スポーツ流体に関する風洞とその関連技術* — スキージャンプを例として —

瀬尾 和哉**

Wind tunnel tests and concerned topics in Sports — Ski jumping flight —

Kazuya SEO

1. はじめに

スポーツ流体と言っても、奇をてらった実験設備は不要である。まずは、オーソドックスな低速風洞、オーソドックスな天秤、で十分である。とは言え、これらを揃えるのが大変だ、と感じる会員の方がいらっしゃることは熟知している。著者がまさにそのような立場である。蛇足ながら、自分の実験室に風洞が無かった頃は、可視化情報学会編集の「日本の低速風洞」¹⁾を見て、こんな風洞がほしい、あんな風洞がほしい、と夢見ていた。低速風洞を使える恵まれた研究環境ならば、風洞実験室の測定空間に取り付けられた飛行機模型をサッカーボールに置き換えた日からスポーツ流体の研究者になる。

本解説では、スポーツ流体の研究例として、スキージャンプに関する研究を紹介する。この紹介を通して、正確な流体力の測定、領域横断的な問題をコンカレント（並行、同時）に取り扱う点、最適化の目的関数をシミュレーション可能な物理量に変換する点が本質で、今後の課題でもあることを指摘する。

2. スポーツ流体に対するエンジニアの役割

スポーツの研究と言えば、体育分野（バイオメカニクス）の研究者が盛んに行ってきた。バイオメカニクス研究者の典型的な研究手法は、エリート選手の運動を高速カメラによって撮影し、その力学的妥当性を検証する方法である。後に続く選手は、そのエリート選手に学ぶ。学んだ後は、経験に基づき、更なるパフォーマンスの向上を目指す。これには試行錯誤が必要で、時間がかかる。別の方法は、合理的な最適化手法を利用したスポーツスキルの最適化である。この方法では、求められた最適スキルが到達目標として教示される為、経験に基づくスキル改善よりも短時間で最適スキルを獲得できる。我々は、スキージャンプの滑空局面に関して、風洞実験²⁾と測定

した空気力に基づく最適化計算³⁾を行った。その結果、V字スキー開き角の最適制御法は、ワールドカップチャンピオンのアダム・マリッシュ選手のそれと定性的に一致していた。しかし、この結果は、風洞実験に使用したスキー板やジャンプスーツに合った最適スキルである。スキー板の剛性（板のしなりや振動に影響する）やジャンプスーツの通気量が変われば、最適スキルも変わる。1998年の長野冬季五輪、スキージャンプの船木和喜選手は金メダルを獲得した。しかし、その後、ジャンプスーツやスキー板に関する用具のルール改正が行われると船木選手は不振に陥り、現在に至る。用具とスキルが適合していなければ、競技力は低下してしまう。

用具とスキルは、競技力向上への両輪である。選手は、日々の努力により、使用している用具に最も適合したスキルを能動的に勝ち取っている。しかし、用具に関しては、限られた選択肢から選択せざるを得ないという受動的な現状がある。しかし、用具も最適化すべきであり、これはエンジニアの仕事である。用具とスキルがコンカレントに最適化されると、競技力はさらに向上する。エンジニアの視点でスポーツ最適化問題をみると、新幹線や航空機と同様な形状最適化に加えて、スキルの最適化も可能な点に研究の面白み、新規性がある。また、スキージャンプの地面効果や非定常流体力の有効活用等、ルールブックには書いていない新しい観点からの最適化が可能である。

3. スキージャンプ

3.1 谷一郎教授の風洞実験と3メートル風洞

日本には、スポーツ流体研究の伝統がある。1950年前後、当時の東京大学第二工学部の谷一郎教授によって、世界に先駆けた科学的なスキージャンプ研究⁴⁾が行われた。ジャンプ模型は1/5サイズで、 0.6×0.6 mの吹出型風洞によって実験が行われた。当時の主流であった万歳姿勢（上肢を前へ伸ばした飛型）を中心として実験され、前傾による抗力減少の重要性を指摘している。補足的に上肢を体側に付けた姿勢（フィンランドスタイル）での測定もしており、これにより揚力と揚抗比が改善さ

* 原稿受付 2011 年 10 月 15 日

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

れると述べている。この結果は、1950年の日本スキー連盟の報告書にも載っているが、日本選手がフィンランドスタイルを意識し始めたのは、50年代半ば以降（54年の世界選手権参加時に外国勢のフィンランドスタイルを見て）のようであった。50年代から60年代にかけては、万歳姿勢とフィンランドスタイルが混在する時代であったが、1964年のインスブルック五輪では、谷教授の研究成果を取り入れ、全員がフィンランドスタイルで飛ぶようになっていた。第二報⁵⁾は、札幌五輪前の数年間の研究成果をまとめた論文である。実物大模型を使用（Fig. 1）することにより、レイノルズ数を一致させ、加えてピッチングモーメントの測定精度も向上した。この実験に使用された風洞は、直径3メートルの円形吹き出し口を持つ回流型風洞（通称、3メートル風洞）である。我々が1999年に行ったV字スキージャンプの風洞実験（Fig. 2）でも同じ風洞を使用した。Fig. 2は、著者が吹き出し口の中に入り込み、ジャンプ模型を見あげながら撮影した写真である。木製吹き出し口は、滑り台のようによく滑り、吹き出し口の最下部で写真を撮影した後は、勢いをつけて駆け登らないと脱出できなかった。計器類は大理石に組込まれた贅沢な作りであった。3メートル風洞は、昭和5年の建造であるが、つくりの良さと丁寧なメンテナンスにより、現在でも立派に稼働し

Fig. 1 Wind tunnel test conducted by Professor Tani.

Fig. 2 Wind tunnel test for V-style.

Fig. 3 Schematic of the experimental set-up.

ている。実験の概略図を Fig. 3 に示した。ジャンプ模型は、ワイヤによって上から吊られており、ワイヤの張力を歪ゲージにより測定する。無風時と通風時の張力差が空気力になる。揚力 L は L_1 と L_2 の和として、抗力は D として、ピッチングモーメント M は D , L_1 , L_2 と重心位置により、算出した。通常は、模型を天地逆の状態ですり下げる（標準吊り）が、V字スキージャンプの場合はスキー板が L_2 用のワイヤと干渉するため、飛行状態で吊った（飛行吊り）。ワイヤ吊り天秤は、他の方法に比べて空気力を正確に測定できる長所がある。ワイヤ直径が1 mm 以下で細く、模型を前後、左右、上下の全方向からワイヤで吊ることにより、安定した支持ができるためである。3メートル風洞では、空気力は、元々、天秤で測定されていた。天秤の支点はナイフエッジで鋭く、そこに手をついてもたれかかる等の行為は言語道断である。 L_1 , L_2 , D のそれぞれに天秤があり、3人の技官の方が錘とつりさげ位置を調整しながら天秤のバランスをとっていたそうである。一方、模型は下方向にも錘で引っ張られている。これは、通風時に模型には上向きの揚力が働き、模型吊り下げ用のワイヤが緩んでしまうためである（標準吊りの場合には、下向き荷重は少なめで済む）。錘は、ドラム缶に満杯に入れられたオイルに浸されており、吊り下げ用のワイヤが緩むのを防ぐと同時に高周波数の振動を減衰させている。

3.2 最適化

スキージャンプの勝敗は、トータルポイントシステムで決まる。トータルポイントとは、飛距離点と飛型点の合計点である。飛距離点は、K点（建設基準点）まで飛ぶと60点、K点に対して飛距離1 mの増減で、1.8点の増減（ラージヒルの場合）となる。一方、飛型点は、5人の審判制で、各20点の持ち点方式である。0.5点刻みの減点法で、最高点と最低点をつけた2人の審判を除く、3人の審判の合計が飛型点となる。飛距離はシミュレーション可能であり、数値化できる。しかし、飛型は審判の主観による。感性に関わる量、例えば、きれ

Fig. 4 Definition of characteristic parameters.

い、強そう、気持ちいい等、を数値化することは困難である。飛型点もそれに当たる。スキージャンプの飛翔局面（踏切や着地局面ではなく）の主な減点例⁶⁾は、「風をうまく利用できていない」、「肩、腕を必要以上に揺らす」、「スキーが揺れる」、「手をぐるぐる回す」等である。そこで、我々は、飛型点＝安定性と解釈し、前傾角（後述）の分散を飛型点と解釈し、飛距離と前傾角の分散の2目的最適化を行った。

スキージャンプは、ジャンプ台を滑り降りるアプローチに始まり、踏切、飛翔、着地の4局面に分けられる。今回は、飛翔局面（踏切後0.3秒以降～着地までの安定した滑空局面）における2目的最適化を紹介する。

3.3 スキージャンプの空力特性

飛距離や前傾角の分散をシミュレーションするためには、スキージャンプに働く空気力を知り、さらに運動方程式を数値積分する必要がある。前者は風洞実験により、後者はルンゲクッタ法により可能である。言うまでもないが、風洞実験による空気力の測定値が異なれば、飛距離等の値は異なってくる。正確な空気力測定は、それ以降の全てに影響するため、最も重要な仕事である。我々は、Fig. 2の通り、実物大模型を製作し、模型に働く空気力（抗力、揚力、ピッチングモーメント）を測定した。実験では、Fig. 4に示した迎え角 α （飛翔軌跡方向とスキー板のなす角）、前傾角 β （体幹とスキー板のなす角）、V字開き角 λ を変数とした。

3.4 目的関数

目的関数は、2つ、

$F1 = -$ 飛距離、

$F2 =$ 前傾角の分散

とした。最適化では、両目的関数を同時に最小化することになる。

3.5 制御変数

18個の制御変数をTable 1に示した。制御範囲もあわせて記述してある。全て、ジャンプが飛翔中に制御可能な変数である。これらの変数を手作業で変えつつ、目的関数 $F1$ と $F2$ を同時に最小化することは、極めて困難である。そこで、ARGA⁷⁾を使用した。制御変数1～5, 12は、初期条件、つまり $t=0.3$ 秒における各変数

である。制御変数5～18は、前傾角 β とスキーV字開き角 λ の制御点である。それぞれの1点目（ β_0 & λ_0 ）は、 $t=0.3$ 秒における制御点の値、2点目は $t=1.3$ 秒における制御点の値、7点目は $t=6.3$ 秒における制御点の値である。これらの制御点間を3次のCスプラインで補間し、時々刻々の $\beta(t)$ と $\lambda(t)$ の値を与えた。

3.6 拘束条件

4つの拘束条件をTable 2に示した。実際的な範囲であること、実験で空気力が得られている範囲であること、を考慮し、拘束条件を決めた。

3.7 結果

以下に最適化結果を示す。Fig. 5の横軸は $F1$ 、縦軸は $F2$ である。 $F1$ は絶対値が大きいほど良く、 $F2$ は小さいほど良いが、両目的関数が同時に最適になることは

Table 1 Control variables.

#	Control variables	Abb.	Range
1	Initial x_b component of $\vec{V}$	U_0	22~27m/s
2	Initial z_b component of $\vec{V}$	W_0	1~4 m/s
3	Initial pitch angle	Θ_0	-11~-8°
4	Initial angular velocity (= $\dot{\Theta}_0$)	Q_0	-30~10°/s
5	Control point of β @ 0.3 sec.	β_0	0~40°
6	Control point of β @ 1.3 sec.	β_1	0~40°
7	Control point of β @ 2.3 sec.	β_2	0~40°
8	Control point of β @ 3.3 sec.	β_3	0~40°
9	Control point of β @ 4.3 sec.	β_4	0~40°
10	Control point of β @ 5.3 sec.	β_5	0~40°
11	Control point of β @ 6.3 sec.	β_6	0~40°
12	Control point of λ @ 0.3 sec.	λ_0	0~30°
13	Control point of λ @ 1.3 sec.	λ_1	0~30°
14	Control point of λ @ 2.3 sec.	λ_2	0~30°
15	Control point of λ @ 3.3 sec.	λ_3	0~30°
16	Control point of λ @ 4.3 sec.	λ_4	0~30°
17	Control point of λ @ 5.3 sec.	λ_5	0~30°
18	Control point of λ @ 6.3 sec.	λ_6	0~30°

Table 2 Constraints

Constraints	Physical meaning
$g1=27-V_0^2>0$, V_0 : Initial speed	The initial speed should be less than 27m/s.
$g2=\alpha>0$	The angle of attack should be larger than 0° .
$g3=40-\alpha>0$	The angle of attack should be less than 40° .
$g4=FD-130>0$, FD : Flight distance	The flight distance should be larger than 130 meters.

Fig. 5 Trade-off between objective functions.

無かった。飛距離のみを重視すれば、163 m の飛翔も可能であるが、前傾角 β の分散が増大する（安定性が失われる）。一方、安定性を重視すれば、飛距離は短くなってしまふ。望ましい解は、両目的関数間にトレードオフのあるパレート解となった。

Fig. 5 の左上端と右下端のパレート最適解、つまり飛距離最長と安定性最大の2つの極限最適解の飛翔軌跡を Fig. 6 と 7 に示した。飛距離最大の場合が Fig. 6、安定性最大の場合が Fig. 7 である。下の実線が大倉山ジャンプ台の斜面をあらわし、その上の実線が重心の飛翔軌跡、さらに横から見たジャンパの姿勢と上から見たV字開き角を示している。両者を比べると、前者 (Fig. 6) のV字開き角は、踏切直後から着地前まで大きく保たれているが、後者 (Fig. 7) のそれは、踏切直後にはやや小さい。また、前者 (Fig. 6) の前傾角 β は中盤から後半にかけて、やや大きくなるが、後者 (Fig. 7) のそれは飛翔中、 $\beta \approx 0$ で、一枚板の姿勢である。

次にパレート解空間を Fig. 8 の自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map)⁸⁾ で示す。SOM をデータマイニングツールとして、利用した⁹⁾。これにより、2つの極限最適解のみではなく、最適解空間全体を知ることができる。黒色が Table 1 で示した制御範囲の最小値、白色が同じく最大値を示している。例えば、 $F1$ (Fig. 8 -a) が最小（飛距離最長）となるのは、マップの一番左、下から2番目の位置である。その位置は、

Fig. 6 Extreme optimal solution in the case of the longest flight distance.

Fig. 7 Extreme optimal solution in the case of the smallest variance of the angle of the forward lean.

$F2$ (Fig. 8 -b) が最大となる位置である。一方、 $F1$ が大きくなるのは、マップの右下付近で、そこは $F2$ が最小となる位置で、トレードオフを確認できる。次に制御変数の SOM を見ると、以下をよみとることができる。

- ・初期ピッチ角 θ_0 (Fig. 8 -c) は、全てのパレート解に対して、制御範囲で最大の -8° (SOM の全域が白)。
- ・初期の頭上げ (下げ) の角速度 Q_0 (Fig. 8 -d) は、全てのパレート解に対して、負の値、つまり頭下げの角速度。
- ・初期の前傾角 β_0 (Fig. 8 -e) は、全てのパレート解に対して、ほぼ 0° (SOM の全域が黒)。つまり体とスキー板が同一平面内にある一枚板姿勢。
- ・ $F1$ を小さくする (マップの左下)、つまり飛距離を長くするならば、 $Q_0 = -17^\circ/\text{s}$ (Fig. 8 -d), $\beta_4 = 8^\circ$ (Fig. 8 -g), $\lambda_0 = 28^\circ$ (Fig. 8 -g), $\lambda_4 = 27^\circ$ (Fig. 8 -h)。
- ・ $F2$ を小さくする (マップの右下) ならば、 $Q_0 = -28^\circ/\text{s}$, $\beta_4 = 1^\circ$, $\lambda_0 = 19^\circ$, $\lambda_4 = 23^\circ$ (Fig. 8 -h)。

4. ま と め

スキージャンプの風洞実験と最適化計算例を紹介した。空気力測定は、それ以降の全てに影響を与える為、最重要である。その上で、領域横断的なスポーツ流体のようなテーマの場合、単一の目的を強調するのではなく、調

(a) F1: -Flight distance

(f) β_4 : Angle of forward lean at 4.3s

(b) F2: Variance of the angle of forward lean

(g) λ_θ : Ski-opening angle at 0.3s (c) Θ_θ : Pitch angle at 0.3s (h) λ_4 : Ski-opening angle at 4.3s (d) $\dot{Q}_\theta$: Angular velocity of Θ_θ at 0.3s (e) β_θ : Angle of forward lean at 0.3s

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

和，バランス，総合力が重要で，コンカレントに取り扱わなければならない．スポーツでは，研究対象に人間が含まれる以上，感性や心理戦，戦略にも配慮する必要がある．例えば，きれい，気持ちいい，といった感性に関する量をシミュレーション可能な物理量に変換する点が研究者の腕の見せ所である．1つ1つの対象に対して，丁寧な観察と洞察力によって，この変換作業を行うしかない，というのが現状である．

謝 辞

1950 年当時の情報を提供して下さいた元東京大学先端科学研究センタの渡部勲技官に感謝の意を表する．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．

参考文献

- 1) 可視化情報学会：日本の低速風洞，可視化情報，Vol.14，No. 14 Suppl. No. 3 (1994).
- 2) Seo K., Watanabe I. and Murakami M.: Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight, Sports Engineering, Vol.7, No.1 (2004), pp.31-39.
- 3) Seo K., Murakami M. and Yoshida K.: Optimal flight of a V-style ski jumping, Sports Engineering, Vol.7, No.2 (2004), pp. 97-103.
- 4) 谷一郎，三石智：スキー飛躍の空気力学Ⅰ，科学，1951，pp. 117-122.
- 5) 谷一郎，井内松三郎，渡部勲：スキー飛躍の空気力学Ⅱ，スキーの科学，日立，1971，pp.64-78.
- 6) 古野嵩俊：ジャンプが10倍楽しめる観戦ガイドブック，マイクローウェブ，1998.
- 7) 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, 2 (2005), pp.44-64.
- 8) Kohonen, T.: Self-Organizing Maps, Springer, Berlin, Heidelberg, 1995.
- 9) 大林茂：航空機設計空間の見える化，可視化情報，31 (2011), pp.48-53.