

〈原著論文〉

ウォームアップ後の経過時間がその後の運動における生理学的応答に及ぼす影響
— 冬季におけるチームスポーツの試合を想定して —

稲葉泰嗣* 加治木政伸** 山下直之*** 松藤貴秋* 小林大地* 松本孝朗*

Effect of elapsed time after warm-up on physiological responses during subsequent exercise: Assuming a team sports game in winter

Taishi INABA *, Masanobu KAJIKI **, Naoyuki YAMASHITA ***,
Takaaki MATSUFUJI *, Daichi KOBAYASHI *, Takaaki MATSUMOTO *

Abstract

It is well-established that warm-up exercise (W-up) and concomitant elevation in core temperature gains athletic performances and subsequent resting periods diminishes the performance advantages obtained from W-up. However, little studies have examined the physiological factors that underlying performance reduction after the resting periods. The purpose of this study was to examine the effect of elapsed resting time after the W-up on physiological factors at an assumed winter temperature (10°C). Eight regularly exercising young males performed a 15-minute W-up at lactate threshold intensity, followed by either of 0 (rest0), 5 (rest5), 10 (rest10), or 15 (rest15) min of seated rest while wearing windbreakers on lower and upper bodies. Thereafter, subjected performed 10 min performance testing (PT) at the exercise intensity of onset of blood accumulation (OBLA) using cycle ergometer in 10°C. Rectal temperature, oxygen consumption ($\dot{V}O_2$), heart rate and blood lactate concentrations were measured. Rectal temperature significantly decreased from post W-up to the onset of PT in rest15 whilst total energy expenditure during PT was significantly higher in rest15 compared with rest0. In addition, change in $\dot{V}O_2$ during PT were significantly higher in rest15 at 4-, 6-, and 10-min points and rest10 at 6-, 8-min points compared with that observed in rest0 condition. No significant difference was observed between other conditions. These results suggest that despite wearing insulation clothes after W-up, 10 to 15 min of resting in winter impairs exercise efficiency due to core temperature reduction.

1. 緒言

ウォームアップ (W-up) がその後の様々な運動パフォーマンスの改善につながる可能性が

あることが知られている¹⁾。これは W-up により、体温が上昇することによって起こる筋肉と腱の柔軟性の増加、ヘモグロビンとミオグロビンからの酸素解離の増加、代謝反応の加速、神

* 中京大学スポーツ科学部、** 中京大学大学院体育学研究科、*** 京都工芸繊維大学

経伝達の加速などが要因であるとされている²⁾。そのため選手にとって競技開始前の W-up は重要な役割を持つ。

チームスポーツでは、試合中の運動強度の多くが低強度から中強度の有酸素性運動である。また、試合の勝敗を左右するオフェンス（攻撃）とディフェンス（防御）を成功させるためにはスプリントやジャンプ、タックルなどの無酸素性運動能力が重要とされている³⁾。この無酸素性運動能力を維持するためには、有酸素性エネルギー供給の貢献が重要になる^{4, 5, 6)}。W-up による体温の上昇は運動初期の有酸素性エネルギー供給の寄与を増加させ、無酸素性エネルギー供給を温存することができると言われている²⁾。このことから、W-up による体温上昇はチームスポーツアスリートのパフォーマンスを左右すると考えられる。

しかしながら、チームスポーツの試合では戦術の確認、各選手の準備、競技規則等の理由により W-up から試合開始までに約 12 分間の移行時間があるとされている⁷⁾。W-up 後の経過時間が延長されるとともに、W-up によって上昇した体温の低下に伴って運動パフォーマンスも低下することがいくつかの研究^{8, 9, 10)} で報告されている。Lovell らの研究¹⁰⁾では 15 分間の休息後、体温の低下とともにサッカー特有の持久力テストにおける運動量が低下したことを報告している。また、W-up 後に 24°C の環境で 5 分間の安静をとった条件をコントロール条件とし、24°C の環境で 30 分間の安静をとった条件でのタイムトライアル（ローイング 2.0km またはランニング 2.4km）の走破時間の比較では 11±21 秒遅延したとの報告がある¹¹⁾。さらに、この研究では、寒冷環境条件との比較も実施しており、コントロール条件と比較して 5°C の環境にて 5 分間の安静をとった条件では 9±19 秒、30 分間の安静をとった条件では 20±27 秒遅延した。これらのことから W-up 後の経過時間が長くなることで運動パフォーマンスは低下し、寒冷環境下では運動パフォーマンスの低下がさらに大きくなる可能性を示唆している。

先行研究^{8, 9, 10, 11)}から、W-up 後少なくとも 15 分までに体温が低下し、エネルギー代謝へ影響を及ぼすことが考えられるが、15 分以内のどの時間経過の時に生理的変化が起こるのかについては不明である。この事を明らかにすることにより、冬季のような低温環境での W-up 後の経過時間に伴うパフォーマンスの低下を防ぐ対策を講じられると考えられる。そこで本研究では、W-up が特に重要とされる冬季の競技開始時を想定した 10°C の低温環境下において、W-up 後の異なる経過時間がその後の運動中のエネルギー代謝へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。W-up の強度については、長時間、高強度での W-up を行ってしまうと、疲労によりパフォーマンスが低下してしまう可能性がある¹²⁾。先行研究では、血中乳酸濃度が上昇し始める乳酸性作業閾値（LT: Lactate threshold）の強度以上での W-up が、その後の運動パフォーマンス向上に効果的であることを報告している^{13, 14)}。また W-up の時間については 10 分から 15 分が好ましい¹⁵⁾との見解が示されている。このため、本研究での W-up 強度は LT 強度とし、その時間は 15 分間とした。

2. 方法

2. 1. 被験者

被験者は運動習慣のある若年成人男性 8 名であった。年齢、身長、体重、体脂肪率、ピーク酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2peak}$ ）の平均値±標準偏差（SD）はそれぞれ 22±1.7 歳、1.72±0.06m、68.9±9.2kg、12.9±1.8%、40.9±3.4ml/kg/min であった。被験者にはあらかじめ実験の趣旨を説明した上で、実験参加についての文書による同意を得た。また本研究は人を対象とする研究に関する中京大学倫理審査委員会の承認を得て実施した。

2. 2 実験方法

全ての試行は日内変動を考慮して同一の被験者については同一の時間帯に行った。また、被験者には前日のアルコール摂取、当日のカフェ

イン摂取と実験3時間前以後の食事を避けるように指示した。

2. 2. 1 事前測定

本実験の前に自転車エルゴメータ (AERO-BIKE 75XL III、KONAMI 社、座間) を用いた漸増運動負荷テストを行い、血中乳酸濃度の測定から LT と Onset of Blood Lactate Accumulation (OBLA) の運動強度 (W) を決定した。そのプロトコルは 20W の負荷で運動を開始し、3分毎に 20W ずつ疲労困憊に至るまで負荷を増加させた。被験者にはペダルの回転数を毎分 75-85 回転に維持するように指示した。各ステージの終了 30 秒前から指先より $0.3 \mu\text{l}$ の毛細血管血を採取し、血中乳酸濃度を測定した。 $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ はペダリング中の酸素摂取量の最大値とした。LT は漸増運動負荷テスト中に採血して作成した血中乳酸カーブの第一変曲点での運動強度、OBLA は血中乳酸値が 4.0mmol/l となる点とし、その点での運動強度を求めた。

2. 2. 2 本実験

本実験として W-up 後の休憩時間の長さを変えた 4 試行をそれぞれ 24 時間以上の間隔を空けて行った。4 試行の順序はカウンターバランスをとれるように割り付けた。

被験者は指定した半袖半ズボン (オンザコート社、神戸) とウィンドブレーカー (オンザコート社、神戸) に着替えた後、直腸温センサー (LT-ST08-11、グラム社、さいたま) を挿入した。その後、冬を想定した気温 (10°C) に設定した人工気象室 (TBR12A4PX、ESPEC 社、大阪) に入室し、呼気ガス分析用マスクを取り付け、自転車エルゴメータの上で 5 分間の座位安静をとらせ、その間に安静時酸素摂取量を測定し、安静時血中乳酸濃度の指先採血を行った。その後 LT 強度で 15 分間の W-up を行った。W-up 後は、休憩なし (rest0)、または椅座位での休憩を 5 分 (rest5)、10 分 (rest10)、15 分 (rest15) とらせた後にパフォーマンステスト (PT) を行った。rest0 条

件では椅座位安静は行わなかった。W-up から PT までは上下のウィンドブレーカーを着用した。椅座位安静後は可能な限り早くウィンドブレーカーを脱ぎ、半袖・半ズボンの着衣にて PT を行った。0 分間の条件では W-up 後すぐに着替え、PT を行った。PT の運動強度は事前に測定した OBLA 強度にて 10 分間の自転車こぎ運動を実施した。

2. 3 測定・算出方法

2. 3. 1 酸素摂取量

事前測定と本実験の両方において、試行の開始から終了までの酸素摂取量を呼気ガス分析器 (AE-310s Aeromonitor、MINATO 社、大阪) を用いて breath-by-breath 法にて計測した。呼気ガス分析器の計測濃度較正は、実験室内の空気と標準ガス (O_2 濃度 15.1%、 CO_2 濃度 5%) を用いて行った。また、換気量測定値用流量センサーの較正は 2L の流量較正器を用い、製造メーカーの説明書通りに行った。

2. 3. 2 直腸温

直腸温は W-up 開始に合わせて測定を開始し、実験終了までをデータ収集型ハンディタイプ温度計 (LT-8、グラム社、さいたま) を使用して 30 秒ごとに記録した。直腸温プローブは被験者各自が肛門より約 10 cm 挿入した。

2. 3. 3 血中乳酸濃度

簡易型乳酸測定機 (Lactate Pro 2、Arkray 社、京都) を用いて測定した。本実験では W-up の前後、PT 開始前、PT 開始後 1 分毎に測定した。

2. 3. 4 主観的運動強度

主観的運動強度は Borg scale ($6 - 20$)¹⁶⁾ を用いて、PT 開始後 1 分毎に申告させた。

2. 3. 5 心拍数

事前測定と本実験の両方において、試行の開始から終了まで、胸部双極誘導によって得られた心電図をベッドサイドモニター (DS8600

system DYNASCOPE、フクダ電子社、東京)を介して呼気ガス分析器に導き、心拍数を記録した。

2. 3. 6 運動によるエネルギー消費量の算出

PT中の酸素摂取量の2分間毎の平均値(ml/min)から5分間の座位安静時酸素摂取量の平均値(ml/min)をそれぞれ引いた後、台形法を用いてPT中の運動による総酸素摂取量(ml)を算出した。

その後、酸素摂取量1Lあたり5kcalと仮定して運動によるエネルギー消費量を算出した。

2. 3. 7 統計分析

結果は、全て平均値±標準偏差で示した。PT中の酸素摂取量は2分毎の平均の値を用いて繰り返しのある2要因分散分析(条件×時間)を用いて行った。直腸温、血中乳酸濃度、心拍数はW-up前、W-up後、PT前、PT後、PT中の平均の値を用いて、繰り返しのある2要因分散分析(条件×時間)を行った。エネルギー消費量は対応のある1要因分散分析(条件)を行った。主観的運動強度の比較はPT後、PT中の平均の値を用いて対応のある1要因分散分析(条件)を行った。主効果あるいは交互作用が認められた場合にはBonferroniの多重比較検定を行った。統計解析はSPSS ver.26(IBM Corp., Armonk, NY, USA)を使用した。統計的有意水準は $P < 0.05$ とした。

3. 結果

3. 1 直腸温、血中乳酸濃度、主観的運動強度、心拍数

直腸温(T_{re})、血中乳酸濃度(La)、主観的運動強度(RPE)、心拍数(HR)をTable1に示した。直腸温は実験途中にプローブが抜けてしまい1名の被験者が測定できなかったため7名のデータを分析した。直腸温は全ての条件においてW-up前と比較してW-up後有意に高い値を示し、PT前と比較してPT後も有意に高い値を示した。W-up終了後、rest15の条件

でPT開始までに体温が有意に低下した。血中乳酸濃度は全ての条件においてW-up前と比較してW-up後有意に高い値を示し、PT前と比較してPT後も有意に高い値を示した。主観的運動強度に有意な差はなかった。心拍数は全ての条件においてW-up前と比較してW-up後有意に高い値を示し、PT前と比較してPT後も有意に高い値を示した。PT前の心拍数はrest0条件が他の条件より有意に高い値であった。

3. 2 運動によるエネルギー消費量

各条件におけるPT中のエネルギー消費量についてFig.1に示した。rest0条件と比較してrest15条件において有意に高い値を示した。

3. 3 酸素摂取動態

各条件におけるPTの開始から終了までの2分間毎の $\dot{V}O_2$ の平均値をFig.2に示した。PT開始後4分、6分、10分目でrest0に対してrest15が有意に高い値であった。また6分、8分目においてrest0に対してrest10が有意に高い値を示した。

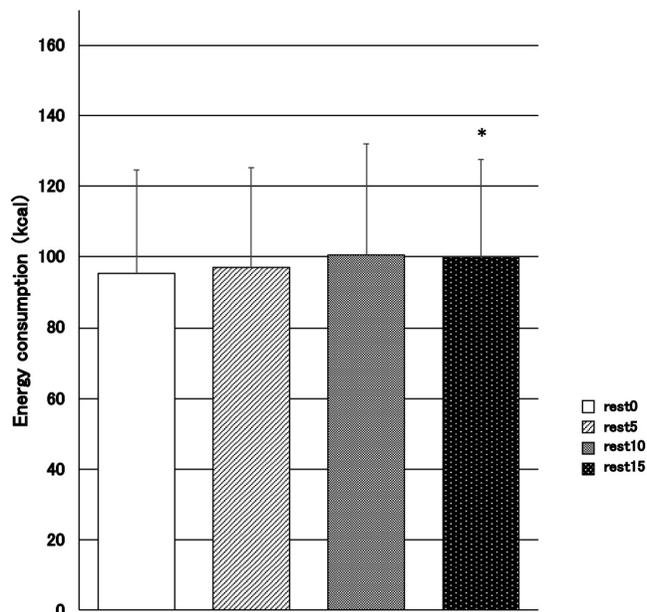
4. 考察

本研究では、冬を想定した気温(10°C)において、W-up後0、5、10、15分の安静時間がその後の一定負荷運動中の生理学的指標に及ぼす影響を評価し、W-up後の経過時間の影響を検討した。その結果、W-upによって上昇した直腸温はrest15の条件で運動開始時まで有意に低下した。また、PT中のエネルギー消費量はrest0と比較してrest15が有意に高値を示した。さらに、PT開始から4分、6分、10分での酸素摂取量が、rest0と比較してrest15の条件で有意に高く、6分、8分ではrest0と比較してrest10の条件で有意に高かった。

直腸温はrest15条件においてW-up後、PTの開始までに有意な低下が見られた。冬季、選手らはW-upによって上昇した体温の低下を競技開始時まで防ぐために、ウィンドブレー

Table 1. T_{re} , La, RPE, and HR during PT. Values are mean \pm SD.

		pre W-up	post W-up	pre PT	post PT	ave PT
T_{re} (°C) (n = 7)	rest0	36.8 \pm 0.3		37.1 \pm 0.3*	37.4 \pm 0.4*	37.2 \pm 0.3
	rest5	37.0 \pm 0.3	37.2 \pm 0.3*	37.2 \pm 0.4	37.4 \pm 0.5*	37.3 \pm 0.4
	rest10	36.9 \pm 0.3	37.2 \pm 0.3*	37.0 \pm 0.4	37.3 \pm 0.5*	37.1 \pm 0.5
	rest15	36.9 \pm 0.2	37.1 \pm 0.3*	37.0 \pm 0.2*	37.2 \pm 0.3*	37.1 \pm 0.2
La (mmol) (n = 8)	rest0	0.7 \pm 0.1		2.0 \pm 1.1*	6.6 \pm 1.4*	4.7 \pm 1.0
	rest5	0.7 \pm 0.1	2.0 \pm 1.1*	1.2 \pm 0.6*	6.7 \pm 2.4*	4.5 \pm 1.4
	rest10	0.7 \pm 0.1	2.0 \pm 1.0*	1.2 \pm 0.4*	7.0 \pm 1.5*	4.8 \pm 1.0
	rest15	0.8 \pm 0.2	2.0 \pm 1.0*	1.1 \pm 0.3*	7.1 \pm 1.9*	4.8 \pm 1.2
RPE (n = 8)	rest0				15.8 \pm 1.9	14.7 \pm 1.9
	rest5				15.6 \pm 2.2	14.2 \pm 2.1
	rest10				15.6 \pm 2.3	14.7 \pm 2.2
	rest15				15.6 \pm 2.5	14.3 \pm 2.2
HR(bpm/min) (n = 8)	rest0	68.6 \pm 7.7		116.1 \pm 15.0*	157.2 \pm 15.9*	137.5 \pm 14.0
	rest5	74.3 \pm 4.9	118.3 \pm 15.0*	88.5 \pm 10.6*†	160.8 \pm 20.1*	139.6 \pm 16.4
	rest10	70.1 \pm 6.5	115.5 \pm 13.5*	82.0 \pm 6.8*†	158.8 \pm 17.6*	136.5 \pm 13.3
	rest15	72.3 \pm 8.9	117.3 \pm 16.4*	84.8 \pm 6.1*†	158.4 \pm 17.6*	137.6 \pm 13.1

Significant difference vs. previous time point ($p < 0.05$)†Significant difference vs. rest0 ($p < 0.05$)Fig 1. Energy consumption by exercise during PT. Values are mean \pm SD (n=8). Significantly difference vs rest0 ($p < 0.05$)

カー等の一般的な防寒着を着用する。しかし本研究の結果から一般的な防寒着では15分を超えると体温を維持できないことが示された。Faulkner らの研究¹⁷⁾では15°Cに保たれた室内で断熱性の衣類を着用した場合に、W-up 終了から30分の安静後、直腸温は約0.1°C、筋温は約1°C低下した。本研究では Faulkner らの

研究¹⁷⁾と同じような防寒着の着用にも関わらず、15分という短い時間で直腸温が同様の低下を示した。これは先行研究と比較して気温が5°C低かったことが体温低下を早まらせたと考えられる。また、Faulkner らの研究¹⁷⁾では筋温が直腸温より大きな変化を示している。直腸温は、筋温、皮膚温と比較して反応が遅いこと

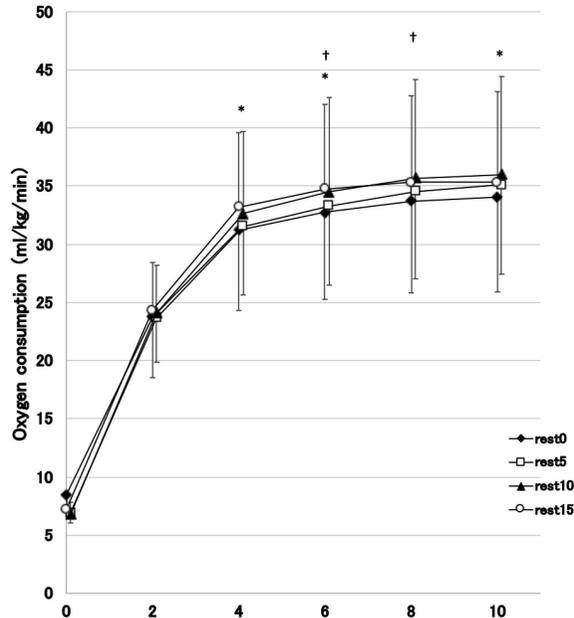


Fig 2. Oxygen consumption during PT. Values are mean \pm SD (n=8).

* Significantly difference rest0 vs rest15 ($p < 0.05$)

† Significantly difference rest0 vs rest10 ($p < 0.05$)

が言われている¹⁸⁾。本研究では筋温や皮膚温の測定は実施していないが、先行研究^{17, 18)}からW-up後と比較してPT前に直腸温が有意に低下したrest15条件と有意差はないが直腸温が0.2°Cの低下を示しているrest10条件では、体表面に近い筋温や皮膚温は直腸温以上に低下した可能性が考えられる。

Rest0条件と比較してrest15条件において運動によるエネルギー消費量の有意な増加が見られた。寒冷環境下での運動時の体温の低下によって運動中のエネルギー消費量が増加することが報告されている^{19, 20)}。筋温の低下により、運動単位あたりの筋収縮力が低下するとともに筋出力も低下する²¹⁾。その低下を補うために運動単位の動員数を増加させ、酸素摂取量の増加が起きると考えられている¹⁹⁾。また、筋温の低い条件では血中乳酸濃度の増加を引き起こすことも報告されており^{22, 23)}、W-up後の経過時間による筋温の低下はエネルギー供給に影響を与えることが考えられる。

PT中の酸素摂取量ではrest10条件で6分、8分、rest15条件で4分、6分、10分の時点で

rest0条件と比較して有意に高い値を示した。一定強度での運動時、酸素摂取量は2-3分で定常状態となるが、LT強度以上の運動では酸素摂取量はゆっくりと増加し続け、定常状態は遅れて出現するか、定常状態とならず、最大酸素摂取量まで増加し続けることが知られている²⁴⁾。本研究におけるPTはOBLA強度にて実施しており、全ての条件において酸素摂取量は2分を超えても定常状態にはならなかった。この酸素摂取量がゆっくりと増加していく成分は緩成分 (slow component) と言われ、タイプII筋線維の動員がその要因であると考えられている^{24) 25)}。タイプII筋線維はタイプI筋線維と比較してエネルギー効率 (外的仕事/エネルギー量) が低いことが知られており、Krustrupら²⁶⁾の研究ではタイプI筋線維の反応性を薬理学的方法で弱めると、タイプII筋線維が多く動員され、筋の酸素摂取量は増加した。またFaulknerら²¹⁾は筋温の低下により筋出力が低下すると、タイプII筋線維の動員数が増加することを報告している。これらのことからrest10とrest15条件ではタイプI筋線維に加

え、エネルギー効率の低いタイプII筋線維がより多く動員されたため4分目以降にrest10、rest15の条件はrest0条件より高値を示したと考えられる。しかしながら、rest10条件の10分の時点ではrest0条件との差は無くなっていた。運動時、筋温は10分-15分でプラトーに達するとされている²⁷⁾。PT前後の直腸温はどの条件においてもPT開始前と比較してPT終了後は有意に高い値を示している。つまり10分間のPTがW-upとなり体温を上昇させたため、rest0条件と比較してrest10条件においてPT中の10分の時点で酸素摂取量に差はなかったと考えられる。

PT中の血中乳酸濃度は条件間に有意な差は見られなかったが、W-up後の経過時間が長くなることでPT終了後の血中乳酸濃度が高くなる傾向が見られた。Wakabayashiら²³⁾は下肢を冷却し筋温を低下させた状態で乳酸性作業閾値(LT)の強度の自転車こぎ運動を行った際、下肢の冷却が無い群と比較して運動開始から8分後の時点で血中乳酸濃度が著しく増加したことを報告している。同研究では運動開始時の酸素摂取動態の遅延と外側広筋の脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビンの一過性の上昇も確認され、筋への酸素供給量の低下が影響したと考察している。また、体温の低下による運動中の血中乳酸濃度の著しい増加は他の研究^{19, 22)}でも報告されており、これらは無酸素性エネルギー供給における解糖系による代謝が増加した事を示している。W-upには体温の上昇によって主運動開始時の効率的なエネルギー供給が期待される。本研究のPTの強度は最大下運動であり、有酸素性エネルギー供給の貢献度が高いと考えられる。しかしながらW-up後の経過時間が長くなることでPT終了後の血中乳酸濃度に増加傾向が見られ、解糖系によるエネルギー供給の寄与が高くなった可能性を示した。これは先行研究^{19, 22, 23)}と同様にW-up後の経過時間による体温の低下が影響したと考えられ、W-up効果が減少したことを示唆している。また、前出したタイプII筋線維はタイプI筋線維と比較して解糖系の能力が高いとされている²⁸⁾。そのた

めタイプII筋線維が動員されることで解糖系によるエネルギー供給の寄与が増大し、より多くの乳酸を産生する。つまりW-up後の経過時間の延長に伴って、その後の運動における血中乳酸濃度に増加傾向が見られたことは、前述する体温の低下によるタイプII筋線維の動員数の増加の可能性と一致していると考えられる。

本研究では筋温の測定は行っていないため、体温の影響は推測に過ぎない。しかしながら一定負荷運動なものにも関わらず、W-up後の経過時間が長くなることでエネルギー代謝が亢進することが明らかになった。これは相対的な運動強度が増加し、運動効率が低下したことを示唆している。一方、主運動が長く継続される場合、主運動により体温が上昇するとともにW-up後の経過時間の影響は小さくなると考えられる。つまりW-up後の経過時間の延長は運動開始初期のパフォーマンスに影響を及ぼす可能性を示唆している。そのため長い出場時間がある選手や持久的な競技ではW-up後の経過時間による影響は少ないと考えられるが、競技開始直後から高いパフォーマンスを求める場合は考慮する必要がある。

チームスポーツでは競技開始までに約12分間の移行時間があるとされている⁷⁾。本研究ではW-up後10分から15分の経過時間が同一運動強度における運動効率を低下させた。つまり、先発選手であっても移行時間の影響を受ける恐れがある。また、控え選手はコーチが交代を宣言するまではベンチ付近で待機しなければならない。そのためW-up後すぐに競技を開始することはできず、W-upの終了から15分以上の経過時間が余儀なくされる可能性がある。より競技レベルが高い試合になると、控え選手のパフォーマンスや交代のタイミングが試合の結果に関わることが報告されて²⁹⁾おり、控え選手は主力選手同様にチームスポーツにおいて重要である。そのためコーチやチームスタッフは10分を基準とし、選手の出場タイミングに合わせW-upを実施する方法を考える必要がある。控え選手については15分以上待機しなければならない場合も考えられるため、15

分を超える経過時間の延長が及ぼす影響についても検討することが必要かもしれない。

本研究で用いた W-up では、先行研究^{12, 13, 14)}をもとに強度と時間を設定した。Tsurubami ら³⁰⁾は、W-up 後の経過時間が長くなる時、ジャンプパフォーマンスを維持するために比較的高い強度の W-up が必要であると報告しており、W-up の強度や時間を変更することで W-up 後の経過時間による運動パフォーマンスの低下を防ぐことができるかもしれない。また Spitz らの研究¹¹⁾では同じ強度、時間の W-up を行なった場合に 5℃と 24℃の気温の違いで W-up 後の経過時間の影響は異なった。このことから気温の違いによる影響についても考慮しなければならない。今後の研究で異なる環境下、W-up の強度と時間の関係を検討し、W-up 後から競技開始までの経過時間による運動パフォーマンスの低下を防ぐ手段を考え、様々なチームスポーツのアスリートのために W-up 戦略を構築する必要がある。

5. 結論

冬季の競技会を想定した条件下（気温 10℃、一般的な防寒着の着用）では W-up 終了後、10 分から 15 分の経過時間によって選手の体温は低下し、一定負荷運動中のエネルギー消費量と運動開始 4 分以降の酸素摂取量の明らかな増加が確認された。この結果は体温の低下によって相対的な運動強度が増加し、運動効率が低下することを示している。そのため運動開始初期には運動効率が低下し、本来のパフォーマンスを発揮できない可能性が示唆された。一方、主運動の継続によって体温が上昇するにつれ、W-up 後の経過時間による影響は減少すると考えられる。この結果はチームスポーツにおいて、主力選手及び控え選手が競技開始直後からベストなパフォーマンスを発揮するために、コーチやチームスタッフにとって重要な情報となる。

引用文献

- 1) Fradkin AJ, Zazryn TR, Smoliga JM. Effects of warming-up on physical performance: a systematic review with meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 24 (1): 140-148, 2010.
- 2) Bishop D. Warm-up I. Potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Medicine*. 33 (6): 439- 454, 2003.
- 3) Stone NM, Kilding AE. Aerobic conditioning for team sport athletes. *Sports Medicine*, 39 (8): 615-642, 2009.
- 4) Bangsbo, J, Krstrup, P, Gonzalez-Alonso, J, and Saltin, B. ATP production and efficiency of human skeletal muscle during intense exercise: Effect of previous exercise. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*. 280: E956-E964, 2001.
- 5) Gaitanos GC, Williams C, Boobis L, Brooks S. Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *Journal of applied physiology*. 75 (2): 712-719, 1993.
- 6) Gastin PB. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports medicine*, 31 (10): 725-741, 2001.
- 7) McGowan CJ, Pyne DB, Thompson KG, Rattray B. Warm-up strategies for sport and exercise: mechanisms and applications. *Sports Medicine*. 45 (11): 1523-1546, 2015.
- 8) Galazoulas C, Tzimou A, Karamousalidis G, Mougios V. Gradual decline in performance and changes in biochemical parameters of basketball players while resting after warm-up. *European journal of applied physiology*, 112 (9): 3327-

- 3334, 2012.
- 9) Crowther RG, Leicht AS, Pohlmann JM, Shakespear-Druery J. Influence of rest on players' performance and physiological responses during basketball play. *Sports*, 5 (2): 27, 2017.
 - 10) Lovell RJ, Kirke I, Siegler J, Mcnaughton LR, Greig MP. Soccer half-time strategy influences thermoregulation and endurance performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 47 (3): 263-269, 2007.
 - 11) Spitz MG, Kenefick RW, Mitchell JB. The effects of elapsed time after warm-up on subsequent exercise performance in a cold environment. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28 (5): 1351-1357, 2014.
 - 12) Tomaras EK, MacIntosh BR. Less is more: standard warm-up causes fatigue and less warm-up permits greater cycling power output. *Journal of Applied Physiology*. 111 (1): 228-235, 2011.
 - 13) Jones AM, Koppo K, Burnley M. Effects of prior exercise on metabolic and gas exchange responses to exercise. *Sports Medicine*. 33 (13): 949-971, 2003.
 - 14) 瀧澤一騎, 石井好二郎. ウォーミングアップ強度が高強度運動パフォーマンスと酸素摂取動態, 筋活動へ及ぼす影響. *日本運動生理学雑誌*. 12 (2): 41-49, 2005.
 - 15) Silva LM, Neiva HP, Marques MC, Izquierdo M, Marinho DA. Effects of warm-up, post-warm-up, and re-warm-up strategies on explosive efforts in team sports: a systematic review. *Sports Medicine*. 48 (10): 2285-2299, 2018.
 - 16) Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 14 (5): 377-381, 1982.
 - 17) Faulkner SH, Ferguson RA, Gerrett N, Hupperets M, Hodder SG, Havenith G. Reducing muscle temperature drop after warm-up improves sprint cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45 (2): 359-365, 2013.
 - 18) Webb P. Temperatures of skin, subcutaneous tissue, muscle and core in resting men in cold, comfortable and hot conditions. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 64 (5): 471-476, 1992.
 - 19) Ito R, Nakano M, Yamane M, Amano M, Matsumoto T. Effects of rain on energy metabolism while running in a cold environment. *International Journal of Sports Medicine*. 34 (8): 707-711, 2013.
 - 20) Hinde K, Lloyd R, Low C, Cooke C. The effect of temperature, gradient, and load carriage on oxygen consumption, posture, and gait characteristics. *European journal of applied physiology*, 117 (3), 417-430, 2017.
 - 21) Faulkner JA, Zerba E, Brooks V. Muscle temperature of mammals: cooling impairs most functional properties. *American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 259 (2), R259-R265, 1990.
 - 22) Blomstrand E, Kaijser L, Martinsson A, Bergh U, Ekblom B. Temperature-induced changes in metabolic and hormonal responses to intensive dynamic exercise. *Acta physiologica scandinavica*. 127 (4): 477-484, 1986.
 - 23) Wakabayashi H, Osawa M, Koga S, Li K, Sakaue H, Sengoku Y, Takagi H. Effects of muscle cooling on kinetics of pulmonary oxygen uptake and muscle deoxygenation at the onset of exercise. *Physiological reports*, 6 (21), e13910, 2018.

- 24) Jones AM, Grassi B, Christensen PM, Krstrup P, Bangsbo J, Poole DC. Slow component of VO₂ kinetics: mechanistic bases and practical applications. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 43 (11), 2046-2062, 2011.
- 25) 右田孝志, 平木場浩二. 一定負荷運動時の酸素摂取動態の生理学的意義. *日本運動生理学雑誌*. 11 (2), 39-60, 2004.
- 26) Krstrup P, Secher NH, Relu MU, Hellsten Y, Soderlund K, Bangsbo J. Neuromuscular blockade of slow twitch muscle fibres elevates muscle oxygen uptake and energy turnover during submaximal exercise in humans. *The Journal of Physiology*. 586 (24), 6037-6048, 2008.
- 27) Bishop D. Warm up II. *Sports medicine*, 33 (7): 483-498, 2003.
- 28) 勝田茂, 伊藤一生, 的場秀樹, 北浦孝, 春日規克, 石原昭彦. 骨格筋線維タイプの特性とそれに影響を及ぼす因子. *体力科学*, 37 (5), 345-357, 1988.
- 29) Gomez MA, Silva R, Lorenzo A, Kreivyte R, Sampaio J. Exploring the effects of substituting basketball players in high-level teams. *Journal of Sports Sciences*. 35 (3), 247-254, 2016.
- 30) Tsurubami R, Oba K, Samukawa M, Takizawa K, Chiba I, Yamanaka M, Tohyama H. Warm-Up Intensity and Time Course Effects on Jump Performance. *Journal of sports science & medicine*, 19 (4): 714-720, 2020.