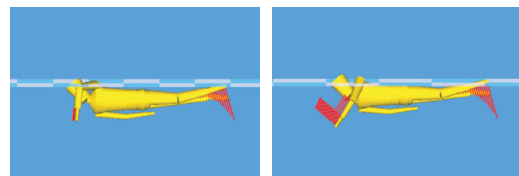


図4 片麻痺スイマーの選手の泳動作（左）と最適化シミュレーションにより求めた泳動作（右）⁶⁾

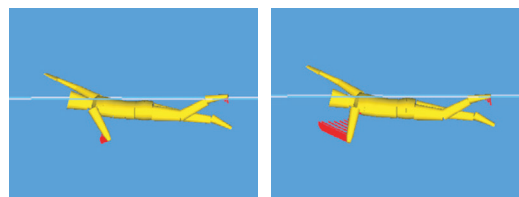


図5 片前腕欠損スイマーの選手の泳動作（左）と最適化シミュレーションにより求めた泳動作（右）⁷⁾

4.2 ビーフィンスイミングの解析

SWUMによる別の応用事例として、ビーフィンスイミングの解析を紹介する。ビーフィンとは両足にひとつずつフィン（足蹼）を装着して泳速度を競う競技である。取り付けのフィンはスキューバダイビングで使用するものより小ぶりで、速い泳動作に適したものとなっている。このようにスイマーに身体以外の用具を取り付けるような問題に対し、筆者らは図6左に示されるように、1個の剛体であるスイマーに加え、弾性変形する一つのフィンを5枚の剛体板要素としてモデル化し、合計11個の剛体の運動方程式を解くことによりシミュレーションを可能とした⁸⁾。このモデルでは、足部とフィンの板要素との連結、また板要素同士の連結は、図6右に示されるように、仮想的なバネとダンパーにより実現されている。図7にシミュレーション結果の一例を示す。足部に装着したフィン部分が流体力を受け弾性変形している様子が確認できる。

4.3 筋骨格シミュレーションへの拡張

SWUM単体では、スイマーと外部流体である水との力学的相互作用をシミュレートするのみであるが、水泳などのスポーツ動作の分析の現場においては、身体にどのような負荷が生じるのか調査することがたびたび求められる。そこで、全身を対象とした本格的な筋骨格モデルを用いた筋骨格シミュレーションとSWUMとを組み合わせることを考えた。手法についての詳細は紙面の都合上割愛するが、最近の解析結果を図8に示す。これは国立スポーツ科学センターおよび美津濃株式会社との共同研究である。国立スポーツ科学センターでは、水中用光学式モーションキャプチャシステムを有していた。そこで、光学式モーションキャプチャシステムの三次元動作計測結果をSWUMに入力し、さらに筋骨格シミュレーションまでを行うシームレスなシステムを構築した。図8はクロールについての解析結果のアニメーションのスナッ

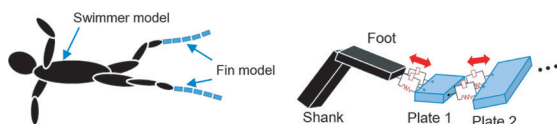


図6 ビーフィンスイミングの解析のモデル全体図（左）およびスイマー足部とフィン要素の結合のモデル（右）⁸⁾

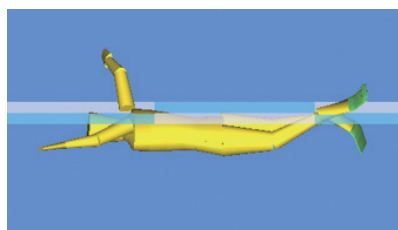


図7 ビーフィンスイミングのシミュレーション結果

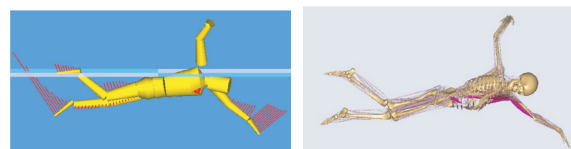


図8 SWUMによる解析結果（左）と筋骨格シミュレーション結果（右）⁹⁾

プショットである。SWUMの解析結果を図8左に、筋骨格シミュレーションの結果を図8右に示す。両者の姿勢は良く一致しており、モデル間の姿勢データ変換結果が良好であることが確認できる。

5. おわりに

本稿では水泳の流体力学として、その特異性について解説したのち、それを踏まえた筆者らのシミュレーションモデルとその応用事例のいくつかを紹介させていただいた。読者諸氏にとって多少なりとも興味を引くものとなっていれば幸甚である。

参考文献

- 1) 高木英樹：高性能水着は競泳を変えるか？—レーザー・レーサー登場の衝撃と効果，スポーツ工学，Vol.4，p.13-17（2009）
- 2) Narita, K., Nakashima, M., Takagi, H.: Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities, Journal of Biomechanics, Vol.54, p.123-128（2017）
- 3) 中島 求, 佐藤 憲, 三浦 康都：全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルの開発，日本機械学会論文集B編，Vol.71, No.705, p.1361-1369（2005）
- 4) <http://www.swum.org/>
- 5) Nakashima, M., Maeda, S., Miwa, T., Ichikawa, H.: Optimizing simulation of the arm stroke in crawl swimming considering muscle strength characteristics of athlete swimmers, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.7, No.2, p.102-117（2012）
- 6) Nakashima, M., Nemoto C., Kishimoto, T., Terada, M., Ikuta, Y.: Optimizing simulation of arm stroke in freestyle for swimmers with hemiplegia, Mechanical Engineering Journal, Vol.5, No.1, p.17-00377（2018）
- 7) Nakashima, M., Takahashi, R., Kishimoto, T.: Optimizing simulation of deficient limb's strokes in freestyle for swimmers with unilateral transradial deficiency, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.15, No.1, p.19-00467（2020）
- 8) Nakashima, M., Yoneda, T., Tanigawa, T.: Simulation analysis of fin swimming with bi-fins, Mechanical Engineering Journal, Vol.6, No.4, p.19-00011（2019）
- 9) Nakashima, M., Kanie, R., Shimana, T., Matsuda, Y., Kubo, Y.: Development of a comprehensive method for musculoskeletal simulation in swimming using motion capture data, Journal of Sports Engineering and Technology, advanced publication, DOI:10.1177/1754337119838395（2019）

（原稿受付：2021年4月5日）

解説

自転車用エアロヘルメットの空力検証技術

著者紹介



おお した ひろ し
大 田 浩 嗣

株式会社オージーケーカブト
〒577-0016 大阪府東大阪市長田西 6-3-4
E-mail: hiroshi_oota@ogkkabuto.co.jp

2009年株式会社オージーケーカブト入社、ヘルメットの規格設計を経て、現在は空力計測に従事。

1. はじめに

当社は競技用自転車ヘルメットについて1992年のバルセロナオリンピックから日本代表に提供しており、オリンピックをひとつの節目としてエアロヘルメットの空力性能向上に取り組んできた。

自転車用ヘルメットの空力性能評価は19世紀から行われており、主に風洞実験による評価から、近年ではCFDや実走での抗力測定も行われるようになっていく。

自転車競技における空気抵抗については諸説あるが、走行時の全抵抗中過半数を占めていると言われている。僅差で勝敗を決する自転車競技において空力は非常に重要視されており、欧米を中心とした自転車用ヘルメットメーカーでも競技用ヘルメットの空力開発は盛んに行われている。

2. 自転車用エアロヘルメット空力評価方法

2.1 風洞実験

自転車用ヘルメットの空力評価方法として、まずは風洞実験があげられる。

ヘルメットの空力検証としては図1のような頭部のみの抗力評価と、大型風洞にて人体、車体を含めたトータルの抗力評価を状況に応じて実施している。頭部のみの評価は実験実施コストが低く、一度に多くの検証が可能でヘルメット部以外（人体など）の影響による差が出にくいというメリットがある。デメリットとしては、ヘルメットの形状により後方の流れに変化が生じる場合など人体への影響が再現で

きないことがある。図2のような大型風洞設備での実験では人、もしくはマネキンにヘルメットを被せ実際の走行に近い状態を再現することができるため、より現実に近い検証が可能となる。ただし、このような実験でヘルメットのみの差をみる場合、車体、人体などそのほかの影響が大きくなるためそれら要因を可能な限り排除することが必要となる。大型風洞による実験については外部の機関での実施となる。



図1 頭部（ヘルメット単体）実験

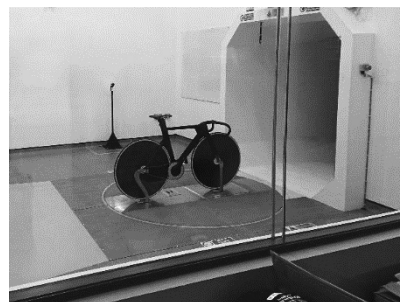


図2 大型風洞での実験

2.2 CFD

近年、コンピュータの急速な発展により数値流体解析CFD（Computational Fluid Dynamics）での空力検証も盛んに行われるようになった。現状、最終的な判断は風洞実験を頼らざるを得ないが、卓上である程度の検証が可能でヘルメットの形状検討においても非常に有効なツールになりつつある。CFDに関してはRANS（Reynolds-Averaged Navier-Stokes）、LES（Large Eddy Simulation）、DES（Detached Eddy Simulation）などさまざまな手法がある。

RANSは計算コストが低いことから市販のコンピュータでも比較的短時間で検証が可能となる。ただし、RANSは基本的に定常流での評価となるため微小な渦やかく離などの現象を再現することがむずかしい。LESは非定常流を扱うことができるため、RANSと比べより現実に近い事象の再現が可能となるが、計算コストが非常に高く一般的な市販コンピュータで計算することはあまり現実的ではない。DESは解析空間の壁近傍をRANSで解き、壁遠方をLESで解くというハイブリッドモデルである。当社では検証回数が増える場合RANSである程度の傾向をつかみ、並行し特に重要な事象について図3のようなDESでの検証を実施している。ただしRANS、DES、LESと風洞実験、各手法での結果を完全に一致させることは非常にむずかしい問題であるため、真の値は風洞実験値としてCFDでは各手法ごとに条件をそろえ絶対値で差をみるのが現状である。

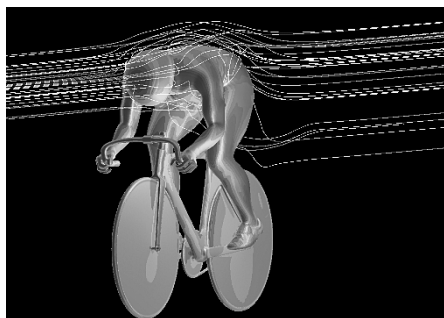


図3 DESによる解析例

現在は、より風洞実験との整合性を図るため図4のようなLESでの検証にも取り組んでいる。



図4 LESによる解析例

3. 自転車用ヘルメットの空力低減技術

自転車用ヘルメットの空力検証はCFDによる検証を先行し行っている。

CFDでは抗力の把握はもちろんのこと、図5のような流体情報の可視化も行うことができる。自転車用ヘルメットの空力検証ではヘルメットの影響による周囲の流れも関係しているため、式(1)に示す圧力

係数(C_{pT})なども最適なヘルメット形状検討において重要な要素となる。



図5 DESによる流体情報可視化

$$C_{pT} = \frac{P_s - \frac{1}{2} \rho_{\infty} u^2}{P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_{\infty} u_{\infty}^2} \quad (1)$$

CFDである程度空力特性において有利な形状を絞り込み、その結果をもとに試作品を作成し風洞実験での確認という流れとなる。

一般製品の場合、空力に加え通気性などの快適さも必要となってくるため、図6のように空気取り込み穴の形状の最適化など空力特性と快適性の双方両立が求められる。

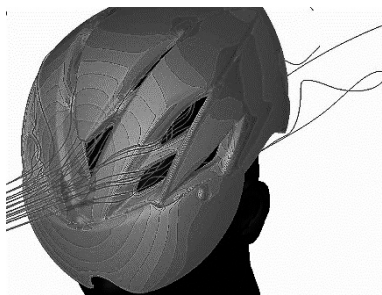


図6 RANSによる通気性確認

4. おわりに

自転車用ヘルメットの空力低減技術については現状発展途上な部分も多く、随所に改良の余地があると考えている。ヘルメットの空力性能評価は自転車走行時の全抵抗からすると数～数十%の領域での検討となり、ヘルメット以外の体形や姿勢により大きく左右される。すべての条件に完璧に対応することは非常に困難であるが、可能な限り幅広い条件下での性能把握が課題となっている。また、CFDはヘルメットの形状開発において非常に有効なツールではあるが、風洞実験との整合性を図るためにはまだまだ検討の余地がある。さらにさまざまな要素が加わってくる実走行時にも安定したパフォーマンスを発揮可能なヘルメットの開発を目指している。

(原稿受付：2021年4月5日)

解説

スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学

著者紹介

みぞ た け と
溝 田 武 人福岡工業大学名誉教授・工学博士
〒811-0295 福岡市東区和白東3-30-1
E-mail: mizota@fit.ac.jp

1969年熊本大学大学院生産機械工学修士課程修了。松下電器産業(株)、九州大学応用力学研究所助手。1985年福岡工業大学助教授・教授。2014年福岡工業大学定年退職・名誉教授・工学博士。剥離流フラッタ、スポーツボールの流体力学。日本風工学会、日本流体力学会、日本機械学会会員。NHK、ミズノ(株)、Topgun技術アドバイザー。

1. はじめに

スポーツボールが空気中を不思議な3次元軌道を描いて飛翔する問題の謎解きには流体力学の知見によることが有効である。ここでは、筆者が行ってきたゴルフボールの3次元飛翔軌道理論、硬式野球ボールの種々の変化球、サッカーボールの弱回転魔球、の3種類のスポーツボールに関する解説を行う。

2020年5月12-15日にフランス、パリで“フラッタとその応用に関する第2回国際会議”が開催される予定であった。筆者はキーノート講演者として発表を行うはずであったが、コロナ禍で中止になった。その予稿集¹⁾は発行されたので、ここではそれをもとにして解説する。

2. ゴルフボールの3次元飛翔理論と実験²⁾

2.1 フック・スライスはサイドスピンではなく回転軸のバンクが原因

ゴルフボールが3次元的に左(フック)や右(スライス)に曲がる物理的な理由は長い間、ボールのサイドスピンによるマグナス効果であると説明されてきた³⁾。現在でも多くの関係者はそう信じている。しかし、航空機の旋回時のように、ボールのショット時に回転軸は傾いて(バンクして)いるとした概念の方が物理的に矛盾がない。なお、回転体の回転軸ベクトルは一般には直交3軸の各成分で表されるが、ゴルフボールの回転速度に対して空気力の線形性は保証されない。図1は飛翔の様子である。進行

方向の逆方向に抗力 D 、それに直交して揚力 L が作用して、回転軸が θ だけバンクしていることにより、揚力 L が傾き、横力 S が生まれ、抗力 D の横方向 Z 軸成分も現れる。ボールの初期飛翔速度は空気力と重力により徐々に変化し、ボールの初期回転速度も空力摩擦トルク T により次第に減少する。定式化では回転軸の初期バンク角度は飛翔中不変であるとし、回転軸は進行方向にYaw角を持たない(回転軸は Y - Z 面内にある)とした。なおYaw角が $\pm 20^\circ$ 以内の空力特性を別途調べた結果は 0° の際とほぼ同様であった。 β は横ブレ角である。

空気力などを直交座標(X , Y , Z)軸方向に射影すると、以下のように各軸方向の空気力が求まる。

$$F_x = -1/2(C_D \cos \alpha \cos \beta + C_L (\sin \theta \cos \alpha \sin \beta + \cos \theta \sin \alpha)) \rho A V_B^2 \quad (1)$$

$$F_y = -1/2(C_D \sin \alpha - C_L \cos \theta \cos \alpha \cos \beta) \rho A V_B^2 - mg \quad (2)$$

$$F_z = 1/2(C_D \cos \alpha \sin \beta + C_L \sin \theta \cos \alpha \cos \beta) \rho A V_B^2 \quad (3)$$

ここで、 $|U| = V_B = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{1/2}$, ρ : 空気密度, m : ボール質量, g : 重力加速度, d : ボール直径, A : ボール直径断面積, $A = \pi d^2/4$, C_D : 抗力係数 $C_D = D/(0.5 \rho U^2 A)$, C_L : 揚力係数 $C_L = L/(0.5 \rho U^2 A)$, C_M : 空力摩擦トルク係数 $C_M = T/(0.5 \rho U^2 A d)$, S_p : スピンパラメータ $S_p = \pi N d/U$, (ボール回転

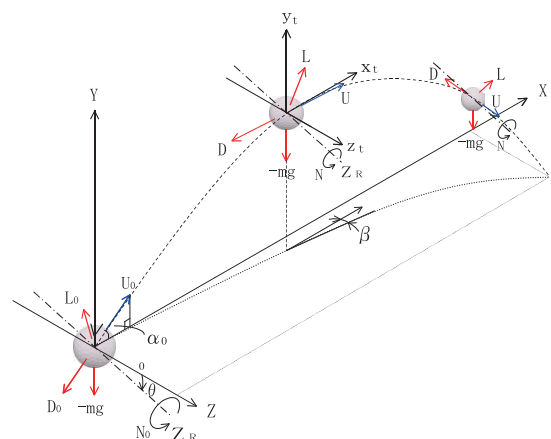


図1 ゴルフボールの3次元飛翔の様子と記号

速度 N による周速)/(ボール飛翔速度),

Re : レイノルズ数 $Re=Ud/\nu$, ν は空気の動粘性係数.

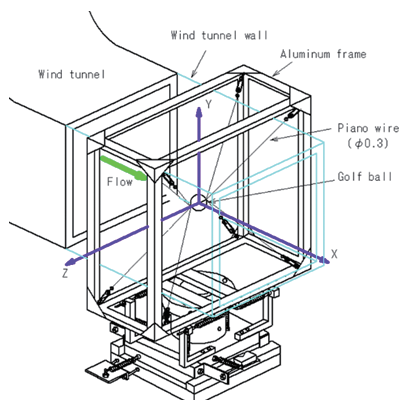
各空気力係数と空力摩擦トルク係数は, 次元解析により, レイノルズ数 Re (以下 Re 数と記す) とスピンパラメータ Sp (以下 Sp 数と記す) で表されることが分かっている. なお, この3次元飛翔軌道理論は, $\theta=0$, $\beta=0$ で当然のことながら, 2次元理論⁴⁾と一致する.

飛翔中に加わる空気力 (D , L) は以下のように風洞実験によりあらかじめ求める.

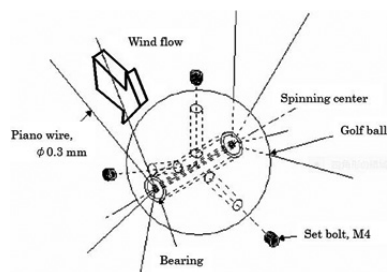
2.2 風洞実験による抗力 D , 揚力 L , 空力摩擦トルク T の求め方

回転するゴルフボールに加わる空気力は正方形測定部断面 $400\times 400\times 600\text{mm}$, 最大流速 44m/s の風洞装置 (乱れ度 0.1% 以下) により測定した. 別途 Re 数の影響を調べるために 80m/s の流速下でも測定を行ったが高流速域ではその影響は現れなかった.

図2(a)に風洞測定部のセットアップ, 図2(b)にはボールの回転の静・動バランスを保つために行った工夫の様子を示す.



(a) 回転ゴルフボール等の風洞による空気力測定部



(b) ボールの回転バランスを得るための工夫

図2 (a)風洞測定部と(b)ボールの安定回転の仕組み
最大風速 $U=44.0\text{m/s}$, ゴルフボールの初期最大回転速度 $N=200\text{rps}$

測定にはすべて実際のゴルフボールを使い, 中心に回転軸をセットして, その中に $\phi 0.3\text{mm}$ のピアノ

線を4本通して風洞外のアルミフレームに風洞壁を無接触で貫通させて固定している. フレームは3分力ロードセルや空気静圧軸受型4分力ロードセル⁵⁾に乗せている. ボールの回転速度は最大 200rps まで空気ノズル噴射で与えて, 徐々に回転数が低下する過程 (静止空気中では 180秒 で, 44m/s 気流中では 60秒 程度で 10rps まで低下した) で空気力 D , L を計測した. 回転数の低下割合から空力摩擦トルク T を求めた. 赤道面上 120° 毎に開けた穴にセットボルトを挿入し, 静バランスを保っておくと全回転域で共振のない安定な回転状態が得られた.

このようにして得られた抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L , 空力摩擦トルク係数 C_M を Sp 数でまとめた結果を図3, 図4に示す.

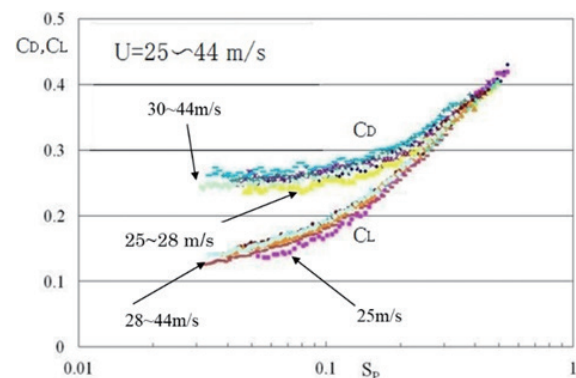


図3 抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L のスピンパラメータ Sp 数による変化

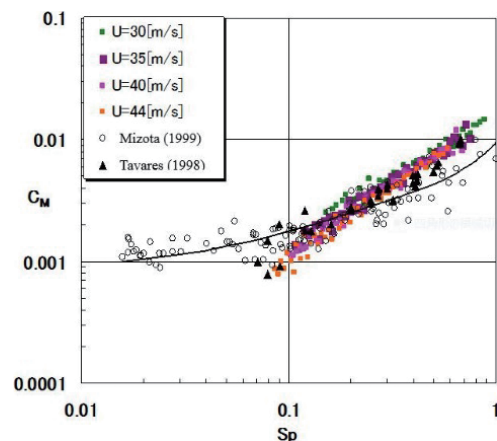


図4 空力摩擦トルク係数 C_M のスピンパラメータ Sp 数による変化

図3に示した抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L の Sp 数による変化には流速 (Re 数) の違いはあまり見られないが, ボール表面のディンプル形状などによっては特に低速域で揚力係数 C_L の低下がみられる場合がある.

図4には飛翔するゴルフボールの回転減衰から求めた空力摩擦トルク係数 C_M の結果⁶⁾も示すが, 風洞実験結果はおおむねこれと合致している.

2.3 飛翔実験による3次元理論と空力実験の検証

ボール飛翔実験においてはボールの初期条件（速度 U 、回転数 N 、回転軸のバンク角度 θ 、飛び出し角度 α ）などを計測して、その後の飛翔距離などをオイラー法で求めた。ボール発射ロボットを使って、バンク角 $\theta = 0$ 、初期横ブレ角 $\beta_0 = 0$ 、として行った。

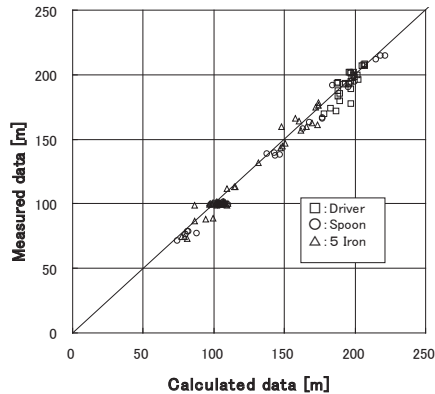
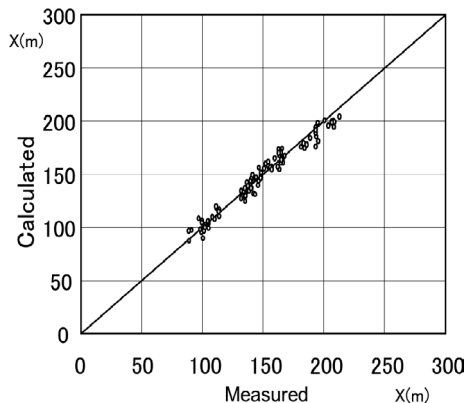
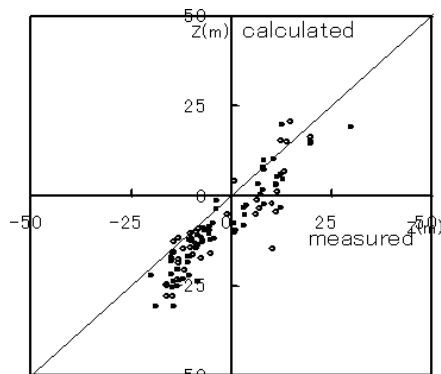


図5 ロボット発射装置による飛距離 X の測定値（縦軸）と計算値の比較（横軸）。バンク角 $\theta = 0^\circ$ 、初期横ブレ角 $\beta_0 = 0^\circ$



(a) ロボット発射装置による飛距離 X の測定値と計算値の比較。初期横ブレ角 $\beta_0 = 0^\circ$ 、種々のバンク角 θ を与えた場合



(b) ロボット発射装置による横ブレ距離 Z の測定値（横軸）と計算値（縦軸）の比較

図6 種々のバンク角 θ を与えた場合の(a)飛距離 X と(b)横ブレ距離 Z

2次元の飛翔実験の飛距離の結果と比較して図5に示す。初期横ブレ角は $\beta_0 = 0$ として、種々のバンク角 θ を与えて行った飛距離 X の結果を図6(a)に示す。その場合の横方向変位 Z の測定結果を図6(b)に示す。

プロット点が 45° の線上にあれば、計算結果と実験結果が一致していることになる。図5と図6(a)は良いが、図6(b)の Z 方向のブレは全体として右方向にシフトしている。実験当日終日吹いていた左から右への風が影響したものと思われる。

2.4 この研究への他研究者の評価など

- 1) “ゴルフの科学世界大会”⁷⁾で口頭発表した際の質疑応答の最後に、座長は“この複雑な問題に良い見通しを与える研究である”と総括した。
- 2) “ブラフボディの後流と渦励振振動に関する第3回会議 (BBVIV3)”⁸⁾でBearman P.W.⁴⁾は“この3次元飛翔理論はOKである。今後は右に出たボールが左に帰って来るようなゴルフボールをどうか開発してくれないかい”と英国紳士流の笑いで評価した。
- 3) ゴルファーにとってはショットしたボールが意図に反して右や左に曲がってしまう、ということは大問題である。サイドスピンではなくて回転軸がバンクするという物理的な概念のもとでプレーされることを筆者は期待している。ここで述べた結果をもとに、クラブフェースがボールにインパクトする瞬間のフェースの角度やスイングパスの方向から、ボールのバンク角度がどのように変化するかを見事に表す学習用リンク装置が開発され⁹⁾、JPGAの公認練習器具に指定されている。
- 4) この理論を使って、同じボール初速でもボールの回転速度や初期迎角によって最大飛距離を得る最適条件図を得ることができた¹⁰⁾。

3. 硬式野球ボールの変化球の不思議

3.1 3種類の超低速魔球ナックルボールの回転と飛翔軌道、および準定常近似による振動方程式

回転軸が進行方向を向いてゆっくりローリング回転するナックルボールの回転の様子を投げた投手側から見た映像を図7(a)に示す。ボール回転軸が進行方向を向き、時計方向に回転している様子がわかる。

図7(b)には同じ投球のストロボ映像を示す。巧みなカメラワークでボールをチルド、パンして撮影してある。グラウンド上のゴミなどを目印（楕円や円で囲んでいる）にしてボールの相対位置を各画像間で矛盾なく表現した結果である。ボール軌道は大きくうねっている様子がよく表れている。

つぎに、ボールをバックスピンの状態で投げた場合のナックルボールの飛翔軌道のストロボ映像を図8(a)に、図8(b)にバックスピンの様子を示す。

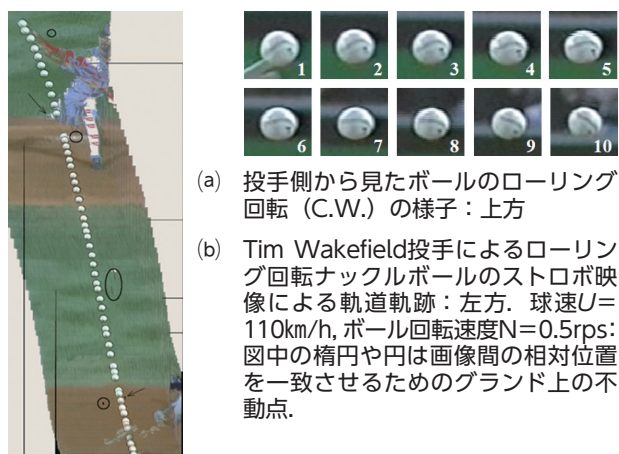


図7 ローリングナックルの(a)回転の様子と(b)飛翔軌道のストロボ映像

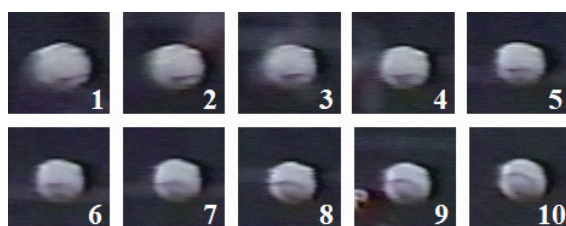
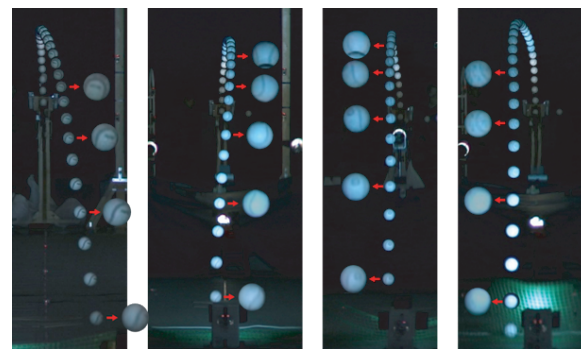


図8 Tim Wakefield投手によるバックスピナックル。(a)ボール飛翔軌道のストロボ映像および(b)飛翔途中の回転の様子

通常のボール速度よりはるかに遅い球速であるが、投球直後では大きな揚力が発生して、重力に抗してなかなか落下してこない印象である。

つぎに示す図9(a)，(b)は発射装置から打ち出されたサイドスピナックルの(a)さまざまなストロボ映像，(b)上方からの軌道観察であり、動画(a)の画像処理により(b)を求めている。ストロボ画像の図9(a)の



(a) 発射装置によるナックルボール

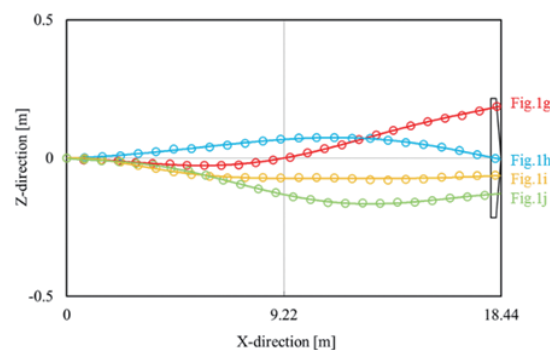


図9 発射装置によるサイドスピナックルの(a)ストロボ映像と(b)軌道軌跡の平面図

下のFig.1g ~ Fig.1jは図9(b)に対応している。同一条件で発射させてもひとつとして同一軌道を描かず、サイドスピンしながらさまざまな軌道変化をする。

ナックルボールの記述の最後に準定常近似で求めた振動方程式による振動振幅をフラッタ実験による実験と比較した結果を示す。風洞気流中で、ボールにゆっくりとローリング回転やサイドスピンさせて、ボールに作用する振動空気力係数を求める。ボールの回転にともない縫い目の粗さが境界層の乱流化を生み、流れの剥離位置が非対称になることで、周期的な横力が発生する。これを近似関数（振幅を C_s とする）で表して、準定常近似の仮定により以下のような振動方程式を求めることができる^{1), 11)}。

$$Z(t)_{\text{spiral}} = (\rho U^2 A C_s / (2 m (2 \pi N)^2)) \cdot [1 - \cos(2 \pi N t)] \quad (4)$$

$$Z(t)_{\text{side}} = (\rho U^2 A C_s / (2 m (8 \pi N)^2)) \cdot [1 - \cos(8 \pi N t)] \quad (5)$$

(4)式がローリング（式中spiral）ナックル，(5)式がサイドスピン（式中side）ナックルの振動方程式である。

別途行ったフラッタ実験により振動振幅を求め、図10にボール回転速度 N による振動方程式の振幅曲線とともに記入してある。準定常近似式の振幅とフ

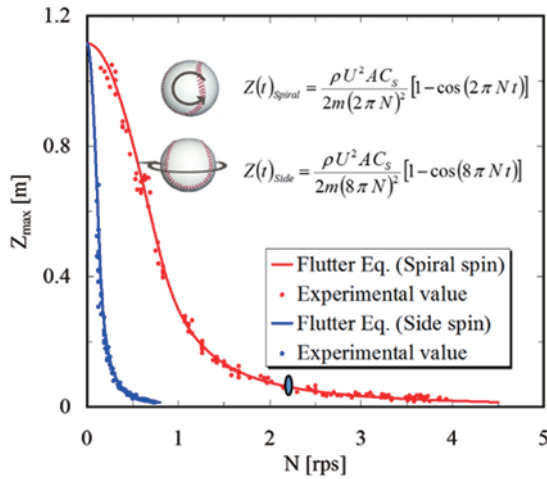


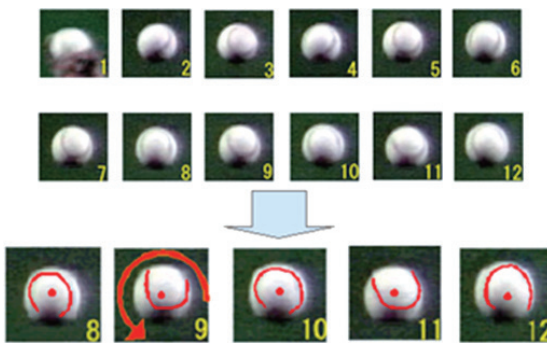
図10 ボールの回転速度 N にともなう横方向変位の振幅 Z_{max} . 図中上側の式がローリング回転の場合でSpiral spinと記している. 例えば1 rpsの回転速度ではサイドスピナックルはほとんど振幅0であるが, ローリングナックルは大きく振動する

ラッタ実験で得られた振幅値の一致は良好であり, ナックルボールの振動振幅は, 空気力の準定常近似で表すことができた.

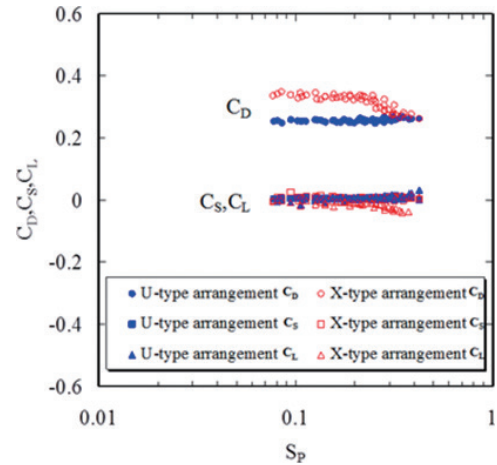
3.2 速球系魔球の2シームボール, 4シームボール

1999年の日本プロ野球界には西武ライオンズ球団に松坂大輔投手が登場した¹²⁾. 縦スラボールといわれる変化球を駆使して, その年のパ・リーグ新人王を取得して松坂ブームと称された. 回転軸が捕手側を向く2シームボールをストロボ映像で示して図11(a)に示す. 捕手側から見てC.C.W.に $N=45$ rpsで回転している. その空力特性(図中ではU-typeとしている)を4シームボール(同X-type)とともに図11(b)に示す¹³⁾.

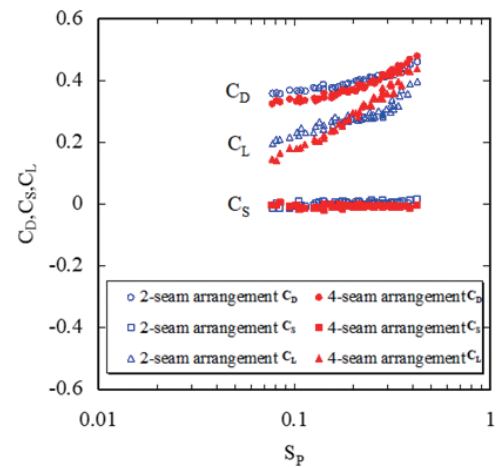
これらの結果から, 松坂選手の2シーム縦スラボール(U)は4シーム(X)ボールや図11(c)の2シーム, 4シームボールより空力抵抗が小さく, 同じ初速で投げても30cm近くホームベース上に早く到達し, 揚力がほぼ働かないので重力で鋭く落下して打者には厄介な変化球である. このボールはジャ



(a) 松坂大輔投手の2シームボール¹³⁾, $U=140$ km/h, 39m/s, $N=40$ rps, $Sp=0.22$



(b) 2(U)(4(X))シームボールの空力特性, 回転軸はボール進行方向を向く



(c) 2 & 4シームボールの空力特性, 回転軸はボール進行方向に直交し水平方向

図11 ボール進行方向に回転軸を持つ(a)松坂縦スラと(b)その空力特性, および(c)2, 4シーム直球

イロボールと呼ばれホップすると主張されていたこともあった.

なお, 図11(c)の4シームボールで $U=160$ km/h, $N=40$ rps ($Sp=0.2$)で投げられるとボールの揚力は重量とほぼ等しくなり, ボールはそれ以上の速度ではホップする. 従来, ホップするボールは無いといわれて来たが, これまでの常識を破るボールが今では投げられている.

3.3 フロントドア, バックドアという魔球

図11(c)で示した2(4)シームボールの回転軸がボール進行方向に対して水平面上で左右にYawing角度 θ (ゴルフの記述のバンク角度とは異なる)を $0^\circ \sim 90^\circ$ 変化させた場合の空力特性を図12に示す. この結果で特徴的な点は以下の2点である.

(1) 2, 4シーム共, $\theta = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$ 付近まで抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L はほとんど変わらない.

$\theta = 0^\circ$ と 30° で右打者の外角を直球で攻めれば, 後者は30cmも横変化して, 明らかなボールが入っ

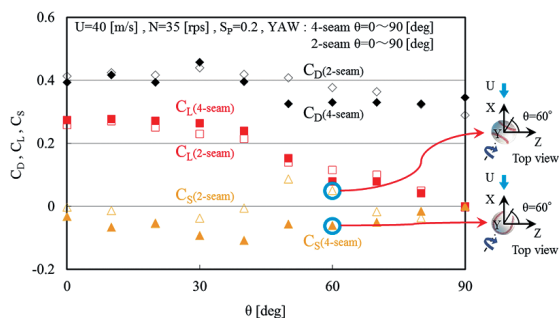
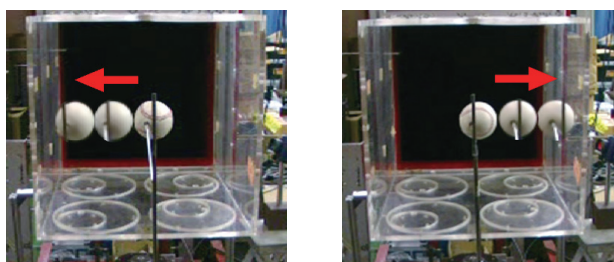


図12 2, 4 シームボールの回転軸のYawing角度 θ を変化させた場合の空力3分力特性, $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$, $Sp = 0.2$ 付近に特化してまとめている

てきてストライク球になり打者には厄介な球になる。(2)横力係数 C_s は, $\theta = 60^\circ$ 付近で正逆が異なる。

これをフラッタ実験で示した結果を図13(a), (b)に示す。図12の $\theta = 60^\circ$ 付近の横力の方向と良く対応して、回転軸の方向は同じ 60° でも4シームと2シームでは移動する方向が逆になる。この結果は図13(a), (b)のように風洞装置によるフラッタ実験や投手による投球実験によっても確かめられた。

これらのボールは最近では、右打者の場合内角で(a)フロントドア、外角で(b)バックドアと呼ばれている。



(a) 4 シーム, $\theta = 60^\circ$ 左ヘシフトした。 (b) 2 シーム, $\theta = 60^\circ$ 右ヘシフトした。

図13 風洞装置によるフラッタ実験。ボールは横滑りする電車に乗っている ($U = 35 \text{ m/s}$, 126 km/h)

3.4 この魔球の研究へのプロ野球選手の反応

回転軸が同じ方向に向いていても2シームと4シームでボールがシフトする方向が逆になる結果について、王 貞治福岡ソフトバンクホークス取締役会長にこれらを見せて説明する機会を得た。実に丁寧に耳を傾けた後に王会長からは“ダルビッシュが投げているボールだろう”(2012.3)というコメントがあった。YouTube上でも最近では図14のような変化を示す実際の投球動画が掲載されている¹⁴⁾。

最後にソフトバンクホークス千賀晃大投手のお化けフォークと呼ばれ激しく落下する球に触れる。これは図13(b)に示す横向きのボール回転軸を下方 30° に向けて投げ、横向きだった空気力を重力方向に一致させると、重力が1.3倍になったかのような力に

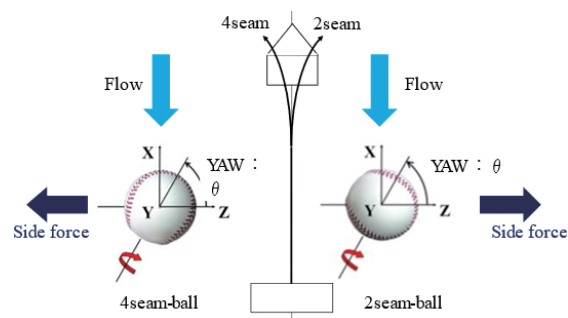


図14 縫い目と回転軸の関係の違いだけでお互い反対方向に変化する魔球

なることを利用した消える魔球である。

4. サッカーボール弱回転魔球のすさまじさ¹⁵⁾

4.1 滑面球まわりの超臨界 Re 数流れと非定常空力との対応

サッカー競技のセットプレーでみられる弱回転ボールやバレーボールのフローターサーブが不規則に揺れる魔球は古くから知られている。この現象は背後の渦の発生位置が不規則に変化することを見出した種子田の滑面球のまわりの流れの研究¹⁶⁾をサッカーボールに適用することで説明できる¹⁵⁾。

滑面球背後の渦を種々の可視化実験の結果から描いた様子を図15に示す。超臨界 Re 数領域における滑面球背後の渦であるが、流れの中心線を対称軸にして、この渦は発生位置をランダムに変化させる自由度を持つので周囲の流れの方向もそれによってランダムに方向を変化させる。この図の瞬間の周囲

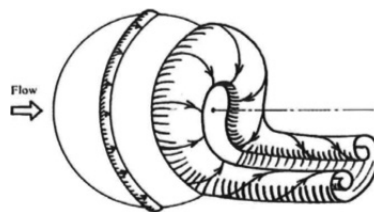
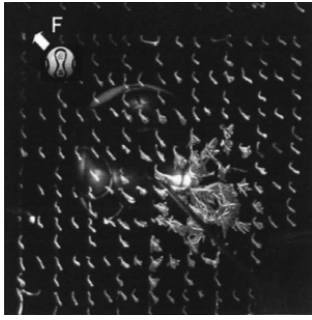
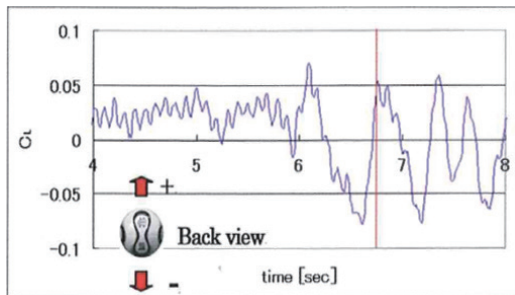


図15 滑面球背後の渦の種子田のスケッチ¹⁶⁾, $Re = 3.8 \times 10^5$. この図では気流は下方に流れ、揚力は上方に作用する。この渦を Ω 型渦と呼ぼう¹⁵⁾

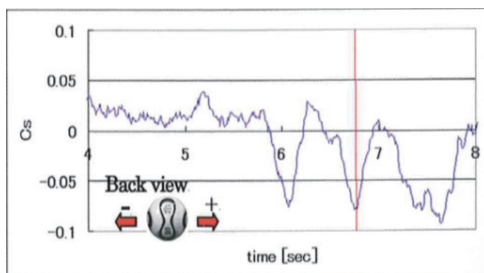
の流れは下方に追いやられ、流体力は上方に作用する。サッカーボールと同じ直径の滑面球では 30 m/s 以上で超臨界 Re 数の流れになる。この速度はかなりのハイレベルのキッカーしか蹴れない。しかしサッカーボール表面は数枚～20数枚のパネルで構成されているので、その継ぎ目の溝部分が表面粗さとなり、境界層の乱流への遷移が滑面球の半分の 15 m/s 以上のボール速度で発生し、ボールまわりには超臨界 Re 数領域の流れが実現する。この渦を Ω 型渦¹⁵⁾と呼ぼう。



(a) サッカーボール背面のタフト法による流れ。 $U = 22.0 \text{ m/s}$, $Re = 3.3 \times 10^5$. 流れはボール支持シャフト後方の右側に向かっていて。図中Fは(b), (c)の $t = 6.8$ 秒の合力方向を示す



(b) サッカーボールに加わる揚力 $C_L(t)$



(c) サッカーボールに加わる横力 $C_S(t)$

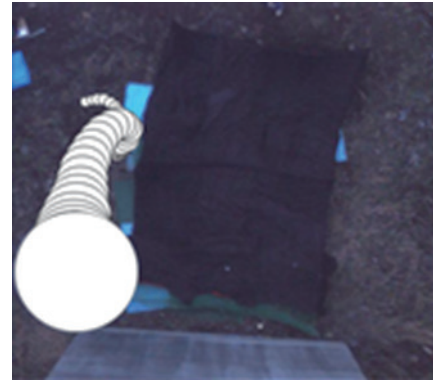
図16 サッカーボールまわりの(a)タフト法による流れは $t = 6.75 - 6.85$ 秒間の25枚重ね合わせ画像で(b)揚力 $C_L(t)$, (c)横力 $C_S(t)$ の時間変化の縦線部分との同時撮影, $U = 22.0 \text{ m/s}$

図16(b), (c)の図中縦線部分を挟む $t = 6.75 - 6.85$ 秒の間のタフト法による25枚重ね合わせ画像を(a)に示している。揚力と横力の合力が $t = 6.8$ 秒では(a)に示すように左上方を向いている。一方ボール後流は右下に向かっており、流れと空気力の対応関係は良い。

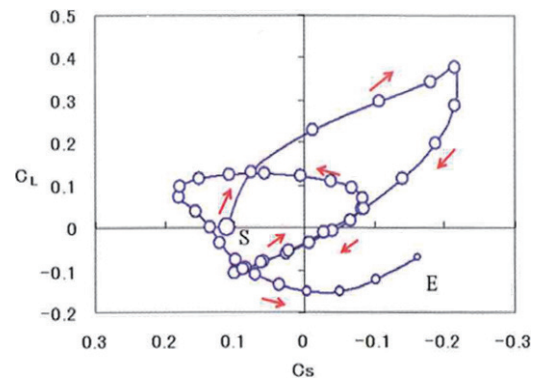
4.2 阿蘇長陽大橋からの自由落下実験

サッカーボールを無回転で静止空気中を自由落下させた場合の軌道変化の様子を図17(a)に示す。

ボールは自由落下しながら、空気力で奇妙な軌道変化を繰り返しながら落下速度を次第に速めてゆく。その過程の横力 C_S と揚力 C_L の非定常変化を(b)に示す。まったくランダムな様相を示している。



(a) 自由落下するサッカーボール揺れの様子



(b) 自由落下するボールに加わる揚力 C_L と横力 C_S の変化,

図17 阿蘇長陽大橋の高さ65mを自由落下中のサッカーボールの(a)揺れ状態と(b)横力 C_S と揚力 C_L ((a)図の紙面上方向き+) の非定常変化, $N = 1/16 \text{ rps}$ 程度の回転速度, (a)の時間的位置情報から揚力, 横力を求めている

4.3 ボール発射装置による弱回転ボールの軌跡

最後にサッカーボールの発射装置を使って弱回転で発射した魔球の様相の1例を図18(a)ストロボ表示軌道, (b)Y-Z平面上の位置変化, (c)横力係数の時間的変化, として示す。

室内における発射実験では、ボールの初期設定条件は同じでも、飛翔軌道はその都度まったく異なる軌道を描いて飛翔した。別途屋外でこの発射装置を使って斜め 45° から40m近く離れた場所からゴールに向けて発射したボールは凄まじい変化をしながら



(a) 発射装置による弱回転魔球事例1, 初速 22.8 m/s (82 km/h)

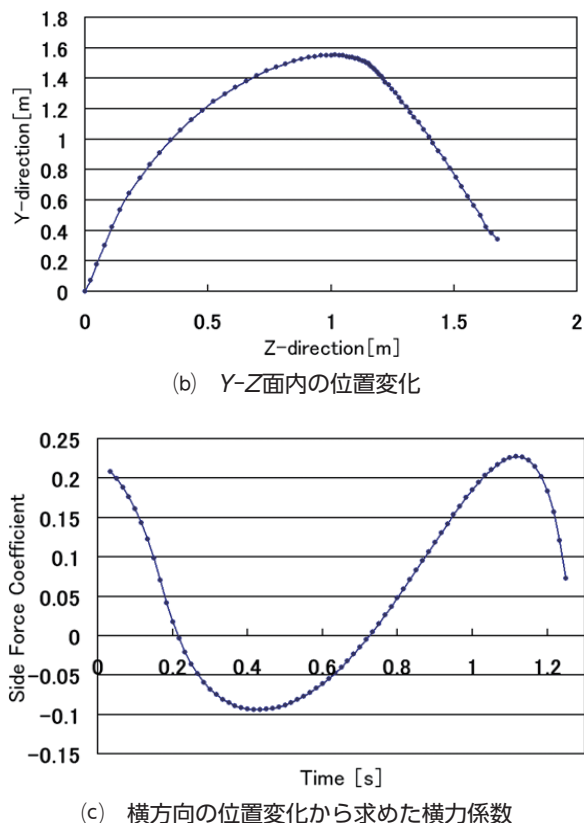


図18 発射装置から発射した(a)サッカーボールの(b)Y-Z方向の位置変化, (c)Z方向の空力係数の時間変化

ゴールポストの内側に飛び込んだ。いずれも奇妙な軌道を描く魔球を実感することができた。詳細は文献15)を参照されたい。

5. おわりに

スポーツボールの3次元飛翔軌跡の中でも、ゴルフボールの3次元飛翔軌道、硬式野球ボールの魔球、サッカーボールの弱回転魔球に注目して解説した。主要な結論は以下のとおりである。

(1)ゴルフボールが左右に曲がる理由はサイドスピンによるというこれまでの考えから、回転軸がバンクしているという概念によって、3次元飛翔理論ができた。

(2)硬式野球ボールの種々の魔球的な変化球を、ボール回転軸の方向と縫い目との関係から実験的に説明することができた。

(3)サッカーボールの弱回転魔球は滑面球の超臨界 Re 流れが、ボールパネル間の縫い目の窪みの粗さ効果により、サッカーボールの球速領域でも実現されていることによる Ω 渦のランダム挙動にもとづくことがわかった。

今回の特集は「スポーツ分野における流体力低減

技術」である。ゴルフボールではディンプル、硬式野球ボールでは縫い目、サッカーボールでは表面のパネル間の溝、などの粗さが球体表面の境界層を層流から乱流への遷移を促進している。これがスポーツボールのさまざまなおもしろい軌道変化を生み出しているもとになっていることを付記しておく。

参考文献

- 1) Mizota T. : Aerodynamics and Flutter Problems of Sports Ball Flight, Proceedings of the Second International Symposium on Flutter and its Application, p. 2-47, Paris France, 12-14 May (2020).
- 2) 鳴尾文司, 溝田武人: ゴルフボールの空気力測定と3次元飛翔軌道解析, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第23巻, 第3号, p. 203-211 (2004).
- 3) Thomson, J. J. : The dynamics of a golf ball. Nature, no. 2147, Vol. 85, p.251-257 (1910).
- 4) Bearman, P. W. & Harvey, L. K. : Golfball aerodynamics. Aeronaut. Q. 27, p.112-122 (1976).
- 5) 溝田武人, 小栗弘規, ほか: 風洞実験用空気静圧軸受型4分力ロードセルの開発研究, 日本風工学会誌, Vol. 41, No. 2 (No.147), p. 48-57 (2016).
- 6) Tavares, G., K. & Melvin, T., Golf ball and spin decay model based on radar Measurements. Science and Golf III (E. & F. N. Spon, London) p.464-472 (1998).
- 7) Mizota, T. Naruo, T., et. al. 3-Dimensional Trajectory Analysis of Golf Balls. Science and Golf IV (E. & F. N. Spon, London) p. 349-358, (2002).
- 8) Mizota, T., Naruo, T., et. al. 3-D Trajectory Analysis of Golf Ball Flight by Inclined Back Spin Axis. : Proceedings of Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations (BBVIV3) , Port Douglas, Australia, 17-20 December, p. 207-210, (2002).
- 9) 若生将志: Spin Axis, benjamin-golf.jp, (2011).
- 10) Naruo, T and Mizota, T., : Trajectory analysis and optimum trajectory of a golfball, Engineering of Sport 5, Blackwell Science Ltd., Oxford,p.432-439, (2004).
- 11) Watts, R. G. & Sawyer, E., Aerodynamics of a knuckleball. Am. J. Phys. Vol. 43, p. 960-963, (1975).
- 12) NHK Special program : "Pitcher Matsuzaka Daisuke", Aug. 27, (1999).
- 13) 溝田武人, 錦織大介, 小西和明: 硬式野球ボールの縦スライダに関する流体力測定と軌道解析, 日本機械学会論文集 (B編), 73巻, 734号, p. 1987-1997, (2007).
- 14) <https://full-count.jp/2021/04/24/post1077386/2/>, (2021).
- 15) Mizota, T., Kurogi, Ohya, Y., Okajima, A., Naruo T., and Kawamura, Y. : The strange flight behaviour of slowly spinning soccer balls. Scientific Reports, Vol.3, Article number 1871, www.nature.com/srep, p. 1-7, 22 May, (2013).
- 16) Taneda, S. : Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech., Vol.85, pp. 187-192, (1978).

(原稿受付: 2021年4月30日)

解説

スキージャンプと流体解析技術

著者紹介



やま もと けい ぞう
山本 敬三

北翔大学 生涯スポーツ学部
〒069-8511 北海道江別市文京台23
E-mail: kyamamoto@hokusho-u.ac.jp

1974年山口県に生まれる。2004年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士後期課程修了。現在は、北翔大学生涯スポーツ学部スポーツ教育学科教授。日本バイオメカニクス学会、日本機械学会、などの会員。博士（工学）。



つば くら まこと
坪倉 誠

神戸大学大学院システム情報科学研究科
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1
E-mail: tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp

神戸大学大学院・システム情報科学研究科・計算科学専攻・教授。理研計算科学研究機構でチームリーダーを務める。計算流体力学を手法とし、自動車の空気抵抗の削減やエンジンの熱効率の向上、スポーツ動作の空力特性の解析などの研究に従事。博士（工学）。

1. はじめに

スキージャンプ競技は、飛距離の大きさと飛型の美しさを競うスポーツである。スキージャンプを対象としたバイオメカニクス（運動学、運動力学）的な研究では、一連の試技を次の6つの局面に分けられることが多い。助走、踏切、初期飛行、安定飛行、着地準備、着地である。実際の試技では、ラージヒルの場合、選手は時速約90km（秒速25m）で滑降・滑空するため、パフォーマンス（飛距離）に対して空気が支配的になる。流体解析の研究では、助走、踏切、初期飛行および安定飛行が取り上げられることが多く、それぞれの局面では、選手に要求される運動技術が異なる。まず、助走では、安定的な姿勢を維持しながら、滑走速度を得るために抗力を抑制する姿勢での滑走技術が求められる。つぎに踏切動作の主な力学的目的は、「身体を伸展させて重心を上昇させること」と「身体に前方回転の角運動量を獲得させること」とされる¹⁻³⁾。前者は踏切力を発揮することで実現されるが、過度な力発揮は身体を直立方向へ伸展させるため、結果的に抗力を増大さ

せ、空力的に不利な状況になる。後者についても、選手には空気力による後方回転のモーメントが作用するため、それに見合った適量の前方回転のモーメントを発揮する必要がある（図1）。踏切局面では、選手は重心の後方に地面反力（図中、選手の足からの上向きの矢印）を立ち上げて、身体に前回りモーメント（中抜きの曲線矢印）を作用させ、角運動量を獲得する。この能動的な前方回転の角運動量と空気力による受動的な後方回転の角運動量が釣り合う時点で飛行姿勢が決定される。

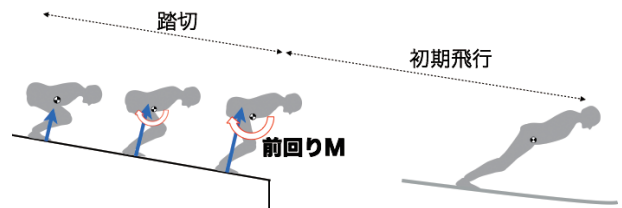


図1 踏切局面と初期飛行局面の定義：踏切動作中に選手の足からの上向きの矢印は地面反力、中抜きの曲線矢印は、選手に作用する前回りモーメントを示す。Mは力のモーメント（Moment）の略。

踏切動作では、約0.25～0.3秒という短時間にダイナミックな姿勢変化が行われるため、選手に作用する空気力は劇的に変化する。先行研究から、世界の一流選手はこの踏切局面で空力的な優位性を確立していることが報告されている^{4,5)}。初期飛行は、離陸から安定飛行に移行するまでの局面である。離陸直後、スキージャンパーは、空気の流れがスキーの下面に作用するように、足関節を背屈させながらスキーの先端を徐々に持ち上げていく。選手が前方回転の角運動量を獲得できるのは、地面反力が作用する踏切動作中だけである。一方で、空気力による後方回転の角運動量は、踏切から初期飛行にかけて累積的に増加していく。つまり、空気力による後方回転の角運動量とバランスを取るために、必要な前方回転の角運動量を選手は離陸までに、あらかじめ獲得しておく必要がある¹⁾。

安定飛行局面でスキージャンパー系に作用する力は重力と空気力の2力である。この局面の力学的目

的は、安定したスキージャンパー系の姿勢を維持しながら、最適な揚抗比を達成することである。安定した飛行姿勢に到達するには、踏切時に獲得した前方回転の角運動量が、空気力によって発生する後方回転の角運動量を完全に補う必要がある。安定した飛行姿勢を短時間に達成することが選手にとって重要な課題である。風洞実験によると、飛行局面でスキージャンパー系が受ける揚力は250～350Nになる⁶⁾。計算上、300Nの揚力を4秒間受けて飛行したとすると、総重量60kgの選手を約40mも上昇させることになる。踏切時の跳躍動作によって発生する床反力による重心上昇量は約0.3mしかないことをかんがみると⁷⁾、空気力が飛距離に大きく影響を及ぼすことは疑いの余地はない。

数あるスポーツの中で、空中動作をとまなう種目（体操競技、スキー競技フリースタイルなど）は多いが、その多くは身体回転等の空中技を目的としている。一方で、スキージャンプ競技では、飛翔を目的とし、空中技を行うことはない。これが、スキージャンプが跳躍競技ではなく、飛翔競技といわれるゆえんである。

本稿では、パフォーマンス（主に飛距離）に大きく貢献する局面として、踏切、初期飛行および安定飛行に着目し、これらの局面において、スキージャンパー系に作用する空気力および周辺気流状態の解析技術について述べる。

2. 安定飛行

2.1 風洞実験

空力的に有利な安定飛行姿勢を探索する研究は、これまで数多く行われてきた。まず、風洞実験による空力特性の計測と、そのデータを用いたシミュレーション研究について述べる。風洞実験は、風洞（人工的に気流を作り出す装置）内に選手または選手を模した模型を設置し、力覚センサを用いて空気力を実測する方法である。空気力の実測値を得られるためデータの信頼性が高い。古くは、Straumann (1926) で報告されており、身体全体の深い前傾姿勢が空力的に有利であることを理論的に明らかにした⁸⁾。この当時の一般的な飛行姿勢は上肢を頭上に突き出すスタイルであったが、後に谷ら (1951, 1971) の研究によって、上肢を体側に沿わせた姿勢の方が、揚力が大きくなることが証明された^{9), 10)}。選手の飛行姿勢の大きな変化に、スキーの先端を開いた、いわゆるV字姿勢の登場がある。V字姿勢の空力特性の優位性を証明する一連の研究報告より、それまでのスキー板を並行にそろえた姿勢よりも空力的に有利であることが証明されてきた^{11)–15)}。現

在では、上肢を体側に沿わせたV字姿勢が一般化された。近年では、飛行姿勢の最適化を目的とし、飛距離を最大化させる姿勢が模索されてきた。風洞実験室内に姿勢可変型のスキージャンパー系の模型を設置し、風速や関節角度、スキー板の姿勢を変化パラメータとして、姿勢ごとの空力特性のデータベースを蓄積していった^{16), 17)}。このデータベースを用い、最適化制御問題を解くことで、飛距離を最大化する最適姿勢が模索されている^{6), 18), 19)}。

2.2 数値流体解析

数値流体解析 (CFD; Computational Fluid Dynamics) を用いた研究では、分析対象となる選手のコンピュータグラフィックス (CG; Computer Graphics) モデルを取得し、コンピュータ上に仮想的な風洞を構築して気流状態や空力特性などを計算させる²⁰⁾。この手法の利点は、空気力だけでなく、周辺の気流状態や体表面圧力を計算し、可視化できる点にあり、空気力（揚力、抗力）の発生原因まで突き止めることができる (図2)^{21), 22)}。また、風洞実験で使用する大型な施設が必要ないこともCFDの利点である²³⁾。不可視な流体特性を可視化できるため、選手やコーチに対して新たな視点から最適動作を模索する情報を提供することができる。一方で、計算結果の妥当性の検討は、慎重に行う必要がある。

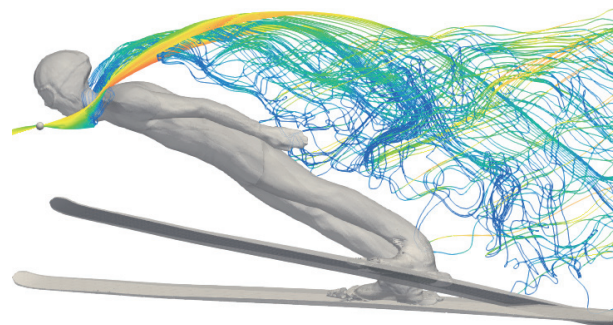


図2 安定飛行局面のCFD計算結果。肩を通過する流れを表示している。身体背面付近の気流状態が可視化されている。

2.3 慣性計測ユニット

実試技で飛行中のスキージャンパー系に作用する空気力を計測する手法として、慣性計測ユニット (IMU: Inertial Measurement Unit) を利用する手法がある。IMUとは、各物理情報のセンサー（加速度センサー・ジャイロセンサー・磁界センサーなど）をひとつのパッケージに統合したセンサーユニットである。軽量のセンサ (100g以下) を身体やスキー板に取り付けることで、空気力や姿勢を計測できるため、計測時の選手への負担を少なくできる。Chanrdonnens et al. (2014) の報告から、安

定飛行中の合成の空気力は、約300Nから500Nまで単純増加していくことが示された²⁴⁾。

2.4 全球測位衛星システム

近年では、GPS (Global Positioning System) に代表される人工衛星によって地上の現在位置を決定する衛星測位システム (Global Navigation Satellite System; GNSS) を用いて空力特性を計測した報告がある²⁵⁾。GNSSは、衛星測位システムの総称で、複数の測位衛星から時刻情報付きの信号を受信し、地上での現在位置を計測するシステムである。GNSSは、複数の衛星から発信された時刻信号を地上で受信し、その電波のわずかな遅延の差を測ることでセンサ座標を測定する。近年のセンサの小型化や精度向上によって、実試技で計測が可能となり、飛行軌跡を求めることができるようになった。また、得られた位置情報 (飛行軌跡) から進行方向と加速度を算出することで、選手に作用する揚力・抗力といった空力特性を算出できる (図3)。この図から安定飛行局面では、揚力・抗力ともに増加するものの、飛行性能の指標となる揚抗比 (L/D) は減少することがわかる。このことから、踏切から初期飛行局面までに飛行性能の高い (L/Dの大きい) 飛行姿勢を獲得し、安定飛行中にそれを維持することが重要であることが示唆される。センサを利用した計測手法の利点は、実試技で計測されたデータの信号処理から、揚力・抗力等の空力特性を得られることである。

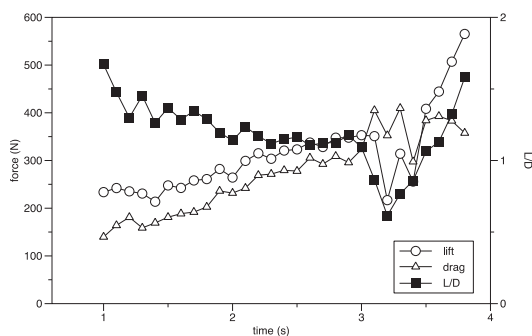


図3 安定飛行中の揚力 (Lift)・抗力 (Drag) および揚抗比 (L/D) : 横軸の時間ゼロは、離陸を示す

3. 踏切と初期飛行

初期飛行局面は、離陸してから安定した飛行姿勢に至るまでの0.4 ~ 1.0sの間 (15 ~ 30m) と定義されている²⁶⁾⁻²⁸⁾。初期飛行局面の終盤におけるスキーと身体とのなす角度と、飛距離との間には有意な負の相関関係があることが報告されていることから^{26), 28)}、この局面ではす早く身体を前傾させて安定した飛行姿勢に移行することが選手に求められる

運動技術であると考えられる。スキージャンパー系の姿勢変化が大きいため、踏切局面と初期飛行局面は、空力特性の計測や計算は容易ではない。

3.1 風洞実験

Virmavirta et al. (2001) は風洞実験室内で選手に模擬踏切動作を行わせ、床反力データから空気力の算出を試みた。風洞実験では、動作中の選手にはたらく揚力だけを抽出して実測することはできない。そこで、彼らは有風条件 (風速33m/s) と無風条件下で踏切動作を行わせ、両条件での床反力の波形データを比較した。その結果、有風条件では、踏切時間が有意に短縮されることを発見し (11.3から14.4%の短縮)、その力積の差から選手にはたらく揚力を推定した⁵⁾。

山辺 (2011) は、風洞施設内に設置したスキージャンパー模型の姿勢を変化させ、それぞれの姿勢時の空力特性を計測した。計測された空力特性データベースを用いて、飛行軌跡をシミュレーションし、初期飛行局面の空力特性に影響を及ぼす姿勢パラメータとして、股関節の屈伸角度の重要性を指摘している²⁹⁾。

3.2 映像解析

Murakami et al. (2014) は、ビデオ分析を用いて、実試技中のスキージャンパー系の重心軌跡を求め、その時間微分から空力特性を算出している。彼らは上級者と初級者の比較から、身体の迎え角を小さくし、抗力を抑制することが飛距離を伸ばす鍵となると結論付けている³⁰⁾。

3.3 数値流体解析

Yamamoto et al. (2016) はCFDを用いて、踏切動作中の選手に作用する空気力算出と身体周辺気流の可視化を行った。競技成績の異なる2名の選手を対象とし、両者の比較を行った。助走姿勢からカンテ (助走路の先端) までの約0.2秒間で、抗力は姿勢変化にともなって増加した。熟練選手は、非熟練選手よりも空力的に優位な状態で踏切動作を完了し、初期飛行局面に移行できていることを示した。また、周辺気流状態の分析から、熟練選手の揚力獲得に上肢の姿勢が貢献していることを示唆する結果を示した⁴⁾。

Gardan et al. (2017) はCFDを用いて、初期飛行局面における風速や迎角の違いが空気力に及ぼす影響を調べた。解析結果から、風速が揚力係数と抗力係数にほとんど影響しないことを示した³¹⁾。逆に、この局面においてジャンパーの身体に作用する揚力および抗力は、迎角の変化に強く影響される。迎角が小さい方が、揚抗比が大きく空力性能が高いことを示した。ジャンプでは、飛行局面の初期において

既に空力的な優劣が決定されることを示唆している。

梶本 (2020) や小山ら (2020) は、踏切から初期飛行局面までの一連の姿勢変化中の空力特性の解明をめざし、移動境界問題を含む数値流体解析手法のフレームワークを構築した。動作中の体幹迎角と空力特性に関連性があることを示した。周辺気流状態の分析から、頭部の後流の気流状態が空力特性に影響を及ぼしていると考察している。これらの研究報告から、選手やコーチが踏切動作や初期飛行局面の姿勢に細心の注意を払ってトレーニングを行うのは理にかなっているといえる。

4. スーツの空力特性

スキージャンパー系の飛行性能を考える上で、選手が着用するスキージャンプ用スーツ (以下、スーツ) の空力特性も重要な情報である。Chowdhury et al. (2011) によると、風洞実験で得られた空力特性からスーツの着用によって、飛距離成績は、着用なしに比べて8m増加すると報告されている³²⁾。国際スキー連盟のスキージャンプ競技規程によると、スーツに関する規程では、生地 of 厚みや通気性、裁断方法、パーツ数、身体へのフィット性などの詳細な制約がある³³⁾。手倉森ら (2015) や前田 (2019) では、生地の通気量と空力特性の関係に着目して風洞実験を行い、通気量が増加するほど失速角が後退し、通気量の増加が飛距離成績に有利になると指摘している^{34), 35)}。

5. 最後 に

他のスポーツ種目に比べて、スキージャンプ試技で選手が行う一連の動作はシンプルであり、1回の試技時間も数秒と短時間である。選手の姿勢がダイナミックに変化するのは、踏切時と着地時のみである。しかし、踏切動作や飛行姿勢の成否は、飛距離成績に大きく影響を及ぼす。スキージャンプが飛翔競技であるため、動作や姿勢を評価する上で、空力特性の情報は不可欠である。しかし、私たちには空気の詳細な流れをみることができない。ここで、紹介した研究報告の多くは、この空力特性や気流状態を可視化しようとする試みといえる。研究によって得られる科学的知見が選手や指導者に十分に還元され、スキージャンプ競技の発展に貢献できれば幸いである。

参考文献

- Schwameder, H. : Biomechanics research in ski jumping, 1991-2006. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, 7 (1), p.114-136 (2008)
- Mu, W., & Müller, W. : Determinants of ski-jump performance and implications for health, safety and fairness. *Sports Medicine*, 39(2), p.85-106 (2009)
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P., Schwameder, H., Pigozzi, F., & Massazza, G. : Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106 m) . *Journal of Biomechanics*, 42(8), p.1095-1101 (2009)
- Yamamoto, K., Tsubokura, M., Ikeda, J., Onishi, K., & Baleriola, S. : Effect of posture on the aerodynamic characteristics during take-off in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 49(15), p.3688-3696 (2016)
- Virmavirta, M., Kiveka, J., & Komi, P. V. : Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 34(4), p.465-470 (2001)
- Schmölzer, B., & Müller, W. : The importance of being light : Aerodynamic forces and weight in ski jumping. *Journal of Biomechanics*, 35(8) (2002) pp.1059-1069.
- Keizo, Y., Takeda, T., Yuichiro, K., Yoshida, M., Katayose, M., Yamamoto, K., Masaki, K. : Take-off force in ski jumping : age and gender differences. In E. Müller, L. Stefan, & S. Thomas (Eds.), *Science and Skiing V. Meyer & Meyer Sport*, p. 637-644 (2012)
- R. Straumann : Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik. *Jahrbuch des Schweiz Ski-Ver-bandes* (1926)
- 谷一郎, 三石智 : スキー飛躍の空気力学, *科学* Vol. 21, p.117-122 (1951)
- 谷一郎, 井内松三郎, 渡部勲 : スキー飛躍の空気力学 II. 日本のスキー科学, スキー科学研究会 (編), 日立製作所, p. 64-77 (1971)
- Mahnke R, Hochmuth G : Recent findings concerning aerodynamic effects in ski-jumping. *Proceedings of 8th ISBS, Prague* : p. 99-105 (1990)
- 神博, 清水俊助, 久保田弘敏, 綿貫忠晴, 小林一敏 : スキージャンプにおける空中フォームの相違と飛距離に関する研究. *日本航空宇宙学会第23期講演論文集*, p. 208-209 (1992)
- 渡部和彦 : ジャンプ : V字型飛行の研究と競技への応用. *体育の科学* 42, p. 375-379 (1992)
- Watanabe K, Watanabe I : Aerodynamics of ski-jumping effect of "V-style" to distance. *Congress of the ISB, abstract book, Paris*, p. 1452-1453 (1993)
- 渡部和彦, 渡部勲 : 「V 字飛行」の効果に関する空気力学的研究. *日本体育協会スポーツ医・科学研究報告集*, p. 224-227 (1993)
- 瀬尾和哉, 渡部勲, 村上正秀, 池口拓也, 木村真吾, 相澤剛 : スキージャンプ飛翔における揚力・抗力・モーメントの迎え角および前傾角依存性. *日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集*, p. 83-86 (1999)
- Seo K, Watanabe I, Murakami M : Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight. *Sports Engineering* Vol. 7, p. 31-39 (2004a)
- 吉田和代, 村上正秀, 渡部勲, 大塚敏之 : スキージャンプにおける空力特性に基づいた飛行曲線の最適化. *日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集*, p. 126-130 (1996)
- Seo K, Murakami M, Yoshida K : Optimal flight technique for V-style ski jumping. *Sports Engineering* Vol. 7, p. 97-104 (2004b)
- Gardan, N., Laheurte, J., Gouy, E., Dey, N., & Taiar, R. : Computational Fluid Dynamics for the Nordic Combined Skiing Jump. *Series on Biomechanic*, Vol. 29 (2-3), p. 31-38 (2015)

- 21) Yu, M. R., Ho, L. C., & Ho, J. C. : Aerodynamic analysis on postures of ski jumpers during flight using computational fluid dynamics. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 58, No. 4, p. 204-212 (2015)
- 22) Lee, K., Park, M., & Kim, K. : Optimization of ski jumper's posture considering lift-to-drag ratio and stability. Journal of Biomechanics, Vol. 45 No. 12, 2125-2132 (2012)
- 23) Meile, W., Reisenberger, E., Mayer, M., Schmölzer, B., Müller, W., & Brenn, G. : Aerodynamics of ski jumping : Experiments and CFD simulations. Experiments in Fluids, Vol. 41, No. 6, p. 949-964 (2006)
- 24) Chardonens J, Favre J, Cuendet F, Gremion G, Aminian K. : Measurement of the dynamics in ski jumping using a wearable inertial sensor-based system, J Sports Sci., Vol. 32, No. 6, p. 591-600 (2014)
- 25) 宮本直人, 山本敬三, 森敏, 森本達郎, 三浦隆治, 畠山望, 宮本明 : 携帯型キネマティック GNSSを用いたスキージャンプの高精度飛行計測. 第30回冬季スポーツ科学フォーラム2019新潟県長岡市予稿集, p.10 (2019)
- 26) Arndt, A., Brüggemann, G. P., Virmavirta, M., & Komi, P. : Techniques used by Olympic ski jumpers in the transition from takeoff to early flight. Journal of Applied Biomechanics, Vol. 11, No. 2, p.224-237 (1995)
- 27) Schwameder, H., Müller, E., Lindenhofer, E., DeMonte, G., Potthast, W., & Brüggemann, P. : Kinematic characteristics of the early flight phase in ski-jumping. In E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, S. Lindinger, & H. Schwameder (Eds.), Science and skiing III, Oxford : Meyer & Meyer Sport., p. 381-391 (2005)
- 28) Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P., Brüggemann, G. P., Müller, E., Schwameder, H. : Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. Journal of Biomechanics, Vol. 38, No. 11, p.2157-2163 (2005)
- 29) 山辺芳 : スキージャンプ踏み切り局面が初期飛行局面に及ぼす影響. 博士学位論文, 広島大学 (2011)
- 30) Murakami, M., Iwase, M., Seo, K., Ohgi, Y. and Koyanagi R. : High-speed video image analysis of ski jumping flight posture. Sports Engineering, Vol. 17, p. 217-225 (2014)
- 31) Gardan, N., Schneider, A., Polidori, G., Trenchard, H., Seigneur, J. M., Beaumont, F., Taiar, R. : Numerical investigation of the early flight phase in ski-jumping. Journal of Biomechanics, Vol. 59, p.29-34 (2017)
- 32) Chowdhury, H., Alam, F., & Mainwaring, D. : Aerodynamic study of ski jumping suits. Procedia Engineering, 13, p. 376-381 (2011)
- 33) https://assets.fis-ski.com/image/upload/v1603353629/fis-prod/assets/document-library/fs-sb-fk-documents/Specifications_for_CC_JP_NC_FS_SB_FK_Competiton_Equipment_2021.pdf
- 34) 手倉森重一, 長谷川裕晃, 瀬尾和哉, 村上正秀, 大林茂 : スキージャンプスーツ用生地を通気量が飛距離に与える影響, シンポジウム : スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2015, B-24 (2015)
- 35) 前田龍生 : スキージャンプスーツ用生地を通気量と空力特性の関係解明と飛距離最大を目指した高性能スーツの提案, デサントスポーツ科学 第40巻, p.72-73 (2019)

(原稿受付 : 2021年 4 月 6 日)

解説

エアタービンを用いた空圧式ボール発射装置の研究事例

著者紹介



かとうとも のり
加藤友規

福岡工業大学工学部知能機械工学科
〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東3-30-1
E-mail: t-kato@fit.ac.jp

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教を経て、2010年福岡工業大学助教。2012年同大学准教授。空気圧の計測・制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会の会員（現在、理事・国際交流委員長を担当）。博士（工学）、技術士（機械部門）。

1. はじめに

著者は空気圧の計測・制御に関する研究に約20年従事しているが、その中のひとつのテーマとして、2015年から2018年頃にかけて、野球トレーニング用のエアタービンを用いた空圧式ボール発射装置の研究に取り組んだ時期があった¹⁾²⁾³⁾。一定の成果を得たこともあり本研究テーマは終了として現在は実施していないが、本特集「スポーツ分野における流体力学」の企画に際して記事の執筆をご依頼いただいたので、当時の研究成果を要約して本記事でご紹介させていただく。

2. 空圧式ボール発射装置

著者らが研究に使用した空気圧式ボール発射装置の外観と寸法を図1に、装置の構成を図2に示す。発射までの手順として、まずボールを保持部にセットする。つぎに電磁弁を開放し、タンク内に溜めた圧縮空気を装置後方から送り、ボールを押し出すことで発射している。その際、長さ約300mmの発射導管（砲身）を通ることで球筋が安定し、コントロールが定まりやすいと考えられている。また、発射する際にボールは砲身内壁に接触しないため、他に力を与えなければボールは無回転の状態が発射できる。

回転軸を与える機構として、進行方向を軸とする回転は、エアタービンユニット（図3）を用いることにより与えられる。このエアタービンユニットは、いわゆる軸衝突型のエアタービンを用いており、回

転部は玉軸受により支持される。エアタービンへの供給空気圧は空気圧レギュレータにより調整され、ハウジング内の空気流路を通してタービンの羽根部に供給される。羽根部に衝突した後の空気は、ハウジングの穴部から排気される。エアタービンの回転数はこの供給空気圧によって決定されるが、たとえば供給圧が85kPaのとき、エアタービンの回転数は40rps（整定値）となる。

また、発射されたボールが進行方向成分を含みつつ回転軸が上下あるいは左右に傾く変化球となることを実現するために「スピンパッドユニット」を持つ機構部（図4）が付与された。スピンパッドとは、発射導管の先端に取り付けられているゴム抵抗体である。スピンパッドは硬化シリコンゴムでできており、左上部にはコイルバネが取り付けられ、右上部には角度調整用のボルトが取り付けられている。また、スピンパッドの右部には支点があり、ピンで上部のケースと固定される。スピンパッドはこのバネ

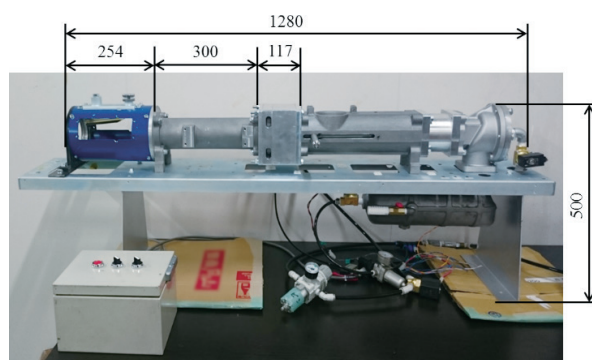


図1 空圧式ボール発射装置

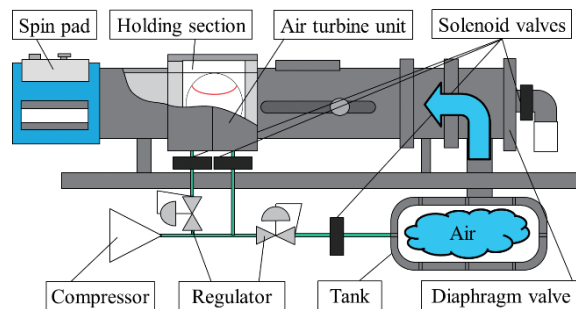


図2 空圧式ボール発射装置の構造

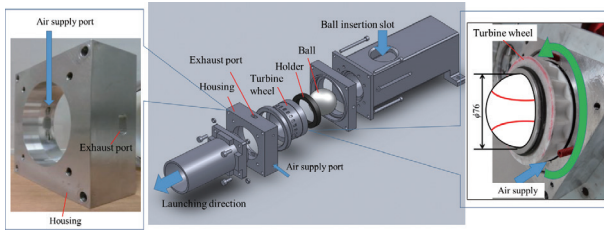
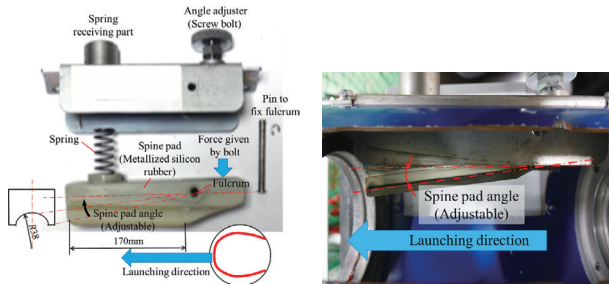


図3 エアタービンユニット



(a) Structure of spin pad (b) Angle of spin pad

図4 スピンパッドユニット

とボルトと支点により、ボールへの接触加減が調整可能である。

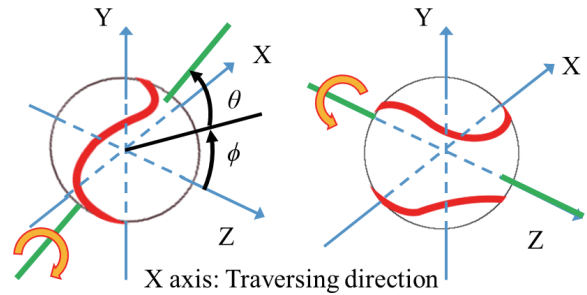
3. 野球ボールの回転軸の定義

本研究における野球ボールの回転軸の定義を図5 (a)に示す。ボールの進行方向X軸とおき、ボールに対し垂直方向をY軸、水平方向をZ軸と定義する。さらに回転軸の方向を (φ, θ) で示す。 φ は+Z軸方向への水平方向角度であり、 θ はX-Z平面からの立ち上がり角度である。

標準的な4-seam直球(ストレート)では、図5 (b)に示すように回転軸の方向は、ほぼ $(\varphi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$ であり、回転方向は投手から見てバックspinである。このように変化球はそれぞれ独自の回転軸と縫い目の関係を持っており、変化球の軌道や到達点に影響を及ぼすことが報告されている。

本研究よりも過去の研究では、空気圧式ボール発射装置で進行方向に対し回転軸が直交平面にあるボール(スライダー、カーブ、フォークなど)と回転軸が進行方向と同一の向き $((\varphi, \theta) = (90^\circ, 0^\circ))$ を持つボールの発射に成功した報告があった。

著者らの研究の段階で目標とした変化球は、回転軸が進行方向の成分を含みつつ上下あるいは左右に傾いているボールであった。目標とする回転軸は $(\varphi, \theta) = (90^\circ, 45^\circ)$ 、 $(\varphi, \theta) = (45^\circ, 0^\circ)$ の2種類であり、回転軸が進行方向に対して、上と右に傾いているボールとした。この2種類のボールは、一般的に「カーブ」と「2-seam」と呼称される変化球である。



(a) Direction of rotation axis (b) 4-seam ball

図5 野球ボールの回転軸の定義

4. 野球ボールの回転軸の観察

4.1 回転軸の決定

前章にて説明したエアタービンとスピンパッドの2つの機構を併用することで、回転軸がボール進行方向成分を含みつつ、上下あるいは左右に傾いている変化球の発射方法を提案する。目標とする回転軸の再現方法を図6に示す。エアタービンユニットにより、ジャイロ回転しながら発射されたボールは、ボール表面に回転軸と直交する方向に接線速度ベクトル V_G が生じる。つぎにスピンパッドにより、進行方向と逆向きにバックspinする接線速度ベクトル V_B が生じる。この2つのベクトルを合わせると合成ベクトル V_R になる。さらに2つのベクトル成分がほぼ等しければ、回転軸は図6に示すように進行方向から傾いた向きになる。本論文における実験では、スピンパッドの取り付け位置および接触加減については、試行錯誤的に何度も発射を行いながら調整を行っている。

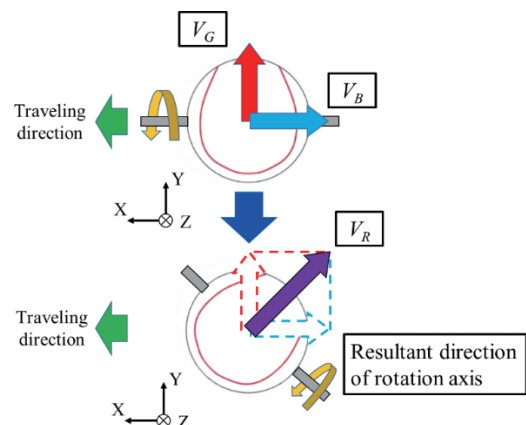


図6 目標とする野球ボールの回転軸

4.2 実験条件・方法

ボールを実際に発射する実験を行う際の設定条件として、一般的な右投げ投手の投げる変化球を想定し、ボール発射速度(球速)110km/h(発射供給

圧：275kPa)，回転数40rps（エアタービン供給圧：85kPa)，回転方向は発射装置（投手）から見て時計回りとした．ボールの軌道を検証する実験の前段階として，まずは発射直後のボール回転軸を解析するために，発射口とネットの距離を2mとした．スピンパッドの取り付け位置は，目標回転軸（ ϕ ， θ ）=（90°，45°）の場合は装置後方（投手側）から見て左側面，目標回転軸（ ϕ ， θ ）=（45°，0°）の場合は上側面とした．実験はそれぞれ20回ずつ行い，回転軸の再現性を確認した．

装置から発射されたボールの撮影には高速度カメラ（SONY DSC-RX10 Mk-2）を使用した．カメラはボール進行方向の延長線上2mの場所に設置し，捕球用のネットを挟んでボールの正面（捕手側）から撮影した（図7）．フレームレートは，高速度カメラの限界である960fpsで撮影を行った．

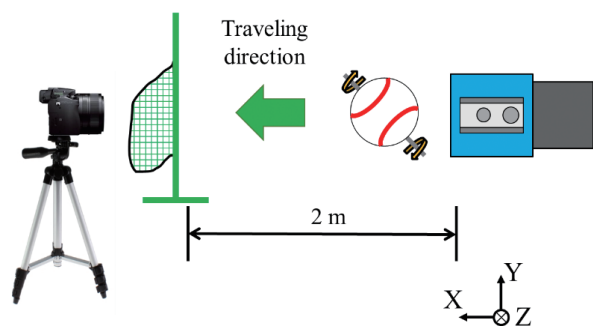
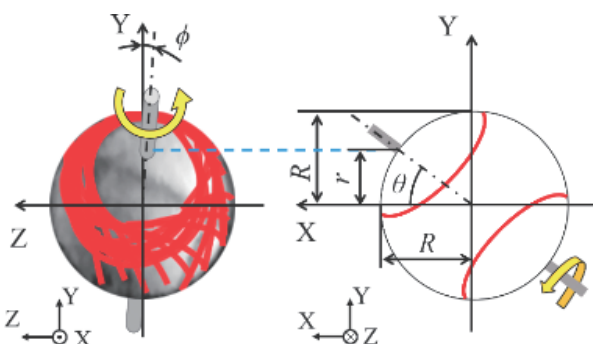


図7 ボール回転軸の観察実験の装置構成

4.3 回転軸の画像解析結果

高速度カメラで撮影した映像を等間隔にコマ送りにした画像を重ね合わせ，縫い目の不動点（＝回転軸）の位置を特定した．一例として，目標回転軸（ ϕ ， θ ）=（90°，45°）とした場合の実験の画像を図8(a)に示す．さらに図8(b)に示すように，画像上のボール半径 R と回転軸高さ r から， $\theta = \sin^{-1}(r/R)$ の式により，立ち上がり角度 θ を算出した．

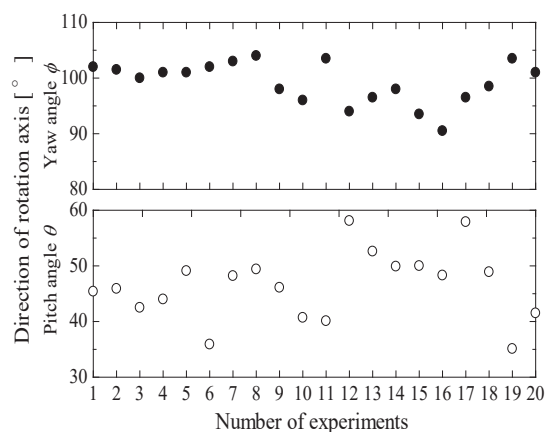


(a) Superimposed photo (b) Cross-sectional view

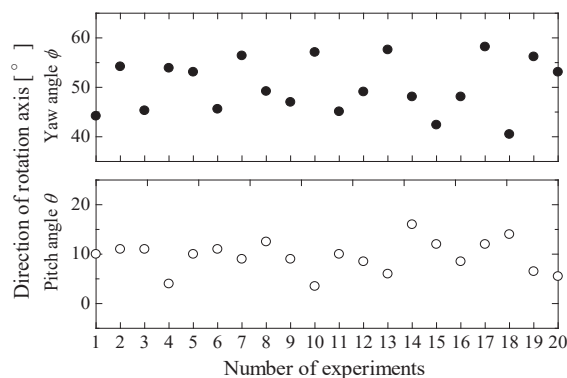
図8 回転軸の画像解析結果と θ の算出方法

解析結果のまとめを図9に示す．回転軸が若干ばらつく原因としては，ボールとスピンパッドの接触位置が異なることが推察される．本装置ではエアタービンユニットを使い発射するボールの「回転数」はほぼ同じに設定できるものの，「回転角度」は一定にできない．そのため，毎回同じ箇所にボールとスピンパッドが接触するとは限らず，接触加減に差異が生じるのではないかと考えられる．

一方，回転軸のわずかな変化にともなうボールの軌道変化に関しては，過去に風洞実験から得られた3分力から，ボール到達点を数値的に解析する先行研究がなされている．今回の解析結果では，回転軸の標準偏差が最大で約6°であったが，約6°ずれた場合の軌道への影響は40mm程度（硬式野球ボールの直径は約72.5mmであることから，ボール半個分程度）の変化である．一般にボール半個分の変化は野球において同じ変化球として扱われる．このことから，回転軸のズレの影響は少ないと考え，本実験では回転軸の再現性は高いと結論づけた．



(a) Target rotation axis (ϕ ， θ)=（90°，45°）



(b) Target rotation axis (ϕ ， θ)=（45°，0°）

図9 回転軸の画像解析結果のまとめ

5. ボール発射実験による変化球の軌道観察

5.1 ボール発射実験の方法

そこで本章では、発射されたボールの軌道を解析するため、屋外にて発射実験を行った。発射するボールの条件を表1に示す。実験条件は実際に投手が投げる変化球の諸条件に合わせ、球速、ボール回転数を設定した。発射距離については、実際の硬式野球の競技規格に従い、投手板からホームベース後端の距離である18.44mを確保した。

軌道観察実験の風景を図10に示す。軌道の撮影には装置後方に設置したビデオカメラ（SONY HDR-TD10, 60fps）を使用した。捕手側には捕球用ネットの前に垂れ幕を設置した。さらにボール到達点の解析のため、地面から500mmと1000mmの位置とホームベース幅（432mm）に合わせて基準線を引いている。本実験では目標回転軸（ ϕ , θ ）=（90°, 45°）、（ ϕ , θ ）=（45°, 0°）についてそれぞれ実験を行った。

表1 ボール発射実験の条件

Target rotation axis (ϕ , θ)	(90°, 45°)	(45°, 0°)
Pitch speed	110 km/h	140 km/h
Ball rotation speed	40 rps	40 rps
Setting seam	2-seam	2-seam

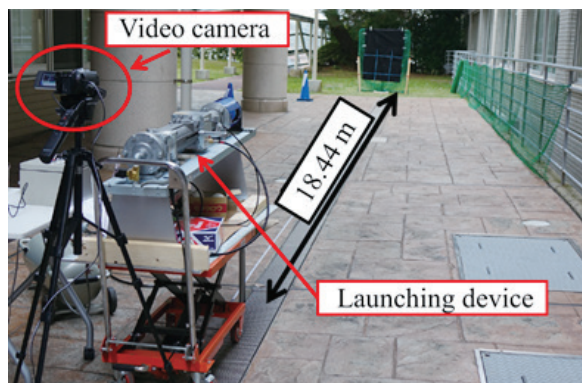


図10 ボール発射実験の様子

5.2 変化球の軌道観察結果

3種類の変化球において、撮影した映像を等間隔にコマ送りにし重ねた画像の比較を図11に示す。

(a)の4-seam直球（ストレート）を基準として、(b)の目標回転軸（ ϕ , θ ）=（90°, 45°）の場合と(c)の目標回転軸（ ϕ , θ ）=（45°, 0°）の場合を比較してみると、(b)の場合は向かって左方向に大きく弧を描くカーブの軌道が見られる。一方、(c)の場合は打者の手元付近で右にわずかに変化する軌道を描いており、(b)(c)どちらのボールも(a)の標準的なストレートと比較すると明らかに異なる軌道を描いている。以上の結果から、発射されたボールは「カーブ」、「2-seam」と呼称される変化球であると結論づけた。



(a) Straight

(b) Curve

(c) 2-seam

図11 観察された変化球の軌道

6. おわりに

本記事では、著者らが過去に実施した、エアタービンを用いた空圧式ボール発射装置の研究事例についてご紹介させていただいた。なお、本研究の遂行に際しては、共和技研株式会社様（福岡県大野城市）より実験装置をご貸与いただき、同社技術顧問の溝田武人氏（福岡工業大学名誉教授）にご助言いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 西田一矢, 瀬戸壮太, 加藤友規, 溝田武人, 田中完二, 吉田和夫: 空気圧式による硬式野球ボール発射装置の高機能化, 平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.68-70 (2016)
- 2) 西田一矢, 加藤友規, 後藤大樹, 三村政司, 溝田武人: エアタービンを用いた空気圧式ボール発射装置の高機能化, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.50-52 (2016)
- 3) 加藤友規, 西田一矢, 後藤大樹, 三村政司: エアタービンを用いた空気圧式ボール発射装置の高機能化と性能試験, 設計工学, 第53巻第7号, pp.527-540 (2018)

(原稿受付: 2021年3月5日)

トピックス

学生さんへ，先輩が語る —機器メーカーで働く魅力について—

著者紹介



か しゅう けん たろう
賀集 顕太郎

東京計器株式会社
〒327-0816 栃木県佐野市栄町1-1

2006年東京電機大学工学研究科（旧）精密システム工学専攻修士課程卒業，同年東京計器株式会社（旧トキメック）に入社，油圧制御システムカンパニーにて油圧ポンプを主とする設計開発業務に従事。

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は幼少の頃からモノの動く仕組みに興味を持ち，工作好きであったことから，「ものづくり」を追求するため工学科へ進学した．大学では機器システムの基礎となる制御工学や電子工学などを学び，展示会をきっかけに東京計器株式会社（旧社名：トキメック）を知り入社した．入社当時より油圧ポンプの設計・開発に携わり，現在は油圧ポンプを用いた制御システムの開発も手がけている．

1.2 企業紹介

弊社は日本初の計器工場として創業し，2021年で125年を迎える精密機器メーカーである．私が所属する油圧制御システムの他，船舶・港湾機器，計測機器，検査機器，通信機器など幅広い製品を提供し，「計測・認識・制御」といった人間の感覚の働きを最先端の技術でカタチにすることを通じ，人々が安



図1 東京計器本社（東京都蒲田）

全で快適に暮らせる社会環境づくりに貢献している．

1.3 職場紹介

弊社の油圧製品は栃木県佐野市の工場を拠点とし，油圧ポンプ，油圧バルブ，油圧モータ，マニホールドブロックなどを生産している．設計・開発部署も同工場に併設している．弊社の油圧製品は，射出成型機，工作機械，建設機械，ダムゲートなどの駆動・制御装置としてご採用いただいております，電子機器と組み合わせた制御性の高い油圧機器の開発と省エネ，環境に配慮した油圧システム開発に力を注いでいる．



図2 油圧制御システムカンパニー（栃木県）

2. 学生時代を振り返って

2.1 学生時代の研究内容紹介

学生時代は電界共役流体（ECF）を用いたポンプの開発とリニアアクチュエータへの応用¹⁾について研究を行い，新構造のポンプの開発と評価，それを駆動源とするリニアアクチュエータの提案を行った．なお電界共役流体（ECF）とは電界により流動を生じる機能性流体の一種であり，広義にはEHD現象を示す流体と考えられている．

電界共役流体に浸された電極間に直流の高電圧を印加すると電極間で強い流れを発生する特性を利用し，小型でシンプルな構造のポンプに応用を試みた．電界の強さで流量が変化することから，電極の形状と流量の関係性について研究し，当初コイル形状で

あった電極構造は、より安定した電界強度と流量を得るため、プリント基板技術を参考に平面基板に電極をプリントする手法に変化した。さらにその基板を乾電池のように並列または直列に配列し、リニアアクチュエータを駆動する流体力を作り出すため試行錯誤をくりかえした。

結果的にアクチュエータを制御するまでにはいかなかったが、本研究を通じてポンプの評価手法や試験装置の構成や設計などを学んだ。ここで得た知識と経験は入社後もたいへん役に立った。

2.2 学生時代に学んでほしいこと

学生諸子には日々の勉学に加え、大学生活の中で熱中できることを見つけ、探究心を持って追及することを学んで欲しい。その中で経験・習得した知識は社会人になってからも多方面で必ず生きてくる。

ここで私個人の印象に残る体験を2つ記載する。

1つは天文部在籍中の出来事である。幼少から宇宙に憧れがあり入学と同時に入部したが、天体観測などを行ううちに興味は天体望遠鏡の構造へ移り、望遠鏡光学に熱中した。そんな時、使用されずにいた望遠鏡を部室で見つけコツコツと修理を行った。ぶじに修理が完了し、目の前に拡大された惑星が見られた時の感動は今でも忘れない。この経験から精密機器の各部品が持つ機能と重要性について学んだ。

2つ目は鳥人間同好会への参加である。当時毎年開催されていた鳥人間コンテストの滑空部門出場を目指し、同好会へ1年限定で参加した。主な業務は設計者が描いた機体の構想図をもとに主翼と尾翼、コックピットの位置とパイロットの理想体重を割出すことであった。設計者や監修のため招いた講師とともに意見を重ね、簡易的であったが主翼と尾翼のサイズを入力すると、自動で主翼など各主要部品の位置、パイロットの理想体重、機体が振り子運動する際の固有振動数を算出するソフトウェアを完成させた。結果、出場は果たせなかったが、各設計担当とコミュニケーションを重ね1つの目標へ向かって皆で業務を遂行できたことは貴重な経験であった。

2.3 就職活動の留意事項

コロナ禍の影響により就職活動や会社説明会などの形態も様変わりしたが、興味を持った企業の情報を細かく確認し、足を運べる機会を積極的に見つけ、少しでもイメージや雰囲気をつかんで欲しい。

説明会は無難なこと、見本市や展示会を訪問し製品に触れながら社員に質問し情報収集するのも良い。

学生時代に得た知識、経験などを一度整理し、自分に適した仕事とは何か、選択した企業は理想とする環境が整っているか、結論を急がず時には友人や先輩などに相談しながら就職先を決めてほしい。

3. 社会人の仕事紹介とやりがい

3.1 仕事紹介

私は入社してすぐに油圧ポンプの設計・開発部へ配属され、約1年間は油圧概論やポンプの基礎を学ぶため、評価試験の手伝いやデータの分析作業を繰り返した。その後、製図や解析などの業務を覚え、油圧製品の設計の基礎を学んだ。入社するまで油圧の知識や経験は全くなかったが、学生時代につかった計測器、流体力学や制御工学の知識などに助けられ、何とか業務をこなすことができた。また、経験豊富な先輩方から都度アドバイスや参考資料による解説をおこなっていただいたことが励みになった。

弊社の設計・開発は、担当者が営業部や生産部などと密に情報を共有し、市場調査から製品の設計、各部品のFEM解析やシミュレーション、試作品の評価、改良、さらには量産立上げ、販売、メンテナンスなどすべての工程に関わりを持つ。よって自身の設計した製品が商品として世の中に販売され、お客様の手元に届くまでのプロセスを常に直近で感じることができる。

私はこれまでに、小型の油圧ユニット用のポンプ開発、電気制御式ポンプの改良、海外OEM生産用ポンプの設計・開発・量産立上げなどを担当してきた。販売にいたったもの、試作品で中断したものなどさまざまな経験をしたが、すべての業務につぎの製品開発や既存製品の改善を行うヒントがあり、それを発見することが設計・開発の魅力であると感じている。

近年は、油圧ポンプ単品だけでなく、弊社の強みである「制御」を生かし、サーボモータで油圧ポンプを制御するシステムを提供し、省エネ化による環境にやさしい製品を手がけている。

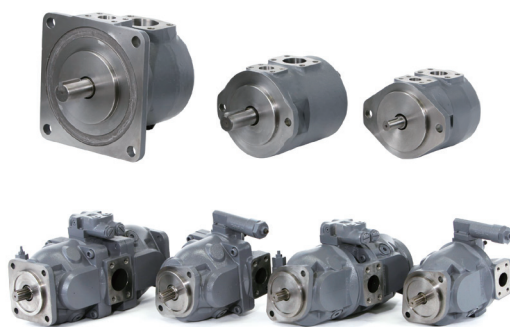


図3 弊社の油圧ポンプ

3.2 業務遂行で心がけていること

業務を円滑に効率よく進めるには、社内外のさまざまな部署の方々と連携し課題を解決することが求められる。その際、私が心掛けていることを3つ紹

介する。

3.2.1 「人の意見を真摯に受止め最後まで聴くこと」

自身が関わった製品や開発などは業務への思い入れが強くなる傾向にあり、周囲のアドバイスをおろそかにしがちである。他者から提案される視点の異なる意見は貴重である。製品を改善する機会であり、課題解決のヒントが隠されている。また、常に新しい技術や市場のトレンドを収集できる利点もある。

3.2.2 「常に相手の立場になって考えること」

これは企業（組織）の一員として働く上で大切なコミュニケーションツールである。社外のお客様へ製品の説明をする、社内で開発品の紹介を行う、さまざまな場面でいかに自分の主張を伝え、相手が快く納得していただけるかで、その後の業務の進行、企業のイメージが決まる。現在でも、相手が私の意図した内容と異なる解釈・理解をすることはあり、コミュニケーションの難しさを日々感じている。

3.2.3 「視野を常に広く持つ意識を心掛けること」

技術や研究に没頭すると、視野が狭くなることがよくある。開発は前例のない構造や機構を創作することであり、毎回さまざまな課題に直面する。私の経験上、困難な課題に直面すると、類似の製品を参考にしたり、課題の発生した部品に集中するため、意識せずに原因や要因を特定分野に絞ってしまう。結果的に真の原因がわからず、思うような結果も得られないためさらに悩む。そんな時は初期段階、つまり広い視点に戻してから改めて課題の原因をとらえる意識をしている。課題が見つかった部品から周囲の部品、さらに計測装置や試験方法まで再検証するのである。遠回りのように思えるが意外と落とし穴が随所に隠れていたりする。

3.3 機器メーカーで働くことの魅力

日常生活ではなじみがないが、プラモデルなど油圧装置を用いて製作された商品、重機など油圧製品で構成されたマシンは意外と多く存在している。

弊社は、前述のとおりそのような装置に使用されるポンプやバルブなどの油圧製品を生産している。いずれも動力源として、また制御装置として欠かすことのできない製品である。油圧装置が正確に目的の動作を果たせるかは、お客様によるところもあるが、機器メーカーが提供する商品の性能が決め手となる。

いかにしてお客様の満足する製品を提案できるか、目的の達成に貢献できるかを考えることが機器メーカーで働くことの魅力であると考えている。

3.4 ライフワークバランスのとり方

仕事は、常に決められた計画内で業務を遂行し、さまざまな方々とコミュニケーションを取り、時には突発的な業務で臨機応変な対応が求められる。

さらに、評価試験や工場内外の技術支援で動き回るため体力も必要とされる。

そんな環境だからこそ、オンとオフの上手な切り替えが重要となる。皆さんには長く続けられる趣味をひとつ以上持つことをお勧めする。

私は、夏は山登り、冬はスキーを趣味としている。山の景色で視点を切り替え、程よい運動で気分転換を図っている。また、近年はコロナ禍で思うように外出ができないため、実家で大切に保管されていたレコードプレーヤを引取り、新たな趣味としている。



図4 スキー場で気分転換

4. ま と め

4.1 学生さんへのメッセージ

昨年より流行したコロナウィルスの影響により、生活様式は変革期を向かえ、渦中にある学生諸子は行動制限や急速なリモート化などにより、思うような学生生活が過ごせずに苦勞をしているかもしれない。しかし、そのような環境下であっても熱中できることや、興味を持ったものには大学で得た知識を活かし、目標を持って突き詰めて欲しい。さまざまな知識と経験を吸収し、学生時代に可能な限り広い知識と視野を手に入れることが重要と考えている。

社会人として働くことは、周囲環境、さまざまな企業や人々に貢献する楽しさと重い責任をともなうことになる。その中で自分に何が出来るか、自分に適した業務とは何か、自身で答えを探すことになるが、ヒントは学生時代に得た知識と経験に隠されていると私は感じている。だからこそ挑戦することを学生時代により多く経験して欲しい。

参考文献

- 1) 賀集頭太郎, 中田毅, 藤田壽憲: ECFポンプの開発とそのアクチュエータへの応用, 日本機械学会東北支部第41期秋期講演会, 講演論文集 (2005.9.9)

(原稿受付: 2021年4月14日)

トピックス

笑顔で活躍—お仕事フルードパワー便— —理系進路選択の動機と学生生活を振り返って—

著者紹介



たか はし かな み
高橋 奏美

東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術
環境学修士課程生産技術研究所 林研究室
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
生産技術研究所 Dw-302号室

2019年3月大阪大学工学部地球総合工学科船舶
海洋工学科目卒業。2021年3月東京大学大学院新
領域創成科学研究科海洋技術環境学修士課程修
了。2021年4月から湖北工業株式会社に勤務。

1. はじめに

理工系分野に進んだ動機や、学生生活、会社選びについて私の経験を教えてほしいとの依頼を受けたとき、正直私なんか語れることはない、私がリケジョ代表のようなことをするなんて畏れ多い、恥ずかしいと思った。私は自分に自信が持てない。こんな自分が嫌いだ、変わりたいと思う反面、どこかでこんな自分をわかってほしいとも思っている。我ながら乙女心は複雑だ。しかし何もしないで変わることわかってもらうこともできない。それに、自分の考えを書くことで誰かの役に立つ可能性もゼロではないと思い、執筆を始めた。とにかく、女性代表ではなく、この前まで女子学生だった、あるひとりの人間の記事だと思って読んでいただきたい。

まず、自己紹介をする。私は誕生してから高校を卒業するまで滋賀県で育った。県立高校を卒業後、初めて地元を離れ、大阪大学工学部地球総合工学科へ進学し、船舶海洋工学科目を卒業した。さらに東京大学大学院新領域創成科学研究科へ進学した。学部時代は船舶海洋工学を学び、海洋系の専門分野に興味があったため、修士課程は海洋技術環境学を専攻した。学部4年生の時は、自動操船に関する研究を行い、修士課程では波力発電に関する研究を行った。この3月に東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学の修士課程を修了し、4月から地元にある製造業の会社に勤務している。

2. 理系進学動機と学生生活

2.1 高校1年生の文理選択

私が通っていた県立高校の普通科では、1年生の終わりに文理選択をすることになっている。私は迷わず理系を選択した。社会的に理系の人材が多く求められていること、理数系科目に苦手意識を持っていなかったことが主な理由だったように思う。周りには好きか嫌いかを一番に考えて選んでいた人もいた。確かに私も物理や化学には関心があった。中学生の時の理科は何かの現象を教えてもらい暗記する科目だが、高校に入ってから習った物理基礎や生物では、なぜその現象が起こるのかそれなりに納得のいく説明が追加されたことがとてもおもしろかったからだ。しかし、好き嫌いをいえば、私は古文や日本史も好きだった。だから生まれ変わったら今度は文系選択をしたバージョンの人生を送ってみたいとも思っている。

2.2 その後の進路

かくして、私は理系に進み、2年生からの授業選択は物理と化学と日本史（わが校の理系選択者の多くは地理を選ぶ）にした。2年生からは理系の少数派（生物選択生と日本史選択生）を集めたクラスに入れられた。そこで私は物理の授業を8人という少なさで受けることになった。少人数のおかげで授業に集中でき、私は物理にのめりこんだ。今振り返ると、物理が一番得意で、これからも物理を勉強したいと思ったことが大学進学先を決めるきっかけとなったのだと思われる。ざっくりと物理が学べるところへ行こうと決めたが、大学受験は選択肢が非常に多くて悩んだ。大学、学部、学科まで選んで受験しなければならないのである。さまざまな条件で選択肢を絞り、最終的には好きか嫌いかで決めた。結果、船舶海洋工学の道へ進み、存分に物理学を学べた。

日本では、文理選択は就職先に大きな違いをもたらすが、理系に進んだからといって（医療系は別として）、必ずしも進学先の専門分野が職業になるわけではないようだ。だから大学での研究や学問は興味の赴くままに選べばよいと私は考えている。

興味の赴くままに東大大学院新領域へも進んだ。ここでは学際的な教育が進められていた。

2.3 学際的とは

専門分野によって研究手法は確立されているが、学際的な学問はどの学問分野にも属さない。既存の学問分野にはない学問領域や、複数の学問領域の手法を組み合わせることを学際的という。

このように「学際的」は説明されることが多いが、概念的でわかりにくい言葉だと思う。そこで、私が履修した学際教育の一例をあげる。

マイクロプラスチックをテーマにして、6人のグループで議論し、グループごとに発表を行った。そもそもマイクロプラスチックが何から始まり、それが生物や環境に影響するか既存の研究を調べた。そして、何が世の中で問題になっているか、これから何が問題になる可能性があるか、それらはどこが問題かを突き詰め、法律や市井の人の感覚、技術的な問題も含めて対策案を他の学生と議論した。さまざまなバックグラウンドの教員や学生と学問分野にこだわらず、多角的な視点で課題に取り組んだ。すると、狭い視野では見えなかったものが見えてきて、すべての問題を解決する唯一の方法はないということを感じた。私がこれが良いと思う意見を言っても、他の人から問題点を指摘され、まったく違う案が出てくるというような繰り返しで、なかなかひとつの方向性にはならず、議論が長引いたのである。

これは、学際教育の悪い面というわけではなく、それだけ問題が複雑だということだ。むしろこのような広い範囲の人間や他の生物、環境に関わる複雑なテーマには、さまざまな人が協力して学際的に取り組む必要がある。

大学院は履修科目の自由度が高く、理系・文系に関わらず、学生が集まってグループ課題をする機会があり、学際的な教育が行える雰囲気があったように思う。

2.4 学生生活を振り返る

学部時代は毎日微分・積分をしていたような気がする。課題も多く試験も難しかった。それでも頑張って単位を落とすことなく、他の学生たちと肩を並べて卒業した。

工学部のイメージとたがわず男子が多い学科だった。私は男女比など気にしないが、周りの人から男ばかりのところはいかがかと聞かれることが多かった。それも多数派である工学部男子からもよく聞かれた。私は男女比など気にしていないと返事していたが、今から思うと私が女性だから気をつけて聞いてくれたのかもしれない。その時は男の人の方が男女比を気にするなど呑気に考えていたものだ。

たしかに、少数派の女子学生である私は、周りの人たちから女性だから気をつかおうという扱いを受けるうちに、引け目を感じているところがあったのかもしれない。積極的に前に出たり、自己主張したりす

ることが難しく感じることもあった。しかしそのような生活の中でも女は私ひとりではない。もちろん女子の学友もいる。インターンシップなどでは、ばりばり働くたくさんの女性に出会えた。特に、男社会に進出していった大先輩たちには強い尊敬の念を抱いた。私もそんなふうになりたいと感じた。まず、自分が女性だからといって一歩下がるのはもうやめよう。なにしろ他の学生と肩を並べて卒業できたのだから。振り返ればそう決心させてくれる学生時代だった。

3. 選ぶときは

大学生をやっているとたまに進路に迷える高校生に相談されることがある。その子がどのように選択するのかを知らなければ私がかうかつなことをいえないといつも思う。というのもどれかを選択しなければならぬとき、そのやり方は人それぞれだからだ。

私の場合は、なるべくたくさんの選択肢を見て、消去法で選択肢を減らしていき、限界まで絞ったらあとは自分の感情に従ってひとつに選ぶ。だから私が悩める高校生の側なら、自分の知らなかった選択肢か、選択肢を減らしていくための情報が欲しくて相談すると思う。だが、他の人が同じとは限らない。初めから感情を優先する人もいれば、揺るぎないひとつの目標を持っていて、でも自信がないから誰かに背中を押してもらいたいという人もいる。誰かに決めてもらうのを待つばかりの人もいる。

質問にはなるべく中立の立場で答えたいと思うが、どうしてもよいか決められないと相談する人には、私が自分に課したルールを話したことがある。そのルールは、あの時違う選択をしていればと後悔することは絶対にしないことである。違う選択肢を選択した自分を空想しても、それはもはや私とは違う人生であり、他人の人生を羨むようなことは意味がないことだ。「違う選択をしていれば」を意識的に考えないようにし、現在を精一杯生きること集中する。私はそうやって生きてきたと伝えた。自分はどうしたいのか、自分にとって何が必要なのか自分で考えて何か答えが見つければ良いと思った。

4. おわりに

なにぶん私はまだ大学を卒業したところで、活躍する前の宙ぶらりんな身分で、こんな活躍をしていると報告できることは何ひとつない。それでも最後まで読んでいただきありがたい限りだ。

私はこれからも自分の信念を貫いて、仕事の現場でもがんばるつもりだ。女性が社会的弱者だと自覚するような世の中はどんどん変えていって、自分も含め皆が明るく活躍できる世の中にしていきたい。

(原稿受付：2021年3月31日)

研究室紹介

長岡技術科学大学 レスキュー工学研究室

著者紹介



きむら てつや
木村 哲也

長岡技術科学大学大学院システム安全工学専攻
〒940-2188 新潟県長岡市上富岡1603-1
E-mail : kimura@mech.nagaokaut.ac.jp

1995年東京工業大学博士後期課程単位認定退学、神戸大助手、大阪府立大学助手を経て2001年より長岡技術科学大学准教授。サービスロボット、安全規格の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員、博士（工学）。

1. はじめに

本研究室は2001年に設立され、空気圧系へのロボット制御応用が研究の中心であった¹⁾。その後、2006年に技術経営研究科システム安全専攻に転属となり、国際安全規格にもとづくサービスロボットの安全設計と人材育成が活動の中心となり、次第にフルードパワーから離れることとなった。2011年の東日本大震災以降は、災害対応技術開発を支援する社会制度設計に、標準化・安全規格化の観点から取り組み²⁾、その成果から2020年に著者は防災功労者内閣総理大臣表彰を受賞した。現在は、レスキューロボットの効果的社会実装を目指し、標準化によるイノベーション推進に関する研究を技術経営的・制御工学的観点から行っている。

2. 国際安全規格と人材育成

著者の所属するシステム安全工学専攻は、ISO、IECなどの国際安全規格を体系的に教授する世界でも類を見ない大学院である。現在の日本の安全規格に関する教育は、企業を中心とした現場重視の職業教育が主である。そこでの対象は既存の生産設備などであり、経験的安全対策でも一定の効果が期待される。一方、サービスロボットなどのイノベティブな分野では経験則による安全対策が困難であり、国際安全規格にもとづく論理的系統的な取り組みが重要となる。システム安全工学専攻ではイノベーションの社会実装に必要な各種安全規格・法制度・工学的／経営学的手法を多面的に教育している。本研究室では、特にリスクアセスメントの効果的実施

方法³⁾とリスク低減方策の妥当性確認⁴⁾を中心に研究を進めている。

3. 災害対応技術の社会実装

災害対応技術は売り上げなどの単純な経済指標でその価値を判断することが困難であり、市場原理によるイノベーション推進が困難である。本研究室では標準性能試験法を適用することで、災害対応ロボット・ドローンの社会実装支援の研究に取り組んでいる⁵⁾。また、地元企業団体と連携してロボット競技会に参加するレスキューロボットを作成し、その開発・運営上の課題を実験的に検討している（図1）。

今後は、これまでの知見をフルードパワー分野にも展開することを考えている。



図1 本研究室で開発中の災害対応ロボット競技会用ロボット

参考文献

- 1) 木村, 小林, “制御理論の空気圧システムへの応用,” フルードパワーシステム, Vol. 31, No. 3, p. 83-88, (2000)
- 2) 木村, “想定外を想定する災害対応ロボット開発と標準化,” 日本機械学会ロボメカ部門講演会, 1A1-V03 (1-2), (2015)
- 3) 櫻井, 五十嵐, 蓮実, 木村, “遠隔操縦型災害対応ロボットのリスク分析を支援するフレームワークに関する一考察—探索用小型UGVの転倒リスクによるケーススタディー,” SICE SI講演会, p. 655-660, (2016)
- 4) T. Miyoshi and T. Kimura, “A reference model in safety design of a modular service robot based on MBSE: A case study of a stocking robot in a supermarket”, in Proc. of IEEE ISR, p. 399-402, (2021)
- 5) 木村, “ロボットの性能評価 標準性能試験法,” 金属, Vol. 89, No. 7, p. 596-599, 2019

(原稿受付：2021年3月12日)

企画行事

2020年度オートムセミナー開催報告 「自動車におけるフルードパワー技術」

著者紹介



かめ だ ゆき のり
亀田 幸則

KYB株式会社
〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1-12-1
E-mail: kameda-yuk@kyb.co.jp

2005年東京電機大学大学院工学研究科修士課程修了。同年カヤバ工業株式会社（現・KYB株式会社）入社。電動アクチュエータおよびセンサの開発に従事。日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

2020年度オートムセミナー「自動車におけるフルードパワー技術」が、2020年11月20日（金）に機械振興会館およびオンライン併設にて開催された。本稿では、本セミナーの開催の様子および当日行われた講演内容の概要について報告する。

2. セミナーの概要

電動化が進む自動車分野においてフルードパワーは現在でも重要な基盤技術であり、各種研究や製品開発が進められている。本セミナーでは、自動車分野におけるフルードパワー技術に関する最新の研究開発事例について、4件のテーマを選定して1件あたり45分間で講演が行われた。

本セミナーは、会場参加が9名、オンライン参加が20名、講師4名の参加で開催された（写真1）。



写真1 セミナー会場の様子

また、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、会場とオンラインの併設による開催とした。

3. 講演内容

3.1 車載用ベーンポンプの性能予測技術

KYB株式会社の鈴木一成氏より、「車載用ベーンポンプの性能予測技術」と題する講演をいただいた。

車両性能向上にともないCVT用ベーンポンプは高効率、低騒音の両立が求められており、この両立を実現するための流体解析や内圧解析をはじめとする性能予測技術について、事例を交えて紹介いただいた。

流体解析については、従来搭載されていた流量制御弁廃止による吐出流量低下の現象に対して、流体解析と実験値で差がある。この差の要因として、①ポンプ内部における隙間漏れ、②油に含まれる気泡、③ポンプ内部において発生するキャビテーションが影響すると考えられる。これらの要因に対して、ポンプ内部の隙間の考慮、キャビテーション現象を単純化したモデルと作動油性状の実験値を用いることで、精度の高い流量予測が可能となったことを紹介いただいた。事例として、カムリングの形状違いとエア混入有無による流体解析結果と実験値との比較を紹介いただき、精度良く予測可能であることが示された。

ポンプ内部の圧力を予測し性能向上につなげるための内圧解析について紹介いただいた。低騒音化のためには、圧力遷移区間のポンプ室圧力変化を緩やかにする必要がある。このため、カム半径とポンプ室のノッチへの開口面積の設計が重要であることを紹介いただいた。内圧昇圧不良の適正化例やポンプ室内圧とじ込み圧の適正化例などを紹介いただき、いずれの事例においても騒音低減を実現したことが示された。

3.2 自動車のトランスミッション用電動オイルポンプの技術動向～アイドルストップ用電動ポンプ～

株式会社ジェイテクトの酒井直行氏より、「自動車のトランスミッション用電動オイルポンプの技術動向～アイドルストップ用電動ポンプ～」と題する講演をいただいた。

今回のテーマであるアイドルストップ用電動オイルポンプの役割として、CVTと電動オイルポンプを用いたアイドルストップシステムを例に紹介いただいた。アイドルストップシステムにより車両燃費が約5%向上すること、電動オイルポンプによるスタンバイ油圧で、アイドルストップからの発進時に発進ショックがなくなりスムーズな発進が可能となることが示された。

後半では、アイドルストップ用の電動オイルポンプの開発事例について紹介いただいた。小型、省エネ、低コストを実現すべく技術開発を行い、旧量産品に対して、30%小型化、最大47%省エネ化、60%低コスト化を実現したことが示された。技術開発の事例として、小型化を実現するための電動モータの扁平化、省エネ化を実現するための電動モータのトルク、回転数、油温から吐出油圧を推定し、必要以上の油圧を抑える過出力抑制制御の実装、低コスト化を実現するための電動モータの磁石固定保持器の採用などを紹介いただいた。電動オイルポンプの静音化技術として、振動モード解析による剛性最適化を行い、高周波音圧が2dB低下した事例を紹介いただいた。また、ポンプ歯型最適化による静音化事例についても紹介いただいた。

電動オイルポンプは今後拡大が見込まれ、その動向として、冷却効率のさらなる向上の高まり、電動モータやインバータの冷却ニーズから、高出力、高流量の電動オイルポンプが必要となることが示された。

3.3 回生協調ブレーキ技術

東京電機大学の川口裕氏より、「回生協調ブレーキ技術」と題する講演をいただいた。

自動車のブレーキとして、機械連結式摩擦ブレーキ、回生協調ブレーキについて、システム構成と作動原理、実例を交えて紹介いただいた。

機械連結式摩擦ブレーキに関して、油圧制御バルブ方式によるタイヤ接地面摩擦限界制動時操縦性安定性制御および電磁油圧制御バルブ方式によるタイヤ接地面摩擦限界加速時・操舵時操縦性安定制御の構成と動作原理について紹介いただいた。

回生協調ブレーキに関して、回生ブレーキにより車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し蓄電池に蓄え、車の駆動力用パワー源として回生・再利用できること、制動時に摩擦ブレーキと回生ブレーキを協調制御することで、熱放散や摩耗粉放出を抑制しながら制動力を確保可能であることが示された。

回生協調ブレーキの課題として、ブレーキペダル操作のフィーリング、車両停止直前や回生と油圧ブレーキ切り替え時の制御性、フェイルセーフ機能の向上などが紹介された。また、今後の動向として、

システムおよび部品構成、制御方式の共通化、統合化の推進や、自動運転用自動ブレーキのパワー源2系統化などが紹介された。

3.4 MR流体ブレーキの開発とEVへの適用

東北大学の中野政身氏より、「MR流体ブレーキの開発とEVへの適用」と題する講演をいただいた。

自動車の運転支援および自動運転システムなどが実用化されつつあり、地球環境への配慮から自動車の全電動化の流れも加速している。これらへの対応と摩耗粉やブレーキ音の発生しない環境に考慮した車両用ブレーキとして、機械的摩擦に頼らないMR流体を用いた電動式のMR流体ブレーキに関して、設計の概要と基本性能、MR流体ブレーキを4輪に実装した超小型EVの紹介をいただいた。

MR流体のせん断流れモードを活用して、MR流体に磁場を印加することによって、制動力を発生させる原理をブレーキに応用することで、耐環境性、低騒音化、電動化、高速応答化、高制御性などの面で、MR流体ブレーキは従来のブレーキより優れるポテンシャルを有する。開発した車両用MR流体ブレーキは、車両側に固定された円盤2枚と、ハブベアリングと一緒に回転する円盤3枚が交互に配置された多層円盤間にMR流体を充填した構造となっている。多層円盤外周に円環状電磁コイルが配置され、電流を流すことで多層円盤間のMR流体に磁界が印加され、回転円盤にせん断力が働きブレーキとして作動する。従来の油圧駆動式ブレーキのような駆動構造が不要のため、比較的シンプルな構造であることが紹介された。

開発したMR流体ブレーキを超小型EVの4輪のホイール内に装着して、ブレーキシステムを構築し、ブレーキフィーリングの可変制御やABS制御の実証を行い、高速応答性や高い制御性を有する結果を紹介いただいた。

4. おわりに

今回、新型コロナウイルス感染拡大防止対策から、会場とオンラインの併設による開催となったが、多くの方にご参加いただいた。各講演後は多くの質問があり、自動車におけるフルードパワー技術への関心が高いと考える。今回のセミナーがフルードパワー技術活用の一助となれば幸いである。

最後に、ご多忙の中、講演を引受けていただいた講師の皆様、ならびに本セミナー開催にあたりご協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げ、セミナー開催の報告としたい。

(原稿受付：2021年5月17日)

企画行事

2020年秋季フルードパワーシステム講演会報告

著者紹介



たか いわ まさ ひろ
高 岩 昌 弘

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部
〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地
E-mail : takaiwa@tokushima-u.ac.jp

1992年岡山大学大学院修士課程修了。同年岡山大学機械工学科助手。2000年同システム工学科講師。2007年同自然科学研究科准教授。2015年徳島大学教授。空気圧サーボを中心とした人間親和型ロボットシステムに関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本ロボット学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員、博士（工学）。

1. はじめに

2020年12月8日（火）、9日（水）の両日、岡山理科大学50周年記念館（岡山市理大町）において、2020年秋季フルードパワーシステム講演会が開催された（図1）。コロナ禍の影響により、その年の春季講演会は中止となったが、本会は感染対策を徹底することで現地参加のオンサイトとオンラインのハイブリッド形態で開催した（図2、3）。本学会講演会としては初めての試みであり、当初運営に不安を感じていたが、74名（オンサイト38名、オンライン36名）のご参加をいただき、皆様のお陰で無事終了するにいたった。本稿では当該講演会の概要を述べる。

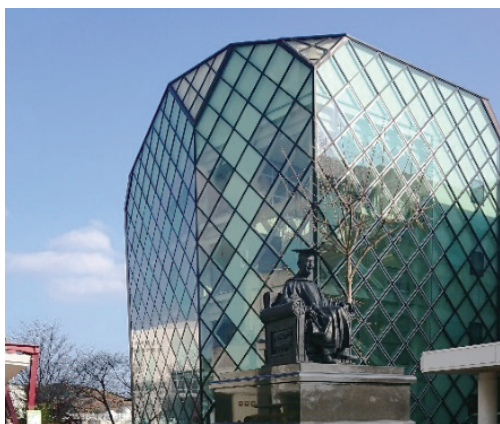


図1 岡山理科大学50周年記念館



図2 正門前にて



図3 講演会場の様子

2. 講演会スケジュール

セッションは、OS 2件、一般セッション5件で構成された。OSはフルードパワーシステムのハードとソフトに関する話題を広く募集するという主旨で、「OS 1：フルードパワーにおける要素技術の新展開」、「OS 2：フルードパワーにおける制御技術の新展開」とした。

講演件数は全体で32件であり、その内訳は、OS 1：8件、OS 2：4件、一般講演として空気圧9件、水圧・機能性流体4件、油圧7件であった。

3. オンラインとオンサイト混在の運営

今回は学会事務局所有のアカウントを用いたZoomを用いた遠隔講演とオンサイト講演を切り替える形で実施した。苦労した点は映像よりも音声であった。講演者の音声をオンライン参加者と講演会場の両方に伝達する必要があるが、ノイズやハウリングの対応が必要であった。この問題は講演会場の音響設備に依存するところが大きく、臨機応変に対応するしかないと思われる。

4. 感染対策の実施

感染対策としては受付時における検温の実施、講演室入口におけるアルコール消毒液の設置、質問者用マイクの除菌を行った。講演者はマスクとフェイスシールドの装着を義務付けた（図4）。また、本講演会日は平日であったため、岡山理科大学の学生と極力接触しないように、現地参加者は全員別室での昼食が用意された。このような大学側の配慮にも感謝したい。



図4 感染対策をした講演者

5. 特別講演

特別講演（図5, 6）は岡山理科大学特任教授・前副学長の堂田周治郎先生よりたまわった。ご退職となられる年に貴重なお話を聞く機会が得られ大変幸運であった。内容は「流体制御技術とともに48年」というタイトルの通り、堂田先生がこれまでご尽力されてきた教育と研究の内容を時系列的にまとめたものであった。



図5 特別講演会の様子



図6 感謝の花束贈呈

筆者は学生時代からお世話になっており改めて感謝申し上げるとともに本学会、ならびに流体制御分野への御貢献に敬服するしだいである。ご講演の最後に若い人へのメッセージが示され筆者はすかさず写真に収めた。示唆に富んだメッセージが詰め込まれているので、読者の皆様と共有したく以下に示す。

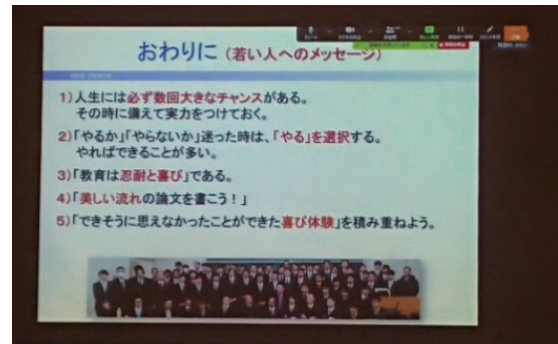


図7 堂田先生からのメッセージ

若い人へのメッセージ（図7）

- 1) 人生には必ず大きなチャンスがある。その時に備えて実力をつけておく。
- 2) 「やるか」「やらないか」迷った時は「やる」を選択する。やればできることが多い。
- 3) 「教育は忍耐と喜び」である。
- 4) 「美しい流れの論文を書こう！」
- 5) 「できそうになかったことができた喜び体験」を積み重ねよう。

6. おわりに

今回はコロナ禍の中オンサイトとオンラインのハイブリッド開催という異例の実施形態となり、参加者の皆様にはご不便をおかけしたが、学術的情報交換という講演会が有する本来の役割は最低限果たせたのではないと思う。

本稿執筆時まだ新型コロナウイルスの猛威は衰えを見せないが、同時にワクチン接種も徐々に始まっている。近い将来通常通りの講演会が開催され、懇親会で意見交換できる日を迎えたいと切に願うしだいである。

最後に、本講演会の開催にあたり、WGとしてご尽力いただいた芝浦工業大学 伊藤和寿先生、福岡工業大学 加藤友規先生、現地実行委員として奔走いただいた赤木徹也先生と小林亘先生、裏方に徹してくれた赤木研、小林研の学生諸氏、企画委員の皆様、ならびに事務局スタッフのご尽力にお礼申し上げます。

（原稿到着日：2021年5月17日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

5月24日	理事会
5月18日	企画委員会
6月1日	編集委員会
6月10日	情報システム委員会

〈理事会報告〉

2021年度第1回理事会

5月24日 書面審議

書面審議によるみなし決議（参加者23名）

- (1) 2020年度決算報告書および決算書類の承認
- (2) 総会の招集について

〈委員会報告〉

2020年度第6回企画委員会

5月18日 15:00～17:30

Web開催（参加者22名）

- (1) 2021年春季フルードパワーシステム講演会準備状況
- (2) 2021年度オータムセミナー準備状況
- (3) 2021年度ウィンターセミナー準備状況
- (4) 2022年春季講演会併設セミナーについて

- (5) その他

2021年度第1回編集委員会

6月1日 13:00～14:00

Web開催（参加者18名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.52 No.4「スポーツ分野における流体工学」
 - 2) Vol.52 No.E 1「電子出版号－緑陰特集号」
 - 3) Vol.52 No.5「フルードパワーシステムとIoT・スマートファクトリー（案）」
 - 4) Vol.52 No.6「AI技術とフルードパワー（案）」
 - 5) Vol.53 No.1「IFPEX2021（案）」
 - 6) Vol.53 No.2「JFPS国際シンポジウム函館2020」

- (2) その他

- 1) 会議報告
- 2) 今後の特集について

2021年度第1回情報システム委員会

6月10日 15:00～17:00

Web開催（参加者9名）

- (1) 学会HPの更新状況
- (2) 理事会報告
- (3) 会員管理システムの更新状況報告
- (4) 会議報告
- (5) 学会HPについて
- (6) その他

会 告

2020年度 学会賞表彰

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会2020年度の学会賞の受賞者が決まりました。

名誉員推挙

- ・ 上智大学 築地 徹浩 殿
- ・ 明治大学 小山 紀 殿

フェロー称号授与

- ・ 株式会社小松製作所 丸田 和弘 殿

学会賞表彰

学術論文賞

「製紐機を用いたインダクタンス型スマート人工筋の製作手法の確立」

- ・ 岡山大学 小川 草太 殿
- ・ 岡山大学 脇元 修一 殿
- ・ 岡山大学 神田 岳文 殿
- ・ 岡山大学 大村 健人 殿
- ・ 岡山大学 安藤 克倫 殿

技術開発賞

「鉄道車両用電動油圧式フルアクティブサスペンションシステムの開発」

- ・ KYB株式会社 青木 淳 殿
- ・ KYB株式会社 小川 貴之 殿
- ・ KYB株式会社 鈴木 努 殿

技術功労賞

- ・ 川崎重工業株式会社 肥田 一雄 殿

学術貢献賞

- ・ 明治大学 小山 紀 殿

SMC高田賞

「Development and Attitude Control of Washable Portable Rehabilitation Device for Wrist without Position Sensor」

- ・ 松江工業高等専門学校 下岡 綜 殿

公益財団法人 油空圧機器技術振興財団顕彰

「微粒子励振型流量制御弁におけるねじり振動を利用した駆動原理の有効性評価」

- ・ 関西大学 廣岡 大祐 殿
- ・ 関西大学大学院 東 一毅 殿
- ・ 関西大学 古城 直道 殿
- ・ 関西大学 山口 智実 殿

最優秀講演賞

2020年12月に開催された秋季フルードパワーシステム講演会において、特に優秀な講演発表をされた受賞者

- ・ 社会人部門 該当者なし
- ・ 学生部門 芝浦工業大学 鶴原 理司 殿
「適応モデルマッチングを用いた逆最適化による水道水圧駆動人工筋のモデル予測変位制御」
- ・ 学生部門 岡山理科大学 武内健史郎 殿
「伸長型柔軟空気圧アクチュエータを用いた正四面体型アクチュエータの試作」

会 告

2021年度（第40期）通常総会終了

1. 日 時 2021年6月25日（金）
14時00分～14時50分
2. 場 所 東京都港区芝公園3丁目5番地22号 機械振興
会館6階 6-67会議室およびオンラインによる開催

3. 議事の経過および結果

14:00 開会、事務局よりオンライン出席上の注意事項説明ののち、出席者数、オンラインによる出席者数、HPIによる書面審議承認者数および委任状の数を報告し、ついで眞田一志会長が定款第15条「総会の議長は、会長がこれにあたる」にもとづき議長となり、議事録署名人として、CKD株式会社 和田重伸殿、株式会社小松製作所 名倉忍殿を指名したのち議事に入る。

（報告事項）

- 報告1 2020年度事業報告（2020年度事業報告書）の件
報告2 2021年度事業計画（2021年度事業計画書）の件
報告3 2021年度収支予算（2021年度収支予算書）の件

報告1～3に対し、庶務委員会 田中委員長、会計委員会 村松委員長から説明および報告があった。

（議案）

第1号議案 2020年度決算（貸借対照表、正味財産増減計算書、財産目録（財務諸表に対する注記、附属明細書を含む）、監査報告の件

第1号議案に対し、会計委員会 村松委員長から説明および報告があり、賛成多数で可決承認された。

以上で総会を終了し、日本フルードパワーシステム学会賞などの受賞者の氏名が読み上げられ、後日、受賞者に表彰状、盾などが贈られることが伝えられた。

2021年度（第40期）通常総会は、昨年と同様に新型コロナウイルス感染防止のためオンラインにて開催された。開催時間短縮のため、学会賞表彰式、および受賞記念講演、技術懇談会などの行事を行うことができなかったが、多数のオンライン出席者を得て成功裡に終えることができた。

会 告

日本フルードパワーシステム学会論文集 52巻（2021）1号 発行のお知らせ （公開日：2021/4/10）

【研究論文】

- (1) マグナス力がおよぼす油圧L字型配管内ボール挙動への影響
梶原 伸治, 大森 勇輝
- (2) ポペット弁型圧力制御弁の内部流れ解析とヒステリシスの再現
増田 精鋭, 清水 文雄, 淵脇 正樹, 田中 和博
- (3) 流体抵抗と慣性を同時に満たす集中定数系モデルの導出と基本的流路形状における検証
肥後 寛, 清水 文雄, 田中 和博

(URL) https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfps/52/1/_contents/-char/ja

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

後援・協賛行事

第374回講習会「実務者のための騒音防止技術」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 関西支部
 開 催 日：2021年7月28日(水)～7月29日(木)
 会 場：オンライン開催
 U R L：https://www.kansai.jsme.or.jp/Seminar/kou374.html

連携講習会「つながる機械 ～機械と通信の融合～」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門
 開 催 日：2021年7月29日(木)
 会 場：オンライン開催
 U R L：https://www.jsme.or.jp/event/21-42/

2021年度 計算力学技術者(CAE技術者)資格認定事業

(固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者)

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学技術者資格認定事業委員会
 試験日程：2021年8月初旬 上級アナリスト認定試験一次試験(書類審査)
 2021年9月19日(日) 上級アナリスト認定試験二次試験(熱流体力学分野)
 2021年9月25日(土) 上級アナリスト認定試験二次試験(固体力学分野・振動分野)
 2021年12月9日(木) 1・2級認定試験(熱流体力学分野・振動分野)
 2021年12月10日(金) 2級認定試験(固体力学分野)
 2021年12月16日(木) 1級認定試験(各分野)
 会 場：下記HPを確認ください
 U R L：https://www.jsme.or.jp/cee/

日本混相流学会 混相流シンポジウム2021

主 催：日本混相流学会
 開 催 日：2021年8月22日(日)～8月24日(火)
 会 場：関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市山手町3-3-35)
 U R L：http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2021/

第39回日本ロボット学会学術講演会

主 催：一般社団法人 日本ロボット学会
 開 催 日：2021年9月8日(水)～9月11日(土)
 会 場：信州大学上田(繊維学部)キャンパス(長野県上田市常田3-15-1)
 U R L：https://ac.rsj-web.org/2021/

第26回フルードパワー国際見本市(IFPEX2021)

主 催：一般社団法人 日本フルードパワー工業会、産経新聞社
 開 催 日：2021年10月6日(水)～10月8日(金)
 会 場：東京ビッグサイト 南1,2ホール(東京都江東区有明3-11-1)
 U R L：https://www.ifpex.jp/

第64回自動制御連合講演会

主 催：システム制御情報学会、計測自動制御学会、日本機械学会、化学工学会、精密工学会、電気学会、日本航空宇宙学会
 開 催 日：2021年11月13日(土)～11月14日(日)
 会 場：オンライン開催
 U R L：https://rengo64.iscie.or.jp/

エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム2021

主 催：エコデザイン学会連合(幹事団体：特定非営利活動法人 エコデザイン推進機構)

開 催 日：2021年12月1日(水)～12月3日(金)

会 場：奈良県コンベンションセンター(奈良県奈良市三条大路1-691-1)

U R L：<http://www.ecodenet.com/ed2021/index.html>**キャビテーションに関するシンポジウム(第20回)**

主 催：日本学術会議 第三部

第20回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会

開 催 日：2021年12月9日(木)～10日(金)

会 場：オンライン開催

U R L：<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/cfs/cav20/index.html>**第22回SICEシステムインテグレーション部門講演会**

主 催：公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門

開 催 日：2021年12月15日(水)～12月17日(金)

会 場：オンライン開催

U R L：<https://www.sice-si.org/conf/si2021/>

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。
各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会員数 (6月10日現在)	860	10	95	126
差引き増減	+ 4	± 0	+ 19	+ 1

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員53名・ジュニア員98名・その他正会員695名

〈新入会員〉

賛助会員

株式会社ウェーブフロント

正会員

小川 草太

谷口 幹直 (株式会社SUBARU)

篠原 隆 (岡山理科大学)

堀米 優斗 (SMC株式会社)

青柳 啓太 (SMC株式会社)

白藤 拓 (SMC株式会社)

青木 淳 (KYB株式会社)

三澤 伽維 (株式会社SUBARU)

丸井 裕太 (SMC株式会社)

荒木 翼 (SMC株式会社)

黒崎 裕太 (SMC株式会社)

山内 大 (パナソニック株式会社)

学生会員

樽谷 啓介 (豊橋技術科学大学)

寺島 遼 (豊橋技術科学大学)

長谷 建汰 (岡山理科大学)

外川 貴規 (法政大学)

島崎 亮太 (東京電機大学)

高嶋 啓太 (東京電機大学)

河野 聖夜 (東京電機大学)

田村祥太郎 (東京電機大学)

手代木 暁 (東京電機大学)

中西 優真 (奈良工業高等専門学校)

藤井 秀峰 (豊橋技術科学大学)

甲斐 友朗 (立命館大学)

佐藤 悠太 (法政大学)

飯島 康文 (東京電機大学)

須藤 優 (東京電機大学)

水戸部海晴 (東京電機大学)

鈴木 宝彦 (東京電機大学)

伊藤 永通 (東京電機大学)

宮本 拓実 (東京電機大学)

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーシステムとIoT・スマートファクトリー」—

【巻頭言】「フルードパワーシステムとIoT・スマートファクトリー」発行にあたって

吉満 俊拓

【解説】

モノづくり現場における時代の変化と油圧機器のあり方～省エネからIoTへ～

河田 健一

設備と共に人が成長する工場を目指すジェイテクトのスマートファクトリーの取り組み

都築 俊行

K-COMMIT カワサキロボット安心ライフサイクルサポート

合田 一喜, 村上 英範

日立建機が推進するICT・IoTソリューション「Solution Linkage」シリーズ

田中 一博

スマートファクトリーへのタクトタイムコントローラの活用

高橋 義広

【会議報告】

The 10th International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2021) におけるフルードパワー関連技術の研究動向

吉田 和弘

【トピックス】

Youは日本をどう思う？

V・Dヒエップ

米国サンディエゴ駐在員日記

竹村研治郎

【研究室紹介】

関西大学 生産加工システム研究室

廣岡 大祐

【研究室紹介】

2020年度ウィンターセミナー開催報告

坂間 清子

2021年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)

副委員長 山 田 宏 尚 (岐阜大学)

委員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)

飯 田 武 郎 (株小松製作所)

伊 藤 雅 則 (東京海洋大学)

猪 飼 暢 崇 (CKD(株))

加 藤 友 規 (福岡工業大学)

窪 田 友 夫 (KYB(株))

栗 林 直 樹 (川崎重工(株))

五 嶋 裕 之 (株工苑)

齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)

佐々木 大 輔 (香川大学)

佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)

妹 尾 満 (SMC(株))

委員 谷 口 浩 成 (大阪工業大学)

寺 澤 達 士 (油研工業(株))

中 野 政 身 (東北大学)

中 山 晃 (日立建機(株))

藤 田 壽 憲 (東京電機大学)

丸 田 和 弘 (株小松製作所)

村 岡 裕 之 (株コガネイ)

山 田 真の介 (株TAIYO)

吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)

担当理事 伊 藤 和 巳 (KYBエンジニアリングアンドサービス(株))

学会事務局 成 田 晋

編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷(株))

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし(公社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって、社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接本会へご連絡ください。

個人會員各位

2021年7月15日

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

2021年度会費納入のお願い

拝啓 時下益々ご清祥のこととお慶び申しあげます。

さて、2021年度（2021年4月1日～至2022年3月31日）の会費を、下記の通りご納入賜わりたくお願い申し上げます。なお、すでにご納入くださいました場合は、なにとぞご容赦ください。

敬 具

記

2021年度	正 会 員 会 費	8,000円
	(40歳未満で入会された方は, 入会から 5年間にかけ4,000円となります.)	
	学 生 会 員 会 費	2,000円
	シニア員・名誉員会費	4,000円

お 願 い

- ・2020年度以前の会費を未納の方は、新年度分（2021年度）とあわせてお振り込みくださいますようお願い申し上げます。
- ・会員名を必ずご記入ください。
- ・便利な自動振り込みは手数料が不要です。ご希望によりお申し込み書をお送りいたしますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、よろしくお願い申し上げます。

以上

00		東京		払込取扱票												払込票兼受領証															
口座番号 (右詰めに記入ください)														金額		千		百		十		万		千		百		十		円	
001103133690														*																	
加入者名		一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会												料金				特殊取扱													
通信用欄		該当するものに○をつけ、お振込の内容をご記入ください。																													
		1. () 年度 () 会費																													
		企業名・[]																													
		2. () の代金																													
払込人住所氏名		(郵便番号)												*																	
		(電話番号 - -)																													
		裏面の注意事項をお読みください。(郵政事業庁)(私製承認東23957号)																													
口座番号		001103												右詰めに記入ください																	
		133690																													
加入者名		一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会																													
金額		千		百		十		万		千		百		十		円															
		*																													
払込人住所氏名		*																													
		(消費税込み)																													
料金		受付局日附印																													
		円																													
特殊取扱																															

各票の※印欄は、払込において記載してください。

記載事項を訂正した場合は、その箇所に訂正印を押してください。

切り取らないで郵便局にお出しください。

お振り込み先金融機関一覧

1. 郵便振替貯金 00110-3-133690

* 下の振替用紙をご利用いただけます。

(なお、この振替用紙は会費納入・資料購入・セミナー等受講料など総てにご利用いただけます。)

2. 三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

(注) * 口座名はいずれも「シャ) ニホンフルードパワーシステムガッカイ」です。

* 誠に恐れ入りますが、振り込み手数料はご負担くださいますようお願い申し上げます。

* 上記2をご利用の方で、会社名・大学名にてご送金の方は、個人名・内容・振込金融機関名を、FAXまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますよう、お願い申し上げます。

FAX : 03-3433-8442

E-mail : info@jfps.jp

この受領証は、郵便局で機械処理をした場合は郵便振替の払込みの証拠となるものですから大切に保存してください。

ご注意

この払込書は、機械で処理しますので、口座番号及び金額を記入する際は、枠内に丁寧に記入してください。

また、下部の欄(表面及び裏面)を汚したり、本票を折り曲げたりしないでください。

(日本郵政公社)

〒105
|
0011

東京都港区芝公園三丁目五―二―機械振興会館別館一〇二 電話 (〇三) 三四三三―八四四一 FAX (〇三) 三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三―二二三六九〇

東京都文京区白山一―三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社