

研究報告

異なる滑走テクニックでローラースキー滑走した際のエナジェティクス

Energetics of roller skiing with different skiing techniques

中井 聖¹⁾伊藤 章²⁾Akira Nakai¹⁾Akira Ito²⁾

Abstract

The purpose of the present study was to investigate energetics of roller skiing with diagonal stride and double poling at various speeds and compare the developments of energetic parameters across speeds between skiing techniques. Two dimensional kinematics and oxygen uptake were determined in two male collegiate cross-country ski athletes who performed roller skiing at the paced speeds using diagonal stride and double poling on a level track. Total mechanical work rate comprising internal and external work, net energy expenditure rate, and net efficiency were calculated from the experimental data. Total mechanical work rate increased linearly and net energy expenditure rate increased exponentially with increasing speed in individual skiing techniques; nevertheless, the developments of the parameters across speeds differed somewhat between the athletes. These would be attributed to the difference in the motions of roller skiing, the proficiency in skiing techniques, and the metabolic capacity in involved musculature. Net efficiency increased with increasing speed, reached a maximal value, before slowly decreasing, which indicates that the optimal speeds exist at which net efficiency can be maximally enhanced in both skiing techniques. This finding suggests that roller skiing at each optimal speed in the race would improve racing performance.

キーワード ダイアゴナルストライド, ダブルポール, 総仕事率, エネルギー消費率, 機械的効率

diagonal stride, double poling, total mechanical work rate, net energy expenditure rate, mechanical efficiency

1. はじめに

クロスカントリースキーやローラースキーのクラシカル競技では、選手はコース状況やレース展開によって、ダブルポール (DP; 図1a) やダイアゴナルストライド (DS; 図1b) などの滑走テクニックを使い分けて滑走している。Stöggle et al. (2006) は、近年従来のディス

タンス種目に加えて1 km程度のコースで争うスプリント種目が導入されたことや、マテリアルが改良されたことによってレースが高速化したことから、レース戦略としてDPが多用されるようになったと述べている。先行研究 (Rundell and Bacharach, 1995; Staib et al., 2000; Mahood et al., 2001) では、ローラースキーでDPを用いて滑走

¹⁾ 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科

*Graduate School of Sport and Exercise Science,
Osaka University of Health and Sport Sciences*

²⁾ 大阪体育大学体育学部

*School of Health and Sport Sciences, Osaka University of
Health and Sport Sciences*

した際の最大酸素摂取量がクロスカンリースキーの競技パフォーマンスの規定要因の1つと成り得るとされている。また、クロスカンリースキー (Saibene et al., 1989) やローラースキー (Hoffman et al., 1994) でDPを用いて滑走した場合、DSよりも酸素摂取量が低く、経済性が高いとされている。主として上半身を用いて推進力を発揮するDPの優位性を示したこれらの報告から、上半身の有酸素性能力を向上させるトレーニングが重視されるようになり、レース時にもDPが多用されるようになったと理解できる。

一方、中井ほか (2009) は、ローラースキーの競技成績がローラースキー時の最大酸素摂取量よりも最大酸素摂取量を発揮する滑走速度と高い相関を示すと報告している。このことは、有酸素性の最大能力よりも有酸素性能力によって産生されたエネルギーがいかに有効に滑走速度に変換されるかが競技成績を左右することを意味している。また、体内に取り込んだ酸素を元に産生されたエネルギーが滑走速度を生み出すエネルギーに変換された割合が競技成績に影響を与える可能性を示唆している。運動時の入力エネルギーに対する出力エネルギーの割合は機械的効率と定義され (Hill, 1927), 持続的運動の競技パフォーマンスを決定する要因の1つであるとされている (Coyle, 1999)。

ローラースキー時の機械的効率に関する研究は、Hoffman et al. (1995) がDPとDSについて、Sandbakk et al. (2010) がスケーティング走法について報告した2例のみに限られている。これらの報告では、機械的効率を身体合成重心の

なす仕事量から求めている。しかし、実際は選手ごとに滑走時の動作は異なっており、身体セグメントによってなされる仕事量は違うと予想される。そこで、本研究では、DPとDSの異なる滑走テクニックを用いてローラースキーで滑走した際の身体セグメントがなす仕事量 (すなわち内的仕事量) を加味した総仕事率、エネルギー消費率と機械的効率の変動および滑走テクニック間におけるこれらの変数の差異について検討し、競技成績の向上に有効な知見を得ることを目的とした。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、全日本学生スキー選手権大会の男子2部の上位入賞選手である男子大学生クロスカンリースキー選手2名であった。被験者の身体的特徴および競技レベルを示すSAJポイントを表1に示した。全日本スキー連盟 (SAJ) のランキングシステムであるSAJポイントは、点数が低いほど高い競技レベルであることを示している。

なお、本研究は、大阪体育大学研究倫理審査委員会の審査、承認を受けて実施された。被験者には、研究の目的や方法、予想される影響について十分に説明し、書面で同意書を得た後、実験を実施した。

2.2 実験プロトコル

全ての実験は、全天候型の400 mトラックにおいて、負荷調整装置を装備したローラースキー (V2-920, V2 Jenex Inc.製) と、被験者が日常

表1. 被験者の身体的特徴および競技レベル

被験者	年齢 (years)	身長 (m)	身体質量 (kg)	体脂肪率 (%)	SAJ ポイント
A	19	1.79	60.0	11.4	73.05
B	21	1.69	62.5	16.8	104.79

的に使用しているクラシカル競技用のブーツおよびポールを使用して実施した。まず、被験者にDSを用いて最大努力で滑走させ、最高滑走速度を測定した。次に、予め規定した速度(1.67, 2.50, 3.33, 4.16, 5.00 m·s⁻¹)で4分間滑走した直後に6分間の休息を取るという試行を、速度を段階的に増加させて連続して行った。各試行では、滑走速度を一定に保つため、被験者を自転車で先導し、速度計と50 mごとの基準タイムを用いてペースを調整した。なお、被験者BがDSを用いて行った5.00 m·s⁻¹での試行は、滑走速度が規定速度に達しなかったため、後述のデータ処理から除外した。DSは競技では登坂時に用いられることが多い滑走テクニックであり、平地で摩擦負荷の少ないローラースキーを用いて滑走させた場合、その動作は登坂時と幾分異なることが予想された。そのため、Nakai and Ito (2011)の方法に従い、負荷調整装置を用いてローラースキーに一定の摩擦負荷を加え、登坂時の動作により近づくよう配慮して実験を行った。DSでの実験の1週間後、DPを用いてDSと同様のプロトコルで実験を実施した。2度の実験の際、質問紙を用いて被験者の健康状態やトレーニング状況について調査を行い、両実験でのコンディションに差がないことを確認した。

2.3 動作解析

400 mトラックの直線区間において、被験者の矢状面における1サイクル分の滑走動作を、デジタルビデオカメラ(DSR-PD150, Sony Corporation製)を使用して60 Hzで撮影した。図1に示したとおり、両滑走テクニックとも、右ポールが接地する時点から次に右ポールが接地する時点までを1サイクルの動作と定義した。被験者を左右上下肢それぞれ3セグメント、頭と胴、左右ローラースキーおよび左右ポールを加えた合計18セグメントのリンクセグメントモデルとみなし(図1参照)、撮影した映像をビデオ動作解析システム(Frame-DIAS 3.22, DKH Inc.製)を使用して解析周波数60 Hzでデジタル化した。分析平面の水平方向かつ被験者の進行方向をX軸、鉛直上方向をY軸として静止座標系を設定し、前述のリンクセグメントモデルに対応する被験者の分析点座標値を2次元パニングDLT法を用いて算出した。座標較正による算出値の平均誤差は、X軸方向が0.001 m、Y軸方向が0.001 mであった。算出された分析点座標値をWinter (2005)が示した残差分析法によって決定した分析点ごとの最適遮断周波数(DPのX座標2.2~6.0 Hz、Y座標2.0~7.6 Hz; DSのX座標2.5~6.6 Hz、Y座標2.2~7.2 Hz)で、4次のButterworth digital filterを用いて平滑化した。各身体セグメントの質量および慣性モーメント

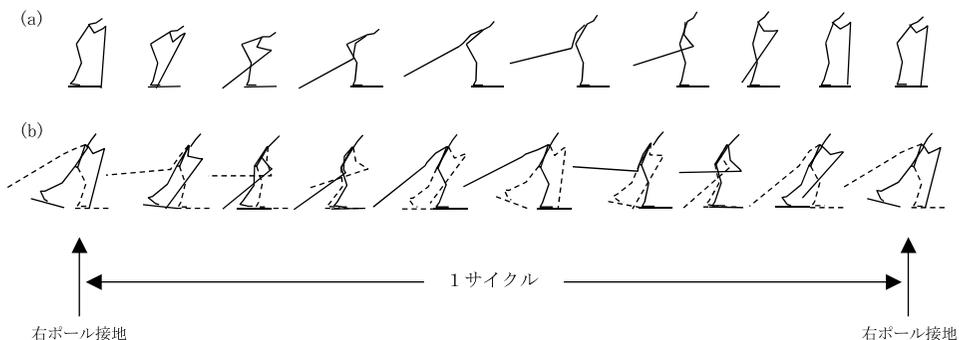


図1. ダブルポール (a) とダイアゴナルストライド (b) を用いてローラースキーで滑走した際の1サイクルの動作の典型例。両滑走テクニックとも、右ポールが接地する時点から次に右ポールが接地する時点までを1サイクルの動作と定義した。実線は右、破線は左を示す。

は、阿江（1996）が示した身体部分慣性係数を用いて求め、ローラースキーおよびボールの重心位置と慣性モーメントは実測値を用いた。足部については、足とブーツを一体とみなして足の質量にブーツの質量を加えて足部の質量とし、足部の重心位置と慣性モーメントは足のみの値と変わらないと仮定した。以上の方法によって得られたデータから、各セグメントの重心座標、速度および角速度を算出した。なお、被験者の滑走速度は合成重心の1サイクル間の平均速度とした。

2.4 総仕事率、エネルギー消費率および機械的効率の算出

本研究では、Winter（1979）の定義を用い、被験者が1サイクル間に行う力学的仕事のうち、身体セグメントがなす仕事を内的仕事、負荷調整装置によって加えられた摩擦負荷、路面とローラースキーとの間の転がり摩擦抵抗などの全ての外的負荷に対してなされる仕事を外的仕事とした。1サイクル間の内的仕事量は、Pierrynowski et al.（1980）の方法を用い、各セグメント内およびセグメント間の全力的エネルギーの伝達を仮定した力学的エネルギーから算出した。先に述べた動作解析によって得られたデータから、時点*j*において、セグメント*i*が有する全ての力学的エネルギー（位置エネルギー、並進および回転運動エネルギー）を合計し、それらを全セグメント分総和することで、全セグメントが有する総力学的エネルギーを求めた（式（1））。

$$TE_j = \sum_{i=1}^s (PE_{ij} + KE_{ij} + RE_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 TE_j は時点*j*における総力学的エネルギー、 PE_{ij} は時点*j*におけるセグメント*i*の位置エネルギー、 KE_{ij} は時点*j*におけるセグメント*i*の並進運動エネルギー、 RE_{ij} は時点*j*におけるセグメント*i*の回転運動エネルギー、*s*は総セグメント数を示す。

次に、時点*j*と時点*j+1*との間の総力学的エネルギーの変化量の絶対値を全測定区間分積分し、セグメント内およびセグメント間の全力的エネルギーの伝達を仮定した1サイクル間の仕事量を求めた（式（2））。

$$W_{wb} = \sum_{j=1}^{n-1} |TE_{j+1} - TE_j| \quad (2)$$

ここでは、 W_{wb} はセグメント内およびセグメント間の全力的エネルギーの伝達を仮定した1サイクル間の仕事量、*n*は1サイクル間のサンプリングの総時点数を示す。

求められた仕事量にはpositive workとnegative workが含まれるが（Winter, 1978）、本研究では、この仕事量のうち、1サイクル間の総力学的エネルギーの増加分の合計にあたるpositive workの総和を1サイクル間の内的仕事量とした。

1サイクル間の外的仕事量は、先行研究（Saibene et al, 1989; Hoffman et al, 1995）に倣い、外的負荷に抗して推進するための力に移動距離を乗じて算出した。Nakai and Ito（2011）は、ローラースキーを装着した立位姿勢の被験者をバイクで牽引して牽引力を測定し、牽引力と滑走速度との関係を1次の回帰式（ $y = 37.14 + 2.611x$, $r = 0.612$, $p < 0.01$; *y*: 牽引力（N）、*x*: 滑走速度（m・s⁻¹））で報告している。彼らの報告と本研究では、被験者の身体的特徴、実験の速度範囲、路面状況および負荷調整装置によってローラースキーに加えられた摩擦負荷が同等であったため、彼らが報告した回帰式に本研究の各試行時の滑走速度を代入して外的負荷に抗して推進するための力を求めた。求められた値に1サイクル間の合成重心の移動距離を乗じて、1サイクル間になされる外的仕事量とした。以上の方法によって求められた内的仕事量と外的仕事量を合計し、被験者の身体質量にローラースキーやボール、ブーツ、測定機器など装備品一式の質量（合計4.23 kg）を加えた総質量および1サイクルに要した時間で除して、総仕事率を算出した。

立位安静時および各試行時の酸素摂取量を呼吸代謝測定装置 (VO2000, MedGraphics Corporation製) を用いて4分間測定し、それぞれの終末1分間の酸素摂取量を安静時および各試行時の酸素摂取量とした。各試行時の酸素摂取量から安静時の酸素摂取量を差し引き、酸素摂取量1 Lあたり20.93 kJとして換算した後、総質量と要した時間で除して、各試行時に用いられた正味のエネルギー消費率 (以下、エネルギー消費率) とした。

先行研究では、ローラースキー滑走時の機械的効率をgross efficiency (Sandbakk et al., 2010) やdelta efficiency (Hoffman et al., 1995) を用いて評価している。gross efficiencyは、安静時のエネルギー消費量を含んだ運動時の全エネルギー消費量に対する仕事量の割合、delta efficiencyは、エネルギー消費量の増加分に対する仕事量の増加分の割合と定義されている (Gaesser and Brooks, 1975)。それに対して、本研究ではnet efficiencyを評価に用いた。net efficiencyは、運動時のエネルギー消費量から安静時のエネルギー消費量を差し引いた運動に消費される正味のエネルギーに対するなされた仕事量の割合と定義されている。金子 (1985) は、複数提唱されている機械的効率の計算方法について、それぞれの方法の限界を理解した上で、研究目的や運動様式に応じた方法を適用することを奨めている。ローラースキー滑走中は選手ごとに動作が異なるが、先行研究で用いられた方法はいずれも外的負荷に対する仕事量から効率を評価しており、異なる滑走動作によって生じるとされる仕事量の違いについては考慮していない。そのため、身体セグメントを動作させるために用いられる仕事を内的仕事として評価し、内的仕事と外的仕事の合計から仕事量を求めた本研究のnet efficiencyは、ローラースキー時の機械的効率の計算方法として最も適当であると考えられる。そこで、本研究では、前述の方法によって求められた総仕事率をエネルギー消費率で除することでnet efficiencyを算出した。

2.5 統計処理

被験者それぞれにおいて、滑走テクニックごとに一群にした各変数と滑走速度の2変数間の回帰分析を行った。線形回帰モデルまたは曲線回帰モデルから最適なモデルを選択し、最小二乗法によって求められた回帰式で2変数間の関係を示した。線形回帰の場合はPearsonの積率相関係数、曲線回帰の場合は決定係数を用いて、回帰式の適合度を示した。net efficiencyについては、各被験者の総仕事率の回帰式をエネルギー消費率の回帰式で除して求めた曲線によってその変動を示した。また、全ての統計処理は、統計解析ソフト (SPSS 15.0J for Windows, SPSS Inc.製) を使用して行い、統計的有意水準は5%未満に設定した。

3. 結果

外的仕事率および内的仕事率と滑走速度との関係を図2に示した。被験者A, Bともに、DPの外的仕事率は、滑走速度の上昇に伴い直線的に増加した ($r = 0.999, p < 0.001$; $r = 0.999, p < 0.001$; 図2上段)。DSの外的仕事率もDPと同様に直線的に増加した ($r = 0.999, p < 0.001$; $r = 0.999, p < 0.01$)。被験者Aの内的仕事率はDP, DSとも、滑走速度の上昇に伴って増加し、指数関数で回帰され ($r^2 = 0.961, p < 0.01$; $r^2 = 0.965, p < 0.01$; 図2下段)、DSに比べてDPが全ての速度で高い値を示した。また、被験者BのDPとDSの内的仕事率はともに指数関数的な増加を示し ($r^2 = 0.969, p < 0.01$; $r^2 = 0.941, p < 0.05$)、滑走速度が $3.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ まではDPの内的仕事率がDSよりも高い値を示したが、それ以上の速度ではDSがDPの値を上回った。

総仕事率、エネルギー消費率およびnet efficiencyの各変数と滑走速度との関係を図3に示した。被験者AのDPとDSの総仕事率は、滑走速度の上昇に伴って増加し、直線で回帰された ($r = 0.966, p < 0.01$; $r = 0.996, p < 0.01$; 図3上段)。両滑走テクニックともほぼ同じような値で推移したが、 $5.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ でのDPの値のみ著しく高い値を示した。被験者Bの総仕事率は、DP, DSともに直線的に増加し ($r = 0.988, p < 0.01$; $r = 0.991, p < 0.01$)、ほぼ同等の値を示した。被験

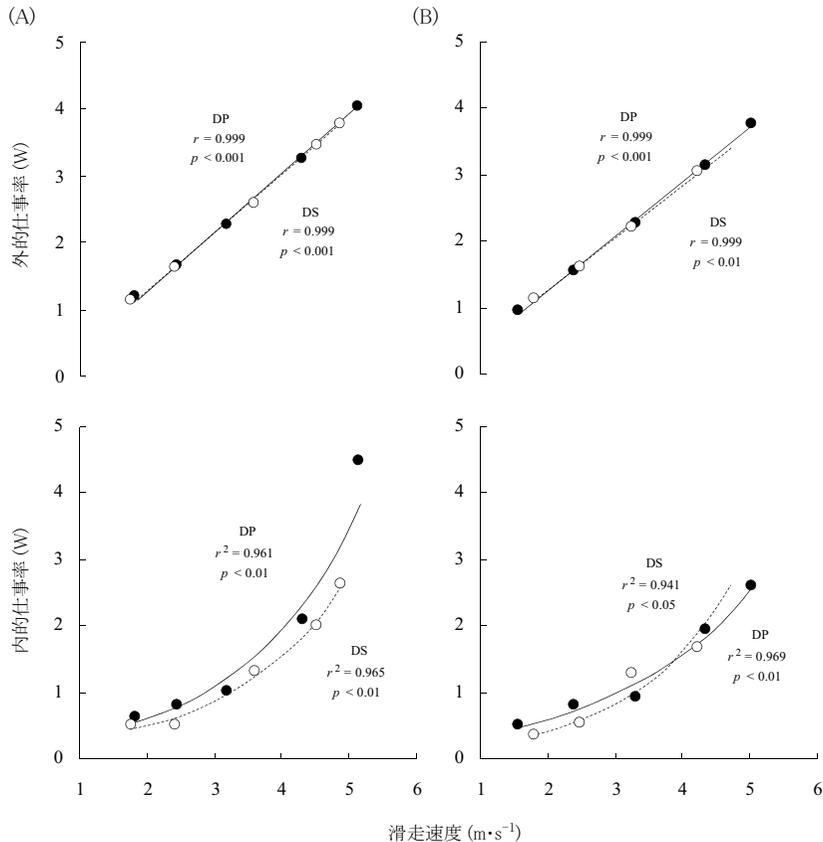


図2. 滑走速度の上昇に伴う外的仕事率および内的仕事率の変動。●はダブルポール (DP), ○はダイアゴナルストライド (DS) を示す。被験者AおよびBの各変数について、滑走テクニックごとに最小二乗法によって求められた回帰直線または回帰曲線とその適合度を図中に示した。実線はDP, 破線はDSを示す。

者Aのエネルギー消費率は、滑走速度の上昇に伴い、DP、DSのいずれも指数関数的に増加した ($r^2 = 0.991, p < 0.001$; $r^2 = 0.921, p < 0.01$; 図3中段)。低い滑走速度ではDSよりもDPのエネルギー消費率が高かったが、3.95 m·s⁻¹以上の速度ではDSのエネルギー消費率がDPを上回った。被験者BのDPとDSのエネルギー消費率もまた指数関数的な増加を示したが ($r^2 = 0.964, p < 0.01$; $r^2 = 0.953, p < 0.05$)、滑走テクニックにかかわらずほぼ同等の値であった。

被験者AのDPのnet efficiencyは、滑走速度の上昇に伴い、4.90 m·s⁻¹の47.7%まで増加した (図3下段および表2)。DSのnet efficiencyは、

3.46 m·s⁻¹の46.8%まで増加し、それ以上の速度では減少した。DPとDSのnet efficiencyを比較すると、3.95 m·s⁻¹まではDSが高かったが、それ以上の速度ではDPがDSの値を上回った。被験者BのDPとDSのnet efficiencyはほぼ同様の傾向の変動を示し、滑走速度の上昇に伴って最大値まで増加した後、減少に転じた。被験者BのDPのnet efficiencyの最大値は3.99 m·s⁻¹の45.9%、DSの最大値は4.04 m·s⁻¹の44.1%であった。また、各滑走テクニックで滑走した際の最高速度は、両被験者ともDSよりもDPの方が高かった (表2)。

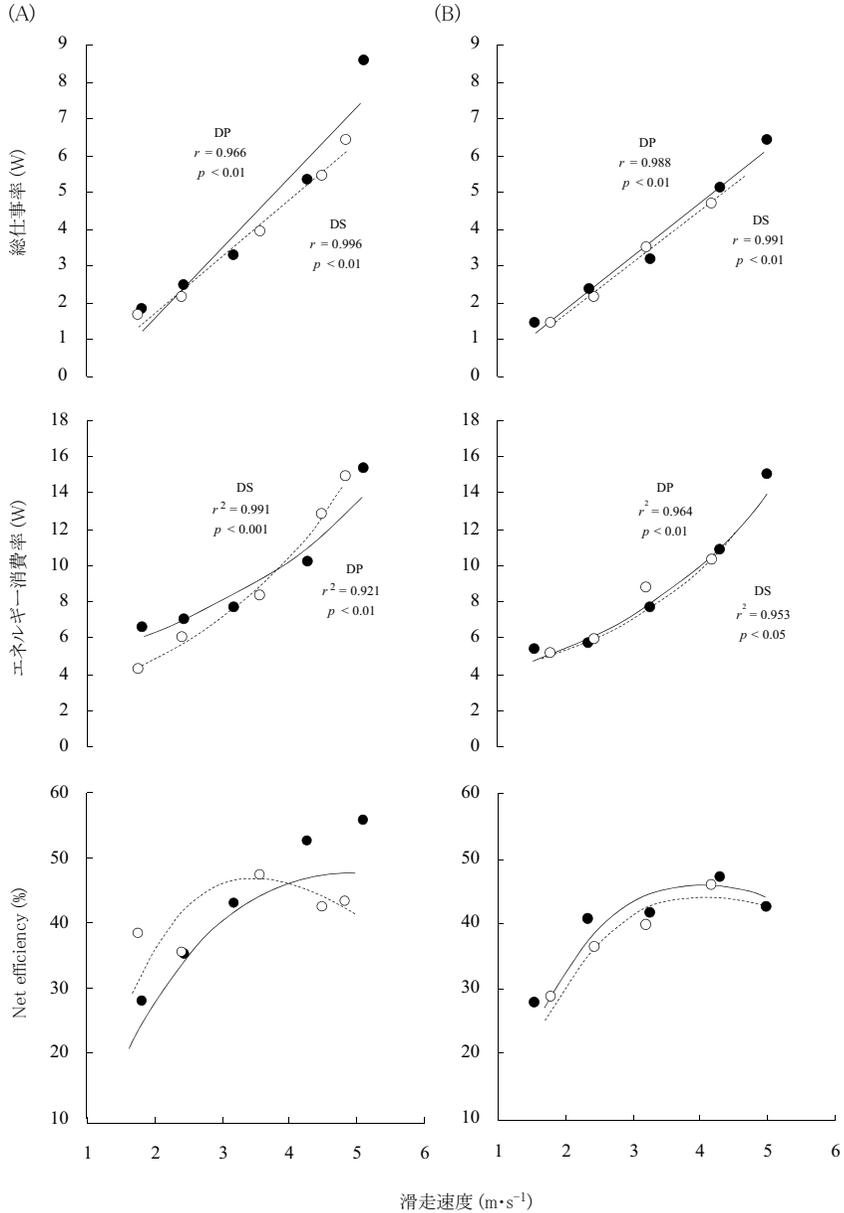


図3. 滑走速度の上昇に伴う総仕事率, エネルギー消費率およびnet efficiencyの変動. ●はDP, ○はDSを示す. 総仕事率およびエネルギー消費率と滑走速度との関係を回帰直線あるいは回帰曲線を用いて図中に示した. net efficiencyと滑走速度の関係は, 総仕事率の回帰式をエネルギー消費率の回帰式で除して求めた曲線によって示した. 実線はDP, 破線はDSを示す.

4. 考察

本研究では, 被験者が僅少であるため, 被験者ごとあるいは滑走テクニックごとに, 滑走速度の上昇に伴う各変数の変動について検討を行

った. 先行研究 (Hoffman et al., 1995; Sandbakk et al., 2010) では, ローラースキー滑走時の外的仕事率は, 滑走テクニックにかかわらず, 滑走速度の上昇に伴い直線的に増加すると報告さ

表2. DP, DSで滑走した際の最大効率, 最大効率時の滑走速度および最高滑走速度

被験者	最大効率 (%)		最大効率時の滑走速度 (m·s ⁻¹)		最高滑走速度 (m·s ⁻¹)	
	DP	DS	DP	DS	DP	DS
A	47.7	46.8	4.90	3.46	6.49	5.74
B	45.9	44.1	3.99	4.04	6.16	5.31

DPはダブルポール, DSはダイアゴナルストライドを示す.

れている. Nakai and Ito (2011) が報告した回帰式を用いて求めた本研究の外的仕事率は, 先行研究と同様にDP, DSとも直線的な増加を示した (図2上段).

内的仕事率は, 滑走速度の上昇に伴ってそれぞれ指数関数的に増加し, 滑走速度が高くなるほど大きく増加したが (図2下段), 被験者間あるいは滑走テクニック間でやや異なる変動を示した. 滑走速度が低い場合, 両被験者のDPとDSの内的仕事率はほぼ同等の値であったが, 5.00 m·s⁻¹という高い滑走速度では, 被験者AのDPの内的仕事率は著しく高い値を示した. これは, 筋活動によってなされた仕事が滑走速度にうまく変換されず, 速度を得るためにさらに多く筋による仕事が必要となったことが一因と考えられる. また, DPとDSを用いて同じ速度で滑走した場合, 内的仕事率は滑走テクニック間で大きな違いは見られなかった. しかし, 被験者Aは全ての速度においてDPがやや大きな内的仕事率を必要としたのに対し, 被験者Bは3.78 m·s⁻¹まではDPが, それ以上の速度ではDSがやや大きな内的仕事率を必要とした. この相違は, 被験者の滑走時の動作や各滑走テクニックの技術的な習熟度が異なることに起因すると思われる. 以上のことから, 内的仕事率は, 筋によってなされた仕事をうまく滑走速度に変換する能力, すなわち滑走技術の良否の影響を受けると考えられる.

内的仕事と外的仕事の合計として求めた総仕事率は, 両被験者とも滑走速度の上昇に対して直線的に増加した (図3上段). 被験者Bの総仕

仕事率は, 対象とした速度範囲において滑走テクニック間に差異は見られなかったが, 被験者Aは滑走速度が高い場合, DPの内的仕事率が大きく増加したことから, DPの総仕事率はDSよりも大きく増加した.

Hoffman et al. (1994) やBellizzi et al. (1998) は, DPあるいはDSを用いてローラースキーで滑走した際のエネルギー消費率は, 滑走速度の上昇に伴い直線的に増加すると報告している. しかし, 本研究のエネルギー消費率は指数関数的な増加を示し, その変動は彼らの報告と幾分異なった (図3中段). Hoffman et al.は1.1~2.9 m·s⁻¹, Bellizzi et al.は2.0~3.2 m·s⁻¹の速度範囲を対象としており, 彼らが対象とした低速度で滑走する際には, ST線維が選択的に動員される (Sale, 1987). 滑走速度を上昇させるために必要とされる仕事に対して, 筋線維の動員数を増加させることで対応したことが, エネルギー消費率が一定の割合で増加した原因であると推察される. それに対して, 本研究では, 彼らの報告よりも広範な1.67~5.00 m·s⁻¹の速度範囲を対象としている. 高い速度で滑走した場合, 収縮速度が速くなると効率が低下するST線維に加え, ST線維と比べて元来効率の低いFT線維が動員されたことでより多くのエネルギーが必要となったため (Goldspink, 1978; Suzuki, 1979), エネルギー消費率が大きく増加したと考えられる.

先行研究では, DPの酸素摂取量はDSと比較すると, クロスカントリースキーでは10~25% (Saibene et al., 1989; 3.7~7.2 m·s⁻¹, 斜度0%),

ローラースキーでは18%程度 (Hoffman et al, 1994; 1.1~2.9 m·s⁻¹, 斜度1.7%) 低く, DSよりもDPの経済性が高いとされている. しかし, 本研究では, 被験者Bのエネルギー消費率は両滑走テクニックでほぼ同等, 被験者Aは3.95 m·s⁻¹まではDPのエネルギー消費率が高く, それ以上の速度ではDSが高いエネルギー消費率を示し, 先行研究と異なる結果となった. この相違は, 測定を行った速度範囲や斜度の違い, 全被験者を一群として検討するか, あるいは被験者ごとに検討するかという方法の違いが影響したと思われる. また, 被験者間のエネルギー消費率の変動の違いは, それぞれの滑走テクニックで主として用いられる筋群の代謝能力の差に起因すると考えられる. DPとDSでは滑走時に動員される筋群が異なり, DPの動作 (図1a参照) では主として上半身の筋群が動員されるのに対し, 上肢のポールのプッシュ動作と下肢のキック動作で構成されるDSの動作 (図1b参照) では全身の筋群が動員される (Smith, 2003). これらのことから, 高い滑走速度でDPが低いエネルギー消費率を示した被験者Aは, 上半身の筋群の代謝機能がより発達しており, DPとDSのエネルギー消費率がほぼ同等であった被験者Bは, 上半身と下半身の筋群の代謝機能が同じように発達していると推察される.

Hoffman et al. (1995) は, DPとDSの機械的効率それぞれ14~15%, 20~36%であり, DPよりもDSの機械的効率が高いと報告している. 本研究のDPとDSのnet efficiencyはそれぞれ27.7~55.6%, 28.8~47.2%を示し (図3下段), DPとDSとの間に大きな差異は認められなかった. この相違は, 彼らが異なる滑走テクニックを用いたにもかかわらずなされる仕事量は同じであると仮定して効率を求めたことや, 両者の機械的効率の定義の違いによるためであると考えられる.

また, Nakai and Ito (2011) は, DSで滑走した際のnet efficiencyが滑走速度の上昇に伴って最大値まで増加した後, 減少に転じる変動を示したことから, DSで滑走する際には効率が最大となる至適速度が存在すると述べている. 本研

究の両被験者のDPとDSのnet efficiencyも彼らの報告と類似した変動傾向であり, 対象とした速度範囲内でnet efficiencyが最大となる速度が認められた (図3下段および表2). 内的仕事を含んだ総仕事率とエネルギー消費率から求めた本研究のnet efficiencyは, 先に述べた各変数を左右する滑走テクニックの技術的な習熟度や筋の代謝機能の獲得程度の影響を大きく受けると考えられ, net efficiencyの最大値は, 体内に取り込まれた酸素を元に化学的エネルギーを産生する能力, 産生された化学的エネルギーを力学的エネルギーに変換する能力, 力学的エネルギーを効率的に速度に変換する滑走技術がうまく合致した速度で発揮されたと推察される.

Coyle (1999) は, 持久的運動の競技成績はその運動を成し遂げるために必要な仕事量に要する時間で評価されるとしている. 持久的運動を高い効率で行えば, 同じエネルギーからより大きな仕事を発揮することができ, 求められる仕事量を行うために必要な時間は短縮される. また, 必要とされる仕事量をより少ないエネルギーで行うことにもなり, 消費エネルギー全体が節約される. これらのことは, 長時間の持久的運動において, 競技成績の向上に有利に働くであろう. 以上のことから, レース時には, 各滑走テクニックで最大効率を発揮する速度で滑走することで競技成績が改善されると考えられる. 各被験者のnet efficiencyの変動 (図3下段) を勘案すれば, 被験者Aの場合は, 3.95 m·s⁻¹までの速度範囲ではDSを用い, それ以上の速度ではDPを用いること, 両滑走テクニックのnet efficiencyがほぼ同様の変動傾向を示した被験者Bの場合は, 疲労部位を考慮して滑走テクニックを使い分けて滑走することで競技成績の向上が望めるであろう. さらに, 5.00 m·s⁻¹以上の高い滑走速度が求められるレース終末のスプリント時には, エネルギー消費や疲労を考慮して滑走テクニックを選択する必要がないため, 両被験者ともより高い速度で滑走できるDPを用いて滑走すべきであると考えられる (表2).

本研究では, Pierrynowski et al. (1980) の方法を用いて仕事量を算出したが, この方法では

異なる関節で同時に起こるエネルギーの発生と吸収が低く見積もられ、仕事量が過少評価される可能性が指摘されている。そのため、地面反力から逆動力学的に仕事量を算出することが推奨されているが (Winter, 2005), ローラースキー滑走時は、歩行や走行と比較して1サイクル間の移動距離が長いこと (本研究では3.41~6.48 m) や左右上下肢が独立して力発揮することから、地面反力の測定が困難であったため、前述の方法を用いた。また、本研究では被験者数が僅少であったため、さらに被験者数を増やして検証を進める必要がある。

5. まとめ

本研究では、DPとDSの2種類の滑走テクニックを用いてローラースキーで滑走した際の速度変化に伴う総仕事率、エネルギー消費率と機械的効率の変動および各変数の滑走テクニック間での差異について被験者ごとに検討した。滑走速度の上昇に対して、総仕事率は直線的、エネルギー消費率は指数関数的に増加し、被験者間ではやや異なる変動を示した。この差異は、滑走時の動作や滑走技術の習熟度、筋の代謝機能の違いによるものであると考えられた。net efficiencyはいずれも滑走速度の上昇に伴って増加した後、減少に転じ、両滑走テクニックでnet efficiencyが最大となる速度が認められた。このことから、レース時にはそれぞれの滑走テクニックで最大効率を発揮する速度で滑走することが競技成績の向上に有効であると考えられた。

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. 体育学研究, 15(3): 155-162.

Bellizzi, M. J., King, K. A. D., Cushman, S. K., and Weyand, P. G. (1998) Does the application of ground force set the energetic cost of cross-country skiing? J. Appl. Physiol., 85(5): 1736-1743.

Coyle, E. F. (1999) Physiological determinants of endurance exercise performance. J. Sci. Med.

Sport, 2(3): 181-189.

Gaesser, G. A. and Brooks, G. A. (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. J. Appl. Physiol., 38(6): 1132-1139.

Goldspink, G. (1978) Energy turnover during contraction of different types of muscle. Biomechanics VI-A: Proceedings of the 6th International Congress of Biomechanics. Copenhagen, Denmark: 27-39.

Hill, A. V. (1927) Muscular movement in man: The factors governing speed and recovery from fatigue. McGraw-Hill: New York.

Hoffman, M. D., Clifford, P. S., Watts, P. B., Drobish, K. M., Gibbons, T. P., Newbury, V. S., Sulentic, J. E., Mittelstadt, S. W., and O'Hagan, K. P. (1994) Physiological comparison of uphill roller skiing: Diagonal stride versus double pole. Med. Sci. Sports Exerc., 26(10): 1284-1289.

Hoffman, M. D., Clifford, P. S., Watts, P. B., O'Hagan, K. P., and Mittelstadt, S. W. (1995) Delta efficiency of uphill roller skiing with the double pole and diagonal stride techniques. Can. J. Appl. Physiol., 20(4): 465-479.

金子公宥 (1985) 筋運動と効率-効率評価法の問題点を中心に-. Jpn. J. Sports Sci., 4(1): 3-8.

Mahood, N. V., Kenefick, R. W., Kertzer, R., and Quinn, T. J. (2001) Physiological determinants of cross-country ski racing performance. Med. Sci. Sports Exerc., 33: 1379-1384.

Nakai, A. and Ito, A. (2011) Net efficiency of roller skiing with a diagonal stride. J. Sports Sci., 29(4): 423-429.

中井聖・伊藤章・豊岡示朗 (2009) ローラースキー滑走時の生理的指標と競技成績の関係. 大阪体育学研究, 47: 1-10.

Pierrynowski, M. R., Winter, D. A., and Norman, R. W. (1980) Transfers of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. Ergonomics, 23: 147-156.

Rundell, K. W. and Bacharach, D. W. (1995)

- Physiological characteristics and performance of top U.S. biathletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27: 1302-1310.
- Saibene, F., Cortili, G., Roi, G., and Colombini, A. (1989) The energy cost of level cross-country skiing and the effect of the friction of the ski. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 58: 791-795.
- Sale, D. G. (1987) Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 15(1): 95-152.
- Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Leirdal, S., and Ettema, G. (2010) Metabolic rate and gross efficiency at high work rates in world class and national level sprint skiers. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 109(3): 473-481.
- Smith, G. A. (2003) Biomechanics of cross country skiing. In: Rusko, H. (Ed) *Cross Country Skiing*. Blackwell Science: Oxford, pp. 38-44.
- Staub, J. L., Im, J., Caldwell, Z., and Rundell, K. W. (2000) Cross-country ski racing performance predicted by aerobic and anaerobic double poling power. *J. Strength Cond. Res.*, 14: 282-288.
- Stöggl, T., Lindinger, S., and Müller, E. (2006) Reliability and validity of test concepts for the cross-country skiing sprint. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 38: 586-591.
- Suzuki, Y. (1979) Mechanical efficiency of fast- and slow-twitch muscle fibers in man during cycling. *J. Appl. Physiol.*, 47(2): 263-267.
- Winter, D. A. (1978) Calculation and interpretation of mechanical energy of movement. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 6(1): 183-256.
- Winter, D. A. (1979) A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.*, 46: 79-83.
- Winter, D. A. (2005) *Biomechanics and motor control of human movement* (3rd ed.). John Wiley & Sons: Hoboken, NJ.