

---

## 足関節底屈運動における Active recovery 部位の相違が 筋酸素動態に与える影響

小泉佳右<sup>1</sup> 都地大基<sup>2</sup> 藤田幸雄<sup>3</sup> 森本耕次<sup>4</sup> 村松成司<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科 <sup>2</sup> 株式会社ゴールドウイン

<sup>3</sup> 千葉大学教育学部 <sup>4</sup> 千葉大学大学院教育学研究科

### The Effect of Active Recovery Region for Plantar Flexion Exercise on Muscle Oxygenation Level.

Keisuke KOIZUMI<sup>1</sup> Daiki TOJI<sup>2</sup> Yukio FUJITA<sup>3</sup> Koji MORIMOTO<sup>4</sup> and  
Shigeji MURAMATSU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> The United Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University

<sup>2</sup> Goldwin Inc. <sup>3</sup> Faculty of Education, Chiba University

<sup>4</sup> Graduate School of Education, Chiba University

---

#### Abstract

This study examined the effects of regional specificity of active recovery on muscle oxygenation characteristics. Ten healthy male subjects performed 3 trials of intensive plantar flexion exercises under different interval (Int) conditions. The subjects carried out two bouts of plantar flexion exercise (1st exercise: 1st Ex, 2nd exercise: 2nd Ex) against 50% torque loads of maximal voluntary contraction. These Ex were separated by an internal period (Int) for 20 min. During Int, the subjects underwent either resting in Passive position (Passive) or performing a recovery plantar flexion exercise (Active). The Active consisted of using either identical leg (Idt-Active) or opposite leg (Opp-Active) light exercise. Local blood flow (IBF) of crus, tissue blood flow (tBF) and tissue oxygen consumption ( $\dot{V}tO_2$ ) of lateral head of gastrocnemius muscle were higher in Idt-Active compared with Opp-Active and Passive during Int ( $p < 0.01$ ). It was also observed that tBF and  $\dot{V}tO_2$  after 2nd Ex were higher in Idt-Active than Passive (tBF:  $15.2 \pm 3.03$  vs  $9.83 \pm 3.70$  ml · 100 g<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>;  $p < 0.01$ ,  $\dot{V}tO_2$ :  $5.55 \pm 1.24$  vs  $3.70 \pm 1.30$  ml · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup>;  $p < 0.01$ ). Under Idt-Active condition, Muscle oxygenation level was higher in 2nd Ex than 1st Ex ( $63.9 \pm 13.3$  vs  $83.0 \pm 20.7\%$ ;  $p < 0.05$ ). tBF was also higher immediately after 2nd Ex compared with 1st Ex ( $14.0 \pm 4.13$  vs  $18.9 \pm 5.31$  ml · 100 g<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>;  $p < 0.05$ ). These findings indicate that a rise in muscle oxygenation levels during highly intensive exercise after active recovery was attributed to the increase of muscle blood flow.

#### I. 緒言

短時間の高強度運動によって生じる乳酸が、運動に使用した筋での代謝性アシドーシスを誘引し、その結果としてエネルギー代謝能を低下させること

は広く知られている<sup>1)</sup>。一方で、その運動に使用した筋群を用いて比較的低い強度の運動を行うことにより、回復が促進され、その後の高強度運動のパフォーマンスの改善がみられる (Active recover

y) 2) 3) 4)。さらにActive recoveryによって、高強度運動により筋で産生された乳酸を代謝させることが多数報告されている<sup>3) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11)</sup>。

これまでの報告から、乳酸の主要な代謝過程は有酸素性エネルギー代謝の基質として利用されることである、と考えられている<sup>12) 13)</sup>。従って、Active recoveryの効果を分析する上で、活動筋の有酸素性代謝動態を観察することは非常に有意義である。しかしこれまでのところ、全身性の指標として呼気ガス分析や血液分析、また局所についても筋内における乳酸やpHの検討はなされているが、筋組織の呼吸循環動態を調査した例はみられない。

これまで、下腿などの局所血流量 (Local blood flow: lBF) を測定する方法として、水銀ラバーストレインゲージ・プレチスモグラフ法(プレチスモグラフ法) が広く用いられてきた。しかし、プレチスモグラフ法は体節全体の血流量を調査する方法であり、筋組織のみの血流動態の観察は不可能であった。

近年、近赤外線分光法 (Near-infrared spectroscopy: NIRS) による非侵襲的測定法によって、筋組織レベルにおける酸素動態を連続的に観察することが可能になった<sup>14) 15)</sup>。また、3波長方式のNIRSと静脈閉塞 (Venous occlusion: VO) 法を併用することにより、筋組織の血流量 (Tissue blood flow: tBF) 並びに筋組織の酸素消費量 ( $\dot{V}tO_2$ ) を測定することが可能である<sup>16) 17)</sup>。従って、これまで観察できなかった活動筋の酸素動態を明らかにし、筋組織レベルでのActive recovery効果を評価することが可能である。さらに、NIRSによるtBF測定とプレチスモグラフ法によるlBF測定を併用することにより、局所におけるActive recoveryの循環調節機構を精査できる。

そこで本研究では、乳酸が蓄積する強度での運動の後に行うActive recoveryが与える影響を、筋での血流量及び酸素動態の指標を用いて調査し、その効果を局所的観点から検討することを目的とした。

## II. 方法

### 1. 被験者

19～22歳の健康な男子大学生10名を被験者とした。被験者の年齢は $20.6 \pm 1.17$ 歳、身長は $172 \pm 4.58$  cm、体重は $65.3 \pm 4.42$  kg (平均  $\pm$  標準偏差) であった。全ての被験者は、右脚が巧緻脚であった。実験開始に当たり、各被験者に主旨、実験手順及び予想される危険性を説明し、参加の同意を得た。

### 2. 実験プロトコール

本実験を開始する前に、被験者には十分なウォーム・アップを行わせた。その後、仰臥位にて股関節及び膝関節をそれぞれ $90^\circ$  屈曲した姿勢をとらせ、両下腿遠位部を30 cmの間隔を空け固定した。この姿勢を、実験を通して維持した。その後、足関節 $0^\circ$  における底屈方向への最大随意収縮 (Maximal voluntary contraction: MVC) 時発揮トルクを計測した。

本実験は、5分間の安静期、1分間の第1主運動期 (1st exercise: 1st Ex)、26分間の中間回復期、1分間の第2主運動期 (2nd exercise: 2nd Ex)、10分間の終了後安静期 (Post) の順で構成された。実験プロトコールはFig. 1に示した。

1st及び2nd Exでは、右足関節底屈運動を行った。運動強度として、MVC時トルクの50% (50%MVC) を負荷した。運動範囲は足関節背屈 $15^\circ$  から底屈 $15^\circ$  までとし、反復パターンは短縮性収縮による底屈運動と脱力による背屈を交互に0.5秒ずつ、すなわち1秒につき1往復の頻度で行った。

中間回復期は、20分間の回復運動期間 (Interval rest: Int) と、その前後及びInt 10分終了後に設けた各2分間の測定のための期間によって構成された。Intでは、主運動と同側の脚を用いた回復運動 (Active recovery using identical leg条件: Idt-Active条件)、逆側の脚を用いた回復運動 (Active recovery using opposite leg条件: Opp-Active条件)、ないし運動時姿勢のまま安静 (Passive条件) のいずれかの条件を用いた。回復運動には、25%MVCの負荷を用い、短縮性収縮による底屈運

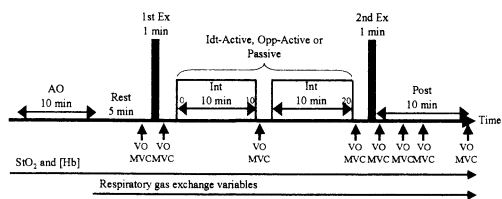


Fig. 1. Experimental protocol and measurement of main testing. The subjects performed a 60 s high intensity dynamic plantar flexion exercise (1st Ex). The subjects then recovered (Interval recovery; Int) in a Idt-Active, Opp-Active or Passive condition for 20 min. The subject exercised at low intensity using an identical leg in Idt-Active condition or using the opposite leg in Opp-Active, or to rest on supine position (Passive). After the Int, the subjects again underwent a 60 s bout (2nd Ex) under the same procedure of 1st Ex. Maximal voluntary contraction (MVC) was measured at rest, immediately after 1st and 2nd Ex, and Int 10 and 20 min, and finally 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Changes in tissue O<sub>2</sub> saturation (StO<sub>2</sub>) and total hemoglobin concentration ([Hb]) of lateral head of gastrocnemius muscle were obtained continuously by near-infrared spectroscopy (NIRS). An arterial occlusion test (AO) was carried out by inflating the cuff to 250 mmHg for 10 min, prior to the resting period. A venous occlusion test (VO) was performed at rest, immediately after 1st and 2nd Ex, and Int 10 and 20 min, and Post 5 and 10 min. Respiratory gas exchange variables were measured throughout the testing period.

動を0.5秒、脱力による背屈を0.5秒、さらに休息3秒を順に行う計4秒の反復パターンをくり返し行った。

### 3. 測定項目とその手順

足関節0°における底屈方向へのMVC時発揮トルクを、1st Ex直後、Int 10及び20分、2nd Ex直後、2nd Ex後(Post) 3、5及び10分に計測した。

換気パラメーターは、AE-280 (ミナト医科学、大阪) を用い、実験期間を通して呼吸ごとに測定した。換気量( $\dot{V}E$ )は熱線流量計により、酸素濃度はジルコニア式酸素計、二酸化炭素濃度は赤外線ガス分析計により測定し、 $\dot{V}E$ との積から酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )及び二酸化炭素排出量( $\dot{V}CO_2$ )を呼吸ごとに算出した。

腓腹筋外側頭の組織酸素飽和度(StO<sub>2</sub>)及び組織ヘモグロビン及びミオグロビン(Hb/Mb)濃度は、NIRS (PSA-IIIN、バイオメディカルサイエンス、金沢)を用いた。腓腹筋外側頭の筋腹にPSA-IIIN専用プローブを貼付した。プローブは、波長の異なる(700、750及び830 nm)3種類の発光ダイオードによる発光部と、同一直線上に11及び26 mm離れた場所にある受光部の2箇所によって構成されている。この受発光部が並ぶ線分と筋の走行方向とが平行になるようにプローブを貼付した。近赤外光が組織内を通過する距離を補正するため、平均光路長係数として4.3を用いた<sup>18)</sup>。また、動脈ないし静脈閉塞のために、カフを大腿遠位部に装着した。

tBFは、筋内のHbの流量を測定することにより換算できる。Hbの流量測定のために、50 mmHgの加圧による静脈閉塞を用いた。静脈閉塞は1秒以内に50 mmHgの圧を急速に加圧し、約10秒後に脱圧した。静脈閉塞法は、1st Ex直後、Int 10及び20分、2nd Ex直後、Post 3、5及び10分に行った。閉塞直後に上昇する[Hb]を単位時間あたりに換算する( $d[Hb] / dt$ )ことにより、tBFを算出した。その際、式(1)を用いた。

$$tBF \text{ (ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 100 \text{ g}^{-1}\text{)} = (d[Hb] / dt) / \rho_{Hb} \quad (1)$$

$\rho_{Hb}$ はヒト血液中に含有するHb量である(0.15 g · ml<sup>-1</sup>)。また、NIRSによるtBF測定に平行して、プレチスモグラフ(EC5R、Hokanson、Bellevue、WA)による1BF測定を行った。水銀ラバーストレインゲージを下腿最大周囲長部に装着し、静脈閉塞直後の下腿周囲長変化を計測することにより算出した。

$\dot{V}tO_2$ は、Fickの法則より、tBFと動静脈酸素較差との積により算出することができる。 $\dot{V}tO_2$ は、式(2)を用いて算出した。

$$\dot{V}tO_2 \text{ (ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} = (d[Hb] / dt) \times a \times (SaO_2 - StO_2) / 100 \quad (2)$$

ここでaはヒトHbが結合できるO<sub>2</sub>量(1.39 mlO<sub>2</sub> · g<sup>-1</sup>)である。SaO<sub>2</sub>は動脈血酸素飽和度であり、本研

究では各被験者に 98%を適応した。

またカフを 250 mmHgに加圧することにより動脈閉塞を実験開始前に 10 分間行った。閉塞時に低下するStO<sub>2</sub>の最低値を 0%及び安静時の値を 100%として、その後の測定中のStO<sub>2</sub>を相対値化して示した (Muscle oxygenation level)。

#### 4. 統計処理

すべての結果は、平均 ± 標準偏差で示した。条件間及び計時的比較には二元配置の分散分析を用い、有意差が認められた場合はTukeyの多重比較を用いた。いずれも有意水準は5%未満とした。

### III. 結果

MVCの時間推移をFig. 2 に示した。各測定期において、条件間の差は認められなかった。またIdt-Active条件では、1st Ex直後よりも2nd Ex直後の方が高い平均値を示し、Opp-Active及びPassive条件では低い平均値を示したが、有意な差はみられなかった。

$\dot{V}O_2$ の時間推移をFig. 3 に示した。Int 10 及び 20 分において、Idt-Active及びOpp-Active条件はPassive条件よりも高い平均値を示したが、統計的には有意ではなかった。その他の測定期においては、

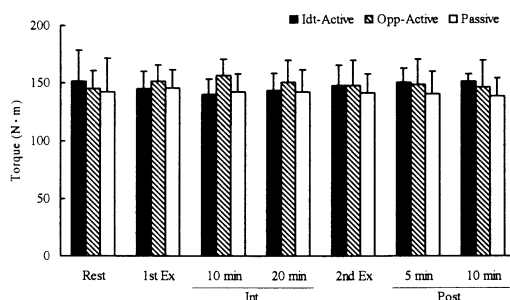


Fig. 2. Comparisons of torque during maximal voluntary contraction in a direction of plantar flexion among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD).

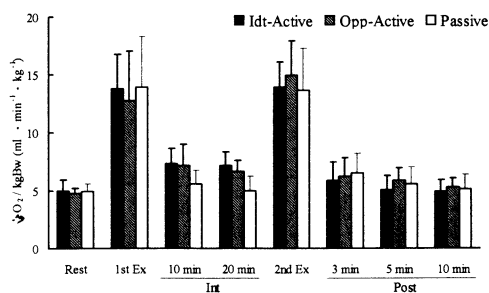


Fig. 3. Comparisons of  $\dot{V}O_2 / \text{kgBw}$  among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD).

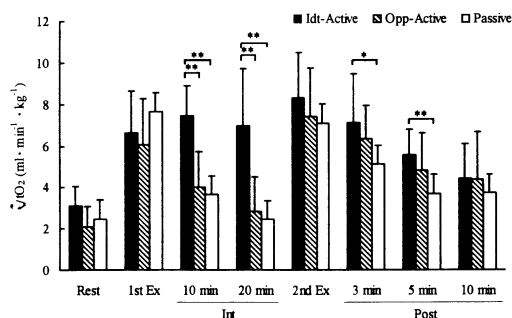


Fig. 4. Comparisons of tissue  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}tO_2$ ) among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD).  $\cdot$  tO<sub>2</sub> at Int 10 and 20 s was significantly higher in Idt-Active than in Opp-Active and Passive.  $\cdot$  tO<sub>2</sub> was also higher than in Idt-Active than in Passive.  $\cdot$ ;  $p < 0.05$ .  $\cdot$ ;  $p < 0.01$  and  $\cdot$ ;  $p < 0.05$ .

一定の傾向が認められなかった。 $\dot{V}tO_2$ の時間推移をFig. 4 に示した。Int 10 及び 20 分において、Idt-Active条件がOpp-Active及びPassive条件よりも有意に高い値を示した (Int 10 分では  $7.44 \pm 1.46$ ,  $4.00 \pm 1.73$  及び  $3.64 \pm 1.20 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ , Int 20 分では  $6.97 \pm 2.73$ ,  $2.84 \pm 1.67$  及び  $2.44 \pm 1.09 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ )。Post 3 及び 5 分ではIdt-A

ctive条件がPassive条件よりも有意に高い値を示した (Post 3分では  $7.13 \pm 2.35$  及び  $5.12 \pm 1.52 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ , Post 5分では  $5.55 \pm 1.24$  及び  $3.70 \pm 1.30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $p < 0.01$ )。  $\dot{V}O_2$  及び  $\dot{V}tO_2$  共に、1st Exと2nd Exとの間の変化は認められなかった。

1BFの時間推移をFig. 5に示した。Int 10及び20分において、Idt-Active条件がOpp-Active及びPassive条件よりも有意に高い値を示した (Int 10分では  $17.0 \pm 6.56$ ,  $8.07 \pm 5.36$  及び  $8.90 \pm 3.80 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ , Int 20分では  $14.1 \pm 4.54$ ,  $4.44 \pm 3.03$  及び  $5.81 \pm 3.66 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ )。2nd ExではIdt-Active条件がPassive条件よりも有意に高い値を示した ( $26.8 \pm 7.37$  及び  $20.8 \pm 9.01 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ )。一方、tBFの時間推移をFig. 6に示した。Int 10及び20分において、Idt-Active条件がOpp-Active及びPassive条件よりも有意に高い値を示した (Int 10分では  $18.4 \pm 3.20$ ,  $10.3 \pm 4.97$  及び  $9.34 \pm 3.46 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ , Int 20分では  $17.72 \pm$

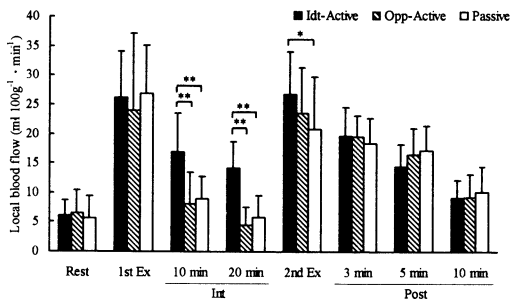


Fig. 5. Comparisons of local blood flow in cruris (lBF) among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD). lBF at Int 10 and 20 s was significantly higher in Idt-Active than in Opp-Active and Passive. At 2nd Ex, lBF was also higher than in Idt-Active than in Passive. \*\*,  $p < 0.01$  and \*,  $p < 0.05$ .

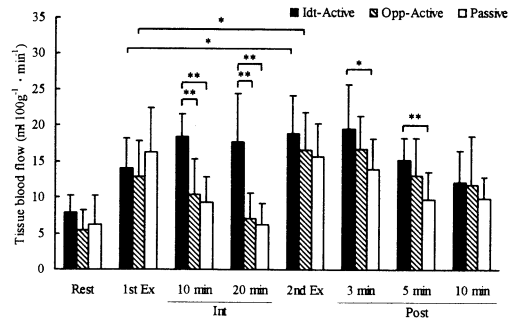


Fig. 6. Comparisons of tissue blood flow in the lateral head of gastrocnemius muscle (tBF) among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD). tBF at Int 10 and 20 s was significantly higher in Idt-Active than in Opp-Active and Passive. At Post 3 and 5 min, tBF was also higher than in Idt-Active than in Passive. In Idt- and Opp-Active, tBF in 2nd Ex was significantly higher than that in 1st Ex. \*\*,  $p < 0.01$  and \*,  $p < 0.05$ .

6.63,  $7.04 \pm 3.60$  及び  $6.28 \pm 2.93 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 共に  $p < 0.01$ )。Post 3及び5分ではIdt-Active条件がPassive条件よりも有意に高い値を示した (Post 3分では  $19.6 \pm 6.12$  及び  $13.9 \pm 4.32 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ , Post 5分では  $15.2 \pm 3.03$  及び  $9.83 \pm 3.70 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $p < 0.01$ )。またIdt-Active及びOpp-Active条件においては、1st Exよりも2nd Exで有意に増加した (Idt-Active条件では  $14.0 \pm 4.13$  及び  $18.9 \pm 5.31 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ , Opp-Active条件では  $12.9 \pm 4.93$  及び  $16.7 \pm 5.14 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ )。Muscle oxygenation levelの時間推移をFig. 7に示した。各測定期において、条件間の差は認められなかった。しかしIdt-Active条件においては、1st Exよりも2nd Exで有意に上昇した ( $63.9 \pm 13.3$  及び  $83.0 \pm 20.7\%$ ;  $p < 0.05$ )。運動中のMuscle oxygenation levelの変動をFig. 8に示した。Idt-Active条件では、運動開始後50秒において、1st Exよりも2nd

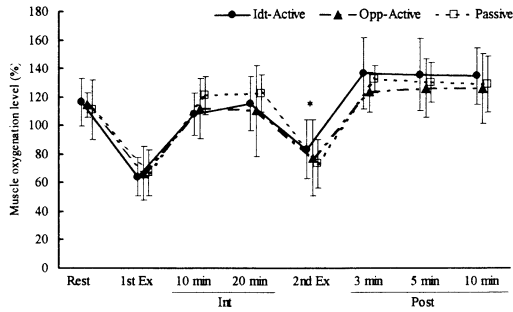


Fig. 7. Comparisons of Muscle oxygenation level in the lateral head of gastrocnemius muscle among different interval conditions (Idt-Active, Opp-Active or Passive) at rest, during 1st and 2nd Ex, at 10 and 20 min after a beginning point of the interval period (Int 10 and 20 min), and 5 and 10 min after 2nd Ex (Post 5 and 10 min). Data are means ( $\pm$  SD). In Idt-Active, Muscle oxygenation level in 2nd Ex was significantly higher than that in 1st Ex. \*,  $p < 0.05$  vs 1st Ex in Act leg.

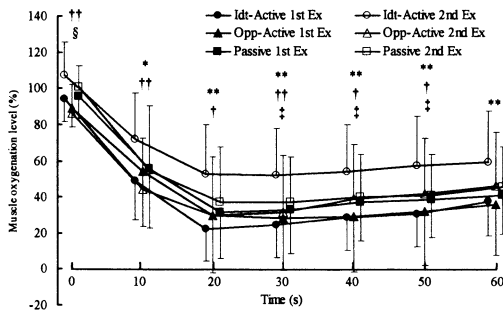


Fig. 8. Change of Muscle oxygenation level in the lateral head of gastrocnemius muscle during 60 s high-intense exercise. Circle, triangle and square symbols represents data in Idt-Active, Opp-Active or Passive, respectively. And, Filled and opened symbols represents data for 1st and 2nd Ex, respectively. \* shows significant difference between 1st and 2nd Ex in Idt-Active. †, ‡ and § show significant difference in 2nd Ex among conditions of interval rest († is Idt-Active vs Opp-Active, ‡: is Idt-Active vs Passive and § is Opp-Active vs Passive). Two symbols show  $p < 0.01$ , and a symbol shows  $p < 0.05$ .

Exで有意に高い値を示した ( $30.9 \pm 18.3$  及び  $57.3 \pm 27.5\%$ ;  $p < 0.05$ )。

#### IV. 考察

本研究は、60秒間足関節底屈運動を50%MVC時トルクを負荷して行い、その後のActive recoveryの有無が与える影響について、運動に用いた下腿局所の血流量及び酸素動態に着目して調査した。その結果、Idt-Active条件では回復運動中のtBF及び $\dot{V}tO_2$ が高く、2nd Ex後もPassive条件より高値を維持した。またIdt-Active条件では、2nd Ex中のMuscle oxygenation levelが1st Exよりも高値であった。

Bogdanisら<sup>4)</sup>は、2回の30秒間全力自転車漕ぎ運動を課し、試技間に約40% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で3分間のActive recoveryを行わせた。その結果、2回目の自転車漕ぎ運動の仕事は、試技間に安静を維持した条件時よりも有意に高値であったことを報告した。またMcEneryら<sup>2)</sup>は、30秒間全力自転車漕ぎ運動後に30% $\dot{V}O_{peak}$ 強度で15分間のActive recoveryをさせた。その結果、Active recovery施行時の方がその前後に行った膝関節静的伸展トルクの回復を亢進させることを報告した。このように、高強度運動遂行に伴う発揮出力の低下からの回復にActive recoveryが有効であることが、これまでに示されている。しかし本研究では、MVC発揮時の足関節トルクに、Idt-Active条件で他条件と比較して回復の傾向がみられたものの、統計的には有意ではなかった。

一般に、筋血流量は低強度運動では安静時よりも増加するものの、強度が高くなっても頭打ちするかむしろ低下することが報告されている<sup>19)</sup>。また先行研究によって、Muscle oxygenation levelと同等の指標であるStO<sub>2</sub>は、低強度では上昇ないし一定を示し、強度を増加させることにより低下することが知られている<sup>20) 21)</sup>。本研究の1st ExのtBFは、Active recovery直後であるInt 10及び20分と同等レベルないしそれ以下の増加にとどまり、活動筋である腓腹筋のMuscle oxygenation levelは低下したことが確認された。

Systromら<sup>22)</sup>は、両脚の足関節動的底屈運動

を、漸増負荷にて疲労困憊に至るまで継続させた。その結果、最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) は、 $1.1 \pm 0.10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  (平均  $\pm$  標準誤差) であったことを報告している。さらに、運動中の乳酸蓄積に起因すると考えられる筋内pH低下が、 $66.4 \pm 3.4\% \dot{V}O_{2max}$  の強度から開始したことを確認しており、この時の  $\dot{V}O_2$  は約  $840 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$  と概算される。一方で、本研究の 1st Exにおける  $\dot{V}O_2$  は、 $879 \pm 15.7 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$  であり、Systromらの筋内pH低下ポイント時よりも若干高い平均値であった。しかし、彼らの検討は両脚運動であったのに対し、本研究は片脚で行われているため、片脚あたりで摂取される  $\dot{V}O_2$  を推測すると、平均値でみられた差はさらに広がるものと考えられる。本研究では筋内乳酸を調査していないが、以上のことを考慮すると、1st Exは筋内で乳酸を蓄積するような強度で行われたと言えよう。

本研究では、活動に用いた筋組織における酸素消費及び血流量を評価するため、 $\dot{V}tO_2$  と tBF を測定した。Bangsboら<sup>9)</sup> は、約 3.5 分で疲労困憊に至る強度 (約 60 W) の膝関節片脚伸展運動後、回復運動として同じ様式の運動を 10 W 強度で 10 分間継続させた。その結果、回復運動開始後 1 ~ 10 分において大腿部酸素消費量が増加し、筋内の乳酸濃度が低下していることを示した。その他、活動筋レベルで観察した調査において、Active recoveryの効果を乳酸濃度及びpHなどの観点からみられているが、いずれの指標もActive recovery施行時の方が改善することが示されている<sup>4) 23) 24)</sup>。この機序としては、低強度運動に利用されるエネルギーを供給するための有酸素性代謝のエネルギー基質として、乳酸が酸化的に消費されたことが考えられる。Brooks<sup>25)</sup> は、Active recoveryによる乳酸消失と運動使用筋の遅筋線維比との相関を示し、Type IIb線維で産生された乳酸はType IあるいはIIa線維に移動し酸化されるというメカニズムを論じている。その結果として、代謝性アシドーシスを抑制しさらに解糖系酵素活性の障害を軽減し、その後の運動中の解糖-乳酸系代謝により適した状況になる<sup>26)</sup> ことが考えられる。従ってこれまでの報告から、Active recoveryによる筋への酸素供給及び消費の増加と乳酸代

謝の亢進は密接に関連することが、定説となりつつある。

Muscle oxygenation levelは、組織の酸素飽和度を相対的に示す指標であり、酸素供給及び消費のバランスを示している。この値が大きい場合は、供給量の増大あるいは消費量の減少が考えられる。2nd Ex中において、Idt-Active条件は、Opp-Active条件との間に開始後 0 ~ 50 秒で、Passive条件との間で開始後 30 ~ 50 秒で有意な高値を示した。一方、筋での消費量を示す  $\dot{V}tO_2$  には、2nd Ex終了後で有意差が認められなかった。これらの結果から、Active recoveryに起因する酸素供給量の増加が示唆される。しかし、 $\dot{V}tO_2$  は有意ではないもののIdt-Active条件、Opp-Active条件、Passive条件の順で平均値が高かったことや、運動中は検討していないことから、運動中の消費量もActive recoveryの影響で増加していた可能性も考えられ、異なる測定手法を用いるなどして観察する必要がある。

一方で、Active recoveryによる血流量の増加により、筋外への乳酸流出を促進させることが、乳酸消失の理由の一つとして報告されている<sup>9) 10)</sup>。局所血流量を検討した例として、Bangsboら<sup>29)</sup> による、膝関節片脚伸展運動後に同様式の回復運動施行の効果の調査がある。その結果、大腿静脈血流量が回復運動により高値を示したものの、筋からの乳酸流出には回復運動の有無による有意な差はないことも示し、血中乳酸濃度低下が産生した筋内での高い乳酸代謝に起因することを指摘した。またGuptaら<sup>11)</sup> は、間欠的高強度運動からの回復条件としてマッサージを用い、血流量のみの効果を調査した。しかし、間欠的運動後の血中乳酸濃度半減期にPassive条件との差が認められなかったことを報告している。

2nd Ex直後のtBFは、Idt-Active条件でPassive条件よりも高値を示した。しかし、tBFには有意な差は認められなかった。この結果は、下腿局所レベルではActive recoveryに起因する血流増加があったが、筋レベルではみられなかったことを意味すると捉えることができる。この理由として2つの要因が考えられる。1つは、筋内の血液が、運動中に筋の機械的圧迫により外部に圧出されることによって、

Active recoveryの有無による局所循環応答の差異を打ち消すほどの影響を及ぼしたということが考えられる。またもう1つの理由として、2nd Exにより産生された代謝産物による血管拡張作用が優位に作用し<sup>27)</sup>、Active recoveryによる効果よりも大きく反映したと考えられる。

一方で、tBFはPost 3及び5分においてIdt-Active条件でPassive条件よりも有意に高値を示した。しかし、心臓を中心とした全身性の循環調節に同等の影響をもたらすと考えられるIdt-Active条件とOpp-Active条件間、またInt期に測定脚を安静にしておき局所性の循環調節に同等の影響を与えると考えられるOpp-Active条件とPassive条件との間には、どちらも差は認められなかった。従って、運動終了後の筋血流量亢進は、全身性及び局所性血流調節の相乗効果によるものと考えられる。その結果、筋への酸素供給及び有酸素性代謝が亢進し、乳酸の代謝性消失の促進に貢献することが推察される。

1st Exと2nd Exは同様式の運動であるが、Idt-Active条件においては、安静期間後に開始する1st Exに対して、2nd Exは1st ExとActive recoveryを経た後の試行であることから、これらの2本の運動の比較が主運動に先行する運動条件の有無の効果についての調査であるとみなすことができる。この種の比較は、一般的にWarm-upの効果の検討として行われてきた。Gutinら<sup>28)</sup>は、高強度運動前に低強度のWarm-upを行うことにより酸素脈が改善することを示し、その理由として動静脈酸素較差増大の可能性を指摘している。またFukubaら<sup>29)</sup>は、Warm-up後の高強度運動開始直後の $\dot{V}O_2$ 増加の応答が早まることを示し、活動筋での酸素供給改善の可能性を述べている。このように、Warm-upによる局所的な循環系の変化がこれまでに推測されていた。

そこで本研究は、Muscle oxygenation levelの運動中の変化に着眼した。その結果、2nd Exが1st Exよりも高い値を示した。前述したが、Muscle oxygenation levelは、酸素供給及び消費のバランスを示す指標である。一方で、消費量を表す $\dot{V}tO_2$ には1st Exと2nd Exで統計的に差がみられなかった。従って、運動中の筋組織レベルでの供給量の増加、

言い換えればHb絶対量の増加が示唆される。

運動を開始すると、活動に用いる筋の血管では、前述した代謝性要因や、血管内皮細胞への「ずり応力」増大に伴う一酸化窒素 (Nitric oxide: NO) 分泌による流量依存性要因などが作用し合い、血管を局所的に拡張する。本研究での代謝物質やNO分泌の変化は明らかではないが、Idt-Active条件の2nd Exでは、tBFが1st Exよりも増加していたこと、さらにはActive recovery運動実施直後であることから、血管に作用する「ずり応力」が増大し、NO分泌が亢進していたことを推察することができる。また、NO分泌を引き起こす「ずり応力」は上位と下位の細動脈の血圧差が大きいほど増大することや下位血管の血圧低下が代謝性血管拡張に起因する<sup>30)</sup>ことから、本研究の現象に両要因が関与した可能性が考えられる。以上のような影響を受け、微小血管床が拡張し、毛細血管内Hb量の増加を惹起した可能性が考えられる。

## V. 結論

Active recovery効果を活動に用いる筋レベルで調査するため、最大随意収縮時の発揮トルクの50%の負荷にて60秒間(1st Ex)の足関節底屈運動、20分間の回復期間(Int)1st Exと同様式の運動(2nd Ex)を順に課し、2nd Ex後(Post)10分までの変化を観察した。Intでは、同脚ないし逆脚での足関節回復運動(それぞれIdt-Active及びOpp-Active条件)あるいは仰臥位安静(Passive条件)のいずれかを行った。

その結果、下腿血流量(1BF)、腓腹筋血流量(tBF)及び腓腹筋酸素消費量( $\dot{V}tO_2$ )は共に、Int 10及び20分において、Idt-Active条件がOpp-Active及びPassive条件よりも有意に高い値を示した。2nd Ex中のMuscle oxygenation levelは、Idt-Active条件がOpp-Active及びPassive条件で有意に高かった。さらに、tBF及び $\dot{V}tO_2$ では、Post 3及び5分においてIdt-Active条件がPassive条件よりも有意に高い値を示した。またIdt-Active条件においては、tBFは1st Exよりも2nd Exで有意に増加し、Muscle oxygenation levelは1st Exよりも2nd Exで



有意に上昇した。

従って、Active recovery後の2nd Exでは筋酸素化レベルが高まり、酸素供給の向上が示唆された。また2nd Ex後の筋酸素消費量が高まり、乳酸の代謝性消失が促進に寄与する可能性が考えられた。

#### VI. 参考文献

- 1) 和田正信, 稲嶋修一郎, 安田俊広, 松永智.:筋小胞体の構造および筋活動に伴うその機能の変化, 体育学研究, 46, 443-459, 2001.
- 2) McEnery, C. M., Jenkins, D. G. and Barnett, C.: The relationship between plasma potassium concentration and muscle torque during recovery following intense exercise, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 75, 462-466, 1997.
- 3) Ahmaidi, S., Granier, P., Taoutaou, Z., Mercier, J., Dubouchaud, H. and Prefaut, C.: Effects of active recovery on plasma lactate and anaerobic power following repeated intensive exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28, 450-456, 1996.
- 4) Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Lakomy, H. K. A., Graham, C. M. and Louis, G.: Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 74, 461-469, 1996.
- 5) Reaburn, P. R. and Mackinnon, L. T.: Blood lactate responses in older swimmers during active and passive recovery following maximal sprint swimming, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 61, 246-250, 1990.
- 6) McLoughlin, P., McCaffrey, N. and Moynihan, J. B.: Gentle exercise with a previously inactive muscle group hastens the decline of blood lactate concentration after strenuous exercise, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 62, 274-278, 1991.
- 7) Thiriet, P., Gozal, D., Wouassi, D., Oumarou, T., Gelas, H. and Lacour, J. R.: The effect of various recovery modalities on subsequent performance, in consecutive supramaximal exercise, *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 33, 118-129, 1993.
- 8) Falk, B., Einbinder, M., Weinstein, Y., Epstein, S., Karni, Y., Yarom, Y. and Rotstein, A.: Blood lactate concentration following exercise: effects of heat exposure and of active recovery in heat-acclimatized subjects, *Int. J. Sports. Med.*, 16, 7-12, 1995.
- 9) Bangsbo, J., Graham, T., Johansen, L. and Saltin, B.: Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: impact of light exercise, *J. Appl. Physiol.*, 77, 1890-1895, 1994.
- 10) Taoutaou, Z., Granier, P., Mercier, B., Mercier, J., Ahmaidi, S. and Prefaut, C.: Lactate kinetics during passive and partially active recovery in endurance and sprint athletes, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 73, 465-470, 1996.
- 11) Gupta, S., Goswami, A., Sadhukhan, A. K. and Mathur, D. N.: Comparative study of lactate removal in short term massage of extremities, active recovery and a passive recovery period after supramaximal exercise sessions, *Int. J. Sports. Med.*, 17, 106-110, 1996.
- 12) Modedero, J. and Donne, B.: Effect of recovery interventions on lactate removal and subsequent performance, *Int. J. Sports. Med.*, 21, 593-597, 2000.
- 13) Hatta, H., Atomi, Y., Yamamoto, Y., Shinohara, S. and Yamada, S.: Oxidation of lactate in rats after short-term strenuous exercise, *Int. J. Sports. Med.*, 9, 429-432, 1988.
- 14) Kawaguchi, K., Tabusadani, M., Sekikawa, K., Hayashi, Y. and Onari, K.: Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake?, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 84, 158-161, 2001.
- 15) Boushel, R., Langberg, H., Olesen, J., Gonzales-Alonzo, J., Bulow, J. and Kjaer, M.: Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 11, 213-222, 2001.
- 16) Van Beekvelt, M. C., Colier, W., Wevers, R. A. and Van Engelen, B. G.: Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local O<sub>2</sub> consumption and blood flow in skeletal muscle, *J. Appl. Physiol.*, 90, 511-519, 2001.
- 17) De Blasi, R. A., Ferrari, M., Natali, A., Conti, G., Mega, A. and Gasparetto, A.: Noninvasive

measurement of forearm blood flow and oxygen consumption by near-infrared spectroscopy, *J. Appl. Physiol.*, 76, 1388-1393, 1994.

18) Wray, S., Cope, M., Delpy, D. T., Wyatt, J. S. and Reynolds, E. O. R.: Characterization of near infrared absorption spectra of cytochrome aa<sub>3</sub> and haemoglobin for the non-invasive monitoring of cerebral oxygenation, *Biochim. Biophys. Acta*, 933, 184-192, 1988.

19) Kagaya, A. and Ogita, F.: Blood flow during muscle contraction and relaxation in rhythmic exercise at different intensities, *Ann. Physiol. Anthropol.*, 11, 251-256, 1992.

20) 塩崎知美, 狩野豊, 渡辺重行, 鱒坂隆一, 石津政雄, 勝田茂, 岡田守彦, 久野譜也.: 近赤外分光法による高齢者の筋酸素動態の検討, *体力科学*, 47, 393-400, 1998.

21) 本間幸子, 福岡義之, 藤井宣晴, 江田英雄, 池上晴夫.: 近赤外分光法を用いた活動筋の循環動態の評価-自転車運動時の大腿活動筋について-, *体力科学*, 41, 586-594, 1992.

22) Systrom, D. M., Kanarek, D. J., Kohler, S. J., and Kazemi, H.: <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance spectroscopy study of the anaerobic threshold in humans, *J. Appl. Physiol.*, 68, 2060-2066, 1990.

23) Bangsbo, J., Johansen, L., Graham, T. and Saltin, B.: Lactate and H<sup>+</sup> effluxes from human skeletal muscles during intense, dynamic exercise, *J. Physiol.*,

462, 115-133, 1993.

24) Sairyo, K., Ikata, T., Takai, H. and Iwanaga, K.: Effect of active recovery on intracellular pH following muscle contraction, a <sup>31</sup>P-MRS study, *Ann. Physiol. Anthropol.*, 12, 173-179, 1993.

25) Brooks, G. A.: The lactate shuttle during exercise and recovery, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 18, 360-368, 1986.

26) Karlsson, J., Hulten, B. and Sjodin, B.: Substrate activation and product inhibition of LDH activity in human skeletal muscle, *Acta. Physiol. Scand*, 92, 21-26, 1974.

27) Hansen, J., Sander, M. and Thomas, G. D.: Metabolic modulation of sympathetic vasoconstriction in exercising skeletal muscle, *Acta. Physiol. Scand.*, 168, 489-503, 2000.

28) Gutin, B., Stewart, K., Lewis, S. and Kruper, J.: Oxygen consumption in the first stages of strenuous work as a function of prior exercise, *J. Sports. Med.*, 16, 60-65, 1976.

29) Fukuba, Y., Hayashi, N., Koga, S. and Yoshida, T.:  $\dot{V}tO_2$  kinetics in heavy exercise is not altered by prior exercise with a different muscle group, *J. Appl. Physiol.*, 92, 2467-2474, 2002.

30) Segal, S. S.: Integration of blood flow control to skeletal muscle: key role of feed arteries, *Acta. Physiol. Scand.*, 168, 511-518, 2000.