

5 科学の箱馬車

サラブレッド骨格筋の特性

山口大学 山野 聖子、宮田 浩文

1. はじめに

競馬場や牧場を訪れた時、たてがみをなびかせて疾走するサラブレッドの美しい姿に、思わず目を奪われた経験はないでしょうか。サラブレッドのしなやかで力強い動き、そして素晴らしいスピードは、鍛え上げられた全身の筋肉によって生み出されています。走る芸術品とも称されるサラブレッドの体には、より速く、より力強く走るための仕組みが数多く見られます。これらの仕組みは、馬が本来持っている能力を人間が改良・洗練することによって創りあげられてきました。

サラブレッドの祖先である野生の馬が家畜化されたのは、13,000年ほど前であると言われていています。長い歴史の中で、人間は馬を輸送や移動の手段として用い、農耕作業を行い、競馬や馬術競技などを楽しんできました。そして、その使用目的に合わせて様々な改良を加え、馬車を引くための大型の馬や、親しみやすい小型のポニー、そして私たちが良く目にする競走用のサラブレッドなど、多くの品種を作り出してきました。その中でもサラブレッドは、徹底した血統管理のもと、選抜育種と近親交配を併用して、速く走ることを目的として300年以上の間に改良が加えられてきました。その結果、サラブレッドは現存する陸上動物中で最も優れたスピードと持久力を兼ね備えた最高の競走動物として、世界中で高い評価を受けるまでになったのです。そして、競馬という大きな産業を背景に、強い馬作りへの興味が高まりを見せ、1950～1960年代以降、馬の運動生理学の研究が激増しました。研究分野は、動きに関するバイオメカニクスの解析、肺や心臓を中心とする呼吸・循環器系の機能に関す

る研究、運動に必要な筋肉とそれを支える腱や骨などに関する組織・生化学的研究など、多岐にわたっています。これらの研究により、究極のアスリートであるサラブレッドは、他の動物や他品種の馬と比べて、優れた身体能力を持っていることが明らかにされてきました。今回はその中から、サラブレッドの筋肉に焦点を当てて話を進めたいと思います。

2. サラブレッドの筋肉の構造的特性

サラブレッドは高速で走るために非常に有利な筋肉を持っています。例えば、サラブレッド以外の馬では、骨格筋の総量が体重の45%程度であるのに対し、サラブレッドでは体重の約53%も筋肉が占めているのです。もちろん、量が多いだけではありません。筋肉の質も、速く走るために最適な状態へと進化を遂げてきたのです。動物の筋肉は、筋線維と言われる紐状の細胞が多数集合してできています。そして、筋線維が収縮と弛緩を繰り返すことによって、運動（動作）が成立するのです。筋線維は、収縮速度の遅い遅筋線維（type I 線維）と、収縮速度の速い速筋線維（type II 線維）に大別されます。そしてこれらの筋線維が、筋肉中にどのような割合で含まれているかによって、筋肉全体の収縮速度が決まります。馬の走行運動では、後軀の中殿筋という大きな筋肉が重要な役割を果たしていますが、サラブレッドでは中殿筋の90%近くをtype II 線維が占めています。乗用馬の中殿筋では、type II 線維の割合が75～80%程度、さらに大型の馬では70%程度であることと比較してみても、サラブレッドがいかに「速く走る」筋肉を持っているかが分かります。

次に、筋線維をもう少し細かく分類して、それぞれの線維の特徴を見てみましょう。筋線維のタイプは、各筋線維タイプが持つ特有の収縮タンパク（ミオシン重鎖、Myosin Heavy Chain; MHC）に特異的に反応する抗体を用いて識別することができます。ニードルバイオプシー法によって得られた中殿筋の一部（爪楊枝の1/4くらい）を薄くスライスし、抗体と反応させることによって、図1のような画像が得られます。この画像を元に、筋線維のタイプを分類し、それぞれの筋線維の面積や含まれる割合（筋線維組成）を調べることができるのです。

type I 線維は MHC-I を発現している線維で、収縮速度は遅いのですが高い持久力を持っています。この線維は断面積が比較的小さなものが多く、ミトコンドリアを豊富に含み、酸素を用いて（=有酸素的に）エネルギーを作り出す能力にたけています。そして、馬を含めた大型の哺乳類の多くでは、type II 線維が2タイプ存在することが知られています。収縮速度が非常に速く持久力の低い type IIX 線維と、収縮速度が速く比較的持久

力の高い type IIA 線維です。type IIX 線維は MHC-IIX を発現している線維で、横断面積が大きく、ミトコンドリアが少なく、酸素を用いず（=無酸素的に）エネルギーを作り出す能力にたけています。type IIA 線維は MHC-IIA を発現している線維で、横断面積とミトコンドリア量ともに type I 線維と type IIX 線維の中間で、有酸素的にも無酸素的にもエネルギーを作り出すことができます。さらに、MHC-I と MHC-IIA を同時に発現している type I/IIA 線維や、MHC-IIA と MHC-IIX を同時に発現している type IIA/IIX 線維も、少数ですが観察することができます。このような MHC に対する抗体が開発される以前は、筋線維中に存在する ATPase という酵素の pH に対する感受性の違いを利用して筋線維タイプを分類していました。この方法を用いた研究では、type IIX 線維の多くが type IIB 線維（ラットやマウスなど小型の哺乳類で多く見られる速筋線維のタイプ）と分類されていました。1990年代半ばより以前の文献は、このことに注意して読む必要があります。

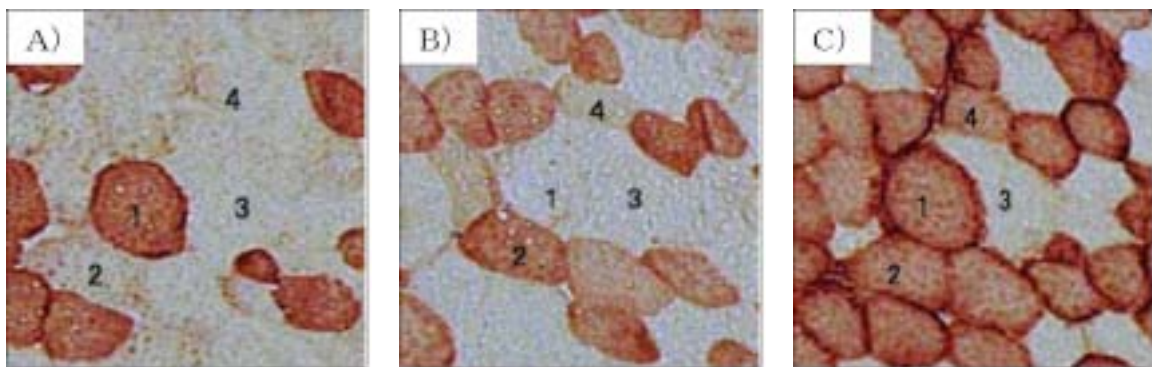


図1 各筋線維タイプが持つ特有のミオシン重鎖（Myosin Heavy Chain; MHC）を識別する抗体を用いた筋線維の染色像

3枚の画像は、それぞれ MHC-I（画像A）、MHC-IIa（画像B）、MHC-IIX（画像C）を特異的に識別する抗体を用いた染色像を示している。1: type I 線維、2: type IIA 線維、3: type IIX 線維、4: type IIA/IIX 線維。

筋線維の面積や組成は、発育の程度やトレーニング効果を議論する際の重要な指標となります。これまでの研究で、生後2か月から24か月齢までに、各筋線維タイプの横断面積が約2.5~4倍に増加すること(図2)、type IIA線維の割合は26%から42%まで増加し、type IIA/IIIX線維の割合は19%から5%まで減少することが明らかになりました(図3)。

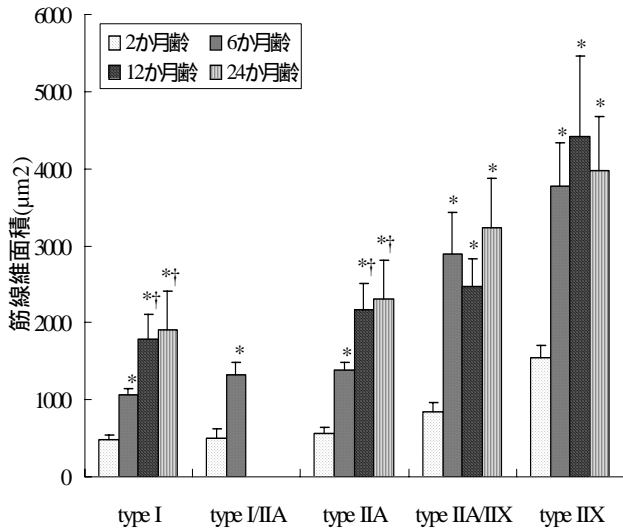


図2 2か月齢から24か月齢までの各筋線維タイプの横断面積の変化

2か月齢から24か月齢までの発育期間中に、すべての筋線維タイプで筋線維横断面積の著しい増加が見られた。

*は同一線維タイプの2か月齢の値と比較して、有意な差があったことを示す(P<0.05)。

+は同一線維タイプの6か月齢の値と比較して、有意な差があったことを示す(P<0.05)。

他の研究でも、発育に伴ってtype Iおよびtype IIA線維の割合が増加すること、type IIIX線維の割合が減少することが報告されています。これらの変化は、発育に伴って重くなる体重をしっかりと支えると共に、酸素を用いて効率よくエネルギーを作り出し、より持続的な運動にも耐えられる体が作られていくことを示しています。また、多くの研究において、概ね12週間以上のトレーニングによっ

てtype Iまたはtype IIA線維の割合が増加し、type IIIX線維の割合が減少することが示されています。一方で筋線維面積については、3~8か月のトレーニング後にtype Iおよびtype IIA線維で面積が増加したという報告もあれば、8か月のトレーニング後でも変化は見られなかったとする研究結果もあります。筋線維の変化には、トレーニングの強度や頻度も大きく関わってくるため、これらの要因を慎重に検討して議論を重ねる必要があると考えられます。

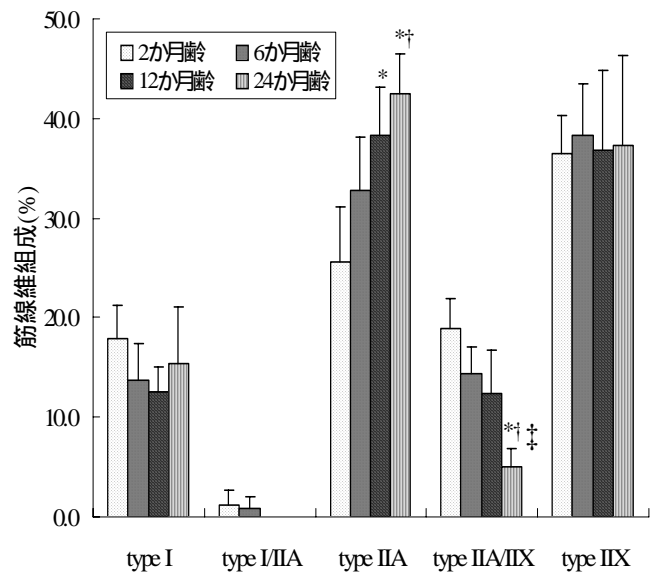


図3 2か月齢から24か月齢までの各筋線維タイプ組成の変化

2か月齢から24か月齢までの発育期間中に、type IIA線維の割合が増加し、type IIA/IIIX線維の割合が減少した。type Iおよびtype IIIX線維の割合には変化が見られなかった。type I/IIA線維は、12か月齢以降の筋肉では観察されなかった。

*は同一線維タイプの2か月齢の値と比較して、有意な差があったことを示す(P<0.05)。

+は同一線維タイプの6か月齢の値と比較して、有意な差があったことを示す(P<0.05)。

‡は同一線維タイプの12か月齢の値と比較して、有意な差があったことを示す(P<0.05)。

3. サラブレッドの筋肉の代謝的特性

動物の運動は、筋肉の収縮と弛緩というダイナミックな動きの繰り返しによって成り立っていますが、筋肉が収縮するためにはエネルギーを必要とします。競走中の全力疾走のような高強度の運動中には、筋肉中に蓄えられているグリコーゲンが主なエネルギー源となります。グリコーゲンがピルビン酸を経て二酸化炭素と水に分解される過程で生じるエネルギーによって、アデノシン三リン酸 (Adenosine Triphosphate; ATP) という物質が生成されます。この ATP が分解される時に生じるエネルギーが、筋肉を活動させるエネルギーとなるのです。サラブレッドの筋肉中には、他の動物の 2 倍近いグリコーゲンが蓄えられています。さらに、ATP を作り出すためのシステムも非常に発達しています。グリコーゲンは筋線維 (細胞) の細胞質でピルビン酸まで分解されます。解糖と呼ばれるこの反応は非常に迅速に進み、酸素を必要としません。その後、ピルビン酸はミトコンドリア中の TCA サイクルおよび電子伝達系での反応を経て、最終的に二酸化炭素と水にまで分解されます。ミトコンドリア中での一連の反応には酸素が用いられ、解糖より時間はかかりますが、効率よく ATP を生成することができます。そしてこれらすべての反応には、多くの酵素が関与しています。そのため、解糖系と TCA サイクルそれぞれで働く主要な酵素の活性を測定することによって、筋肉が無酸素的または有酸素的にエネルギーを作り出す能力の高さを調べることができます。

私たちは、解糖系の代表酵素として Phospho-fructokinase (PFK) を、TCA サイクルの代表酵素としてコハク酸脱水素酵素 (Succinate dehydrogenase; SDH) を用いて研究を行ってきました。これまでの研究で、成長に伴って PFK 活性は低下し、SDH 活性は増加することが報告されています。特に SDH 活性では、2 か月齢から 28 か月齢までに約 1.7 倍もの増加

が見られました。これは、発育に伴って有酸素的にエネルギーを作り出すことが得意な type I 線維の相対割合が増加したこと、すべての筋線維タイプでミトコンドリア量が増加したことに起因しています。また、トレーニングに伴う酵素活性の変化も数多く報告されており、それらの多くは、慣習的なサラブレッドのトレーニングで SDH 活性が増加することを示しています。この酵素活性の増加を引き起こす原因を調べるために、私たちは 16 週間のトレーニング実験を行い、その前後に筋線維タイプごとの SDH 活性を測定しました。その結果、本来は無酸素的なエネルギー生産を主としている type IIX 線維において、最も顕著な SDH 活性の増加が見られることが明らかになりました (図 4)。

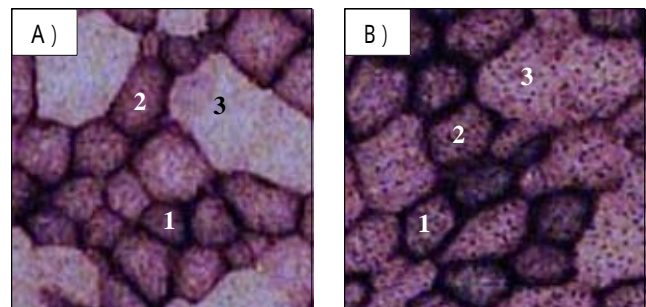


図 4 筋線維のコハク酸脱水素酵素 (Succinate dehydrogenase; SDH) 染色画像

この染色方法では、SDH 活性が高い筋線維ほど濃い紫色を示す。1: type I 線維、2: type IIA 線維、3: type IIX 線維。トレーニング前 (画像 A) とトレーニング後 (画像 B) を比較すると、type IIX 線維の色調が最も顕著に変化しており、SDH 活性が大きく増加したことが分かる。

この研究により、筋肉全体の SDH 活性の増加、すなわち有酸素的なエネルギー生産能力の改善には、筋肉中で大きな割合 (40~50%) を占める type IIX 線維の強化が非常に重要であることが示されました。

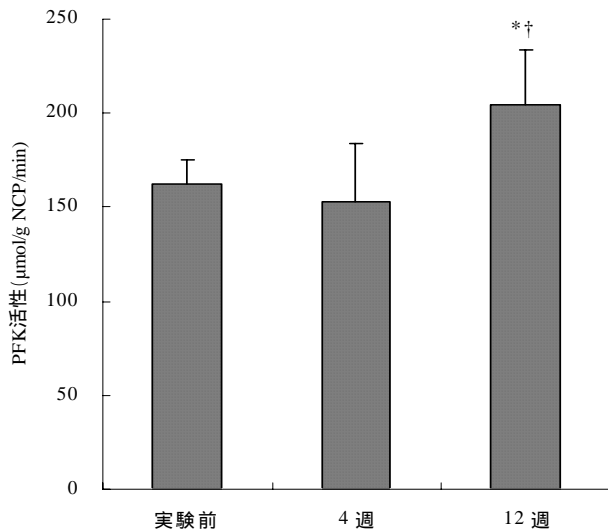


図5 高強度トレーニングに伴う中殿筋の Phospho-frukutokinase (PFK) 活性の変化
慣習的なサラブレッドのトレーニングよりも強い強度の運動を12週間行くと、筋肉中のPFK活性が増加した。これは筋肉の無酸素的なエネルギー生産能力が向上したことを示している。

一方で、PFK活性は、トレーニングによる変化がほとんど観察されません。これは、慣習的なトレーニングの大部分が有酸素性の最大下運動で構成されており、最大運動を課されるのは週に1、2回程度に過ぎないことが一因であるかもしれません。このように、人間の陸上競技選手などが行うトレーニングに比べて強度も頻度も低いトレーニングが行われる理由として、サラブレッドは先天的に優れた運動適応能力を有しているため、最大強度のトレーニングを多く必要としないと考えられてきたことが挙げられます。この説を検証するために、私たちは、十分にトレーニングされたサラブレッドに、従来のトレーニングよりも強い強度の運動を12週間課して、高強度トレーニングの効果を検証しました。その結果、トレーニング後にPFK活性の増加が観察されました(図5)。

これは、従来のトレーニングが解糖系によるエネルギー生産能力を向上させる

には十分でないかもしれないことを示しているとも考えられます。すなわち、解糖系の酵素活性を改善することによって、さらに強い馬を作り出せる可能性があるかもしれないのです。

4. 強い馬を育てるためのトレーニングとは…?

私たちのこれまでの研究によって、サラブレッドのトレーニングで重要なのは、type IIX線維を十分に鍛えることであると分かってきました。その理由は、type IIX線維が走行運動に重要な役割を果たす中殿筋において最も大きな体積を占め、その酸化酵素活性の増加が筋全体の酸化能力を大きく改善すると考えられるからです。筋肉を鍛えて様々な機能を改善するためには、筋肉中の筋線維が運動に動員され、物理・化学的刺激を受けることが必要です。運動に動員された筋線維は、運動後の筋肉に過ヨウ素酸 Schiff (Periodic acid-Schiff; PAS) 染色を施し、筋線維中のグリコーゲン含有量を調べることによって識別することができず(図6)。

筋線維は、type I type IIA type IIX線維の順で運動に動員されると言われており、type IIX線維を動員するためには一定以上の運動強度と持続時間が必要だと考えられます。しかし、高強度の運動には様々なリスクが伴います。連続的な高強度トレーニングによる慢性的な疲労は、オーバートレーニング症候群(プア・パフォーマンス)を起こす原因となることが指摘されていますし、肢に過度の負担をかけることにより、負傷や故障の危険性も高まります。前章で述べた高強度トレーニングの実験でも、研究に用いた9頭中3頭のサラブレッドが、跛行などの理由で最後までトレーニングを行うことができませんでした。これらの理由から、必要最小限のトレーニングで適切な効果を上げることが、トレーニングを行う上での理想であり、その強度を見出すことが重要な課題であると言えます。

そこで私たちは、四肢への負荷を最小限に抑え、type IIX 線維を効率よく鍛えることのできる運動時間や運動様式を見いだすため、運動強度を酸素摂取水準で正確に規定し、高強度運動における筋線維タイプの動員様式を調べました。その結果、100%VO₂max（最大酸素摂取量の100%に相当する走行速度）で4分間走行した場合と、80%および60%VO₂maxで8分間走行した場合は、筋線維の動員様式に差がないことが明らかになりました（図7）。この結果は、全力疾走を行わなくても、長時間の走行によってtype IIX線維が十分に鍛えられる可能性を示しています。また、運動時間が同じ場合でも、10%の昇り勾配をつけたトレッドミル上での運動は、傾斜を付けない場合の約2/3の速度で、十分な筋線維の動員が見られることも明らかにされています。昇り勾配の走路（坂路）の走行は、実際にサラブレッドのトレーニングに用いられています。坂路を用いたトレーニングは、

- 1) 前肢にかかる負担が軽減される、
- 2) 比較的低速で行われるために安全性が高い、
- 3) 十分な筋線維の動員が得られる等の理由から、非常に有効なトレーニング方法であると考えられます。また、トレーニング中に一定の速度で走り続けるのではなく、疾走期と緩走期（常歩や速歩）を繰り返すインターバルトレーニングも、筋肉を効率よく鍛えるために有効であることが示されています。トレッドミルを用いた実験でも、一定の速度で8分間走り続けた場合より、間に10分間の常歩を挟んで4分間の走行を2回行った場合で、多くの筋線維の動員が観察されました。これはスタートダッシュ時に有酸素的なエネルギー供給が間に合わず、無酸素的にエネルギーを作り出す必要が生じたためだと考えられます。すなわち、インターバルトレーニングは、無酸素性のエネルギー生産能力を改善するためにも有効な方法であると言えるでしょう。さらに、途中で休息を挟むことにより、トレーニ

ングに対する苦痛や疲労感が軽減する可能性があることも、インターバルトレーニングの利点であるかもしれません。

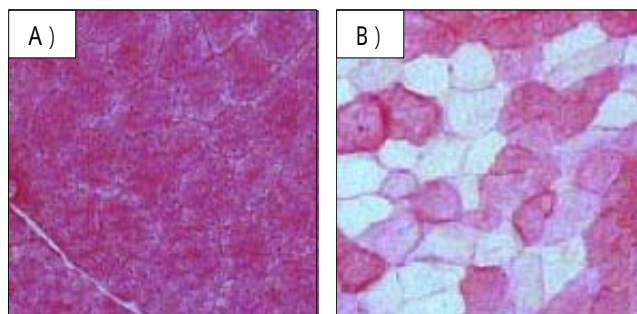


図6 筋線維の過ヨウ素酸 Schiff (Periodic acid-Schiff; PAS) 染色画像

この染色方法では、筋線維中のグリコーゲン含有量が多いほど濃い桃色を示す。画像Aは運動前の筋線維の状態、すべての筋線維にグリコーゲンが豊富に含まれている。画像Bは激しい運動後の筋線維の状態、薄い桃色や白色の筋線維が多く見られる。これは筋線維中のグリコーゲンが減少または枯渇したことを示しており、これらの線維が運動に動員されたことが分かる。

5 . おわりに

サラブレッドは、速く走ることを目的として改良を続けられてきた品種です。現在は娯楽として人気を集めている競馬も、本来は優秀な個体を選抜淘汰する目的で行われているものです。「サラブレッドは走るために生まれてきた」と言われるように、サラブレッドでは、走行能力の高さがそのまま個体の価値であると言っても過言ではありません。それゆえ、個々の馬が持つ能力を最大限に引き出すことのできる安全なトレーニング法を模索することは、非常に重要な課題のひとつであると言えます。また、「無事是名馬」の言葉どおり、大切な馬が怪我や故障で不本意な休養や引退を余儀なくされることなくトレーニングや競走を続けてほしいと競走馬に携わる人なら誰もが願うことでしょう。そのためにも、トレーニング方法でどのような運動機能が向上するかという、科学的根拠が求められていま

す。これまで私たちは、優秀な競走馬を作り出すための安全で適切なトレーニング法を提案することを目的として、研究

を続けてきました。私たちの研究で得られた知見が、強い馬作りに少しでも貢献できることを願ってやみません。

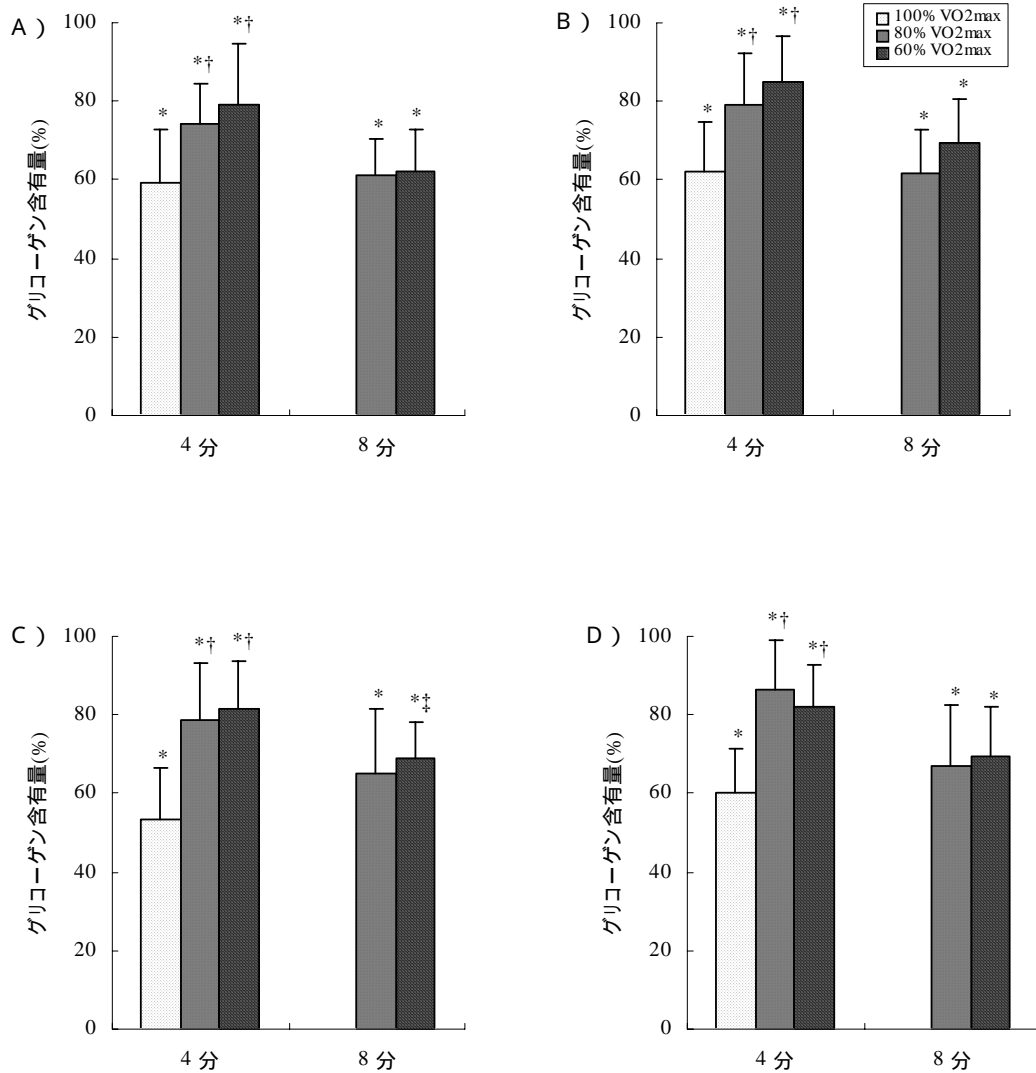


図 7 高強度運動に伴う各筋線維タイプ中のグリコーゲン含有量の変化

100%VO2max (最大酸素摂取量の100%に相当する走行速度)で4分間、80%および60%VO2maxで8分間走行した場合の、筋線維中のグリコーゲン含有量の変化を、運動前の値を100%とした相対値で示している。100% VO2max で4分間走行した場合と、80%および60%VO2maxで8分間走行した場合のグリコーゲン含有量に大きな差がないことが分かる。A) type I 線維、B) type IIA 線維、C) type IIA/IIX 線維、D) type IIX 線維。

*は同一運動強度の運動前の値と比較して、有意な差があったことを示す (P<0.05)。

†は同一運動時間(4分)の100% VO2max の値と比較して、有意な差があったことを示す (P<0.05)。

‡は100% VO2max の4分の値と比較して、有意な差があったことを示す (P<0.05)。