

Optimal Control of V-style Ski Opening Angle during Ski Jumping Flight

○ 瀬尾和哉 (山形大教育), 渡部勲 (東大先端研), 三浦明子 (山形大教育),
五十嵐麻貴 (山形大教育), 村上正秀 (筑波大機工系)

Kazuya SEO*, Isao WATANABE**, Akiko MIURA*, Maki IGARASHI* and Masahide MURAKAMI***

*Faculty of Education, Yamagata University, Yamagata 990-8560, Japan

** Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo 153-8904, Japan

***Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8573, Japan

Ski jumpers have been struggling to control their V-style ski-opening angle from time to time in order to make the longest flight distance. They have acquired their own angle control techniques based on their experiences and coaches' advice. It has been desired to make clear how to control V-style ski-opening angle on the basis of aerodynamics as well as empirical knowledge. This is thus the very objective of this study. In this study, the ski-opening angle is chosen as a control parameter as well as the angle of attack or the forward leaning angle for the maximum flight distance. It is found that the ski-opening angle increases with the increase of time in the first half of the flight, and it slightly decreases after the maximum value of 38° is attained in the second half. The optimized flight distance is comparable with the winner's one

1. はじめに

スキージャンパーはジャンプ台から空中に飛び出すと、より大きな飛距離を得るために、スキーの V 字開き角等を時々刻々制御する。これまでのバイオメカニクス的な研究によって、一流ジャンパーの V 字開き角や迎え角の制御方法は明らかになったが、これら制御方法は選手やコーチの経験にもとづいているため、様々な方法がある。選手達はどの制御方法が最適なのか、試行錯誤しているのが現状である。このような局面を打開し、さらに競技力を向上させるためには、確固とした基礎学理にもとづき、科学的に裏づけされた制御方法を明らかにすることが必要である。このような考えの下、我々はこれまでに実物大模型を用いてスキージャンプの飛行局面の模擬した風洞実験を行い、縦三分力（抗力、揚力、ピッチングモーメント）をデータベース化した¹⁾。今回は、このデータベースを能動的に応用した多変数関数の最適化計算を行い、飛距離を最大にする V 字開き角の時々刻々の変化について調べた。

2. 風洞実験

実験では、Fig.1 に示す迎え角 α 、前傾角 θ 及び V 字開き角 λ を変数として変化させた。迎え角 α は $0 \sim 50^\circ$ 、前傾角 θ は $0 \sim 40^\circ$ の範囲に、V 字開き角 λ は $0, 11$ 及び 25° にセットし、計測を行った。速度が U 、水平軸と速度のなす角を β 、水平軸と体のなす角を ϕ 、揚力・抗力をそれぞれ $D \cdot L$ とした。 m は人体ースキー複合体の全質量、 g は重力加速度である。実験で取得した縦三分力は、(2-1)に示す抗力面積 SD 、揚力面積 SL 、モーメント容積 QM に変換した。

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

ここで、 ρ は空気の密度である。

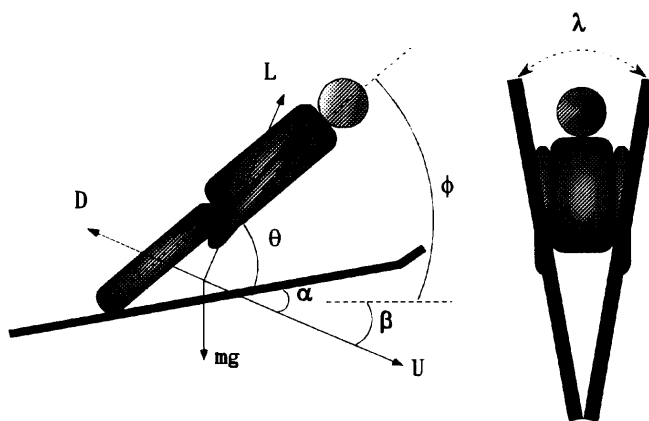


Fig.1 Definition of characteristic parameters.

3. スキージャンプの運動方程式

人体ースキー複合体の重心は鉛直面内を飛行すると仮定する。飛行経路方向の運動方程式は、Fig.1 より

$$m \frac{dU}{dt} = mg \sin \beta - D \quad (3-1)$$

となり、飛行経路方向に垂直な方向の運動方程式は、

$$mU \frac{d\beta}{dt} = mg \cos \beta - L \quad (3-2)$$

となる。重心周りのモーメント方程式は、

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (3-3)$$

である。ここで、 I は人体ースキー複合体の重心周りの慣性モーメント、 ω は角速度、 M は頭上げが正のモーメントをあらわす。 ω は $\phi = (\alpha + \theta - \beta)$ の時間微分である。(3-1)~(3-3)中の D, L, M の値は風洞実験から得られる。飛行経路は、着地時間を t_f とすると、

$$X = \int_0^{t_f} U \cos \beta dt \quad Y = \int_0^{t_f} U \sin \beta dt \quad (3-4)$$

になる。

4. 最適計算例

最適計算の結果を Fig.3 に示す。ジャンプ台は大倉山ジャンプのラージヒルとした。テイクオフ時の速度は $U=25\text{m/s}$ で、その方向は $\beta = -11^\circ$ （水平軸より下向き）とした。Fig.3 はモーメントの式(3-3)を無視した場合の結果である。制御変数を α 及び λ として計算を行った。飛距離は約 140m であった。この値はワールドカップの優勝記録にほぼ等しい。スキーの開き角 λ は時間とともに増加し、後半に最大値 38° となり、その後減少に転ずる。

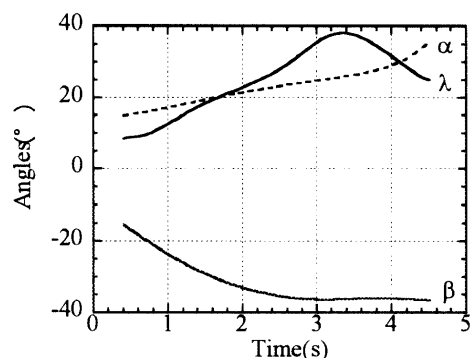


Fig.3 Optimal angles as a function of time.

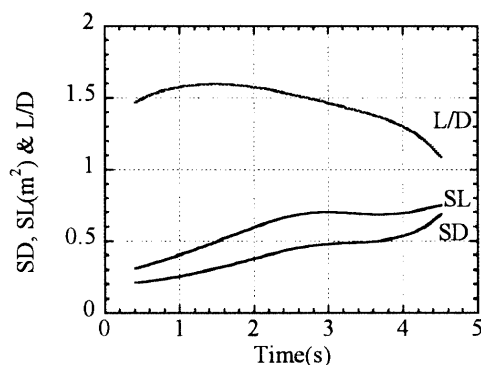


Fig.4 Drag and lift areas as a function of time.

Fig.4 は Fig.3 に対応する抗力面積 SD と揚力面積 SL 及び揚

抗比 L/D である。飛行の前半は抗力が小さく、後半には揚力が大きくなる。Table1 は各計算例の飛距離を比較した表である。①は姿勢一定 ($\lambda=11, \theta=10, \alpha=40^\circ$) の下での計算例²⁾で、飛距離は 85m であった。②~④は最適化計算の結果である。②の制御変数は θ で、運動方程式は (3-1)、(3-2) 及び (3-3) を考慮した。スキーの開き角 λ は 11° で一定とした³⁾。最適化することにより、飛距離が 27m 伸びた。③では、制御変数が α と λ で、モーメントの式 (3-3) を無視した場合である。Fig.3 及び 4 はこの場合の計算結果である。迎え角 α に加えて、スキー開き角 λ も最適化することで、飛距離がさらに伸びた。④は、制御変数が θ と λ 、運動方程式は全てを考えた場合である。モーメントの式が拘束条件として加わったため、③の場合よりも飛距離が短くなった。

	制御変数	一定値とした変数	運動方程式	飛距離
①	無し	$\lambda=11, \theta=10, \alpha=40^\circ$	(3-1, 2)	85 m
②	θ	$\lambda=11^\circ$	(3-1, 2, 3)	112 m
③	α & λ	無し	(3-1, 2)	140 m
④	θ & λ	無し	(3-1, 2, 3)	139 m

Table 1 Comparison of the flight distance.

5. まとめ

飛距離最大を目的とした V 字開き角の時間変化を風洞実験と最適化計算により、明らかにした。飛距離を最大にするためには、V 字開き角は時間とともに増加させ、飛行の後半で最大値に達した後、減少させる。最適化した飛距離は、ワールドカップの優勝記録にほぼ等しい。

謝辞

本研究は文科省科研費 (13750840, 2001) の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) 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及び前傾角依存性, 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集(1999)83-86.
- 2) 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, 日立(1971)64-78.
- 3) 瀬尾和哉, 渡部 勲, 村上正秀, 池口拓也, 三浦明子, 五十嵐真貴: スキージャンプ飛翔における前傾角の最適化, 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集(2000)135-139.