

ROH 2017/Sept.

Science Journal of Graduate School of Rakuno Gakuen University



# Research of One Health

journal homepage:<http://gra.rakuno.ac.jp/roh.html>



運動後における筋グリコーゲン回復のための栄養補給方法

## The methods of nutrient supply for muscle glycogen recovery after exercise

東郷将成, 山口太一

Masanari TOGO, Taichi YAMAGUCHI

酪農学園大学大学院酪農学研究科

Graduate School of Dairy Sciences, Rakuno Gakuen University

069-8501, Hokkaido, Japan

キーワード：運動後，栄養補給，血糖値，インスリン，筋グリコーゲン

Keywords: post exercise, nutrition supplementation, blood glucose, insulin, muscle glycogen

### Abstract

Three major nutrients (protein, fat and carbohydrate) are utilized as energy source during some exercises. Especially, the carbohydrate intake is necessary for high quality exercise and training. The purpose of present study was to clarify methods of nutrient supply for muscle glycogen recovery after exercise systematically. The required amounts of carbohydrate and energy were 0.8-4.0 g/kg body weight and 5-10 kcal/kg body weight, respectively. The drink or liquid food intake was recommended because it was difficult to intake solid food immediately after exercise. It was important for muscle glycogen recovery to increase blood glucose and insulin after exercise. The increase in insulin secretion was caused by simultaneous intake of carbohydrate and protein or fat.

## はじめに

より良い運動能力の発揮のためには適切な栄養摂取が重要であることは周知の事実である。これまで持久的な運動前の有効な栄養摂取方法について多くの知見が報告されてきた[1, 2, 3]。しかしながら、持久的な運動後の栄養補給方法についての知見は限られている。本稿では、限られた持久的な運動後の栄養補給方法に関する知見をもとに、現時点において考え得る好ましい方法、すなわち、摂取すべき栄養素、摂取タイミングおよび食品形態について総論する。これらにより持久的な運動の現場に提言可能な運動後の栄養補給方法を明示するとともに、今後検討すべき課題をみつけることを目的とする。

## 運動後の栄養補給の意義

持久的な運動時、三大栄養素（たんぱく質、脂質および炭水化物）がエネルギー源となる。利用されるエネルギー源、すなわちエネルギー基質は、運動強度によって異なり、高強度の持久的な運動では炭水化物（糖質）が利用される。一方、低強度の持久的な運動では主に脂質が利用されるものの、一定量の糖質も利用される[4]。したがって、持久的な運動前の糖質摂取はより良い運動能力の発揮や維持のために重要である[5, 6, 7]。また、一日に複数回の試合がある場合などについては、運動直後の糖質補給が次の運動においても能力を最大限発揮させるために必要不可欠となる[1, 2, 3]。加えて、連日の練習や強化合宿中などについ

ては、複数回の運動の成果であるトレーニング効果を引き出すという観点においても運動後の糖質補給が重要となってくる。

## 運動時におけるエネルギー代謝のメカニズム

糖質は、主に筋にグリコーゲンとして貯蔵されている。その貯蔵量は食事の摂取状況によって異なるものの[8]、脂質と比べるとかなり少量である。筋グリコーゲンは最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) の 80%相当強度における約 75 分間の持久的な運動で枯渇する[9]ことから、比較的長い時間の持久的な運動を継続する場合には必ず糖質摂取を行い、筋グリコーゲン量を増やしておく必要がある。経口摂取した糖質は肝臓や筋にグリコーゲンとして貯蔵される。肝臓のグリコーゲンは血糖（グルコース）として血中を流れ、インスリンによって筋細胞内に取り込まれる。インスリンは膵臓ランゲルハンス島β細胞より分泌されるペプチドホルモンで、筋内への糖取り込みを促進する。グルコーストランスポーター4 (GLUT4) は運動により活性化し、筋細胞表面の糖取り込みを促進させる[10]。GLUT4 によって取り込まれた糖質は無酸素系である解糖系やミトコンドリアに局在する有酸素系の TCA 回路を経て筋収縮に必要なアデノシン三リン酸 (ATP) を合成する。他方、経口摂取した脂質はリンパ管から肝臓に到達し、その後脂肪組織でトリグリセリド (TG) として貯蔵される。運動時は TG がグリセロールおよび遊離脂肪酸 (FFA) に分解され、

FFA は Fatty acid translocase cluster of differentiation 36 (FAT/CD36) によって筋細胞に取り込まれミトコンドリアでβ酸化を受け ATP を合成する. FAT/CD36 も GLUT4 同様に運動によって FFA の筋の取り込みが増加することが明らかとなっている[11, 12]. 脂質を運動のエネルギーとして利用する場合には血中でのリポたんぱくリパーゼ (LPL) が活性化し, 脂質の利用量が増加する[13, 14]. このように糖質および脂質がエネルギー基質となり, ミトコンドリアの TCA 回路にて ATP が合成されるものの, 解糖系において TCA 回路に入りきれなかったピルビン酸は一時的に乳酸となり[7, 15], 乳酸トランスポーター4 (MCT4) を介して直接エネルギーとして利用されることもある[10, 16]. 他方, ケトン体も運動時には MCT を介して筋細胞質ゾルやミトコンドリアに取り込まれ, エネルギーとして利用されることが明らかとなっている[12, 17]. 運動時や運動直後では各種輸送体やエネルギー供給系が運動に応じて適切に働き, 体内のグリコーゲンや脂肪を分解して ATP を合成している.

#### 栄養補給のタイミングと摂取すべき糖質量

持久的な運動後の栄養補給に関する文献における運動負荷設定および補給内容をそれぞれ Table 1 および 2 に示した. 栄養補給のタイミングについては, Ivy[18]が運動直後と運動 2 時間後の糖質補給の効果を比較し, 運動直後の方が運動 2 時間後の摂取と比較して運動 4 時間後までの筋グリコーゲ

ンの回復量が多いことを示している. 筋グリコーゲンの早期回復には運動直後に糖質を補給して血糖値を高めておくことが望ましい[18, 19, 20, 21]. さらに, 血糖値の上がりやすさを反映するグリセミックインデックス (GI) 値の高い食品の摂取が早期の筋グリコーゲンの回復量を増大させることが明らかとなっている[22]. また, 運動後の栄養補給では, インスリンの分泌量の増加[18, 19, 23]により筋グリコーゲンの早期回復[24, 25, 26, 27]が促進されることも明らかになっている. 稲井ら[39]は, ラットを用いて運動直後, 30, 60, 120 分後に糖質飲料を摂取することで筋グリコーゲンの再合成率に相違が生じるかを検討し, 直後の摂取において血糖, インスリンが高値を示し筋グリコーゲンが回復しやすいことを示した. よって, 運動直後に糖質補給を行って血糖値を高め, インスリンの分泌を促進させられる食事の摂取が好ましい.

摂取すべき糖質量については, 運動直後に単回の食事を摂取した研究を概観すると, 糖質量が 0.8[23]-2.0[18] g/kg 体重, エネルギー量が 5[23]-10[21] kcal/kg 体重で筋グリコーゲンの回復がみられている (Table 2). なお, 糖質摂取のガイドライン[24]では, 4 時間以内の早期の筋グリコーゲンの回復については, 1.0-1.2 kcal/kg 体重, 24 時間後の筋グリコーゲンの回復については 10-12g/kg 体重/日の糖質補給が推奨されている.

**Table 1. 運動後の栄養補給に関する研究の対象および運動負荷設定**

文献データ	被験者				運動		
	筆頭著者	n	性	VO <sub>2</sub> max ml/min/kg	体重 kg	様式	強度
Ivy <sup>18</sup>	12	男	59.7	70.2	自転車	VO <sub>2</sub> max 68%(8min), 88%(2min) 7set	70min
Zawadzki <sup>19</sup>	9	男	66.6	73.1	自転車	60-65% VO <sub>2</sub> max 3set	15min
						70-75% VO <sub>2</sub> max 3set	15min
						60-65% VO <sub>2</sub> max	10min
						70-75% VO <sub>2</sub> max	10min
						50% VO <sub>2</sub> max	5min
Burke <sup>22</sup>	5	男	69.9	68.7	自転車	75% VO <sub>2</sub> max	2h
						HIT 30sec, rest 2min	疲労困憊
Parkin <sup>30</sup>	6	男	60.5	73	自転車	70% VO <sub>2</sub> max HIE 30sec rest 2min	疲労困憊
Carrithers <sup>32</sup>	7	男	55.7	75.4	自転車	75%VO <sub>2</sub> max	75min
						125%VO <sub>2</sub> max	1min
Van Loon <sup>23</sup>	8	男		70	自転車	w-up 50% watt max	10min
						90%+50% watt max	2min
						80% or 70% watt max	2min
Ivy <sup>21</sup>	7	男	61.1	74	自転車	65-75% VO <sub>2</sub> max	120min
寺田 <sup>25</sup>	8	男	73	62	ランニング	30km	-
Berardi <sup>33</sup>	① 6	男	-	80.2		タイムトライアル (後輪負荷)	60min
	② 6	男	-	80.2	自転車	休息 (10,60,120,240分で栄養補給)	6h
	③ 4	男	-	80.7		タイムトライアル (後輪負荷)	60min
De Sousa <sup>26</sup>	15	男	-	64.5	ランニング	800m 12set HIE, rest 1.2min	-
Cheng <sup>27</sup>	8	男	49.7	69.1	自転車	75% VO <sub>2</sub> max	60min
Volek <sup>31</sup>	① 10	男	64.3	66.5	ランニング	65% VO <sub>2</sub> max	3h
	② 10	男	64.7	68.8			

VO<sub>2</sub> max : 最大酸素摂取量, w-up : ウォーミングアップ, HIE : High Intensity Intermittent Exercise

### 栄養補給形態の違い

食品の形態や咀嚼による摂取時間の違いが血糖値、インスリンならびに消化管ホルモン分泌に影響を与える[40]. 運動直後は筋への血液循環が優先され、消化器への血液循環量は減少しているため消化吸収能力が低下する。合わせて、運動後には食欲を増加させるホルモンであるグレリンの分泌低下に伴う食欲の低下が起きる[28, 29]. これら理由により、通常の食事から必要とされる糖質量の補給が難しいことが考えられる。

実際に、筋グリコーゲンの早期回復のためには、運動直後にマルトデキストリンなどを含む飲料による補給が有効であることが述べられている[21]. つまり、運動後の筋グリコーゲン回復に際して栄養補給形態にも気を配らなければならない。飲料と固形食品とでは飲料の方が胃の排出や吸収の速度が早い。また、固形食品は食品構造や調理方法などの影響を受け、摂取時間自体を遅延させることも考えられる。加えて、運動直後に摂取する食品はできるだけ消化

Table 2. 運動後の栄養補給内容および回復に関する文献

文献データ	被験者		運動後の食事					結果					
	筆頭著者	n 性	食事 形態	摂取時間 タイミング	条件	総エネルギー	エネルギー	糖質	たんぱく質	脂質	インスリン	グリコーゲン	FFA
						kcal	kcal/kg	g/kg	g/kg	g/kg			
Ivy <sup>18</sup>	12	男	飲料	①直後 ②2時間後	CHO	562	8	2.0	-	-	①↑	2h after ①↑	①↓
Zawadzki <sup>19</sup>	9	男	飲料	直後	①CHO 112g	448	6	1.5	-	-	①③↑	4h after ①③↑	-
					②PRO 40.7g	163	2	-	0.6	-			
					③CHO112g +PRO 40.7g	611	8	1.5	0.6	-			
Burke <sup>22</sup>	5	男	食品	0, 4, 8, 21h 計4回	①Lo GI (GI71) ②Hi GI (GI108)	3833 3815	56 56	10.5 10.4	2.0 1.9	0.7 0.7	→	24h after ②↑	-
Parkin <sup>30</sup>	6	男	食品	①直後(IT) ②2時間後 (DT)	①IT 0h, DT2h	780	11	2.3	0.3	0.1	→	24h after →	-
					②IT 2h, DT4h	710	10	2.3	0.1	0.0			
					③IT 4h, DT6h	792	11	2.3	0.2	0.1			
					④8h	710	10	2.3	0.1	0.0			
					⑤22h	780	11	2.3	0.3	0.1			
Carrithers <sup>32</sup>	7	男	飲料	8回/30min	①CHO100%	1206	16	4.0	-	-	→	4h after →	-
					②CHO-PRO	1206	16	2.8	0.8	0.2			
					③CHO-AA	1206	16	3.2	0.6	-			
Van Loon <sup>23</sup>	8	男	食品	3.5ml/kg/ 30min	①CHO	224	3	0.8	-	-	②③↑	5h after ②③↑	-
					②CHO+PRO 0.8+0.4g/kg	336	5	0.8	0.4	-			
					③CHO 1.2g/kg	336	5	1.2	-	-			
Ivy <sup>21</sup>	7	男	飲料	直後	①CHO-Pro: 28g:6g:80g	756	10	1.6	0.6	0.2	→	2h after ①↑	→
					②Hi CHO :0g:6:108g	756	10	2.2	-	0.2			
					③Lo CHO :0g:6g:80g	588	8	1.8	-	0.2			
寺田 <sup>25</sup>	8	男	飲料	直後	①CHO 1.5g/kg	372	6	1.5	-	-	②↑	-	→
					②CHO 1.5g/kg PRO 0.5g/kg	496	8	1.5	0.5	-			
Berardi <sup>33</sup>	① 6	男	飲料	運動後10, 60, 120min	①CHO+PRO	385	4.8	0.8	0.4	-	-	6h after ①↑	-
	② 6	男			②CHO	385	4.8	1.2	-	-			
	③ 4	男			③風味飲料	0	-	-	-	-			
De Sousa <sup>26</sup>	15	男	飲料	①直後 ②60分毎	①②固形食	561	7	1.2	0.3	0.1	②↑	-	②↑
					③3倍量の固形食	1684	21	3.6	1	0.3			
					CHO 1.2g/kg/4ml	310	5	1.2	-	-			
Cheng <sup>27</sup>	8	男	食品	直後	①fasting	-	-	-	-	-	②↑	-	②③↓
					②Hi GI(76.6)	678	10	2.0	0.3	0.1			
					③Lo GI(36.1)	682	10	2.0	0.3	0.1			
Volek <sup>31</sup>	① 10	男	飲料	直後	①Hi CHO	343	5	0.7	0.7	0.2	①↑	2h after ②↑	→
	② 10	男			②Lo CHO	332	5	0.1	0.2	0.4			

CHO: Carbohydrate, PRO: Protein, AA: Amino Acid, FFA: Free Faty Acid

器に負担をかけない食品が好ましいとされるが、通常の食事で当該食品を運動直後に糖質必要量を満たすために単回もしくは頻回で摂取することは難しい。筋グリコーゲンの早期回復を考えた場合、運動現場で摂取しやすい食品は飲料や液体に近いような形態のものとなるだろう。

一方で、24時間後に筋グリコーゲンを回復させるのであれば、固形食品の摂取も可能である。Parkin[30]はGI値の高い固形食品を運動直後、2時間後および4時間後に摂取してもそれぞれ2時間遅れで摂取して

も、摂取エネルギー量や糖質量が同一であれば、24時間後の筋グリコーゲンの回復量は変わらないことを示している。24時間後の筋グリコーゲン回復が目的であれば、運動後、直ちに食事による糖質補給ができない場合には、喫食できるまで飲料により糖質補給を行い、喫食可能となった段階で固形食品を頻回摂取して筋グリコーゲンの回復を行うべきである[23, 30]。その場合、糖質も含んだ5kcal/kg体重以上のエネルギー摂取によって筋グリコーゲン量の増加がみられる[31]。

## 栄養素の組み合わせが筋グリコーゲン回復 に与える影響

筋グリコーゲンは糖質だけではなく、たんぱく質や脂質を組み合わせることで摂取することにより回復量が高まることが明らかとなっている。運動直後の糖質とたんぱく質を組み合わせた摂取はインスリン量を増加させ[25]、筋グリコーゲンの回復を促進する[21]。また、インスリンの分泌量は糖質 0.8 g/kg 体重およびたんぱく質 0.4 g/kg 体重を含む飲料摂取が糖質 1.2 g/kg 体重の飲料のみの摂取よりも多くなり、筋グリコーゲンの回復量が増加したことも明らかとなっている[23]。たんぱく質の付加は筋グリコーゲンを回復させるだけでなく、たんぱく質代謝を亢進させ、筋たんぱくの合成にも寄与する。これまでは糖質にたんぱく質を付加（たんぱく質比 20%以上）させることで筋グリコーゲンや筋たんぱく質を増加させることが報告されている[19, 32, 33]。

他方、近年脂質による筋グリコーゲン回復の可能性に関する報告が増えてきた。Volek[31]は、運動後に脂質比の高い食品を摂取することで糖質の利用を抑制し、筋グリコーゲンを回復させることを報告している。また、運動後の低糖質食の摂取は回復期間に筋の TG 貯蔵量を増加させ、同じエネルギー摂取量の高糖質、低脂質食の摂取と比較して全身の脂質分解および運動中の脂質酸化を高めることが明らかとなっている[34]。これらの結果は、インスリンが脂肪組織の LPL 活性を高め脂肪を運動時のエネルギーとして利用すること[35]、運動後の脂

質摂取が血中の遊離脂肪酸やグリセロール量[3, 31]、ケトン体[12]を増加させ、脂質自体の利用量を増加させること、さらには、運動後において、FAT/CD36[11, 12]や MCT[10, 16]が、GULT4 同様に発現が増加するために脂質のエネルギー利用率が増加することが関係すると考えられている。

一方、寺田[36, 37]は脂質によるグリコーゲン回復の可能性について異なる観点から検討しており、ラットに動物性脂質と糖質を摂取させることで腸管から分泌されるインスリンの前駆体である glucose-dependent insulinotropic polypeptide (GIP) などのインクレチンを増加させ、インスリン分泌を促進し、筋グリコーゲンを回復させたことを報告している。動物性脂質を用いた試験食の糖質量は、ヒトに換算すると 1.0 g/kg 体重相当であった[36, 37]。このことから、筋グリコーゲンの回復に最低限必要な糖質量を付加し、たんぱく質、動物性脂質を含んだ食品を摂取することで筋グリコーゲンの回復が亢進する可能性が考えられる。

## まとめおよび今後の課題

以上のことから、運動後の筋グリコーゲン回復のための栄養補給は、早期回復を目論むならば、運動直後に血糖値およびインスリンを高めることが重要である。加えて、必要とされる糖質量を摂取しやすい液体などの飲料で補給するとより良い。一方、24 時間後までのグリコーゲン回復を目論むならば、頻回の固形の食品の摂取も可能と考えられる。加えて、筋グリコーゲンの回復

量を増加させるためには、たんぱく質や動物性脂質を含んだ食品を同時に摂取することでインスリン分泌促進による糖取り込みや糖利用の抑制を図ることも重要であると考えられる。

運動後の栄養補給に関する今後の検討課題として、運動能力の測定評価や飲料や食品の提供温度があげられる。従来は、運動後に筋グリコーゲン量の測定を行なっているものの、その後の運動能力を測定評価した報告は少ない[33]。運動現場では回復した筋グリコーゲンがその後運動時に利用され、より良い運動能力の発揮につながるかが重要であるため、今後は筋グリコーゲン回復後に運動能力を測定評価していく必要がある。また、栄養補給の検証のための運動負荷設定の統一 (Table 1) や提供される飲料や食品の温度 (Table 2) はこれまで記載されていない。Naperalsky[38]は運動後の環境温度が低い方が筋グリコーゲンの回復量が多いことを報告している。経口摂取された飲料や食品が冷たければ運動によって上昇した体温を体内から冷却する可能性があるため、今後の研究としては栄養を補給する際の飲料や食品の提供温度の検討も必要であると考える。

#### 文 献

- 1) 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(11), 1570-1579 (1999).
- 2) Ichinose, T., Arai, N., Nagasaka, T., Asano, M., Hashimoto, K., Impact of intensive high-fat ingestion in the early stage of recovery from exercise training on substrate metabolism during exercise in humans. *J. Nutr. Sci. Vitaminol*, 58(5), 354-359 (2012).
- 3) Murakami, I., Sakuragi, T., Uemura, H., Menda, H., Shindo, M., Tanaka, H., Significant effect of a pre-exercise high-fat meal after a 3-day high-carbohydrate diet on endurance performance. *Nutrients*, 4, 625-637 (2012).
- 4) Ahlborg, G., Felig, P., Hagenfeldt, R., Hendler, R., Wahren, J., Substrate turnover during pro-longed exercise in man. Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids, and amino acids. *J. Clin. Invest*, 53, 1080-1090 (1974).
- 5) Hawley, J.A., Burke, L.M., Angus, D.J., Fallon, K.E., Martin, D.T., Febbraio, M.A., Effect of altering substrate availability on metabolism and performance during intense exercise. *Br. J. Nutr.* 84(6), 829-38 (2000).
- 6) Paul, D., Jacobs, K.A., Geor, R.J., Hinchcliff, K.W., No effect of pre-exercise meal on substrate metabolism and time trial performance during intense endurance exercise. *Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab.* 13(4), 489-503 (2003)
- 7) 東郷将成, 佐々木将太, 山田祐輝, 山口太一, 眞船直樹, 寺井格, 小林邦彦, 神

- 林勲, 糖質サプリメント摂取が長時間の間欠的な高強度自転車運動の走行パフォーマンスに与える影響, 北海道教育大学紀要, 61(1), 13-20 (2010).
- 8) Bergström, J., Hermansen, L., Hultman, E., Saltin, B., Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta. Physiol. Scand*, 71(2), 140-150 (1967).
- 9) Saltin, B., Gollnick, P.D., Fuel for muscular exercise: role for carbohydrate. New York. 45-71 (1988).
- 10) Green, H.J., Duhamel, T.A., Holloway, G.P., Moule, J.W., Ranney, D.W., Tupling, A.R., Ouyang, J., Rapid upregulation of GLUT-4 and MCT-4 expression during 16 h of heavy intermittent cycle exercise. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 294(2), R594-600 (2008).
- 11) Tanaka, T., Nakata, T., Oka, T., Ogawa, T., Okamoto, F., Kusaka, Y., Sohmiya, K., Shimamoto, K., Itakura, K., Defective human myocardial long-chain fatty acid uptake is caused by FAT/CD36 mutations. *J. Lipid. Res*, 42, 751-759 (2001).
- 12) Cox, P.J., Kirk, T., Ashmore, T., Willerton, K., Evans, R., Smith, A., Murray, A.J., Stubbs, B., West, J., McLure, S.W., King, M.T., Dodd, M.S., Holloway, C., Neubauer, S., Drawer, S., Veech, R.L., Griffin, J.L., Clarke, K., Nutritional Ketosis Alters Fuel Preference and Thereby Endurance Performance in Athletes. *Cell. Metab.* 9;24(2), 256-268 (2016).
- 13) Kiens, B., Lithell, H., Mikines, K.J., Richter, E.A., Effects of insulin and exercise on muscle lipoprotein lipase activity in man and its relation to insulin action. *J. Clin. Invest*, 84, 1124-1129 (1989).
- 14) Seip, R.L., Mair, K., Cole, T.G., Semenkovich, C.F., Induction of human skeletal muscle lipoprotein lipase gene expression by short-term exercise is transient. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab*, 272, E255-E261 (1997).
- 15) 八田秀雄., 乳酸輸送担体 MCT の発現と乳酸の代謝との関係. *日本運動生理学雑誌*, 7, 45-56 (2000).
- 16) Enoki, T., Yoshida, Y., Lally, J., Hatta, H., Bonen, A., Testosterone increases lactate transport, monocarboxylate transporter (MCT) 1 and MCT4 in ratskeletal muscle. *J. Physiol.* 15, 433-43 (2006).
- 17) Halestrap, A.P., Meredith, D., The SLC16 gene family-from monocarboxylate transporters (MCTs) to aromatic amino acid transporters and beyond. *Pflugers. Arch*, 447, 619-628 (2004).
- 18) Ivy, J.L., Katz, A.L., Cutler, C.L., Sherman, W.M., Coyle, E.F., Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion. *J. Appl. Physiol*, 64(4), 1480-1485 (1988).
- 19) Zawadzki, K.M., Yaspelkis, B.B., Ivy, J.L., Carbohydrate-protein complex increases the

- rate of muscle glycogen storage after exercise. *J. Appl. Physiol*, 72(5), 1854-1859 (1992).
- 20) 齊藤慎一, 向井直樹, 鈴木正成, 夕方の激運動後の食事摂取タイミングが翌朝空腹時の筋グリコーゲン含量に及ぼす影響, *体育科学系紀要*, 23, 55-62 (2000).
- 21) Ivy, J.L., Goforth, H.W., Jr., Damon, B.M., McCauley, T.R., Parsons, E.C., Price, T.B., Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J. Appl. Physiol*, 93(4), 1337-1344 (2002).
- 22) Burke, L.M., Collier, G.R., Davis, P.G., Fricker, P.A., Sanigorski, A.J., Hargreaves, M., Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the frequency of carbohydrate feedings. *Am. J. Clin. Nutr*, 64(1), 115-119 (1996).
- 23) Van. Loon. L.J., Saris, W.H., Kruijshoop, M., Wagenmakers, A.J., Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supplementation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *Am. J. Clin. Nutr*, 72(1), 106-111 (2000).
- 24) Burke, L.M., Hawley, J.A., Wong, S.H., Jeukendrup, A.E, Carbohydrates for training and competition. *J. Sports. Sci*, 29, S17-S27 (2011).
- 25) 寺田新, 大森一伸, 中村好男, 村岡功, 長時間運動後の糖質・タンパク質混合物摂取が日本人陸上長距離選手の回復期の血中エネルギー基質並びに関連ホルモン動態に及ぼす影響, *日本運動生理学雑誌*, 9(1), 47-52 (2002).
- 26) De, Sousa, M.V., Simões, H.G., Oshiiwa, M., Rogero, M.M., Tirapegui, J., Effects of acute carbohydrate supplementation during sessions of high-intensity intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol*, 99(1), 57-63 (2007).
- 27) Cheng, I.S., Liao, S.F., Liu, K.L., Liu, H.Y., Wu, C.L., Huang, C.Y., Mallikarjuna, K., Smith, R.W., Kuo, C.H., Effect of dietary glycemic index on substrate transporter gene expression in human skeletal muscle after exercise. *Eur. J. Clin. Nutr*, 63(12), 1404-1410 (2009).
- 28) Broom, D.R., Batterham, R.L., King, J.A., Stensel, D.J., Influence of resistance and aerobic exercise on hunger, circulating levels of acylated ghrelin, and peptide YY in healthy males. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol*, 296(1), R29-35 (2009).
- 29) King, J.A., Miyashita, M., Wasse, L.K., Stensel, D.J., Influence of prolonged treadmill running on appetite, energy intake and circulating concentrations of acylated ghrelin. *Appetite*, 54(3), 492-498 (2010).

- 30) Parkin, J.A., Carey, M.F., Martin, I.K., Stojanovska, L., Febbraio, M.A., Muscle glycogen storage following prolonged exercise: effect of timing of ingestion of highglycemic index food. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 29(2), 220-224 (1997).
- 31) Volek, J.S., Freidenreich, D.J., Saenz, C., Kunces, L.J., Creighton, B.C., Bartley, J.M., Davitt, P.M., Munoz, C.X., Anderson, J.M., Maresh, C.M., Lee, E.C., Schuenke, M.D., Aerni, G., Kraemer, W.J., Phinney, S.D., Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners. *Metabolism*, 65(3), 100-110 (2016).
- 32) Carrithers, J.A., Williamson, D.L., Gallagher, P.M., Godard, M.P., Schulze, K.E., Trappe, S.W., Effects of postexercise carbohydrate-protein feedings on muscle glycogen restoration. *J. Appl. Physiol.*, 88(6), 1976-82 (2000).
- 33) Berardi, J.M., Price, T.B., Noreen, E.E., Lemon, P.W.R., Post-exercise muscle glycogen recovery enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 38, 1106-1113 (2006).
- 34) Zderic, T.W., Davidson, C.J., Schenk, S., Byerley, L.O., Coyle, E.F., High-fat diet elevates resting intramuscular triglyceride concentration and whole body lipolysis during exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 286, E217-E225 (2004).
- 35) Sadur, C.N., Eckel, R.H., Insulin stimulation of adipose tissue lipoprotein lipase. Use of the euglycemic clamp technique. *J. Clin. Invest.*, 69, 1119-1125 (1982).
- 36) 寺田新, 脂質による消化ホルモン分泌作用を活用した新たな筋グリコーゲン回復法の開発, *デサントスポーツ科学*, 36, 61-67 (2015).
- 37) 稲井真, 西村脩平, 浦島章吾, 野中雄大, 木村典代, 寺田新, 運動後の糖質・牛乳混合物の摂取がマウス骨格筋および肝臓におけるグリコーゲン回復に及ぼす影響, *日本スポーツ栄養研究誌*, 10, 38-47 (2017).
- 38) Naperalsky, M., Ruby, B., Slivka, D., Environmental temperature and glycogen re-synthesis. *Int. J. Sports. Med.*, 31(8), 561-566 (2010).
- 39) 稲井真, 西村脩平, 浦島章吾, 野中雄大, 木村典代, 寺田新, 糖質摂取のタイミングの違いが運動後の筋グリコーゲン回復率に及ぼす影響, *日本スポーツ栄養研究誌*, 10, 48-57 (2017).
- 40) 宮下政司, 柏原杏子, 咀嚼と運動からみた消化管ホルモンの変動, *体力科学*, 65, 367-373 (2016).