

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18700524

研究課題名（和文） スピードスケートの加速動作に影響を及ぼす体力的要因に関する研究

研究課題名（英文） Influence of fitness factors for propulsive motion in speed skating

研究代表者

湯田 淳 (YUDA JUN)

日本女子体育大学・体育学部・講師

研究者番号：80415835

研究成果の概要：

短距離種目でより大きな加速を得るためにはストローク頻度を増大させる必要があり，そのためには特に膝関節における最大伸展パワー発揮を高めることが重要となることが示唆された．また，シニア選手では体幹部の腰方形筋および大腰筋が有意に太く，スピードスケート模倣動作での股関節のトルク発生が大きいことから，ジュニア選手における滑走動作の改善および体幹安定化（側屈や屈曲など）のトレーニングの必要性が示唆された．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,300,000	0	3,300,000
2007年度	100,000	30,000	130,000
2008年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	60,000	3,560,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，スポーツ科学

キーワード：スピードスケート，加速動作，3次元動作分析，身体的特性，発育発達

1. 研究開始当初の背景

スポーツにおいては技術と体力が密接に関連しており，両者の複合的な結果としてパフォーマンス（競技力）が発現される．したがって，スポーツにおけるパフォーマンスの実態をより詳細に捉えるためには技術および体力的側面からの総合的な検討が不可欠である．しかし，スポーツ科学においてはその研究分野の細分化のため，パフォーマンスを技術的（スポーツバイオメカニクスなど）および体力的（スポーツ生理学など）側面に分け，それぞれの分野において検討を進めるといった研究が多いのが現状である．また，体力的要因は発育発達段階の影響を大きく

受けることを考慮すると，高い水準までのパフォーマンス獲得の過程を明らかにするためには，技術および体力的特性をジュニア期からの変化と関連づけて検討する必要がある．

スピードスケート競技に関する研究は国内外を問わず数多く行われている．技術的要因に関しては滑走動作の力学的特徴や競技成績に影響を及ぼす要因などがバイオメカニクス的に検討されており，優れた滑走動作の特徴が明らかにされてきている．しかし，これらの研究ではそのほとんどが定常速度での滑走時における動作を対象としており，走動作と滑走動作が混在すると考えられる

スタートからの加速局面においてはほとんど検討されていない。スピードスケート競技では、滑走スピードが大きいためトップスピードに到達するまでに比較的多くの時間を要し、そこで発揮されるパワーは定常速度での滑走時よりも加速時の方が著しく大きい。これは、スピードスケートで良い成績を出すためにはトップスピードまで素早く加速する能力が要求されることを意味しており、この能力は短時間でレースが終了する短距離種目では特に重要であると考えられる。一方、体力的要因については滑走中の生理学的な負荷特性やラボラトリーテストによるスケート選手の体力特性などが報告されているものの、滑走動作と体力特性とを関連づけてパフォーマンスについて検討した報告はほとんど見当たらない。

これらのことから、短距離種目の競技力を向上させるためにはより大きな加速を得るための体力的要因を明確にする必要があり、氷上での加速能力と下肢のパワー発揮能力との関係を滑走動作と関連づけて検討することによって、トレーニングにおいて目指すべき体力的課題を明確にできると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スピードスケート競技における加速動作を対象として、発育発達に伴うパフォーマンスの変化を技術および体力的側面から検討し、発育発達段階に応じた技術および体力トレーニング立案に役立つ知見を得ることである。

3. 研究の方法

(1) 被験者

被験者には、スピードスケート競技を専門とする社会人、大学生および高校生の男子 19 名（年齢、 19.4 ± 2.6 歳）を用いた。計測に先立ってこれらの被験者には、研究のねらいや意義、計測状況、安全性などを説明し、被験者と指導者（コーチ）から協力の同意を得た。

(2) 形態および下肢パワー発揮能力の測定形態

空気置換の全身体密度法による体脂肪測定装置（LMI 社製、BODPOD）を用いて体重および身体密度を測定し、体脂肪率を算出した。その後、体重から体脂肪量を減じることによって除脂肪体重を求めた。また、1.5T の MR 装置（Siemens 社製、Magnetom Symphony）とボディーコイルを用いて、右大腿部および体幹部における MR 撮像を仰臥位にて行い、それぞれの部位における筋断面積を算出した。大腿部では、大転子上端と膝関節列隙間の 50% 部位における T1 強調断画像（スピンエ

コー法；繰り返し時間 404 ms，エコー時間 11 ms，積算回数 1 回，撮像領域 240 mm，スライス厚 10 mm，マトリックス 256×256 ，撮像時間 3 分 34 秒）を用い、大腿四頭筋（大腿直筋，外側広筋，中間広筋，内側広筋），外側ハムストリング（大腿二頭筋長頭および短頭），内側ハムストリング（半腱様筋，半膜様筋），内転筋（長内転筋，大内転筋），薄筋，および縫工筋を分析対象筋とした。また、体幹部では、ヤコビー線上の T1 強調断画像（スピンエコー法；繰り返し時間 98 ms，エコー時間 4.3 ms，積算回数 1 回，撮像領域 380 mm，スライス厚 10 mm，マトリックス 256×256 ，撮像時間 27 秒）を用い、腹直筋，外側腹筋群（外腹斜筋，内腹斜筋，腹横筋），大腰筋，腰方形筋，脊柱起立筋群を分析対象筋とし、左右の各筋における平均値をそれぞれの筋断面積として採用した。なお、体幹部の MR 撮像は、呼吸によるモーションアーチファクトを回避するために吸気位での息止め撮像を実施した。各筋断面積は、専用の画像分析ソフト（Hitachi Medical Corporation 社製，Independent System for Imaging Services）を用いてそれぞれの領域をトレースすることで算出した。その際、骨，神経および血管が分析対象筋に含まれないように配慮した。

自転車ペダリング運動における発揮パワー

電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ（Combi 社製，Power Max V）を用い、ペダリング運動における下肢の発揮パワーを測定した。被験者には、右ペダル最高位（右足が最も上に位置する地点）を 0 度とし、そこから前方 45 度に位置する地点をスタート地点として 10 秒間の全力ペダリング運動を行わせた。負荷重量はスピードスケート選手のトレーニングとして一般的に用いられている体重の 10% とし（ 6.8 ± 0.6 kp），サドルの高さは任意とした。発揮パワーは 1 秒ごとの平均値として算出し、10 秒間の平均値（平均ペダリングパワー）および最大値（最大ペダリングパワー）を求めた。

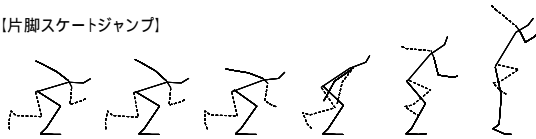
等速性最大筋力

等速性筋力測定器（Biodex 社製，Biodex System 3）を用い、60 および 180 deg/s の 2 種の角速度で左右それぞれの膝関節伸展および屈曲筋力を測定した。測定は椅座位で行い、膝関節の運動範囲は最大伸展位を 0 度として 0 度から 100 度と設定した。いずれの試技においても最大努力での伸展および屈曲動作を 2~3 回連続して行わせ、この間に測定された伸展および屈曲トルクのピーク値を最大筋力として採用した。本研究では、このようにして得られた最大筋力からそれぞれの角速度での左右脚における平均値を求め、これを下肢の等速性最大筋力とした。

スピードスケート模倣動作による発揮パワー

被験者には、スピードスケート滑走の模倣動作として、上方および側方へのトルク発揮能力をみるためそれぞれ片脚スケートジャンプおよびサイドジャンプを行わせた(図1)。片脚スケートジャンプは、下肢関節を深く屈曲した片脚支持姿勢(右脚)から上方へ全力で跳躍するものであり、下肢の反動動作を伴わない低い姿勢での静止状態からの1回全力跳躍とした。また、サイドジャンプは、下肢関節を深く屈曲した姿勢で左右へのジャンプを連続して行うものであり、トレーニングにおいて一般的に用いられているジャンプ幅(およそ1m)での10回全力跳躍とした。

[片脚スケートジャンプ]



[サイドジャンプ]



図1 スピードスケート模倣動作

実験室内のタータントラック上に幅3m,長さ2.9m,高さ2.5mの計測範囲を設置し,範囲内に埋設してあるフォースプラットフォーム上で試技を行わせた。撮影は同期した2台の高速度VTRカメラ(NAC社製,HSV-500C³)により側方および後方から行い(撮影スピードは250fps,露出時間は1/500s),1台のフォースプラットフォーム(Kistler社製,Type 9287B)により右支持脚に作用する地面反力を測定した。フォースプラットフォームからの信号は専用アンプを介してA/D変換し,サンプリング周波数500Hzでパーソナルコンピュータに取り込んだ。また,同期ランプの画像への映し込みおよび同期信号のA/D変換ボードへの取り込みによってVTR画像と地面反力データとの同期を行った。なお,ジャンプ動作の分析範囲は,片脚スケートジャンプでは静止状態からの動作開始(地面反力が体重レベルの5%を越えた時点)から右脚離地まで,サイドジャンプでは10回の跳躍における接地のうち動作が安定するスタート後5回目の接地期(右脚接地から離地まで)とした。

得られたVTR画像からVTR digitizer(DKH社製,Frame-Dias)により身体各部位23点をデジタル化し,DLT法を用いて3次元座標を算出した。得られた3次元座標は,残差分析法(Winter,1990)により最適遮断周波数を決定し,4次のButterworth low-pass

digital filterにより平滑化した。その後,阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いてセグメントの質量,重心位置および主慣性モーメントを算出した。

画像分析から得られたキネマティクスのパラメータと,フォースプラットフォーム測定から得られた地面反力を用い,湯田ら(2007)の方法にしたがって右支持脚の3次元関節トルクおよびトルクパワーを算出した。ここで設定された下肢関節の運動軸は,股関節では内外転軸,屈伸軸および内外旋軸の3軸,膝関節では屈伸軸と内外旋軸の2軸,足関節では底背屈軸と回内外軸の2軸であった。なお,本研究では,それぞれの試技における支持脚の伸展動作に強く関与する関節の動きに着目し,片脚スケートジャンプでは股および膝関節伸展トルク,足底屈トルク,サイドジャンプでは股関節外転・伸展・内旋トルク,膝関節伸展・外旋トルク,足関節底屈・回内トルクにおけるそれぞれの最大値を採用した。

(3) 氷上におけるパフォーマンスの測定

被験者19名のうち,14名は長野市オリンピック記念アリーナ(エムウェーブ)で開催された第13回全日本スピードスケート距離別選手権大会における男子500m競技を,残りの5名は当日の競技終了後に同様の条件下において実施された500mタイムトライアルを分析対象とした。

光電管を用いて測定された公式記録のうち100m通過タイムを氷上滑走での加速能力を表す指標とした。また,1台の高速度VTRカメラ(NAC社製,HSV-500C³)によりスタート後50m付近の滑走動作を側方からパンニング撮影し(撮影スピードは250fps,露出時間は1/500s),得られた映像から1ストローク(左右いずれかのスケートブレード離氷から引き続く反対脚のスケートブレード離氷まで)に要する時間を求めた。このようにして算出した所要時間の逆数をストローク頻度と定義し,氷上滑走での加速動作を表す指標とした。

(4) 統計処理

測定結果における群間の差を検定するために対応のないt検定を行った。また,2変数の関係をみるために相関係数を算出した。これらの有意水準はいずれも5%以下とした。

4. 研究成果

(1) 下肢パワー発揮能力と氷上加速能力との関係

ここでは,500mレースにおける100m通過タイムをもとに上位群8名(9秒台)および下位群11名(10秒台)に分けて検討を進めた。

図 2 に上位群および下位群における 500m レースのパフォーマンスを平均値および標準偏差で示した。また、表 1 に 100m 通過タイムおよびストローク頻度と各種パラメータとの相関係数を示した。100m 通過タイムは上位群の方が下位群よりも有意に早く、500m ゴールタイムとの間にも有意な正の相関がみられた。これらのことから、500m レースのパフォーマンス向上には 100m 通過タイムを早めることが重要であり、本研究の分析対象において、加速能力は上位群の方が優れていたといえる。

本研究において、ストローク頻度は上位群が有意に大きく(図 2)、100m 通過タイムとストローク頻度との間には有意な負の相関がみられた(表 1)。このことは、短距離種目における加速能力を高めるためには加速時のストローク頻度を増大させることが重要であることを示唆しており、ストローク頻度は氷上での加速能力を表す指標となり得ると推察される。また、ストローク頻度に影響を及ぼす体力的要因をみると、全力ペダリング運動による最大パワー、60 および 180 deg/s の角速度での膝関節の等速性最大伸展筋力、片脚スケートジャンプでの膝関節最大伸展パワーにおいて有意な正の相関がみられた(表 1)。これらの体力的要因と 100m 通過タイムとの間に有意な関係がみられていないことを考慮すると、これらの体力的要因は 100m 通過タイムを短くすることに直接影響を及ぼすというわけではなく、加速時のストローク頻度を増大させるために要求される体力的要因であると捉えることができる。氷上でのパフォーマンス向上のためには体力的要因に加えて技術的要因も重要であり、優れた滑走動作(技術)を獲得するために備えなければならない体力的要因も存在すると考えられる。このようにみえてくると、前述のストローク頻度に強く影響を及ぼす体力的要因は、優れた加速技術を獲得するために要求される体力的要因として捉えることができよう。

一方、ペダリング運動には膝関節伸展の主働筋である大腿四頭筋が大きく関与するため、膝関節における最大伸展パワーを高めることの必要性は氷上での加速時のストローク頻度を増大させることにあると考えられる。ストレート滑走中の下肢のキネティクスについてはいくつかの報告がみられ、プッシュオフ動作においては主に大殿筋と内側広筋によってパワーが発揮されていることや(de Boer et al., 1987)、股関節まわりのパワー発揮が重要(結城, 1996)であることが示唆されている。しかし、これらの研究では、いずれもプッシュオフ動作のメカニズムを滑走速度との関係に着目して検討されているものの、ストローク頻度といった動作

スピードの観点からの検討は行われてはいない。したがって、今後、加速能力を滑走動作との観点からより詳細に明らかにするためには、氷上滑走における動作スピードに影響を及ぼす技術的要因を体力的要因と関連づけて検討していく必要がある。

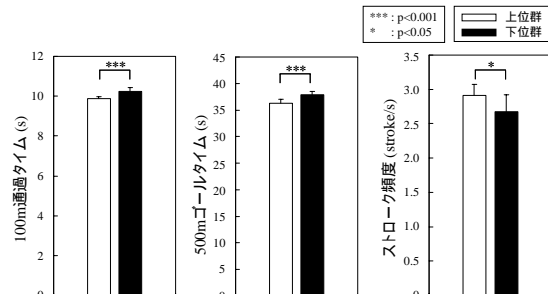


図 2 上位群および下位群における 500m レースのパフォーマンス

表 1 100m 通過タイムおよびストローク頻度と各種パラメータとの相関係数

	100m通過タイム	ストローク頻度
ストローク頻度	-0.672**	-
500mゴールタイム	0.909***	-0.450
体脂肪率	0.422	-0.156
除脂肪体重	-0.346	0.274
平均ペダリングパワー	-0.410	0.381
最大ペダリングパワー	-0.399	0.585**
等速性膝関節最大筋力		
伸展@60deg/s	-0.422	0.528*
屈曲@60deg/s	-0.585**	0.411
伸展@180deg/s	-0.341	0.509*
屈曲@180deg/s	-0.564*	0.371
股関節最大伸展パワー	-0.359	0.329
膝関節最大伸展パワー	-0.330	0.484*
足関節最大伸展パワー	-0.221	0.358

***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05

以上のことから、良くトレーニングされたトップ選手では陸上トレーニング手段におけるパワー発揮能力のみで加速能力を評価することはできないことが明らかとなった。また、短距離種目でより大きな加速を得るためにはストローク頻度を増大させる必要があるため、そのためには特に膝関節における最大伸展パワー発揮を高めることが重要となることが示唆された。そして、膝関節における最大伸展パワー発揮能力は、氷上滑走での動作スピードを評価するための指標として用いることが可能であり、加速能力を向上させ

するための体カトレーニングにおいて重要となることが示唆された。

(2) 形態的特徴とパフォーマンスとの関係

ここでは、男子ジュニア選手 10 名(以下、ジュニア群)およびシニア選手 9 名(以下、シニア群)に分けて検討を進めた。なお、500m ゴールタイムはシニア群の方がジュニア群よりも有意に早く(ジュニア群、37.96±0.65 秒>シニア群、36.45±0.73 秒;p<0.001)、シニア群の方がパフォーマンスは高いといえる。

身長、体重、体脂肪率および除脂肪体重のいずれにおいても群間に有意差はみられなかった。一方、全筋断面積は、大腿部では群間に有意差はみられなかったが、体幹部ではシニア群(199.1±15.9 cm²)の方がジュニア群(178.0±14.9 cm²)よりも有意に大きかった(p<0.01)。

図3にジュニア群およびシニア群における大腿部各筋の断面積を平均値および標準偏差で示した。筋断面積は、大腿直筋、外側広筋、中間広筋、内側広筋、外側および内側ハムストリング、内転筋、薄筋のいずれにおいても群間に有意差はみられず、縫工筋でのみシニア群(5.8±0.7 cm²)の方がジュニア群(5.1±0.7 cm²)よりも有意に大きかった(p<0.05)。スピードスケートにおいては下肢による爆発的なパワー発揮が重要であり、これには膝伸展パワーを発生するための膝関節伸筋群が必要とされる。しかし、パフォーマンスの異なるジュニア群およびシニア群においては膝関節伸筋群における断面積に明確な差がみられず、高い競技水準におけるパフォーマンスの差は大腿部の筋形態のみでは評価できないことが示唆される。

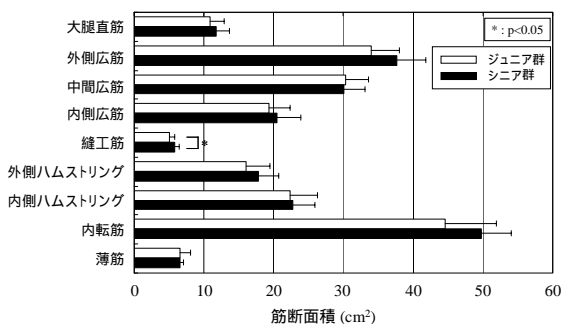


図3 ジュニア群およびシニア群における大腿部各筋の断面積

一方、図4にジュニア群およびシニア群における体幹部各筋の断面積を平均値および標準偏差で示した。筋断面積は、腹直筋、外側腹筋群および脊柱起立筋群のいずれにおいても群間に有意差はみられず、大腰筋および腰方形筋ではいずれもシニア群(大腰筋、

21.7±1.3 cm²; 腰方形筋、9.9±2.7 cm²)の方がジュニア群(大腰筋、18.5±2.5 cm²; 腰方形筋、7.9±0.9 cm²)よりも有意に大きかった(それぞれ p<0.01, p<0.05)。これらの結果は、体幹部の筋断面積が競技水準の高い選手のパフォーマンスを評価する際の指標となり得ることを示唆している。

筋の形態的特徴は、パフォーマンスに大きく影響を及ぼすものであり、選手が繰り返し行ってきた動作でのパワー発揮の結果として引き起こされた変化として捉えることができよう。このようなパワー発揮の特徴を明らかにするため、本研究では陸上での模倣動作を用いて両群における専門的パワーを検討した。

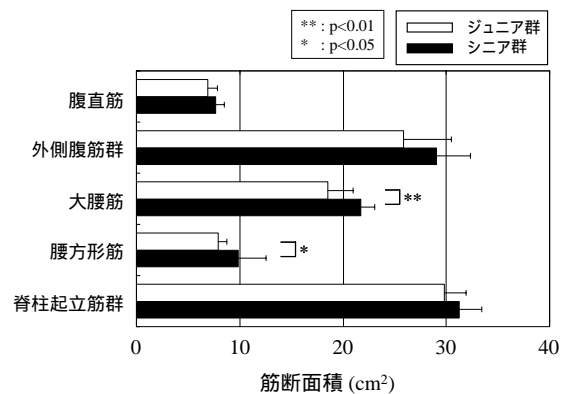


図4 ジュニア群およびシニア群における体幹部各筋の断面積

図5にジュニア群およびシニア群における片脚スケートジャンプでの下肢関節最大トルクを平均値および標準偏差で示した。伸展トルクは、股、膝および足関節のいずれにおいてもジュニア群とシニア群との間に有意差はみられず、これは膝関節伸筋群において群間に有意差がみられなかったという前述の結果と類似していた。また、図6にジュニア群およびシニア群におけるサイドジャンプでの下肢関節最大トルクを平均値および標準偏差で示した。氷上ストレート滑走において重要となる股関節まわりのトルクをみると、最も大きな値のみられた伸展トルクではジュニア群とシニア群との間に有意差はみられなかったが、外転および内旋トルクではいずれもシニア群の方がジュニア群よりも有意に大きかった(それぞれ p<0.05, p<0.01)。一方、ジュニア群では足関節の底屈トルクにおいてシニア群よりも有意に大きい値を示した(p<0.05)。これらのことから、シニア選手では模倣動作においても氷上ストレート滑走で重要となる股関節外転トルク発揮が大きく、身体の中核に位置づけられる股関節まわりの筋群でのトルク発揮が強調されているのに対して、ジュニア選手で

は末梢部となる足関節でのトルク発揮が強調されていると考えられる。このような結果は、前述の体幹部の筋断面積において群間に有意差がみられたことを強く反映しているものと考えられる。

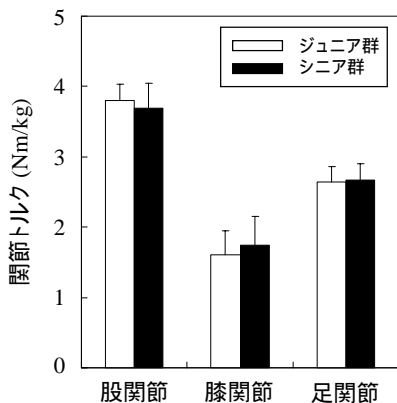


図5 ジュニア群およびシニア群における片脚スケートジャンプでの下肢関節最大伸展トルク

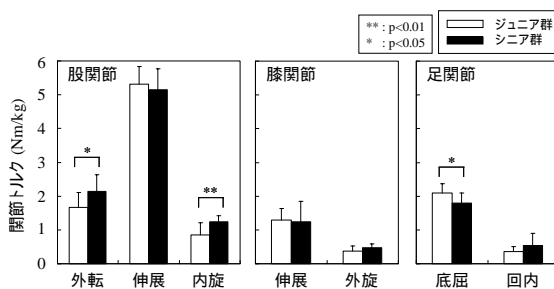


図6 ジュニア群およびシニア群におけるサイドジャンプでの下肢関節最大トルク

サイドジャンプは側方への連続跳躍のため、支持脚伸展動作における股関節の外転トルクは腰部の側方への加速を大きくし、これは体幹の側屈を引き起こすと考えられる。また、この際の内旋トルク発揮は、大腿部を内旋させることによる下肢の内傾を引き起こし、これによって下肢の伸展による地面反力ベクトルはより側方へ向けられると考えられる。したがって、これらのトルク発揮の大きかったシニア群では、動作遂行中において繰り返し起こる体幹の側屈といった滑走姿勢の崩れを引き起こし易いと推察される。このため、シニア群では動作遂行中に体幹(脊柱)を安定させるための力発揮がより求められ、これが体幹部の腰方形筋(腰椎の側屈や骨盤と腰椎の安定に関与)などの体幹部の筋群の著しい発達へと繋がったと考えられる。これらのことから、スピードスケートでは大きな膝伸展パワーの発揮が重要となるが、ジュニア選手であっても比較的高い競技力を有する場合は膝関節伸筋群は十分にト

レーニングされている可能性が示唆された。また、シニア選手では体幹部の腰方形筋および大腰筋が有意に太く、スピードスケート模倣動作での股関節のトルク発生が大きいことが明らかとなった。これらのことから、ジュニア選手における滑走動作の改善および体幹安定化(側屈や屈曲など)のトレーニングの必要性が示唆された。

参考文献

- 阿江通良: 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, 1996.
- de Boer, R. W., J. Cabri, W. Vaes, J. P. Clarijs, A. P. Hollander, G. de Groot, G. J. van Ingen Schenau: Moments of force, power, and muscle coordination in speed-skating, Int. J Sports Med., 8 (6): 371-378, 1987.
- Winter, D. A.: Biomechanics and motor control of human movement, John Wiley and Sons Inc, New York, pp.41-43, 1990.
- 湯田淳, 村田正洋, 山辺芳, 田内健二, 青柳徹: 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, 2007.
- 結城匡啓: スピードスケート滑走動作のバイオメカニクスの研究 - 加速動作の力学的メカニズム -, 平成8年度筑波大学大学院博士論文, 1996.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

湯田淳, 村田正洋, 横澤俊治, 山辺芳, 山田哲, 青柳徹, スピードスケート短距離選手における加速能力と下肢パワー発揮能力との関係, トレーニング科学, 20巻, 2008年, 43-53, 査読有り

〔学会発表〕(計1件)

湯田淳, 柳澤修, 青柳徹, スピードスケートジュニア短距離選手における大腿および体幹部の形態的特徴, 第20回日本トレーニング科学学会大会, 2007年11月16~18日, 東京大学駒場キャンパス

6. 研究組織

(1)研究代表者

湯田 淳 (YUDA JUN)
日本女子体育大学・体育学部・講師
研究者番号: 80415835