

スキージャンプスーツ用生地を通気量と空力特性の 関係解明と飛距離最大を目指した高性能スーツの提案

宇都宮大学 前田 龍 生

Elucidation of The Relationship between Aerodynamic Characteristics and Air Permeability of Ski Jumping Suit and Proposal of High-performance Suit to Achieve The Maximum Flight Distance

by

Ryusei Maeta
Utsunomiya University

ABSTRACT

Ski jumping competition is a sport that competes in term of the total point of "Distance Point" that digitizes the flight distance and "Judges Point" that digitizes the beauty of flight attitude and landing, and ski jumpers attempt to fly as far as possible. In competition, there are many regulations to ensure fairness. In the international ski jumping competition rules, suit fabric must show the air permeability of a minimum of 40 liters per m^2/sec under 10 mm water pressure. However, the effect of air permeability of suit fabric on aerodynamic characteristics has not been completely clarified yet. The purpose of this study is to investigate the effect of air permeability of suit fabric on aerodynamic characteristics. Four types of fabric with different air permeability are used and the wind tunnel experiments were carried out using the fabric clothed elliptic cylinder. The drag coefficient decreases with increasing the air permeability. Also, the stall delay occurs for the fabric with high air permeability, and the lift to drag ratio at the high angle of attack can be improved. Furthermore, it was confirmed that the velocity profiles near the surface show the different tendency for

different air permeability fabric. It is presumed that the aerodynamic performance of ski jumpers during a flight can be improved by depending on the air permeability of the ski jumping suits fabric. The flight distance for each fabric was calculated with the aerodynamic force data assuming that the elliptic cylinder flies. Case-2 with increased air permeability have longer flight distances than Case-1 (original air permeability).

要 旨

本研究ではスキージャンプスーツ生地を通気量に注目し、通気量と空力特性の関係を明らかにすることを目的とする。通気量の異なる生地を数種類用意し、これを楕円柱に巻き付けて風洞試験を行った。楕円柱に作用する流体力は3分力天秤を、生地近傍の流れ場は熱線風速計を用いて測定した。楕円柱周りの流れはスモークワイヤ法による可視化を行い評価した。また、取得したデータを考慮し楕円柱がスーツを巻いて飛行すると想定した場合の飛距離を試算した。

流体力測定では、オリジナルの生地よりも通気量を増加させた Case-2 において最も失速角が後退した。熱線風速計による測定結果より、Case-2 で楕円柱後縁側の生地近傍において他の生地と比較して増速が見られた。また、飛距離計算の結果から現在の空気通気量の規定値以上においても、飛距離が延伸する可能性を示すことができた。

緒 言

スポーツスーツの性能はスポーツの勝敗において重要な役割を果たしている。特に高速運動が特徴的なスキー、スピードスケート、自転車競技などは、着用するスーツの空力特性が重要な役割を担っている。空力特性はスーツの表面形状、素材、厚み、空気通気量などから影響を受ける。それ故、スーツの開発に風洞試験や数値解析を用いることで、これらのスポーツの成績向上に大きく貢献している¹⁾。その中でもスキージャンプにおいては

縫い目の方向による影響を考慮し、体の各部位に反映させることで揚抗比が向上したとの報告がある²⁾。

スキージャンプ競技は飛距離と飛行中や着地の美しさや大胆さをそれぞれ数値化し、その合計点で勝敗を競う競技である。飛距離を数値化した飛距離点は、より遠くへ飛べば飛ぶほど点数が加算されるため、高得点を出すために飛距離を伸ばすことは非常に重要である。飛距離を伸ばすためには、飛翔中の競技者に作用する揚力を増大させる必要があり、これは流体力学的観点で解析可能である。スキージャンプスーツの性能は流体力と密接な関係があるため、競技ではスーツに多くの規定が設けられている。その規定の1つにスーツの空気通気量がある。一般的に空気通気量が少ない方が有利と考えられているため、その下限値のみが規定されている（差圧10mmAq時で40L/m²/s以上³⁾）。しかし、スーツの空気通気量が空力特性に及ぼす影響は十分には明らかになっていない。

そこで本研究では、空気通気量の異なるスーツの生地を数種類用意し、それらを楕円柱に巻き付けて風洞試験を行った。楕円柱に作用する流体力は3分力天秤を、生地近傍の流れ場は熱線風速計を用いて測定した。楕円柱周りの流れはスモークワイヤ法による可視化を行い評価した。また、取得した流体力のデータを考慮し楕円柱がスキージャンプスーツを巻いて飛行すると想定した場合の飛距離を試算し、通気量の違いが飛距離に及ぼす影響を調べた。

1. 実験装置及び方法

1.1 スキージャンプスーツ

図1にスキージャンプスーツの構造を示す。生地は厚さは5.5mmであり、図に示すように三層構造になっている。外層と内層はシャルムーズ生地（パターン表記法）と呼ばれる織物である。素材は81% polyamid gloss dtex 44f12 19% : Elasthane (Lycra) dtex 44f1である。重量は約180/190g/m²である。中間層はスポンジ状の発泡材料である。スーツの生地の通気量は、図1に示す中間層の既存の穴の数と大きさによって調整されている。中間層の穴は円形で、直径は約1mmである。穴の数は1m²あたり約14000個である。本研究ではオリジナルの生地（Case-1）に加えて、中間層の穴を拡張させた生地（Case-2）、Case-2の状態からさらに穴の数を増やした生地（Case-3）、裏面にテープを隙間なく貼ることで通気性を無くした生地（Case-0）の4種類の生地を用いた。また、生地の通気量は通気量測定装置を製作して実測した。図2に通気量測定装置の概

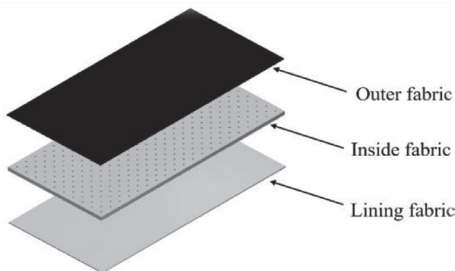


図1 Ski jumping suit fabric

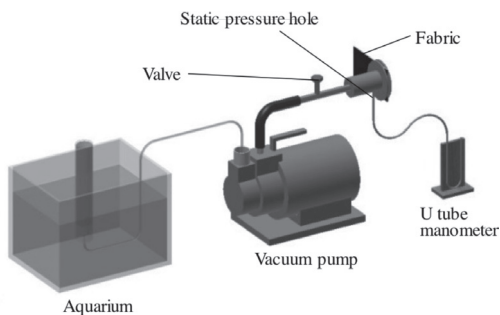


図2 Schematic of air permeability experiment

略図を示す。それぞれの通気量の生地を真空ポンプの上流側に取り付け、空気を透過させる。透過された流量は水上置換法を用い、一定の容器に空気が溜まるまでの時間を測定することで算出する。差圧はU字管マンオメーターを用い、片方を生地の下流側にある静圧孔に繋ぎ、もう片方は大気に開放し、水柱差が10mmの状態を測定した。表1に通気量測定の結果を示す。

表1 Fabric air permeability

Fabric (L/m ² /s)	Case-0	Case-1	Case-2	Case-3
	0.0	43.4	58.2	65.8

1.2 試験モデル

図3に本研究で使用した試験モデルを示す。試験モデルはNACA0012翼と楕円柱を用意した。NACA0012翼は本研究で生地の取り付け等の問題点があり、今後の改善につながる成果を得られた。本研究においては楕円柱の実験結果のみで評価する。使用した楕円柱は、楕円長軸長さ150mm (c=150)、短軸長さ90mm (b=90)、高さ200mm (h=200)である。これに製作した生地を巻き付けて実験を行った。

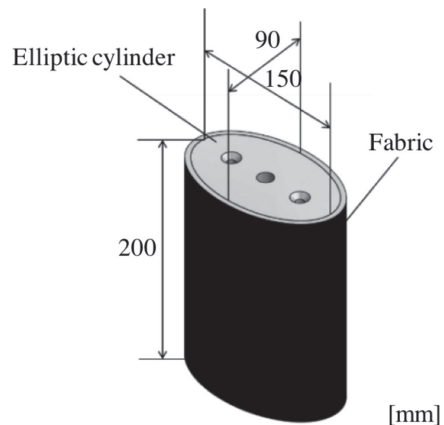


図3 Schematic of the fabric clothed elliptical cylinder

1.3 風洞試験概略図

図4に流体力測定と流速測定の概略図を示す。

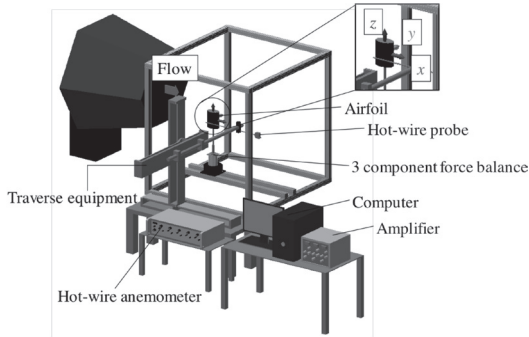


図4 Experimental apparatus of force balance system

流体力測定と流速測定には東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を使用した。楕円柱の中心を原点とし、主流方向を x 、高さ方向を y 、スパン方向を z とする。楕円柱は下から片持ちで支持した。本研究では主流速は $U=20\text{m/s}$ で実施した。この時、楕円柱の長軸長さ c を代表寸法とした主流レイノルズ数は $Re=1.0\times 10^5$ である。図5に楕円柱の迎え角 α の定義を示す。迎角 $\alpha=0^\circ$ は楕円長軸が主流方向に平行な角度とし、迎角を $0^\circ\sim 60^\circ$ まで増加させて測定した。流体力測定では、3分力天秤 (LMC-3501-100N, NISSHO-ELECTRIC-WORKS) を使用した。また、境界層プローブを用いて x - y 断面の速度プロファイルを測定し、流れ場の評価を行った。測定位置の移動にはトラバース装置 (HXYx - CUSTOM, RX-240S, YAMAHA) を使用した。

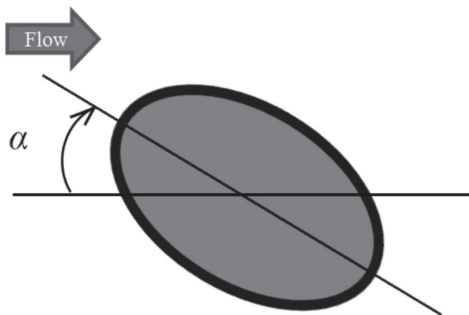


図5 The definition of an angle of attack of the elliptic cylinder

図6に可視化実験の概略図を示す。スモークワイヤ法による可視化実験では、スモークワイヤ

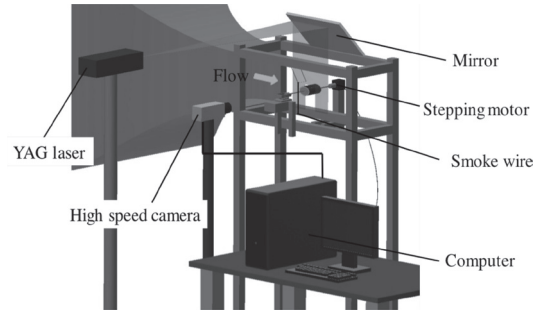


図6 Experimental setup of flow visualization

は z 軸と平行になるように設置した。また、ワイヤを張る位置は自由に設定することができるように製作し、本研究では楕円柱前縁の生地近傍に設置して実験を行った。撮影は、ハイスピードカメラ (MEMRECAM GX-8F, nac image technology) を使用した。 x - y 平面にレーザーシート光を照射し、カメラのフレームレートを 1000fps に設定し、画像を取得した。

1. 4 飛距離計算

飛距離の計算では、本実験で使用した楕円柱が実際のジャンパーと同じように飛翔した際の飛距離計算をそれぞれの生地を巻き付けた状態で行った。飛距離計算には実際のジャンパーモデルに作用する力から飛距離を算出する方法^{4,5)}を参考に実施した。図7にジャンパーの角度の定義を示す。ジャンパーの座標系は水平方向を X_E 、垂直方向を Z_E とする。ジャンパーの飛行速度を V とし、スキー板に平行な方向の速度を U 、垂直な方向を W とする。飛行速度 V に対するスキー

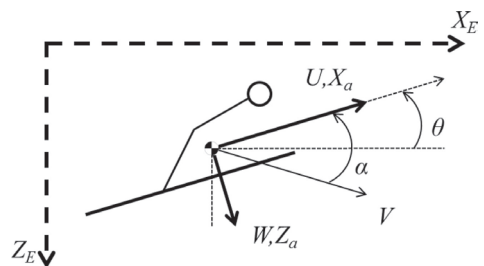


図7 The angle of ski jumper

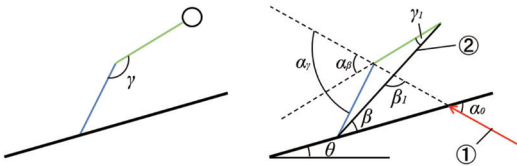


図8 The angle of upper and lower body of ski jumper

板の迎角を α とし水平方向とスキー板のなす角を θ とする. 計算するにあたってジャンパーの迎角 α はジャンパーの飛翔中の角度を画像で解析した結果⁶⁾を参照した. ジャンパーの上半身と下半身の迎角を算出する際には図8を用いた. 論文中では主流(赤い矢印)に対してスキー板の角度 α_0 , スキー板に対してジャンパーの角度 β , ジャンパーの腰の角度 γ が示されている. これらの角度とジャンパーの上半身と下半身の長さは同じと仮定し, 計算を行った. 主流の方向を表す線を①とし, ジャンパーの脚の部分から頭までを繋いだ線を②とする. 上半身の迎角 α β は図8に示すように①の線と上半身を表している黄緑線を延長させてできる部分の角度 α β である. まず, ①の線と②の線とスキー板でできる三角形の α_0 と β 以外の β_1 の角度の部分を求める.

$$\beta_1 = 180^\circ - \alpha_0 - \beta \quad (1.1)$$

次にジャンパーの上半身と下半身を表す黄緑線と青い線と②の線のできる三角形の γ 以外の γ_1 の角度を求める. 黄緑線と青い線は同じ長さとすることで二等辺三角形となり片側の角度が γ から求めることができる.

$$\gamma_1 = \frac{180^\circ - \gamma}{2} \quad (1.2)$$

先ほどの α_0 と β から求めた角度と γ から求めた角度を使って α β を求めると以下ようになる.

$$\alpha_\beta = \alpha + \beta + \frac{\gamma}{2} - 90^\circ \quad (1.3)$$

上記の式を使ってジャンパーの上半身の迎角を

計算した.

次に下半身の迎角 α_γ は②の線と青い線と①の線の延長で囲まれた四角形の角度の計算で求めることができる. 四角形のすべての角の角度の合計は 360° であるので式 (1.1), (1.2) を使うことで求めることができる. 式は以下の通りになる.

$$\alpha_\gamma = 360^\circ - (180^\circ - \alpha_0 - \beta) - \left(\frac{180^\circ - \gamma}{2}\right) - \gamma$$

$$\alpha_\gamma = \alpha_0 + \beta - \frac{\gamma}{2} + 90^\circ \quad (1.4)$$

先に述べたとおり, 本実験で使用した楕円柱における飛距離計算であるため迎角は楕円柱の迎角とした. また, ジャンパーの部位によって主流に対して様々な迎角が定義できるが, 本研究では上半身における迎角を楕円柱の迎角として計算を実施した.

次に飛距離計算方法を示す. 測定した揚力 L , 抗力 D , を用いてスキー板に水平な力 X_a , スキー板に垂直な力 Z_a を算出する.

$$X_a = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (1.5)$$

$$Z_a = -L \cos \alpha - D \sin \alpha \quad (1.6)$$

式 (1.5), (1.6) から \dot{U} , \dot{W} を計算する. なお g は重力加速度, m は質量である.

$$\dot{U} = \frac{1}{m} [X_a - mg \sin \theta] \quad (1.7)$$

$$\dot{W} = \frac{1}{m} [Z_a - mg \cos \theta] \quad (1.8)$$

速度 U , W を計算し X_E 方向, Z_E 方向の変移を算出する.

$$X_E = U \cos \theta + W \sin \theta \quad (1.9)$$

$$Y_E = -U \sin \theta + W \cos \theta \quad (1.10)$$

以上の式から変移を計算し, ジャンプ台のプロファイルと比較を行って飛距離を求めた. なおジャンプ台のプロファイルは大倉山スキー場のジャンプ台のプロファイルを使用した. なお, 飛距離計算はカンテと呼ばれる選手が踏み切る位置から計算を開始した.

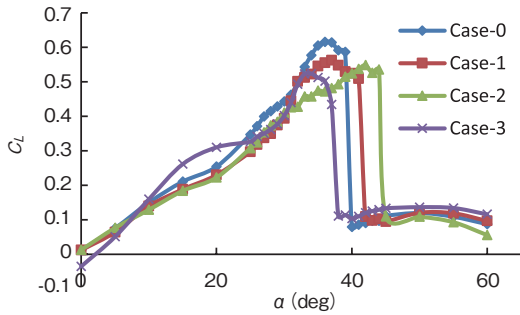


図9 Lift coefficient curves

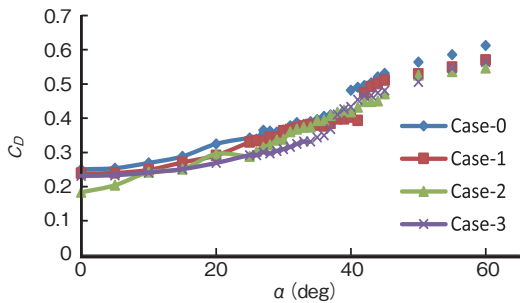


図10 Drag coefficient curves

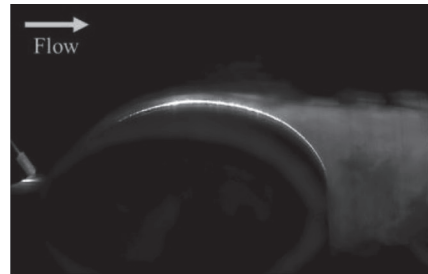
2. 実験結果及び考察

2. 1 流体力測定結果

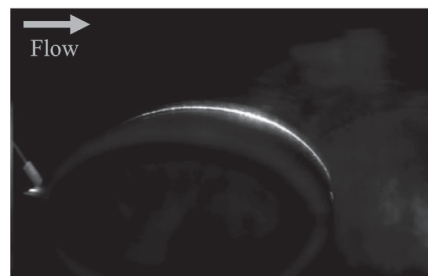
流体力測定の結果を図9, 10に示す。図5は $Re = 2.0 \times 10^5$ における流体力をまとめたグラフである。図9の揚力係数 C_L のグラフでは、通気量のないCase-0で最大揚力係数が最大となった。失速角については、オリジナルの生地であるCase-1よりも通気量を増加させたCase-2で後退が見られた。しかし、さらに通気量を増加させたCase-3では失速が早まった。よって通気量の違いにより最大揚力係数と失速角に影響を及ぼすことが分かった。一方で、図10の抗力係数 C_D のグラフでは、本研究の通気量の範囲では通気量が増加するにつれて抗力係数は減少した。したがって、実際のジャンパーの上半身の迎角は 35° から 45° の間で変化しながら飛行する⁷⁾ことを考慮すると、通気量を増加させた場合ジャンパーの飛行中の迎角における揚抗比の改善が期待できる。

2. 2 可視化実験結果

可視化実験によって取得した画像を図11に示す。図11は迎角 $\alpha = 0^\circ, 14^\circ, Re = 1.0 \times 10^5$ の時



$\alpha = 0^\circ$, Case-0



$\alpha = 0^\circ$, Case-2



$\alpha = 14^\circ$, Case-0



$\alpha = 14^\circ$, Case-2

図11 Smoke flow visualization around elliptic cylinder

の Case-0, Case-2 の可視化画像である. $\alpha=0^\circ$ の画像は, ワイヤの位置を $x/c=-0.52$, $y/c=0.13$ に設置した時のものであり, Case-0 では楕円柱上面の表面近傍に煙が確認できるのに対し, Case-2 ではそのような煙を確認することができない. これは, 通気量を増加させることにより生地内部に流れが入り込んでいるためと推測される. 一方で, $\alpha=14^\circ$ の画像は, $x/c=-0.38$, $y/c=0.26$ に設置した時のものであり, 生地に沿って流れる煙に通気性の有無で後縁側において異なる振る舞いが見られた. これは, 生地内部に入り込んだ流れが表面に流出することによって, 楕円柱上面の流れに影響を及ぼしたためである. そのため, 流体力測定結果で示したように通気量を増加させることにより失速特性に違いが見られた.

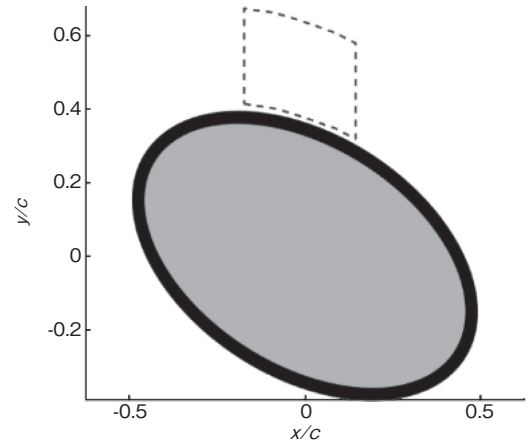


図12 Measurement region by using hot wire anemometer

2. 3 速度分布

熱線プローブによる速度分布は図12に示すように, $x/c=0.17$ から $x/c=-0.14$ の範囲で測定した. 計測ではサンプリングレート 4000Hz, サンプル数 12000 点で行った. 速度分布は図13に示す.

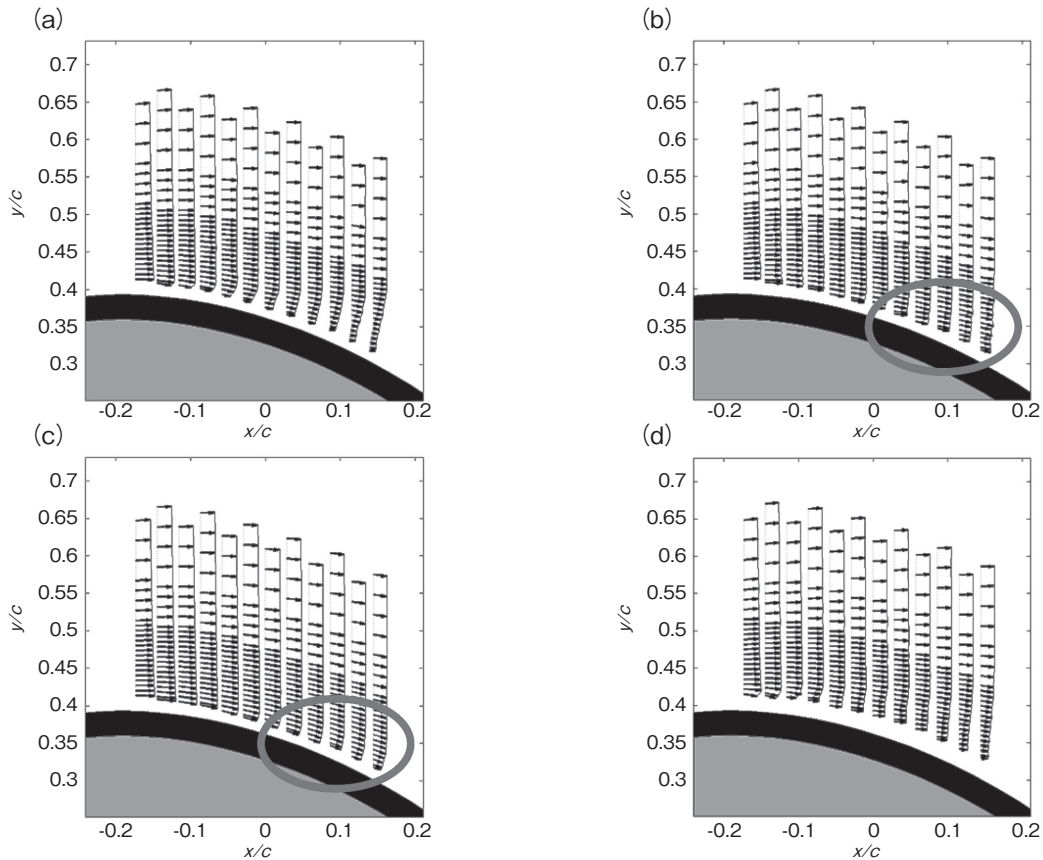


図13 Velocity profiles on elliptic cylinder ($\alpha = 30^\circ$)
(a) Case-0, (b) Case-1, (c) Case-2 and (d) Case-3

迎角はすべての生地で $\alpha=30^\circ$ であり、主流速は $U=20\text{m/s}$ である。オリジナルの通気量の Case-1 (図 13(b)) と通気量が無い Case-0 (図 13(a)) の生地近傍の流れ場を比較すると、Case-1 の生地では図で示す太線の円で囲った部分で増速がみられた。オリジナルの通気量よりも大きい Case-2 (図 13(c)) でも同様に増速がみられた (図中の円内)。一方でさらに通気量が Case-2 よりも大きい Case-3 (図 13(d)) では増速はみられなかった。これらは生地の通気性が生地近傍の流れに影響を与えているためである。

2. 4 飛距離計算

飛距離計算の初期条件として楕円柱はジャンプ台端の水平になる位置からカンテの位置までの 86.558m の高さから飛び出したと仮定した。飛び出し時の速度は小早川らの論文⁵⁾を参照し 25.5m/s とした。飛距離計算結果を表 2 に示す。

表2 Flight distance of the fabric clothed elliptic cylinder

Fabric	Case-0	Case-1	Case-2	Case-3
Flight distance (m)	49.82	50.88	54.83	46.52

通気量を増加させた Case-2 の飛距離が Case-1 よりも延伸した。これは失速角の後退によって高迎角時の揚抗比が改善されたためである。一方で Case-2 よりもさらに通気量を増加させた Case-3 では飛距離は延伸しなかった。これは、Case-3 では失速角の後退が起きなかったため高迎角時の揚抗比が改善されなかったためである。

今回の飛距離計算では楕円柱に作用する流体力をもとに楕円柱が実際の選手と同様の迎角変化を時間基準で変化しながら飛翔したと仮定して飛距離計算を行った。よって実際の選手に作用する流体力と楕円柱に作用する流体力には違いがあるため選手の結果よりも飛距離が短い値となった。つまり、時間基準による迎角変化では楕円柱の飛翔とは合わないためこのような差異が生じたと考え

た。

本研究の結果より失速角付近の高迎角時に限っては高通気量生地にすることで飛距離の延伸につながる。しかしながら実際のジャンパーの体は楕円柱と比較して複雑な形状をしていることから体の部位ごとに適正な通気量値が存在すると推測される。したがってジャンパーが着用するスーツへ応用するには詳細な検討が必要となる。

結 言

楕円柱に通気量を変化させたスキージャンプスーツ生地を巻き付けて風洞試験を行い、通気量と空力特性の関係について調べた。流体力測定では、オリジナルの生地よりも通気量を増加させた Case-2 において最も失速角が後退した。また、今回行った通気量の範囲では通気量が増加すると抗力係数は減少した。熱線風速計による測定結果より、Case-2 で楕円柱後縁側の生地近傍において他の生地と比較して増速が見られた。流体力測定の数値をもとに行った飛距離計算の結果から、現在の競技における通気量の規定値以上においても飛距離が延伸する可能性を示すことができた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を承りました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。本報告書は元々本学で行っていた研究をまとめたものとなっております。本研究において親切かつ的確にご指導いただきました宇都宮大学の長谷川裕晃教授、筑波大学の村上正秀名誉教授、山形大学の瀬尾和哉教授に深く感謝申し上げます。また風洞試験時の測定方法、測定技術に関してご助言いただきました東北大学流体科学研究所の小西康郁氏、奥泉寛之氏に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Chowdhury H., Alam F., Mainwaring D.E., Subic A., Tate M., Forster D., Methodology for aerodynamic testing of sports garments. The Proceeding of the 4th BSME-ASME, *International Conference for Thermal Engineering*, 1: 409-414 (2008)
- 2) Chowdhury H., Moria H., Alam F., Subic A., Aerodynamic of ski jumping suits. *Sports Technology, August–November*, 4(3-4) : 164-170 (2011)
- 3) International Ski Federation, Specifications for competition equipment and commercial markings, (online), available from <http://www.fis-ski.com/mm/Document/documentlibrary/Marketing/04/30/53/Competitionequipment_1617_11072016_clean_English.pdf>, (参照日 2018年 8月 31日)
- 4) Murakami M., Iwase M., Seo K., Ohgi Y., Koyanagi R., Ski jumping flight skill analysis based on high-speed video image. *Procedia Engineering* 2: 2381-2386 (2010)
- 5) 小早川命, 近藤喜彦, スキージャンプの飛行力学, 科学, 55: 185-190 (1985)
- 6) Schmolzer B., Muller W., Individual flight styles in ski jumping: results obtained during, *Journal of Biomechanics*, 38: 1055–1065 (2005)
- 7) Murakami M., Iwase M., Seo K., Ohgi Y., Koyanagi R., Ski jumping flight skill analysis based on high-speed video image. *Procedia Engineering* 2: 2381-2386 (2010)