

原著論文

環境や体格を考慮したスピードスケートスーツの生地選択：
溝つきニット生地の微細な表面形状変化と空力の関係に着目して

Fabric selection for speed skating suits based
on the atmospheric conditions and the athletes morphology :
Focusing on the relationship between micro-surface shape
changes and aerodynamics of grooved knit fabrics

鈴木功士^{1),2)}, 山辺芳¹⁾, 前田明³⁾

Koshi Suzuki^{1),2)}, Kaoru Yamanobe¹⁾, Akira Maeda³⁾

Abstract : Aerodynamic drag in speed skating is also reduced by equipment. Among them, many studies have been reported on the reduction of aerodynamic drag by suits. However, the relationship between the aerodynamic properties of grooved knit fabrics and the change in their micro-surface shape has not been clarified. Therefore, this study conducted the circular cylinder model wind tunnel experiments on two types of grooved knit fabrics (Type A and Type B) with different micro-surface shapes. In addition, a full-scale model of a skater wind tunnel experiments were conducted on two types of one-piece suits (Suit A and Suit B) with different grooved knit fabrics used near the thighs. In the circular cylinder model experiment, the onset of criticality for Type A was in the lower speed range than for Type B. In a full-scale model of a skater experiment, the onset of criticality was slower in Suit A than in Suit B. Groove depth (Type A>Type B) may have affected the criticality. In addition, it is necessary to consider the environment of the competition venue, the physique of the athlete, and the speed of the skater when choosing between grooved knit fabrics. Suit A and Suit B use for 0.45 m (height 1.58 m) $\leq L \leq$ 0.53 m (height 1.84 m) at Heerenveen (elevation 0 m) was as follows. The Male 500 m was Suit B at any L, the Male 1000 m to 1500 m and Female 500 m to 1000 m events required the use of Suit A and Suit B depending on L, and the Male 5000 m and above and Female 1500 m and above were Suit A at any L.

Key words : sports fabric, wind tunnel, aerodynamic drag, air density

キーワード : スポーツ用生地, 風洞, 空気抵抗, 空気密度

¹⁾国立スポーツ科学センター, ²⁾鹿屋体育大学大学院, ³⁾鹿屋体育大学

¹⁾ Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾ Graduate School of Physical Education, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya,

³⁾ National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

E-mail : koshi.suzuki@jpnnsport.go.jp

受付日 : 2022 年 10 月 26 日

受理日 : 2023 年 1 月 31 日

I. 緒言

スピードスケート競技のゴールタイムには空気抵抗が大きく影響する。それはスピードスケート競技における滑走速度が選手のパワー出力と、空気抵抗および氷摩擦抵抗によるパワー損失との差によって決まり¹⁸⁾ 尚且つ、空気抵抗による滑走中のパワー損失が全体の80%以上を占めることがあるためである¹²⁾。したがって、スピードスケート競技のゴールタイム短縮には、空気抵抗の低減が求められる。選手が能動的に空気抵抗を低減できる手法として、滑走時の体幹部の水平に対する角度を小さくすることが有効であることが知られている¹⁷⁾。

一方でスピードスケート競技における空気抵抗は競技用具によっても低減される。中でも競技用スーツによる空気抵抗低減効果について、多くの研究・開発が報告されている。まず1974年にスイスのスピードスケート選手であるFranz Krienbühlがワンピースのスーツを導入した¹⁵⁾。その後1980年のレイクプラシッド五輪大会で生地表面を平滑化し摩擦抵抗を低減するダウンヒル競技用スーツの技術が活かされた⁶⁾。このように1980年から1998年までのスーツ開発は摩擦抵抗の低減を意図して表面が滑らかな生地を使用する傾向にあった。

その後スーツ表面の一部に粗さを利用した空気抵抗の低減手法が実用されるようになった。1998年の長野五輪大会でオランダチームによってトリップワイヤを応用したジグザグテープを取り付けたスーツが導入された¹⁵⁾。トリップワイヤは円柱にワイヤなどの突起物を取り付けることで円柱周りの流れを層流から乱流へ遷移させることにより圧力抵抗を減少させる手法である⁴⁾。長野五輪大会のオランダチームのスーツは突起物として発泡素材のジグザグ形状のテープをスーツの下腿部と前頭部に取り付け¹⁵⁾、流れの乱流化にともない抗力が急激に減少する効果(ドラッグクライシス)による圧力抵抗の低減を図った。ジグザグテープの効果についてTimmer and Veldhuis¹⁵⁾は当時の世界記録推移のデータ分析から、ジグザグテープを

取り付けることによって男子1500mで平均ラップを約0.5秒短縮すると示唆した。しかし、国際スケート連盟は長野五輪大会翌年の1999年からジグザグテープなどの付属品のスーツへの取り付けを禁止した¹⁰⁾。そこで、2002年のソルトレイクシティ五輪大会では人体の部位ごとに異なる表面粗さの生地を採用したスイフトスキンスーツ(Nike社)が導入された⁸⁾。表面粗さは円柱に適用することで周囲の流れの乱流化を促進する効果が知られている。したがって、スイフトスキンスーツは人体の部位ごとに異なる表面粗さを採用することでドラッグクライシス現象による圧力抵抗の低減を図った。その後、2006年のトリノ五輪大会では6か国の選手がスイフトスキンスーツを着用し、他国の選手も同様の機能を持つスーツを着用した¹⁾。これらのスーツの効果についてSætran and Oggiano¹²⁾は6種類のスーツを比較した人形模型をもちいた風洞実験(人形実験)から、人体の部位ごとに適した表面粗さを採用したスーツが表面の滑らかなスーツと比べて男女1500mで約3秒短縮すると推定した。このように1998年以降のスーツ開発は圧力抵抗の低減を意図して、トリップワイヤや表面粗さの適用によるドラッグクライシス現象が活かされている^{12),15)}。

ドラッグクライシス現象は流体力学でよく知られている現象である。流体力学では流れの状態を、慣性力と粘性力の比であるレイノルズ数(Re)という無次元数であらわす。式(1)

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (1)$$

ここで L [m]は代表長さ(例えば円柱の場合は直径、ヒトの場合は肩幅等)、 U [m/s]は流体の速度、 ρ [kg/m³]は空気密度、 μ [Pa·s]は粘性係数である。ドラッグクライシス現象が生じる Re は、臨界 Re と呼ばれ、滑面円柱の場合 $Re = 3 \times 10^5$ 付近である¹⁶⁾。ドラッグクライシス現象は、円柱表面に粗さ、溝、ディンプル、トリップワイヤなどをつけることで滑面円柱よりも低い Re 領域でも生じる^{4),11),14)}。例えば、スピードスケート選手の腓腹部(下腿の最大周囲長)は $Re = 1.18 \times 10^5$ 程度である¹⁵⁾。したがって、1998

年以降のスーツはスピードスケート競技の Re 領域でドラッグクライシス現象が生じるようにトリップワイヤや表面粗さなどを適用している。

筆者らは2019年ワールドカップ長野大会における各国代表選手のスーツを調査した(未発表資料)。その結果、多くの強豪国は腕部や脚部の表面に溝やディンプルなどの特徴を持つニット生地を採用していた。このような特徴をもつニット生地の研究も報告されている。Moon et al.⁹⁾は円柱模型をもちいた風洞実験(円柱実験)で特徴の異なる複数のディンプルニット生地の風速15 m/sにおける抗力係数を比較し、人形実験で新たに開発したディンプルニット生地を採用したスーツと、既存スーツの抗力係数を比較検証した。Hong and Asai³⁾は円柱および自転車競技用人形実験でディンプルや溝など特徴の異なるニット生地を比較し最適な組み合わせを検証した。このように特徴の異なるニット生地そのものを比較検証することにより生地ごとに臨界 Re や最小抗力係数が異なることが知られている。

一方、同一の形状特徴(例えば溝構造)に対してより詳細な変化を与えた場合の影響も報告されている。Skeide, et al.¹³⁾は3Dプリンタで積層されたリブ(溝:凹形状、リブ:凸形状)によるマクロな粗さを有する円柱模型を用い、円柱表面を覆う生地のミクロ粗さとの組合せによる28種類の円柱実験でリブ間隔、リブ高さ、ミクロ粗さと臨界 Re 、最小抗力係数の関係を検証した(溝とリブはその特徴を繰り返す幾何学模様を持つ生地とした場合、同様の生地である)。その結果、リブ高さが高いほど臨界 Re が減少し、ミクロ粗さが大きいほど臨界 Re が減少することを示唆した。ただし、これは実際のリブ(溝つき)ニット生地ではなくマクロ粗さと生地が組み合わされたものである。したがって、これらをスピードスケートスーツの開発に応用する場合は、実際のニット生地をもちいた円柱実験による検証が必要である。また、スポーツに応用する場合は人形実験による検証も重要である。というのも、人体形状における空力は、三次元流れ、身体の各部位による相互

作用を受けるため、直立した円柱の組合せとして単純化できない要素が多い²⁾。したがって、溝やディンプルなどの特徴をもつニット生地の微細な表面形状変化にともなう空力特性を人形実験で定量化することにより、スピードスケート競技において空気力学的に最適な表面形状の特徴を明らかにすることが期待される。

また、風洞実験の結果は施設の設置環境(標高や気象条件など)やもちいた人形のサイズ(基本的には1つのサイズで実施することが多い)に依存する。よって、人形実験の結果を個々の競技現場に応用するためには、各競技会場の環境や選手の体格による空力への影響を考慮することが重要である。というのも、 Re は式(1)であらわされるように L [m]、 U [m/s]、 ρ [kg/m³]、 μ [Pa·s] の関数である。そのため選手の滑走速度と同一速度(U が同一)で風洞実験を行ったとしても、競技会場と実験の環境(ρ 、 μ)が異なれば Re は異なり、選手個々の体格と人形サイズ(L)が異なれば Re は異なる。スピードスケートスーツに活かされているドラッグクライシス現象は Re に依存する。したがって、環境や体格を考慮することで、競技会場や選手個々に最適な生地を明らかにすることが期待される。

そこで本研究は、2019年ワールドカップ長野大会において強豪国の大腿部付近に採用されていた溝つきニット生地に着目し、溝つきニット生地の二次加工による微細な表面形状の違いと空力特性の関係を明らかにし、競技会場の環境や選手の体格を考慮したスピードスケートスーツの生地選択の示唆を得ることを目的とした。

II. 方法

1. 生地種類

本研究は市販の溝つきニット生地に実験のために異なる2次加工を施し表面形状が微細な違いをもつ2種類の生地(Type A、Type B)を対象とした。表面形状の詳細は後述するTable 2に示す。また、スピードスケートスーツは選手着用時に皺が発生しないように身体サイズより小さく製造されるこ

とが多い。よって生地は伸長率（伸長率＝伸張時生地長／生地長）1.11とした。

2. 生地の表面粗さと表面形状

生地の三次元表面性状の測定にはレーザー顕微鏡（キーエンス社 VK-X1050）をもちいた。生地サンプルの寸法は200 mm × 50 mmである。生地伸長時の三次元表面性状を測定するために曲面型生地引張固定治具（曲面の半径は150 mm、掴み幅は左右に各25 mm）をもちいた。解析時に固定治具由来の曲面成分は差し引いた。レーザー顕微鏡による測定領域は20 mm × 20 mm以上かつ生地の表面形状が横方向に一周期以上確認できる範囲とした。取得した画像の解析にはMountains-Map Imaging Topography（Digital Surf社）をもちいた。

解析領域（ A ）は、横方向に表面形状の一周期長、縦方向に20 mmとした。表面粗さを評価するために算術平均高さ Sa [mm] を式(2)より算出した。

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (2)$$

ここで $Z(x, y)$ は測定点における A の平均面からの高さの差である。

表面形状を評価するために溝幅（Groove width）、溝深さ（Groove depth）、円周長／一周期長（Circumference/One cycle length）を算出した（Figure1）。溝幅と溝深さを算出するために、丘を構成する成分の平均高さ（丘平均高さ）と、谷を構成する成分の平均高さ（谷平均高さ）を算出した。溝幅は谷領域の断面輪郭線における丘平均高さ位置の両端の長さとした。溝深さは丘平均高さから谷平均高さまでの深さとした。円周長／一周期長の円周長は空力測定にもちいた直径150 mmとした。

また、各表面形状変数の差を比較するために変化率 d [%] を式(3)により算出した。

$$d = \frac{\text{Type B} - \text{Type A}}{\text{Type A}} \quad (3)$$

3. 円柱模型をもちいた空力測定

空力測定は国立スポーツ科学センター（JISS）のゲッチンゲン式風洞実験装置（高さ3 m、幅2.5

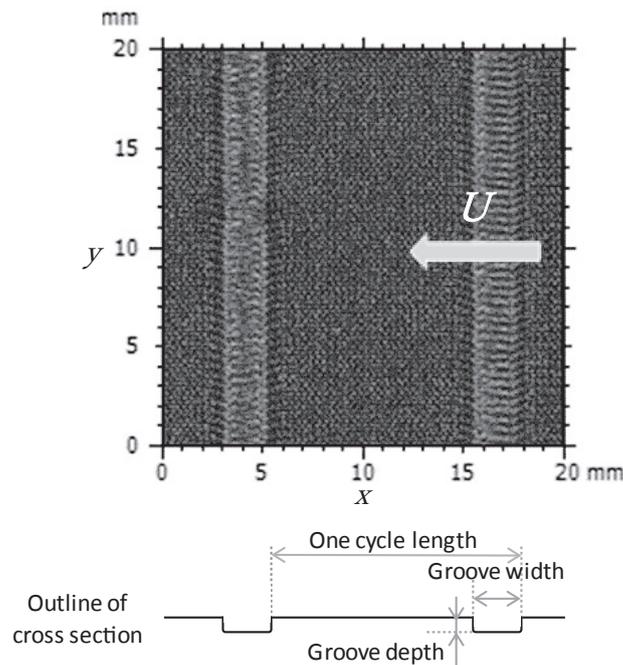


Figure 1. Grooved knitted fabric

m、長さ 8 m の開放型の測定部を有する縦回流型風洞) で実施した。風洞吹出口より下流 2 m 地点に設置したストレインゲージ式 6 分力計 (日章電機社 LMC-61418) の上面に真鍮製円柱 (高さ 1000 mm、直径 150 mm) を取りつけた (Figure 2)。円柱の直径は大腿部を模して 150 mm とした。測定部における縮流胴吹き出し口から測定部周辺 (吹き出し口から 2 m 下手方向) の風速分布は $\pm 1.0\%$ 以下、平均乱れ度は 0.3% 以下であった。この円柱に筒状の生地を縫い目が風下になるように装着し、抗力を測定した。生地の向きは、風の主流方向が Figure 1 の生地画像の右から左になるように装着した。風速 U [m/s] は 8 m/s から 18 m/s の範囲で 1 m/s ピッチで設定し、測定中は一定とした。6 分力計によって測定した信号は直流型歪増巾器 (日章電機社 DSA-100B) と分解能 24 bit の A/D 変換器 (ナショナルインスツルメンツ社 NI9202) を介し、サンプリング周波数 1000 Hz でコンピュータ (HP 社 ProDesk600 G6 SFF) に取り込んだ。5 秒間測定した平均値を抗力の代表値とした。測定した抗力 [N] を動圧 [Pa] で除して抗力面積 S_D [m²] を算出した。また、測定部床面の影響をとり除くために、円柱を取り除

いた状態の S_D を測定し各測定結果から差し引いた。

測定対象は、溝つきニット生地 2 種類 (Type A、Type B) と生地未装着円柱 (Bare) であった。

4. 人形模型をもちいた空力測定

空力測定は円柱実験と同様の風洞実験装置で実施した。人形模型は身長 1.75 m の男性選手がモデルの実寸サイズであり、両腕を背中に回して右膝を伸展した典型的なスピードスケートの姿勢であった (Figure 3)。ここで人形模型の代表長さは湯田ら¹⁹⁾を参考に肩幅 $L=0.5$ m とした。人形模型は風洞吹出口より下流 2 m 地点に設置したストレインゲージ式 6 分力計上面に設置した。人形模型の姿勢は上胴部の迎角を 0° (Figure 3) に設定した。

測定対象は、およそ膝関節 (直径約 120 mm) から大腿中央 (直径約 190 mm) までの部分 (Figure 3) に使用した溝つきニット生地が異なる 2 種類 (Suit A、Suit B) のワンピーススーツであった。Suit A と Suit B は上述の部分以外の生地配置は同様であった。スーツの着せ方および姿勢の違いによる影響を排除するために、予め撮影しておいた

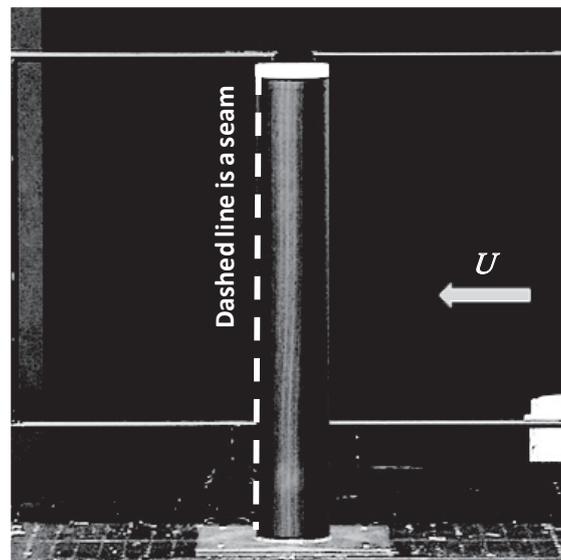


Figure 2. Circular Cylinder model (Height: 1000 mm, Diameter: 150 mm)

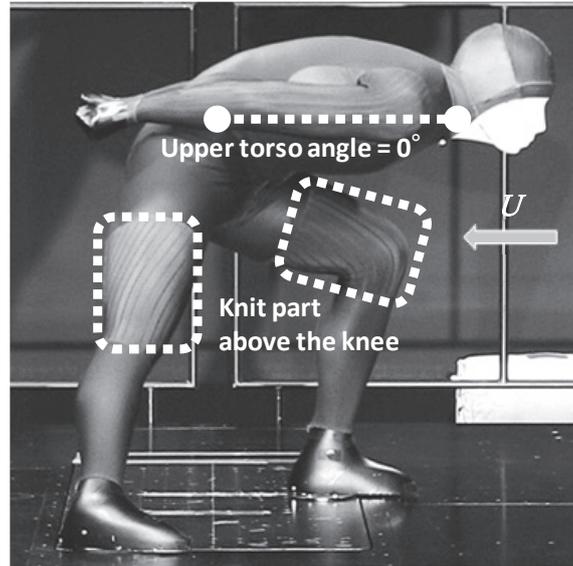


Figure 3. A full-scale model of a skater (L [Shoulder width]: 0.5 m, Height: 1.75 m)

静止画像と透過度をつけたリアルタイム画像をオーバーレイ表示し、縫目位置と姿勢の調整を行った。

風速 U [m/s] はスピードスケート競技の主な滑走速度域である 12 m/s から 16 m/s に ± 2 m/s の幅をもたせた 10 m/s から 18 m/s の範囲とし、滑走速度による空気力の影響を詳細に検証ができるように 0.5 m/s ピッチで設定し、測定中は一定とした。6 分力計によって測定した信号は直流型歪増巾器 (日章電機社 DSA-100B) と分解能 24 bit の A/D 変換器 (UEI 社 DNA-AI-217) を介し、サンプリング周波数 1000 Hz でコンピュータ (Dell 社 Optiplex7010) に取り込んだ。5 秒間の測定を 4 回実施し、その平均値を抗力とした。測定した抗力 [N] を動圧 [Pa] で除して抗力面積 S_D [m²] を算出した。また、測定部床面の影響をとり除くために、人形模型を取り除いた状態の S_D を測定し各測定結果から差し引いた。

空気密度 ρ [kg/m³] は各測定時の大気圧 P [hPa] と風洞内の温度 t [°C] から以下の式(4)より算出した⁷⁾。

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{t+T_0} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

ここで ρ_0 [kg/m³] は温度 0 °C、海拔 0 m における空気密度 1.2935 kg/m³、 T_0 [K] は温度 0 °C における絶対温度 273 K、 P_0 [hPa] は国際標準大気で定義されている海拔 0 m の基準気圧 1013.25 hPa である⁷⁾。

また、粘性係数 μ [Pa · s] は以下の式(5)より算出した⁷⁾。

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{T_0+C}{t+T_0+C} \cdot \left(\frac{t+T_0}{T_0}\right)^2 \quad (5)$$

ここで μ_0 [Pa · s] は温度 0 °C における粘性係数 1.7246×10^{-5} Pa · s、 C [°C] は定数であり 107 °C である⁷⁾。

5. 競技会場の環境および選手の体格による空力への影響

3-3 にて後述するように人形実験の結果 (Figure 5) から、Suit A と Suit B はおよそ $U=14.5$ m/s ($Re=4.9 \times 10^5$) を境界として $U \leq 14.5$ m/s では Suit A が Suit B に比して小さな抵抗値を示し、 $U > 14.5$ m/s では逆に Suit B が Suit A に比して小さな抵抗値を示した。これは速度 (すなわち Re) の大きさを考慮した生地を選択 (空気抵抗の大小) が重要であることを意味している。 Re は式 (1) で

あらわされるように L [m]、 U [m/s]、 ρ [kg/m³]、 μ [Pa · s] の関数である。そのため競技会場で得られた選手の滑走速度と同一速度で風洞実験を行ったとしても L 、 ρ 、 μ が異なれば Re の異なる条件下での実験結果となってしまふ。このような環境条件の変化に適合させるため、風洞実験で得られた Re から、競技会場の環境を考慮した滑走速度 V [m/s] を推定した。代表的な競技会場および風洞実験の環境変数を Table 1 に示す。式(6)から各競技会場の大気圧 P [hPa] を推定した⁷⁾。

$$P = P_0 \cdot \left(1 + \frac{\gamma \cdot h}{t + T_0 - \gamma \cdot h}\right)^{-\frac{g}{R_d \cdot \gamma}} \quad (6)$$

ここで P_0 [hPa] は国際標準大気で定義されている海拔 0 m の基準気圧 1013.25 hPa、 h [m] は各競技会場の標高¹⁵⁾、 t [°C] は各競技会場の温度¹⁵⁾、 γ [K/m] は $h \leq 11000$ m における気温の減率定数 -0.0065 K/m、 g [m/s²] は重力加速度 9.81 m/s²、 R_d [J/(kg · K)] は乾燥空気の気体定数 287 J/(kg · K) である⁷⁾。

各競技会場における滑走速度 V [m/s] は、式(1)を変形した式(7)により推定できる。本研究においては、3-3 にて後述する人形実験の結果 (Figure 5) から Suit A と Suit B における S_D の境界となる $Re = 4.9 \times 10^5$ の V [m/s] を算出した。

$$V = \frac{\mu \cdot Re}{\rho \cdot L} \quad (7)$$

ここで ρ は Table 1 の P および t と式(4)より、 μ は Table 1 の t と式(5)より算出した。 L は

$L = 0.5$ m (身長 1.75 m) を 100 % として 90 % ($L = 0.45$ m) から 105 % ($L = 0.53$ m) まで 5 % ピッチとした。 L に 90 ~ 105% の幅を与えたのは風洞実験で用いた人形模型のサイズよりも小さい女子選手と大きい男子選手をそれぞれ想定したためである。

本研究において推定した滑走速度 V [m/s] を実際の大会における選手の滑走速度と比較検証するために、2021 年 2 月に Heerenveen で開催された ISU World Championships の各種目における平均滑走速度 \bar{V} [m/s] を算出した。 \bar{V} の算出には ISU 公式リザルト⁵⁾ を用いた。対象は各種目の上位 8 名とし、スタートを含むラップタイム以外の各ラップタイムとした。 \bar{V} は 1 周長である 400 m をラップタイムで割り滑走速度を求め、その平均とした。

Heerenveen (標高 0 m) におけるスーツの使い分け基準を明らかにするために、推定した滑走速度 V [m/s] と平均滑走速度 \bar{V} [m/s] を比較検証した。ここで V [m/s] は、3-3 にて後述する人形実験の結果 (Figure 5) から Suit A と Suit B における S_D の境界となる $Re = 4.9 \times 10^5$ を Heerenveen (標高 0 m) 環境における各代表長さ L [m] (90 ~ 105%) として算出した。そして、 V [m/s] と各種目における \bar{V} [m/s] を比較し $V \geq \bar{V}$ の場合は Suit B より Suit A を使用することで抵抗の軽減が期待できる基準として A、 $V < \bar{V}$ の場合は Suit A

Table 1. Ice rinks and Wind tunnel test's Environment variable

	t [°C]	h [m]	P^* [hPa]
Wind tunnel test (JISS)**	17.6	-	1021
Heerenveen***	13.0	0	1013
Nagano***	13.0	342	973
Calgary***	13.0	1034	897
Salt Lake City***	13.0	1423	857

* Ice rink atmospheric pressure (P) is estimated from Equation(6).

** Measured values in wind tunnel tests.

*** Ice rink elevations(h) and temperatures(t) were taken from Timmer¹⁵⁾.

より Suit B を使用することで抵抗の軽減が期待できる基準として B と判別してまとめた。

Ⅲ. 結果

1. 生地表面粗さと表面形状

Type A、Type B の S_a 、溝幅、溝深さ、円周長/一周長の結果を Table 2 に示す。 S_a ($d=-6.1\%$) と溝深さ ($d=-9.0\%$) は Type A>Type B であった。一方、溝幅 ($d=1.9\%$)、円周長/一周長 ($d=2.6\%$) は Type A<Type B であった。

2. 円柱模型をもちいた空力測定

円柱模型をもちいた空力測定の結果を Figure 4 に示す。 U の増大にともない急激な S_D の減少がみられたことから Type A、Type B ともにドラッグクライシスが生じた。一方、Bare ではドラッグクライシスがみられなかった。ドラッグクライシスが確認された速度域 (臨界領域) は Type A が $11 \text{ m/s} < U < 13 \text{ m/s}$ 、Type B が $12 \text{ m/s} < U < 14 \text{ m/s}$ であり、Type A が Type B より低速域であった。超臨界領域である $U > 14 \text{ m/s}$ において U の増大にともなう S_D の増大がみられ、 S_D は Type A>Type B であった。

Table 2. Fabric surface roughness and surface characteristics

	Sa	Groove width	Groove depth	Circumference/ one cycle length
Type A	0.10 mm	2.87 mm	0.28 mm	33.4
Type B	0.09 mm	2.93 mm	0.26 mm	34.3
d^*	-6.1 %	1.9 %	-9.0 %	2.6 %

* The rate of change (d) is calculated from equation (3).

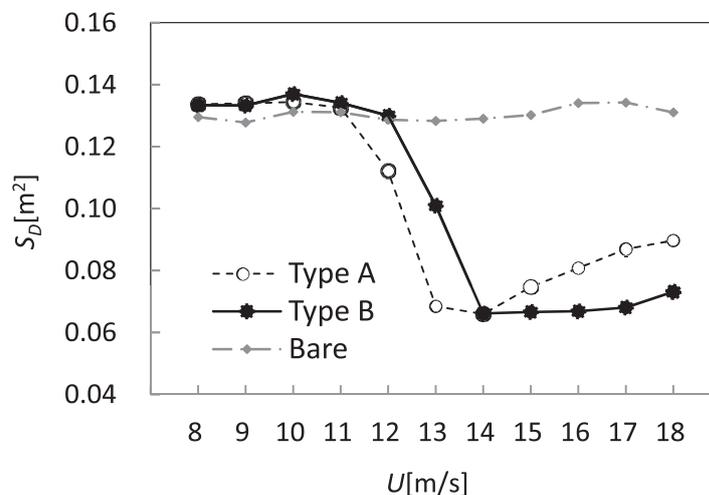


Figure 4. Results of aerodynamic measurements using the cylindrical model (Height: 1000 mm, Diameter: 150 mm)

3. 人形模型をもちいた空力測定

人形模型をもちいた空力測定の結果を Figure 5 に示す。Suit A では $U < 14 \text{ m/s}$ 、Suit B では $U < 15 \text{ m/s}$ で U の増大にともない S_D の減少がみられる臨界領域であった。Suit A では $U > 14 \text{ m/s}$ 、Suit B では $U > 15 \text{ m/s}$ で U の増大とともに S_D が増大し、それぞれ超臨界領域に達した。 S_D は $U \leq 14.5 \text{ m/s}$ で Suit A < Suit B、 $U > 14.5 \text{ m/s}$ で Suit A > Suit B であった。

4. 競技会場の環境および選手の体格による空力への影響

Figure 5 の結果から Suit A、Suit B における S_D の境界 $U = 14.5 \text{ m/s}$ ($Re = 4.9 \times 10^5$) を、競技会場の環境および選手の体格を考慮した滑走速度 V [m/s] として推定した (Table 3)。競技会場の標高の増大にともない V は増大した。

2021 年 2 月に Heerenveen で開催された ISU World Championships の各種目上位 8 名の平均滑走速度 \bar{V} [m/s] を Table 4 に示す。 \bar{V} は $12.1 \text{ m/s} \leq \bar{V} \leq 16.0 \text{ m/s}$ であり、男女ともに種目の距離の増大とともに減少した。Heerenveen における空力を考慮した種目別の A ($V \geq \bar{V}$) と B ($V < \bar{V}$) の使い分けを Table 5 に示す。男子 500 m はどの L [m] に

おいても B であった。男子 1000 m、男子 1500 m、女子 500 m、女子 1000 m は L によって A と B に分かれていた。男子 5000 m 以上、女子 1500 m 以上の種目はどの L においても A であった。

IV. 考察

1. 生地の表面形状と空力の関係

円柱実験において Figure 4 で示した通り、臨界領域は Type A が Type B より低速域であった。人形実験において Figure 5 で示した通り、Suit A と Suit B ともに臨界領域と超臨界領域が確認された。人形実験では $U = 10 \text{ m/s}$ ですでに臨界領域であったものの、臨界領域と超臨界領域の境界は Suit A が Suit B より低速であり、Suit A が Suit B より臨界領域が低速域であったと推察される。沖・山岸¹¹⁾は溝つき円柱実験および数値解析から、溝深さが大きくなるほど臨界領域が低い Re 領域に移り、また溝数 (本研究の円周長 / 一周期長) が大きくなるほど臨界領域が低い Re 領域に移ると報告した。本研究において Table 2 で示した通り、溝深さは Type A > Type B であり、円周長 / 一周期長は Type A < Type B であった。これは、臨界領域の移動をお互いに打ち消しあうような変化である。しかし、変化率 d [%] は溝深さ ($d = -9.0\%$)、

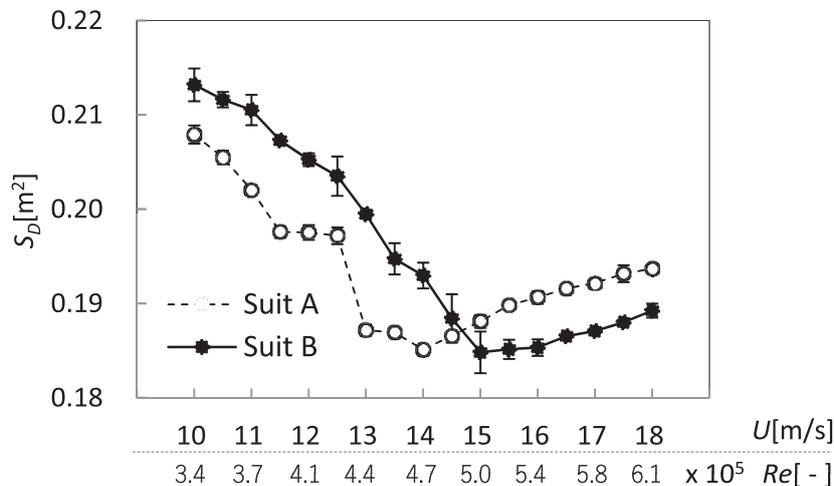


Figure 5. Results of aerodynamic measurements using a full-scale model of a skater (L [Shoulder width]: 0.5 m, Height: 1.75 m)

Table 3. Assumed speed(V [m/s]), Taking into account the location and the physique of the players

		Athlete's Physique				
		Ratio [%]	105	100*	95	90
		L^{**} [m]	0.53	0.50	0.48	0.45
		Height [m]	1.84	1.75	1.66	1.58
			V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]
Location of Ice rinks (Elevation [m])	Heerenveen (0***)		13.5	14.2	14.9	15.7
	Nagano (342***)		14.0	14.7	15.5	16.4
	Calgary (1034***)		15.2	16.0	16.8	17.8
	Salt Lake City (1423***)		15.9	16.7	17.6	18.6

* Ratio 100% means the same size of a full-scale model of a skater.

** L is shoulder width.

*** Ice rink elevations(h) were taken from Timmer¹⁵⁾.

Table 4. Averaged speed (\bar{V} [m/s]) of the top 8 skaters in each discipline at the ISU World Championships in Heerenveen in February 2021

		\bar{V} [m/s]	
		Mean	SD
Male	500m	16.0 ± 0.1	
	1000m	15.3 ± 0.6	
	1500m	14.8 ± 0.6	
	5000m	13.5 ± 0.3	
	10000m	13.0 ± 0.3	
Female	500m	14.7 ± 0.1	
	1000m	14.0 ± 0.6	
	1500m	13.4 ± 0.7	
	3000m	12.7 ± 0.5	
	5000m	12.1 ± 0.3	

Table 5. Criteria for the use of "A" and "B" in different disciplines for aerodynamic considerations in Heerenveen

		Athlete's Physique				
		Ratio [%]	105	100*	95	90
		L^{**} [m]	0.53	0.50	0.48	0.45
		Height [m]	1.84	1.75	1.66	1.58
Male	500 m		B	B	B	B
	1000 m		B	B	B	A
	1500 m		B	B	A	A
	5000 m		A	A	A	A
	10000 m		A	A	A	A
Female	500 m		B	B	A	A
	1000 m		B	A	A	A
	1500 m		A	A	A	A
	3000 m		A	A	A	A
	5000 m		A	A	A	A

A is expected to reduce drag by using Suit A rather than Suit B.

B is expected to reduce drag by using Suit B rather than Suit A.

* Ratio 100% is a full-scale model of a skater.

** L is shoulder width.

円周長 / 一周期長 ($d=2.6\%$) であり、その差は 6.4 ポイントである。したがって、ポイント数の大きな要因の方が結果的に有意となり、Type A の臨界領域が Type B より低速域であったと考えられる。

2. 競技会場の環境および選手の体格による空力変化を考慮した生地を選択

人形実験の結果 (Figure 5) から Suit A、Suit B における S_D の境界は $Re=4.9 \times 10^5$ であった。 $Re=4.9 \times 10^5$ から推定した滑走速度 V [m/s] は Table 3 で示した通り、代表長さ L の増大、すなわち体格が大きいほど減少し、競技会場の標高の増大、すなわち空気密度の減少にともない増大した。したがって、Timmer and Veldhuis¹⁵⁾ も示唆しているように、競技用スーツでスピードスケート選手の空気抵抗を低減するためには、競技会場の

標高および選手の体格を考慮した最適な生地を使用する必要がある。

本研究は Heerenveen (標高 0 m) における種目別の生地の使い分けを具体的に示すことができた (Table 5)。しかし、これらは風洞実験にもちいた人形模型 (身長 1.75 m、両腕を背中に回して右膝を伸展した姿勢) を拡大もしくは縮小しただけであり、選手による形態の個人差を正確に網羅できていない。今後、対象となる選手を 3D スキャンしたデータから個々の人形模型を製造し、風洞実験をすることで、より個人に最適化した生地の使い分けを明らかにすることが期待される。また、女子 3000 m や女子 5000 m では $\bar{v} < 13$ m/s であることから、Type A よりも溝深さが大きい生地が望ましい可能性がある。

本研究は模型をもちいた静的な人形実験であり、円柱実験および人形実験を実施することで三

次元流れや身体各部位による相互作用による影響を考慮することができた。しかし、実際の氷上滑走時においては、身体各部位の角度や動きなどが、空力に影響を与える可能性がある¹⁷⁾。氷上滑走時の空力を適切にシミュレーションすることが今後の課題である。

V. まとめ

溝つきニット生地での微細な溝深さの違いが円柱実験および人形実験における臨界領域に影響することがわかった。溝つきニット生地の溝深さがより大きい Type A の臨界領域が Type B より低速域であった。

微細な溝深さの違いがある溝つきニット生地の使い分けには競技会場の環境、選手の体格、滑走速度を考慮する必要がある。Heerenveen (標高 0 m)、0.45 m (身長 1.58 m) $\leq L \leq 0.53$ m (身長 1.84 m) における種目別のスーツの使い分けについて、男子 500 m はどの L においても Suit B、男子 1000 m から 1500 m、女子 500 m から 1000 m は L によって Suit A と Suit B を使い分ける必要があり、男子 5000 m 以上と女子 1500 m 以上の種目はどの L においても Suit A であった。この結果をふまえると、オリンピックのような比較的少数のトップアスリートに対して最適な生地を選択するためには、各選手の体格およびターゲットとなる競技会場の滑走速度域を考慮して個別に生地を使い分けることが望ましい。

謝辞

本研究はスポーツ庁委託事業「スポーツ支援強化のための基盤整備事業」の一部として実施した。本研究の実施にあたっては、公益財団法人日本スケート連盟、ミズノ株式会社の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) Brownlie LW, Kyle CR. Evidence that skin suits affect long track speed skating performance. *Procedia Engineer*, 34: 26-31, 2012.
- 2) D'Auteuil A, Larose GL, Zan SJ. Relevance of similitude parameters for drag reduction in sport aerodynamics. *Procedia Engineer*, 2: 2393-2398, 2010.
- 3) Hong S, Asai T. Aerodynamics of Cycling Skinsuits Focused on the Surface Shape of the Arms. *NATO Adv Sci Inst Ser E Appl Sci*, 11(5): 2200, 2021.
- 4) Igarashi T. Effect of Tripping Wires on the Flow around a Circular Cylinder Normal to an Airstream. *Bulletin of JSME*, 29(255): 2917-2924, 1986.
- 5) International Skating Union. ISU World Championships. https://live.isuresults.eu/events/2021_NED_0005/schedule (2021年9月14日)
- 6) 板垣良彦. 低抵抗スポーツウェアの開発. *日本造船学会誌*, 851: 270-277, 2000.
- 7) 航空評議会. 風洞試験規程. 航空評議会, 1942.
- 8) Kuper GH, Sterken E. Do skin suits affect the average skating speed? *Sports Technology*, 1(4-5): 189-195, 2008.
- 9) Moon Y, Song J, Kwon K, Kwon O, Kim M, Yoon S-H, Byun Y, Sa A-N. Development of a Functional Speed Skating Uniform through Aerodynamic Analysis on Knit Textiles and Uniforms. *J Eng Fiber Fabr*, 11(4): doi.org/10.1177/155892501601100409, 2016.
- 10) 荻野毅. トリップワイヤーを装着したスキーアルペンモデルの流体力学特性. *スポーツ工学*, 3: 15-20, 2008.
- 11) 沖真, 山岸陽一. 溝つき円柱まわりの流動特性と溝形状の最適設計. *東海大学紀要開発工学部*, 20: 41-52, 2011.
- 12) Sætran L, Oggiano L. Skin Suit Aerodynamics in Speed Skating. In: Nørstrud H, *Sport Aerodynamics*. Springer Vienna, pp. 93-105, 2008.
- 13) Skeide AK, Bardal LM, Oggiano L, Hearst RJ.

- The significant impact of ribs and small-scale roughness on cylinder drag crisis. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 202: 104192, 2020.
- 14) 辰野正和, 堀之内修, 石井幸治. 円弧溝あるいはディンプル付き円柱の空力特性. 九州大学応用力学研究所所報, 128: 15-21, 2005.
- 15) Timmer N, Veldhuis L. The Impact of Skinsuit Zigzag Tape Turbulators on Speed Skating Performance. *Appl Sci*, 11(3): 988, 2021.
- 16) 植松康. 二次元円柱まわりの流れの分類と臨界レイノルズ数について. 日本風工学会誌, 43: 35-43, 1990.
- 17) van Ingen Schenau GJ. The influence of air friction in speed skating. *J Biomech*, 15(6): 449-458, 1982.
- 18) van Ingen Schenau GJ, de Koning JJ, de Groot G. A simulation of speed skating performances based on a power equation. *Med Sci Sports Exercise*, 22(5): 718-728, 1990.
- 19) 湯田淳, 青柳徹, 高松潤二, 山辺芳, 鈴木恵一. スピードスケートにおける滑走姿勢の相違が空気抵抗に及ぼす影響. 日本女子体育大学紀要, 39: 9-15, 2009.