

ショートトラックスピードスケートのブレードにおける エッジ深度の定量評価と摩耗パターン

イムレ エミル (ハンガリースポーツ科学大学)

河合 季信 (筑波大学)・テレグディ アッティラ (ハンガリースポーツ科学大学)

Quantitative Assessment of Edge Depth and Wear Patterns in Short Track Speed Skating Blades

IMRE Emil, KAWAI Toshinobu, TELEGDI Attila

【Abstract】

This study established a quantitative measurement protocol for blade edge depth in short track speed skating and examined wear patterns after skating use. Forty blades used by elite skaters were analyzed using a custom-developed contact-based device equipped with a dial gauge (0.0001-inch resolution = 2.54 μm). Edge depth was measured immediately after sharpening and after a 96-lap training session. Results showed high uniformity in edge depth across all blade sections after sharpening (mean = 124.46 μm). Following skating use, significant spatial differences emerged ($p < 0.001$), with the middle section showing significantly smaller edge depth than both front and rear sections, indicating concentrated wear in the middle section. This reflects the sport-specific loading characteristics during cornering in short track speed skating. The proposed measurement protocol enables objective blade wear evaluation and provides a scientific basis for evidence-based maintenance, equipment optimization, and performance enhancement.

Keywords : short track speed skating, speed skating blade, edge depth, blade geometry, measurement protocol

【要旨】

本研究は、ショートトラックスピードスケートのブレードにおけるエッジ深度の定量的測定プロトコルを確立し、滑走使用後の摩耗パターンを明らかにすることを目的とした。エリート選手が使用した40本のブレードを対象に、ダイヤルゲージ(最小目量0.0001インチ = 2.54 μm)を用いた独自開発の接触式測定装置を用いて、研磨直後と96周のトレーニング滑走後のエッジ深度を測定した。研磨直後のエッジ深度は全部位で均一であった(平均124.46 μm)。滑走後には部位間で有意差が認められ($p < 0.001$)、ブレード中央部のエッジ深度は前部・後部より有意に小さく、摩耗が集中することが確認された。この結果は、カーブ滑走時の荷重がブレード中央部に集中するショートトラックの力学的特性を反映している。本測定プロトコルは、客観的なブレード摩耗評価を可能にし、エビデンスに基づくメンテナンス、用具最適化、パフォーマンス向上に貢献する。

キーワード：ショートトラックスピードスケート、スピードスケートブレード、エッジ深度、ブレード形状、測定プロトコル

1. 緒言

ショートトラックスピードスケート(以下、「ショートトラック」という)は、コンマ数秒レベルで競われ、競技者に最高レベルの技術的準備を要求すると同時に、細部にわたる専門的なエンジニアリングを用いて個人ごとにカスタマイズされたスポーツ用具の精度を要求する。パフォーマンスの最適化において、重要でありながら過小評価されがちな側面の一つがスケートのブレード形状、特にエッジの深さである(以下、「エッジ深度」という)。ブレードエッジの状態は、氷上での滑りやグリップ、速度、加速、操作性(エッジチェンジ)に直接影響を及ぼし、競技者の成功に基本的な役割を果たす(Federolf and Redmond, 2010; McGurk, 2015;

Morrison et al., 2005)。

ブレードのエッジ深度に関する研究は、同様の意味を持つROH(Radius Of Hollow:ブレードに施す溝加工の半径)がパフォーマンスに及ぼす影響という観点で、アイスホッケーにおいて多数実施されている。

Federolf and Redmond (2010)は、アイスホッケーにおけるブレードの「ホロー」形状がパフォーマンスに与える影響を検討し、ホロー半径が非常に小さい、すなわち鋭利な場合(半径3.18mm)には、摩擦が増加してパフォーマンスが著しく低下したが、一般的な範囲(半径9.53~22.23mm)ではパフォーマンスには個人差が大きく、ホローの違いを正確に認識する感度が低いことを示した。また、McGurk (2015)は、同じくアイスホッケー選手を対象に、ブレードの種類、ロッ

ク形状（ブレード長軸方向の加工半径）、ホロー形状を変化させて一連の氷上ドリルを実施し、加速度とドリル完了までの合計時間を比較した結果、個々のスキルを測定する単独ドリルでは有意な差が認められず、ゲーム動作をシミュレートした複合ドリルでは、選手の好みに合わせたカスタムブレードがメーカーの設定する標準的な形状を持つブレードよりも速い滑走速度を示した。Morrison et al. (2005) は、ホロー形状の相違が滑走時の生理学的指標に及ぼす影響について、女子アイスホッケー選手を対象に検討し、ホロー形状の条件間で酸素摂取量、心拍数、主観的疲労度などに有意な差が認められなかったものの、特定の形状を「滑りやすい」と評価し、心理的好感度がパフォーマンスに寄与している可能性を示唆した。

本研究の出発点は、エッジ深度が国内外の文献で入手可能な知識にもかかわらず、一般に広く受け入れられたり科学的に妥当かつ標準化された測定手順や定量化されたりするようなコンセンサスが存在しないところにある。これまでに実施されてきたショートトラックの研究は、レースパターンの分析 (Konings et al., 2016; Konings and Hettinga, 2018; Menting et al., 2019; Okabe et al., 2021), 滑走技術のバイオメカニクス的分析 (Ashanin et al., 2021; Kim et al., 2013; van der Kruk et al., 2019), ストレングスとパフォーマンスとの関係 (Felser et al., 2016; Haug et al., 2015), 試合に向けた心理的な準備の重要性 (Beauchamp et al., 2012) などに焦点を当てられているが、用具、特にパフォーマンスの決定要因としてのエッジ深度については、ショートトラックではこれまでのところ研究の対象になっていない。

そこで、本研究では2つの目的を設定した。1つはブレードのエッジ深度について、信頼性の高い測定プロトコルを提示することである。もう1つは、滑走によってエッジ深度にどのような変化があるかを定量化することである。本研究の成果が、ショートトラックに携わるコーチやスポーツ専門家によるより情報に基づいた研究、ひいてはスポーツの技術とパフォーマンスの向上に貢献することを願う。

上記の研究上の疑問に対して、我々は次のような仮説を立てた。

H1: ブレードの研磨後、ブレードの異なる箇所測定したエッジ深度は同じである。

H2a: 滑走後、ブレードに沿って測定されたエッジ深度は、測定点ごとに大きく異なる。

H2b: 摩耗によりブレード中央部分のエッジ深度が小さ

くなる。

これらの仮説は、上述した文献、およびショートトラックに関する我々の専門知識に基づいている。これらの仮説には、測定データと選手の観察に基づいて分析可能な変数（エッジ深度、摩耗、ブレードの種類、推定パフォーマンス）が含まれている。

II. 研究方法

1. 実験設定

本研究には、筆頭著者が所属するカザフスタン・ナショナルチームの男子28名、女子12名が使用するブレードを用いた。いずれもシニアまたはジュニアの国際競技会に参加経験があり、本研究への参加に同意を得た。

事前の予備実験において、ブレードの摩耗には左右差がないことが確認できたことから、本研究には、右足のブレードの結果を用いた。ブレードの研磨には、ダイヤモンド砥石 (ATOMA 社) を用い、いずれのブレードも #400 と #600 で研磨後、#1200 で仕上げを行った。ブレードの横バリを研磨するためのサイドストーンには、超硬フライス用インサート (Sandvik 社, R290.90-12T320M) を用いた。ブレードの研磨は、複数の国のナショナルチームにおいて、技術スタッフとして従事する熟練した技術者である筆頭著者が実施した。

ブレードの研磨直後に最初のエッジ深度測定 (Before) を実施し、トレーニングセッションの実施後、2 回目のエッジ深度測定 (After) を実施した。トレーニングセッションは、リレー形式で実施され、いずれの被験者も 4 周 × 6 タッチ × 4 セット、すなわち合計 96 周を滑走した。なお、本研究では、Figure 1 に示した部分の長さをエッジ深度として定義した。

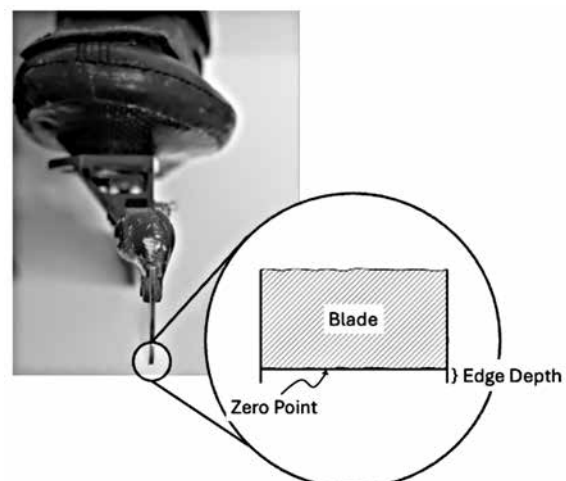


Figure 1. Definition of edge depth



Photo 1. Overview of the measurement apparatus.
Note: The background was removed using an AI-based image editing tool for clarity.



Photo 2. Example of marking the measurement points.

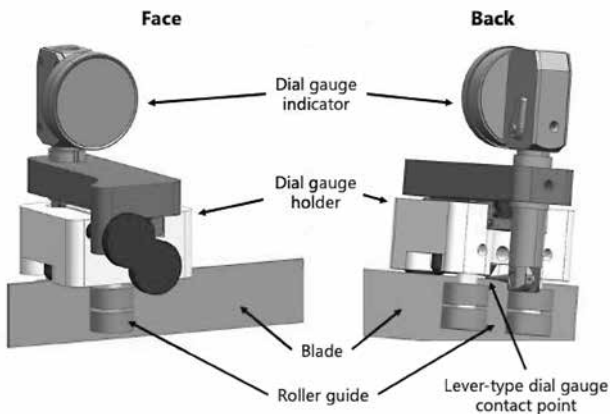


Figure 2. CAD drawing of the measurement apparatus.

2. 測定装置および測定方法

測定には、ダイヤルゲージを用いた独自の設計による測定装置を使用した (Photo 1 および Figure 2) . この装置は、ブレードをローラーガイドで挟みながら移動するガイドシステムを持った本体に、てこ式ダイヤルゲージ (ミットヨ製 TI-614TX, 目量 0.0001 インチ = 2.54 μm) を取り付けただけのもので、ショートトラック用ブレードのエッジ深度を定量的に測定することができる。

測定を始める前に、ブレードを傷をつけないように、柔らかい布ですべての汚れ (氷, 水, 水垢, 油) を徹底的に拭き取った。次に、ブレードを測定用治具に固定した。取り付け中は、ブレードが変形していないこと、センサーの先端が測定ポイントに簡単にアクセスできることを確認した。各ブレードの測定を開始する前に、測定装置を基準点 (ゼロポイント) に対して較正した。

測定ポイントは、ブレードのロック形状 (氷面に対する船底形状) を考慮して決定した。ブレードの中心部分に加えて、前方に 10 ポイント, 後方に 10 ポイント, 計 21 個の測定ポイントを設定した。測定ポイント間の長さは 16.5 mm とした。このように標準化された測定ポイントを、ブレードにマークした。

各測定ポイントにおいて、まずブレードエッジの最高점에接触するように、測定デバイスの変位センサーの先端を慎重に配置した。その基準点からブレードエッジの最低点までの距離を記録した。測定誤差を最小限に抑え、再現性を確保するために、各測定ポイントで少なくとも 3 回測定を繰り返した。各測定ポイントにおける 3 回の平均値を記録した。得られた測定値は、インチからマイクロメートル (μm) に換算した。

3. 統計処理

得られた 21 ポイントのエッジ深度に関する測定データは、7 ポイントごとにグループ化し、分析を行った。各グループは、ブレードの先端から「前部 (Front)」、「中央部 (Middle)」、「後部 (Rear)」とした。使用後のエッジ深度のデータを Shapiro-Wilk 検定で確認したところ、正規性が確認できなかったため、各測定部位間の比較には、Kruskal-Wallis 検定を用いた。また、事後比較には Bonferroni 法によって補正をした Dunn 検定を用いた。有意水準は $p = 0.05$ に設定した。なお、測定結果に男女間で有意差が認められなかったことから、性別による比較は実施しなかった。

III. 結果

本研究の目的は、ショートトラック用ブレードのエッジ深度の測定方法を確立し、滑走によるエッジの摩耗度合いを評価することであった。そこで、独自に開発した測定装置を用いて、ブレード研磨直後と滑走後の 2 つの条件で、各部位 (前部, 中央部, 後部) におけるエッジ深度を測定した。

1. 研磨直後のエッジ深度 (H1)

Table 1. Results of edge depth measurements immediately after sharpening (units: μm).

		Front (before)	Middle (before)	Rear (before)
N	Valid	40	40	40
	Missing	0	0	0
Mean		124.46	124.46	124.46
Median		124.46	124.46	124.46
Mode		121.92 ^a	121.92 ^a	121.92 ^a
Std. Deviation		2.54	2.54	2.54
Skewness		0.315	0.315	0.315
Std. Error of Skewness		0.374	0.374	0.374
Kurtosis		-0.354	-0.354	-0.354
Std. Error of Kurtosis		0.733	0.733	0.733
Minimum		119.38	119.38	119.38
Max		129.54	129.54	129.54

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

研磨直後のエッジ深度は、明確な均一性を示した。Table 1 に研磨直後のエッジ深度に関する統計情報を示した。平均値は3つの部位すべてで同じ (124.46 μm) で、標準偏差は小さかった (SD = 2.54 μm)。中央値と最頻値もほぼ一致しており、エッジが均一に加工されていることを示している。正規性検定でも、データの分布はほぼ正規分布を示しており、仮説 H1 (研磨後、エッジ深度はすべての部位にわたって均一) が認められ、証明された。

2. 使用後のエッジ深度 (H2a, H2b)

Table 2 に、使用後のエッジ深度の結果を示した。Shapiro-Wilk 検定の結果、データの分布が正規性の要件を満たさないケースがいくつかあったため、ANOVA の代わりに Kruskal-Wallis 検定を実施し部位間を比較した (Figure 3)。ブレードの部位によって、測定値に有意な差が認められた ($\chi^2(2) = 59.381$, $p < 0.001$, $\varepsilon^2 = 0.50$, $N = 120$)。事後比較の結果、前部は後部

Table 2. Results of edge depth measurements after use (units: μm).

		Front (after)	Middle (after)	Rear (after)
N	Valid	40	40	40
	Missing	0	0	0
Mean		122.05	115.55	119.38
Median		121.92	115.57	119.38
Mode		121.92	115.57	119.38
Std. Deviation		3.20	2.93	3.18
Skewness		0.121	-0.082	0.041
Std. Error of Skewness		0.374	0.374	0.374
Kurtosis		-0.251	-0.152	-0.202
Std. Error of Kurtosis		0.733	0.733	0.733
Minimum		120.83	114.66	117.57
Maximum		123.37	116.11	120.47

および中央部よりも有意に高値を示し、後部は中央部よりも有意に高値を示した (すべて $p < 0.001$)。すなわち、ブレードの使用後、エッジ深度は中央部で有意に小さく、摩耗が最も大きいことを示しており、仮説 H2b も確認された。

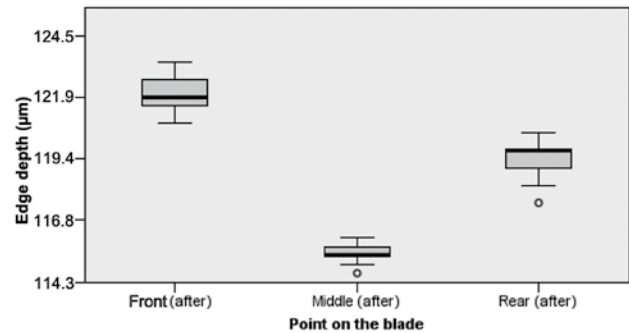


Figure 3. Comparison of edge depth at each measurement location after use.

IV. 考察

本研究の結果、ショートトラック用ブレードのエッジ深度は研磨直後は均一である一方、使用後はブレード部位によって摩耗パターンが異なり、特に中央部で顕著に小さく (浅く) なることが確認された。

本研究の結果は仮説 H1, H2a, H2b のすべてを支持するものであり、ブレードの使用におけるショートトラックの力学的特性を強調している。すなわち、中央部のエッジ深度が著しく小さくなったのは、明らかに荷重の結果であるといえる。ショートトラックでは、カーブ滑走中に体重と遠心力による荷重が主にブレードの中央領域に集中する。この結果は、ブレードと氷の間の力の伝達の不均一性に注目した van der Kruk et al. (2019) によるバイオメカニクスの分析の結果と一致している。

エッジ深度の変化が与える実際的な意味は多岐にわたる。ブレードの早期摩耗や不均一な摩耗は、カーブ滑走時の安定性、加速、操縦性に直接的な影響を与える。とくに、ブレード中央部におけるエッジ深度の過度な減少は、氷のグリップ力の低下につながる。すなわち、ブレードエッジの摩耗によりエッジ深度が減少することで、ブレードを氷面に食い込ませるための角度 (バイト角) が大きくなって局所での圧力が分散し、氷との噛み合いが減少する (Federolf and Redmond, 2010; McGurk, 2015)。これにより、ブレードの氷に対するグリップ力が低下する。これは競技パフォーマンスに直接影響を与え、テクニカルエラーやケガのリスクを高める可能性がある。

本研究の結果は、用具のメンテナンスと最適化に関する新たな視点を提供する。ショートトラックの実践において、研磨の頻度と方法はこれまで主に経験に基づいて決定されてきた。しかし、本研究は、ブレード中央部の摩耗がどれほど速く、いかに体系的であるかに関して、客観的かつ定量化されたデータを提供した。これは、ブレードメンテナンスの Protokol において、中央部の耐久性確認の重要性と、摩耗に強い研磨技術および材料の開発が必要であることを示唆している。

本研究の結果は、ショートトラックにおける技術的準備の科学的根拠に貢献する。スポーツコーチにとって、得られたデータはブレード摩耗のダイナミクスに関する実用的なフィードバックを提供し、個々の選手のニーズに合わせた研磨およびメンテナンス Protokol の開発に役立つ。さらに、ブレードの材料組成と熱処理がブレードエッジの耐久性に重要な役割を果たす可能性があるため、工学および材料科学分野にも新しい課題を示した。

全体として、本研究は、エッジ深度は静的な特性ではなく、動的に変化するパラメータであり、その変化はスポーツ技術、負荷、そして氷面との相互作用の組み合わせによって影響を受けることを明確に示した。すなわち、滑走することによってエッジ深度は減少し、その変化の仕方はブレードの部位によって異なることを示した。

van der Kruk et al. (2019) によれば、ショートトラック滑走中のブレードの圧力中心の位置は、1 ストローク中にブレード後方から前方に移動し、本研究で我々が測定したブレード中央部が多く時間を占めている。また、多くの選手は最も遠心力が大きく働くカーブの中央区間付近を右足で滑走する。このことから、ブレード中央部の摩耗が最も大きくなり、エッジ深度が減少したものと考えられる。

この発見は、バイオメカニクスに関する理論的知識を豊かにするものであり、ショートトラックの実践に直接応用することで、パフォーマンスの最適化とケガの予防に貢献する。

研究の実際的意義と応用の可能性

本研究は、ショートトラックのエッジ深度を定量的に分析するための Protokol の開発と応用に焦点を当てており、重要な実用的意味合いを持ち、このスポーツのさまざまな関係者に影響を与える。ブレードエッジの形状、特にエッジ深度は、氷上での滑走性とグリップの点で重要な要素であり、競技者のパフォーマンス

に直接影響する (Morrison et al., 2005)。

本研究の結果は、主にこのスポーツのコーチやスポーツ専門家に利益をもたらす。彼らは、開発された測定 Protokol を使用し、これまで実施していた主観的または間接的な方法の代わりに定量化されたデータを使用できるようになる。スポーツ専門家とアスリートにブレードの現在の状態に関する正確なデータを提供することで、さまざまな研磨技術の効果を科学的に評価し、アスリートの個々のニーズに最適な設定を見つけることができる。

ブレードのさまざまな部位で測定されたエッジ深度のデータは、スポーツ専門家が摩耗パターンを識別するのに役立ち、よりターゲットを絞った技術的修正やトレーニングプランの修正を可能にし、運動パフォーマンスを最大化する。

研究の限界

この研究では、独自に開発した測定装置を用いて、ショートトラックのエッジ深度を客観的に測定し、最適範囲を決定することを試みた。科学研究の性質上、この研究には一定の限界がある。

主な研究の限界は、サンプルの性質である。研究に行われた測定は、特定の母集団、すなわち著者がアクセス可能なショートトラック選手のグループに限定されていた。データの代表性を目指したが、参加者の人口統計学的特性とサンプルサイズ ($n = 40$) は、本研究の結果を国際的な集団に広く適用するには限界がある (Bryman, 2016)。

本研究の結果は、氷の状態、研磨方法、滑走技術、トレーニング内容に影響を受けるので、条件が変われば、異なるデータが測定される可能性があり、エッジ深度の最適範囲に関する結論の妥当性に影響を与える可能性がある。

広範な検証および標準化プロセスのためには、測定結果の信頼性と比較可能性を国際レベルで確保するためのテストが大幅に必要である。より大きな対照群で、現段階では、因果関係の探求は限られている。測定されたエッジ深度の値とスケートパフォーマンスの間には潜在的な関係があるが、我々の研究は主に測定方法の提示とエッジ深度の空間分布の調査に焦点を当てたものである。

今後の課題

今後の研究では、国際協力を通じてサンプルサイズの拡大と多様化に努める必要がある。これにより、異

なる国やチーム、ブレード、研磨方法に関する比較分析が可能になる。国際データベースの作成により、スピードスケートにおけるブレードの使用とパフォーマンスの関係における世界的な傾向の特定が容易になる可能性がある。Hughes and Bartlett (2002) が指摘しているように、競技スポーツにおいて国際的な比較は重要である。

さらなる研究では、Lozowski et al. (2013) が示したモデルに基づいて、実験室条件下で氷の状態（温度、表面硬度、表面粗さ）を厳密に制御し、体系的に変化させることも必要であろう。

スケートブレードの材料科学研究は、材料組成と製造工程、特にブレードの耐摩耗性とエッジ耐久性、そして使用される鋼の硬度と耐摩耗性に影響を与える金属の熱処理の調査 (Campos Freneschini Canale and Crnkovic, 2004) に大きく貢献する可能性がある。この研究は、他のスポーツ科学者やエンジニアがセンサーを統合した適応システムやスケートブレードを開発するきっかけとなり、ブレードやブレードの変化や摩耗をリアルタイムで監視し、アスリートやコーチに最適なメンテナンスオプションに関するフィードバックを提供する可能性を秘めている。

V. 倫理コンプライアンス

本研究は、ハンガリー科学アカデミー (MTA) の研究倫理規定に定められた原則を全面的に遵守した。同時に、本研究のデータ管理は、欧州一般データ保護規則 (GDPR) に準拠している。著者らは、研究のすべての詳細は科学的誠実性と透明性の要件に準拠しており、スポーツ科学研究の倫理基準に違反していないことを宣言する。

付記

本稿は、筆頭著者が英語で記述した内容を、筆頭著者の確認のもと、共同研究者が日本語に翻訳して投稿したものである。

文献

Ashinin, V., Dolgopolova, N., Dolgopolova, M., Filenko, L., and Pasko, V. (2021) Biomechanical analysis of motional actions of athletes engaged in short track speed skating during the turning phase. *Slobozhanskyi*

Herald of Science and Sport, 9(5):92-107.

Beauchamp, M.K., Harvey, R.H., and Beauchamp, P.H.

(2012) An integrated biofeedback and psychological skills training program for Canada's Olympic short-track speedskating team. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 6:67-84.

Bryman, A. (2016) *Social research methods* (fifth edition). Oxford University Press.

Campos Freneschini Canale, L., and Crnkovic, O.R.

(2004) Heat treatment: tribological applications. In: Totten, G.E., and Liang, H. (eds.) *Surface modification and mechanisms: friction, stress, and reaction engineering*. CRC Press, pp.501-551.

Federolf, P., and Redmond, A. (2010) Does skate

sharpening affect individual skating performance in an agility course in ice hockey?. *Sports Engineering*, 13(1):39-46.

Felser, S., Behrens, M., Fischer, S., Heise, S., Bäumlner, M.,

Salomon, R., and Bruhn, S. (2016) Relationship between strength qualities and short track speed skating performance in young athletes. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(2):165-171.

Haug, W.B., Spratford, W., Williams, K.J., Chapman, D.W.,

and Drinkwater, E.J. (2015) Differences in end range of motion vertical jump kinetic and kinematic strategies between trained weightlifters and elite short track speed skaters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(9):2488-2496.

Hughes, M.D., and Bartlett, R.M. (2002) The use of

performance indicators in performance analysis. *Journal of Sports Sciences*, 20(10):739-754.

Kim, T.H., Jun, M.K., Yoo, S.H., and Park, S.K. (2013)

쇼트트랙 스피드 스케이팅 곡선주로의 반경 차이에 따른 운동학적 분석 [Kinematic analysis of cornering with different radius of curve course in short track speed skating]. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 23(2):109-116. (Abstract Only)

Konings, M.J., and Hettinga, F.J. (2018) The effect of

preceding race efforts on pacing and short-track speed skating performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(8):970-976.

Konings, M.J., Noorbergen, O.S., Parry, D., and Hettinga,

F.J. (2016) Pacing behavior and tactical positioning in 1500-m short-track speed skating. *International*

【 原 著 論 文 】

Journal of Sports Physiology and Performance, 11(1):122-129.

Lozowski, E.P., Szilder, K., and Maw, S. (2013) A model of ice friction for a speed skate blade. Sports Engineering, 16(4):239-253.

McGurk, M. (2015) The contribution of skate blade properties to skating speed [Master's Thesis]. Brock University.

Menting, S.G.P., Konings, M.J., Elferink-Gemser, M.T., and Hettinga, F.J. (2019) Pacing behavior of elite youth athletes: analyzing 1500-m short-track speed skating. International Journal of Sports Physiology and Performance, 14(2):222-231.

Morrison, P., Pearsall, D.J., Turcotte, R.A., Lockwood, K., and Montgomery, D.L. (2005) Skate blade hollow and oxygen consumption during forward skating. Sports Engineering, 8(2):91-97.

Okabe, F., Takao, C., Kawai, T., Yuda, J., and Fujita, Z. (2021) Racing behavior among the winners of men's 500 m final races on the international competition of short-track speed skating. International Journal of Sport and Health Science, 19:98-101.

van der Kruk, E., Reijne, M.M., de Laat, B., and Veeger, D. (H.E.J.) (2019) Push-off forces in elite short-track speed skating. Sports Biomechanics, 18(5):527-538.