

空力特性に基づいたスキージャンプ飛行の最適化

山形大学 瀬尾和哉
(共同研究者) 筑波大学 村上正秀

The Optimization Study of Ski Jumping Flight on the Basis of Aerodynamic Data

by

Kazuya Seo

Faculty of Education, Yamagata University

Masahide Murakami

Institute of engineering Mechanics and Systems,

University of Tsukuba

ABSTRACT

The objective of this study is to reveal the optimum condition that makes the longest flight distance for the flight phase of ski jumping. In other words, the question is how a jumper should control their posture such as the body-ski angle (forward leaning angle) from start to finish to achieve the longest flight distance. Our study was in two parts. The first was obtaining experimental data for an aerodynamic database, and the second was then to optimize the flight distance utilizing the aerodynamic database. We solved the fully optimization problem taking account of the equation of motion on the basis of aerodynamic data. Aerodynamic data are acquired for a wide variety of the angle of attack, the forward leaning angle and the ski-opening angle with a full size model of a ski jumper mounted in the 3-meter low speed wind tunnel. In the optimization study, the forward leaning angle is taken as a control parameter for the maximum flight distance. The result is summarized as follows. In order to reach the maximum flight distance, a jumper should keep their deep

forward leaning angle, that is about 6° during the flight. The flight distance is more sensitive for the head wind velocity than the jumper's skill.

要 旨

本研究の目的は、飛距離最大を達成するために、時々刻々ジャンパーがとるべき姿勢制御法を明らかにすることである。この目的を達成するため、実物大模型を用いた風洞実験と最適化計算を行った。風洞実験では、迎え角、前傾角(体とスキー板の間の角)およびスキーのV字開き角をパラメータとして、揚力、抗力およびピッチングモーメントを計測した。これらの実験データを最小二乗法により近似し、多項式を求めた。これにより、任意の迎え角、前傾角およびスキーのV字開き角に対して、ジャンパーに働く空気力を容易に求めることが可能になった。最適化計算は実験で得られた空気力に基づいて実行し、向かい風・追い風がある場合の前傾角最適制御法を明らかにした。前傾角の最適制御法は、風向きによって定量的に異なるが定性的には等しい。飛距離最大を達成するためには、テイクオフ直後とランディング直前を除いて、前傾角を数度に保つ必要がある。また、向かい風による飛距離増大効果は技術(最適化)による飛距離増加以上に大きいことが明らかになった。

緒 言

1988年にスウェーデン人ジャンパー、ヤン・ボークレフによって、V字スタイルが開発されて以来、スキージャンプ競技における飛距離は増大した。これに伴い、スキージャンプの科学的な研究も再び見直されるようになり、V字スタイルでの風洞実験^{1,2)}がはじめられた。神ら³⁾は、2/5模型でV字スタイルおよびフラットV字スタイルの実験をし、その結果を用いてシミュレーションを行った。滑空途中にフラットV字スタイルから

V字スタイルに変えることで、飛距離がより伸びることを指摘した。吉田ら⁴⁾は、渡部ら¹⁾の空力データを用いて、ピッチングモーメントまでを含めた運動方程式に最適化理論を応用した。しかし、用いた空力データは特に前傾角に対して十分なデータ量ではなかった。

今回は、等身大模型による風洞実験から得られた広範囲の空力データベースを用い、吉田らと同様にピッチングモーメントまでを含めた運動方程式について最適化計算を行った。飛距離最大を達成するために、時々刻々ジャンパーが満たすべき前傾角の制御方法、および向かい風・追い風に対する最適な適応法について議論する。

1. 研究方法

1.1 風洞実験

スキージャンパーに働く空気力を計測するため、風洞実験を行った(図1)。

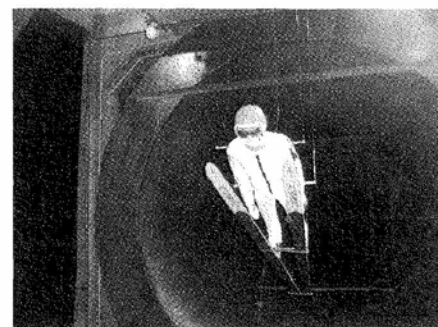


図1 風洞実験

風洞実験では、東京大学先端科学技術研究センターの大型低速風洞と実物大模型を使用した。大型低速風洞は昭和5年、東京帝国大学航空研究所風洞部の設備として建設された。噴出し口が円形で、その直径が3メートルであることから、通称3メートル風洞と呼ばれている。水平に置かれた

単廻路式噴流型(ゲッチングン型)である。送風機のプロペラは八翅木製で直径4メートル。動力は630馬力(470kW)の発電機で直流を発生させて500馬力(373kW)の電動機を駆動し、Ward Leonard式による制御で風速の変化を与えている。最大風速は50m/sである。実物大模型は、葛西紀明選手をモデルとし、身長175cmである。FRP製のマネキン(高知マネキン, カタカタ)をアルミおよびステンレス製の骨組みで補強し、簡易発泡ウレタンで肉付けした。肩、腰、股の関節部分はジャンパーの飛行姿勢に対応できる範囲で可動とした。模型には実際のジャンパーと同様にヘルメット、ゴーグル、ジャンプスーツ(ミズノ特注)、グローブ、ブーツ(アシックス)、スキー板(アトミック2.52m)を装着させた。

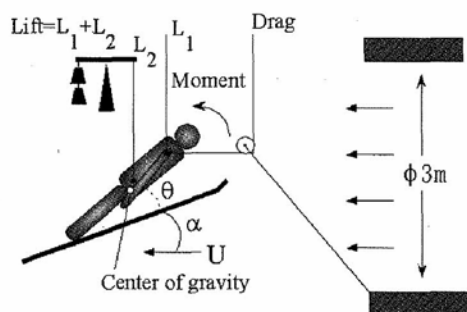


図2 実験の概要図

図2は実験の概要図である。揚力、抗力およびピッチングモーメント(縦3分力)は6分力天秤で計測した。揚力LはL₁とL₂の和である。抗力DはD-wireの張力として得られる。ピッチングモーメントMはL₁, L₂およびDと人体-スキー複合系の重心からそれらの作用点までの垂直距離との積の総和として求めた。頭上げの方向を正に定義した。人体の重心位置は、Chandlerの測定⁵⁾をもとに算出した。実験では、スキー板と飛行経路、つまり空気流方向とのなす角を迎え角α, 体と板のなす角を前傾角θ, およびスキーのV字開き角λを変数として変化させた。迎え角αは0~50°, 前傾角θは0~40°の範囲に、V字開き角λは0, 10

および25°にセットし、計測を行った。風速Uは20または25m/sに設定した。風速U=25m/sはラージヒルのテイクオフ速度に相当する。実験で取得した縦3分力は、式(2-1)~(2-3)に示すように抗力面積SD, 揚力面積SL, モーメント容積QMに変換した。

$$SD = \frac{D}{1/2\rho U^2} \quad (2-1)$$

$$SL = \frac{L}{1/2\rho U^2} \quad (2-2)$$

$$QM = \frac{M}{1/2\rho U^2} \quad (2-3)$$

ここで、ρは空気の密度である。

1. 2 飛行経路の計算

横風等の影響は無視し、人体-スキー複合体の重心は鉛直面内を運動すると仮定した。座標系の原点はカンの端とし、水平右向きにX軸、鉛直上方にY軸とした(図3)。

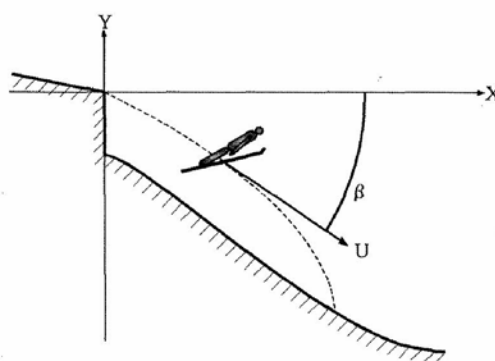


図3 座標系

重心の速度をU, X軸と飛行経路方向のなす角をβとする。飛行経路方向の運動方程式は、

$$m \frac{dU}{dt} = mg \sin \beta - D \quad (2-4)$$

となり、飛行経路方向に垂直な方向の運動方程式は、

$$mU \frac{d\beta}{dt} = mg \cos \beta - L \quad (2-5)$$

となる。ここで、mは人体-スキー複合体の全

質量, g は重力加速度, D は抗力, L は揚力をあ
らわす. 重心周りのモーメント方程式は,

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (2-6)$$

である. ここで, I は人体-スキー複合体の慣
性モーメント, ω は角速度, M は頭上げが正方向
のモーメントをあらわす.

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega \quad (2-7)$$

ω は ϕ の時間微分である. 式(2-4) ~ (2-6)
中の D , L , M の値は風洞実験から得られ, 迎え
角 α , 前傾角 θ およびスキーのV字開き角 λ の関
数である. 飛行経路は, 着地時間を t_f とすると,

$$X = \int_0^{t_f} U \cos \beta dt$$

$$Y = \int_0^{t_f} U \sin \beta dt \quad (2-8)$$

になる.

1. 3 スキージャンプ飛行の最適計算

最適化問題の定式化を式(2-4) ~ (2-8)に対
して行う.

$$\dot{\vec{x}} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \cos \beta \\ U \sin \beta \\ -g \sin \beta - D/m \\ (\frac{L}{m} - g \cos \beta)U \\ \omega \\ M/I \end{pmatrix} \quad (2-9)$$

\vec{x} は状態ベクトルで, 以下のように定義される.

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ U \\ \beta \\ \phi \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

最適化の目的は着地時間 t_f において水平飛距離
 X を最大にすることである. 最適化問題の目的関
数 J は式(2-11)のように与える.

$$J(\theta) = -X(t_f) = -x_1(t_f) \quad (2-11)$$

最適化問題は式(2-9)を拘束条件として, 目
的関数 J を最小にするような $\theta(t)$ を時間 t の関
数として求めることになる. 状態量の拘束条件と
して, 終端時間 t_f においてジャンプ台の高さとジ
ャンパーの高さが一致する, という条件を課す.
ジャンプ台の高さを $Y=G(X)$ とかくと, ジャン
プ台の高さとジャンパーの高さが一致するとは,

$$\Psi = G(X(t_f)) - Y(t_f) = G(x_1(t_f)) - x_2(t_f) = 0 \quad (2-12)$$

とあらわされる. ペナルティー法を用いて目的
関数(2-11)を次のように書き直す.

$$J(\theta) = -x_1(t_f) + c\Psi^2 \quad (2-13)$$

ここで, c はペナルティー係数で, 十分大きな
値にする. 具体的な最適化計算には, 現在の大倉
山ジャンプ台のプロファイルを使った.

1. 4 初期条件

テイクオフ直後の過渡的な過程は0.4秒間⁶⁾と
し, その間に前傾姿勢を完成させ, かつ飛び出し
時, 平行であったスキー板をV字に開く, と仮定
した. よって, 前傾角 θ の最適化はフライト局面
がスタートするテイクオフ後0.4秒から始め, 過
渡的な0.4秒間は質点の自由落下運動と仮定した.
 $t = 0.4$ 秒における初期条件は,

$$\vec{x}(0.4) = \begin{pmatrix} 10.7 \text{ m} \\ 2.3 \text{ m} \\ 27.8 \text{ ms}^{-1} \\ 16.8^\circ \\ 20.0^\circ \\ -20.0 \text{ }^\circ\text{s}^{-1} \end{pmatrix} \quad (2-14)$$

とした. フライト局面のV字開き角は風洞実験
時に設定した 25° で一定とした.

2. 研究結果・考察

2. 1 風洞実験結果

風洞実験結果の代表例として, 図4,5,6に抗力

面積SD, 揚力面積SL, モーメント容積QMの3次元プロットを示す. これらの3次元プロットは実験データを最小二乗法により近似し, 多項式を求め, それらの多項式に基づき描いた図である. それぞれは, V字開き角 $\lambda=25^\circ$ 一定の場合で, α と θ の関数である. 図5,6では, 各 θ に対する最大値を×で表わした. 図4より, SDは α と θ と共に増加する. 図5より, SLは α が小さい範囲では α と共に増加するが, やがて失速が出現し, 減少に転ずる. θ の増加と共に失速角は減少する. モーメント容積QMは α が小さい場合には正だが, α が $20\sim 30^\circ$ の範囲で負に転ずる.

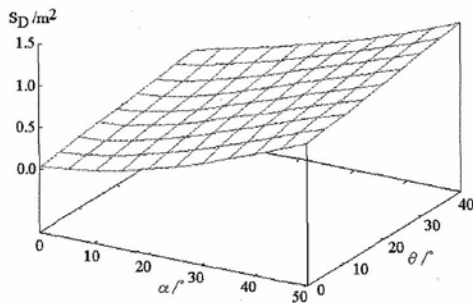


図4 抗力面積 (SD)

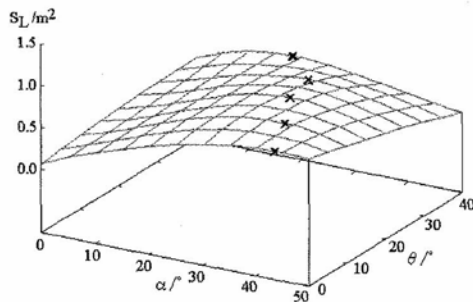


図5 揚力面積 (SL)

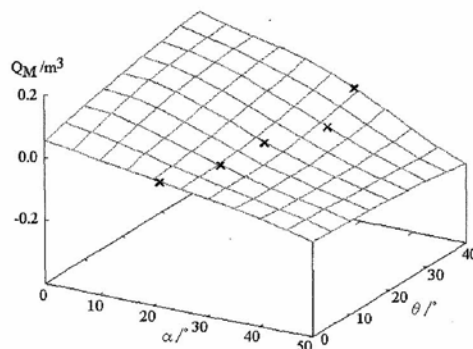


図6 モーメント容積 (QM)

2.2 向かい風・追い風が飛距離に及ぼす影響
向かい風および追い風とスキージャンプの飛距離の関係を図7に示した. 飛距離の計算結果は式(2-9)で述べた飛行軌跡の式, 運動方程式, モーメント方程式を $\lambda=25^\circ$ 一定, $\theta=5,7,10.5^\circ$ でそれぞれ一定, としてルンゲクッタにより解いた結果で, 最適化はしていない. 初期条件は式(2-14)である. 向かい風と追い風の方向は水平方向(図3のX軸に平行)とした. 風速負は向かい風, 正は追い風を表わす. 前傾角 θ をパラメータとした. 飛距離は向かい風が強い(Uが負に大きい)と長くなり, 追い風が強くなるにしたがって, 短くなる. 前傾角 $\theta=5^\circ$ と小さい場合には, 追い風か向かい風か, によって飛距離が大きく異なる. 追い風 $U=1\text{m/s}$ では, 飛距離120m, 向かい風 $U=-1\text{m/s}$ では, 飛距離134mと, 14mも飛距離が長くなる. 同様に, $\theta=7^\circ$ の場合には, 追い風 $U=1\text{m/s}$ では, 飛距離126m, 向かい風 $U=-1\text{m/s}$ では, 飛距離134mと, 8m飛距離が長くなる. 前傾角 $\theta=10.5^\circ$ と大きい場合にも追い風か向かい風か, によって飛距離は異なるが, その差は小さくなる. θ が小さい場合には, 大きい場合に比べてジャンパーが受ける抗力は小さくなる(図4)が, 同時に揚力も小さくなる(図5). スキージャンプにおいて, 飛距離にもっとも大きな影響を与えるのは, 揚力である^{7,8)}. 揚力是对気速度の二乗に比例する. 追い風の場合是对気速度が小さくなるため, 揚力が小さくなる. 加えて, θ が小さい条件では, 揚力は小さくなる. 以上の理由で, θ が小さい場合には追い風の場合に飛距離が極端に減少する, と考える. 逆に向かい風の場合には, 対気速度が大きくなるため揚力が大きくなる. よって, θ が小さくとも飛距離が長くなる. 向かい風が強い場合には, かえって θ を小さくした方が抗力の減少があるため, 飛距離が伸びると考える. 飛距離を増大させるためには, 向かい風の場合には θ を小さめ, 追い風の場合には大きめにと

良い。定量的には、向かい風もしくは追い風の風速によって、飛距離を増大させるための θ の値は異なる。ただし、実際的な向かい風、追い風の範囲 $-1 < U < 1 \text{ m/s}$ では、 $\theta = 7^\circ$ 近傍の姿勢を保つことが飛距離増大につながる。

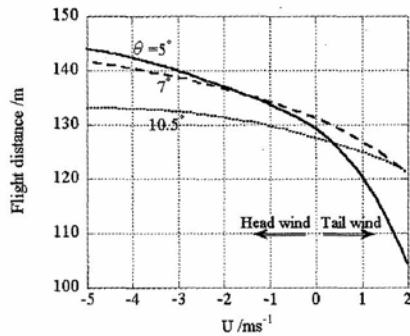


図7 向かい風・追い風が飛距離に及ぼす影響

2. 3 向かい風・追い風に対する最適制御

図8は前傾角 θ の最適制御例である。パラメータ U は水平(X軸)方向の風速をあらわす。 $U=1$ は追い風 1 m/s 、 $U=0$ は無風、 $U=-1$ は向かい風 1 m/s である。定性的にはほぼ同様である。無風時を例にとると、テイクオフ直後は 10° 以上の値で、その後、約1.5秒までかけて、 5° 近くまで減少させる。その後は、ランディング直前の4秒過ぎまで 6° 近傍に値を保ち、最後にまた 10° 付近にまで戻す。以上が、飛距離最大を達成するための前傾角の最適制御例である。定量的には風速が大きいほど前傾角 θ の値は大きくなる。追い風が強いとジャンパーの対気速度は小さくなるため、大きな揚力を得るために θ を大きくしなければならない。ジャンパーとスキー板はつま先の一点で接触しているため、実際の競技中に前傾角 θ を制御することは不可能である。しかし、スキー板上のビンディングとブーツの踵を繋ぐ紐の長さを調整することにより、前傾角を一定にして飛行することは可能である。ビンディングとブーツの踵を繋ぐ紐の長さは、追い風時には短め、向かい風時には長めに調整する必要がある。飛距離は向かい風 1 m/s で 135 m 、追い風 1 m/s で 127 m であった。図7で示した最適化してない $\theta = 7^\circ$ 一定の

場合の飛距離に比べて、それぞれ 1 m ずつ長くなった。この場合、ジャンパーの技術により、飛距離は 1 m 伸びる可能性がある、と言える。風向きによる飛距離増大効果は技術(最適化)による飛距離増加以上に大きい。

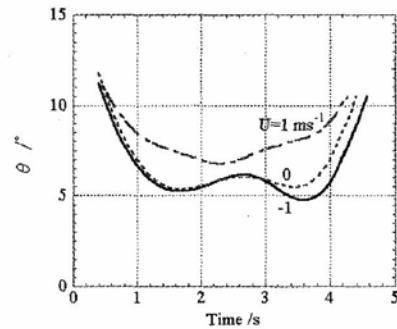


図8 前傾角の最適制御

3. まとめ

風洞実験と最適化計算により、スキージャンプ飛行に関して前傾角の最適化を行った。その結果は次のようにまとめられる。

- ・ジャンパーに働く空気力を決定するための多項式を求めた。
- ・同じ姿勢制御法ならば、向かい風の場合の方が追い風の場合よりも飛距離は長くなる。
- ・飛距離最大を達成するためにはテイクオフ直後とランディング直前を除いて、前傾角を 6° 前後に保たなければならない。
- ・風向きによる飛距離増大効果は技術(最適化)による飛距離増加以上に大きい。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

この報告書をまとめる際にご協力くださった山形大学教育学部人間環境課程情報教育コース4年生の太田香織さんに厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 渡部和彦；ジャンプ；V字飛行の研究と競技への応用, 体育の科学, 42, 5, pp.375-379 (1992)
- 2) 渡部勲 ほか；スキー飛躍の空気力学（開脚姿勢の効果）, 日本航空宇宙学会第23期年会講演集, pp.206-207 (1992)
- 3) 神 博；スキージャンプにおける空中期の動作と飛距離の力学的研究, 筑波大学大学院修士論文 (1992)
- 4) K.Yoshida ; Investigation of Optimal Ski Jump Flight on the basis of Aerodynamic Data, Master Thesis, Univ. of Tsukuba (1998)
- 5) R. F. Chandler ; Investigation of Inertial Properties of the Human Body (1975)
- 6) 小早川命, 近藤喜彦；スキージャンプの飛行力学. 科学, 55 (3) pp.185-190 (1985)
- 7) 谷一郎 ほか；スキー飛躍の空気力学Ⅱ, 日立 (1971)
- 8) Kazuya Seo, et. al. ; The optimization of flight distance in ski jumping, *The Engineering of Sport*, 4, pp.408-414 (2002)