

○ Session III 基調講演

タバタトレーニングの生理学とさらなる発展性

田畑 泉

(立命館大学スポーツ健康科学部 特命教員 (教授))



【はじめに】

最近、従来の中等強度の持続的運動を用いた、いわゆる“有酸素性トレーニング”に加えて、より高い強度の運動の間に休息を挟むような高強度インターバルトレーニングが、流行している。このような高強度インターバルトレーニング (high intensity interval training: HIIT) そのものは新しいものではない。インターバルトレーニングを取り入れたチェコスロバキア (当時) のザトベック選手が、ヘルシンキ・オリンピック (1952 年) の 5000m, 10000m, マラソン競技に優勝したことなどで、その有効性が知られている。

このような 1950 年代に広まったインターバルトレーニングは、最近の HIIT の流行、特に一般人における流行には、関係が無いようである。最近の HIIT の流行に影響を与えたと推察されるトレーニング法はタバタトレーニングである (Tabata 2019)。命名は誰が行ったかは不明であるが、その根拠は我々が 1990 年代に発表した論文である (Tabata et al. 1996, 1997)。このトレーニングは、最大酸素摂取量の 170% の強度 (連続して行えば 50 秒程度で疲労困憊になるような強度) による 20 秒間の自転車エルゴメータ運動を 10 秒間の休息を挟んで間欠的に行い、6 から 7 セット目の運動で疲労困憊にいたるような HIIT である。このトレーニング法は、1980 年代に我が国のスピードスケートナショナルチームのヘッドコーチであった入澤孝一氏 (現 高崎健康福祉大学) が群馬県立

婦恋高校で黒岩彰選手等の指導時に考案されたものである。このトレーニング法の有用性と科学性に関する研究成果を発表した上述の論文の筆頭者名から誰かが Tabata protocol と命名したのである。

この運動を週 4 回 6 週間行くと最大酸素摂取量 (有酸素性エネルギー供給機構の指標であり持久性体力) と最大酸素借 (無酸素性エネルギー供給機構の指標) が同時に、飛躍的に増加する (Tabata et al. 1996)。 (図 1, 図 2)

ヒトが身体活動・運動を行う場合、骨格筋が収縮する必要がある。骨格筋の収縮には ATP (アデノシン 3 リン酸) の分解によるエネルギーを必要とする。骨格筋内に ATP はごく少量

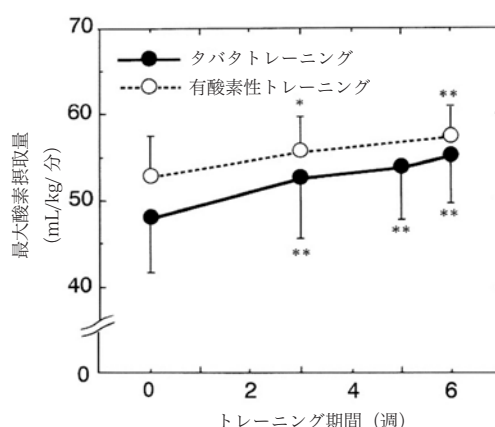


図 1 タバタ・トレーニング (●) が最大酸素最大酸素摂取量に及ぼす影響 (Tabata et al. 1996) ○は最大酸素摂取量の 70% の強度の 1 時間の中強度運動を用いたいわゆる“有酸素性トレーニング”が最大酸素摂取量に及ぼす影響

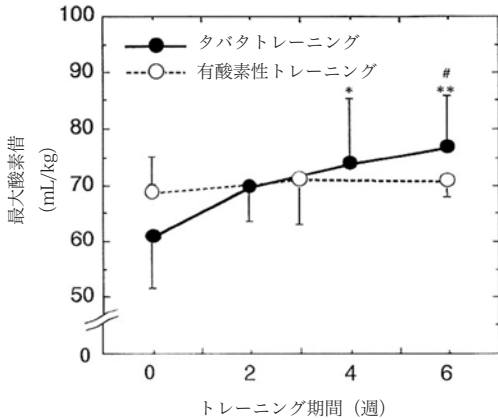


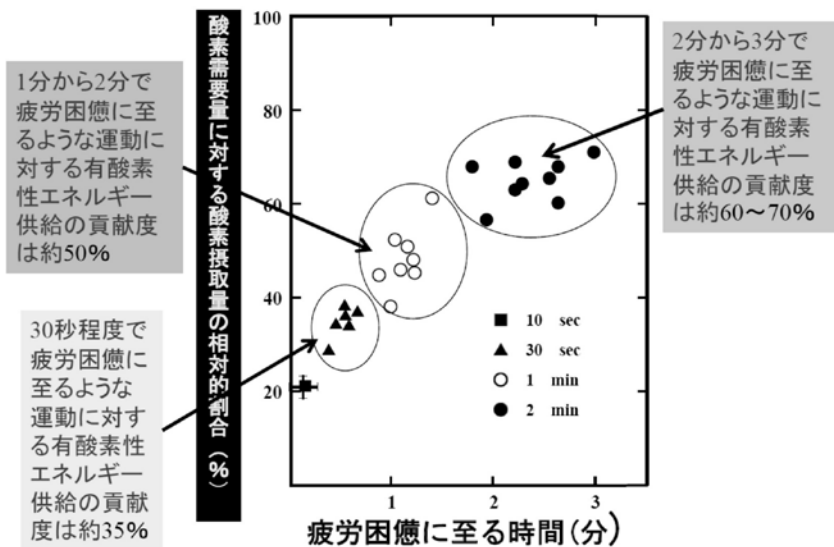
図2 タバタ・トレーニング(●)が最大酸素借に及ぼす影響(Tabata et al. 1996 2) ○は最大酸素摂取量の70%の強度の1時間の中強度運動を用いたいわゆる“有酸素性トレーニング”が最大酸素借に及ぼす影響

しか存在しない。しかし、かなり高い強度の運動でも骨格筋のATP濃度は、低下することはない。これは、ATPが常に再合成されていることを示している。ATPの再合成には、エネルギーが必要である。そのエネルギーを供給するのに有酸素性エネルギー供給機構と無酸素性エネルギー供給機構という、2つのエネルギー供給機

構が存在する。

これらの2つのエネルギー供給機構がATPの再合成のためのエネルギーを供給する。一般的にいうと、低い強度の場合は、有酸素性エネルギー供給機構が、高い強度の場合は無酸素性エネルギー供給系からのエネルギー供給の割合が高い(図3: Medbo and Tabata, 1989)。図のように30秒程度で疲労困憊に至る運動では有酸素性エネルギー供給機構から供給されるエネルギーが全体のエネルギー供給量に対する貢献度は35%程度であるが、より運動強度が低い(疲労困憊に至る時間が長い)1分あるいは2分で疲労困憊に至る運動ではそれぞれ約50%、約70%とその貢献度が高くなる。30分以上継続するような運動では、有酸素性エネルギー供給機構の貢献度がほぼ100%となることから、そのような運動が“有酸素性運動”といわれる所以である。

多くのスポーツ競技では、様々な強度の運動が混在していることより、スポーツ競技の競技能力を高めるには、両方のエネルギー供給機構の能力つまり最大酸素摂取量及び最大酸素借



ミドルパワーの運動における有酸素性代謝の貢献度

図3 ミドルパワー(30秒から2分程度で疲労困憊に至る強度)の運動の有酸素性エネルギー供給量の貢献度(Medbo and Tabata, 1989)

が大きいことが求められる。このような観点から、両方の指標を同時に増加させるタバタトレーニング（図 1、図 2）は多くのスポーツの競技力を高めることが期待され、実際に球技系のスポーツを含む多くのスポーツ競技選手がタバタトレーニングを行っている。

【タバタトレーニングが両方のエネルギー供給機構の能力を同時に増加させる機序】

トレーニング効果は、その機能に対して、最大の負荷をかけたときに最大となると考えられる。タバタトレーニングで用いる高強度・短時間・間欠的運動の最後のセットの酸素摂取量が最大酸素摂取量に達する（図 4）。最大酸素摂取量とは、各個人が摂取することができる時間当たりの酸素摂取量（単位：L/分、あるいは体重当たりで mL/kg/分）であり、有酸素性エネルギー供給機構の能力の指標である。最大酸素摂取量より高い酸素摂取量は存在しないので、この運動は有酸素性エネルギー供給機構に最大の負荷をかけており、最も有酸素性エネルギー供給機構の能力を高め、最大酸素摂取量を最も効果的に増加させることが期待される。1 セッ

ト目の運動中の酸素摂取量は低く、全体のエネルギー供給量に対する有酸素性エネルギー供給量が少なく、逆に無酸素性のエネルギー供給量である酸素借が多いので、この運動自体は無酸素性運動と考えられる（図 4）。また、タバタトレーニングは、運動強度が最大酸素摂取量の 170% という高い強度（連続して行えば 50 秒程度疲労困憊に至る）であることより、また運動終了時の筋中の乳酸濃度が最高になることより“無酸素性運動”と推測されるが、実際には、この運動つまりタバタトレーニングは、究極の“有酸素性トレーニング”である（Tabata et al. 1997）。

さらに、タバタトレーニングで用いる高強度・短時間・間欠的運動の総酸素借（無酸素性エネルギー供給量）は、最大酸素借（各個人が供給できる無酸素性エネルギー供給量であり無酸素性エネルギー供給機構の能力指標（Medbo et al. 1988））と等しいことにより、この運動は無酸素性エネルギー供給機構にも最大の負荷をかける。したがって、この運動トレーニングは究極の無酸素性トレーニングである。タバタトレーニングにより、最大酸素摂取量と最大酸素

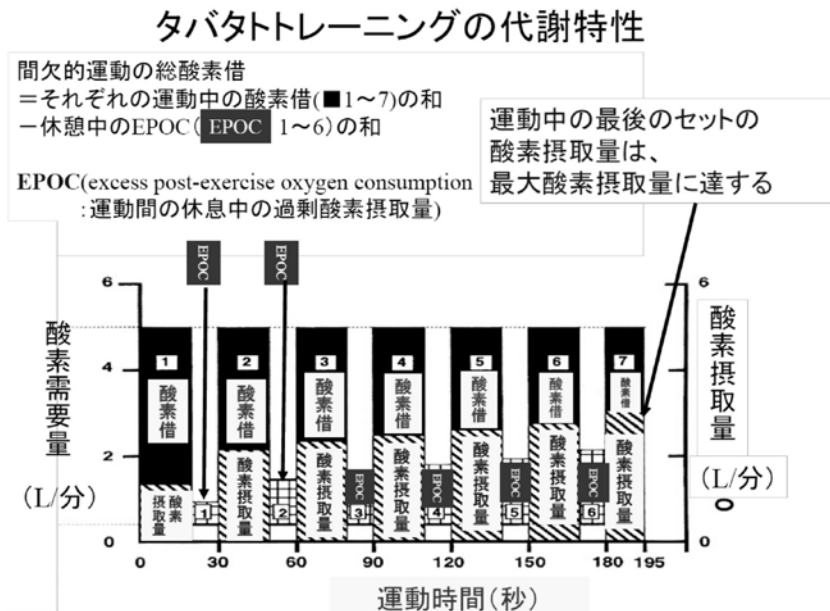


図 4 タバタトレーニング運動中の酸素摂取量と総酸素借の測定方法（Tabata et al. 1997）

借が同時に顕著に増加するのは、このトレーニングが、有酸素性及び無酸素性エネルギー供給系の両方に最大の負荷をかけているからであると考えられている。ヒトには2つのエネルギー供給系しかなく、その両方に最大の負荷をかけていることより、エネルギー供給系という観点から言えばこのトレーニングが最高のトレーニングの1つである。

インターバル／間欠的運動の代謝特性を、総酸素借として無酸素性エネルギー供給量を評価した研究は、それまでなかったことにより、この研究は高強度・短時間・間欠的運動（トレーニング）に新しい見地を与えた。それまでは、運動時間や運動と休息の比等でインターバルトレーニングを分類していたが、それらは、多くの組み合わせがあり、実際には試行錯誤でトレーニング効果を明らかにすることが従来行われてきた（7）。しかし、本研究により有酸素性及び無酸素性エネルギー供給系という観点から高強度・短時間・間欠的運動（トレーニング）を評価するという科学的方法が確立されたことが、多くの欧米の研究者やフィットネス関係者を納得させたと推測される。

より高い強度の運動では無酸素性エネルギー供給系から、より低い強度の運動では有酸素性エネルギー供給系からエネルギーを供給されているが、どちらか一つと言うことはなく、多くのスポーツ活動は有酸素性エネルギーと無酸素性エネルギーの両方からエネルギーを供給されている。したがって、両方のエネルギー供給系を同時にトレーニングでき、それも最大効果が得られるということは、このトレーニングがサッカーやラグビー等の球技を含む多くのスポーツ競技の競技力を最高に向上させることができる“最高のトレーニングの一つである”。このようなクリアなメッセージが論文に出たこともあり、学術論文と一般の愛好者の間をつなぐ雑誌に Tabata protocol として、紹介される記事が増加するようになったのが2005年くらいからである。

【タバタトレーニングのその後の発展】

競技スポーツ現場でのタバタトレーニング

トレーニングを行う場合、意識性の原則にしたがって、そのトレーニングがどのような目的で、どのような効果があるかを意識する必要がある。

我々は、多くのスポーツ競技の動作を用いたタバタトレーニングを開発し、その効果を定量化している（田畑ら（2021）、Tabata（2022））。これは、“自転車エルゴメータやトレッドミルを用いた実験室で実施された研究結果から、実際にフィットネスクラブ等で用いられている自体重を用いた運動（たとえばいくつかの自体重を組み合わせたエアロビクス）による効果を予測するのではなく、“この複数の自体重を用いたタバタトレーニング”では、このような結果が得られるというエビデンスを研究者として示したかったからである。たとえば、剣道競技で用いられている“掛かり稽古”を用いたタバタトレーニングを、大学剣道部所属の男子では週3日6週間、女子では週3回11週間に行った（田畑ら2021）。その結果、男子においてトレーニングを実施しなかったコントロール群では最大酸素摂取量に変動は見られなかったが、トレーニング群では有意に最大酸素摂取量が増加した（トレーニング前： $50.9 \pm 8.4 \text{ mL/kg/min}$, トレーニング後： $54.1 \pm 8.0 \text{ mL/kg/min}$, $p < 0.05$)). また、女子では大幅に最大酸素摂取量が増加した（トレーニング前： $42.1 \pm 2.9 \text{ mL/kg/min}$, トレーニング後： $48.3 \pm 2.2 \text{ mL/kg/min}$, $p < 0.001$).

この研究では、トレーニング対象である掛かり手に、“20秒間の運動時間内は動作を止めないこと”、“掛かり手、やみくもに打ちかかるのではなく、受け手の空いているところを狙って打つようにすること”、“掛かり手がきつくなると動作が遅くなるので受け手が、動作を引き出すこと”、“掛かり手は、なるべく小さく鋭い打突で、遠くまですり足で抜けていくこと”を留意するように指示した <https://youtu.be/1SbtX>

901piU.

女子部員は、大学選手権に向けての地方大会の実施期間中も継続してトレーニングを行っていた。タバタトレーニングを1日のトレーニングの最もフレッシュな最初に行っていたということである。タバタトレーニングは疲労困憊に至るようなトレーニングであるので1日のトレーニングの最後に行う場合もある。筆者は、タバタトレーニングは、できれば身体ともにフレッシュな最初に行ってほしいと考えている。タバタトレーニングは基本的には疲労困憊に至るようなものであるが、しっかりクールダウンのような運動を5~10分行くと技術練習のような次のトレーニングを行うことができる。他のトレーニングと同様にタバタトレーニングでも、集中して行うのが最も効果が高いと感じている。

その他、20秒間の運動中、最大努力（行う運動をできるだけ多い回数行う）で、行うタバタトレーニングとして、一般男女学生、女子サッカー選手、女子バドミントン選手、男子ラグビー選手、男子中距離選手等を対象にした結果を英文著書に記載している（Tabata 2022）。英文著書に記載した理由はこのような研究成果は、実践者やコーチにとって重要であるが、“descriptive”ということではなかなか原著として科学雑誌に掲載されないからである。

疲労困憊に至らないタバタトレーニング

タバタトレーニングは、その歴史からも対象はモチベーションの高いスポーツ選手である。しかしタバタトレーニングが広まってきて、最近では、“体力の無い方、中高年の方でもできるタバタトレーニングはありませんか”と質問を受けることが多い。そこで、日本女子体育大学の沢井史穂教授の力を借りて、いわゆる“フィットネスクラブのグループレッスン”で用いられている自体重を用いた疲労困憊に至らない運動（https://youtu.be/lwlfyR_CuKA）の効果を検証した。その結果、このタバタトレーニング

を新型コロナウイルス蔓延中の2020年に週3回6週間行った男子大学生の最大酸素摂取量は有意に増加した（（トレーニング前：46.6±2.8mL/kg/min, トレーニング後：49.5±2.7mL/kg/min, $p<0.001$ ））。この結果は、大学に登校することがほとんど無く、身体活動量の低下による最大酸素摂取量の低下が危惧された時期において、このトレーニングを行うことにより最大酸素摂取量が増加したことは、今後このような社会状況になった場合の対応策としてこのようなタバタトレーニングの有効性を証明したと考えられる。また、体力の低い女子大学生についても週3回6週間で最大酸素摂取量が増加した。トレーニング後の主観的運動強度は平均で17（かなりきつい）であったが、しっかりとした被験者の指導を行えば、体力の低い女子大学生も最大酸素摂取量が増加することを確認できた。今後は、この“沢井式タバタトレーニング”と同様なタバタトレーニングについても、トレーニングによる最大酸素摂取量を評価対象として、エビデンスを蓄積していきたいと思っている。

タバタトレーニングが陸上長距離選手の疲労骨折のリスクを低減する可能性

我が国の陸上長距離選手に疲労骨折が頻発している。女性の場合、長い距離を走りエネルギー不足の状態となり、骨形成を高める女性ホルモンが低下することがその理由の一つと考えられている。一方、男性でも多くの陸上長距離選手で疲労骨折が発症している。これを説明する機序として最近、中等度の強度の走運動を長時間行うことにより血中カルシウム濃度が低下し、それに対応して副甲状腺から、骨吸収を促進する副甲状腺ホルモンが分泌されることがあげられている。陸上長距離の競技成績と関係の深い最大酸素摂取量を増加させるためには、このような運動トレーニングは必須である。一般的には、最大酸素摂取量の70%の強度で20分以上週3回以上、トレーニングすることにより

最大酸素摂取量が向上するとされている。もちろん、競技力の高い選手については、さらに長い距離、走行する必要があるのかもしれない。しかし、我が国の高校陸上長距離選手の走距離は著しく高く、欧米において疲労骨折発症のリスクが有意に高くなる走距離（週 31.1km）の数倍の 570km/月であり、驚くべき異常な走距離である（濱野ら 2022）。高校生がトレーニングとして走る走運動の強度は最大酸素摂取量の 70%程度であり、この強度で長時間走ることにより、血中副甲状腺ホルモンが上昇し、それが骨代謝に悪影響を与え、疲労骨折を発症させている可能性がある。一方、タバタトレーニングは、血中カルシウム濃度を低下させず（逆に血液濃縮により、血中カルシウム濃度は上昇する）、血中副甲状腺ホルモン濃度は上昇しない（Hamano et al. 2021）。タバタトレーニングは、最大酸素摂取量を増加させることは明らかである。したがって、最大酸素摂取量を高めるという観点からは、多くの陸上長距離選手がトレーニングとして行っている中等度強度の運動と同じ効果である。中等度強度の運動の意義（多分、体重の維持・減少を目的）は、わからないでもないが、同じように有酸素性体力を高めるのが目的なら、タバタトレーニングのような HIIT を現行よりも多く、逆に中等度の走運動を減らすことが、疲労骨折の発症予防という観点からは良いと思われる。難しいと考えるが、陸上競技選手の理想的な体組成を明らかにし、その達成を可能とするようなスポーツ栄養学的研究が必要であると考えられる。

我々の最近の研究により、高校 1 年生の 1 学期に疲労骨折が多いことが明らかとなった（濱野ら 2022）。このような高校生はトレーニングを自分で決めることができない。したがって、このような高校生の疲労骨折は、そのようなトレーニングメニューを与えた指導者の責任であると考えべきである。同じ研究で、疲労骨折は走運動の強度を高めたときよりも、走距離を増やしたときに発症することが明らかになっ

た。これらの結果より、高校 1 年生の疲労骨折は走距離が急増したことによると推察される。したがって、高校 1 年生の 1 学期は、上級生と一緒にトレーニングをすることなく、徐々に走距離を増加させるのが高校 1 年初期の陸上男子長距離選手の疲労骨折の発症を抑制する方策であると考えられる。

話は変わるが、アメリカスポーツ医学会の機関誌である *Medicine and Sciences in Sports and Exercise* の 2022 年に、持久性競技選手にとって *periodical training* の善し悪しについて紙上討論の論文が掲載された（Foster et al. 2022 ①②, Burnley et al. 2022 ①②）。さらに、お互いの論説に対して反論が掲載されている。これは、実際に選手コーチが行っているトレーニングを運動強度で分けて、2つの方法について議論している。日本の学会でもこのような取り組みが、コーチを含めて学会大会や学会誌で行われることを期待している。このようなことについて、日本女子体育大学のイニシアティブを期待したい。

シグナル探求のためのツールとしてのラットを対象としたタバタ水泳トレーニング

トレーニングによる多くの機能向上に、活動筋に存在する生理学的機能を持つタンパク質の発現量の増減が関係している。タンパク質の発現量は、運動によるシグナル→転写活性化→翻訳という順番でなされるが、一般的に細胞内シグナルは運動強度に依存している。必ずしも全てのタンパク質の発現量増加が細胞内シグナル高低で決まっているわけではないが、シグナルにより反応が起こるとすれば、一般的にはシグナルの高低が最終的なタンパク質の発現量を決める。従来、実験動物を対象とした研究では、トレッドミル運動における速度と角度で強度を決めていたことより、実験動物の安全性を考えるとヒトのタバタトレーニングのような高強度運動を行うことは困難であった。そこで、我々は、ラットに重りをつけて泳がせる水泳タバタ

トレーニングを考案した (Kawanaka *et al.* 1998, Terada *et al.* 2001). それにより, ヒトのタバタトレーニングと同様に, 有酸素性及び無酸素性代謝により高い刺激を与え, それによる細胞内シグナル (たとえば AMPK や CAMK を活性化させる Pi や Ca 濃度) を最高に高めることを明らかにしたことにより, このラット水泳トレーニングは, トレーニングによる生体の適応に対するトレーニング強度の影響を明らかにするツールとして有用であることが明らかとなった. 我々は, このトレーニングを用いてトレーニング強度が骨格筋の糖代謝等に与える影響についての研究を行い, 成果を挙げた (Terada *et al.* 2001, 2004, 2005, Tabata 2022, 田畑 2022). 今後も, トレーニングにより改善する生理機能に関するタンパク質の発現量増加に対する運動強度の影響を見るための, ツールとしてラット水泳タバタトレーニングは有効であると考えられる. このようなトレーニングによる機能向上に関する機序解明のためのトレーニングも, ヒトを対象としたタバタトレーニングの発想が基に開発された.

【おわりに】

1990 年代に我々が報告した高強度・短時間・間欠的トレーニングが, スポーツ選手の競技力向上や, 一般人のための健康増進に有効である HIIT として認知されてから四半世紀の時間が流れ, 我々を含む多くの研究者が HIIT の研究を始め, 貴重は研究成果が蓄積されている (田畑 2022). 今後も, ヒト及び実験動物を対象にトレーニングに関するエビデンスを収集し, それに基づいたトレーニングを競技者や一般の方に届けるのが我々の役目であると考え

参考文献

Burnley M, Bearden SE, Jones AM.: Polarized Training Is Not Optimal for Endurance Athletes. *Med Sci*

Sports Exerc **54**(6): 1032-1034, 2022 ①.

Burnley M, Bearden SE, Jones AM.: Polarized Training Is Not Optimal for Endurance Athletes: Response to Foster and Colleagues. *Med Sci Sports Exerc* **54**(6): 1038-1040, 2022 ②.

Foster C, Casado A, Esteve-Lanao J, Haugen T, Seiler S.: Polarized Training Is Optimal for Endurance Athletes. *Med Sci Sports Exerc* **54**(6): 1028-1031, 2022 ①.

Foster C, Casado A, Esteve-Lanao J, Haugen T, Seiler S.: Polarized Training Is Optimal for Endurance Athletes: Response to Burnley, Bearden, and Jones. *Med Sci Sports Exerc* **54**(6): 1035-1037, 2022 ②.

Kawanaka K, Tabata I, Tanaka A, Higuchi M.: High-intensity intermittent swimming increases muscle glucose transport to a higher level than in vitro tetanic contractions. *J Appl Physiol* **84**: 1852-1857, 1998.

Medbo JJ, Mohn A-C, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted O.: Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* **64**: 50-60, 1988.

Medbo JJ, Tabata I.: Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhaustive bicycle exercise. *J Appl Physiol* **67**: 1881-1886, 1989.

Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K.: Effects of moderate intensity-endurance and high intensity-intermittent training on anaerobic capacity and Vo₂max. *Med Sci Sports Exerc* **28**: 1327-1330, 1996.

Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M.: Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* **29**: 390-395, 1997.

Tabata, I.: Tabata training: One of the most energetically effective high-intensity intermittent training methods. *J Physiol Sci* **69**(4): 559-572, 2019.

田畑泉, 前田顕, 相原清乃, 街勝憲, 東郷将成, 吉岡路, 恵土孝吉: 剣道における高強度・短時間・間欠的トレーニング: タバタ式掛かり稽古による最大酸素摂取量の増加. *武道学研究*, **54**: 1-13, 2021.

Tabata, I.: Tabata Training. The history and sciences of HIIT. Academic Press. USA. 2022.

田畑泉：1日4分世界標準の科学的トレーニング
今日から始める「タバタトレーニング」(ブルー
ボックス). 東京：講談社. 2022.

Terada S, Yokozeki T, Kawanaka K, Ogawa K, Higuchi M, Ezaki O, Tabata I.: Effects of high-intensity intermittent swimming training on GLUT-4 and glucose transport activity in rat skeletal muscle. *J Appl Physiol* **90**: 2019-2024, 2001.

Terada S, I Tabata, M Higuchi.: Effect of high-intensity intermittent swimming training on fatty acid oxi-

dation enzyme activity in rat skeletal muscle. *Jpn J Physiol* **54**: 47-52, 2004.

Terada S, Kawanaka K, Goto M, Shimokawa T, Tabata I.: Effects of high-intensity intermittent swimming on PGC-1 α protein expression in rat skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* **184**: 59-65, 2005.

濱野純, 田中綾乃, 田畑泉：若年男性陸上長距離選手における疲労骨折の危険因子に関する研究
ートレーニングの量と強度の観点から－. 体力
科学, **71**(4)：319-331, 2022.