スポーツ栄養と MCT

Sport Nutrition and Medium-chain Triglycerides

野坂 直久

日清オイリオグループ株式会社 中央研究所

〒235-8558

神奈川県横浜市磯子区新森町1番地

Naohisa NOSAKA

The Nisshin Oilio Group, Ltd.

1 Shinmori-cho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa,
235-8558, Japan

論文要旨：中鎖脂肪酸摂取が運動中のエネルギー基質代謝や体組成へ与える影響について解説する。脂肪は体内に大量に保有するエネルギー基質であり、パフォーマンス向上や競技特性に望ましい体組成の獲得のため、脂肪利用促進はトレーニングや食事の面から検討されている。中鎖脂肪酸は容易にエネルギーを産生し脂肪利用を促進することを期待され注目されてきた。運動前や運動中の多量摂取によるエネルギー補給が検討されてきたが、パフォーマンスへの効果は一貫しておらず、消化管の不快感も認め、その後、研究は中鎖脂肪酸の中間代謝物であるケトン体を主成分とした補給食品へ進展した。一方、中鎖脂肪酸の少量継続摂取は最大下運動中の脂肪利用を高め、オフシーズン時の筋厚の減少を抑え、運動との併用では体脂肪蓄積を相加的に抑制するなど、持久的運動能力の向上や階級制競技に望ましい体組成の維持増進に役立つ可能性が近年示されつつあり、他の競技や運動様式への応用が期待されている。

Abstract: The objective of the present article is to review literature concerning the effect of supplementation of medium-chain fatty acids (MCFA) on energy substrate metabolism during exercise and body composition. Fat is an energy substrate that is stored in large quantities in the body, and in order to improve the performance and to acquire the body composition desirable for competition characteristics, promotion of fat utilization has been investigated from the aspect of training and diet. Medium-chain triglycerides (MCT) have been attracted attention because they are expected to generate energy easily and promote fat utilization in working skeletal muscle. As a result of studying MCT supplementation by large intake before and during exercise, gastrointestinal discomfort was observed, but the effect on performance was not consistent, and the study was then progressed studying ketone bodies supplementation, which is an intermediate metabolite of MCFA.

On the other hand, continuous supplementation of small amount of MCFA could increase fat utilization during submaximal exercise, improve endurance exercise capacity, suppress the decrease in muscle thickness during off-season, and additively suppressing body-fat accumulation when combined with exercise. In recent years, applications of MCT supplementation for other competitions and exercise modalities are expected as well as class competitions and endurance exercise as cycling.

Key words: medium-chain fatty acids, exercise, body composition, endurance capacity

1 はじめに

運動中の活動筋が必要なエネルギーを得るために酸化する主要な基質は糖質である¹⁾。とくに、高強度(最大酸素摂取量の70-80%相当以上の強度)の運動ではエネルギーであるATPをすみやかに効率よく生成させる必

要がある。糖質の酸素1リットル当たりのエネルギー生成量は5.05 kcal/O₂ℓであるのに対し、脂質は4.67 kcal/O₂ℓとわずかに少なく²⁾、加えてATPの最大生成速度は筋グリコーゲン由来の糖質では約2.8 mmol/kg dry wt/secと、脂質の約1.0 mmol/kg dry wt/secに比べるとかなり速い³⁾。しかし、肝臓や骨格筋のグリコーゲンや糖質の枯渇は運動中の疲労の原因の一つとされ、筋での解糖系亢進で生じる乳酸の血中濃度増加と疲労感の指

連絡者：野坂 直久
E-mail : n-nosaka@nisshin-oillio.com

摂取量の70%に相当する強度で1時間運動したとき、脂肪酸化率は等しい重量の長鎖脂肪酸油(LCT)を糖質とともに摂取したときと比較して高まらず、MCTやLCT摂取時の脂肪酸化率は空腹のまま運動したときよりどちらも低かった。運動中の血清脂質の変化も検討され、MCT摂取時は血中のケトン体濃度が有意に上昇、LCT摂取時は血中の中性脂肪濃度と遊離脂肪酸濃度が上昇、絶食時は脂肪の分解により血中の遊離脂肪酸とグリセロールの濃度が上昇し、血中指標の変化では運動前の食事内容による違いが示された。この研究の予備検討では、MCTはシリアルとともに摂取させると摂取受容性が良いものの、50gや60gのMCTを摂取させると全ての対象者でけいれんや下痢を生じた。この研究では30g摂取ではそれらは概ね10%程度であったとしているが、実際に運動時に30g摂取させたときの下痢は10名中3名に生じたと報告されている。Décombazらの報告¹¹⁾では、運動1時間前に25gのMCTを摂取し、最大酸素摂取量の60%に相当する強度(最大酸素摂取量の50~60%に相当する強度は中強度運動に分類される)で1時間運動したとき、50gの糖質(デキストリン)摂取と比較して総脂肪酸化量は高まらなかった。このとき、MCT摂取時の運動直前の血中乳酸濃度は、糖質摂取と比べ低値を示したものの、運動中はどちらも2mM程度に上昇して違いを認めなかった。MCT摂取時の運動中の血中遊離脂肪酸、グリセロール、ケトン体の濃度はいずれも糖質摂取より有意に高値を示した。さらに、運動1時間前に25gのMCTを摂取したMassicotteらの研究¹²⁾では、最大酸素摂取量の65%に相当する強度で2時間運動すると摂取したMCTの54%が酸化されたが、比較対照の水摂取のみと比べ総脂肪酸化量は高まらなかった。この研究では、運動中の糖質(グルコース)の間欠的な繰り返し摂取も検討されており、最初の1時間の脂肪酸化はMCT摂取で糖質摂取より有意に高値を示したが、次の1時間の運動ではMCT摂取と糖質摂取との間に有意な脂肪酸化の違いがなかった。さらに2時間の運動の全体を通じてみると、いずれも水摂取のみより脂肪酸化は有意に低値を示しており、MCT摂取において持続的な脂肪酸化が認められなかった。中鎖脂肪酸の経口摂取は、肝臓で分解利用される以外に筋以外の抹消組織でも利用されることによる損失と、肝臓で代謝され生成されるケトン体への変換などから、筋に至る中鎖脂肪酸は摂取量に比べて少なくなることが知られている。

一方、血液中への中鎖脂肪酸投与における筋への取り込みや酸化は運動強度に依存しないことが当時報告されている。血管から中鎖脂肪酸を投与し、低強度(最大酸素摂取量の40%以内に相当する強度)や高強度で運動さ

せたときの脂肪酸化を比較検討したSidossisらの研究¹³⁾では、オクタン酸やオレイン酸を静脈から注入しながら最大酸素摂取量の40%、さらに80%に相当する強度で運動させると、オレイン酸の酸化は67.7%から51.8%と取り込みと酸化が有意に低下したのに対し、オクタン酸では84.8%、89.3%と同等で、末梢血中の中鎖脂肪酸が筋で酸化されるときは高強度運動であっても抑制を受けないことが示されている。

3 運動中の継続した中鎖脂肪酸摂取が運動中のパフォーマンスや基質代謝に与える影響

Massicotteらの研究¹²⁾では、運動前の中鎖脂肪酸の摂取により、最初の1時間は運動中の糖質酸化の節約効果を認めた。これを受け、1995年に報告されたJeukendrupらの研究¹⁴⁾では、運動前に加え運動中にもMCTを摂取させ、MCTの酸化速度に見合ったエネルギー基質の供給継続がパフォーマンスを改善させると期待され検討が行われた。しかし、Van Zylらの長時間運動を行わせた一つの研究報告¹⁵⁾以外には有効な結果を認めなかった。

Jeukendrupらの研究¹⁴⁾では、試験飲料は運動前(体重1kg当たり飲料4ml)から20分おきに運動終了まで(体重1kg当たり飲料2ml)摂取させ、最大酸素摂取量の57%に相当する運動強度で3時間自転車運動を行った。試験飲料は(1)糖質のみ(3時間で、糖質214g摂取)(2)1と等エネルギーのMCT+糖質(同、MCT29g+糖質149g摂取、エネルギーの3割がMCT)と(3)MCTのみ(同、MCT29g摂取)であった。運動中のMCT酸化量を計算すると、その摂取量の7割程度が酸化され、運動中のMCT摂取量として充分であると確認された。同グループによる次の研究¹⁶⁾では、まず筋グリコーゲンを減少させるため高強度運動と中強度運動を繰り返させた後、低糖質食を摂取させた翌日に最大酸素摂取量の57%に相当する強度で90分自転車運動を行った。運動開始時から摂取した試験飲料は等エネルギーの(1)糖質のみ(1.5時間で146g摂取)(2)MCT+糖質(同MCT26.6g、糖質87.1g摂取)であった。90分間の運動中の基質酸化は試験食の違いでは有意差を認めないものの、血清中の遊離脂肪酸と血中 β HB濃度はMCT摂取で有意に増加した。一方、筋グリコーゲン減少運動の後、高糖質食を摂取しグリコーゲンを回復させてから90分間運動させる検討も行われ、低糖質食と比較すると、糖質酸化は有意に増加し、反対に脂肪酸化は減少した。

同時期のVan Zylらの研究グループによる検討¹⁵⁾は、運動パフォーマンスに初めて好影響を認めた。この研究

は、最大酸素摂取量の60%に相当する強度で2時間運動させ、続けて1時間近くの時間を要する40 kmのタイムトライアルを模した運動を行わせた。試験飲料は(1) 4.3% (wt/vol) MCTのみ (2) MCT+10%糖質 (3) 糖質のみで、10分毎に100 ml摂取した。運動終了まで3時間近く要し、MCT摂取量は通算で86 gに達した。40 km タイムトライアルではMCT摂取のみは糖質摂取のみと比べ有意に遅かったが、MCT+糖質摂取時は糖質摂取のみと比べて有意に早く、MCT追加摂取の有効性が示された。また、MCT+糖質ならびにMCTのみ摂取は糖質摂取のみと比較し、タイムトライアル中の血中乳酸濃度は有意に低値を示し、糖質酸化量も低値を示した。この研究はJeukendrupらによる追試が行われ¹⁷⁾、最大酸素摂取量の60%に相当する強度で2時間運動、続けて15分間のタイムトライアルを実施し通算85gのMCTを摂取させたが、その有効性は認められず一貫した結果が得られなかった。Van Zylらの研究では、運動中の基質酸化はMCT+糖質摂取と糖質摂取のみとの間に有意な違いを認めたのに対し、Jeukendrupらの追試では糖質摂取のみとMCT+糖質摂取との間に違いを認めず、MCT摂取のみとの間では有意な違いがあるなど、運動中の基質酸化の状況は研究間で異なっていた。対象者の違いに加え、タイムトライアルの時間が短かったことも一貫した結果が得られなかった理由として挙げられている。

この研究分野では糖質摂取が重要であることは十分に理解された上で、追加のエネルギー基質によるさらなる運動パフォーマンス向上を達成させる手法を発見することが重要課題となって研究が進んできた。運動前や運動中のMCT摂取は、その最大基質酸化量を維持する量を持続的に摂取させ、中強度運動を3時間継続させるといった長時間運動の場合に運動パフォーマンス向上を認めることが示されたものの、この研究報告以外には有効な結果は示されておらず、また、MCTは糖質と同様に体内での酸化速度に上限があり、必要以上のMCT摂取は効果のないことも示されており、MCT摂取の有用性は未だ課題として捉えられている。より少量の摂取、あるいは、より短時間の運動中に有効な結果を示すことが、胃腸に不快感を与えずに摂取可能で、適用できる競技の種類や運動様式を広げることにつながると考えられる。

4 運動前や運動中のケトン体摂取が運動中パフォーマンス、代謝に与える影響

運動前や運動中にMCTを摂取する研究では、血中ケトン体を上昇させることで運動パフォーマンスを向上させる可能性も検討されてきた。食事内容の変更によるケ

トン体の効果を検討する研究は、MCT摂取の他にも絶食や低糖質高脂肪食 (Low-carbohydrate, high-fat diet, LCHF食) など、いわゆるケトジェニックな食事でも検討されている。食事内容の変更は、ケトン体の上昇だけでなく、血中遊離脂肪酸の上昇、糖質摂取の制限による血糖値の上昇抑制やインスリン分泌の低下など、様々な変化を伴い、運動中の代謝やパフォーマンス向上に対し単純にケトン体上昇による作用であるか、十分に見分けることが困難であると指摘されている。また、糖質摂取の有無に関わらず、MCT摂取は運動パフォーマンスに寄与する程度まで十分に血中ケトン体濃度が上昇しないと報告された¹⁸⁾。これらのことから、次第にケトン体そのものを摂取させる研究へとシフトしていったと考えられる。

現在、ケトン体のNa塩・Ca塩・K塩、モノおよびジエステルなどのケトン誘導体は、食品成分として米国を中心に市販されているが、その塩化物の多量摂取はMCTと同様に胃腸の不快感が生じやすいことなどを理由に主にはエステル体が使われており、欧州でも利用されている。それらは摂取後すみやかに血中 β HB濃度を1 mM以上に上昇させてケトシスを生じさせる。これはグリコーゲン利用を抑え、糖質代謝の高まりによって生じる乳酸の産生を低下させ、筋肉内に存在するIMTGへの依存度を高めて、運動中に使用するエネルギー基質を変化させる。 β HBはシグナル伝達物質として作用してヒストン脱アセチル化酵素 (HDAC) を抑制、骨格筋に対し蛋白合成を促進させるなどの調節をする可能性も報告されている¹⁸⁾。この作用を認めてもなお、ケトン食やケトン誘導体の摂取は短時間に大きな筋力を発揮するパワー系競技や短距離種目のためでなく、間欠的に繰り返し高強度運動を行うチーム競技や持続的な長距離種目のために有用な食事と考えられている。

5 中鎖脂肪酸の継続摂取による運動中の脂肪酸化とパフォーマンスへの影響

中鎖脂肪酸は運動前や運動中に摂取する研究から、継続摂取の影響を検討する研究へと進展した。少量から多量摂取の複数の検討が行われ、対象者の脂肪酸化能力に合わせた運動強度と時間で評価した研究では、少量でも継続摂取により中強度運動時の脂肪酸化促進やその後の高強度運動時の運動パフォーマンスに好影響を与えるなどのいくつかの結果が報告されている。

MCTの継続摂取は、脂肪の摂取比率を増やさずとも、高脂肪食の継続摂取と同様に運動中の脂肪利用亢進作用を示すことが1995年に報告された。普通の脂肪摂取比率でMCTを6週間摂取させ、週1回の頻度で運動トレ

ニングを行ったマウスでは、一般的な油脂を摂取させたときに比較し、ケトン体酸化関連酵素を含めた脂肪酸代謝が高まる結果、血中乳酸濃度が低く (MCT: 2.33 ± 0.22 mmol/L, 対照: 3.66 ± 0.33 mmol/L, 平均値 $\pm$ SD), 中強度運動時の遊泳時間は延長した (MCT: 74.3 ± 2.1 分, 対照: 67.5 ± 1.8 分, 平均値 $\pm$ SD)。一方, MCT を 1 回摂取させただけでは, 中強度運動時の血中乳酸濃度や遊泳時間に違いは認められなかった¹⁹⁾。MCT の継続摂取により脂肪酸化を亢進させた条件下で中強度運動を行うと脂肪酸やケトン体の利用を高め, 持久的運動能力を向上させる可能性が示されたことから, その後ヒトを対象とした研究が行われた (Table 1)。

2001 年に行われた Ööpik らの研究²⁰⁾では, 一日 35 g の MCT を 2 回に分け 7 日間摂取させた後, 最大酸素摂取量の 80% に相当する強度で疲労困憊まで運動させた。運動の持続時間は等量の LCT 摂取と比べて有意差を認めなかった。また, 7 人中 5 人に胃腸の不快状態を認めた。βHB 濃度は運動終了後に高値を示した。MCT の継続摂取がケトン体の産生亢進を認めたものの, 運動パフォーマンスには変化がなく, 一日 17 g の MCT を 2 回摂取させる場合でも胃腸の不快状態には注意が必要だとしている。MCT を一日 60 g, 2 週間摂取させた後に運動させた Misell らの研究²¹⁾では, 最大酸素摂取量の 85% に相当する強度で 30 分間運動させた後, 75% に相当する強度で疲労困憊まで運動させた。LCT を一日 56 g 摂取させたときと比較し, 疲労困憊までの運動持続時間, 血中の乳酸や βHB の濃度にも有意差を認めなかった。血中中性脂肪は MCT 摂取で増加, 運動中の呼吸交換比 RER は高値を示し, MCT 摂取は糖質の同化と酸化の双方を促進する可能性も考えられた。Ööpik らの研究では試験食の違いに関わらず 7 日間でどちらも体重が減少していたが, Misell らの研究では体重の変化が

ない条件下で運動負荷による評価が行われた。いずれの研究も高強度運動時の評価が行われ, 糖質以外のエネルギー供給の寄与による運動パフォーマンス向上が検討されたものの, 有効な結果は得られなかった。

筆者らの研究グループでは, 一日 6 g の MCT を 2 週間摂取させる検討を行った。運動愛好者を対象にしたクロスオーバー試験は 2 回行い, いずれも 2 週間 MCT を継続摂取させた後, (1) 最大酸素摂取量の 60% に相当する強度で 40 分間運動, 続けて 80% に相当する強度で疲労困憊まで運動²²⁾, (2) 最大酸素摂取量の 50% に相当する強度で 40 分間運動, 続けて 70% に相当する強度で疲労困憊まで運動²³⁾, と強度を 10% ずつ変更した条件で検討した。最大酸素摂取量の 60% に相当する強度での 40 分間の運動中, 血中乳酸濃度は 4 mM 程度に上昇したが, 比較対照とした LCT 摂取では 6 mM に上昇してその抑制が有意に示された。同 50% 相当強度の運動では, 血中乳酸濃度は 2 mM 程度までしか上昇しない代わりに 40 分間の脂質酸化量は比較対照としたマルチデキストリン摂取に比べて有意に増加し, 反対に糖質酸化量は有意に抑制された (Fig. 2)。続けて行われた同 80% や 70% に相当する強度での運動持続時間はどちらの研究でも MCT 摂取時に有意に時間が延長された。その一方で, アスリートに一日 6.6 g の MCT を摂取させたクロスオーバー試験では, 最大酸素摂取量の 60% に相当する強度で 60 分間運動させた結果, 比較対照である LCT 摂取でも血中乳酸濃度は 3 mM レベルの上昇であって脂質並びに糖質酸化量には違いを認めず, 続けて 85% に相当する強度で疲労困憊まで運動させてもその持続時間には違いを認めなかった (Table 1)²⁴⁾。

これら 3 研究では胃腸の不快感などは報告されず, MCT の少量継続摂取は日常の食生活に取り入れやすいことを認めたものの, 一貫した有効な結果を得ることは

Table 1 Detail in the study that investigated effect of continuous ingestion of medium-chain fatty acids.

duration (d)	daily intake (g/d)	control	workload, % of peak or maximal oxygen uptake	result	exercise time to exhaustion	reference
7	35	LCT	80	MCT $\approx$ LCT	MCT: 3498 ± 559 sec LCT: 3916 ± 1225 sec	Ööpik, et al. (2001)
14	60	LCT	75	MCT $\approx$ LCT	MCT: 99.8 ± 23.5 min LCT: 106.5 ± 29.4 min	Misell, et al. (2001)
14	6	LCT	80	MCT>LCT	MCT: 10.2 ± 7.6 min LCT: 5.8 ± 3.3 min	Nosaka, et al. (2009)
14	6	carbohydrate (CHO)	70	MCT>CHO	MCT: 23.5 ± 19.4 min CHO: 17.6 ± 16.1 min	Nosaka, et al. (2018)
14	6.6	LCT	85	MCT $\approx$ LCT	MCT: 349 ± 119 sec LCT: 386 ± 180 sec	Taguchi, et al. (2012)

Fig. 2 Cumulative values of fat oxidation and carbohydrate oxidation at a workload of 50% peak $\dot{V}O_2$ during cycling after ingestion of a MCT+CHO or CHO meal for 2 weeks. Values are means and error bars are SD. Clear square bars (□) : MCT+CHO; solid square bars (■) : CHO. *Statistically significant difference from the value in the CHO trial ($p < 0.05$).

できなかった。Jeukendrup らの報告にあるように、アスリートでは長時間の運動を行わないと有効な結果を得られない可能性がある。運動愛好者でも、全体で1時間弱という比較的長い運動時間が必要であったことに加え、脂肪利用を高めて糖質利用を抑える結果を得ることと血中乳酸濃度の上昇抑制作用を確かめたりすることではその運動強度が異なっていたことなどから、対象者や運動負荷条件が異なると同じ結果を得られない可能性がこれらの研究から推測される。

6 中鎖脂肪酸の継続摂取による体組成への影響

MCT や中鎖脂肪酸油 (Medium- and long-chain triglycerides, MLCT) を継続摂取した際のスポーツ選手の体組成に関する研究も行われている。

大学ボート部選手を対象にクロスオーバー試験から体脂肪の蓄積性を検討した研究²⁵⁾では、中鎖脂肪酸を約4g含むMLCT 20gを日常の食事に加えて3週間継続摂取させたところ、体脂肪量は比較対照であるLCT摂取に比べ3週間後に有意に低い値を示し、その蓄積性の低いことが肥満でない大学スポーツ選手への介入から示された。また、動物を用いた研究²⁶⁾では、有酸素性運動を週5回行わせたラットと運動を行わないラットにそれぞれMCTとLCTのいずれかを6週間摂取させたところ、内臓脂肪は比較対照であるLCT摂取・運動なしに比べてMCT摂取・運動なしとLCT摂取・運動ありは同程度に減少し、MCT摂取・運動ありはさらに減少していた。皮下脂肪は運動なしではMCTとLCT摂取に違いを認めなかったが、運動ありはMCTとLCT摂

取に違いを認め、MCT摂取では有意に低値を示した。この結果は、体脂肪の蓄積性に対し運動とMCT摂取は相加的に作用することを示している。また、筆者らはオフシーズン期の大学レスリング選手を対象に上肢及び下肢の筋厚ならびに皮脂厚に与える影響をエコー画像解析から検討し²⁷⁾、2か月間の並行群間比較介入によって、その皮脂厚は比較対照であるLCT摂取との違いを認めなかったもののMCT・MLCT摂取で有意に減少し、下肢の筋厚は介入前からLCT摂取で有意に減少したのに対し、MCT・MLCT摂取では有意に増加して二群間の比較でも有意な高値を認めた。MCTやMLCTから一日5g程度の中鎖脂肪酸を摂取したときの筋厚の増加はわずかであったものの、筋量の保持や増進に対して好ましい影響を示す可能性が示された。廃用性筋萎縮モデル動物を用いた研究²⁸⁾では、MCT摂取によって筋量低下が抑制、タンパク分解経路を抑制する結果と合わせて報告されており、摂取する油脂を代えることで筋タンパク分解に対し抑制作用を示す可能性が示されている。

7 おわりに

中鎖脂肪酸摂取が理論上有益だと言われながら、研究の初期には運動パフォーマンス向上や糖質利用の抑制につながらなかった。消化吸收後に発生するエネルギー量が摂取量と見合うのかどうか、求める運動パフォーマンスは脂肪利用が可能な運動強度の範囲にあるか、など十分な情報がなかったことに起因する。研究が進むにつれ、それらの情報に加えて継続摂取による介入研究の報告が増え、LCHF食や中鎖脂肪酸摂取、さらにはケトン体摂

取により運動パフォーマンス向上や糖質利用が抑制される有用な結果が得られ、体組成や筋量にも影響を与える可能性も示されている。しかし、適用可能な競技や運動様式などには限界があり、まだ課題が多く残されている。食事成分を運動、スポーツ分野へ応用・利用する場合には、その運動様式や競技特性、あるいはトレーニング期や試合期などの期分けの理解、なかでも対象とする食事成分の機能性がそれぞれの運動や競技のどの場面で求められるか、あるいは獲得したい身体等指標と合致するか、ということは重要であり、その適用条件や範囲はできるだけ正確に示すことが、当該分野での利用には必要である。最近、欧州食品安全委員会(EFSA)が示した文献²⁹⁾を付した。ぜひ参考にさせていただきたい。

文 献

- 1) Mul, J. D.; Stanford, K. I.; Hirshman, M. F.; Goodyear, L. J. Exercise and regulation of carbohydrate metabolism. *Prog. Mol. Biol. Transl. Sci.* **135**, 17-37 (2015).
- 2) Zunz, N. Ueber der Stoffvenbrauch des Hundes bei Muskelarbeit. *Pfugers. Archiv. für Physiologie* **68**, 191-221 (1897).
- 3) Maughan, R.; Gleeson, M.; Greenhaff, P. L. スポーツとトレーニングの生化学. (谷口正子, 大野秀樹, 谷口直之 監訳). メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京 (1999).
(Maughan, R.; Gleeson, M.; Greenhaff, P. L. *Biochemistry of Exercise and Training*, Oxford University Press (1997).)
- 4) Peter, C. D. The effect of isokinetic exercise on the relationship between blood lactate and muscle fatigue. *J. Orthopaed. Sports Physic. Ther.* **17** (1), 31-35 (1993).
- 5) Edwards, H. T.; Margaria, R.; Dill, D. B. Metabolic rate, blood sugar and the utilization of carbohydrate. *Am. J. Physiol.* **108**, 203-209 (1934).
- 6) van Loon, L. J. C.; Greenhaff, P. L.; Constantin-Teodosiu, D.; Saris, W. H.; Wagenmakers, A. J. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *J. Physiol.* **536**, 295-304 (2001).
- 7) Romijn, J. A.; Coyle, E. F.; Sidossis, L. S.; Gastaldelli, A.; Horowitz, J. F.; Endert, E.; Wolfe, R. R. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* **265**, E380-E391 (1993).
- 8) 青山敏明. 中鎖脂肪酸の栄養学的研究 - 最近の研究を中心に -. オレオサイエンス **3**, 403-410 (2003).
(Aoyama, T. Nutritional studies on medium-chain fatty acid -From the recent research-. *Oleosience* **3**, 403-410 (2003).)
- 9) 竹内弘幸. 食餌脂肪の分子種と体脂肪蓄積に関する研究. 日本栄養・食糧学会誌 **57**, 51-58 (2004).
(Takeuchi, H. Studies on molecular species of dietary fat and body fat accumulation. *Journal of Japan Society of Nutrition and Food Science* **57**, 51-58 (2004).)
- 10) Ivy, J. L.; Costill, D. L.; Fink, W. J.; Maglischo, E. Contribution of medium and long chain triglyceride intake to energy metabolism during prolonged exercise. *Int. J. Sports Med.* **1**, 15-20 (1980).
- 11) Décombaz, J.; Arnaud, M. J.; Milon, H.; Moesch, H.; Philippoian, G.; Thélén, A. L.; Howald, H. Energy metabolism of medium-chain triglycerides versus carbohydrates during exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **52**, 9-14 (1983).
- 12) Massicotte, D.; Peronnet, F.; Brisson, G. R.; Hillaire-Marcel, C. Oxidation of exogenous medium-chain fatty acids during prolonged exercise: comparison with glucose. *J. Appl. Physiol.* **73**, 1334-1339 (1992).
- 13) Sidossis, L. S.; Gastaldelli, A.; Klein, S.; Wolfe, R. R. Regulation of plasma fatty acid oxidation during low- and high-intensity exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **272**, E1065-1070 (1997).
- 14) Jeukendrup, A. E.; Saris, W. H.; Schrauwen, P.; Brouns, F.; Wagenmakers, A. J. Metabolic availability of medium-chain triglycerides coingested with carbohydrates during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* **79**, 756-762 (1995).
- 15) Van Zyl, C. G.; Lambert, E. V.; Hawley, J. A.; Noakes, T. D.; Dennis, S. C. Effects of medium-chain triglyceride ingestion on fuel metabolism and cycling performance. *J. Appl. Physiol.* **80**, 2217-2225 (1996).
- 16) Jeukendrup, A. E.; Saris, W. H. M.; Van Diesen, R.; Brouns, F.; Wagenmakers, A. J. M. Effect of endogenous carbohydrate availability on oral medium-chain triglyceride oxidation during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* **80**, 949-954 (1996).
- 17) Jeukendrup, A. E.; Thielen, J. J.; Wagenmakers, A. J.; Brouns, F.; Saris, W. H. Effect of medium-chain triacylglycerol and carbohydrate ingestion during exercise on substrate utilization and subsequent cycling performance. *Am. J. Clin. Nutr.* **67**, 397-404 (1998).
- 18) Evans, M.; Cogan, K. E.; Egan, B. Metabolism of ketone bodies during exercise and training: physiological basis for exogenous supplementation. *J. Physiol.* **595**, 2857-2871 (2017).
- 19) Fushiki, T.; Matsumoto, K.; Inoue, K.; Kawada, T.; Sugimoto, E. Swimming endurance capacity of mice is increased by chronic consumption of medium-chain triglycerides. *J. Nutr.* **125**, 531-539 (1995).
- 20) Ööpik, V.; Timpmann, S.; Medijainen, L.; Lemberg, H. Effects of daily medium-chain triglyceride ingestion on energy metabolism and endurance performance capacity in well-trained runners. *Nutr. Res.* **21**, 1125-1135 (2001).
- 21) Misell, L. M.; Lagomarcino, N. D.; Schuster, V.; Kern, M. Chronic medium-chain triacylglycerol consumption and endurance performance in trained runners. *J. Sports Med. Physic. Fit.* **41**, 210-215 (2001).
- 22) Nosaka, N.; Suzuki, Y.; Nagatoishi, A.; Kasai, M.; Wu, J.; Taguchi, M. Effect of ingestion of medium-chain triacylglycerols on moderate- and high-intensity exercise in

- recreational athletes. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* **55**, 120-125 (2009).
- 23) Nosaka, N.; Suzuki, Y.; Suemitsu, H.; Kasai, M.; Kato, K.; Taguchi, M. Medium-chain triglycerides with maltodextrin increase fat oxidation during moderate-intensity exercise and extend the duration of subsequent high-intensity exercise. *J. Oleo Sci.* **67**, 1455-1462 (2018).
- 24) 田口素子, 渡邊まいみ, 野坂直久, 山澤文裕. 中鎖脂肪酸の短期的な摂取がアスリートの中・高強度運動時の基質酸化とパフォーマンスに及ぼす影響. *日本スポーツ栄養研究誌* **5**, 15-23 (2012).
(Taguchi, M. *et al.* Effects of short-term ingestion of medium-chain triacyl glycerol on substrate oxidation and endurance performance at moderate- and high-intensity exercise in female collegiate athletes. *Japanese Journal of Sports Nutrition* **5**, 15-23 (2012).)
- 25) Takeuchi, H.; Kasai, M.; Taguchi, N.; Tsuji, H.; Suzuki, M. Effect of triacylglycerols containing medium- and long-chain fatty acids on serum triacylglycerol levels and body fat in college athletes. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* **48**, 109-114 (2002).
- 26) Ooyama, K.; Wu, J.; Nosaka N.; Aoyama, T.; Kasai, M. Combined intervention of medium-chain triacylglycerol diet and exercise reduces body fat mass and enhances energy expenditure in rats. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* **54**, 136-141 (2008).
- 27) 野坂直久, 久木留毅, 鈴木佳恵, 笠井通雄, 青山敏明, 近藤和雄, 田口素子, 佐藤満, 河野一郎. 中鎖脂肪酸を構成成分とするトリアシルグリセロール摂取が男子レスリング選手の筋肉厚と血液成分に及ぼす影響. *日本臨床栄養学会雑誌* **33**, 12-21 (2011).
(Nosaka, N. *et al.* Effect of triacylglycerol consisting of medium-chain fatty acids on muscle thickness and body composition in male college wrestlers. *Journal of Japanese Society of Clinical Nutrition* **33**, 12-21 (2011).)
- 28) Nishimura, S.; Inai, M.; Takagi, T.; Nonaka, Y.; Urashima, S.; Honda, K.; Aoyama, T.; Terada, S. Preventive effects of the dietary intake of medium-chain triacylglycerols on immobilization-induced muscle atrophy in rats. *J. Oleo Sci.* **66**, 917-924 (2017).
- 29) EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies), Turck, D.; Bresson, J. L.; Burlingame, B.; Dean, T.; Fairweather T. S.; Heinonen, M.; Hirsch, E. K. I.; Mangelsdorf, I.; McArdle, H.J.; Naska, A.; Neuhäuser, B. M.; Nowicka, G.; Pentieva, K.; Sanz, Y.; Sjödin, A.; Stern, M.; Tomé, D.; Van Loveren, H.; Vinceti, M.; Willatts, P.; Martin, A.; Strain, S. J. J.; Siani, A. Carbohydrate solutions and contribute to the improvement of physical performance during a high-intensity and long-lasting physical exercise: Evaluation of a health claim pursuant to Article 13 (5) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA J.* **16**, 5191 (2018).