

依頼総説

競技選手における糖質と脂質の摂取比率に関する最近の知見

寺田 新、柄澤 拓也、小池 温子、深澤 歩

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系

競技選手における糖質と脂質の推奨摂取量として、それぞれエネルギー比で55～60%、25～30%という値が示されてきた。しかしながら、近年、この推奨範囲を大きく超えるような食事を摂取しているエリート選手の事例がいくつか報告されている。本総説では、1) 超高脂質・低糖質食、2) 超高糖質・低脂質食、3) 中程度脂質食という極端な組成の食事が骨格筋の代謝機能に及ぼす影響について、我々の研究室で最近得た知見を紹介する。それぞれの食事にはメリットとデメリットがあり、全ての競技において有効となるような万能な摂取比率などは存在しない。試行錯誤を重ねながら、各競技の特性や個人個人の体質にあわせて、糖質と脂質の最適な摂取比率を選択する必要があると考えられる。

キーワード：高糖質食 高脂質食 骨格筋 ミトコンドリア 脂肪酸酸化

I はじめに

運動時の主なエネルギー源は糖質と脂質であるが、体内貯蔵量の少ない糖質をより多く摂取することがこれまで推奨されてきた。例えば、日本体育協会（現：日本スポーツ協会）から発表されているガイドライン¹⁾では、糖質と脂質のエネルギー摂取比率として、それぞれ55～60%、25～30%という値が示されている（最近では、エネルギー比率の基準値を満たせたとしても、総エネルギー摂取量が少ない場合には不足状態になってしまうため、体重あたりの摂取量（g）で示した方が良いとされている）。しかしながら、近年、このような推奨摂取範囲から大きく逸脱するような食事を摂取しているトップアスリートの事例が報告されており、それによって実際にパフォーマンスが向上したという経験談も示されている。私たちの研究室では、このような、ある意味「非常識」とも思える食事戦略による効果やそのメカニズムについて検討しており、本総説では我々がこれまでの研究で得た知見をまとめて紹介させていただく。

II 超高脂質・低糖質食による効果

国際的なスポーツ栄養のガイドライン²⁾では、脂質の摂取法に関して、1) 一般人向けのガイドラインの

基準値を参考にしながら、個々の選手のトレーニング状況や身体組成に応じて個別化をはかる必要があること、2) 減量時において脂質の摂取量を極端に制限するケースがみられるが、そのような場合でも脂質の摂取量はエネルギー比で20%未満とならないようにすべきであることが示されている。その一方で、運動時の脂質利用能力を高めるために（それによって、体内貯蔵量の少ない糖質を節約するために）、上記のような推奨範囲をはるかに超える量の脂質を摂取している選手もみられる。運動中の脂質利用能力は、骨格筋のミトコンドリア系酵素、特に脂肪酸の β 酸化に関わる酵素の発現量が増えることで高まる。脂肪酸の β 酸化に関わる酵素の多くは、細胞の核内に存在する核内受容体 Peroxisome proliferator-activated receptor β/δ (PPAR β/δ) によって、その発現量が調節されているが、脂質を多量に摂取した場合には、血中遊離脂肪酸濃度の上昇にともなって、このPPAR β/δ が活性化され、脂肪酸の β 酸化に関わる酵素の発現量さらには脂肪酸酸化能力が高まる（図1）³⁾。

骨格筋の脂肪酸酸化能力を高めるための高脂質食の一つの形態として、糖質の摂取量をできるだけ少なくする一方、脂質の摂取量を極限まで高めるという「超高脂質・低糖質食」が近年注目を集めている。超高脂質・低糖質食と呼ばれる食事では、糖質と脂質のエネルギー比率がそれぞれ5%と80%程度となっており

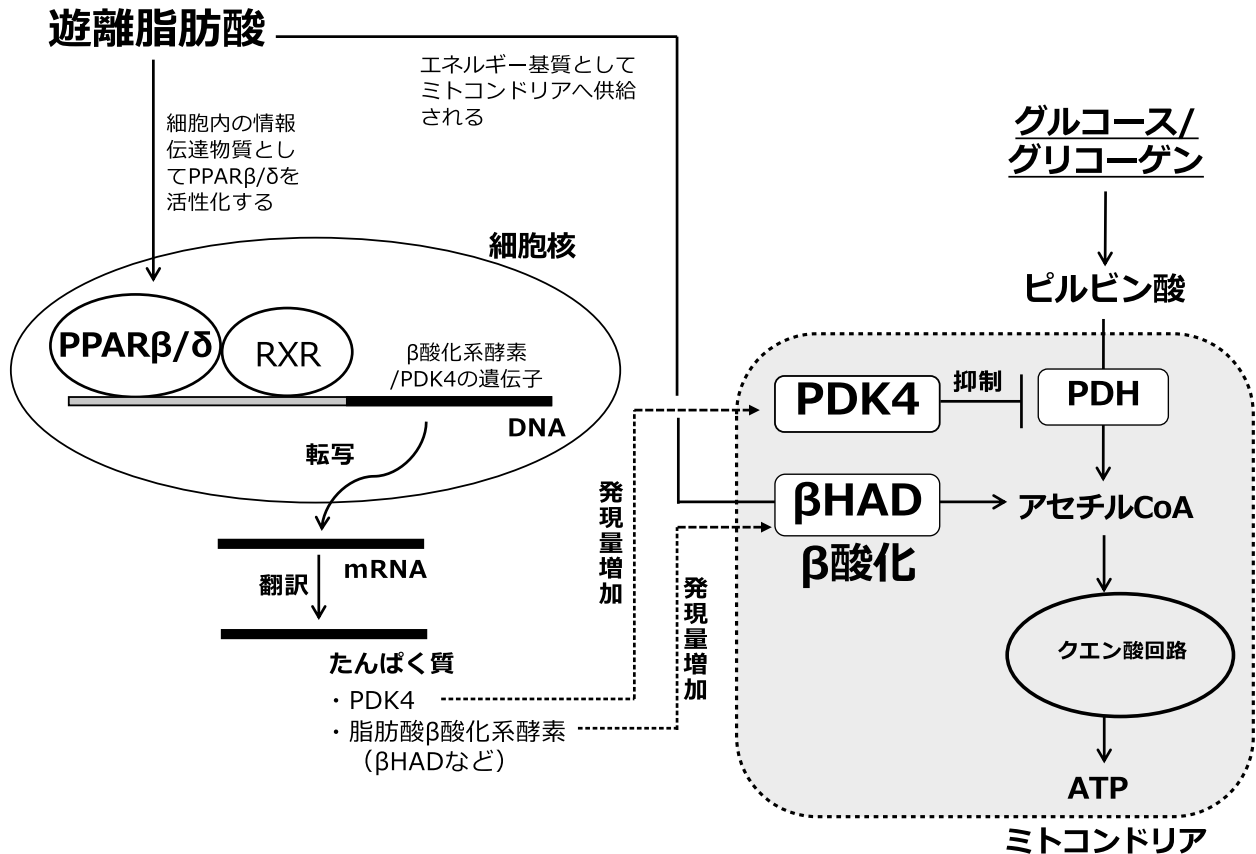
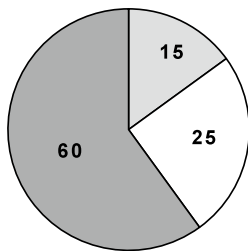
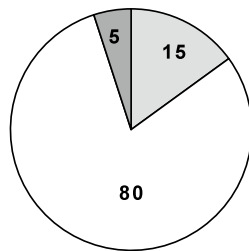


図1 脂肪酸による遺伝子発現とエネルギー代謝の調節機構

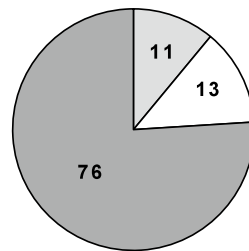
一般的なスポーツ選手
向けの食事内容



超高脂質・低糖質食



超高糖質・低脂質食



中程度脂質食

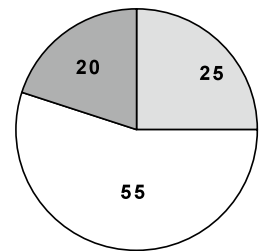


図2 本総説で取り扱っている各食事のPFC比 (図中の数値の単位は%)

(図2)、このような食事を摂取した場合には、血中のケトン体濃度が上昇することから、「ケトン食」とも呼ばれる。この超高脂質・低糖質食に関する研究は数多く行われているが、そこで報告されているメリットとデメリットを図3にまとめた。最も大きなメリットは、上述したような脂肪酸酸化能力の向上効果がよ

り大きく得られることである。例えば、超高脂質・低糖質食を9～36ヶ月間にわたって摂取した持続的競技選手では、中強度の長時間運動中に消費したエネルギーの90%以上が脂質によって賄われるようになること、また、より高い強度で運動を行なっても、脂質をエネルギー基質として利用できるようになることなど

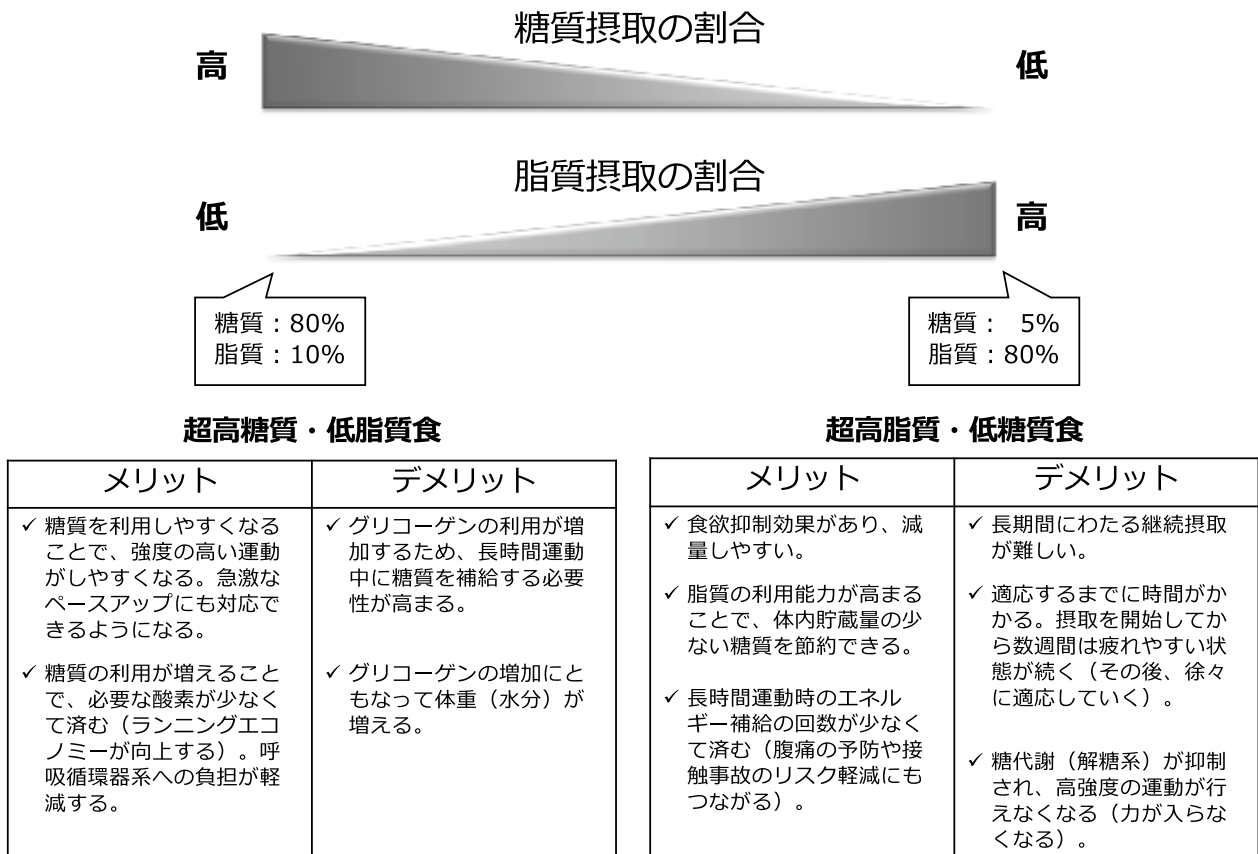


図3 超高脂質・低糖質食と超高糖質・低脂質食のメリットとデメリット

が示されている⁴⁾。このように、脂質酸化能力が高まることで、体内貯蔵量の少ない糖質が枯渇するのを防ぐことができ、より長時間にわたって運動を持続することが可能になる。

一方、超高脂質・低糖質食に対して適応しすぎた場合には、糖質を使いづらくなり骨格筋になってしまうことも知られている。糖質は高強度運動時に必要となるエネルギー基質であることから、このような状態になると、大きな力を発揮することができなくなり、高強度運動時のパフォーマンスが低下することになる。実際、超高脂質・低糖質食を継続して摂取することで、坂道でペダルを踏み込めなくなったという自転車選手の症例も報告されている⁵⁾。超高脂質・低糖質食を摂取することで糖質が利用できなくなる要因の一つとして、Pyruvate dehydrogenase kinase 4 (PDK 4) と呼ばれる酵素の発現量が増加することが挙げられる。このPDK 4は、解糖系における重要酵素であるPyruvate dehydrogenase (PDH) をリン酸化し、その働きを弱めることで、解糖系を抑制する作用を持つ（図1）。超高脂質・低糖質食を長期間摂取した場合には、このPDK 4が骨格筋で顕著に増加することが報告されており⁶⁾、その結果、運動時に糖質を利用しようと

思っても利用できず、高強度の力発揮が阻害されることになる。このPDK 4は、脂肪酸の β 酸化に関わる酵素群と同様に、遊離脂肪酸およびPPAR β/δ による発現調節を受ける遺伝子（酵素）でもある（図1）。

以上のようなメリットとデメリットを考慮すると、超高脂質・低糖質食は、ウルトラマラソンのように、低強度で超長時間にわたって行われる競技においては有効な手法となる可能性が高い。また、体内に多量に存在する体脂肪を有効活用できるようになるため、運動中のエネルギー補給の回数を減らすことが可能となる。このような特徴から、最近では、戦場という厳しい環境において任務を果たさなければならない兵士に対する食事戦略としても注目を集めている⁷⁾。兵士は、長時間にわたって作業を行うことが多く、その際、エネルギー補給が必要不可欠となる。しかしながら、身軽な状態で任務を行えた方が良いため、荷物をできるだけ少なくすることも必要になる。超高脂質・低糖質食に適応できている場合には、体内に多量に存在する体脂肪を活用できることから、携行する食料を減らすことができ、より有利な状況で任務につくことができる。一方、長時間運動であっても、高強度の運動を実施しなければならないような競技においては、糖代

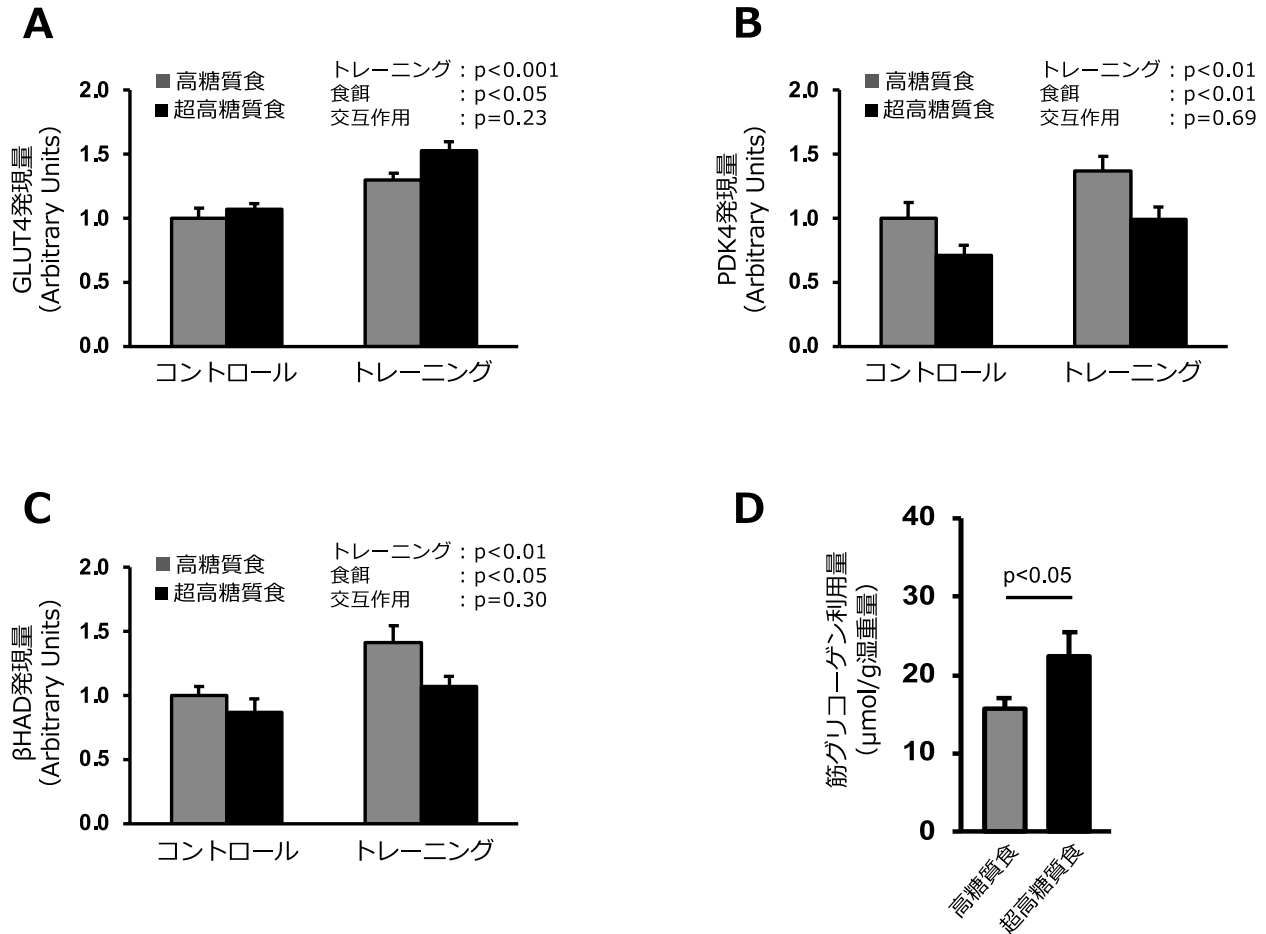


図4 超高糖質・低脂質食と持久的トレーニングが骨格筋のGLUT 4 (A)、PDK 4 (B) および β HAD (C) の発現量と一過性運動中の筋グリコーゲン利用量 (D) に及ぼす影響 (文献10より引用・一部改変)

謝を抑制してしまう超高脂質・低糖質食は好ましくない食事戦略であると考えられる。

Ⅲ 超高糖質・低脂質食による効果

先述したように、一般的な競技選手に対して推奨されている糖質のエネルギー摂取比率は、60%程度である¹⁾。一方、現在、世界のマラソン界を席巻しているケニア人長距離選手では、普段よく摂取している飲料(チャイ)や主食(ウガリ)に糖質が多く含まれているため、その摂取比率が76%にもおよぶ(脂質はエネルギー比で13%)という調査結果がある⁸⁾。この調査結果には多少の誤差があると思われるものの、彼らの食事は、通常の競技選手に対して推奨されている食事内容に比べてもなお糖質の摂取量が多い「超高糖質・低脂質食」と言える。ケニア人選手の強さの秘密に関しては、脚の細さやフォアフット着地などが関係しているという説が示されているが⁹⁾、この超高糖質・低脂質食もその強さの要因の一つとなっている可能性が

考えられる。そこで、Karasawaら¹⁰⁾は、持久的トレーニングを行いながら、超高糖質・低脂質食を摂取することで、骨格筋においてどのような適応が生じるか検討した。その結果、通常の高糖質食(糖質のエネルギー比率: 60%)を摂取しながらトレーニングを行った場合と比べて以下のような適応・変化が生じることが明らかとなった(図4): 1) 骨格筋で血糖の取り込みを担う糖輸送体GLUT 4の発現量がより大きく増加し、それにともない筋グリコーゲン量も増加した、2) 脂肪酸の β 酸化系酵素の一つである β -hydroxyacyl CoA dehydrogenase (β HAD: この酵素の発現量と運動中の脂肪酸酸化量の間には高い相関関係が認められている¹¹⁾) および解糖系を抑制する作用を持つPDK 4の増加が抑制された。

持久的トレーニングを行なった場合、 β HADをはじめとする β 酸化系酵素の発現量が増加することで、脂肪酸の酸化能力が高まり、同時にPDK 4も増加することで、糖の利用が減り、結果として、糖質が枯渇することなく、長時間にわたって運動を持続できるよ

うになる。一方、超高糖質・低脂質食を摂取した場合にみられる適応は、このような持久的トレーニングで得られる適応を減弱させてしまい、通常の高糖質食を摂取した時よりも糖質が利用されやすい・枯渇しやすい骨格筋になっているようにもみえる。実際、図4に示すように、超高糖質・低脂質食を摂取しながら、持久的トレーニングを行なったラットでは、通常の高糖質食を摂取したラットに比べて、一過性運動中の筋グリコーゲン利用量が高まることも明らかとなっている¹⁰⁾。

このような超高糖質・低脂質食による適応は、果たしてマラソンランナーにとってどのような意味を持つのであろうか？図3に超高糖質・低脂質食のメリットとデメリットを示した。持久的な運動時における主なエネルギー源は、脂質であると言われているが、マラソンを2時間数分という驚異的なタイムで完走するようなエリートランナーは、レース中にほぼ糖質のみを利用していると考えられている¹²⁾。同じエネルギーを生み出す場合、脂質に比べて、糖質を利用したときの方が必要となる酸素が少なくなるため、呼吸循環器系に対する負担も小さくなる。実際、ケニア人ランナーでは、ランニングエコノミーが優れている（同じ速度で走行した際の、酸素消費量が少なく済む）という結果が報告されている¹³⁾。また、糖質をいつでも利用できる身体になっていると、急激にペースアップをしてライバルを揺さぶることもできる（もしくは、そのようなペース変化にもすぐに対応できる）というメリットもある。糖輸送体GLUT 4が増えることで、グリコーゲンローディングによってより多くの筋グリコーゲンを貯蔵できるようになるという利点も挙げられるが、一方で、体重（水分）が増加することや、グリコーゲンを利用しやすくなっているため、その枯渇を防ぐために糖質を十分に補給できるような対策を講じなければならないといった点がデメリットとして挙げられる。最近、ケニア人ランナーを中心に、マラソンレース中にアルギン酸やペクチンを配合した高濃度の糖質ドリンクを摂取する選手が増えているが¹⁴⁾、超高糖質・低脂質食を摂取し、運動中の糖質利用能力が向上しているランナーでは、そのように多量に摂取した糖質をレース中に有効に活用することができ、またそれによって糖質が枯渇するのを予防できているのかもしれない。

IV 中程度脂質食による効果

以上のように、糖質と脂質、それぞれ多く摂取した方のエネルギー基質を利用する能力が高まるものの、もう一方の基質を使いづらい体質になることがわかる。したがって、全ての競技選手にとって有効となるような完璧・万能な唯一の摂取比率などはありえず、

それぞれの競技特性や自分の体質にあった比率がどのようなものであるか、実際に自ら試しながら検討する必要がある。そのような検討を行ううえで参考になる一例（サッカー選手の事例）を以下に示す。

サッカーは前・後半あわせて90分間という長時間にわたって行われることから、筋グリコーゲンが減少・枯渇することがパフォーマンス低下の主な要因であると考えられてきた。実際、サッカー選手を対象とした調査において、前半終了時点で筋グリコーゲンが約70%減少し、試合終了時には、さらにその半分にまで減少することが報告されている¹⁵⁾。そのようなサッカー選手に対しては、グリコーゲンの枯渇を防ぐために、高糖質食を摂取することがこれまで推奨されてきた。一方、最近、あるサッカー選手が自らの食事法を、書籍¹⁶⁾などを通じて発信しており、その食事内容は超高脂質・低糖質食と超高糖質食・低脂質食の中間型の（やや脂質量の多い）「中程度脂質食」と呼べるようなものであった。個人的な経験談ではあるものの、このような食事を摂ることでコンディションが改善され、パフォーマンスも向上したということが伝えられている。中程度脂質食が本当に有効なのかどうかを検討する上では、サッカー選手を対象としてランダム化比較試験を行い、その効果を検証することが必要であるが、我々は、まずその食事で骨格筋の代謝機能にどのような適応が生じるのか、動物実験において検討することとした。小池ら¹⁷⁾は、実験動物（マウス）に対して、試合中のサッカー選手の動きを模した高強度・間欠的走行運動と一定強度の持久的走行運動を組み合わせたトレーニングを週5日の頻度で行わせるとともに、糖質と脂質の配合比率が異なる飼料を摂取させながら、8週間飼育した。その結果、先述したように、超高脂質・低糖質食を摂取しながらトレーニングを行なったマウスの骨格筋では、脂肪酸の β 酸化における重要酵素である β HADならびに解糖系抑制酵素のPDK 4が大きく増加していた（図5）。一方、中程度脂質食を摂取したマウスでは、PDK 4の発現量は増加することなく、さらに、超高脂質・低糖質食ほどではないものの、 β HADの発現量が増加していた。つまり、この結果は、中程度脂質食は、糖質の利用能力を低下させることなく、脂質利用能力をある程度高めることができる食事戦略であるという可能性を示唆している。

欧米のエリートサッカー選手を対象として行われた調査では、試合中の動きのうち、約90%が歩行やジョギングといった低強度の運動であり、ダッシュなどの高強度運動はごくわずか（10%程度）であったことが報告されている¹⁸⁾。通常、低強度運動時における主なエネルギー基質は脂質であることから、この分析結果に基づけば、サッカー選手に求められるものは、脂質を主なエネルギー基質として利用しながら、必要に応

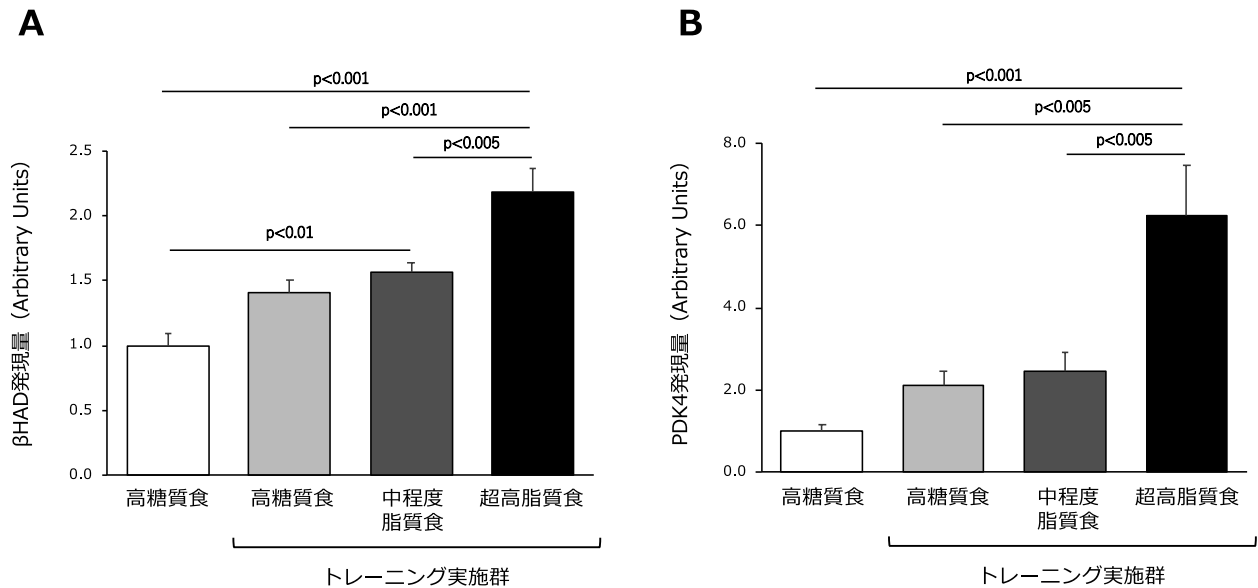


図5 中程度脂質食と高強度・間欠的および持久的な走行トレーニングが骨格筋の β HAD (A) およびPDK 4 (B) の発現量に及ぼす影響 (文献17より引用・一部改変)

じて糖質を使い、高強度運動を行うという能力であると言える。したがって、グリコーゲンの枯渇を防ぐために、これまで高糖質食が推奨されてきたものの、それによってグリコーゲンが利用されやすい状況となり、試合の大部分を占める低強度運動時においても無駄にグリコーゲンを利用してしまっていたという可能性もありうる。一方、これまでとは逆の発想、すなわち、脂質を多めに摂取し、糖質の利用能力を低下させない程度に脂質の利用能力を高めるという手法も、新たな考え方であると言えなくもない。

上記のように、トレーニングだけではなく、食事内容も骨格筋の代謝能力に対して大きな影響を及ぼす。糖質を多く摂取すれば、糖質を利用しやすい骨格筋となり、逆に、脂質を多く摂取すれば、脂質を利用しやすい骨格筋へと変化・適応する。糖質と脂質どちらを利用しやすいほうが有利となるかは、それぞれの競技特性によって異なるため、その競技特性にあわせて、糖質と脂質の摂取比率を検討しなければならない。つまり、すべての競技において有効となるような完璧な糖質と脂質の摂取比率は存在しないと言えよう。また、ケニア人ランナーや世界で活躍するサッカー選手のような、トップアスリートにおいて有効であった食事が、国内レベルや一般のスポーツ愛好家のような人たちにとっても有効なものになるとは限らない。したがって、まずはどのような糖質と脂質の摂取比率が自分の競技および自分の体質にとって最適なのか？ということを実際に色々と試してみる必要があるだろう。

V 機能性脂質の活用

上述したように、超高脂質・低糖質食を摂取した場合には、糖質の利用能力が低下することが最大のデメリットとなるが、そのようなデメリットを生じさせることなく、脂質の利用能力を向上させる可能性がある手法の一つとして「中鎖脂肪酸油 (Medium-Chain Triglyceride: MCT)」と呼ばれる機能性脂質がある。日常的に我々が摂取している油脂の主な構成成分は、炭素数が12~22個の長鎖脂肪酸であるが、MCTを構成する中鎖脂肪酸は炭素数が8もしくは10個と鎖長が短く、消化・吸収経路および代謝経路が長鎖脂肪酸とは大きく異なる¹⁹⁾ (炭素数が12個のラウリン酸も中鎖脂肪酸として分類される場合がある)。長鎖脂肪酸で構成されるトリグリセリド (Long-Chain Triglyceride: LCT) は、膵リパーゼによって2つの脂肪酸とモノグリセリドへと分解されたのち小腸から吸収される。吸収後、トリグリセリドへと再合成され、リンパさらには体循環へと運ばれる。一方、MCTは、リパーゼで分解されたのち、再合成されることなく、門脈から吸収され、直接肝臓へと運ばれる。さらに、肝臓においても、長鎖脂肪酸はミトコンドリアに流入する量が制限されるのに対して、中鎖脂肪酸はその量が制限されることなく、ミトコンドリア内へと流入し、代謝されることになる。肝臓 (のミトコンドリア) は、ケトン体の主な産生場所であり、絶食時などにおいて多量の脂肪酸が肝臓に流入した際に、ケトン体が産生される。中鎖脂肪酸は、上記のような特徴を持つことから、それを多く摂取した際には、絶食時と同じように

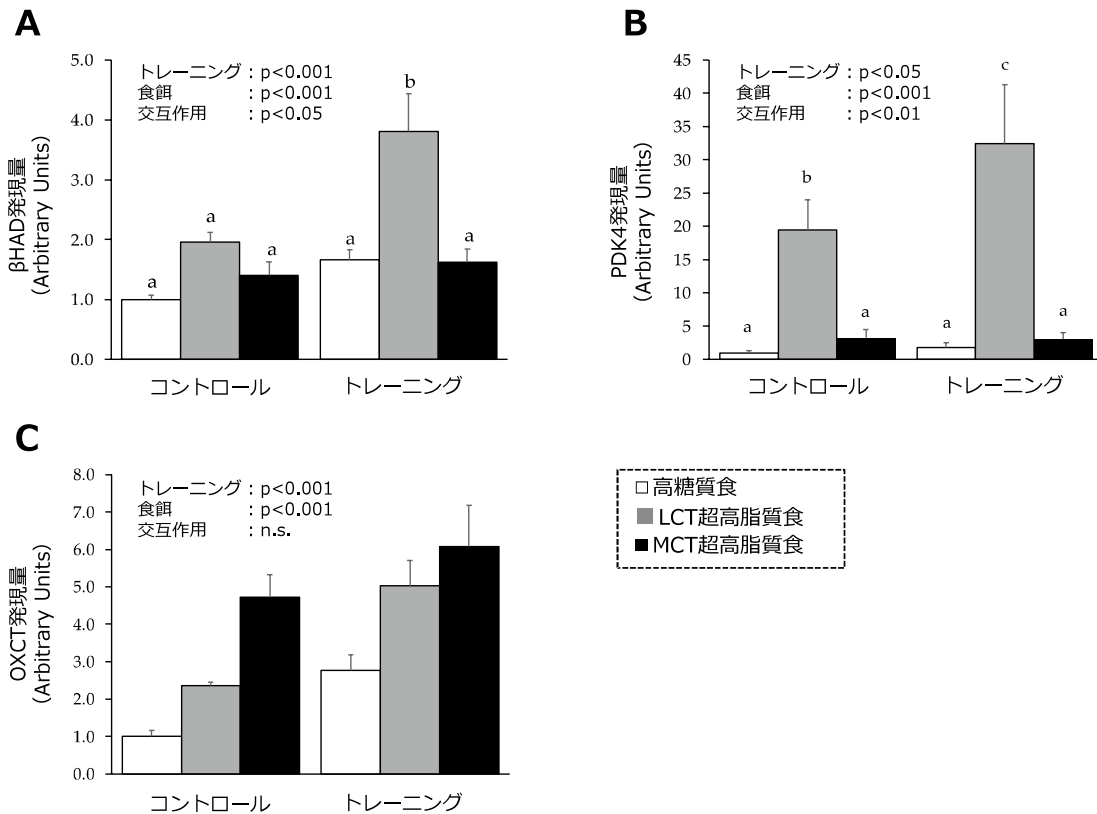


図6 MCT（中鎖脂肪酸油）もしくはLCT（長鎖脂肪酸油）を用いた超高脂質食と持久的トレーニングが骨格筋の β HAD（A）、PDK 4（B）およびOXCT（C）の発現量に及ぼす影響（文献21より引用・一部改変）交互作用が認められた β HADとPDK 4に関しては、アルファベット（a、b、c）が異なる群間で有意差があることを意味する。

肝臓でのケトン体の産生が大きく増加する²⁰⁾。

Fukazawaら²¹⁾は、このような特徴を有するMCTを含む超高脂質・低糖質食を摂取しながら持久的トレーニングを行った場合の効果について実験動物（ラット）を対象に検討を行なった。まず、LCT（大豆油）を用いた超高脂質・低糖質食を摂取した群の骨格筋では、先述したように、脂肪酸 β 酸化系酵素である β HADと解糖系抑制酵素であるPDK 4の発現量が顕著に増加する（図6）。特に、持久的トレーニングを行いながら、LCTを用いた超高脂質・低糖質食を摂取した群でその増加が大きく高まる。一方、MCTを用いた超高脂質・低糖質食では、LCTの場合とは異なり、PDK 4の発現量の増加は認められなかった。したがって、MCTを多量に摂取したとしても、解糖系（糖代謝）が抑制される（高強度の運動が妨げられる）可能性は低いと考えられる。さらに、MCTを摂取した群の骨格筋でみられた大きな特徴として、 β HADの発現量は増加しなかったものの、ケトン体を利用する際の律速酵素である3-oxoacid-CoA transferase（OXCT）と呼ばれる酵素の発現量が顕著に増加していたことが挙げられる。つまり、MCTを用いた超高脂質・低糖質食は、1）糖代謝に対する抑制効果

が少なく、2）脂肪酸をそのままの状態で利用する能力を高めることはないものの、脂肪酸をケトン体へと変換し、それを利用する能力を向上させる食事であると考えられる。ケトン体は、脂肪酸よりもエネルギー効率の良いエネルギー基質であること²²⁾や、抗酸化系酵素の発現量を増やす作用があること²³⁾なども報告されており、脂質を脂肪酸のまま利用するよりも、ケトン体へと変換してから利用の方が、メリットが大きいと言われている。以上のことから、MCTを用いた超高脂質・低糖質食は、高強度運動をともなう持久的競技の選手にとって有用な食事法となる可能性が高いと考えられる。

Fukazawaらの研究で用いられていた飼料のPFC比は、LCTとMCTを用いた飼料でそれぞれ12:87:1と16:66:18であった²¹⁾。MCTを用いた超高脂質・低糖質食では、LCTを用いた飼料にくらべて脂質の摂取量が少なくなっているが、これは、MCTの場合、脂質の摂取量をこの程度まで減らしても、血中のケトン体濃度がLCTを用いた場合と同程度に増加するためである（超高脂質・低糖質食では、血中のケトン体濃度を上昇させることが、その効果を得るうえで重要であると考えられていたこともあり、血中ケトン体濃

度を基準に飼料の組成を決定した)。図3で示したように、超高脂質・低糖質食の場合、継続して摂取することが難しいと言われているが、MCTを用いた場合には、食事の脂質の含有量を減らすとともに、糖質を多く配合することができるため、より摂取しやすくなる。さらに、糖質を多く摂取できることで、グリコーゲンの貯蔵量もある程度維持できる食事組成となっている。普段、このように多量のMCTを摂取することはないものの、てんかん患者向けの食事療法の一環として、このような量のMCTが摂取されることがある²⁴⁾。さらに、Fukazawaら²⁵⁾は、この食事を実験動物(ラット)に対して24週間にわたって摂取させても、安全面で大きな問題が生じないことを報告している。今後、ヒトを対象とした介入試験を実施し、その効果や安全性を確かめなければならないことは言うまでもないが、現在のところ、高強度運動をとまなう長時間運動の競技選手にとって有望な栄養戦略となりうる可能性がある。

VI まとめ

以上のように、糖質と脂質の摂取比率の違いによって、トレーニングに対する骨格筋の適応も大きく異なることが明らかとなっている。繰り返し述べてきたように、全ての競技、全ての選手にとって有効となるような完璧な摂取比率などは存在せず、それぞれの競技特性や個人の体質にあわせて選択する必要がある。スポーツの現場において、様々な試行錯誤が今後行われると思うが、サッカー選手の事例のように、その試行錯誤の結果をぜひ症例報告や実践活動報告として学会での一般演題や論文・ショートレポートで発表して頂きたい。たとえそれがネガティブな結果であっても、また、対象者数が少ない症例であっても、知見を一つ一つ積み重ねていくことこそが、日本のスポーツ栄養界の進歩・発展につながるはずである。

謝辞

本総説は、日本スポーツ栄養学会第7回大会のフロンティアセミナーで発表した内容を中心にまとめたものである。発表の機会を与えていただきました第7回大会長・故藤井久雄先生、大会長代理・長橋雅人先生ならびに大会関係者の先生方に感謝致します。

利益相反

以下の申告すべき利益相反状態がある。

寺田 新：共同研究費（日清オイリオグループ株式会社）

文 献

- 1) 日本体育協会スポーツ医科学専門委員会監修：アスリートのための栄養・食事ガイド（2001），第一出版，東京
- 2) Thomas, D.T., Erdman, K.A., Burke, L. M.: American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 48, 543-568 (2016)
- 3) Hancock, C.R., Han, D.H., Chen, M., et al.: High-fat diets cause insulin resistance despite an increase in muscle mitochondria, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 7815-7820 (2008)
- 4) Volek, J.S., Freidenreich, D.J., Saenz, C., et al.: Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners, *Metabolism*, 65, 100-110 (2016)
- 5) Zinn, C., Wood, M., Williden, M., et al.: Ketogenic diet benefits body composition and well-being but not performance in a pilot case study of New Zealand endurance athletes, *J. Int. Soc. Sports. Nutr.*, 14, 22 (2017)
- 6) Chokkalingam, K., Jewell, K., Norton, L., et al.: High-fat/low-carbohydrate diet reduces insulin-stimulated carbohydrate oxidation but stimulates nonoxidative glucose disposal in humans: An important role for skeletal muscle pyruvate dehydrogenase kinase 4, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 92, 284-292 (2007)
- 7) Volek, J.S., LaFountain, R.A., Dituro, P.: Extended Ketogenic Diet and Physical Training Intervention in Military Personnel, *Mil. Med.*, 184, 199-200 (2019)
- 8) Onywera, V.O., Kiplamai, F.K., Boit, M.K., et al.: Food and macronutrient intake of elite kenyan distance runners, *Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab.*, 14, 709-719 (2004)
- 9) Wilber, R.L., Pitsiladis, Y.P.: Kenyan and Ethiopian distance runners: what makes them so good?, *Int. J. Sports. Physiol. Perform.*, 7, 92-102 (2012)
- 10) Karasawa, T., Kondo, S., Fukazawa, A., et al.: Effects of Dietary Fat Restriction on Endurance Training-induced Metabolic Adaptations in Rat Skeletal Muscle, *J. Oleo. Sci.*, 70, 253-262 (2021)
- 11) Kiens, B.: Skeletal muscle lipid metabolism in exercise and insulin resistance, *Physiol. Rev.*, 86, 205-243 (2006)
- 12) Spriet, L.L.: Regulation of substrate use during the marathon, *Sports. Med.*, 37, 332-336 (2007)
- 13) Saltin, B., Larsen, H., Terrados, N., et al.: Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners, *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 5, 209-221 (1995)
- 14) Sutehall, S., Muniz-Pardos, B., Bosch, A.N., et al.: Sports Drinks on the Edge of a New Era, *Curr.*

- Sports. Med. Rep.*, 17, 112-116 (2018)
- 15) Kirkendall, D.T.: Effects of nutrition on performance in soccer, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 25, 1370-1374 (1993)
 - 16) 長友佑都 (著), 山田 悟 (監修): 長友佑都のファットアダプト食事法 カラダを劇的に変える、28 日間プログラム (2019), 幻冬舎, 東京
 - 17) 小池温子, 柄澤拓也, 筒井桃子, 他: 高強度・間欠的および持久的な走行トレーニングに対するマウス骨格筋の糖・脂質代謝機能の適応に及ぼす中程度脂肪食摂取の影響, 日本スポーツ栄養研究誌, 14, 20-29 (2021)
 - 18) Mohr, M., Krstrup, P., Bangsbo, J.: Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue, *J. Sports. Sci.*, 21, 519-528 (2003)
 - 19) Aoyama, T., Nosaka, N., Kasai, M.: Research on the nutritional characteristics of medium-chain fatty acids, *J. Med. Investig.*, 54, 385-388 (2007)
 - 20) Nonaka, Y., Takagi, T., Inai, M., et al.: Lauric Acid Stimulates Ketone Body Production in the KT-5 Astrocyte Cell Line, *J. Oleo. Sci.*, 65, 693-699 (2016)
 - 21) Fukazawa, A., Koike, A., Karasawa, T., et al.: Effects of a Ketogenic Diet Containing Medium-Chain Triglycerides and Endurance Training on Metabolic Enzyme Adaptations in Rat Skeletal Muscle, *Nutrients*, 12, 1269 (2020)
 - 22) Sato, K., Kashiwaya, Y., Keon, C.A., et al.: Insulin, ketone bodies, and mitochondrial energy transduction, *FASEB. J.*, 9, 651-658 (1995)
 - 23) Shimazu, T., Hirschey, M.D., Newman, J., et al.: Suppression of oxidative stress by β -hydroxybutyrate, an endogenous histone deacetylase inhibitor, *Science*, 339, 211-214 (2013)
 - 24) Neal, E.G., Chaffe, H., Schwartz, R.J., et al.: A randomized trial of classical and medium-chain triglyceride ketogenic diets in the treatment of childhood epilepsy, *Epilepsia*, 50, 1109-1117 (2009)
 - 25) Fukazawa, A., Karasawa, T., Yokota, Y., et al.: The Safety of Very-long-term Intake of a Ketogenic Diet Containing Medium-chain Triacylglycerols, *J. Oleo. Sci.*, 70, 989-993 (2021)

Invited Review

Recent findings regarding dietary intakes of carbohydrate and fat in athletes: what is the optimal ratio of carbohydrate-fat in the diet?

Shin TERADA, Takuya KARASAWA, Atsuko KOIKE, Ayumi FUKAZAWA

Department of Life Sciences, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

ABSTRACT

A high-carbohydrate, low-fat diet (55-60% energy from carbohydrates and 25-30% energy from fats) has been recommended as an effective dietary strategy to improve athletic performance. However, recent case reports have shown that some elite athletes consume extremely high levels of carbohydrates or fats exceeding the recommended ranges. This review summarizes our recent findings regarding the effects of 1) extremely high-fat, low-carbohydrate diets (ketogenic diets), 2) extremely high-carbohydrate, low-fat diets, 3) moderate-fat diets, and 4) a ketogenic diet containing functional lipids on endurance training-induced metabolic adaptations in skeletal muscle.

Keywords: high-carbohydrate diet, high-fat diet, skeletal muscle, mitochondria, fatty acid oxidation