円盤投の最適化に関する可視化技術* —PIV, 煙, SOM, アニメーション—

瀬尾 和哉**, 下山 幸治***

The Visualization concerning the Optimization of Disc — PIV, Smoke observation, SOM and Animation —

Kazuuya SEO and Koji SHIMOYAMA

1. 緒 論

我々はスポーツに関わる何か飛ぶもの、を研究対象にしている。典型的な研究の進め方は、空気力測定→飛翔軌跡シミュレーション→最適化、である。これらの行程中、可視化技術をしばしば応用する。研究の見通しを良くするため、流体力学的不思議を解明するため、選手や用具設計者に結果をわかりやすく提示するため、である。今回は、円盤投を例として、我々が利用した可視化技術を紹介する。

円盤投研究の目的は、飛距離最長となる投出し条件を求めることである。選手は、日々のトレーニングの中で、飛距離最長を目指して、投出し条件、つまりスキルを改善している。用具設計者は、投げやすく、飛距離がでる円盤を目指して、ルール範囲内で、円盤の慣性モーメントや形状を最適設計している。スキルと用具がうまく調和すれば、飛距離は伸びるはずである。我々は、スキルと用具の同時最適化を目標として、研究を進めている。また、今回は、飛距離に加えて、投出し条件のロバスト性も目的に加えた最適化例を紹介する。

2. 円盤投円盤の風洞実験

2.1 基本的な空力特性

まずは、基本的な空力特性を知るために風洞実験により、商用の女子用円盤 (Discus SUPER for Women, Nishi) に働く空気力を計測した (Fig. 1)。風洞は、本実験室の低速風洞で、最大風速が 30m/s、乱れ度 1.5% 以下である。円盤の回転対称軸に直径 10mm のステンレス棒を挿入し、そのステンレス棒にプーリーを介して、モーターから回転を与えた。実験では、風速を 15m/s から 30m/s、迎え角を 0° から 90°、回転速度を 0 から 7 rev./sec. の範囲で変化させた。これらは、実際の範

囲を包含している。

女子用円盤の測定結果を Fig. 2 にしめした。横軸は迎え角 α 、縦軸は空力係数 (C_L , C_D , C_M) である。定義を式 (1) と (2) に示した。

$$C_{L,D} = \frac{L,D}{0.5\rho U^2 A} \quad (1)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho U^2 A d} \quad (2)$$

揚力係数 C_L と抗力係数 C_D は揚力 L と抗力 D を動圧と円盤平面面積 A で除した値、ピッチングモーメント係数 C_M はピッチングモーメント M を動圧と A さらに円盤直径 d で除した値である。空力係数の風速や回転速度に対する依存性は小さかった¹⁾ため、Fig. 2 には代表値として、風速 20m/s、回転速度 0 rev./sec. の場合を示した。また、黒丸は迎え角を増加させた場合の結果、白四角は減少させた場合の結果である。迎え角が 24° 以下、及び 34° 以上では、道筋に寄らず、ほぼ等しい値であったため、黒丸のみを示した。

基本的な空力特性を列記すると、

- ・空力係数は迎角に依存する (風速や回転速度に対す

Fig. 1 Experimental set-up.

* 原稿受付 2013 年 4 月 10 日

** 正会員 山形大学 地域教育文化学部
(〒990-8560 山形市小白川 1-4-12,
E-mail: seo@e.yamagata-u.ac.jp)

*** 非会員 東北大学 流体科学研究所

る依存性は小さい¹⁾).

- ・失速迎角近傍では、ヒステリシスがある.
- ・ C_L は迎角とともに直線的に増加（渦格子法により C_L を予測可能¹⁾）し、失速に至ると急減する．さらに迎角を増加させると減少する．
- ・ C_D は迎角とともにほぼ増加する．
- ・失速により C_L が急減すると C_D も減少する（ C_L の2乗に比例する誘導抗力が減少するため）．

Fig.2-a The lift coefficient.

Fig.2-b The drag coefficient.

Fig.2-c The pitching moment coefficient.

Fig. 2 The angle of attack dependence of aerodynamic coefficients.

- ・ C_M は全領域で正（頭上げ）である．
- である．

円盤の縁付近にドリルで直径 1 mm の測定用圧力孔をあけ、その点における圧力を微差圧変換器（PDV-A, Kyowa）により測定した．測定位置のポンチ絵とともに Fig. 3 に結果を示した．縦軸は、圧力を動圧で除した圧力係数 C_P である．迎え角が正の場合、孔は圧力側（風が直接流入する位置）、迎え角が負の場合、孔は背面側にある．迎え角を 0 から +90° に増加させた場合、 C_P は迎え角とともに増加し、 $\alpha \approx 50^\circ$ で最大値の 1 に達する．+90° から 0° に減少させた場合も C_P はほぼ同じ道筋をたどる（ヒステリシスは無い）．一方、迎え角が負の領域では、ヒステリシスがある．つまり、ヒステリシスは、背面側で起こる．このことから円盤等の模型は圧力側から支える必要がある（磁気浮上の無支持天秤で、支柱は無いのがベストであるが、...）．ちなみに Fig. 2 は、失速迎角未満に対しては、背面側フリーの状態（円盤を支える支柱は圧力側にあり、背面側には何もない）の結果、失速迎角以上に対しては、背面側から支柱で円盤を支えた場合の結果をつなぎ合わせた図である．今回は示していないが、背面側に支柱が存在すると失速迎角近傍のヒステリシス現象は鈍り、不明確になる．

2.2 特徴的な迎角における特性

時系列 PIV 計測システム（西華産業）により、1000Hz のサンプリング周波数で PIV 計測を行い、約 4 秒間の平均値を Fig. 4 に示した．風速 20m/s, 回転速度 0 rev./sec. の場合で、円盤の中心軸上の 2 次元速度分布である． C_L がほぼ最大となる $\alpha = 28^\circ$ （ α を 0 → 90°へ変化させた場合の 28°）を Fig. 4-a, 失速状態にある 25°（ α を 90 → 0°へ変化させた場合の 25°）を Fig. 4-b に示した．流れ方向は左から右で、円盤の下側は円盤の陰になるため、レーザーが届かず、速度ベクトルを得られていない．主目盛間隔は、それぞれ 26mm と 25mm である．Fig. 4-a では、円盤背面の上流側で、一度剥離するが、凸点辺りで再付着し、ほぼ背面に沿っ

Fig. 3 The angle of attack dependence of the coefficient of the pressure.

Fig.4-a $\alpha=28^\circ$, where C_L becomes maximum. Fig.4-b $\alpha=25^\circ$

Fig. 4 Velocity vectors around the disc at the centerline.

た流れが存在する。この凸点はルール範囲内で、数 mm 程度、移動可能である。凸点位置を移動することにより、空力特性を制御できる可能性が示唆された。このように可視化により、創造的洞察力を働かすことができる。一方、Fig. 4 -b では境界層が剥離した状態で、逆流も観察される。

次に 3 次元的な流れを煙により観察した。煙発生器 (Model8304, KANOMAX) によって発生させた粒子径

Fig.5-a $\alpha=20^\circ$ Fig.5-b $\alpha=29^\circ$

Fig.5 Smoke observations on the downstream side at 2.6 m/s. Woman's disc. 0.18 revolutions per second.

は $0.3\text{--}1\mu\text{m}$ 程度である。風洞吹出し口上流に楕円ノズルを挿入し、コンプレッサにより押し出した煙の流れにのせた。Fig. 5 は、風下方向から円盤を見た視線で、風速 = 2.6m/s 、回転速度 = 0.18rev./sec. の場合である。レイノルズ数を合わせる為には風速を増加させるべきであるが、 3 m/s 以上に風速を増加させると煙が拡散し、観察困難であった。スピンパラメータは実際の場合にはほぼ一致している。圧力側から背面側へ向かう 1 組の縦渦が観察された。 $\alpha=20^\circ$ の場合、縦渦に加えて中心軸に沿った流れが観察された。 $\alpha=29^\circ$ は、中心軸に沿った流れが観測された限界角度である。円盤両端から漏れこむ縦渦が中心軸まで達するためである。

3. 最適化

3.1 目的関数

慣性座標系を Fig. 6 に示した。原点を投出しサークル中心、前進方向を X_E 、横方向を Y_E 、鉛直下方を Z_E とした。最適化の目的関数は、飛距離とロバスト性である。飛距離は長いほど良く、ロバスト性は大きい、つまり最適投出し条件から多少外れた条件で投出しても飛距離に影響を与えないほど良い。人間はロボットではない為、実際の競技会では、失敗もする。スポーツの世界では、競技力に加えて、ロバスト性も重要な評価指標である。ロバスト性の概念は、最適解候補周りの勾配 (差分近似)、もしくは最適解候補周りの分散 (or 標準偏差) 等で評価するのが一般的である。今回は、標準偏差を評価指標とした。飛距離は F1、標準偏差は F2 として、式 (3) と (4) の通り定義した。F1 は運動方程式等の数値積分²⁾により、後者はモンテカルロシミュレーションにより見積った。

$$F_1 = -\sqrt{X_E(tf)^2 + Y_E(tf)^2} \quad (3)$$

$$F_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FD_i - FD_{\text{candidate}})^2}{n-1}} \quad (4)$$

ここで、 tf は飛翔時間、 FD は飛距離、 $FD_{\text{candidate}}$ は最

Fig. 6 Inertial coordinate system.

適解候補の飛距離、 n は最適解候補周りのシミュレーション点数である。 n は大きいほど確実なF2を算出できるが、その分、計算時間は長くなる。今回は、 $n=50$ とした。つまり、最適解候補周りに一様乱数に基づき50点の飛距離計算をし、F2を算出した。最適化は、領域適応型遺伝的アルゴリズム (ARMOGA)³⁾で行った。人口を300、世代を300とした。最適化では、2つの目的関数F1とF2の最小化を行った。

3.2 制御 (設計) 変数

制御変数は、Table1に示した10個ある。#1～8は投出しのスキルに関わる制御変数、#9&10はものづくりに関わる設計変数である。これらを並行して、最適化する。投出しスピードは26m/s、投出し位置は $(X_E, Y_E, Z_E) = (1.0, 1.0, -1.6)$ とした。#1&2は速度ベクトルの方向、#3～5はオイラー角で慣性座標系に対する円盤姿勢を表す角度、#6～8は角速度ベクトル、#9は回転対称軸周りの慣性モーメント、#10は円盤質量である。ARMOGAの際に各変数がとりうる範囲を最適化範囲として、モンテカルロシミュレーションの際に各変数がとりうる範囲をモンテカルロ範囲として、Table1に示した。これらの範囲は、右投げの女子選手が実行可能な値⁴⁾である。

3.3 拘束条件

拘束条件は、円盤落下地点がインフィールドであるこ

と、である。これを式(5)に示した。 $Y_E(X_E(tf))$ は落下地点の $X_E(tf)$ に対応したサイドラインの Y_E の値(式(6))である。角度 34.92° はFig.6に示されている。

$$gl = |Y_E(X_E(tf))| - |Y_E(tf)| > 0 \quad (5)$$

$$|Y_E(X_E(tf))| = \tan\left(\frac{34.92^\circ}{2}\right) \cdot X_E(tf) \quad (6)$$

3.3 結果

最適化の結果をFig.7に示した。横軸は、-飛距離のため、小さい(横軸の左)ほど良く、縦軸も小さいほどロバストで良い。しかし、両目的関数を同時に満たす最適解は存在せず、両者はトレードオフの関係にある。飛距離のみを目的とすれば、飛距離=77mの世界記録も可能だが、仮に最適投出し条件から外れると1.7m程度短くなってしまう可能性がある(ロバストではない)。一方、飛距離=56mの場合、飛距離は短い、ロバストではある。飛距離が短いと言っても日本記録程度ではある。F1とF2の両者を高いレベルで満たす最適解(スウィートスポット)を×で示した。飛距離は76m、標準偏差は0.7mである。

次に最適解空間を可視化する目的で、自己組織化マップを描いた(Fig.8)。自己組織化マップは、人工ニューラルネットワークの1つである。ニューロン同士を連携させることにより、自分自身で学習していく脳機能の一部を簡略化した数理モデルである⁵⁾。自己組織化マップ作製には、Viscovery SOMine (マインドウェア)を用いた。最低値を黒色で、最高値を白色で示した。飛距離が最長となる位置は、▲で示したマップの右下角である。その位置では、F2が最大で、飛行経路角 γ が 37° で、質量 m_d が最小、となっている。飛距離最長の場合に比べると、スウィートスポット×では、ロール角 Φ が約 3° 小さく、慣性モーメントや質量はやや大きい。

まとめると、選手は、一発にかけるならば、▲で示した飛距離77mの世界記録を目指して投げればよい。安全に行くならば、よりロバストな×もありうる。選択肢は選手にゆだねられ、時と場合によって、様々な選択が

Table 1 Control variables

#	記号	最適化範囲	モンテカルロ範囲
1	γ_0	$15 \sim 60^\circ$	$\pm 5^\circ$
2	χ_0	$-30 \sim 30^\circ$	$\pm 5^\circ$
3	ψ_0	$-45 \sim 45^\circ$	$\pm 5^\circ$
4	θ_0	$-60 \sim 60^\circ$	$\pm 5^\circ$
5	ϕ_0	$-45 \sim 45^\circ$	$\pm 5^\circ$
6	P_0	$-3 \sim 3 \text{ rev./sec.}$	$\pm 0.1 \text{ rev./sec.}$
7	Q_0	$-3 \sim 3 \text{ rev./sec.}$	$\pm 0.1 \text{ rev./sec.}$
8	R_0	$0 \sim 7 \text{ rev./sec.}$	$\pm 0.1 \text{ rev./sec.}$
9	I_s	$0.0055 \sim 0.006 \text{ kg m}^2$	$\pm 0.0001 \text{ kg m}^2$
10	m_d	$1.005 \sim 1.025 \text{ kg}$	$\pm 0.005 \text{ kg}$

Fig. 7 Trade-off between both objective functions.

Fig.8 Self-organizing maps of the objective function and control variables.

考えられる。重要な事は、例えば Fig. 8 のような結果を知っている事である。これを知っていれば、戦略を立てられる。

4. アニメーション

我々は、円盤飛翔の様子を知るためにアニメーションを利用している。紙面でアニメーションを表示する事は困難なため、今回は数枚の静止画を紹介するにとどめるが、Fig. 9 と 10 で示したようなパラパラ漫画の元を動画作成ソフトでつなぎ合わせれば動画は完成する。

これらのパラパラ漫画の元は、POV-Ray⁶⁾で製作した。POV-Ray は、マルチプラットフォームに対応したレイトレーシングソフトウェアで、フリーである。飛翔軌跡のシミュレーションは右手系で行ったが、POV-Ray を含め、CG ソフトは一般に左手系であるため、姿勢角の変換が必要になる⁷⁾。

Fig. 9 と 10 は、前章のスイートスポットに対応した投出し姿勢や飛翔の様子である。Fig. 9 は投出しサークルの真横と真後ろから眺めた投出し条件、Fig.10 は飛翔後半の様子を空から眺めた図で、Fig.10-a から Fig.10-b へ時間が進行している。また、円盤に加えて、初速度ベクトルも矢印で示してある。Fig. 9 の初速度ベクトルと円盤の姿勢より、飛翔の初期は、円盤に対して、風は上から入射し、下向きの揚力が働く。後ろからの視線では、投出し時、円盤は右下に傾いている (Fig. 9 -b) が、時間とともに回転し、着地直前には地面に対して、ほぼ平行な姿勢 (Fig.10-b) になっている。飛翔初期は、飛距離を稼ぐ局面であり、抗力を小さくする必

Fig.9-a Side view.

Fig.9-b View from the back.

Fig. 9 Optimal launch condition.

Fig.10-a 2.6 sec.

Fig.10-b 3.9 sec.

Fig.10 View from the top

要がある。飛翔後半は、失速状態になるが、また落下を防ぐ局面でもある。

5. まとめ

円盤投の最適化を例として、研究に用いた可視化技術を紹介した。スポーツにおいては、現場のことを常に念頭に置き、現場に分かり易く結果を可視化すること、が重要である。今後もこれを肝に銘じて、研究に取り組みたい。

参考文献

- 1) Seo, K., Shimoyama, K., Ohta, K., Ohgi, Y., Kimura, Y.: Aerodynamic behavior of a discus, Procedia Engineering 34, Vol.34 (2012) pp.92-97.
- 2) Seo, K., Shimoyama, K., Ohta, K., Ohgi, Y., Kimura, Y.: Optimization of the moment of inertia of a disc and the release condition of a discus, Procedia Engineering 34, Vol.34 (2012) pp.170-175.
- 3) Sasaki, D., and Obayashi, S.: Efficient Search for Trade-Offs by Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms, AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, (2005) pp.44-64.
- 4) Leigh, S., Liu, H., Hubbard, M. and Yu, B.: Individualized optimal release angles in discus throwing, J Biomechanics, Vol.43 (2010) pp.540-545
- 5) Kohonen T.: " Self-Organizing Maps," Springer, Berlin, Heidelberg (1995)
- 6) <http://www.povray.org/>
- 7) 瀬尾和哉: 円盤投げ飛翔のアニメーションによる可視化, 可視化情報, Vol.32, Suppl, No.2 (2012) pp.151-152

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (A) No. 23240090) の助成を受けた。感謝の意を表する。