

平成21年 5月30日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18680045  
 研究課題名 (和文) スポーツにおける非定常流体力の積極活用を目指した多目的空力最適化

研究課題名 (英文) Multi-optimization in Sports taking into account the unsteady aerodynamic forces

研究代表者 瀬尾 和哉 (SEO KAZUYA)  
 山形大学・地域教育文化学部・准教授  
 研究者番号：60292405

## 研究成果の概要：

本研究では、回転機構を備えたラグビーボールやテイクオフ局面の動作を模擬できるスキージャンプロボットを製作し、非定常流体力を測定することに成功した。測定した空気力に基づき、飛翔軌跡を計算した。さらに遺伝的アルゴリズムにより、多目的最適化を実行し、最適な飛翔条件を明らかにした。加えて、最適な飛翔条件のトレードオフを自己組織化マップにより、可視化した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2007年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

## 研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 ・ スポーツ科学

キーワード：非定常流体力、遺伝的アルゴリズム、スポーツ、風洞実験

## 1. 研究開始当初の背景

従来のスポーツ流体工学的手法は、ある物体にかかる定常的な（静的な）流体力を風洞実験やCFD等で知り、その定常的な力が各瞬間瞬間に成り立つと仮定し、飛行軌跡や推進力等を算出していた。しかし、実際のスポーツ競技は、姿勢一定で進行するわけではない。水泳然り、スキージャンプ然りである。非定常流体力の典型例としては、ダイナミックストール或いは動的失速と呼ばれる揚力発生機構がある。非定常流体力生成の主因は、剥離渦と物体の相互作用で、流体工学の各分野で研究が行われ始めたところである。

## 2. 研究の目的

スポーツにおいては、非定常流体力の積極活用が競技レベルをさらに引き上げる可能性がある。そこで本研究では、風洞実験により非定常流体力の特性を計測し、非定常流体力をも考慮した空気力学的な最適化をGA（遺伝的アルゴリズム）により実行することを目的とする。

## 3. 研究の方法

風洞実験と最適化計算によって、研究を進めた。風洞実験では、ラグビーボール、サツ

カーボール、バレーボール、スキージャンプロボット、セパタクロを使用し、静的及び動的な空気力を測定した。また、最適化計算では、エリート主義の遺伝的アルゴリズム：NSGAIIIを使用し、多目的最適化問題を解いた。最適解として、パレート解（1つの目的関数を改良するためには、他の1つ以上の解を改悪せざるを得ない解、つまり妥協解）を導出し、目的関数間及び制御変数間のトレードオフを自己組織化マップにより、可視化した。

#### 4. 研究成果

主な成果を競技ごとに説明する。

##### (1) ラグビー

①短軸周りに回転するボール模型を製作し、ゴールキックを模擬した風洞実験を行った。ボールはFRP製で、実物大のかたどりのボールである。そのボールの短軸に沿って、図1のように内部にモータを組込んだ。このモータをモータコントロールユニットで制御した。回転速度は90~1000rpm程度まで可能である。

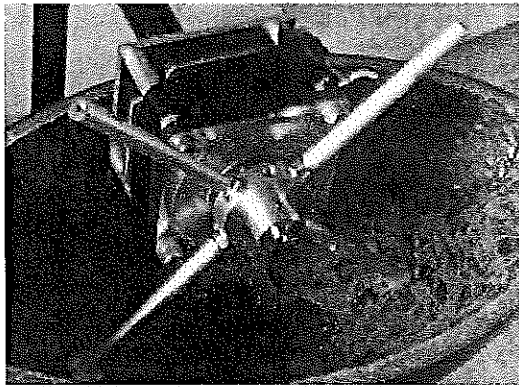


図1 短軸周りの回転機構

実験の結果、回転するボールに働く空気力は横滑り角と回転速度に依存することを明らかにした。測定した空気力に基づき、最適ゴールキックの蹴りだし条件を明らかにした。最適なゴールキックとは、両ボールの中心を通過し、クロスバー通過時のボール高度が高いゴールキック、と定義した。最適ゴールキックの飛翔軌跡は、鳥瞰した場合、直線的になった。パレート解を満たすためには、以下の蹴り出し条件を満たさなければならない。

- 角速度ベクトルは、速度ベクトルとボール長軸に対して直交していなければならない。
- 飛行経路角は45°弱にしなければならない。
- 蹴り出しスピードは速いほどよい。
- 回転速度は速いほどよい。

②無回転ラグビーボールに働く空気力を測定し、横力係数が縫い目位置と迎え角に依存

することを明らかにした。以下、具体的に説明する。

図2は、空気力と変数の定義である。ボール長軸と飛行軌跡方向、すなわち $\vec{v}$ とのなす角を迎え角 $\alpha$ とした。また、縫い目角 $\sigma$ も変数とした。縫い目角 $\sigma$ は、風洞吹き出し口から風下をみて $\alpha=90^\circ$ で縫い目位置がよどみ点になる場合（ $\alpha=0^\circ$ では真下にくる場合）を $\sigma=0^\circ$ 、右にくる場合を $\sigma=90^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ で真後にくる場合を $\sigma=180^\circ$ 、左にくる場合を $\sigma=270^\circ$ と定義した。実験では、 $\alpha$ を0~90°、 $\sigma$ を0~360°（1周）、風速 $U$ は15~30[m/s]の範囲で実験した。

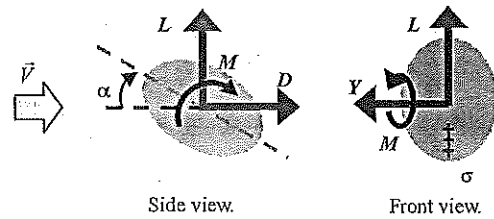


図2 空気力と変数の定義

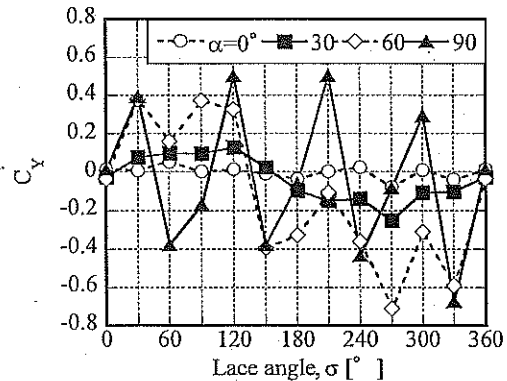
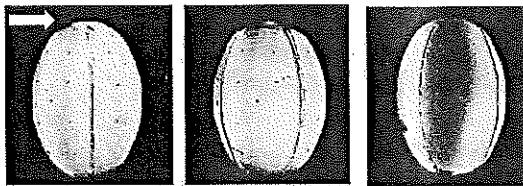


図3 横力係数の縫い目角依存性

次に横力係数 $C_y$ を縫い目角 $\sigma$ の関数として図3に示した。迎え角 $\alpha$ を変数とした。 $\alpha=0^\circ$ の場合、 $C_y$ は $\sigma$ によらず、ほぼ0である。迎え角 $\alpha=30^\circ$ では縫い目位置が一周する間（ $0 \leq \sigma < 360^\circ$ ）に $C_y$ は1周期分の変化をする。迎え角 $\alpha=60^\circ$ になると $\sigma$ とともに1周期分の変化をするが、さらに高周波の振動も出現する。迎え角 $\alpha=90^\circ$ では、縫い目位置が一周する間に $C_y$ は4周期分の変化をする。これは、ボールの4つのシーム (Seam) が生み出す流れの非対称性に起因する。ラグビーボールは、4つの面が縫い合わせられ、楕円球になっている。縫い合わせられた線は凹、つまりシームとなる。

迎え角90°における横力の縫い目位置依存性を詳しく調べる目的で、感圧塗料による圧力場計測を行った。その結果を図4に示す。風向きは、左から右である。左図は縫い目角

$\sigma=0^\circ$ 、中図は  $30^\circ$ 、右図は  $60^\circ$  である。青色は圧力係数が小さく、赤色は圧力係数が大きいことを表している。縫い目角  $\sigma=60^\circ$  では、低圧部が出現しているが、他の場合には、出現しない。シームが前方よみ線から測って、 $30^\circ$  に位置する場合には乱流境界層は出現しないが、 $60^\circ$  に位置する場合には、そのシームが乱流境界層を励起するためである。以上より、ボールには横力が働き、低回転速度のハイパントでは、ボールが空中で揺れる。

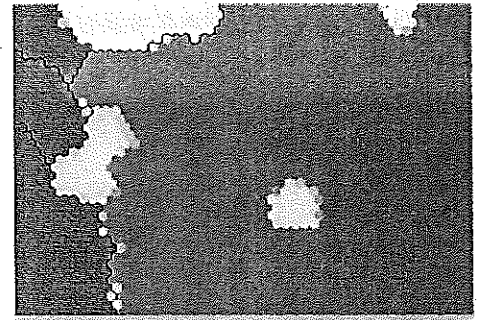


$\sigma=0^\circ$        $30^\circ$        $60^\circ$

図4 感圧塗料による圧力場計測  
縫い目角  $\sigma$  依存性

③揺れるハイパントの多目的最適化を実行した。目的関数は、前進及び横方向の揺れ回数、ハングタイムとした。制御変数は、9つある蹴りだし条件とした。得られたパレート解を自己組織化マップにより可視化し、最適制御空間探索をした。結果を図5に示す。

図5は、自己組織化マップである。図5-aは横方向： $X_E$ の揺れ回数、5-bはハングタイム、5-cは角速度である。図5-aと5-bを比較すると、逆の色パターンである。つまり、揺れ回数が多い場合はハングタイムが短くなり、揺れ回数が少ない場合はハングタイムが長くなる。両者は、トレードオフの関係にある。また、蹴りだし時の角速度（図5-c）は、横方向の揺れ回数（図5-a）と同じ色パターンで、かつハングタイムと逆の色パターンである。これは、角速度が大きいと飛行軌跡方向に対して投影面積が大きくなる瞬間が頻度高く出現するためである。頻度高く出現すると、ハイパントの上昇局面でトータルの抗力が增大するため、ハングタイムが短くなる。一方、横力は、迎え角と縫い目位置（図3）によって、正負に変化するため、角速度が大きいと揺れ回数は増大する。



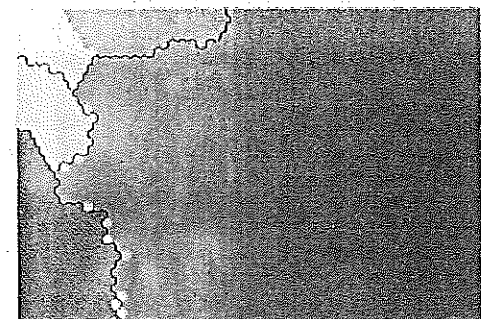
1.0      2.5      4.0  
Number of fluctuation in the  $X_E$ -axis

図5-a 横方向： $X_E$ の揺れ回数



5.25    5.30    5.35    5.40    5.45  
Hang time [sec.]

図5-b ハングタイム



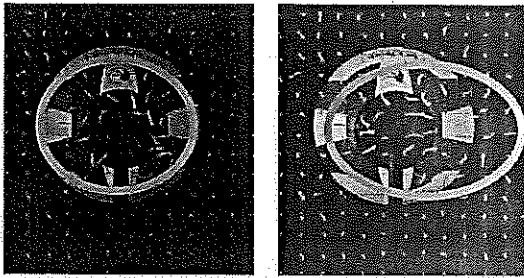
0.50      0.61      0.72  
 $\omega$  [rev./sec.]

図5-c 角速度

## (2) サッカー&バレーボール

揺れるサッカー&バレーボールの飛行の不思議を実験的に調べた。空気力測定と高速カメラによるタフト観察を同期し、実験した。その結果、ボールに働く横力は、時間とともに正負に変化することが明らかになった。タフト観察によれば、ボール後方に渦が無い場合には、ボールに空気力は働かないが、渦が存在する場合には、渦の偏りに対応した空気力が働くことが明らかになった（図6）。2つの渦対は、中心軸周りに回転、或いは合流し

て消滅する。これらの局面を任意に繰り返している。



揚力<0      揚力>0

図6 後流の偏り

### (3) スキージャンプ

テイクオフ直後にジャンパーが前傾を深め、一枚板になる過渡的過程について、ジャンパーに働く空気力を測定した。風洞実験の様子を図7に示した。実験には、近藤科学製19自由度のヒューマノイドロボットキット(KHR-1HV)を使用した。22%の縮尺模型である。合計19個のサーボにより、人間のような動作が可能である。標準サーボ(KRS-788HV)は、樹脂製のシャフトであるが、剛性を高めるため、下半身のサーボ12個を金属製シャフトのサーボ(KRS-2350SHV)に置換した。また、樹脂製の関節アームもアルミ製の関節アーム(SC-40A)に置換した。

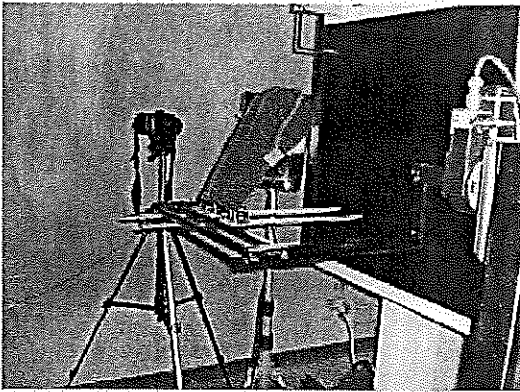


図7 風洞実験

ジャンプスーツは、高校の体操着を裁断し、手作りした。后背側に肩から袖口まで、及び肩から裾まで、4つのファスナーを取り付け、着せやすくした。実際のスーツよりもダブダブ感があるが、このスーツにより、ロボットの形状に人間らしい丸みを持たすと共に通風時に配線が外れることを防ぐことができるようになった。

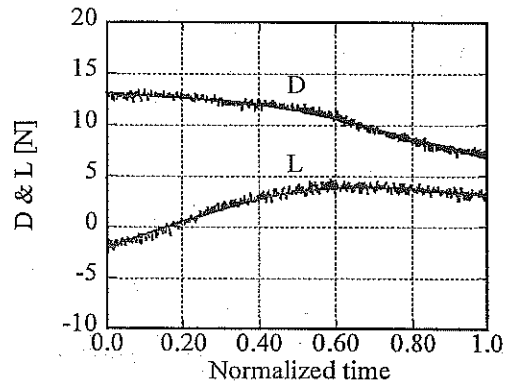


図8 過渡過程の時間変動。

$\omega=11^\circ/\text{s}$ ,  $U=20\text{m/s}$ ,  $\alpha=10^\circ$

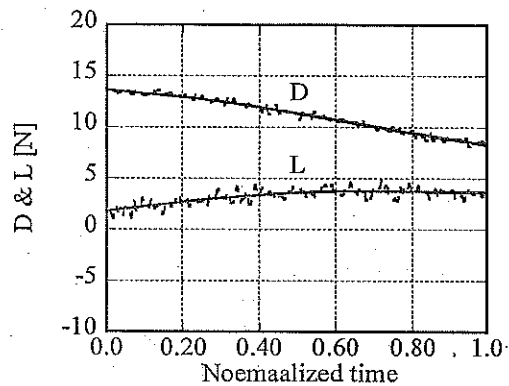


図9 過渡過程の時間変動。

$\omega=50^\circ/\text{s}$ ,  $U=20\text{m/s}$ ,  $\alpha=10^\circ$

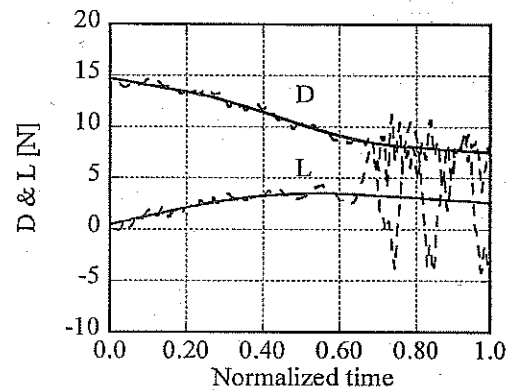


図10 過渡過程の時間変動。

$\omega=82^\circ/\text{s}$ ,  $U=20\text{m/s}$ ,  $\alpha=10^\circ$

実験結果を図8~10に示す。前傾開始時間を0、前傾完了時間を1とした正規化時間で揚力Lと抗力Dの時間変動を示した。図8は、風速 $U=20\text{m/s}$ 、迎え角 $\alpha=10^\circ$ で、前傾角速度が最遅の $\omega=11^\circ/\text{s}$ の場合、図9は同じく前傾角速度が並の $\omega=50^\circ/\text{s}$ の場合、図10は同じく前傾角速度が最速の $\omega=82^\circ/\text{s}$ の場合で

ある。各図において、波線は生データ、実線は回帰曲線である。慣性のため、前傾速度が速いほどロボットは急停止できない。そのため、生データは振動している。

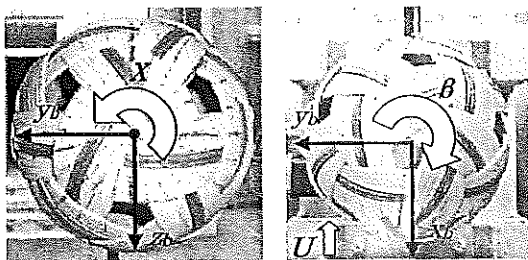
3つの図を比較すると、Lの時間変動は比較的似ている。前傾開始直後から変化がはじまり、正規化した時間0.6近傍でピークを迎えた後、微減しつつ滑空状態の一定値となる。各図に出現するLのピークは、滑空状態の静的揚力よりも大きい。

一方、Dの時間変動は、前傾角速度によって異なる。前傾角速度が最速の場合(図8)、Dは前傾開始直後にも一定値を保ち、その後、減少し始める。すなわち、DとLの時間変動には位相差がある。しかし、前傾角速度が最速の場合(図10)、Dは前傾開始直後から減少を始める。我々が行った最適化計算によれば、テイクオフ直後は最小の抗力が良い。この条件を満たすのは、前傾角速度が最速の場合である。加えて、前傾角速度が最速の場合、揚力も短時間で増加する。以上より、テイクオフ直後の過渡過程においては、前傾角速度が速いほど良い。

#### (4)セパタクロ

男子用セパタクロを使用し、風洞実験を行った。顔の向きの角度を定義する変数として、ロール姿勢角 $\chi$ と横すべり角 $\beta$ を図11の通りに定義した。図11は $\chi=\beta=0^\circ$ の場合で、左図が風洞吹出し口からボールを眺めた視線、右図は上流側からボールを鳥瞰した視線である。

図12に $\chi=30^\circ$ における抗力係数 $C_D$ の横すべり角 $\beta$ 依存性を示した。特徴的な角度に関しては、吹出し口目線の写真も併せて示した。抗力係数 $C_D$ が減少する角度 $\beta=-70^\circ, -15^\circ$  &  $45^\circ$ は、流れがボール内部を通過できる顔の向きである。特に $C_D$ が小さくなる $\beta=-70^\circ$  &  $45^\circ$ では、よどみ点に対応する位置に穴がある。つまり、よどみ点にボールの穴がくると抗力係数が減少することが明らかになった。この場合、ボール前後の圧力差がつき難くなり $C_D$ が減少すると考えられる。また、横力係数は $60^\circ$ 周期で変化し、その振幅は約0.1であった。



正面からの目線 上方からの目線  
図11 変数の定義

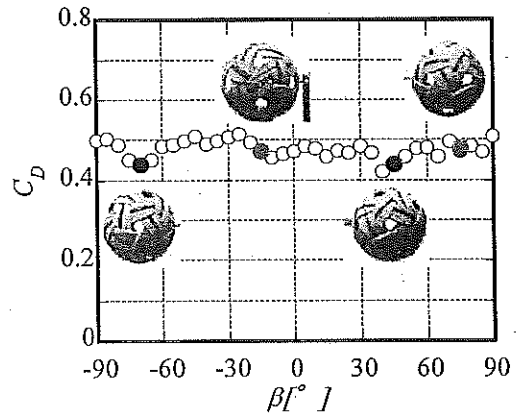


図12  $C_D$ の $\beta$ 依存@ $\chi=30^\circ$

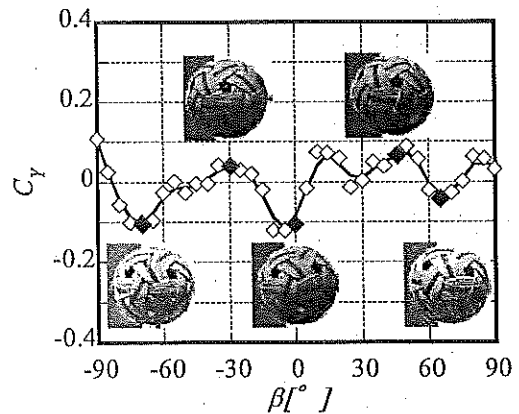


図13  $C_y$ の $\beta$ 依存

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計25件)

- ① Kazuya Seo, Osamu Kobayashi & Masahide Murakami (2008) 査読有 The fluctuating flight trajectory of a non-spinning punted ball in rugby, *The Engineering of Sport* 7, Vol. 1, pp.329-336.
- ② 瀬尾和哉, 小林修, 村上正秀 (2007) 査読有 短軸周りに回転するラグビーボールの空力特性, *日本機械学会論文集 B編*, Vol.73, No.734, pp.1999-2003.
- ③ Kazuya Seo, Osamu Kobayashi & Masahide Murakami (2006) 査読有 Multi-optimisation of the screw kick in rugby by using a genetic algorithm, *Sports Engineering*, Vol.9, No.2, pp.87-96.

[学会発表] (計37件)

- ① 瀬尾和哉 (2008) セパタクロの空力特

性に及ぼす顔の向きの効果, 日本流体力学会年会 2008 拡張要旨集, 全 3 頁, 2008 年 9 月 6 日, 神戸大学.

- ② 瀬尾和哉, 小林修(2008) 遺伝的アルゴリズムによるラグビーゴールキックの最適化, 日本フットボール学会第 5 回大会, p. 52, 2008 年 3 月 16 日, 大阪市立大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

(守秘義務あり、非公開)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.e.yamagata-u.ac.jp/~seo>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

瀬尾 和哉 (SEO KAZUYA)

山形大学・地域教育文化学部・准教授

研究者番号: 6 0 2 9 2 4 0 5

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: