

## 最大酸素摂取量と無酸素パワーの同時改善法の開発に向けた研究

尾崎隼朗<sup>1,2</sup>, 加藤豪<sup>1</sup>, 中潟崇<sup>1</sup>, 形本静夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 順天堂大学, <sup>2</sup> 東海学園大学

### ABSTRACT

Purpose: Developing a training method for effectively improving maximal anaerobic power (MAnP), maximal accumulated oxygen deficit (MAOD), and maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ) is important to enhance sports performance, but no previous studies have demonstrated concurrent improvements in all three abilities by a training intervention with only a single exercise. This study aimed to investigate the effects of a gradually decreasing intensity training from that corresponding to MAnP to that of near  $\dot{V}O_{2max}$  (decreascent intensity training) on MAnP, MAOD, and  $\dot{V}O_{2max}$  in untrained young men. Methods: Seventeen untrained young men were randomly divided into either a training (TR, n=9) group or a control (CON, n=8) group. The TR group performed the decreascent intensity training, whereas the CON group did not perform any exercises. Results: The mean training time per session throughout the training period was  $275 \pm 135$  s. There was a group  $\times$  time interaction for both absolute and relative ( $p < 0.01$ ) values of  $\dot{V}O_{2max}$ , MAOD, and MAnP. The TR group had significantly increased values for all variables after the 8-week training program, and the relative values of all variables were significantly higher in the TR group than in the CON group. Muscle thicknesses in the anterior and posterior aspects of the thigh and maximal isokinetic knee extension and flexion strengths improved only in the TR group ( $p < 0.05$ ). Conclusion: A single-exercise training with gradually decreasing intensity from that corresponding to the MAnP to that of approximately 100%  $\dot{V}O_{2max}$  improves MAnP, MAOD, and  $\dot{V}O_{2max}$  concurrently, despite the short training time per session.

### 1. 緒言

短時間高強度運動において、ATP は有酸素性および無酸素性エネルギー供給系によって再合成される (Beneke and Boning 2008; McMahon and Jenkins 2002)。こうしたエネルギー供給系の供給量や速度の大きさは、多くのスポーツにおいてパフォーマンスの制限因子となり得る (Noordhof et al. 2013; Girard et al. 2011; McMahon and Jenkins 2002)。有酸素性エネルギー供給系の最大供給速度は一般に最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) によって評価される (Poole and Jones 2017)。一方で、多くの先行研究において、無酸素性エネルギー供給系を介した ATP の再合成量の最大値は、最大蓄積酸素借 (MAOD) によって評価されている (Noordhof et al. 2010)。例えばサッカーやハンドボールのような多くのスポーツにおいてみられる繰り返しのスプリント運動を継続するためには、有酸素性および無酸素性エネルギー供給系の両方からエネルギーが供給されており、高い  $\dot{V}O_{2max}$  や MAOD を有する者ではスプリントパフォーマンスの低下が少ない (Girard et al. 2011)。最大努力での短時間スプリント運動から評価される最大無酸素パワー (MAnP) は、無酸素性エネルギー供給系による ATP の産生速度の最大値を反映するものであると考えられている (Driss and Vandewalle 2013)。最大努力で実施する運動の初めの数秒間に必要とされるエネルギーの多くは無酸素性エネルギー供給系によって供給される。スプリントのような短時間で大きなパワーを発揮することを求められる動作においては、エネルギーの供給速度の大小がパーフォー

マンスに大きな影響を与える(Gastin 2001)。従って、これら全ての能力( $\dot{V}O_2\max$ 、MAOD、MAnP)を効果的に改善するトレーニング方法を開発することはスポーツパフォーマンスの向上のために非常に重要である。これまでも、有酸素性および無酸素性エネルギー供給系を刺激するために、持続的な運動や高強度インターバルトレーニングなどが広く実施されてきた(Gist et al. 2014; Milanovic et al. 2015; Tabata et al. 1996)が、1つの運動によってこれら全ての能力が向上した研究例はこれまでにない(Tabata et al. 1996)。

トレーニングにおける特異性を考慮すれば、1つの運動によって、有酸素性および無酸素エネルギー供給系の供給速度と容量を最大限に刺激するプロトコルを開発することができれば、これら3つの全ての能力を同時に向上させることが可能であると推測される。最近我々は、レジスタンストレーニングにおいて、80%1RMから30%1RMまで徐々に負荷を落とす、つまり高負荷から低負荷までの挙上を休むことなく続けるトレーニングが最大筋力と筋持久力を同時に向上させることを証明した(Ozaki et al. 2018)。つまり、高負荷でのトレーニングでは最大筋力が、低負荷での挙上では筋持久力が向上することが知られており(Schoenfeld et al. 2015)、我々の研究の結果は、まさにトレーニングの特異性を反映したものであると考えられる。運動中の代謝的な要求の観点から考えれば、MAnPを向上させるための運動中に必要とされるエネルギーは最も大きく、 $\dot{V}O_2\max$ の向上に必要な運動中の代謝要求は最も低いと考えられる。従って、我々は、MAnPに相当する強度から $\dot{V}O_2\max$ に相当する強度まで徐々に強度を落としながらトレーニングを実施すれば、有酸素性および無酸素性エネルギー供給系の容量と速度の全てを向上させることが出来ると仮説を立てた。

本研究の目的は、運動習慣のない若年男性を対象に、MAnPに相当する強度から $\dot{V}O_2\max$ に相当する強度まで徐々に強度を落としながら実施するトレーニング(漸減強度トレーニング)がMAnPとMAOD、 $\dot{V}O_2\max$ を同時に向上させるか否かを明らかにすることである。既に運動習慣のある者を被験者とした場合、本研究で実施する運動と既に実施している運動の効果を完全に区別することは困難であるために、本研究では運動習慣のない者を対象とした。

## 2. 研究方法

### 2.1 被験者

本研究は17名の若年男性を対象に実施した。被験者は過去1年間に持久性トレーニングやレジスタンストレーニングを実施していない者であった。喫煙者や医薬品やサプリメントを服用している者も被験者からは除外した。全ての被験者に対して、本研究の目的や方法、手順、リスク等に関して十分な説明を行い、口頭および書面にて、研究参加前に同意を得た。なお、本研究は順天堂大学スポーツ健康科学研究科研究等倫理委員会の承認を受け、ヘルシンキ宣言に則って実施された。

### 2.2 研究デザイン

トレーニング前の測定(PRE)は、連続しない5日間に渡って行われた。1日目は、まず初めに大腿部の筋厚の測定を行い、その後、 $\dot{V}O_2\max$ の評価のために電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ(Power Max VII; Kombi Wellness Corporation, Tokyo, Japan)を用いて、最大運動負荷テストを実施した。2日目と3日目には、自転車運動時の運動強度と酸素摂取量の直線関係を決定するために、最大下運動負荷テストを実施した。4日目は、BIODEX System 3(Biodex, Shirley, NY)を用いて、最大筋力の測定を行った後、MAODを算出するために、自転車エルゴメータを用いて、2-3分で疲労困憊に至る超最大強度での運動テストを実施した。1-3目のテストでは自動呼吸代謝測定装置(Aeromonitor AE-300S, Minato Medical Science, Tokyo, Japan)を用いて、4日目のテストではダグラスバッグ法を用いて、 $\dot{V}O_2$ を測定した。5日目は、最大筋力の測定を行った後、MAnPを決定するために3つの異なる負荷を用いた最大努力でのスプリント運動テストを実施した。

(Nakamura et al. 1985)。その後、TR 群では、トレーニング開始の 2-3 日前にトレーニングの練習を行った。トレーニング開始 4 週間後(MID)には、MAnP と  $\dot{V}O_{2max}$  のみを 1 日で測定した。 $\dot{V}O_{2max}$  を評価するための最大運動負荷テストは、MAnP を評価するためのスプリント運動テスト終了後、30 分以上の休憩をとった後に実施した。トレーニング終了後 12 日以内に、各被験者において、測定が連日に渡らないように注意しながら、PRE 測定と同じ全ての測定を再び実施した(POST)。

### 2.3 トレーニング

被験者はコントロール群(CON, n=8)とトレーニング群(TR, n=9)に無作為に分けられた。TR 群は自転車エルゴメータを用いて、漸減強度トレーニングを実施し、CON 群は特別な運動を実施しないように指示された。また、研究期間中、全ての被験者は他の身体活動や食事のパターンを変化させないように指示された。各々のトレーニングセッションの開始前に、ウォームアップとして、被験者は  $50\% \dot{V}O_{2max}$  の強度で 10 分間の自転車運動を実施し、運動開始から  $8 \cdot 9 \cdot 10$  分の 5 秒前から 5 秒間、各々最大努力でのペダリングを実施した。

漸減強度トレーニングは連続した 5 つのパートから成り立っており、各パート間に休息時間は設けなかった。ペダリングの回転数と負荷を調節することにより、運動強度を徐々に低下させていった(Figure 1)。初めに、被験者は MAnP に相当する強度で 5 秒間、最大努力でのペダリング運動を実施した(パート I)。その後、ペダリングの負荷は維持したまま、回転数を 85rpm まで素早く落とし、さらに 5 秒ごとに 5rpm ずつ回転数(85, 80, 75, 70, and 65 rpm)を落とし、25 秒間ペダリング運動を実施した(パート II)。運動開始から 30 秒後の時点で、回転数を 60rpm まで落とし、MAOD に相当する強度の負荷で 30-60 秒間のペダリング運動を実施(パート III)し、その後、回転数は 60rpm を維持したまま、 $105\% \dot{V}O_{2max}$  に相当する強度になるように負荷を落として、回転数が 57rpm を下回った状態が 3 秒以上続くまで運動を継続させた(パート IV)。最後に、被験者は回転数を 55rpm まで落として、 $90\% \dot{V}O_{2max}$  に相当する強度になるように負荷を落として、回転数が 52rpm を下回った状態が 3 秒以上続くまで運動を継続させた(パート V)。パート III の運動時間は初め 30 秒間に設定され、設定された時間、ペダリングの回転数を 60rpm のまま維持できた場合には、次のトレーニングセッションでは運動時間を 10 秒間延長した。さらに再び延長された時間内において回転数を維持できた場合には、運動時間をさらに 10 秒間延長した。これを繰り返し、パート III において、60 秒間 60rpm の回転数を維持できた場合には、運動時間を 30 秒間に戻すとともに、パート III ~ V において  $5\% \dot{V}O_{2max}$  分強度が上昇するように、ペダリングの負荷を増加させた。MID テスト直後のトレーニングセッションでは、パート I・II のペダリング負荷と、パート III ~ V の相対的な運動強度を MID テストの結果に基づいて修正し、パート III の運動時間は 30 秒間に戻した。その後は、前述したトレーニング前半と同様の方法で、ペダリングの回転数と負荷を、各被験者の状況に合わせて調節した。トレーニング 1・2・5・8 週目は 2 日/週の頻度で、3・4・6・7 週目は 3 日/週の頻度でトレーニングを実施した。1・2 週目は被験者に徐々にトレーニングに慣れてもらうために、5 週目は MID テストを実施するため、8 週目は POST 測定に備えて疲労を最小限に抑えるために、各々トレーニング頻度を 2 回/週に設定した。

### 2.4 最大運動負荷テスト

被験者は  $\dot{V}O_{2max}$  を決定するために、自転車エルゴメータを用いて、漸増負荷テストを実施した。2 分間の座位安静の後、1.0kp の負荷で運動を開始し、疲労困憊に至るまで 1 分ごとに 0.3kp ずつ負荷を増加させた。運動中のペダリングの回転数は 60rpm に設定した。運動中の心電図は心電計(DS-7120, Fukuda Denshi, Tokyo, Japan)を用いて常にモニターされ、1 分ごとに心拍数を測定した。 $\dot{V}O_{2max}$  の判定基準を以下の 5 つとし、この基準を少なくとも 3 つ以上満たした場合に、 $\dot{V}O_{2max}$  と判定した。全ての被験者がこの条件を満たした。

- [1] 酸素摂取量のプラトー現象がみられること
- [2] 年齢から推定される最高心拍数(220-年齢)の 90%以上に達していること

- [3] 呼吸交換比が 1.10 以上に達していること
- [4] 血中乳酸濃度が 10 mmol/L に達していること
- [5] 主観的運動強度が 19 あるいは 20 であること

## 2.5 最大下運動負荷テスト

被験者はペダリングの負荷と酸素摂取量の直線関係を決定するために、最大下運動負荷テストを実施した。30～90% $\dot{V}O_{2max}$  の異なる 10 点の強度で、各々 4 分間の運動を実施した (Noordhof et al. 2010)。運動中の回転数は 60rpm に設定した。1 日あたり 5 つの強度の測定を行い、2 日間に分けて実施した。各強度での測定は 10 分以上の間隔を空けて行い、各強度での運動開始前に酸素摂取量が安静時の水準に戻っていたことを確認した。

## 2.6 超最大運動負荷テスト

被験者は MAOD を算出するために、2-3 分で疲労困憊に至る一定強度での超最大運動負荷テストを実施した。ペダリングの回転数は 60rpm に設定した。運動テスト中の酸素需要量は、最大下運動負荷テストで得られた運動強度と酸素摂取量の直線関係から推定(外挿)した。総酸素摂取量は運動中に実測された酸素摂取量の合計値とし、運動中の酸素需要量と総酸素摂取量の差を MAOD とした。

## 2.7 最大努力でのスプリントテスト

被験者は MAnP を決定するために、3 つの異なる負荷を用いて、8 秒間の最大努力でスプリントテストを実施した。ペダリングの負荷(kp)は体重(kg)の 5%、10%、15%とした。テストは負荷が小さい順に実施し、各テスト間の休息時間は 5 分間とした。各被験者において、3 つのテストの負荷と得られた回転数の最大値から直線回帰式( $Y = -aX + b$ ,  $a > 0$ ,  $b > 0$ )を求めた。各々の負荷での発揮パワーは以下の式によって算出した。

$$\text{パワー(W)} = \text{負荷(kp)} \times \text{回転数(rpm)} \times 0.98$$

さらに、負荷と発揮パワーの関係を二次回帰することで、最大無酸素パワーを推定した。これらの算出は Nakamura ら (1985) の研究に従って実施した (Nakamura et al. 1985)。

## 2.8 筋厚

筋厚は超音波 B モード法 (Noblus, Aloka, Tokyo, Japan) により、大腿部前面と後面において、各々、大腿長の 40・50・60% の部位、計 6 部位を仰臥位、もしくは腹臥位で測定した。測定前、被験者は仰臥位にて 30 分以上安静にした状態を保った。前面と後面の各々 3 部位の測定値の平均値をデータの分析に用いた。

## 2.9 最大筋力

BIODEX System 3 を用いて、膝伸展および屈曲動作における等尺性および等速性最大筋力を評価した。被験者は、股関節 85 度屈曲位(完全伸展位が 0 度)で専用のイスに座り、代償動作を最小限に抑えるために、ストラップで身体を固定された。被験者はまず、膝関節完全伸展位を 0 度として、10 度～100 度の範囲で、 $270^{\circ} \cdot s^{-1}$ 、 $180^{\circ} \cdot s^{-1}$ 、 $90^{\circ} \cdot s^{-1}$  の順に、膝伸展および屈曲動作の等速性最大筋力を測定した。その後、膝関節屈曲 60 度で膝伸展、膝関節屈曲 15 度で膝屈曲動作の等尺性最大筋力を測定した。測定は各々、2 回ずつ行い、2 つの測定値が 5% 以上異なった場合には、3 回目の測定を実施した。各々、最も高い値をデータの分析に用いた。

## 2.10 統計処理

統計処理は統計解析ソフトウェア SPSS (Ver. 23.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) を用い

て行った。結果は全て平均値±標準偏差で示した。平均値の差の検定には、二元配置分散分析(時間[PRE、MID、POST]×群[CON、TR])を用い、交互作用が認められた場合には、Bonferroniの多重比較検定を実施した。有意水準は5%未満とした。

### 3. 結果

TR群のトレーニング実施率は100%であり、全ての被験者がトレーニングおよび測定を完遂した。トレーニング前の測定値に群間で有意な差は認められなかった(Table 1)。研究期間全体を通じた1セッション当たりの平均トレーニング時間は275±135秒、前半と後半の10セッションごとの平均トレーニング時間は各々、375±264秒と175±53秒であった。

#### 3.1 $\dot{V}O_{2max}$

$\dot{V}O_{2max}$ の絶対値( $p < 0.001$ )と相対値( $p = 0.001$ )ともに、交互作用が認められた(Figure 1)。絶対値において、PRE( $p = 0.986$ )とMID( $p = 0.235$ )の値に群間差はなかったが、POSTではCON群と比較してTR群で有意( $p = 0.042$ )に高い値を示した。また、TR群ではPREからMID( $p = 0.004$ )、MIDからPOST( $p = 0.010$ )にかけて有意な増加が認められた。相対値において、PRE( $p = 0.331$ )の値に群間差はなかったが、MID( $p = 0.048$ )とPOST( $p = 0.005$ )ではCON群と比較してTR群で有意に高い値を示した。さらに、TR群ではPREからMID( $p = 0.008$ )、MIDからPOST( $p = 0.012$ )にかけて有意な向上が観察された。

最大運動負荷テストにおける運動時間に交互作用が認められた( $p = 0.001$ )。PRE( $p = 0.537$ )、MID( $p = 0.062$ )、POST( $p = 0.060$ )の値に群間差はみられなかったが、TR群では、PREとPOST( $p < 0.001$ )、PREとMID( $p < 0.001$ )の間で有意な増加が認められた。

#### 3.2 MAOD

MAODの絶対値( $p = 0.024$ )と相対値( $p = 0.044$ )ともに、交互作用が認められた(Figure 2)。絶対値と相対値ともに、PRE絶対値： $p = 0.573$ 、相対値： $p = 0.192$ )では群間差がなかったが、POSTではCON群と比較してTR群で有意(絶対値： $p = 0.017$ 、相対値： $p = 0.004$ )に高い値を示した。また、TR群において、PREからPOSTにかけて有意(絶対値： $p = 0.001$ 、相対値： $p = 0.003$ )な向上が認められた。

超最大運動負荷テストにおけるペダリングの負荷に交互作用が認められた( $p < 0.001$ )。PRE( $p = 0.928$ )とPOST( $p = 0.140$ )の値に群間差はみられなかったが、TR群ではPREからPOSTにかけて有意( $p < 0.001$ )に増加した。超最大運動負荷テストにおける運動時間においては、群( $p = 0.251$ )および時間( $p = 0.755$ )の主効果と交互作用( $p = 0.520$ )のいずれも有意ではなかった。

#### 3.3 MAnP

MAnPの絶対値( $p = 0.003$ )と相対値( $p = 0.006$ )ともに、交互作用が認められた(Figure 3)。絶対値において、PRE( $p = 0.820$ )、MID( $p = 0.804$ )、POST( $p = 0.439$ )のいずれにおいても群間差はなかった。相対値においても、PRE( $p = 0.753$ )とMID( $p = 0.060$ )で群間差はなかったが、POSTではCON群と比較してTR群で有意( $p = 0.014$ )に高い値を示した。また、TR群ではPREからPOSTにかけて相対値が有意( $p < 0.001$ )に増加した。

ピーク回転数は体重の5%( $p < 0.001$ )と10%( $p = 0.030$ )の負荷で交互作用がみられた。5%の負荷では、PRE( $p = 0.581$ )とMID( $p = 0.966$ )、POST( $p = 0.125$ )のいずれにおいても群間差はなかったが、TR群ではPREとPOST( $p < 0.001$ )、PREとMID( $p < 0.001$ )の間で有意に向上した。10%の負荷では、PRE( $p = 0.888$ )とMID( $p = 0.243$ )で群間差はなかったが、POSTにおいて、CON群と比較してTR群で有意( $p = 0.044$ )に高い値を示した。さらに、TR群ではPREからPOSTにかけて10%負荷でのピーク回転数が有意( $p = 0.018$ )に向上した。体重の15%負荷では、群( $p = 0.103$ )と時間( $p = 0.165$ )の主効果、交互作用( $p = 0.089$ )のいずれも有意ではなかった。

### 3. 4 筋厚

大腿部前面 ( $p=0.048$ ) と後面 ( $p=0.047$ ) の筋厚ともに、交互作用が認められた (Table 1)。前面と後面ともに、PRE (前面 :  $p=0.752$ 、後面 :  $p=0.765$ ) と POST (前面 :  $p=0.556$ 、後面 :  $p=0.842$ ) の値に群間差はなかったが、TR 群では PRE から POST にかけて有意 ( $p<0.001$ ) に増加した。

### 3. 5 最大筋力

膝伸展 ( $p=0.009$ ) および屈曲 ( $p=0.042$ ) 動作ともに、 $270^\circ \cdot s^{-1}$  の等速性最大筋力に交互作用がみられた (Table 2)。伸展と屈曲ともに、PRE (伸展 :  $p=0.930$ 、屈曲 :  $p=0.385$ ) と POST (伸展 :  $p=0.518$ 、屈曲 :  $p=0.917$ ) の値に群間差はなかったが、TR 群では PRE から POST にかけて有意 (伸展 :  $p=0.004$ 、屈曲 :  $p=0.016$ ) に向上した。その他の角速度での等速性最大筋力と等尺性最大筋力では、群 ( $p=0.329-0.884$ ) と時間 ( $p=0.119-0.737$ ) の主効果および交互作用 ( $p=0.052-0.728$ ) のいずれも有意ではなかった。

## 4. 考察

本研究では、運動習慣のない若年男性を対象として、MAnP に相当する強度から  $\dot{V}O_{2max}$  に相当する強度まで強度を漸減する 8 週間の漸減強度トレーニングによって MAnP、MAOD、 $\dot{V}O_{2max}$  が同時に向上することが明らかになった。さらに、1 セッション当たり平均 4 分半程度と、非常に短いトレーニング時間によって、これらのトレーニング効果を獲得できた。研究期間中にトレーニング強度を徐々に増加させたために、後半 10 セッションにおける 1 セッション当たりのトレーニング時間は 3 分程度であった。

トレーニングの特異性を考慮すれば、 $\dot{V}O_{2max}$  と MAOD の両方を向上させるためには、有酸素性および無酸素性エネルギー供給系の両方に大きな刺激を与えることが重要である。Wenger と Bell (1986) は、トレーニング強度が  $90 \sim 100\% \dot{V}O_{2max}$  のときに  $\dot{V}O_{2max}$  の向上率が最大化することを示している (Wenger and Bell 1986)。MAOD の向上のためのトレーニングに関する情報は限られているものの、例えば、Tabata ら (1996) はおよそ  $170\% \dot{V}O_{2max}$  の強度での 20 秒間の運動を 10 秒間の休息をはさんで 7-8 セット実施することで、トレーニング 6 週間後に  $\dot{V}O_{2max}$  と MAOD の両方が増加したことを報告している (Tabata et al. 1996)。彼らはまた、このトレーニング中の蓄積酸素借が MAOD に匹敵していたこと、さらに、最終セットにおける運動中の酸素摂取量が  $\dot{V}O_{2max}$  程度まで上昇していたことを示している (Tabata et al. 1997)。本研究においても、平均してトレーニング開始後およそ 1 分程度で酸素摂取量は  $90\% \dot{V}O_{2max}$  を上回り、その後、運動終了まで  $100\% \dot{V}O_{2max}$  付近を維持していたことを、20 回目のトレーニング (最終セッション) の際に確認している。さらに、各被験者は漸減強度トレーニングのパート IV の部分において、 $\dot{V}O_{2max}$  をわずかに上回る強度で疲労困憊に至るまでペダリング動作を継続しており、パート I ~ IV までに蓄積した酸素借はおよそ MAOD に匹敵するものであった。従って、本研究においても、有酸素性および無酸素性エネルギー供給系の両方に大きな刺激を与えられていたことが、 $\dot{V}O_{2max}$  と MAOD の向上に貢献していたものと推察される。一方で、トレーニング頻度の観点から、Fox ら (1975) は高強度インターバルトレーニングを 2 日/週と 4 日/週の頻度で実施した場合に、 $\dot{V}O_{2max}$  の向上率に有意な差は認められなかったことを示している (Fox et al. 1975)。従って、本研究で採用した 2-3 日/週のトレーニング頻度も、少なくとも  $\dot{V}O_{2max}$  の向上のためには十分な頻度であったと推察される。さらに、高強度運動中の有酸素性および無酸素性エネルギー産生の大小は運動に参与する骨格筋の量に大きく依存する (Bangsbo et al. 1993; Sanada et al. 2005) ことを考慮すれば、TR 群で観察された筋肥大は、 $\dot{V}O_{2max}$  や MAOD の向上に、少なくとも部分的には貢献しているものと考えられる。

本研究において、漸減強度トレーニングは $\dot{V}O_{2max}$ とMAODに加えて、MAnPも向上させた。実施しやすさの観点から、先行研究では無酸素パワーの評価のためにウィングテストを使用していることが多く、自転車エルゴメータを用いたトレーニングがMAnPに与える効果を検討した研究は、恐らく本研究が初めてである(Nakamura et al. 1985; Driss and Vandewalle 2013)。本研究の結果を、トレーニングの特異性に基づいて解釈すれば、漸減強度トレーニングのパートIにおいてMAnPに匹敵する負荷で実施した5秒間の最大努力でのスプリント運動が、MAnPの向上に貢献したと推測するのが妥当であろう。さらに、本研究では、体重の5%と10%の負荷でのテスト中のピーク回転数が増加した結果として、MAnPが向上した。研究期間を通じたパートIでの平均のペダリング負荷は7-8kp程度であり、これは本研究における被験者の体重のおよそ10-11%に相当する。これは各トレーニングセッションで使用されたペダリング負荷と同程度、もしくはこれよりも低い負荷を用いたテスト(つまり体重の5%と10%のテスト)でピーク回転数の向上がみられたと解釈できるかもしれない。さらに、本研究では、膝伸展および屈曲動作における等速性最大筋力は、最も早い角速度( $270^{\circ} \cdot s^{-1}$ )の条件でのみ向上が認められており、これは、低い負荷、つまり高い回転数でのテストでのピーク回転数に向上がみられた一因であるかもしれない。

本研究においては、漸減強度トレーニング以外のトレーニングを実施する群が含まれていないことから、TR群の効果の程度を、これまで実施されてきた他の典型的なトレーニング方法と比較することはできない。しかしながら、その程度に関わらず、漸減強度トレーニングという1つのトレーニングによって、大腿部の筋サイズと筋力に加えて、仮説通り、MAnP、MAOD、 $\dot{V}O_{2max}$ が同時に向上したことは特筆すべきことである。

## 5. 結言

結論として、本研究は、1つのトレーニング、つまり、MAnPに相当する強度から $\dot{V}O_{2max}$ に相当する強度まで強度を漸減させる8週間の漸減強度トレーニングが、1セッション当たり4分半程度の短い運動時間であっても、MAnP、MAOD、 $\dot{V}O_{2max}$ を同時に向上させることを初めて明らかにした。本トレーニングプロトコルは、アスリートや運動時間に制限のあるトレーニング愛好家にとっても有効であると推測されるが、この点についてはさらなる研究が必要である。さらに、トレーニング効果を最大化するプロトコルについても今後詳細な検討を加えていく必要があるであろう。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人ミズノスポーツ振興財団の皆様にご多大なご支援を頂きましたことに、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- Bangsbo J, Michalsik L, Petersen A (1993) Accumulated O<sub>2</sub> deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes. *Int J Sports Med* 14:207-213. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021165>
- Beneke R, Boning D (2008) The limits of human performance. *Essays Biochem* 44:11-25. <https://doi.org/10.1042/BSE0440011>
- Driss T, Vandewalle H (2013) The measurement of maximal (anaerobic) power output on a cycle ergometer: a critical review. *Biomed Res Int* 2013:589361. <https://doi.org/10.1155/2013/589361>

- Fox EL, Bartels RL, Billings CE, O'Brien R, Bason R, Mathews DK (1975) Frequency and duration of interval training programs and changes in aerobic power. *J Appl Physiol* 38:481-484. <https://doi.org/10.1152/jappl.1975.38.3.481>
- Gastin PB (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med* 31:725-741
- Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D (2011) Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med* 41:673-694. <https://doi.org/10.2165/11590550-000000000-00000>
- Gist NH, Fedewa MV, Dishman RK, Cureton KJ (2014) Sprint interval training effects on aerobic capacity: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 44 (2):269-279. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0115-0>
- McMahon S, Jenkins D (2002) Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise. *Sports Med* 32:761-784
- Milanovic Z, Sporis G, Weston M (2015) Effectiveness of high-intensity interval training (HIT) and continuous endurance training for  $\dot{V}O_{2\max}$  improvements: a systematic review and meta-analysis of controlled trials. *Sports Med* 45:1469-1481. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0365-0>
- Nakamura Y, Mutoh Y, Miyashita M (1985) Determination of the peak power output during maximal brief pedalling bouts. *J Sports Sci* 3 (3):181-187. [doi:10.1080/02640418508729750](https://doi.org/10.1080/02640418508729750)
- Noordhof DA, de Koning JJ, Foster C (2010) The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? *Sports Med* 40:285-302. <https://doi.org/10.2165/11530390-000000000-00000>
- Noordhof DA, Skiba PF, de Koning JJ (2013) Determining anaerobic capacity in sporting activities. *Int J Sports Physiol Perform* 8:475-482
- Ozaki H, Kubota A, Natsume T, Loenneke JP, Abe T, Machida S, Naito H (2018) Effects of drop sets with resistance training on increases in muscle CSA, strength, and endurance: a pilot study. *J Sports Sci* 36:691-696. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1331042>
- Poole DC, Jones AM (2017) Measurement of the maximum oxygen uptake  $\dot{V}O_{2\max}$ :  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  is no longer acceptable. *J Appl Physiol* (1985) 122:997-1002. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01063.2016>
- Sanada K, Kearns CF, Kojima K, Abe T (2005) Peak oxygen uptake during running and arm cranking normalized to total and regional skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging. *Eur J Appl Physiol* 93:687-693. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1250-y>
- Schoenfeld BJ, Peterson MD, Ogborn D, Contreras B, Sonmez GT (2015) Effects of low- vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men. *J Strength Cond Res* 29:2954-2963. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000958>



- Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M (1997) Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 29:390-395
- Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K (1996) Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and V02max. *Med Sci Sports Exerc* 28:1327-1330
- Wenger HA, Bell GJ (1986) The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med* 3 (5):346-356.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-198603050-00004>

Table 1. Changes in anthropometric variables and muscle thickness of the thigh

	CON			TR			p value		
	PRE	MID	POST	PRE	MID	POST	Group	Time	Interaction
Anthropometric variables									
Age, y	23 (2)			23 (2)					
Standing height, m	1.74 (0.03)			1.74 (0.06)					
Body mass, kg	70.9 (9.5)	70.4 (8.9)	70.5 (8.5)	67.5 (7.1)	68.2 (7.8)	68.4 (8.3)	0.531	0.804	0.248
Body mass index, kg·m <sup>-2</sup>	23.5 (2.8)	23.3 (2.5)	23.4 (2.4)	22.4 (1.6)	22.6 (1.5)	22.6 (1.7)	0.413	0.864	0.276
Muscle thickness									
Anterior aspect of thigh, mm	41.9 (8.0)		42.9 (7.7)	40.9 (3.2)		44.7 <sup>††</sup> (5.0)	0.874	<0.01	<0.05
Posterior aspect of thigh, mm	59.1 (5.3)		60.0 (5.2)	58.3 (5.6)		60.6 <sup>††</sup> (5.9)	0.963	<0.01	<0.05

Data are presented as means (SD). CON, control group; MID, after 4 weeks of training; POST, after 8 weeks of training; PRE, before training; TR, training group. <sup>††</sup> p<0.01 vs. PRE.

Table 2. Changes in knee extension and flexion strength

	CON		TR		Group	p value	
	PRE	POST	PRE	POST		Time	Interaction
Knee extension							
0° /sec, Nm	245.5 (45.1)	239.6 (45.2)	268.6 (53.5)	266.0 (57.5)	0.329	0.199	0.612
90° /sec, Nm	194.5 (44.5)	185.2 (38.5)	201.4 (38.3)	198.5 (39.6)	0.607	0.119	0.397
180° /sec, Nm	156.6 (32.6)	155.3 (32.7)	157.2 (29.8)	163.0 (28.4)	0.781	0.208	0.052
270° /sec, Nm	130.5 (25.0)	128.5 (23.4)	129.4 (24.6)	136.0 <sup>††</sup> (23.2)	0.786	0.132	<0.01
Knee flexion							
0° /sec, Nm	133.7 (33.5)	135.4 (33.7)	129.4 (25.2)	128.8 (34.3)	0.724	0.884	0.728
90° /sec, Nm	95.7 (23.1)	97.0 (19.8)	89.7 (24.4)	95.3 (25.5)	0.737	0.204	0.424
180° /sec, Nm	84.5 (18.8)	84.5 (20.4)	78.2 (19.0)	81.8 (20.4)	0.640	0.232	0.223
270° /sec, Nm	73.3 (16.7)	72.3 (14.9)	65.9 (17.4)	71.4 <sup>†</sup> (18.8)	0.618	0.151	<0.05

Data are presented as means (SD). CON, control group; PRE, before training; POST, after 8 weeks of training; TR, training group.

<sup>††</sup> p<0.01 vs. PRE, <sup>†</sup> p<0.05 vs. PRE.

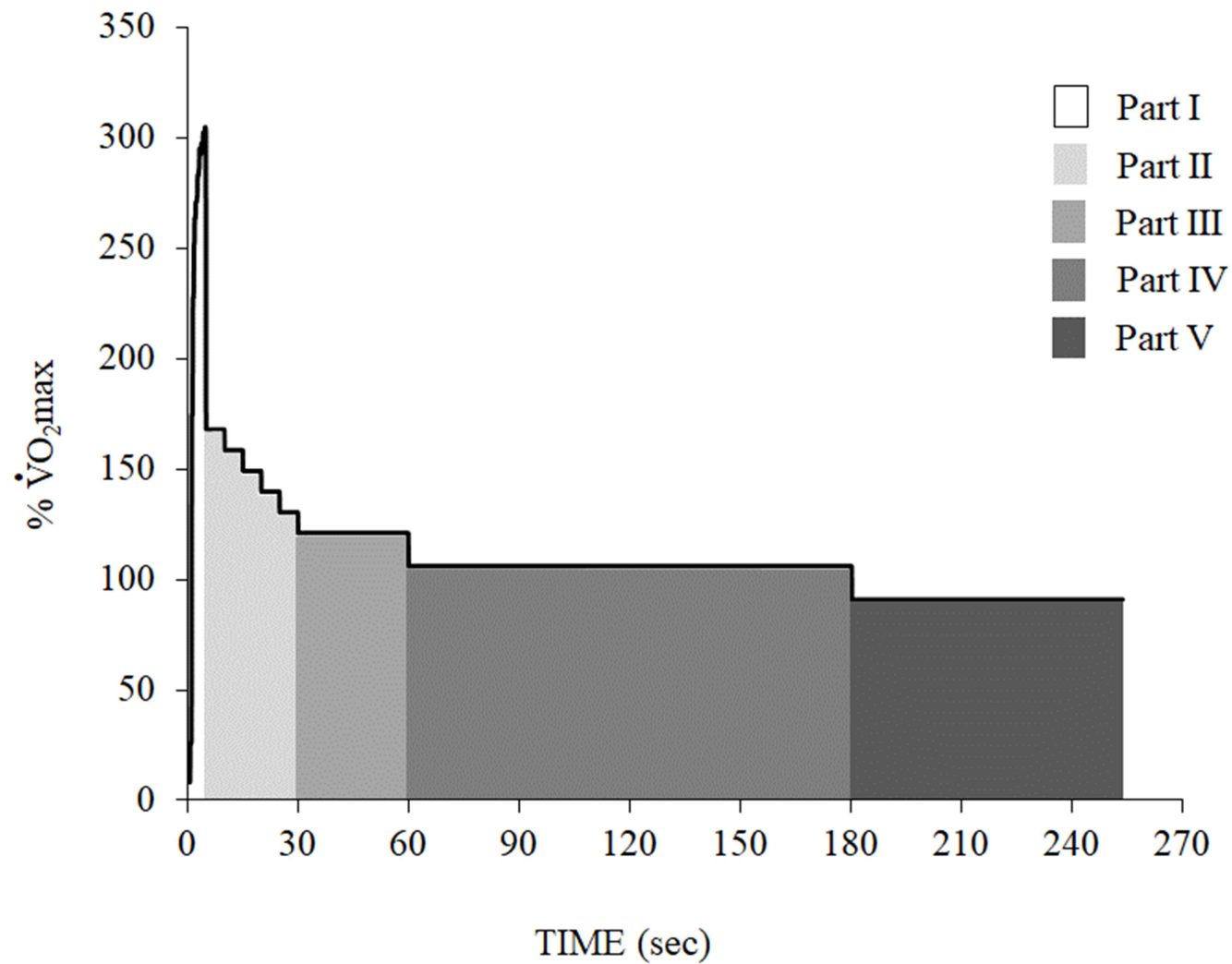


Fig. 1 A typical example of decrescent intensity training.

$\dot{V}O_{2max}$ , maximal oxygen uptake

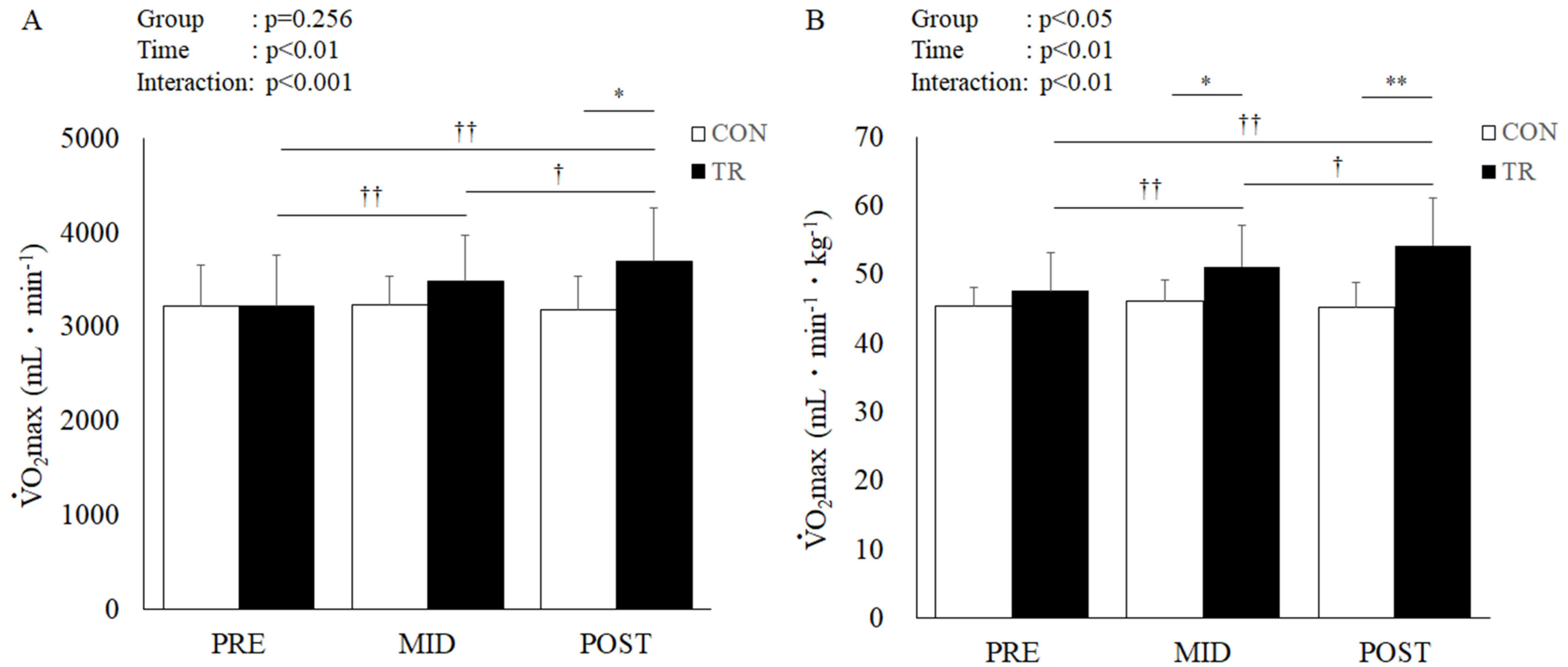


Fig. 2 Changes in  $\dot{V}O_{2max}$ .

Data are presented as means  $\pm$  SD. A. Absolute value. B. Relative value. CON, control group; MID, after 4 weeks of training; POST, after 8 weeks of training; PRE, before training; TR, training group;  $\dot{V}O_{2max}$ , maximal oxygen uptake. †† p<0.01 vs. PRE or MID, † p<0.05 vs. MID, \* p<0.05 vs. CON, \*\* p<0.01 vs. CON.

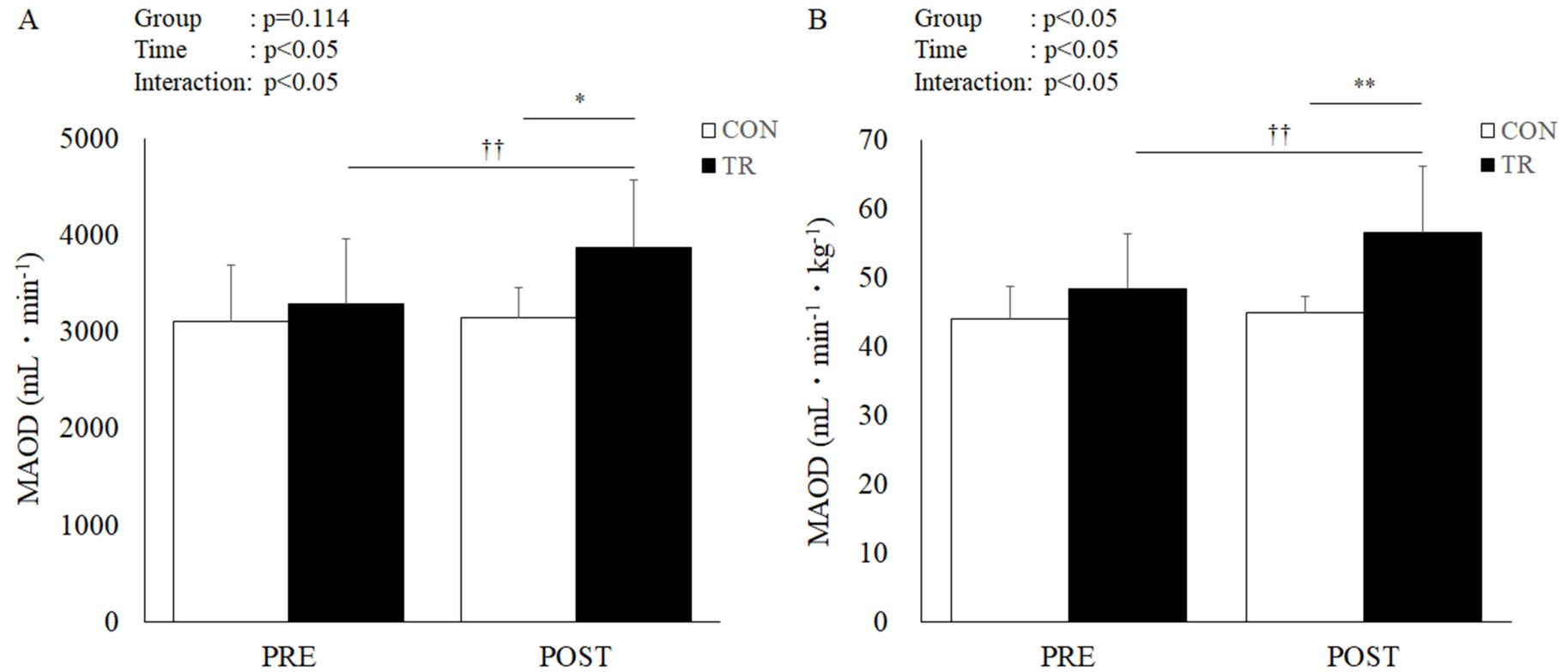


Fig. 3 Changes in MAOD.

Data are presented as means  $\pm$  SD. A. Absolute value. B. Relative value. CON, control group; MAOD, maximal accumulated oxygen deficit; POST, after 8 weeks of training; PRE, before training; TR, training group. ††  $p<0.01$  vs. PRE, \*  $p<0.05$  vs. CON, \*\*  $p<0.01$  vs. CON

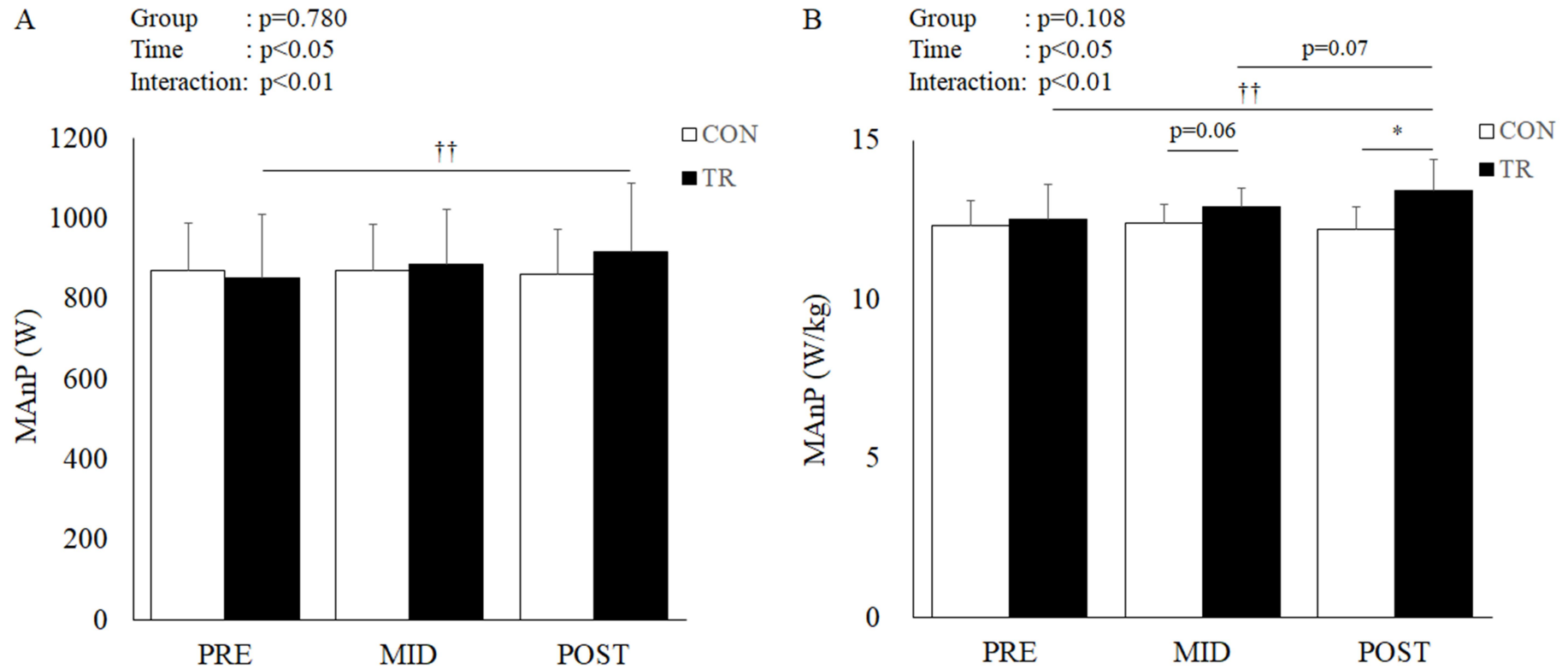


Fig. 4 Changes in MAnP.

Data are presented as means  $\pm$  SD. A. Absolute value. B. Relative value. Data are presented as means  $\pm$  SD. CON, control group; MAnP, maximal anaerobic power; MID, after 4 weeks of training; POST, after 8 weeks of training; PRE, before training; TR, training group. †† p<0.01 vs. PRE, \* p<0.05 vs. CON