

2024年度 9月修了 修士論文

スピードスケート競技における
腕振り動作の役割と指導方法の検討

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻
エリートコーチングコース

5023A351-1

近藤 太郎

研究指導教員： 藤田 善也 准教授

目次

I . 緒言	1
II . 方法	8
1. 被験者	8
2. 試技	8
3. 測定方法	9
4. 分析方法	10
5. 統計処理	11
III . 結果	13
1. ピーク反力	13
1.1. プッシュオフ動作中に生じた地面反力の左右方向成分	13
1.2. 右脚プッシュオフ動作	14
1.3. 左脚プッシュオフ動作	14
1.4. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較	15
2. プッシュオフ時間	15
2.1. 右脚プッシュオフ動作	15
2.2. 左脚プッシュオフ動作	16
2.3. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較	17
3. 力積	17
3.1. 右脚プッシュオフ動作	17
3.2. 左脚プッシュオフ動作	18
3.3. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較	18
4. プッシュオフ動作時の股関節屈曲伸展角度	19

4.1. 右脚プッシュオフ動作	19
4.2. 左脚プッシュオフ動作	19
5. プッシュオフ動作時の股関節内転外転角度	20
5.1. 右脚プッシュオフ動作	20
5.2. 左脚プッシュオフ動作	20
6. プッシュオフ動作時の膝関節屈曲伸展角度	21
6.1. 右脚プッシュオフ動作	21
6.2. 左脚プッシュオフ動作	21
7. プッシュオフ動作時の身体重心速度	21
7.1. 右脚プッシュオフ動作	21
7.2. 左脚プッシュオフ動作	21
IV. 考察	23
1. 腕振り動作と発揮されたプッシュオフ力との関係	23
1.1. 腕振りを伴うプッシュオフ動作の左右差	23
1.2. 腕振り動作と右脚のプッシュオフ力	24
1.3. 腕振り動作と左脚のプッシュオフ力	25
2. プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度	27
2.1. 右脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度	27
2.2. 左脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度	28
3. 高い滑走速度を獲得するための腕振り動作の指導方法の検討	29
V. 結論	33
VI. 謝辞	34
VII. 参考文献	35

I．緒言

スピードスケート競技とは、氷上に設けられたトラックで専用の靴に取り付けられた金属製のブレードを利用して、推進力を得ることで滑走し、所要時間を競う競技である。その起源はオランダとされており、ヨーロッパを中心に寒冷な地域で暮らす人々が、雪や氷に覆われた自然環境での生活に適応し、凍結した運河や湖、川の上を移動する手段として、古くから用いられてきた。日々の生活における移動手段として発達していったスケートはやがて、高い技術力や芸術性で競う「フィギュアスケート」、相手のゴールにシュートして得点を競う「アイスホッケー」、そして、指定距離の所要時間を競う「スピードスケート」へと様態が変化し、発展していった。スピードスケートが競技として認識されたのは1763年のイギリスで行われた競技会とされており、その後、1893年にオランダのアムステルダムで行われた初の世界選手権を皮切りに、広く世界中で普及した。

現在のスピードスケート競技は個人種目と団体種目で大別され、個人種目は男女で距離が異なっている。男子は500m、1000m、1500m、5000m、10000m、マススタート、女子は500m、1000m、1500m、3000m、5000m、マススタートのそれぞれ6種目となっており、女子では長距離種目が男子よりも短く設定されている（International Skating Union, 2022）。団体種目では男女ともにチームパシュート、チームスプリントがあり、3人1チームでの構成で実施され、チームパシュート、チームスプリントの両競技では、3番手の選手までの所要時間を競う種目である。

個人種目（マススタートレースを除く）は、1周400mのコースを2名

の選手がコース内側のインナーレーン、コース外側のアウターレーンに分かれて滑走する。競技開始はスタートラインでの完全な制止状態からスタートし、2 回目のフライングで失格となる。競技開始後は、内側半径 26m、外側半径 30m およびレーン幅 4m のカーブを滑走し、クロッシングストレートと呼ばれる交差区域に到達するたびに、それぞれのレーンで滑走している選手はレーンを交換しなければならないルールがある (International Skating Union, 2022)。トラックでは、直走路を滑走するストレート滑走と曲走路を滑走するカーブ滑走が用いられており、これらのスケーティング技術は異なっているものの、各区間において、適切な滑走動作を用いながら戦略的に高い滑走速度を獲得し、維持することが競技成績の優劣に関わる決定的な要因の一つとなる。

スピードスケート競技における所要時間の短縮には、滑走速度を高める必要があり、側方への脚の伸展および外転動作（以下、プッシュオフ動作とする）によって進行方向への推進力を獲得することが滑走速度を大きくすることに強く関連していることが報告されている (Ingen Schenau et al., 1987)。上述したように、ストレート滑走とカーブ滑走では進行方向の違いによって異なるスケーティング技術が要求されるが、左右の脚で交互にスケーティングを行うという点では共通している。

一般的に前方に移動するストレート滑走では、ストローク序盤から中盤にかけてスケートのブレードを外傾させたアウトエッジ滑走と、ストローク中盤から終盤にかけてブレードを内傾させたインエッジ滑走を左右の脚で交互に行い、インエッジ滑走時にプッシュオフ動作を行うことで推進力を獲得している (D.M. Fintelman et al., 2011)。一方、カーブ滑走では、左ブレードを外傾させ、右ブレードを内傾させながら右脚のブレードでカーブ外側にプッシュオフ動作を行い、その後、右脚を左脚

の前方に交差させ、左脚のブレードを外傾させたままプッシュオフ動作を行う。これらを連続して交互に行うことでカーブの進行方向に合わせて滑走することができる。

ストレート滑走時のプッシュオフ動作について、結城ら（1996）は、ブレードに作用する力を静止座標系に変換することで、上下を鉛直方向、左右を水平方向のブレード反力と定義し、高速滑走時では低速滑走時よりもプッシュオフ動作時に作用する力の鉛直成分は大きく、世界記録保持者のブレード反力は、内向き水平成分の立ち上がりを早めることで、身体重心の水平移動距離が大きく変位するプッシュオフ動作を実施していることを報告している。また、結城（1999）は、映像とブレード反力からストレート滑走時のプッシュオフ動作における各関節トルクと水平ブレード反力を算出し、それらの関係を検討した結果、ストローク前半の股関節外転トルクの発揮が水平ブレード反力を生み出すことに大きく貢献していたことを示唆している。これらのことから、プッシュオフ動作に関与する下肢で発揮される力および力学的に効率の良いプッシュオフ動作を習得することがスピードスケート競技における推進運動の重要なポイントであるといえる。

これまでの研究では、滑走速度とプッシュオフ動作との関連が多くの文献で報告されている（結城ら、1996；結城、1999；湯田ら、2012）。その一方で、上肢における腕振り動作と滑走速度との関連性が記された文献は極めて少ない。スピードスケート競技では、脚のプッシュオフ動作に合わせて腕振り動作が実施される。この腕振り動作は、種目によって両腕を交互に振る場合と片腕のみを振る場合、腕を振らない場合がある。一般的に短距離種目のストレート滑走時には、両腕を振る滑走動作のフリーハンド滑走が用いられ、主に大きな滑走速度を獲得する場面で

使用される。また、短距離および中距離種目では、片腕のみを振る滑走動作のワンハンド滑走が用いられており、左側の腕を休めつつ、対側である右側の腕を脚のプッシュオフ動作と合わせて振る動作となる。ワンハンド滑走は、主に大きな滑走速度の獲得や速度の維持が要求される場面で使用される。長距離種目では、腕を振らない滑走動作のバックハンド滑走が一般的であり、腕振り動作を行わずに、腰部に手を添えることで体力を温存し、脚のプッシュオフ動作のみで滑走する。競技現場では、これら3種類の腕振り動作を種目や滑走速度の違いによって使い分けられているが、すべての種目に共通して、大きな滑走速度の獲得が要求される場面では、ほとんどの選手がフリーハンド滑走およびワンハンド滑走を行なっていることから、腕振り動作が滑走速度の増加に寄与する可能性を推察することができる。スピードスケート競技における腕振り動作は、力の発揮を高めることのみならず、スピードスケートの厚さ1mmにも満たないブレードを氷上で巧みに扱うためのバランス保持などの役割も担っており、高いバランス能力を維持しながら上肢と下肢の協調性を高めることによって、それぞれ異なる動作が連動し、効率の良いプッシュオフ動作を実施することが可能となる。

歩行や走運動などのヒトの移動が伴う運動では、腕振り動作が高い走速度に貢献していることが報告されている（笠井、1982）。走運動を最大努力下で行う際に、腕振りを制約した走動作（片腕固定、両腕固定）の研究（辻本ら、2009）では、通常走行と比較すると、走速度とストライド長が減少し、股関節伸展角度および角速度が減少したことが報告されている。また、走速度の増加に伴うピッチ数およびストライド長の変化に対し、腕振り動作がどのように対応しているのかを検討した馬場（2022）の研究では、前後の腕振り速度を高くすることでストライド長

に対応し、大きな加速度で腕振りを実施することで、脚全体のスイング速度の増加によるキック力が変化し、走速度の更なる増大に貢献できることを示唆している。さらに、下肢関節の屈曲伸展動作という観点から、垂直跳びと腕振り動作の関連性を検討した原（2006）の研究では、腕振り動作の有無が下肢関節の仕事量、身体仕事量および跳躍高に影響を与えることを報告している。これらは、腕振り動作自体が下肢関節の屈曲伸展動作に直接的には関与していないが、その振る舞いによって、間接的に下肢関節の仕事量を増加させることで、跳躍高の上昇に貢献することを報告している。以上のことから、垂直跳びは鉛直方向、走運動は水平方向と移動させる方向はそれぞれ異なるものの、腕振り動作によって下肢関節の屈曲伸展動作に作用する力の発揮を高めることで、より効率的な移動運動を可能にしていることが推察できる。上述したような腕振り動作によって下肢筋力から発揮される力を高める要因は、スピードスケート競技においても同様に存在すると考えられる。しかし、腕振り動作の実態と脚で発揮された力成分が滑走速度の獲得にどのような影響を及ぼすのかについては、未だ検討されていない。

冬季種目であるスピードスケート競技は季節性のスポーツであり、スケートリンクをはじめとするトレーニング環境の制約を受けるため、氷上での滑走動作を模倣した陸上トレーニング（以下、滑走模倣動作とする）が国内外問わず、多くの選手のトレーニング手段として定着している。滑走模倣動作のバリエーションは多種多様であるが、その多くは実際の滑走動作にも多くの点で類似しており、主に夏季トレーニングにおける下肢筋力の強化やスケーティング技術の習得および改善に大きく寄与している。実際にサイドジャンプ（下肢関節を深く屈曲した状態で左右方向へのジャンプを連続して行う滑走模倣動作の一つ）を対象とした

湯田ら（2007）の研究では、スピードスケート選手の夏季トレーニングの手段として、滑走模倣動作でのサイドジャンプをキネティクスの的に検討し、サイドジャンプが非氷上期において有効な専門的トレーニング手段として報告している。このように、サイドジャンプをはじめとする滑走模倣動作の研究は、実験環境の違いによる様々な影響は無視できないが、氷上での滑走動作における筋活動やスケーティング技術と非常に類似していることを踏まえると、腕振り動作の影響を滑走模倣動作から検討することは有用であるといえる。また、実験環境が設定しやすいという利点があり、様々な分析手法を実践することが可能となる。したがって、スピードスケート競技の研究に滑走模倣動作を用いることは、腕振り動作によって滑走速度に及ぼす影響を一定水準で明らかにできるものと考えられる。さらに、オリンピック出場経験を有する筆者自身が上肢の腕振り動作を改善したことで、競技パフォーマンスが大幅に向上した経験があることから、スピードスケート競技における腕振り動作の効果について迫ることは、選手の競技力向上および指導者の資質向上にも貢献できると考えられる。実際に多くの指導者が自身の経験に基づいた指導方法を実践しているため、その内容も多種多様であるように見受けられる。そのため、選手と指導者の間で混乱を招く原因になることが指導現場の課題として挙げられる。また、筆者自身が腕振り動作を改善することで、足が先行することなく、スムーズな体重移動が実施できたことから、ストレート滑走時における腕振り動作によって、脚で発揮される力の左右方向成分に関与し、より滑走速度を高めることができる要素が内包されている可能性があると考えられる。そこで、これまでの先行研究から明らかになった下肢の動態を中心とした滑走動作に関する科学的な知見を踏まえ、腕振り動作がスピードスケートの滑走速度にどのような

な影響を及ぼしているのかを明らかにすることは、腕振り動作の役割をより明確にし、競技現場での更なる強化方策としての重要な知見になると考えられる。また、この研究によってトレーニング手法やトレーニング技術の習得および改善に役立つ新たな知見を得ることができ、選手と指導者が共通理解を持つことで、競技パフォーマンスの更なる向上の一助となることを期待する。

そこで、本研究では、スピードスケート競技のストレート滑走時における腕振り動作に焦点を当て、滑走速度に関与する要因をバイオメカニクス的手法によって明らかにし、得られた知見をもとに高い滑走速度を獲得するための腕振り動作の指導方法を検討することを目的とした。

II. 方法

1. 被験者

被験者は、スピードスケート競技を専門とする大学生の現役選手 10 名（年齢 20 ± 1 歳、身長 172.9 ± 7.0 cm、体重 70.2 ± 6.4 kg）とした。全被験者の競技歴は 10 年以上であり、それぞれが国内主要大会において入賞経験を持つことから、高度な滑走技能を有すると判断した。なお、実験に先立ち、これらの被験者には、実験の主旨や目的、方法および安全性について十分に説明し、実験参加の同意を書面にて得られた者にのみ測定を実施した。本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を受けたのちに実施した（承認番号：2023-177）。

2. 試技

本研究では、夏季のトレーニング手段として用いられるスライドボード（ULTRASLIDE 社製、幅 60cm、長さ 230cm）上で行うスピードスケート競技のストレート滑走模倣動作を分析対象とした。被験者には、ランニングやバイクで十分にウォーミングアップを行わせた後、滑走模倣動作を最大努力で左右それぞれの脚で実施させた。試技は、3 つの異なる条件下（1. 両腕振り、2. 片腕振り、3. 腕振りなし）で実施した。本来スライドボードでの滑走模倣動作は左右方向への反復運動で実施されているが、本実験では、左右それぞれの支持脚から一方向のみへのプッシュオフ動作を最大努力で実施するよう指示した。さらに、それぞれの

条件下はスピードスケート競技で用いられるフリーハンド滑走（両腕振り）、ワンハンド滑走（片腕振り）、バックハンド（腕振りなし）を模倣した滑走動作となり、選手には普段のトレーニングで実践している滑走動作のまま動作を遂行するよう指示した。使用するスライドボードには被験者ごとにシリコンスプレー（呉工業 KURE 社製、型番:1046）を塗布し、布ウエスで余分な滑走剤を拭き取ることで表面を整え、条件統制を行った。各試行を左右の脚で 2 回ずつ行い、被験者から 3 段階の主観的評価（○：良い、△：どちらでもない、×：良くない）を収集した。収集した評価のうち、「どちらでもない」もしくは「良くない」と回答された試技を失敗試技とした。

3. 測定方法

スライドボードでのプッシュオフ動作時に作用する地面反力の出力信号は、スライドボード直下に埋設されたフォースプレート（型番: 9287C、Kistler 社製）によって計測し、データ収録解析システム（PowerLab、Ad Instruments 社製）を用いてサンプリング周波数 1000Hz で PC に収集した。なお、地面反力データを正確に収集するために、スライドボードの幅 60cm、厚さ 1.5cm に合わせたスターティングブロックを自作して、フォースプレート上に固定し、横にスライドボードを設置した（図 2-1）。また、各被験者による滑走模倣動作中の 3 次元座標データを収集するために、光学式モーションキャプチャシステムのカメラ 8 台（Prime X 22、OptiTrack 社製）を用いてサンプリング周波数 250Hz で計測した。赤外線反射マーカースは球状マーカースを使用し、身体計測点 41 点（Skeleton: Baseline 41 Points）の 3 次元座標データを計測した。

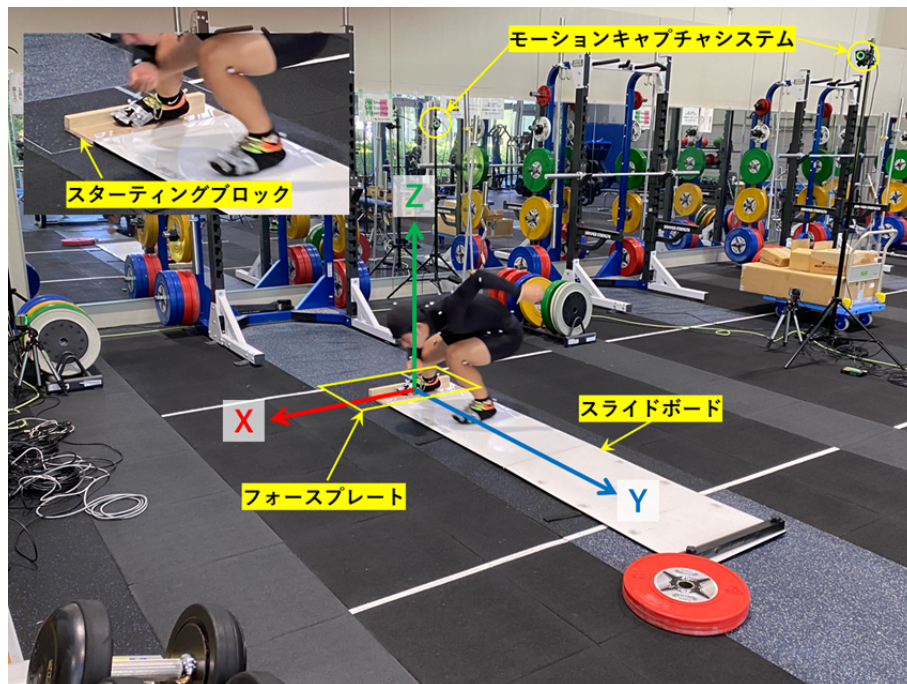


図2-1. 実験設定

4. 分析方法

本研究では、成功試技のうち最も地面反力が高い値を示した試技を分析対象とした。フォースプレートから収集された出力信号より、解析ソフトウェア（LabChart、Ad Instruments 社製）を用いてフォースプレートに作用した力の各軸方向成分を算出することで地面反力を求めた。求められた地面反力データより、プログラミングソフトウェア（MATLAB、MathWorks 社製）を用いて左右方向への力の作用時間、地面反力のピーク値の左右方向成分（以下、ピーク反力とする）および力積の左右方向成分を算出した。力積は、左右方向成分の作用時間中に生じた地面反力を積分して求めた。また、左右方向への力の作用時間（以下、プッシュオフ時間とする）は、左右方向への力が 100N を超えた時点をプッシュ

オフ開始時点とし、力が 100N 未満になった時点をプッシュオフ終了時点と定義し、時点間に要した時間とした。

収集された 3 次元座標データは、解析ソフトウェア (Motive Body、OptiTrack 社製) で後処理を行ったのちに、動作解析ソフトウェア (Frame-DIAS V、Q'sfix 社製) 上で被験者に対して前後方向を X 軸 (前後の前方向を正)、左右方向を Y 軸 (左右の進行方向を正)、上下方向を Z 軸 (上下の上方向を正) とする静止座標系を構築したうえで、キネマティクスパラメータを算出した。身体重心速度は、阿江 (1996) の身体部分係数を用いて各セグメントの部分重心と身体重心を算出したうえで、身体重心の変位を 1 フレームに要した時間で除して求めた。また、プッシュオフ時の股関節屈曲伸展角度は、X 軸と支持脚側の上前腸骨棘と膝関節中心とを結ぶベクトルのなす角とし、伸展方向を正とした。股関節内転外転角度は、Z 軸を反転させたベクトルと支持脚側の上前腸骨棘と膝関節中心とを結ぶベクトルのなす角とした。なお、本研究では対象の運動において上体がほぼ一定に保たれることから、股関節の動作は大腿ベクトルの変化によって生じると仮定し、上記の通り定義した。膝関節屈曲伸展角度は、支持脚側の膝関節中心と上前腸骨棘とを結ぶベクトルと、膝関節中心と足部外踝とを結ぶベクトルのなす角とした。

5. 統計処理

各測定項目は平均値±標準偏差で表した。3 つの試技間のパラメータを、反復測定の一要因分散分析を用いた。帰無仮説が棄却された場合は、Bonferroni 法で下位検定を行い、有意確率は 5%未満 ($p<0.05$) を有意、10%未満 ($p<0.1$) を有意傾向とした。さらに、右脚プッシュオフ動作と

左脚プッシュオフ動作における両腕振りおよび腕振りなしの条件間の左右差を検討するため、スチューデントの t 検定を用いた。有意確率は 5% 未満 ($p < 0.05$) を有意、10% 未満 ($p < 0.1$) を有意傾向とした。なお、片腕振りは右脚プッシュオフ動作時には右腕のみを前方に振り、左脚プッシュオフ動作時には右腕のみを後方に振る動作であり、左右の脚のプッシュオフ動作とそれぞれ異なる動作となるため、左右を比較するための分析対象から除外した。本研究の統計処理には、統計解析ソフトウェア (SPSS Statistics Ver.29, IBM 社製) を用いた。

Ⅲ．結果

1. ピーク反力

1.1. プッシュオフ動作中に生じた地面反力の左右方向成分

図 3-1 はプッシュオフ動作中に生じた地面反力の左右方向成分の様相を示したものである。本研究の分析範囲は、プッシュオフ動作の開始を、地面反力の左右方向成分が 100N を上回った時点とし、プッシュオフ動作の終了を、地面反力の左右方向成分が 100N を下回った時点までとした。プッシュオフ動作の開始後、地面反力の左右方向成分は著しく上昇し、ピークを迎えるまで増加したのちに急激に低下し、動作の終了を迎えていることが示された。なお、この図は一例のみを示したものであるものの、両腕振り条件では立ち上がりの途中で力がより急激に高まっていることが見て取れる。

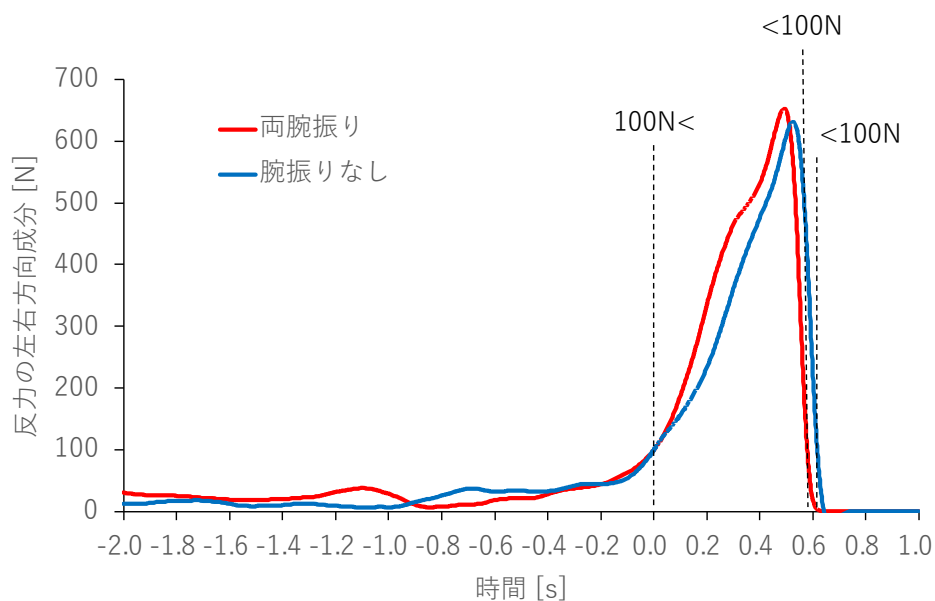


図3-1. プッシュオフ動作時に生じた反力の左右方向成分

1.2. 右脚プッシュオフ動作

図 3-2 に、右脚のプッシュオフ動作時における各条件下のピーク反力を示した。右脚プッシュオフ動作時のピーク反力は、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。また、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い傾向がある値を示した。

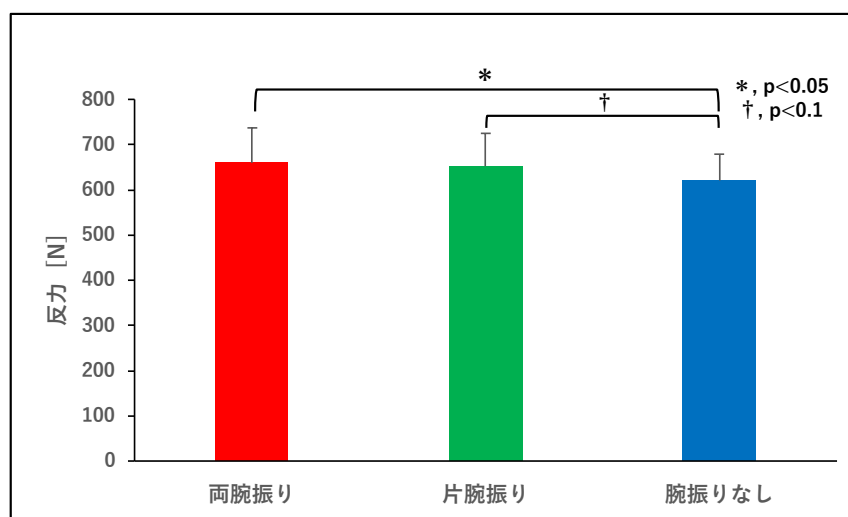


図3-2. ピーク反力の左右方向成分（右脚プッシュオフ動作）

1.3. 左脚プッシュオフ動作

図 3-3 は、左脚のプッシュオフ動作時における各条件下のピーク反力を示したものである。左脚プッシュオフ動作時のピーク反力は、各条件間で有意な差は認められなかった。

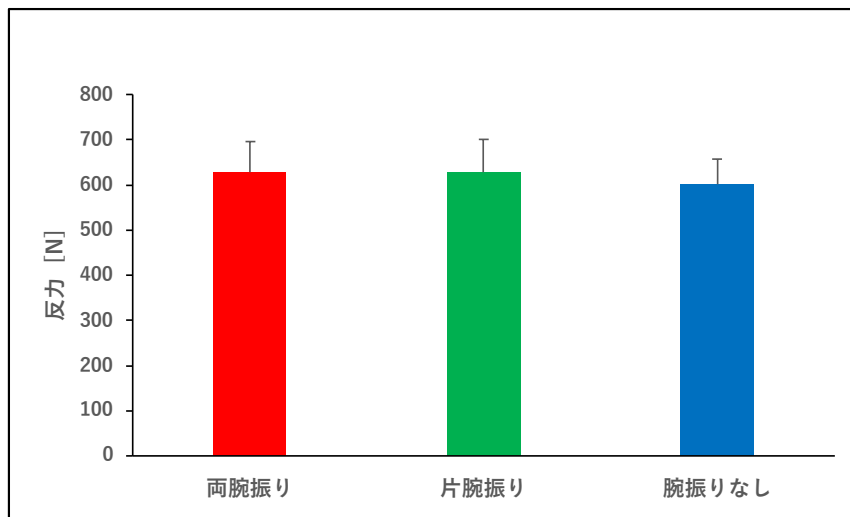


図3-3. ピーク反力の左右方向成分（左脚プッシュオフ動作）

1.4. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較

ピーク反力は、右脚プッシュオフ動作時の両腕振りが左脚プッシュオフ動作時の両腕振りと比較して、有意に高い傾向がある値を示した ($p < 0.099$)。腕振りなしでは、右脚プッシュオフ動作と左脚プッシュオフ動作との間で有意な差は認められなかった。

2. プッシュオフ時間

2.1. 右脚プッシュオフ動作

図 3-4 は、右脚のプッシュオフ動作時における各条件下のプッシュオフ時間を示したものである。右脚プッシュオフ動作時のプッシュオフ時間は、各条件間で有意な差は認められなかった。

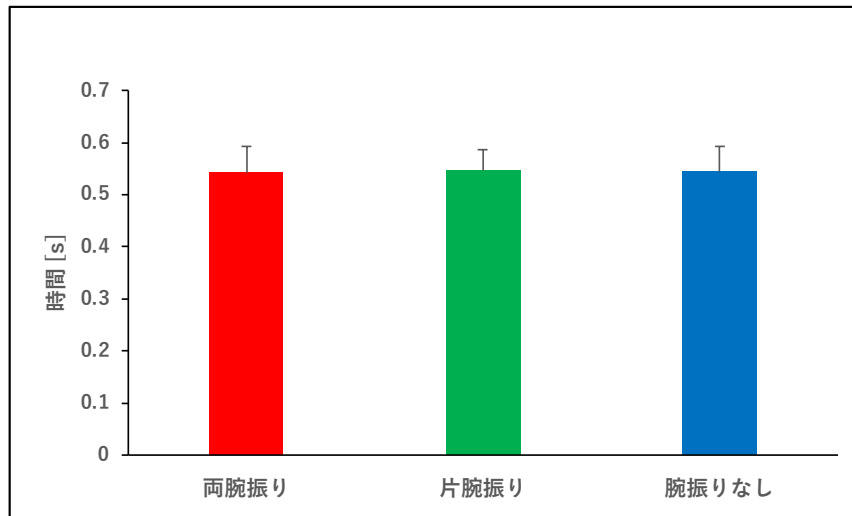


図3-4. プッシュオフ時間（右脚プッシュオフ動作）

2.2. 左脚プッシュオフ動作

図 3-5 は、左脚のプッシュオフ動作時における各条件下のプッシュオフ時間を示したものである。左脚プッシュオフ動作時のプッシュオフ時間は両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に長い値を示した。

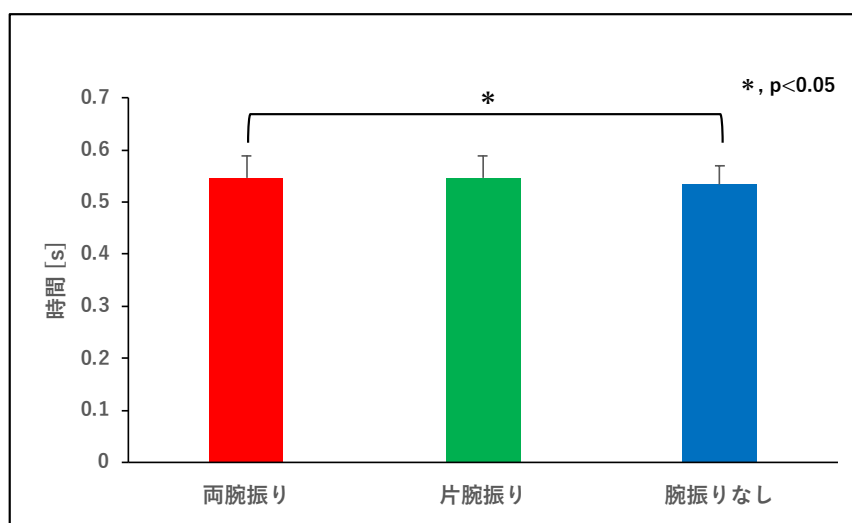


図3-5. プッシュオフ時間（左脚プッシュオフ動作）

2.3. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較

プッシュオフ時間は、右脚プッシュオフ動作と左脚プッシュオフ動作の両腕振りおよび腕振りなしとの間で有意な差は認められなかった。

3. 力積

3.1. 右脚プッシュオフ動作

図 3-6 は、右脚のプッシュオフ動作時における各条件下の力積を示したものである。右脚プッシュオフ動作時の力積は、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に大きな値を示し、片腕振りも腕振りなしと比較して、有意に大きな値を示した。また、両腕振りが片腕振りと比較して、有意に大きな傾向がある値を示した。

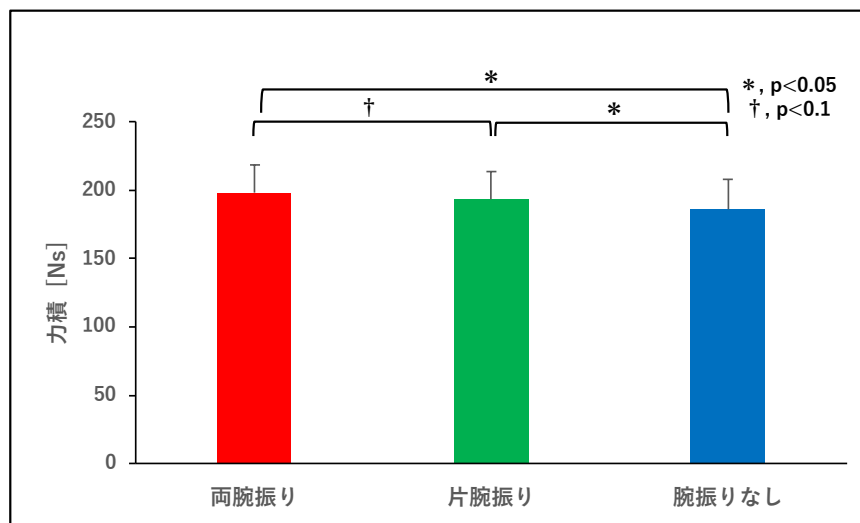


図3-6. 力積の左右方向成分（右脚プッシュオフ動作）

3.2. 左脚プッシュオフ動作

図 3-7 は、左脚のプッシュオフ動作時における各条件下の力積を示したものである。左脚プッシュオフ動作時の力積は、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に大きな値を示した。また、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に大きな傾向がある値を示した。

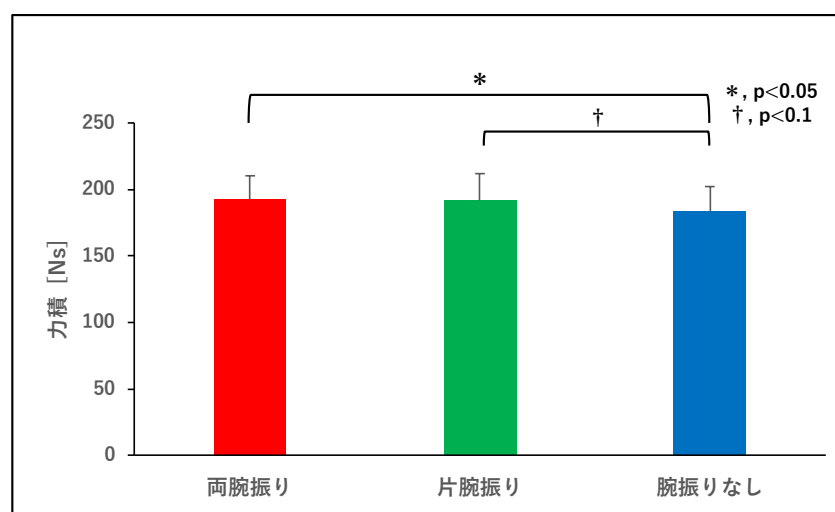


図3-7. 力積の左右方向成分（左脚プッシュオフ動作）

3.3. 左右の脚における両腕振りおよび腕振りなしとの比較

力積は、右脚プッシュオフ動作時の両腕振りが左脚プッシュオフ動作の両腕振りと比較して、統計的有意差や有意傾向はないものの、左右差を疑うような兆候がみられた ($p < 0.102$)。腕振りなしでは、右脚プッシュオフ動作と左脚プッシュオフ動作との間で有意な差は認められなかった。

4. プッシュオフ動作時の股関節屈曲伸展角度

4.1. 右脚プッシュオフ動作

表 3-1 に、右脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度についてのプッシュオフ開始時点およびプッシュオフ終了時点を条件ごとに示した。右脚プッシュオフ動作開始時の股関節屈曲伸展角度は、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に低い値を示した。プッシュオフ終了時点では、各条件間で有意な差は認められなかった。

表3-1 右脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度

			両腕振り	片腕振り	腕振りなし
股関節屈曲伸展角度	(deg.)	開始時点	45.1±6.7	47.2±4.6	48.8±5.9 ^{1*}
		終了時点	82.4±11.9	84.9±9.0	86.8±8.3
股関節内転外転角度	(deg.)	開始時点	8.0±6.8	9.0±7.6	2.7±7.0 ^{1*}
		終了時点	53.7±2.7	53.4±3.2	51.9±3.2 ^{1†,2*}
膝関節屈曲伸展角度	(deg.)	開始時点	99.1±10.2	100.7±8.5	102.1±10.7
		終了時点	167.6±7.0	168.2±3.7	168.1±5.4
身体重心速度	(m/s)	開始時点	0.29±0.05	0.3±0.03	0.32±0.04
		終了時点	2.91±0.14	2.86±0.14	2.77±0.13 ^{1*}

1* 両腕振りと有意差あり, 1† 両腕振りと有意傾向あり

2* 片腕振りと有意差あり, 2† 片腕振りと有意傾向あり

*, p<0.05、†, <0.1

4.2. 左脚プッシュオフ動作

表 3-2 に、左脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度についてのプッシュオフ開始時点およびプッシュオフ終了時点を条件ごとに示した。左脚プッシュオフ動作開始時の股関節屈曲伸展角度は、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に低い値を示した。プッシュオフ終了

時点では、各条件間で有意な差は認められなかった。

表3-2 左脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度

			両腕振り	片腕振り	腕振りなし
股関節屈曲伸展角度	(deg.)	開始時点	45.1±5.1	44.9±5.2	49.1±5.8 ^{2*}
		終了時点	80±11.6	84.4±7.3	83.8±8.2
股関節内転外転角度	(deg.)	開始時点	14±18.3	12.9±14.1	7.6±11.0 ^{2*}
		終了時点	54.5±8.2	53.1±3.8	50.1±2.3
膝関節屈曲伸展角度	(deg.)	開始時点	101.1±5.7	100.5±7.8	102.8±8.5
		終了時点	166.4±8.0	169.1±4.9	166.7±5.9
身体重心速度	(m/s)	開始時点	0.28±0.04	0.31±0.02 ^{1*}	0.34±0.03 ^{1*,2*}
		終了時点	2.86±0.19	2.85±0.16	2.74±0.13 ^{2*}

1* 両腕振りと有意差あり, 1† 両腕振りと有意傾向あり

2* 片腕振りと有意差あり, 2† 片腕振りと有意傾向あり

*, p<0.05、†, <0.1

5. プッシュオフ動作時の股関節内転外転角度

5.1. 右脚プッシュオフ動作

右脚プッシュオフ動作開始時の股関節内転外転角度は、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。プッシュオフ終了時点は両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い傾向がある値を示した。さらに、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。

5.2. 左脚プッシュオフ動作

左脚プッシュオフ動作開始時の股関節内転外転角度は、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。プッシュオフ終了時点は、各条件間で有意な差は認められなかった。

6. プッシュオフ動作時の膝関節屈曲伸展角度

6.1. 右脚プッシュオフ動作

右脚プッシュオフ動作時の膝関節屈曲伸展角度は、プッシュオフ開始時点およびプッシュオフ終了時点ともに各作用で有意な差は認められなかった。

6.2. 左脚プッシュオフ動作

左脚プッシュオフ動作時の膝関節屈曲伸展角度は、プッシュオフ開始時点およびプッシュオフ終了時点ともに各作用で有意な差は認められなかった。

7. プッシュオフ動作時の身体重心速度

7.1. 右脚プッシュオフ動作

右脚プッシュオフ動作開始時の身体重心速度は、各条件間で有意な差は認められなかった。プッシュオフ終了時点では、両腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。

7.2. 左脚プッシュオフ動作

左脚プッシュオフ動作開始時の身体重心速度は、両腕振りが片腕振り、

腕振りなしと比較して、有意に低い値を示した。また、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に低い値を示した。プッシュオフ終了時点では、片腕振りが腕振りなしと比較して、有意に高い値を示した。

IV. 考察

1. 腕振り動作と発揮されたプッシュオフ力との関係

1.1. 腕振りを伴うプッシュオフ動作の左右差

スピードスケート競技において、一般的なキネティクス分析で用いられるフォースプレート等の設備を氷上で利用することは極めて難しい。そのため、これまでに陸上トレーニングの手段として用いられるストレート滑走模倣動作の地面反力がフォースプレートで計測され、発揮された力の特徴が検討されている（湯田ら、2007）。本研究においても、スライドボードを用いた滑走模倣動作における各条件間のピーク反力、プッシュオフ時間および力積を比較検討した。その結果、両腕の腕振りを伴うプッシュオフ動作において、右脚プッシュオフ動作のピーク反力で高い傾向があることが示され、統計的有意差や有意傾向はないものの、力積にも差を疑うような兆候がみられた。一方で、腕振りを伴わないプッシュオフ動作では、ピーク反力と力積に差はみられなかった。これらのことは、右脚と左脚のプッシュオフ動作では、同じ両腕の腕振り動作を伴う場合には、発揮される力に左右差があることを示唆している。なお、ストレート滑走の模倣動作は、一般的には左右の反復運動として捉えられているが、本研究では、選手の身体的特徴や滑走動作の左右差がある可能性を考慮し、左右それぞれの脚のプッシュオフ動作について検討した。

1.2. 腕振り動作と右脚のプッシュオフ力

右脚のプッシュオフ動作において発揮されるピーク反力は、両腕振りが腕振りなしと比較して高く、片腕振りが腕振りなしと比較して高い傾向を示した（図 3-2）。これらのことは、両腕を振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、また、右腕のみを前方に振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、強い力の発揮に関連していることを示唆している。さらに、右脚のプッシュオフ動作において発揮された力積は、両腕振りが片腕振りおよび腕振りなしと比較して大きく、片腕振りが腕振りなしと比較して大きい傾向を示した（図 3-6）。これらのことは、両腕を振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、また、右腕のみを前方に振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、さらに、両腕を振るプッシュオフ動作は右腕のみを前方に振る場合よりも、大きな力積の獲得に関連していることを示唆している。これらの結果は、垂直跳びにおける跳躍時の腕振り動作の効果を検討した原（2006）の研究と関連する点が多い。下肢関節の伸展動作によって実施される垂直跳びの運動は、スピードスケート競技におけるストレート滑走時の運動と、下肢のプッシュオフ動作によって力が発揮される点では共通しており、垂直跳びでは、腕振り動作によって下肢関節の仕事量および身体全仕事量が増大し、跳躍高が上昇することが報告されている。さらに、スケートティング滑走運動という点で類似するクロスカン트리スキー競技では、スケートティング滑走動作中の腕振り動作が、生体力学のおよび生理学的側面に与える影響を検討した研究（Hegge et al., 2014）が行われている。ここでは、低速（10km/h）、中速（15km/h）、高速（20km/h）の3つの

異なる速度域で腕を前後に振る滑走動作（腕振りあり）と腕を胸の前に固定した状態の滑走動作（腕振りなし）を比較しており、その結果、腕振り動作を伴う滑走動作がすべての速度域でピーク反力が増加し、力積も増大することが明らかにされている。これらの先行研究では、必ずしも力を発揮する主体ではない上肢が、その振る舞いによって、より高いパフォーマンスの発揮に関与していることを示しているが、スピードスケート競技におけるプッシュオフ動作時においても、腕を振るという動作そのものが下肢のプッシュオフ動作には直接的に力を作用させる役割はないものの、間接的に力の発揮を高めていることが本研究により明らかとなったと考えられる。これらの点をより詳細に考察するためには、脚のプッシュオフ動作と腕振り動作を細かく観察する必要があるだろう。

1.3. 腕振り動作と左脚のプッシュオフ力

左脚プッシュオフ動作時のプッシュオフ時間は、両腕振りが腕振りなしと比較して長いことが明らかになった（図 3-5）。これらのことは、両腕を振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、プッシュオフ動作中に発揮された力の作用時間に関連していることを示唆している。さらに、左脚のプッシュオフ動作において発揮された力積は、両腕振りが腕振りなしと比較して大きく、片腕振りが腕振りなしと比較して大きい傾向を示した（図 3-7）。これらのことは、両腕を振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、また、右腕のみを後方に振るプッシュオフ動作は腕を振らない場合よりも、大きな力積の獲得に関連していることを示唆している。左脚プッシュオフ動作では、右脚プッシュオフ動作と異なり、腕振りによって力の作用時間が長くなることが示されたが、ピ

ーク反力に統計的有意差はみられなかった。一方で、力積には右脚のプッシュオフ動作と類似した結果がみられた。これらのことは、左脚ではプッシュオフ動作時の腕振りによって、より力を作用させる時間を長くすることで、力積を獲得するような動作が行われている可能性が示唆される。先に述べた通り、両腕を振るプッシュオフ動作に左右差がみられることを踏まえると、右脚ではよりピークを高めるような力の発揮が行われた一方で、左脚では作用時間を長くすることで、力積を獲得するような力の発揮が行われていた可能性が考えられる。この点については、本研究の対象がストレート滑走模倣動作であるという点も考慮し、実際のスピードスケート競技中において、腕振りがどのように関与しているのかを詳細に検討する必要があるが、ピーク反力を高めることで力積を獲得する方策と、力の作用時間を長くすることで力積を獲得する方策の2つが示された点は非常に意義深い。これらの知見は、競技現場における腕振り動作を伴うプッシュオフ動作の指導の際に有益であり、腕を振ること自体が脚の発揮する力に大きく関与することが選手や指導者の間で感覚的に捉えられてきた。本研究のキネティクスパラメータから示された結果は、ストレート滑走動作時の不安定な氷上でのバランス保持やプッシュオフ動作に対応する腕振りのタイミングを意識することに加え、腕振り動作が高い滑走速度を獲得するためのプッシュオフ力を高める役割を持つことが本研究から明らかとなったと考えられる。これらは、競技現場における具体的かつ実践的な腕振り動作のトレーニング方法を検討するための重要な基盤になるといえる。

2. プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度

2.1. 右脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度

両腕を振るプッシュオフ動作では、プッシュオフ開始時点の股関節屈曲伸展角度が、腕を振らない場合と比較して小さかった。このことは、両腕を振る動作によって股関節がより屈曲した滑走姿勢でプッシュオフ動作を実施している可能性を示唆している。プッシュオフ開始時点とプッシュオフ終了時点の股関節内転外転角度は、両腕を振るプッシュオフ動作では、腕を振らない場合と比較して大きいことが示された。また、プッシュオフ終了時点では、右腕のみを前方に振るプッシュオフ動作が腕を振らない場合と比較して大きかった。これらのことは、両腕を振る動作によって股関節をより外転させた、つまりは身体全体を内傾させた滑走姿勢を獲得している可能性を示唆している。また、片腕を振る動作によってプッシュオフ終了時点でより外転させた内傾姿勢を保持したままプッシュオフ動作を完了していることが示唆された。

スピードスケート競技において、滑走姿勢を低く保つことは空気抵抗による滑走速度の低下を抑え、効率的なプッシュオフ動作を実施するためには非常に重要である。結城ら（1996）は、スピードスケート滑走中のブレード反力を計測し、世界記録保持者の滑走中のブレード傾斜角度が高速滑走時の平均に比べ、ストローク開始時の外傾が小さく、早いタイミングで内傾していたことを報告している。プッシュオフ動作で発揮された力は、スケート靴に取り付けられたブレードを介して氷に伝わり、進行方向の推進力を得ることが可能となる。そのため、ブレード傾斜角度が氷面を捉えるうえで非常に重要であり、プッシュオフ動作における

下肢関節の動態によって滑走速度に対応し得る適切なブレード傾斜角度が求められる。本研究においては、両腕を振るプッシュオフ動作が腕を振らない場合と比較して、プッシュオフ開始時点で股関節をより深く屈曲させた状態からプッシュオフ動作を実施しており、また、より股関節を外転させた内傾姿勢によるプッシュオフ動作を実施していることから、腕振り動作によって力の立ち上がりを早めることにより、プッシュオフ力の左右方向成分を高めていたことが考えられる。プッシュオフ終了時点においても、腕振りを伴うプッシュオフ動作では内傾させた滑走姿勢を保持したままプッシュオフ動作を実施しており、身体重心速度も高い値を示したことから、腕振りを伴うプッシュオフ動作が各関節角度および身体重心速度を変化させ、発揮される力の増大に関連することが本研究から明らかとなったと考えられる。

また、垂直跳びや走運動をはじめとする他の運動においても、腕振り動作を制約することで下肢の関節角度が小さくなり、発揮される力が減少することが報告されている（原 2006；辻本ら 2009）。このことから、下肢の関節運動において、腕振り動作と下肢のプッシュオフ動作との関連性は他の運動と共通しており、腕振り動作が下肢の動態に影響を及ぼし、高い滑走速度を獲得することのできるプッシュオフ力へと変化させている可能性が明らかとなった。

2.2. 左脚プッシュオフ動作時の各関節角度と身体重心速度

右腕のみを後方に振る左脚のプッシュオフ動作では、プッシュオフ開始時点の股関節屈曲伸展角度が、腕を振らない場合と比較して小さかった。このことは、右腕のみを後方に振る動作によって、より股関節を屈

曲させた滑走姿勢でプッシュオフ動作を実施している可能性を示唆している。また、股関節内転外転角度については、プッシュオフ開始時点で右腕のみを後方に振るプッシュオフ動作が、腕を振らない場合と比較して大きかった。このことは、右腕のみを後方に振るプッシュオフ動作によって、より股関節を外転させた、つまりは身体全体を内傾させた滑走姿勢を獲得している可能性を示唆している。これらの結果は、右脚と同様に左脚においても、腕振り動作によって股関節をより深く屈曲させた姿勢と外転させた内傾姿勢でのプッシュオフ動作の実施に関連し、身体重心速度も高い値を示したことから、腕振り動作によって発揮される力の増大に貢献することが明らかになったといえる。

3. 高い滑走速度を獲得するための腕振り動作の指導方法の検討

スピードスケート競技におけるストレート滑走運動時には、脚のプッシュオフ動作によって身体を左右方向に大きく移動させる必要がある。腕振りを伴うプッシュオフ動作を詳細に観察すると、腕振りは体幹や下肢の移動に先んじて発生していることがわかる（図 4-1）。腕を振る動作の実施、すなわち腕の部分重心の移動のためには外力が作用するため、腕振りを伴うプッシュオフ動作では、先んじて実施される腕振りのための外力が作用しているといえる。一方で、腕振りを伴わないプッシュオフ動作では、腕を振るためには必要な外力は作用しないこととなる。

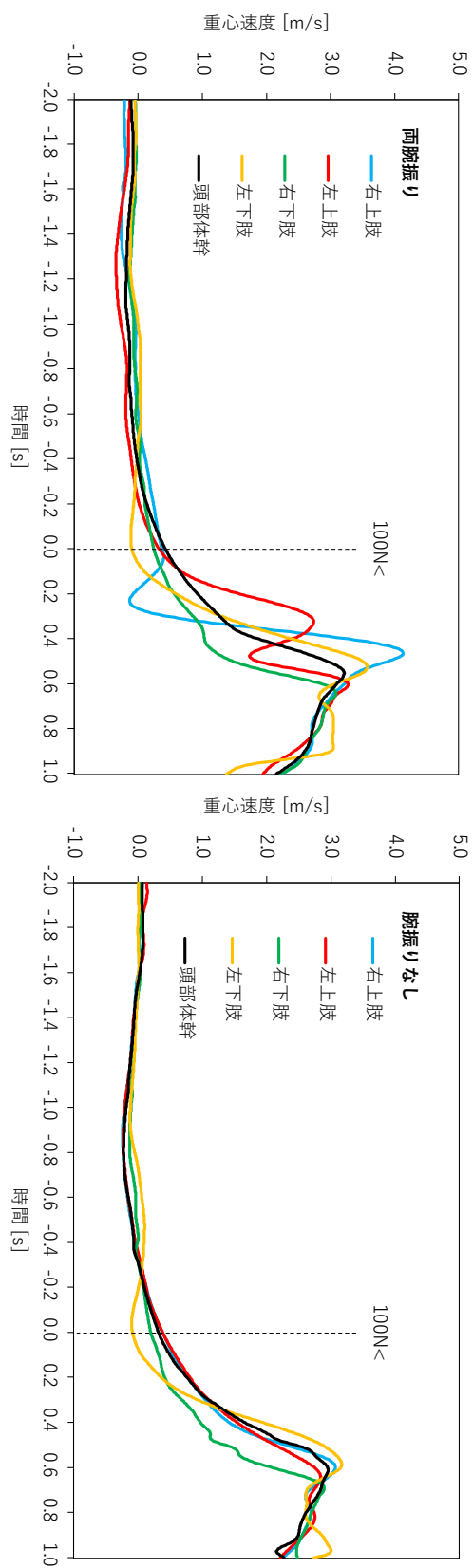


図4-1. 右脚プッシュオフ動作中の身体部分重心速度の左右方向成分

この力の作用は他の部分重心の移動に先んじて起こるため、脚のプッシュオフ動作を開始する際には「起点」の役割を果たすと考えられる。両腕を振るプッシュオフ動作では、両腕の部分重心の左右方向への加速はそれぞれの腕で同時には起きておらず、プッシュオフ動作を実施する支持脚の対側の腕(右脚プッシュオフ動作の場合は左腕)が先に加速し、続くようにプッシュオフ動作を行う支持脚と同側の腕が加速することが明らかとなった。したがって、プッシュオフ動作時の対側の腕振りはプッシュオフ動作の「起点」の役割を果たすが、同側の腕振りは「追従」の役割を担っているといえる。「追従」は、先に生じる対側の腕振りによる腕の加速に続いて起こり、その移動は対側の腕よりも大きな速度を持っていることから、左右方向へ発揮される力を更に高める要因の一つと推察される。片腕振りでは、左脚のプッシュオフ動作が支持脚と対側の右腕を後方に振ることによる「起点」の意識が必要となる一方で、右脚のプッシュオフ動作では支持脚と同側の腕を振らないため、「起点」の役割を担う動きが存在しない。そのため、片腕振りにおいても下肢や頭部体幹に先行して右腕を後方から前方へ振ることで、「起点」と同様の役割を担うことが重要となる。腕振りなしでは、上述した腕振り動作の効果を獲得することができないため、脚のみで実施するプッシュオフ動作において、特に高い滑走速度を獲得しなければならない加速局面では、力の発揮が限定的になることが推察される。

本研究では、脚のプッシュオフ動作に左右差があることが示されているが、不得意な脚のプッシュオフ動作に対して発揮される力を高めるには、腕振りによる「起点」の意識をより強調し、身体重心速度の左右方向成分を高めることが重要であると考えられる。十分に側方へ身体重心が移動せず、競技現場でよくいわれる「足が先行して体が中心に残ってしま

う」選手は、腕振り動作による「起点」のタイミングから腕振り動作を効果的に作用させることが体重移動の一助になると考えられる。走運動の先行研究においても、同様に前後の腕振り動作を大きな加速度で実施することで脚全体のスイング速度が増加し、走速度が高くなる可能性が報告されている（馬場、2022）。このことから、スピードスケート競技においても、腕振り動作を大きく加速させることで、脚によって発揮される力を高めることができる可能性がある。これらの動作を習得するには、より力強く腕振り動作を実施することが必要となるが、上肢と下肢の協調性が乱れることによる体幹の安定性の欠如や一時的なプッシュオフ力の低下を引き起こすリスクも同時に存在する。しかし、腕振り動作に（求める要素に）「バランスの保持」や「プッシュオフ動作のきっかけ」の役割を持たせていた選手に対しては、腕振り動作が単に姿勢の保持や運動開始の役割に留まらないこと、滑走速度の向上に貢献する役割があることを指導することで、腕振り動作の役割を意識させることが競技パフォーマンスの向上において重要であろう。

V. 結論

本研究の目的は、スピードスケート競技のストレート滑走時における腕振り動作に焦点を当て、滑走速度に關与する要因をバイオメカニクスの手法によって明らかにし、得られた知見をもとに高い滑走速度を獲得するための腕振り動作の指導方法を検討することであった。

具体的な研究結果は以下の通りである。

- 1) 腕振りを伴うプッシュオフ動作では、プッシュオフ力に左右差の兆候がみられたことから、左右対称であるスピードスケート競技のストレート滑走動作では腕振りによって左右差が生じる可能性がある。
- 2) プッシュオフ動作では、腕振りを行うことで発揮されるピーク反力および力積が増大することにより、高い滑走速度を獲得している。
- 3) 腕振りを伴うプッシュオフ動作は、プッシュオフ開始時点でより深く股関節を屈曲させた状態と、股関節をより外転させた内傾姿勢からプッシュオフ動作を実施することで力の立ち上がりを早めており、より内傾したプッシュオフ動作は終了まで保持される。
- 4) 腕の(身体)部分重心は、体幹や下肢の移動に先んじて加速しており、それぞれの腕で「起点」と「追従」の役割を担っていることから、指導においてこれらの役割を意識させるトレーニングを実施することが有効となる。

VI. 謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教員である藤田善也准教授には常に親身になって温かいご指導とご助言を賜り、心から感謝申し上げます。また、土屋純教授、岡部文武講師、浅野佑樹助教には本研究の実験および分析に際し、多大なるご指導とご助言を賜りました。諸先生方に深く感謝申し上げます。

そして、実験に快くご協力してくださった専修大学体育会スピードスケート部の選手の皆様、大学院生活全般に渡り、ご指導、ご助言を賜りましたコーチング科学研究領域の皆様方に心から感謝申し上げます。

2024 年 6 月 吉日

藤田研究室 近藤 太郎

VII. 参考文献

阿江通良（1996）：日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数.
Jpn J Sports Sci 15 (3) : 155-162

Ann Magdalen Hegge, Gertjan Ettema, Jos de Koning, Asgeir Bakken
Rognstad, Martin Hoset, Øyvind Sandbakk (2014): The effects of the
arm swing on biomechanical and physiological aspects of roller ski
skating. Human Movement Science 36: 1-11

D.M. Fintelman, O. den Braver, A.L. Schwab (2011): A simple 2-
dimensional model of speed skating which mimics observed forces and
motions. Multibody dynamics 2011, Eccomas thematic conference J.C.
Samin, P. Fisette (eds.)

International Skating Union (2022): Special regulations & Technical
rules Speed Skating as accepted by the 58th Ordinary Congress June
2022

van Ingen Schenau GJ, de Boer RW, de Groot G (1987): On the technique
of speed skating. Int J sport Biomech 3: 419-431

馬場崇豪（2022）：走速度の増加に伴う腕振り動作とピッチ数、ストラ
イド長との関係．九州国際大学・経済論集, 10, 49-58

原樹子（2006）：跳躍における腕振り動作の効果に関するバイオメカニクス的研究．平成 18 年東京大学大学院博士論文

笠井達哉（1982）：走における腕振り動作の効果．国士舘大学体育研究所報, 2, 61－66

辻本典央，水藤弘吏，新海宏成，布目寛幸，池上康男（2009）：腕振りの制約が走動作に及ぼす影響．バイオメカニクス研究 13, 38-50

湯田淳，村田正洋，山辺芳，田内健二，青柳徹（2007）：スピードスケート選手のサイドジャンプにおける支持脚のキネティクス．バイオメカニクス研究 11 (1), 9-24

湯田淳，村田正洋，横澤俊治，山田哲，青柳徹（2012）：支持脚伸展動作からみたスピードスケート 500m 競技での氷上加速運動と陸上模倣運動の諸特性の比較．コーチング学研究 26 (1), 41-54

結城匡啓，阿江通良，藤井範久（1996）：スピードスケート滑走中のブレード反力．バイオメカニズム 13 : 41-51

結城匡啓（1999）：スピードスケートの動作分析．計測と制御 38 (4): 236-241