

総説

運動当日の栄養摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響—摂取エネルギーに占める脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事を比較した研究のシステマティック・レビュー

山口 太一^{*1}、東郷 将成^{*1, *2}、保科 圭汰^{*1, *3}、佐藤 未来^{*1, *4}、八田 早那子^{*1}、佐々木 将太^{*5}、瀧澤 一騎^{*6}

^{*1} 酪農学園大学大学院酪農学研究科食品栄養科学専攻健康栄養学食・健康スポーツ科学研究室、

^{*2} 立命館大学総合科学技術研究機構、^{*3} 環太平洋大学体育学部体育学科、^{*4} 帯広大谷短期大学生活科学科、

^{*5} 北海道文教大学人間科学部健康栄養学科、^{*6} 一般社団法人身体開発研究機構

【目的】

持久的な運動を行う当日の栄養摂取法として運動1～4時間前に糖質を体重1 kgあたり1 g～4 g 摂取する方法が推奨されている。しかしながら、当方法が推奨される根拠となった研究では摂取エネルギーに占める脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事の摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を比較検討した結果が考慮されていなかったように思える。本総説では運動当日の脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事の摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を比較検討した研究を総論することを目的とした。

【方法】

採用基準を①対象が健康な者であったこと、②運動直前の食事に摂取エネルギーに占める脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事が含まれていたこと、③持久性パフォーマンスに対する影響を調べていたこととし、原著論文を検索した。

【結果】

採用された論文は6編のみであった。6編すべてにおいて脂質および糖質エネルギー比の高い食事間で持久性パフォーマンスに及ぼす影響に相違が認められていなかった。

【結論】

運動当日の栄養摂取方法として推奨されている方法を満たす糖質エネルギー比の高い食事が脂質エネルギー比の高い食事の摂取よりも持久性パフォーマンス向上に有効であることを認めた研究はなかった。しかしながら、検討した研究が6編と限られており、十分なエビデンスが揃っていない問題点が明らかとなった。

キーワード：PFC比 グリコーゲン 持久力 自転車 ランニング

I 緒言

持久的な運動においてより良いパフォーマンスを発揮するためには適切な栄養摂取が必要となる。例えば、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の75%に相当する最大下運動の継続時間は、事前の栄養摂取の影響を強く

受け、糖質の摂取によって蓄えられた筋グリコーゲン量がその長短に寄与する¹⁾。これまで筋グリコーゲンを蓄えるための栄養摂取方法については、運動の3日前、遅くとも36時間前から1日体重1 kgあたり8 g～12 gの糖質を摂取する²⁾、いわゆるグリコーゲンローディング法が推奨されてきた。

一方、運動当日の栄養摂取方法については、運動の1～4時間前に体重1 kgあたり1 g～4 gの糖質を摂取することが推奨されている²⁾。2014年にOrmsbeeら³⁾によって報告された運動前の栄養摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響に関するレビューでは、運動当日の糖質摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討した原著論文が19編引用されていた。そのうち運動当日に推奨されている運動の1～4時間前に体重1 kgあたり1 g～4 gの糖質摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討した研究は8編^{4)～11)}あり、7編^{4)～7), 9)～11)}で持久性パフォーマンスの向上が認められていた。しかしながら、これらの研究結果のほとんどは糖質摂取条件とプラセボ摂取^{4)～7), 10), 11)}や食事無摂取⁹⁾の条件とを比較したものであり、栄養素の組成の異なる食事摂取条件との比較をしたものはたったの1編⁸⁾であった。ここで疑問が生じるのは、運動当日の栄養摂取は本当に糖質でなければならないのかということである。糖質と同じくエネルギー源として考えられている栄養素には脂質があるものの、消化の観点から運動前に脂質の多い食事を摂取することが敬遠される傾向にある。また、グリコーゲンローディングおよび当日の糖質の摂取によって筋や肝臓に蓄えられるグリコーゲンのエネルギー量は、脂肪として蓄えられているエネルギー量に比べて極めて少ない。筋グリコーゲン量の減少は中枢性の疲労も生じさせることから、運動当日に糖質を摂取しなければ持久性パフォーマンスのさらなる低下にもつながりかねない。さらに、糖質は脂質に比べてエネルギーの産生効率が高いことや、脂質を利用しミトコンドリアにおいてエネルギーを産生するためにも解糖系で糖質が代謝されたオキサロ酢酸が必要となることから¹²⁾、運動当日の糖質摂取によって筋グリコーゲンの貯蔵量をできるだけ増やす必要があると考えられている。しかしながら、Ormsbeeら³⁾のレビューにおける運動の1～4時間前に体重1 kgあたり1 g～4 gの糖質摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討した研究のなかで、食事無摂取条件に食事の組成の異なる食事摂取条件である高脂質食摂取条件を加えて比較した研究⁸⁾では、高脂質食摂取条件と高糖質食摂取条件との間の持久性パフォーマンスに及ぼす影響に相違がなかったことが示されていた。当該研究⁸⁾では、運動の4時間前に食事が摂取されており、少なくとも4時間前の高脂質食の摂取によって持久性パフォーマンスに悪影響を及ぼすような消化不良は起こさなかったようである。また、運動当日の栄養摂取の必要性を運動終了時まで空腹を感じないようにするため¹³⁾と考えるならば、俗にいう腹持ちの良い脂質を摂取する方が糖質を摂取するよりも好都合であるかもしれない。加えて、運動当日の栄養摂取の意義を運動前最後のエネルギー補給のためと考えるならば、糖質が1 gあたり4

kcalのエネルギー量であるのに対し、脂質は1 gあたり9 kcalであることから、同量の摂取で倍以上のエネルギーを摂取できる。さらに、逆に同量のエネルギーを摂取したい場合には、半分以下の量(体重1 kgあたりの糖質量1 g～4 g=体重1 kgあたりの脂質量0.4 g～1.8 g)で運動に必要なエネルギー量を満たせると考えられるが、これは体重移動が伴うような持久性スポーツ競技において有利に働かないのか。そこで本総説では、運動当日の摂取エネルギーに占める脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を比較検討した研究を概観し、総論することを目的とした。

II 方法

文献検索には、検索サイトPubMed、Cochrane、Scopus、医中誌WebおよびJDreamⅢを利用した。検索語はPubMed、CochraneおよびScopusでは「carbohydrate AND fat AND meal AND endurance performance」、医中誌WebおよびJDreamⅢでは「糖質 AND 脂質 AND 食 AND 持久力」とした。最終検索日は2018年10月26日であった。さらに、検索された論文の参考文献も確認し、採用基準を満たしたものを追加した。検索結果に基づいて各々の抄録を確認し、以下に示す採用基準を満たしているか否かについて確認を行った。採用基準は、①健康な被検者を対象としていること、②運動直前の食事の条件に脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取が含まれていること、③持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討していることとした。採用基準の確認は原著論文のみとし、総説は除外した。採用基準を満たしていると考えられたものについては、全文を入手して精読し、内容を確認した。

III 結果

図1に論文の採用過程のフローチャートを示した。上記の検索語で検索された論文は145編であった。また、重複した論文を除外し、検索された論文の参考文献で採用が必要であると共著者間で確認を行った3編を加えた97編について、タイトルおよび抄録をスクリーニングし、87編を除外した。残りの10編について全文精読をした結果、2編^{14), 15)}において脂質エネルギー比の高い食事摂取条件にのみにヘパリン投与がなされていた。ヘパリンの投与は、脂質酸化量を増大させ、持久性パフォーマンスに好影響を及ぼす可能性が示されていることから除外した。また、1編¹⁶⁾において運動中に糖質サプリメントが摂取されていたことから、単純な運動前の食事摂取条件のみの比較検討ではなかったため除外した。さらに、1編¹⁷⁾が運動直前だ

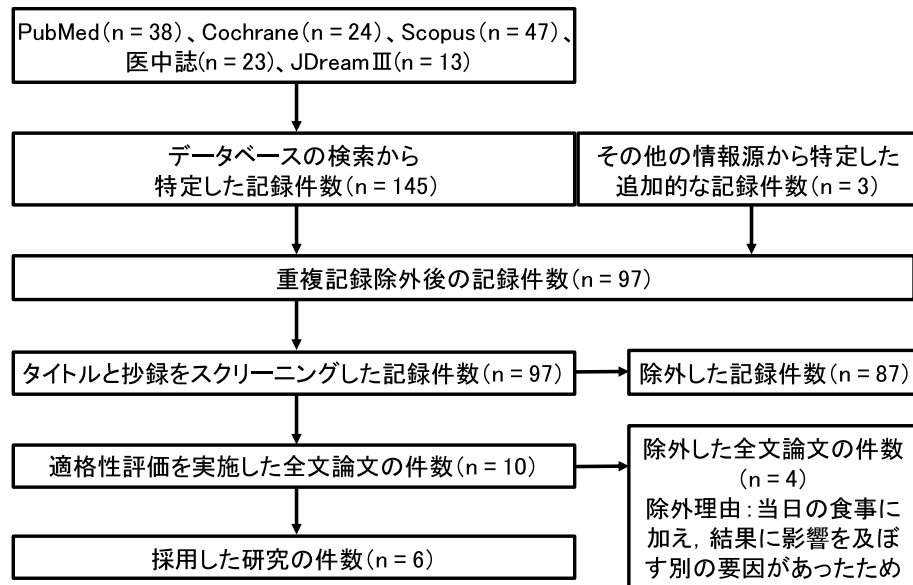


図1 文献検索のフローチャート

表1 運動当日の脂質エネルギー比の高い食事および糖質エネルギー比の高い食事の摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討した研究の文献データ、被検者および運動前日までは運動当日の朝食の内容について

文献データ		被検者				前日までは朝食の内容					
筆頭著者	年	人数	性別	競技	競技レベル	$\dot{V}O_2\text{max}$ (ml/kg/分)	体重 (kg)	日数など	kcal	PFC 比	体重あたりの糖質量 (g/kg体重)
18) Okano	1996	10	男	陸上競技中長距離	—	58.5	62	3日前から	2,987	11:46:43	5.2
8) Whitley	1998	8	男	自転車	鍛錬者	74.6	69.5	2日前から	2,844	14.5:24:61.5	6.4
(前夜の F 比は 3.5%未満)											
19) Okano	1998	9	男	ランニング、水泳、自転車、体操、野球	一般	55	69	3日前から	2,868	11:30:59	6.1
20) Paul	2003	8	男	—	鍛錬者	64.1	73.4	前夜	830	6:2:92	2.6
								朝食 (9.5 時間前)	654	7:3:90	2.0
21) Murakami	2012	8	男	陸上競技長距離	鍛錬者	61.3	55.9	3日前から	2,562	10:19:71	8.1
22) Hulton	2013	10	男	サッカー	リクリエーショナル	—	74.2	前日	2,304	?:?:60	4.7
								朝食 (7 時間前)	377	13:7:84	1.1

$\dot{V}O_2\text{max}$ は体重 1 kg あたりの最大酸素摂取量、PFC 比は摂取エネルギーに占めるたんぱく質：脂質：糖質の比率。

けでなく運動 4 日前から脂質エネルギー比が高い食事あるいは糖質エネルギー比が高い食事を摂取した条件設定がされていたため除外した。その結果、6 編の論文^{8), 18)~22)}が採用基準を満たした。なお、本来であれば、システマティック・レビューでは採用基準を満たした研究の質的な評価を行い、質の低いものについては、除外すべきであるが、そもそも論文が 6 編^{8), 18)~22)}しか存在しなかったため、本研究ではすべてについて網羅的に示すこととした。なお、6 編^{8), 18)~22)}のなかには脂質エネルギー比の高い食事と

糖質エネルギー比の高い食事摂取条件だけではなく、たんぱく質エネルギー比の高い食事およびプラセボ摂取²⁰⁾あるいは食事無摂取⁸⁾の条件が含まれていた論文もあったが、本研究の結果では脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事摂取条件との比較のみを示すこととした。

表 1 に文献データ、被検者情報および前日までは実験当日の朝食における食事内容について示した。すべての研究の被検者が男性であり、競技は Okano ら¹⁹⁾の研究を除き、陸上競技中長距離種

表2 運動当日の脂質エネルギー比の高い食事および糖質エネルギー比の高い食事の摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を検討した研究における当日の食事内容、持久性パフォーマンス測定時の運動およびパフォーマンスの結果について

文献	運動当日の食事				パフォーマンス測定時の運動					結果
	PFC 比	kcal	体重あたりの糖質量 (g/kg 体重)	重・容量	運動前	様式	強度	時間など		
18)	① FAT = 961:30 ② CHO = 11:10:79	1,125 1,115	1.4 3.6	722 g 1,032 g	240 分	事前運動 本運動	自転車 自転車	65% $\dot{V}O_{2max}$ 80% $\dot{V}O_{2max}$	120 分 疲労困憊まで	① 2 ± 3 分 ② 8 ± 3 分 ① = ②
8)	① FAT = 6:74:20 ② CHO = 11:3:86	956 956	0.7 3.1	— —	240 分	事前運動 本運動	自転車 自転車	70% $\dot{V}O_{2max}$ 10 kmTT (79 ~ 83% PPO)	90 分	① 854 ± 37 秒 ② 878 ± 44 秒 ① = ②
19)	① FAT = 961:30 ② CHO = 11:31:58	1,125 1,166	1.2 2.5	722 g 883 g	240 分	事前運動 本運動	自転車 自転車	67% $\dot{V}O_{2max}$ 78% $\dot{V}O_{2max}$	120 分 疲労困憊まで	① 21 ± 8 分 ② 18 ± 5 分 ① = ②
20)	① FAT:1.3g/kg ② CHO:3g/kg	859 881	0 3.0	95 g 220 g	210 分	事前運動 本運動	自転車 自転車	LT (69.3% $\dot{V}O_{2max}$) (61.5% PPO) 20 kmTT (64 ~ 65% PPO)	30 分	① 33.1 ± 1.1 分 ② 32.7 ± 0.5 分 ① = ②
21)	① FAT = 15:55:30 ② CHO = 9:21:70 ③ FAT + マルトデキストリン	1,007 1,007 1,007+410	1.4 3.2 1.4+1.8	— — —	240 分	事前運動 本運動	走運動 走運動	LT (71.8% $\dot{V}O_{2max}$) LT と OBLA との間 (80% $\dot{V}O_{2max}$)	80 分 疲労困憊まで	① 92 ± 2.8 分 ② 90 ± 1.7 分 ③ 100 ± 3.4 分 ① = ② < ③
22)	① FAT = 14:64:22 ② CHO = 17:22:61	995 984	0.8 2.2	350 g+250 ml 400 g+590 ml	210 分	事前運動 本運動	サッカー 走運動	試合形式 1 kmTT	45 分× 2 = 90 分	運動量差なし ① 228.8 秒 ② 229.4 秒 ① = ②

PFC 比は摂取エネルギーに占めるたんぱく質：脂質：糖質の比率、FAT が脂質エネルギー比の高い食事、CHO が糖質エネルギー比の高い食事、 $\dot{V}O_{2max}$ は最大酸素摂取量、TT はタイムトライアル、PPO はピークパワー、LT は乳酸性作業閾値強度、OBLA は血中乳酸濃度が 4 mmol/l に相当する強度。

目^{18), 21)}、自転車⁸⁾、サッカー²²⁾などの持久系の競技実施者であった。また、競技レベルは、一般競技者¹⁹⁾、リクエシヨナルレベル²²⁾ならびに鍛錬者^{8), 20), 21)}であり、体重 1 kgあたりの $\dot{V}O_{2max}$ は55 ml/kg/分¹⁹⁾～74.6 ml/kg/分⁸⁾と比較的高い有酸素性能力を有していた。また、大半の研究で前日までの食事がコントロールされており、3日前^{19), 21)}から前日^{20), 22)}に糖質の摂取エネルギー比が比較的高い食事が摂取されていた。体重 1 kgあたりの糖質量は前夜のみ統制された食事を摂取した研究²⁰⁾を除くと1日あたり4.7 g²²⁾～8.1 g²¹⁾であった。

表2に運動前の食事、運動およびパフォーマンスの結果について示した。運動前の食事は、運動開始240分前^{8), 18), 19), 21)}、210分前^{20), 22)}に859 kcal²⁰⁾～1,166 kcal¹⁹⁾のエネルギー量が摂取されていた。脂質エネルギー比の高い食事摂取条件では、脂質のみを摂取した条件が設定された研究²⁰⁾を除くと、摂取エネルギー量に占め

るたんぱく質、脂質および糖質の比率（PFC比）における脂質エネルギー比が55%²¹⁾～74%⁸⁾の食事が摂取され、体重 1 kgあたりの糖質量は0.7 g⁸⁾～1.4 g^{18), 21)}であった。他方、糖質エネルギー比の高い食事摂取条件では、糖質のみを摂取した条件が設定された研究²⁰⁾を除くと、PFC比における糖質エネルギー比が58%¹⁹⁾～86%⁸⁾の食事が摂取され、体重 1 kgあたりの糖質摂取量は2.2 g²²⁾～3.6 g¹⁸⁾の範囲であった。また、重量および容量について記述のあった研究^{18)～20), 22)}では、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件の方が糖質エネルギー比の高い食事摂取条件よりも重量および容量が少なかった。

持久性パフォーマンス評価のための運動は自転車漕ぎ運動^{8), 18)～20)}ないし走運動^{21), 22)}であった。すべての研究^{8), 18)～22)}において65%¹⁸⁾～71.8% $\dot{V}O_{2max}$ 相当強度²¹⁾の中～高強度の事前運動後やサッカーの試合形式の運動後²²⁾、パフォーマンス測定が実施されていた。

パフォーマンス測定については、定常負荷運動が採用された研究では78%¹⁹⁾あるいは80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 相当強度^{18), 21)}で疲労困憊に至るまでの継続時間が計測されていた。また、タイムトライアルを採用したものでは、1 km²²⁾、10 km⁸⁾ないし20 km²⁰⁾のタイムトライアルが実施されていた。

もっとも重要な持久性パフォーマンスへの影響に関する結果については、6編すべて^{8), 18)~22)}が脂質エネルギー比の高い食事摂取条件と糖質エネルギー比の高い食事摂取条件との間に持久性パフォーマンスの有意な差を認めなかった。また、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件と糖質エネルギー比の高い食事摂取条件との間に有意な差は認めなかったものの、運動の4時間前に脂質エネルギー比の高い食事を摂取し、運動直前にマルトデキストリンを410 kcal分摂取した条件において、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件ないし糖質エネルギー比の高い食事摂取条件よりもパフォーマンスが有意に向上した研究²¹⁾が存在した。

IV 考察

本研究の採用基準を満たした運動当日に脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事を摂取し、持久性パフォーマンスに及ぼす影響について比較検討した研究は6編^{8), 18)~22)}と限られていた。6編すべてにおいて、運動3日前^{18), 19), 21)}より、短いものでは前夜²⁰⁾より食事がコントロールされており、1日に摂取されていた体重1 kgあたりの糖質量は4.7 g²²⁾~8.1 g²¹⁾であった。また、食事が運動の前夜のみ統制されていた研究²⁰⁾では1食における体重1 kgあたりの糖質量は2.6 gであった。グリコーゲンローディング法として、運動の3日前、遅くとも36時間前から1日に体重1 kgあたり8 g~12 gの糖質を摂取することが推奨されている²⁾。本研究において採用された6編^{8), 18)~22)}のうち、このグリコーゲンローディングの推奨法を満たした研究はMurakamiらの1編²¹⁾に限られていた。グリコーゲンローディングの推奨法よりも1日体重1 kgあたりの糖質摂取量が少ない、そして摂取期間が短い緩徐な方法であった研究が5編^{8), 18)~20), 22)}あり、本来であれば、運動当日の食事の組成が持久性パフォーマンスに大きな影響を及ぼすことが予想された。しかしながら、グリコーゲンローディングの推奨法を満たさなかった研究を含め、本研究において採用された6編すべて^{8), 18)~22)}で運動当日に脂質エネルギー比の高い食事を摂取するか、それとも糖質エネルギー比の高い食事を摂取するかによって生じる持久性パフォーマンスに及ぼす影響の差異は認められていなかった。

グリコーゲンローディングの推奨法を満たさなかった5編^{8), 18)~20), 22)}における糖質エネルギー比の高い食

事の摂取条件では体重1 kgあたり2.2 g²²⁾~3.6 g¹⁸⁾の糖質が摂取されていた。よって、運動当日の栄養摂取法として推奨されている運動開始1~4時間前に体重1 kgあたり1 g~4 gの糖質が含まれている食事を摂取するという条件が5編すべて^{8), 18)~20), 22)}において満たされていた。また、2編^{18), 19)}では脂質エネルギー比の高い食事の摂取条件でも体重1 kgあたり1.2 g¹⁹⁾あるいは1.4 g¹⁸⁾の糖質が摂取されており、運動当日に推奨される糖質摂取量の条件を満たしていた。したがって、この2編^{18), 19)}においては脂質エネルギー比の高い食事摂取条件も運動当日に推奨される糖質摂取量を満たしていたことが脂質エネルギー比の高い食事摂取条件と糖質エネルギー比の高い食事摂取条件との間で持久性パフォーマンス発揮に及ぼす影響に相違が生じなかった要因となった可能性が考えられる。

また、グリコーゲンローディングの推奨法を満たさなかった5編^{8), 18)~20), 22)}のうち、脂質エネルギー比の高い食事条件が運動当日に推奨される糖質摂取量を満たしていなかった3編^{8), 20), 22)}については、持久性パフォーマンスが1 kmのタイムトライアル走²²⁾、あるいは10 km⁸⁾ないし20 kmの自転車タイムトライアル²⁰⁾で評価されていた。これらの持久性パフォーマンス評価時の運動強度は、報告のあった2編において最大パワー出力の64%²⁰⁾~83%⁸⁾であった。また、運動継続時間は228.8秒²²⁾~33.1分²⁰⁾であり、事前運動の時間と合わせても62.7分²⁰⁾~104.6分⁸⁾の範囲に留まった。これらの研究^{8), 20), 22)}における持久性パフォーマンス評価時の運動強度と継続時間を考慮すると、筋グリコーゲンの蓄積量が影響を及ぼすような持久性パフォーマンス評価方法が採用されていなかった可能性が考えられる。筋グリコーゲン量、被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ 、持久性パフォーマンス評価時の運動強度および運動継続時間についてメタ解析を行ったAreta and Hopkinsのシステムティック・レビュー²³⁾において、40%および100% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度では被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ ないし筋グリコーゲン量の多少が運動継続時間に及ぼす影響は僅少であるのに対し、70% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度では被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ ならびに筋グリコーゲン量が高値であるほど運動継続時間が長くなることが示されている。筋グリコーゲン量が実測されたPaulらの研究²⁰⁾では事前運動の前の筋グリコーゲン量が湿重量で140 mmol/kg~150 mmol/kg程度であった。これは乾重量に換算すると609.0 mmol/kg~652.5 mmol/kgに相当する。Areta and Hopkinsのレビュー²³⁾において筋グリコーゲン量が乾重量で600 mmol/kgにおける70% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動継続時間は、被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ が60 ml/kg/分で125分以上であることが示されている。Paulら²⁰⁾の被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ は64.1 ml/kg/分であり、69.3% $\dot{V}O_2\text{max}$ (最大パワー出力の61.5%) 強度、30分間の事前運動によって筋グリコーゲン量が乾重量

で400 mmol/kg相当前後まで減少した。しかしながら、その後の持久性パフォーマンス測定時の運動強度は最大パワー出力の64~65%と事前運動の強度よりも高かったものの、運動時間は33分程度で事前運動と合計しても63分程度と筋グリコーゲンの蓄積量から予想される運動継続可能な時間よりも短かった。また、Whitleyらの研究⁸⁾では筋グリコーゲン量が実測されていなかったものの、被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ (74.6 ml/kg/分) と2日前から体重1 kgあたり6.4 gという糖質摂取量から、Areta and Hopkinsのレビュー²³⁾をもとに筋グリコーゲン量を推定すると乾重量で600 mmol/kg程度であったと予想される。さらに、Whitleyら⁸⁾の被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ および乾重量600 mmol/kg程度の筋グリコーゲン量では、70% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度で140分以上の運動が継続可能と考えられる²³⁾。Whitleyらの研究⁸⁾では事前運動が70% $\dot{V}O_2\text{max}$ (最大パワー出力の70%) 強度で90分行われ、その後の持久性パフォーマンスの測定時の運動強度は最大パワー出力の79~83%と事前運動に比べ高かったものの、運動時間は14分程度で事前運動と合計しても104分程度とこちらも筋グリコーゲンの蓄積量から予想される運動継続可能な時間よりも短かったといえる。他方、Hultonら²²⁾の研究では、筋グリコーゲン量が実測されておらず、被検者の $\dot{V}O_2\text{max}$ も示されていなかったことから、どれほどの筋グリコーゲンが事前運動前に蓄積していたかも推定もできない。しかしながら、Hultonら²²⁾の研究では、そもそも持久性パフォーマンスが1 kmのタイムトライアル走で評価されており、予想される運動強度と時間を考えれば筋グリコーゲン量が持久性パフォーマンスに影響を及ぼすような評価方法ではなかったように思える。したがって、脂質エネルギー比の高い食事条件が運動当日に推奨される糖質摂取量を満たしていなかった3編^{8), 20), 22)}については筋グリコーゲンの蓄積量が持久性パフォーマンスに影響を及ぼすような持久性パフォーマンス評価方法が採用されていなかったために、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件と糖質エネルギー比の高い食事摂取条件との間で持久性パフォーマンス発揮に及ぼす影響に相違が生じなかった可能性がある。

一方、本研究で採用された6編の研究^{8), 18)~22)}の中で唯一グリコーゲンローディングの推奨法を満たしたMurakamiら²¹⁾の研究では、3日間にわたる体重1 kgあたり8.1 gの糖質摂取によるグリコーゲンローディング後、運動当日の運動4時間前に脂質エネルギー比の高い食事あるいは糖質エネルギー比の高い食事を1,007 kcal摂取し、乳酸性作業閾値の強度に相当する71.8% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度で80分間のトレッドミル走運動後、80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度において疲労困憊まで運動を継続した。その結果、8名の被検者中7名で脂質エネルギー比の高い食事摂取において運動継続時間が延長し

たことが示されていたものの、運動継続時間に両試験食摂取条件間で相違は認められなかった。Murakamiら²¹⁾の研究は、グリコーゲンローディングの推奨法を満たし、かつAreta and Hopkinsのレビュー²³⁾をもとに運動時間や強度を考えると筋グリコーゲンの蓄積量が影響を及ぼすような持久性パフォーマンス評価法が採用されていた。しかしながら、上述の2編^{18), 19)}と同じく脂質エネルギー比の高い食事摂取条件においても運動4時間前に摂取された体重1 kgあたりの糖質量が1.4 gであった。よって、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件が運動当日に推奨される糖質摂取量を満たしていたことで両試験食摂取条件間の持久性パフォーマンスに差異が認められなかった可能性が考えられる。一方で、Murakamiら²¹⁾の研究では、4時間前の脂質エネルギー比の高い食事摂取に加え、運動直前にマルトデキストリン410 kcal分を摂取することで全被検者が両単独試験食摂取条件よりも運動継続時間を延長させ、平均でも両単独試験食摂取条件に比較し有意に延長したことが明らかとなっていた。運動45分前の糖質摂取は運動時にインスリンの作用と運動による糖利用とが相まって生じる運動誘発性低血糖を引き起こし、持久性パフォーマンスに悪影響を及ぼす恐れがある²⁴⁾。ところが、Murakamiら²¹⁾の研究では4時間前の脂質エネルギー比の高い食事摂取に加えて運動直前の糖質摂取によってインスリンが運動中に安静時以上に分泌されていたものの、血糖値は安静時以下に低下することはなかった。また、4時間前の脂質エネルギー比の高い食事摂取に加え、運動直前に糖質を摂取した条件における運動中の糖質利用量は脂質エネルギー比の高い食事摂取よりは高値であったものの、糖質エネルギー比の高い食事摂取よりは低値であったことから、運動中の筋グリコーゲンの節約も図れていたことが示唆されている。したがって、Murakamiら²¹⁾の研究で用いられた前日までの推奨されるグリコーゲンローディング法に準じた高糖質食摂取に加え、運動4時間前に脂質エネルギー比の高い食事、そして運動直前に糖質ゼリーなどでマルトデキストリンを摂取する方法は、より良い持久性パフォーマンス発揮のために有用である可能性が考えられる。ただし、Murakamiら²¹⁾の研究では運動4時間前に糖質エネルギー比の高い食事後に運動直前にマルトデキストリンを摂取する条件が設定されていなかった。このことから、脂質エネルギー比の高い食事を摂取し、運動直前にマルトデキストリンを摂取した条件では単純にエネルギー摂取量が多かったことが持久性パフォーマンスに好影響を及ぼした可能性も拭えない。よって、グリコーゲンローディングを行い、持久性運動4時間前の脂質エネルギー比の高い食事摂取後に運動直前にマルトデキストリンを摂取することが持久性パフォーマンスの向上に有効であると提言するにはさらなる検討が必要で

あろう。

重要なこととして、すべての研究において、脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取との間における消化の程度の相違については報告されていなかった。自転車運動よりも走運動の方が、身体の上下動も多く含まれることから、消化が不十分な状態であれば、持久性パフォーマンスに悪影響を及ぼす可能性がある。Murakamiら²¹⁾およびHultonら²²⁾の研究では持久性パフォーマンス測定に走運動が用られていたものの、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件において持久性パフォーマンスの悪化が報告されていたわけではなかった。このことは、運動3.5時間前あるいは4時間前の脂質エネルギー比の高い食事摂取は走運動の持久性パフォーマンスに悪影響を及ぼすような消化が不十分な状態には陥らなかったことを意味しているのであろう。Murakamiら²¹⁾の研究では、試験食摂取後の安静時における血中遊離脂肪酸濃度が測定されており、脂質エネルギー比の高い食事摂取条件において摂取後180分~240分で血中遊離脂肪酸濃度の上昇が確認された。このことは摂取された脂質が運動前までに分解され、運動時のエネルギー源として利用できる状態になっていたことを示唆している。

また、空腹感についても消化の程度同様、いずれの研究においても報告はなく、運動終了後まで空腹を感じないために脂質エネルギー比の高い食事と糖質エネルギー比の高い食事のどちらが好ましいかは不明のままである。

加えて、当日の食事の重量および容量について記述のあった研究^{18)~22)}では、高脂質摂取条件の方が高糖質摂取条件よりも重量および容量が少なかった。しかしながら、これらの研究^{18)~22)}では両試験食摂取条件の持久性パフォーマンスに相違は認められなかった。移動の伴う走運動を持久性パフォーマンスの指標に採用したHultonら²²⁾の研究も含まれていたが、1食分の食事の重量および容量の相違が持久性パフォーマンスに及ぼす影響は僅少であるといえるだろう。

最後に、今回採用された研究^{8), 18)~22)}の被検者はすべて男性であった。したがって、女性を対象にしても脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取における持久性パフォーマンスへの影響に相違がないかは不明である。また、今回採用された研究^{8), 18)~22)}における対象は一般競技者¹⁹⁾から鍛錬者^{8), 20), 21)}までが含まれていたものの、比較的有酸素性能力の高い被験者を採用した研究が多かった。よって、有酸素性能力の低い対象では、本研究で得られた脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取における持久性パフォーマンスへの影響に相違がないという知見は該当しない可能性もある。

V 結論

本研究では、運動当日の脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響について比較検討した研究を概観した。その結果、採用された6編の研究すべて^{8), 18)~22)}で比較的有酸素性能力の高い男性における両試験食摂取条件が持久性パフォーマンスに及ぼす影響には相違がなかったことが示されていた。よって、運動当日の栄養摂取方法として推奨されている運動1~4時間前に体重1 kgあたりの糖質量1 g~4 gを満たす糖質エネルギー比の高い食事が脂質エネルギー比の高い食事に比べ、比較的有酸素性能力の高い男性における持久性パフォーマンスの向上に有効であることは確認できなかった。しかしながら一方で、本研究で採用された研究は6編と限られていた。加えて、6編^{8), 18)~22)}のうち3編^{18), 19), 21)}では脂質エネルギー比の高い食事摂取条件においても運動当日の栄養摂取方法として推奨されている糖質摂取量を満たしていたことから、脂質エネルギー比が高い食事条件ではあったものの、糖質摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響を排除できていなかったといえる。また、残りの3編^{8), 20), 22)}については持久性パフォーマンス評価時の運動強度および運動時間を考えると筋グリコーゲンの蓄積量が影響を及ぼすような持久性パフォーマンス評価方法が採用されていなかったことが考えられる。よって、現状では運動当日の脂質エネルギー比の高い食事摂取と糖質エネルギー比の高い食事摂取が持久性パフォーマンスに及ぼす影響の比較については十分なエビデンスが揃っておらず、さらなる検討が必要であるというべきであろう。

利益相反

本研究内容に関して利益相反は存在しない。

文 献

- 1) Saltin, B., Karlsson, J.: Muscle glycogen utilization during work of different intensities. *Muscle Metabolism During Exercise* (Pemow, B., Saltin, B. ed.), pp.289-299 (1971), Plenum Press, New York
- 2) Casazza, G.A., Tovar, A.P., Richardson, C.E., et al.: Energy availability, macronutrient intake, and nutritional supplementation for improving exercise performance in endurance athletes, *Curr. Sports Med. Rep.*, 17, 215-223 (2018)
- 3) Ormsbee, M.J., Bach, C.W., Baur, D.A.: Pre-exercise nutrition: the role of macronutrients, modified starches and supplements on metabolism and endurance performance, *Nutrients*, 29, 1782-1808 (2014)

- 4) Okano, G., Takeda, H., Morita, I.: Effect of pre-exercise fructose ingestion on endurance performance in fed men, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 20, 105–109 (1988)
- 5) Sherman, W.M., Peden, M.C., Wright, D.A.: Carbohydrate feedings 1 h before exercise improves cycling performance, *Am. J. Clin. Nutr.*, 54, 866–870 (1991)
- 6) Thomas, D.E., Brotherhood, J.R., Brand, J.C.: Carbohydrate feeding before exercise: Effect of glycemic index, *Int. J. Sports Med.*, 12, 180–186 (1991)
- 7) Wright, D.A., Sherman, W.M., Dernbach, A.R.: Carbohydrate feedings before, during, or in combination improve cycling endurance performance, *J. Appl. Physiol.*, 71, 1082–1088 (1991)
- 8) Whitley, H.A., Humphreys, S.M., Campbell, I.T., et al.: Metabolic and performance responses during endurance exercise after high-fat and high-carbohydrate meals, *J. Appl. Physiol.*, 85, 418–424 (1998)
- 9) Schabert, E.J., Bosch, A.N., Weltan, S.M., et al.: The effect of a preexercise meal on time to fatigue during prolonged cycling exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 464–471 (1999)
- 10) Chrysanthopoulos, C., Williams, C., Nowitz, A., et al.: The effect of a high carbohydrate meal on endurance running capacity, *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, 12, 157–171 (2002)
- 11) Chen, Y.J., Wong, S.H.S., Chan, C.O.W., et al.: Effects of glycemic index meal and CHO-electrolyte drink on cytokine response and run performance in endurance athletes, *J. Sci. Med. Sport*, 12, 697–703 (2009)
- 12) 寺田 新：第3章 糖質—パフォーマンスと健康のための三大栄養素摂取法（その1），スポーツ栄養学 科学の基礎から「なぜ？」にこたえる，pp.73–110 (2017)，東京大学出版会，東京
- 13) 鈴木志保子：第4章 試合期・遠征中の栄養管理・食生活，理論と実践 スポーツ栄養学，pp.77–108 (2018)，日本文芸社，東京
- 14) Pitsiladis, Y.P., Smith, I., Maughan, R.J.: Increased fat availability enhances the capacity of trained individuals to perform prolonged exercise., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 1570–1579 (1999)
- 15) Hawley, J.A., Burke, L.M., Angus, D.J., et al.: Effect of altering substrate availability on metabolism and performance during intense exercise, *Br. J. Nutr.*, 84, 829–838 (2000)
- 16) Rowlands, D.S., Hopkins, W.G.: Effect of high-fat, high-carbohydrate, and high-protein meals on metabolism and performance during endurance cycling, *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, 12, 318–335 (2002)
- 17) Couto, P.G., Bertuzzi, R., de Souza, C.C., et al.: High carbohydrate diet induces faster final sprint and overall 10,000-m times of young runners, *Pediatr. Exerc. Sci.*, 27, 355–363 (2015)
- 18) Okano, G., Sato, Y., Takumi, Y., et al.: Effect of 4 h preexercise high carbohydrate and high fat meal ingestion on endurance performance and metabolism, *Int. J. Sports Med.*, 17, 530–534 (1996)
- 19) Okano, G., Sato, Y., Murata, Y.: Effect of elevated blood FFA levels on endurance performance after a single fat meal ingestion, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30, 763–768 (1998)
- 20) Paul, D., Jacobs, K.A., Geor, R.J., et al.: No effect of pre-exercise meal on substrate metabolism and time trial performance during intense endurance exercise, *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, 13, 489–503 (2003)
- 21) Murakami, I., Sakuragi, T., Uemura, H., et al.: Significant effect of a pre-exercise high-fat meal after a 3-day high-carbohydrate diet on endurance performance, *Nutrients*, 4, 625–637 (2012)
- 22) Hulton, A.T., Edwards, J.P., Gregson, W., et al.: Effect of fat and CHO meals on intermittent exercise in soccer players, *Int. J. Sports Med.*, 34, 165–169 (2013)
- 23) Areta, J.L., Hopkins, W.G.: Skeletal muscle glycogen content at rest and during endurance exercise in humans: A meta-analysis, *Sports Med.*, 2091–2102 (2018)
- 24) Costill, D.L., Coyle, E., Dalsky, G., et al.: Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise, *J. Appl. Physiol.*, 43, 695–699 (1977)

（受付日：2018年8月17日）
（採択日：2019年4月8日）

Review

Effects of pre-exercise nutrition on endurance performance - A systematic review of studies comparing high fat energy ratio meal ingestion and high carbohydrate energy ratio meal ingestion

Taichi YAMAGUCHI ^{*1}, Masanari TOGO ^{*1, *2}, Keita HOSHINA ^{*1, *3}, Miku SATO ^{*1, *4},
Sanako HATTA ^{*1}, Shota SASAKI ^{*5}, Kazuki TAKIZAWA ^{*6}

^{*1} Laboratory of Food Ecology and Sports Science, Food and Nutrition Science, Graduate School of Dairy Science, Rakuno Gakuen University

^{*2} Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

^{*3} Department of Physical Education, International Pacific University

^{*4} Life Science Department, Obihiro Otani Junior College

^{*5} Department of Health and Nutrition, Faculty of Human Sciences, Hokkaido Bunkyo University

^{*6} Institute of Physical Development Research

ABSTRACT

【Aim】

To improve endurance performance, the ingestion of 1-4 g/kg of bodyweight of carbohydrates 1-4 hours prior to endurance exercise is recommended. However, the reviews recommending this method of pre-exercise nutrition may not have considered the results of studies comparing the effects of high fat energy ratio meal ingestion with those of high carbohydrate energy ratio meal ingestion on endurance performance. The purpose of this study was to conduct a systematic review of studies comparing the effects of high fat energy ratio meal ingestion with high carbohydrate energy ratio meal ingestion on endurance performance.

【Methods】

Original articles were searched according to the following criteria: 1) healthy subjects, 2) comparison of high fat energy ratio meals and high carbohydrate energy ratio meals as pre-exercise meals, and 3) effects on endurance performance were examined.

【Results】

Six studies were included based on the criteria. All studies found no differences in the effects on endurance performance between high fat energy ratio meal ingestion and high carbohydrate energy ratio meal ingestion.

【Conclusion】

We were unable to find studies that demonstrated that high carbohydrate energy ratio meal ingestion, which is the recommended method of pre-exercise nutrition, was more effective at improving endurance performance than high fat energy ratio meal ingestion. However, the evidence may be insufficient because there were only six studies comparing the effects of high fat energy ratio meal ingestion with those of high carbohydrate energy ratio meal ingestion on endurance performance.

Keywords: PFCratio, glycogen, endurance, cycling, running