

# 運動中の糖質 - たん白質混合液摂取と全身持久力

所属領域                      スポーツ医科学  
著                      者                      青   野                      博  
論文指導教員                      青 木 純 一 郎

合格年月日                      平成 / 2 年   3 月   2 日

論文審査員

教授   南谷和利

教授   澤本 裕 浩

助教授   櫻 庭 景 穂

## 目次

	頁
第 1 章 緒言 . . . . .	1
第 2 章 関連文献の考証 . . . . .	4
第 1 節 筋グリコーゲンとパフォーマンス . . . . .	4
第 2 節 糖質摂取とパフォーマンス . . . . .	6
第 3 節 糖質 - たん白質混合摂取と筋グリコーゲン . . . . .	11
第 3 章 実験方法 . . . . .	16
第 1 節 被験者 . . . . .	16
第 2 節 実験デザイン . . . . .	17
(1) 主運動 . . . . .	17
(2) 糖質 - たん白質混合液および糖質液の摂取 . . . . .	18
(3) 試行順序 . . . . .	18
第 3 節 実験手順 . . . . .	19
第 4 節 主運動に対する生理学的変数の測定 . . . . .	20
第 5 節 主運動に対する生化学的変数の測定 . . . . .	20
第 6 節 実験期間および環境条件 . . . . .	21
第 7 節 統計処理 . . . . .	21
第 4 章 実験結果 . . . . .	22
第 1 節 主運動に対する生理学的応答 . . . . .	22



## 第 1 章 緒言

運動のエネルギー源として利用される基質は大部分が筋グリコーゲン、グルコース及び脂質であり<sup>49)</sup>、中でも持続的高強度運動では筋グリコーゲンおよびグルコースが主なエネルギー源となる<sup>14,21)</sup>。肝臓と筋のいずれの組織においてもグリコーゲンはグルコースから合成される。両組織で異なる点は、肝臓ではグリコーゲンを分解してグルコースを生成し、血液中に放出するのに対して、筋ではグルコース 6-ホスファターゼが存在しないため、グルコースが生成できないことである。そのため、筋のグリコーゲンは筋中ですべて消費される<sup>49)</sup>。また、運動中肝臓から放出されたグルコースは活動筋に取り込まれ、酸化され、エネルギー源となるか、筋グリコーゲンを合成する<sup>27)</sup>。

マラソンやトライアスロンなどの持続的運動においては、筋グリコーゲンの減少が疲労を引き起こす重要な要因である<sup>3, 17, 22)</sup>。したがって、長時間にわたって運動を持続させるためには、運動中の血中グルコース濃度を安静値のレベルに保ち、筋グリコーゲンの減少を抑えることが重要である<sup>7, 9, 10, 15, 50)</sup>。そのためには、運動中の糖質摂取が効果的であることが多くの先行研究で示されている。例えば、Hargreaves ら<sup>15)</sup>は、4 時間におよぶ自転車運動中に 1 時間ご

とに糖質液を摂取させ、有意な血中グルコース濃度の増加および筋グリコーゲン利用率の減少を観察した ( $p < 0.05$ )。また、4 時間の運動終了直後に引き続いて 100%  $\dot{V}O_{2\max}$  強度で疲労困憊まで運動を行わせたところ持続時間は  $126 \pm 24.7$  秒となり、プラセボ摂取の場合の  $87.2 \pm 17.5$  秒より有意に長かった ( $p < 0.05$ )。また、Yaspelkis ら<sup>50)</sup>は、190 分間の自転車運動中に 20 分ごとに糖質液を摂取させたところ、有意な血漿グルコースの増加 ( $p < 0.05$ ) および運動の 190 分の時点における筋グリコーゲンの節約効果が観察された。その結果、190 分の運動に引き続いて行われた 80%  $\dot{V}O_{2\max}$  強度での疲労困憊運動の終了時間が、プラセボ摂取条件の  $202.4 \pm 9.8$  分と比較して、 $233.4 \pm 7.5$  分と有意に大きな値が記録された ( $p < 0.05$ )。

このように、持久的運動中の糖質摂取は、血中グルコース濃度を安静値水準に維持し、筋グリコーゲン利用の抑制による節約効果をもたらし、パフォーマンスを改善することがいくつもの研究で報告されている<sup>7、10、15、50)</sup>。

一方、運動前および持久的運動後の回復期に糖質 - たん白質を混合摂取すると、糖質の単独摂取よりもインスリン分泌を促進させ<sup>37、38、39、43、51)</sup>、筋グリコーゲン合成率がより高められることが報告されている。例えば、Nuttall ら<sup>37)</sup>は、安静時における糖質とたん白質の混合摂取による影響を調査し、糖質 50g とたん白質 50g を混合摂

取させ、糖質 50g の単独摂取と比較して、血清インスリン応答における有意な増加を観察した ( $p < 0.05$ )。さらに、50g の糖質と 10、30 および 50g のたん白質をそれぞれ同時に摂取させ、たん白質の摂取量の増加に伴ってインスリンの分泌量が増加することを観察している。また、Zawadzki ら<sup>51)</sup>は、長時間の疲労困憊運動の直後と 2 時間後に糖質とたん白質を約 3:1 の割合で混合摂取させ、糖質だけを摂取させた場合と比較して、インスリン分泌量および筋グリコーゲン合成率の有意な増加を観察した。

したがって、持久的運動中に糖質 - たん白質混合液を摂取すれば、安静時や回復期と同様に、インスリン分泌が促進され、筋グリコーゲンの合成率が高められ、高強度の運動を長時間維持できるものと考えられる。しかし、持久的運動中の糖質 - たん白質混合液摂取が、パフォーマンスに及ぼす効果を検討した研究は今のところ見あたらない。

そこで、本研究は持久的運動中の糖質 - たん白質混合液摂取が、糖質液摂取よりも持久的パフォーマンスを改善するか否かを検討することを目的とした。

## 第2章 関連文献の考証

高強度での持久的運動中のエネルギー源は主に糖質であることから、筋グリコーゲンとパフォーマンスとの関わりは大きい。持久的パフォーマンスを改善するために、今日では運動中にスポーツドリンクなどの糖質 - 電解質溶液を摂取することは常識となりつつある。さらに最近、糖質とたん白質を同時に摂取することによる筋グリコーゲン貯蔵量の増大効果が注目されている。

そこで、本章では筋グリコーゲンとパフォーマンスに関する文献を紹介しながら、糖質 - たん白質混合摂取と筋グリコーゲンとの関わりについて考証する。

### 第1節 筋グリコーゲンとパフォーマンス

Bergstrom ら<sup>3)</sup>は、9名の体育大学生を被験者として、75%V(dot)o<sub>2</sub>maxの強度で自転車運動を行わせ、筋グリコーゲンを枯渇させたのち、たん白質と脂肪食、混合食および高糖質食の3種類をそれぞれ3日間与えた。その結果、筋グリコーゲン量は、たん白質と脂肪食で 0.63 ± 0.10g/100g muscle、混合食で 1.75 ± 0.15g/100g muscle および高糖質食で 3.31 ± 0.30g/100g muscle となった。その後に行った 75%V(dot)o<sub>2</sub>max での自転車運動の持続時間は、それぞれ

56.9±1.7、113.6±5.3 および 166.5±17.8 分であった。これらの結果から運動開始前の筋グリコーゲン量が持久的運動のパフォーマンスを決定する重要な要因であると同時に、筋グリコーゲン量が食事の内容によって異なることが示された。

また、Karlsson と Saltin<sup>22)</sup>は 10 名の体育大学生に 3 週間の間隔を開けて 30km 走のタイムトライアルを 2 回行わせ、それぞれのトライアル前 3 日間に高糖質食をとらせた場合と、混合食をとらせた場合とのパフォーマンスを比較した。それぞれの規定食を 3 日間とった後の外側広筋における筋グリコーゲン含有量は、高糖質食後は 35g/kg wet muscle および混合食後は 17g/kg wet muscle であった。全ての被験者において高糖質食後のレースにおいてより良いパフォーマンスが記録された。さらに、大腿四頭筋におけるグリコーゲン利用率を  $0.5\text{g/kg wet muscle} \times \text{km}$  として、筋グリコーゲンの利用量を算出すると、大腿部の筋グリコーゲン含有量が 3g/kg wet muscle 以下に減少したとき、ベストパフォーマンスが発揮されたときのランニングスピードが維持できなくなることが明らかとなった。

持久的運動中は筋グリコーゲンが徐々に低下してしまうので、運動前にグリコーゲンを多量に貯蔵しておけば、パフォーマンスが改善されると考えられる。そこで、こうした先行研究を受けて、今日では食事とトレーニングを管理し、運動前の筋グリコーゲン含有量



を通常よりも増加させるグリコーゲン・ローディング<sup>2, 44)</sup>が行われるようになった。また、筋グリコーゲンの重要性はマラソンやトライアスロンなど持久的競技だけでなく、サッカーやテニスなどの球技スポーツでも十分認識され、今では一流スポーツ選手だけでなく、市民スポーツレベルにおいてもグリコーゲン・ローディングが取り入れられている<sup>40)</sup>。

グリコーゲン・ローディングが行われ始めた初期の頃は、試合の6~7日前に、まず激しいトレーニングにより筋グリコーゲンを低下させることに始まり、次の3日間は低炭水化物食にしてさらに筋グリコーゲンを低下させ、次の3日間は筋グリコーゲンを蓄積させるために高炭水化物食をとるというものであった<sup>40)</sup>。しかし、この方法では食事をコントロールする期間が長すぎるなどの問題点があった。そこで、1980年代に Sherman ら<sup>42)</sup>は、初めの3日間は普通食に近い50%炭水化物食とし、後半の3日間は70%炭水化物食にすることにより、初期のグリコーゲン・ローディングと同じ効果が得られるとし、より現実的な方法でのグリコーゲン・ローディングを提案した。

## 第2節 糖質摂取とパフォーマンス

運動中の筋グリコーゲンの減少を抑制するためには、運動中の糖

質摂取も有効であると考えられる。例えば、Coyleら<sup>10)</sup>は、7名の自転車選手を被験者として、74% $\dot{V}O_2\max$ の強度での自転車運動中の20分の時点で体重1kg当たり1.0gを、また60、90および120分の時点で0.25gのグルコースポリマー溶液を摂取させ、規定の強度が維持できなくなるまで自転車運動を行わせた。その結果、運動中の血中グルコース濃度は安静時の値より低下することはなく、運動終了までほぼ定常状態が示された。運動持続時間は $157\pm 5$ 分で、プラセボ摂取条件( $134\pm 6$ 分)よりも有意に長くなった( $p<0.01$ )。一方、プラセボを摂取させた場合、60分を過ぎたあたりから血中グルコース濃度が低下し始め、130分時点で $2.9\text{mmol}$ まで低下し、規定強度が維持できなくなった。したがって、彼らは運動中の糖質摂取によって、高い糖質酸化率が維持され、筋グリコーゲンの減少が抑えられて疲労の発現が遅延したものと結論づけた。

また、Hargreavesら<sup>15)</sup>は10名の男性を被験者として、50% $\dot{V}O_2\max$ の運動強度での自転車運動を4時間にわたって行わせ、その0、1、2および3時間の時点でそれぞれ43gのグルコースを摂取させ、引き続いて100% $\dot{V}O_2\max$ の運動強度で疲労困憊まで自転車運動を行わせた。また、運動前、運動中20、50、80、110、140、170、200および230分の時点で採血が、運動前、運動中1および4時間の時点で外側広筋にて筋生検が行われた。その結果、運動

中の血中グルコース濃度がプラセボの場合は徐々に低下したのに対し、グルコースの場合は安静時と変わらない値が示された。一方、筋グリコーゲンの利用量はプラセボの  $126.2 \pm 5.5 \text{ mmol/kg} \cdot \text{wet muscle}$  に対し、グルコースを摂取させた場合は、 $100.7 \pm 10.2 \text{ mmol/kg} \cdot \text{wet muscle}$  と有意に低いことが観察され ( $p < 0.05$ )、運動中の糖質摂取による筋グリコーゲンの節約効果が示唆された。また、4 時間の運動に引き続いての疲労困憊運動の持続時間は、プラセボの場合の  $87.2 \pm 17.5$  秒に対し、グルコースを摂取させた場合  $126.8 \pm 24.7$  秒と有意に高い記録が観察された ( $p < 0.05$ )。

このような運動中の糖質摂取によるパフォーマンスの改善は、ランニングや、間欠的な運動を用いての研究<sup>29, 35, 41, 46, 47, 48</sup>)でも報告されている。

一方、Chryssanthopoulos と Williams<sup>6)</sup>は運動前の糖質食と運動中の糖質液摂取とを組み合わせた場合と、運動中の糖質液摂取だけの場合の持久的ランニングパフォーマンスの改善に及ぼす効果を検討している。すなわち、ランニング愛好家 10 名を被験者として、 $70\%V(\dot{O}_2)\text{max}$  の運動強度でのトレッドミルランニングを疲労困憊まで行わせた。運動前の糖質食 (Meal(M)) + 運動中の糖質液摂取 (Carbohydrate solution(C))の場合でも運動中の糖質液摂取だけ (C) の場合でも運動中の血中グルコース濃度はほぼ安静値のレベルで定

常状態が示された。しかし、糖質酸化率は条件 M+C において運動開始後 60 分まで条件 C よりも有意に高かった ( $p < 0.01$ )。そして、後者の持続時間 ( $125.3 \pm 7.0$  分) と比較して、前者の持続時間は  $147 \pm 9.6$  分と有意に長くなった ( $p < 0.01$ )。

Costill ら<sup>8)</sup>は、運動前の糖質摂取は、運動開始時における血中インスリン濃度を高め、活動筋への遊離脂肪酸の利用能を減少させ、筋グリコーゲン利用率を高めることによって早期の疲労を引き起こす可能性があることを報告している。そこで Foster ら<sup>13)</sup>は、16 名の男女を被験者とし、75g のグルコースを摂取させたのち、45 分後に  $84\% \dot{V}O_2 \max$  の強度での自転車運動を疲労困憊まで行わせた。グルコースを摂取させた場合、運動持続時間は 43.2 分でプラセボ摂取の場合 (53.2 分) より 19% も減少したことを示している。

しかしながら、Chryssanthopoulos と Williams<sup>6)</sup>の研究では、運動前 + 運動中の糖質摂取条件において、糖質酸化率が運動中の糖質摂取だけの場合よりも高かったにもかかわらず、運動持続時間が有意に増加された。この結果から、インスリン濃度の増加が、運動中に摂取した糖質の活動筋への利用を促進し、高い糖質酸化率をもたらしたことが推察される。したがって、高められた糖質酸化率による、筋グリコーゲンの利用率の増加よりも、外因性の糖質による活動筋における利用率の方が上回ったと示唆している。

一方、Anantaraman ら<sup>11)</sup>は適度にトレーニングされた5名の被験者を用い、直前に30gのグルコースポリマーを摂取させて、90%V(dot)o<sub>2</sub>maxの強度での60分間の自転車運動を行わせた。その間15、30および45分の時点にもそれぞれ30gのグルコースポリマーまたはプラセボを摂取させた。その結果、運動前+運動中のグルコース摂取条件では、運動前にしかグルコースを摂取させなかった場合よりも血中グルコース濃度が常に高かったにも関わらず、パフォーマンスには条件間に有意な差が認められなかったと報告している。また、Davis ら<sup>11)</sup>も15人の良くトレーニングされた男性サイクリストに、6%もしくは12%のグルコースポリマーを65%V(dot)o<sub>2</sub>maxでの自転車運動中の10、30、50分の時点に275mlずつ摂取させ、その直後に全力運動を行わせたところ、プラセボ摂取と比較して、どちらの摂取条件においても血中グルコース濃度が高められたにもかかわらず、パフォーマンスに改善が認められなかったことを報告している。

これらの結果は、運動前にグルコースを摂取させれば、運動中にさらにグルコースを摂取させてもそれ以上の効果は期待できないということを示すものである。糖質摂取は活動筋でのグルコース吸収を増加させるが、筋グリコーゲン利用にはわずかな影響しかもたらないという報告もなされ<sup>4、16)</sup>、運動中の糖質摂取がパフォーマンス

スの改善に及ぼす影響についての先行研究の結果は必ずしも一致していない。

### 第3節 糖質 - たん白質混合摂取と筋グリコーゲン

インスリンは筋膜を通してグルコースの輸送を促進し、活動筋での糖質利用を促進させる。このことからインスリンは低血糖ホルモンとして働く。つまり血中グルコース濃度を低下させる<sup>34)</sup>。インスリンは膵臓の内分泌機能を受け持つランゲルハンス島の中心部にある $\beta$ 細胞から分泌され、血中グルコース濃度によって、負のフィードバック系により調節されている。すなわち、糖質を摂取すると血中のグルコース濃度が高まり、それが $\beta$ 細胞に検知され、その結果インスリン分泌が促進される。

一方、糖質とたん白質を同時に摂取すると、糖質の単独摂取時よりもインスリンの分泌が促進されることが報告されている<sup>37、38、39、43、51)</sup>。例えば、Rabinowitzら<sup>39)</sup>は8名の健康な女性に対して、100gのグルコースと64gのたん白質を同時に摂取させ、その後の血中グルコース濃度および血清インスリン濃度の変化調べたところ、グルコースあるいはたん白質を単独摂取させた場合より血中グルコース濃度の増加が有意に少ないにもかかわらず、血清インスリン濃度はグルコース単独の場合よりも2倍、たん白質単独摂取の場合より4

倍も大きな増加を観察した。糖質とたん白質の混合摂取による相乗的なインスリン分泌の増加が生じる理由は明らかではないが、胃腸管からのインスリン分泌促進剤の放出の増加が示唆されている<sup>38)</sup>。

また、Nuttallら<sup>37)</sup>はインスリン非依存性糖尿病患者を被験者として、50gのたん白質、50gのグルコースあるいは両者同時に無作為な順序で摂取させ、血漿グルコースおよび血清インスリン応答を摂取後5時間にわたって測定した。グルコースとたん白質を同時に摂取させた場合の血漿グルコースの増加量は、グルコースを単独摂取させた場合よりも有意に低かった ( $p<0.05$ )。しかし、血清インスリン分泌量はグルコースおよびたん白質を単独摂取させた場合よりも両者同時に摂取させた方が、有意に高かった ( $p<0.01$ )。さらに、グルコースに加えるたん白質の量の変化による血中グルコースおよびインスリン分泌量に及ぼす影響を検討するために、50gのグルコースに、たん白質を0、10、30および50g付加して摂取させ、摂取後5時間にわたり血漿グルコースおよび血清インスリン応答を測定した。血漿グルコースの増加量は、50gのたん白質を付加した場合だけ、グルコースを単独で摂取させた場合よりも有意に低かった ( $p<0.05$ )。一方、血清インスリンの分泌量は30gおよび50gのたん白質を同時に摂取させたとき、グルコースを単独で摂取させた場合よりも有意に高かった。10gのたん白質を同時に摂取させた場合

も、有意ではないがグルコースの単独摂取よりも平均で 25%高い血清インスリン分泌量が示された。

Spiller ら<sup>43)</sup>は、14 人の健康な標準体重の男女を被験者とし、糖質 + たん白質摂取に対する血清グルコースおよびインスリン応答を調査した。58g の糖質に、0、15.8、25.1、33.6 および 49.9g のたん白質が加えられ、摂取後の 0、15、30、60 および 120 分時点で血液サンプルが採取された。その結果、糖質に加えたたん白質の摂取量が増加するにしたがって、血清グルコース応答が減少した。また、たん白質を混合摂取させた場合、糖質だけの摂取条件よりも血清グルコース応答が有意に減少され ( $p < 0.01$ )、血清グルコース応答とたん白質摂取量の間には負の有意な相関が示された ( $p < 0.001$ )。一方、たん白質の摂取量の違いによってインスリン応答における差は認められなかったが、たん白質の混合摂取は、糖質だけの摂取よりも有意 ( $p < 0.01$ ) に高いインスリン応答をもたらした。

このように、安静時における糖質 - たん白質混合摂取による血中グルコースおよびインスリン応答に及ぼす影響についての研究は古くから行われており、同時に摂取する糖質とたん白質の比率についての研究もされている。さらに最近では、運動後の回復期に糖質とたん白質を混合摂取させ、血清インスリン応答や筋グリコーゲン貯蔵率に及ぼす影響について調査した研究も見られるようになってきた。



例えば、Zawadzki ら<sup>51)</sup>は9人の男性サイクリストを被験者として、長時間の持久的運動後に糖質 - たん白質を混合摂取させ、血漿インスリン応答および筋グリコーゲン貯蔵率に及ぼす影響について調査した。まず、2時間の自転車運動により筋グリコーゲンを枯渇させ、その直後と2時間後に、112gの糖質と40.7gのたん白質を同時に摂取させ、糖質112gもしくはたん白質40.7gをそれぞれ単独で摂取させた場合と比較した。その結果、血清インスリン応答は、摂取後15分の時点からほとんどの時点で、糖質あるいはたん白質を単独摂取させた場合よりも有意に高かった。同様に、筋グリコーゲン貯蔵率も有意に高かった。したがって、糖質とたん白質の混合摂取は、運動後の回復期においても安静時と同様に糖質とたん白質の相乗効果によってインスリン分泌を促進し、その結果、筋グリコーゲン貯蔵量を高めるということが示唆される。

上述のZawadzki ら<sup>51)</sup>はミルクなどの食品を利用することにより、たん白質を摂取させているが、たん白質構成成分のアミノ酸を個々に用いた研究でも同様の効果もたらされ、中でもアルギニンにその効果が高いことが報告されている<sup>12)</sup>。そこで、Ivy<sup>20)</sup>は糖質とアルギニンを同時に摂取させたときの回復期における筋グリコーゲン合成率を検討し、糖質だけを摂取させた場合よりも筋グリコーゲン合成率が高いことを見い出した。しかし、血中インスリン濃度は同等

であった。血中インスリン濃度が同等であったにも関わらず、筋グリコーゲン合成率に差が見られたのは、筋に取り込まれたグルコースの酸化される割合が低下されたからだと考察しており、糖質酸化率の抑制の結果として、その分グリコーゲン合成への供給が増加されたためであることを示した。

いずれにしても、これらの研究では安静時および回復期における糖質 - たん白質混合摂取によるインスリン分泌およびグリコーゲン合成に及ぼす影響について調査されているものであって、運動中に摂取させた場合のパフォーマンスに及ぼす影響についての研究が課題として残されている。

### 第3章 実験方法

#### 第1節 被験者

順天堂大学スポーツ健康科学部の学生でトライアスロン部に所属し、定期的にトレーニングを行っている男子8名（内4名は1998年日本学生トライアスロン選手権に出場）を被験者とした。彼らは測定機器、実験手順等に慣れるために研究室を数回訪問した。その後、身長、体重および自転車エルゴおよびランニングの最大酸素摂取量を測定した（表1）。

表1

身長および体重については、同年齢における日本人の平均値（身長171.9cmおよび体重65.8kg<sup>33)</sup>と比較すると、身長はほぼ同じであったが、体重はやや少なく痩せ型であった。

自転車エルゴおよびランニングでの最大酸素摂取量は、適度にトレーニングされたトライアスリートを対象としたKohrtら<sup>24)</sup>の結果（自転車エルゴ57.9ml/kg・min、およびランニング60.5ml/kg・min）よりも高い値であった。しかし、三浦ら<sup>30)</sup>が用いた国内のプロトライアスリートを含む一流男子トライアスリートの自転車エルゴ（66.8ml/kg・min）およびランニング（68.8ml/kg・min）による値と比較すると、自転車エルゴの値がやや低い傾向にあった。また、Kreiderら<sup>25)</sup>の被験者の値（自転車エルゴ64.3ml/kg・minおよびラン

ニング 68.1ml/kg・min) とはほぼ同じ範囲内にあった。

なお、被験者には実験に先立って、本実験の目的、内容、手順について、口頭および文書（付表1）による説明を行い、了解を得た上で被験者としての同意書を得た。また、順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科倫理委員会の承認を得た。

付表1

## 第2節 実験デザイン

### (1) 主運動

主運動としての負荷運動を、トライアスロンをシミュレートした Kreider ら<sup>25)</sup>の研究で報告された強度を用いた。まず、自転車エルゴメータを用いて 65% $\dot{V}O_{2max}$  に相当する負荷でペダル回転数を 80rpm として1時間自転車エルゴ運動を行わせ、その後、5分間のランニングの準備期間をはさんで、トレッドミル上で 80% $\dot{V}O_{2max}$  に相当する速度でのランニングを疲労困憊まで行わせた。なお、自転車運動の負荷時間(1時間)は、トライアスロン競技の国際標準距離 (International Standard Distance:51.5km)<sup>36)</sup>における自転車種目(40km)の男子選手の平均的な所要時間を用いた。

65%および 80% $\dot{V}O_{2max}$  に相当する自転車エルゴ運動時の負荷 (kp)およびトレッドミル走の速度(m/分)は、自転車エルゴ運動およびトレッドミル走で、最大酸素摂取量を測定した時に得たそれぞれの

負荷(速度) - %  $\text{Vo}_2\text{max}$  関係の一次回帰式より求めた。

## (2) 糖質 - たん白質混合溶液および糖質液の摂取

実験液は、糖質 - たん白質混合液摂取する(CHO-Pro)条件と、糖質だけを摂取する(CHO)条件とで実験を行った。10%濃度の糖質液(Shaklee Performance : Shaklee 社製) 100ml に、CHO-Pro 条件ではたん白質(プロテインダブルエックス : 明治製菓社製) 3.3g を、CHO 条件ではグルコース(第一製薬社製) 3.1g を加え、摂取カロリーを同等にした。その際、たん白質およびグルコースはそれぞれ同一製品のオブラート(国光オブラート社製)に包み、二重盲検法により与えられた。なお、CHO-Pro 条件で摂取した糖質とたん白質の比率(3:1)は Zawadzki ら<sup>51)</sup>に従った。

摂取パターンは Yaspelkis ら<sup>50)</sup>の20分ごとに200mlずつ摂取させる方法を一部変更し、間隔および1回の摂取量ともに半分ずつにした。

## (3) 試行順序

実験は8名の被験者のうち4名がCHO-Pro条件から、また残りの4名がCHO条件からそれぞれ主運動を行うように配慮した。なお、2条件の間隔は最低1週間とるようにし、2条件とも同じ時刻に実験を開始した。

### 第3節 実験手順

主運動の実験プロトコルを図1に示した。被験者は指定された日時に2度実験室に出頭した。まず、約10分間椅座位で安静状態を保ち、心拍数、酸素摂取量および呼吸交換比を測定した。その後、安静時の血中グルコースおよび血中乳酸濃度を測定するために採血を後で示す手順に従って行った。

図1

次に、ジョギング、ストレッチなどのウォームアップを自由に行わせた。その後、自転車エルゴメータのサドルの高さを最もペダリングしやすい位置に調節し、実験液の摂取後、開始の合図とともにペダリングを開始した。自転車運動中は心電図を連続モニターし、心拍数を10分ごとに記録した。実験液の摂取は10分の時点から10分ごとに自転車運動終了直前まで行った。また、20および40分の時点で採血を行った。1時間の自転車運動が終了すると被験者は直ちにエルゴメータから降り、採血を行った後、採気用のマスクを装着した。

次に、トレッドミルの設定速度に調節し、自転車運動終了から5分後に験者の合図とともにトレッドミルに飛び乗り、疲労困憊までランニングを行った。ランニング中の心拍数、酸素摂取量および呼吸交換比が5分ごとに記録された。被験者が疲労困憊に達すると、直ちにトレッドミルを止め、採血を行った。

なお、被験者には実験の前日 24 時間のアルコールおよびカフェインの摂取および高強度運動を避け、実験の前日および当日の食事記録をつけ、2 回目の実験も 1 回目と同様の食事をとるよう指示した。

#### 第 4 節 主運動における生理学的変数の測定

心拍数は、胸部双極誘導により心電図を患者監視装置（ハートメモリ、2E26：三栄側器社製）で連続モニターすると同時に、その R 棘の数を 30 秒毎に数えて心拍数（beats/min）を求めた。また、換気量（l/min）を熱線流量計（ミナト医科学社製：RM-300）を用いて 30 秒毎に定量した。呼気の一部は赤外線式およびジルコニア素子式医用ガス分析器（ミナト医科学社製：MC-360）を用いて、酸素および二酸化炭素濃度について分析し、酸素摂取量（ml/kg・min）および二酸化炭素排出量を 30 秒毎に算出した。分析器の較正は、既知濃度の標準ガス（日本酸素：O<sub>2</sub>-14.99%、CO<sub>2</sub>-5.00%）によった。

#### 第 5 節 主運動における生化学的変数の測定

採血の直前にブラッドランセットを用いて被験者の指先に尖刺し、誘出させた血液をまず、グルコース分析用のキャピラリーチューブ（25  $\mu$  l）に採取し、次に乳酸分析用のキャピラリーチューブ（20  $\mu$  l）に採取した。グルコース分析用の血液は採取後直ちにグルコース分

析器(YSI モデル 27: YSI 社製)によって分析した。乳酸分析用の血液は採取後直ちにキャピラリーチューブごと溶血剤入りのサンプル容器に投入し、十分に溶血させるために 15 分以上放置し、その後乳酸分析器(BIOSEN5040L: Enviteck 社製)によって分析した。

#### 第 6 節 実験期間および環境条件

全ての実験は 1998 年 9 月から 11 月にかけて、順天堂大学スポーツ健康科学部運動生理学研究室の恒温恒湿実験室で行われた。その間の平均室温は  $20.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  および相対湿度は  $57.5 \pm 2.4\%$  であった。

#### 第 7 節 統計処理

CHO-Pro および CHO 条件間の全ての実験結果における差の検定については対応のある student の t-test を用いた。有意水準は危険率 5% 未満とした。なお、データは全て平均  $\pm$  標準偏差 (Mean  $\pm$  SD) で示した。



## 第4章 実験結果

### 第1節 主運動に対する生理学的応答

#### (1) 自転車運動中の心拍数

各被験者の自転車運動中の心拍数の変化を図2に示した。いずれの条件においても、自転車運動中の心拍数はほぼ定常状態を示した。しかし、その水準は CHO 条件での約 160 拍/分に対して、CHO-Pro 条件では約 150 拍/分と低く、運動開始 10 分の時点以降常に CHO 条件よりも CHO-Pro 条件の方が有意に低かった。

図 2

#### (2) ランニング中の心拍数、酸素摂取量および呼吸交換比

ランニング中の心拍数、酸素摂取量および呼吸交換比を、5 分ごとに 8 名中 6 名以上の被験者が持続できた 10 分までと、ランニング終了時のそれぞれ 1 分間値を平均して表 2 に示した。

表 2

心拍数は、CHO および CHO-Pro 条件において、ランニング中運動時間の経過とともに上昇し、定常状態を示すことはなかった。また、条件間における有意な差は認められなかった。

酸素摂取量は 2 つの条件においてランニング開始 5 分後から運動終了までほぼ定常状態を示した。ランニングを開始して 5 および 10 分の時点と運動終了時での平均では、CHO および CHO-Pro 条件においてそれぞれ  $56.4 \pm 1.2 \text{ ml/min}$  ( $84.0 \pm 1.8\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ ) および  $55.7$

±0.8ml/min (83.0±1.1%V(dot)o<sub>2</sub>max) であった。

呼吸交換比は、ランニングの0分および5分の時点と運動終了時において、CHO条件よりもCHO-Pro条件の方が有意に低かった。また、その他の時点においてもほとんどの被験者がCHO条件よりもCHO-Pro条件で低い値を示した。

## 第2節 主運動に対する生化学的応答

### (1) 血中グルコース濃度

CHOおよびCHO-Pro条件における血中グルコース濃度の変化を図3に示した。

図3

運動開始から終了まで、CHOおよびCHO-Pro条件においてほぼ一定の値(75±6および72±8mg/dl)が示され、安静値水準が保たれていた。また、条件間における有意な差は認められなかった。

### (2) 血中乳酸濃度

CHOおよびCHO-Pro条件における血中乳酸濃度の変化を図4に示した。

図4

CHOおよびCHO-Pro条件において、自転車エルゴ運動中は安静時(2.02±0.54mmol/lおよび2.02±0.54mmol/l)よりも有意に高い値(4.07±1.57mmolおよび3.54±0.94mmol/l)でほぼ定常状態が保たれた。しかし、ランニング終了直後の値(8.91±2.38mmol/lおよび

9.85±2.63mmol/l)は自転車エルゴ運動終了時の値(3.16±1.09mmol/l  
および 3.27±0.86mmol/l) より約 3 倍も高く、その差は有意であっ  
た。

安静時、自転車エルゴ運動中およびランニング終了直後の両条件  
による平均値には、有意な差は認められなかった。しかし、ランニ  
ング終了直後の値については 8 名中 6 名の被験者は、CHO-Pro 条件  
において高い値が示された。

### 第 3 節 主運動におけるパフォーマンス

CHO および CHO-Pro 条件における、それぞれの被験者のランニン  
グの持続時間を図 5 に示した。

図 5

全ての被験者において CHO 条件よりも CHO-Pro 条件において勝  
れたランニング持続時間が記録され、それぞれの平均値は CHO 条件  
では 17.9±9.2 分であったのに対し、CHO-Pro 条件では 21.6±8.8 分  
で、その差は統計的に有意であった。

## 第 5 章 考察

### 第 1 節 主運動の運動強度

トライアスロンをシミュレートし、トライアスロン競技中の水泳、自転車およびランニングの運動強度を報告した研究はいくつかあるが、用いられる被験者の競技力によって結果はかなり異なっている<sup>18、19、25、28、30、31、32</sup>。そこで、本研究の被験者と  $V(\dot{o}_2)_{max}$  が近似している Kreider ら<sup>25)</sup>の研究に着目し、そこで示された運動強度（自転車エルゴ  $65\%V(\dot{o}_2)_{max}$  およびランニング  $80\%V(\dot{o}_2)_{max}$ ）を参考にして本研究の主運動の強度を設定した。

その結果、自転車エルゴ運動中の平均心拍数は、CHO および CHO-Pro 条件において、 $161.8 \pm 2.9$  拍/分および  $150.0 \pm 4.1$  拍/分ではほぼ定常状態を示した。一方、ランニング中の心拍数は 2 条件において徐々に増加する傾向が見られ、ランニング終了時で約  $95\%HR_{max}$  まで増加した。本研究では、規定されたランニングスピードで走れなくなった時点を運動終了のポイントとしたが、 $100\%$  近くまで心拍数が上昇したことから、最大運動テストと同様にオールアウトまで追い込んだ状態で運動を終了したことが推察される。

酸素摂取量はランニング開始 5 分後から定常状態を示し、ランニング時の 5 分、10 分および終了時点での値を平均すると、CHO およ

び CHO-Pro 条件において、それぞれ  $56.4 \pm 1.2 \text{ ml/min}$  ( $84.0 \pm 1.8\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ ) および  $55.7 \pm 0.8 \text{ ml/min}$  ( $83.0 \pm 1.1\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ ) を示し、2条件ともに  $80\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  を越えてしまった。これはランニングの直前に行った自転車運動の残存効果<sup>26)</sup>が原因と考えられる。すなわち、自転車運動とランニングからなる連続運動では、それぞれを別々に運動したときと比べて、ランニングの前に行った自転車運動の残存効果によって、ランニング時に酸素摂取量および心拍数などのより高い増加がみられたものと考えられる。

石原と青木<sup>19)</sup>は、よくトレーニングを行っているエリート男子トライアスリートを被験者として、国際標準距離 ( $51.5 \text{ km}$ )<sup>36)</sup>のトライアスロン競技における運動強度を推定した。事前に行われた3種目の漸増最大テストから得られた心拍数 - 酸素摂取量関係式をもとに、実際のトライアスロン競技中の心拍数を求め、その心拍数から酸素摂取量を推定したところ、トライアスロン競技における3種目平均の運動強度は  $85\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  で、ランニング中は  $83.6\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  に相当すると報告している。一方、Kreiderら<sup>25)</sup>の研究では、実験室でトライアスロン競技をシミュレートし、その際に酸素摂取量を測定し、事前に測定した3種目の最大酸素摂取量に対しての割合として運動強度を求めた。本研究における主運動の強度は、事前に行われた最大運動テストにおいて得られたデータを

もとに設定されたので、運動中の残存効果によって設定された運動強度よりも高くなった。ランニング中の酸素摂取量は、2条件ともに Kreider ら<sup>25)</sup>によって報告された強度よりも高くなったが、石原と青木<sup>19)</sup>の研究の結果と一致しているので、定期的にトレーニングを行っているトライアスリートを被験者として、全身持久力を測定するために用いる運動の強度としては適切であったと考えられる。

## 第2節 糖質 - たん白質混合液摂取と全身持久力

ランニングの持続時間は全ての被験者において CHO 条件よりも CHO-Pro 条件で良くなった。すなわち、CHO 条件では  $17.9 \pm 9.2$  分であったのに対し、CHO-Pro 条件では  $21.6 \pm 8.8$  分となり、その差は統計的に有意であった。したがって、持久的運動中に糖質にたん白質を加えて摂取したことは、長時間運動のパフォーマンス向上に有益な効果をもたらされたものと考えられる。

持久的運動中の疲労を引き起こす要因としては、血中グルコース濃度の低下および筋グリコーゲンの減少が認められている<sup>7, 9, 15, 17)</sup>。また、持久的運動中の糖質摂取は、血中グルコースレベルの維持および筋グリコーゲンの節約をもたらす<sup>7, 9, 15, 50)</sup>ことも知られている。したがって、持久的運動中の糖質摂取は疲労の発現を遅らせ、パフォーマンスを改善させる<sup>5, 6, 7, 9, 10, 15, 28, 29, 35, 41, 46, 47, 48, 50)</sup>こと

になる。本研究ではどちらの摂取条件においても糖質を摂取させているので、上記の効果はどちらの条件においてももたらされたものと考えられる。確かに、2条件ともに運動中の血中グルコース濃度は安静時のレベルが維持され、2条件間における有意差は見られなかった。また、呼吸交換比も2条件において1.00前後の値が維持され、高い糖質酸化率が維持されたことが示唆される。

安静時および回復期における糖質とたん白質の混合摂取が糖質だけを摂取させた場合よりもインスリン分泌を促進させ<sup>37, 38, 39, 43, 51)</sup>、筋グリコーゲン合成率を高める<sup>51)</sup>ということがこれまで報告されている。そこで運動中にも糖質 - たん白質を混合摂取させることにより、糖質だけを摂取させる場合よりもインスリン分泌が促進されることが予想される。すなわち運動中、高い血中インスリン濃度が維持されれば、摂取したグルコースの筋への取り込みが促進され、高い糖質酸化率が維持されることにより高強度の運動を長時間維持できると考えられる。また、Zawadzkiら<sup>51)</sup>の研究において、糖質とたん白質を混合摂取させた場合と糖質だけを摂取させた場合を比較し、血漿インスリンおよび血漿グルコース応答において、摂取後30分以降に差がみられたことから、30分もしくはそれ以上持続される運動中に糖質 - たん白質を混合摂取させれば、糖質だけを摂取させた場合と比較して何らかの効果が得られると考えられた。

インスリン分泌が促進されると、筋膜を通してのグルコース輸送が促進され、筋中でのグルコース利用を促進させる。その結果、血中グルコース濃度の低下および呼吸交換比の増加が示される<sup>34)</sup>。しかし、本研究では2条件間に血中グルコース濃度の有意な差が見られなかったことから、摂取した糖質の筋への取り込みに差がなかったと考えられる。しかし、呼吸交換比は CHO-Pro 条件よりも CHO 条件の方が高くなる傾向が見られた。

Ivy<sup>20)</sup>は長時間運動からの回復期に糖質とアルギニンを混合摂取させ、糖質だけを摂取させた場合よりも高い筋グリコーゲン合成率を観察している。そこでは、糖質とアルギニンを混合摂取させた場合と、糖質だけを摂取させた場合とで血中インスリン濃度に有意差がなかったが、糖酸化率の抑制の結果として、その分グリコーゲン合成への供給が増加されたためであると報告されている。

さらに、運動中は運動前や回復期とは違ってインスリン濃度が増加しにくいことを報告した研究もある。例えば、Chryssanthopoulos と Williams<sup>6)</sup>は、10名の適度にトレーニングされたランナーを被験者として用い、70%V(dot)o<sub>2</sub>max に相当するスピードで走れなくなるまでトレッドミルランニングを行わせ、運動の3時間前および運動中20分ごとに糖質を摂取させた。運動直前および約2時間の運動終了直後に血中インスリン濃度が測定され、運動直前においては顕著



な増加が観察されたが、運動終了直後は有意な差が見られなかったことを報告した。また、Coyleら<sup>9)</sup>は、7名の持久的なトレーニングを行っている自転車選手を被験者として用い、71%V(dot)o<sub>2</sub>maxの運動強度で規定された運動強度が維持できなくなるまで自転車運動を行わせた。運動中20分ごとに10%の糖質液を摂取させた結果、プラセボ摂取よりパフォーマンスは改善されたが、運動中のインスリン応答についてはわずかな違いしか観察されなかった。

一方、最近、運動時にはインスリンの働きとは別の経路で活動筋へグルコースが取り込まれているということが報告されている<sup>23)</sup>。すなわち、運動にともなう筋収縮時に細胞内のカルシウム濃度が上昇することにより、細胞内にプールされているグルコース輸送担体（GLUT-4）が細胞膜上に移動し、活動筋へのグルコース輸送を行っているというものである。したがって、糖質にたん白質を加えて摂取させても、血中グルコースからの活動筋への取り込みに差が現れたとは考えにくい。

無氣的閾値（anaerobic threshold:AT）を越えるような高い強度の運動を持続するためには筋グリコーゲンが無氣的に乳酸に分解されエネルギーが供給される。筋中に発生した乳酸は、血液中へ流れ込み、血中乳酸濃度が増加する。この乳酸は重炭酸ナトリウムによって緩衝され炭酸となり、さらに二酸化炭素と水に分解される。この

二酸化炭素は呼気として放出され、そのために呼吸交換比が高くなる。CHO条件において示されたより高い呼吸交換比は、より多くの筋グリコーゲンが分解されていることを示唆している。本研究で用いたランニングの運動強度は  $80\%V(\dot{O}_2)_{max}$  とかなり高いので、脂質の代謝を促進させて運動を持続することは考えにくい。したがって、糖質によるエネルギー供給に依存して運動を持続したと推察されるので、2条件において、酸化された糖質の量は同じであると考えられる。酸化された糖質の量が同じであれば、当然呼吸商は同じであると推察されるが、CHO条件において呼吸交換比が高かったことから、CHO条件においてより多くの筋グリコーゲンが分解され呼気の二酸化炭素が増加し、その結果、CHO-Pro条件よりも呼吸交換比が高くなったと考えられる。これにより、CHO条件よりも、CHO-Pro条件の方が長時間にわたる一定運動中の筋グリコーゲンの減少率を抑えたものと推察される。

運動中の血中乳酸濃度は、どちらの条件においても安静時に比べて運動中は常に高い値が示され、その差は有意であった。また、自転車運動中はほぼ定常状態が示されたが、ランニング終了時には自転車終了時よりも有意に高い値が示された。安静時および自転車運動中の両条件による平均値には有意な差が見られなかったが、ランニング終了時において8名中6名の被験者でCHO-Pro条件の方が高

くなる傾向が見られた。したがって、この現象は、CHO-Pro 条件において筋グリコーゲンがより節約され、運動終了間際にそれまで節約されていた筋グリコーゲンが分解され血中乳酸濃度が高められたことが推察される。これは、上述の筋グリコーゲンの節約効果のさらなる根拠となるものと考えられる。

以上のことから、持久的運動中の糖質 - たん白質混合液摂取は運動中の筋グリコーゲンを節約し、その後の高強度運動のパフォーマンスを改善するものと考えられる。しかし、今後の課題として筋グリコーゲンの節約の直接的証明および本研究に用いた主運動以外の運動形式、強度、時間等の検討は残されたといえよう。

## 第6章 結論

持久的運動中に糖質 - たん白質混合液を摂取することによって、血中グルコース濃度は安静値のレベルが維持され、呼吸交換比の増加が抑えられた。さらにランニング終了直後における血中乳酸濃度のより一層の増加が観察され、全ての被験者においてランニングの持続時間が増加された。これらの事実は、持久的運動中の筋グリコーゲンの節約を予測させる。したがって、長時間運動中の糖質 - たん白質混合液摂取は運動中の筋グリコーゲンの減少を抑え、その後の高強度最大運動のパフォーマンスを有意に向上させることが結論される。

## 第7章 要約

- 1) 本研究の目的は、運動中の糖質 - たん白質混合液摂取が全身持久力に及ぼす影響を検討することであった。
- 2) 被験者として順天堂大学スポーツ健康科学部のトライアスロン部に所属する男子学生8名を用いた。
- 3) 主運動として、 $65\%V(\dot{o}_2)_{\max}$  の負荷強度で1時間自転車エルゴ運動を行わせ、その直後に、 $80\%V(\dot{o}_2)_{\max}$  のスピードでランニングを疲労困憊まで行わせた。
- 4) 自転車運動中は心拍数を、ランニング中は心拍数、酸素摂取量および呼吸交換比を測定した。また、主運動を通して血中グルコースおよび血中乳酸濃度を測定した。
- 5) 各被験者に糖質液摂取 (CHO) 条件と、糖質 - たん白質混合液摂取 (CHO-Pro) 条件とで運動を行わせた。それぞれ実験液は運動開始直前から自転車運動中10分ごとに、CHO条件では糖質液100ml + グルコース 3.1g を、CHO-Pro条件では糖質液100ml + たん白質 3.1g を二重盲検法により経口摂取させた。
- 6) CHO-Pro条件において、血中グルコース濃度は安静値水準が保たれ、呼吸交換比の増加が抑えられ、さらにランニング終了直後における血中乳酸濃度のより一層の増加が見られたことより、糖質酸

化率の促進および筋グリコーゲンの節約が示唆された。

7) 全ての被験者において CHO-Pro 条件での持続時間が長く、両条件による平均値（パフォーマンス）の差は有意であった。

8) これらの結果から、運動中の糖質 - たん白質混合液摂取は、長時間運動中の筋グリコーゲンを節約することによって全身持久力を高め、パフォーマンスの改善に寄与するものと結論された。

## 謝辞

稿を終えるにあたり、実験の被験者、また験者として御協力いただいた順天堂大学トライアスロン部の学生諸君ならびに同大学スポーツ健康科学部運動生理学研究室研究生石原啓次氏、石崎聡之氏ならびに大学院生諸氏に心から感謝の意を表します。

## 引用文献

- 1) Anantaraman, R., A. A. Carmines, G. A. Gaesser and A. Weltman: Effects of carbohydrate supplementation on performance during 1 hour of high intensity exercise. *Int. J. Sports Med.* 16:461-465(1995)
- 2) Åstrand P.O.: Diet and athletic performance. *Fed. Proc.* 26:1772-1777 (1967)
- 3) Bergstrom, J., L. H. Hermansen, E. Hultman and B. Saltin: Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol. Scand.* 71:140-150 (1967)
- 4) Bosch, A. N., S. C. Dennis and T. D. Noakes.: Influence of carbohydrate ingestion on fuel substrate turnover and oxidation during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* 76:2364-2372(1994)
- 5) Chryssanthopoulos, C., C. Williams, A. Nowitz, C. Kotsiopolou and V. Vleck: Comparison between carbohydrate feedings before exercise, during, or in combination on endurance running capacity. *Clin. Sci.* 87(Suppl.):34(1994)
- 6) Chryssanthopoulos, C. and C. Williams: Pre-exercise carbohydrate meal and endurance running capacity when carbohydrates are ingested during exercise. *Int. J. Sports Med.* 18:543-548(1997)



- 7) Coggan, A. R. , and E. F. Coyle: Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *J. Appl. Physiol.* 63: 2388-2395(1987)
- 8) Costill, D. L. , E. Coyle, G. Dalsky, W. Evans, W. Fink and D. Hoopes: Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J. Appl. Physiol.* 43:695-699(1977)
- 9) Coyle, E. F. , J. M. Hagberg, B. F. Hurley, W. H. Martin, A. A. Ehsani and J. O. Holloszy: Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol.* 55:230-235(1983)
- 10) Coyle, E. F. , A. R. Coggan. M. K. Hemmert and J. L. Ivy: Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J. Appl. Physiol.* 61:165-172(1986)
- 11) Davis, J. M. , W. A. Burgess, C. A. Slentz, W. P. Bartoli and R. R. Pate: Effects of ingesting 6% and 12% glucose-electrolyte beverages during prolonged intermittent cycling in the heat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 57:563-569(1988)
- 12) Floyd, J. C. , Jr. , S. S. Fajans, J. W. Conn, R. F. Knopf and J. Rull. : Stimulation of insulin secretion by amino acids. *J. Clin. Invest.* 45:1487-1502(1966)
- 13) Foster, C. , D. L. Costill and W. J. Fink: Effects of preexercise feedings

- on endurance performance. *Med. Sci. Sports.* 11:1-5(1979)
- 14) Gollnick, P. D., K. Piehl and B. Saltin: Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *J. Physiol.* 241:45-57(1974)
- 15) Hargreaves, M., D. L. Costill, A. Coggan, W. J. Fink and I. Nishibata: Effect of carbohydrate feedings on muscle glycogen utilization and exercise performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16:219-222(1984)
- 16) Hargreaves, M and C. A. Briggs: Effect of carbohydrate ingestion on exercise metabolism. *J. Appl. Physiol.* 65:1553-1555(1988)
- 17) Hermansen, L., E. Hultman and B. Saltin: Muscle glycogen during prolonged severe exercise. *Acta Physiol. Scand.* 71:129-139(1967)
- 18) Hue, O., D. Le Gallais, D. Chollet, A. Boussana and C. Prefaut: The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 77:98-105 (1998)
- 19) 石原啓次, 青木純一郎: オリンピックトライアスロン競技の運動強度とエネルギー消費量の推定. 日本体育学会第47回大会号 275(1996)
- 20) Ivy, J. L.: Glycogen resynthesis after exercise: effect of carbohydrate intake. *Int. J. Sports Med.* 19:S142-S145(1998)

- 21) 岩垣丞恒: 第3章 運動と代謝・栄養. 石河利寛, 杉浦正輝編: 運動生理学. 第7版. pp. 118-132, 建帛社: 東京(1988)
- 22) Karlsson, J. and B. Saltin: Diet, muscle glycogen, and endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 31:203-206(1971)
- 23) 河盛隆造, 野見山 崇: 筋の代謝とインスリンの作用不足. *からだの科学* 201:34-37(1998)
- 24) Kohrt, W. M., D. W. Morgan, B. Bates and J. S. Skinner: Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 19:51-55(1987)
- 25) Kreider, R. B., T. Boone, W. R. Thompson, S. Burkes and C. W. Cortes: Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20:385-390(1988)
- 26) Kreider, R. B., D. E. Cundiff, J. B. Hammett, C. W. Cortes and K. W. Williams: Effects of cycling on running performance in triathletes. *Ann. Sports Med.* 3:220-225(1988)
- 27) McArdle, W. D., F. I. Katch and V. L. Katch.: *Exercise Physiology. Energy, Nutrition, and Human Performance.* 2nd ed. pp.4-12, Lea&Feibiger: Philadelphia(1986)
- 28) Millard-Stanford, M., P. B. Sparling, L. B. Rosskopt, B. T. Hinson and L. J. Dicarolo: Carbohydrate-electrolyte replacement during a simulated

- triathlon in the heat. *Med. Sci. Sports Exerc.* 22:621-628(1990)
- 29) Millard-Stafford, M., L. B. Roskopf, T. K. Snow and B. T. Hinson:  
Water versus carbohydrate-electrolyte ingestion before and during a  
15km run in the heat. *Int. J. Sports Nutr.* 7:26-38(1997)
- 30) 三浦 哉,北川 薫,石河利寛: トライアスロン競技の成績を決  
定する上での呼吸循環器系能力からみた規定因子について. デサ  
ントスポーツ科学 17:190-196(1994)
- 31) 三浦 哉,北川 薫,石河利寛: トライアスロン競技をシミュレ  
ートした際の運動後半にみられる呼吸循環応答の特性. 体力科学  
43:381-388(1994)
- 32) Miura, H., K. Kitagawa and T. Ishiko: Economy during simulated  
laboratory test triathlon is highly related to olympic distance triathlon.  
*Int. J. Sports Med.* 18:276-280(1997)
- 33) 文部省体育局: 平成 9 年度体力・運動能力調査報告書. p.47  
(1998)
- 34) 永田 豊,坪井 實(監訳):生理学. Kapit, W., R. I. Macey and  
E. Meisami 著. 初版. pp.116-117,廣川書店:東京(1990)
- 35) Nicholas, C. W., C. Williams, H. K. A. Lakomy, G. Phillips and  
A. Nowitz: Influence of ingesting a carbohydrate-electrolyte solution on  
endurance capacity during intermittent, high-intensity shuttle running.

- J. Sports Sci.* 13:283-290(1995)
- 36) 日本トライアスロン連合: '95年度トライアスロンルールブック.  
pp.159-162(1995)
- 37) Nuttall, F. Q., A. D. Mooradian, M. C. Gannon, C. Billington and  
P. Krezowski: Effect of protein ingestion on the glucose and insulin  
response to a standardized oral glucose load. *Diabetes Care* 7:465-  
470(1984)
- 38) Pallotta, J. A. and P. J. Kennedy: Response of plasma insulin and growth  
hormone to carbohydrate and protein feeding. *Metabolism* 17:901-908  
(1968)
- 39) Rabinowitz, D., T. J. Merimee, R. Maffezzoli and J. A. Burgess: Patterns  
of hormonal release after glucose, protein, and glucose plus protein. *The  
Lancet* 27:454-456(1966)
- 40) 斉藤慎一: 筋グリコーゲン・ローディング. 臨床スポーツ医学  
8:747-752(1991)
- 41) Sasaki, H., J. Maeda, S. Usui, and T. Ishiko: Effect of sucrose and  
caffeine ingestion on performance of prolonged strenuous running.  
*Int. J. Sports Med.* 8:261-265(1987)
- 42) Sherman, W. M., D. L. Costill, W. J. Fink and J. M. Miller: Effect of  
exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent

- utilization during performance. *Int. J. Sports Med.* 2:114-118(1981)
- 43) Spiller, G. A., C. D. Jensen, T. S. Pattison, C. S. Chuck, J. H. Whittam and J. Scala: Effect of protein dose on serum glucose and insulin response to sugars. *Am. J. Clin. Nutr.* 46:474-480(1987)
- 44) Thornton, J. S.: Carboload and endurance: A new look. *Physician and Sportmed.* 17:149-156(1989)
- 45) Tsintzas, O. K., C. Williams, L. Boobis and P. Greenhaff: Carbohydrate ingestion and glycogen utilization in different muscle fibre types in man. *J. Physiol.* 489:243-250(1995)
- 46) Tsintzas, O. K., C. Williams, L. Boobis and P. Greenhaff: Carbohydrate ingestion and single muscle fibre glycogen metabolism during prolonged running in men. *J. Appl. Physiol.* 81:801-809(1996)
- 47) Tsintzas, O. K., C. Williams, W. Wilson and J. Burrin: Influence of carbohydrate supplementation early in exercise on endurance running capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28:1373-1379(1996)
- 48) Wilber, R. L. and R. J. Moffatt: Influence of carbohydrate ingestion on blood glucose and performance in runners. *Int. J. Sports Nutr.* 2:317-327(1992)
- 49) 山田 茂, 福永哲夫: 生化学・生理学からみた骨格筋に対するトレーニング効果. 初版. pp.130-143, 美巧社: 東京(1996)

50) Yaspelkis, B. B. , III , J. G. Ptterson, P. A. Anderla, Z. Ding and J. L. Ivy:

Carbohydrate supplementation spares muscle glycogen during variable-intensity exercise. *J. Appl. Physiol.* 75:1477-1485(1993)

51) Zawadzki, K. M. , B. B. Yaspelkis III and J. L. Ivy: Carbohydrate-protein

complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise.

*J. Appl. Physiol.* 72:1854-1859(1992)

## Influence of ingesting a carbohydrate-protein complex

during exercise on endurance performance

Hiroshi AONO

### Summary

- 1) The purpose of the present study was to investigate if a carbohydrate-protein ingested during exercise could improve the endurance performance.
- 2) Eight male triathletes gave their informed consent and volunteered to participate.
- 3) The experimental exercise was consisted of one hour bicycle ergometer riding at  $65\% \dot{V}O_2\text{max}$  followed by running on a treadmill at  $80\% \dot{V}O_2\text{max}$  to exhaustion.
- 4) Heart rate, oxygen uptake, respiratory exchange ratio, and blood glucose and lactate concentrations were measured at selected prearranged times.
- 5) In a double-blind design 10% carbohydrate solutions including either 3.1g glucose(CHO condition) or 3.3g protein(CHO-Pro condition) were given immediately before and every 10minutes during cycling.
- 6) In the CHO-Pro condition, the resting level of blood glucose concentration was maintained during exercise, and respiratory exchange



ratio was lower and blood lactate concentration was higher than those in the CHO condition. From these facts, the increase of the carbohydrate oxidation rate and the sparing of muscle glycogen were suggested in the CHO-Pro condition.

7) Endurance performance in the CHO-Pro condition was longer in all subjects than in the CHO condition.

8) From those results, it was concluded that ingesting the carbohydrate-protein complex during prolonged exercise would increase the endurance performance by means of muscle glycogen sparing.

Table 1. Physical characteristics of the subjects

Subjects	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg · min)	
				Bike	Run
A	22	175.0	60.85	65.3	70.3
B	20	170.1	61.50	56.6	63.8
C	21	170.3	59.20	54.2	60.1
D	20	168.6	62.90	58.1	68.4
E	21	172.7	64.35	59.9	65.4
F	20	168.4	63.55	57.4	71.8
G	19	160.0	50.60	62.6	70.9
H	22	176.5	67.05	65.7	66.0
Mean	21	170.2	61.25	60.0	67.1
SD	1	4.7	5.15	3.2	3.6

Table 2. Heart rate, oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) and respiratory exchange ratio (R) during exhaustive running

Variables	Conditions	at rest	0min	5min	10min	exhaustion
Heart rate (beats/min)	CHO-Pro	68±6	118±13	179±8	183±7	187±9
	CHO	69±6	126±13	181±5	186±3	190±5
$\dot{V}O_2$ (ml/kg · min)	CHO-Pro	4.7±0.4	8.7±2.2	54.8±6.2	55.5±4.9	56.7±5.3
	CHO	4.8±0.4	9.1±1.6	54.9±6.1	56.3±3.7	57.9±5.6
R	CHO-Pro	0.82±0.04	0.93±0.05*	0.97±0.04*	0.94±0.04	0.91±0.06*
	CHO	0.82±0.04	1.01±0.09	1.02±0.05	0.98±0.03	0.98±0.05

\* significant difference from CHO

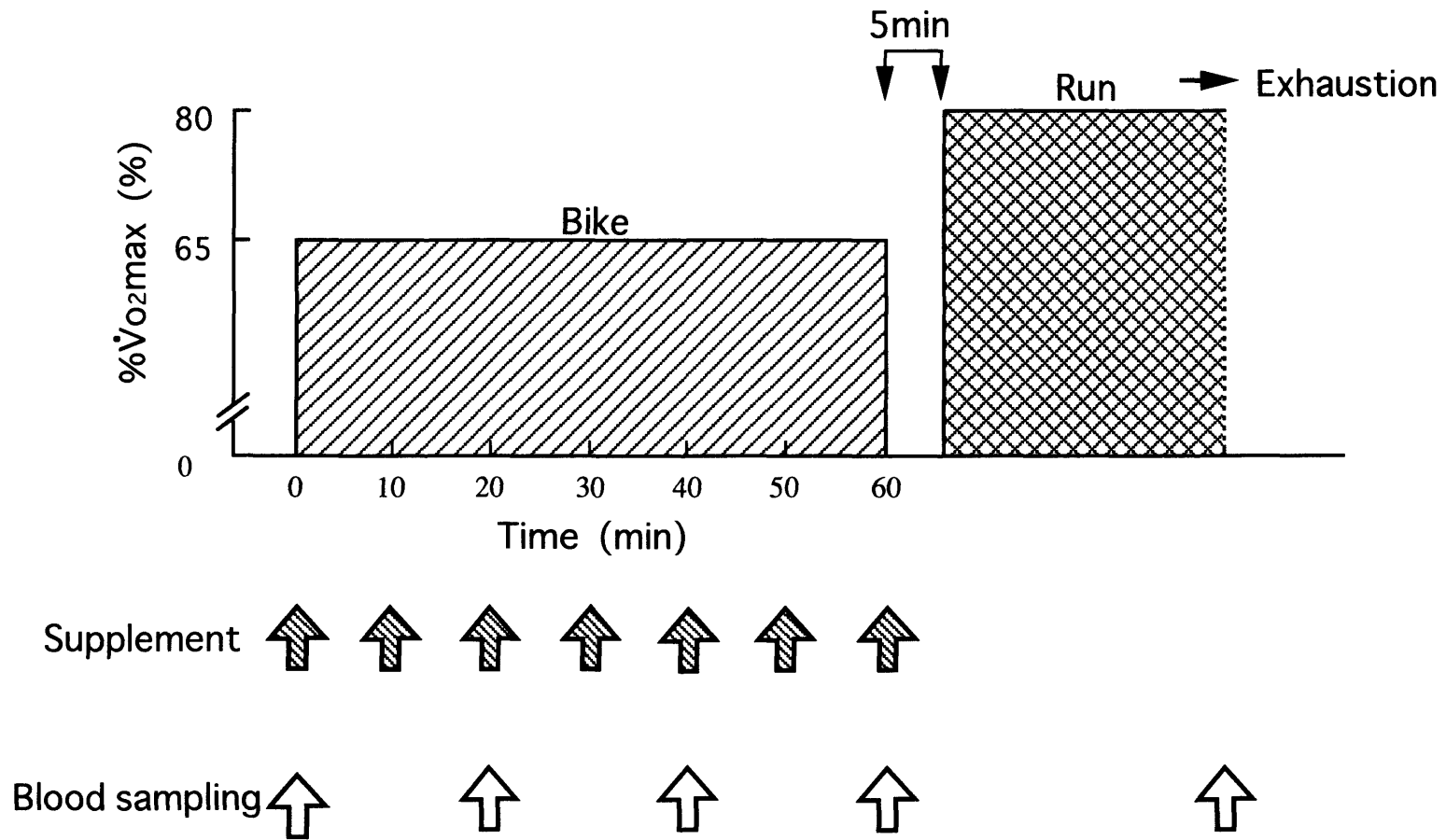


Fig.1. Experimental protocol

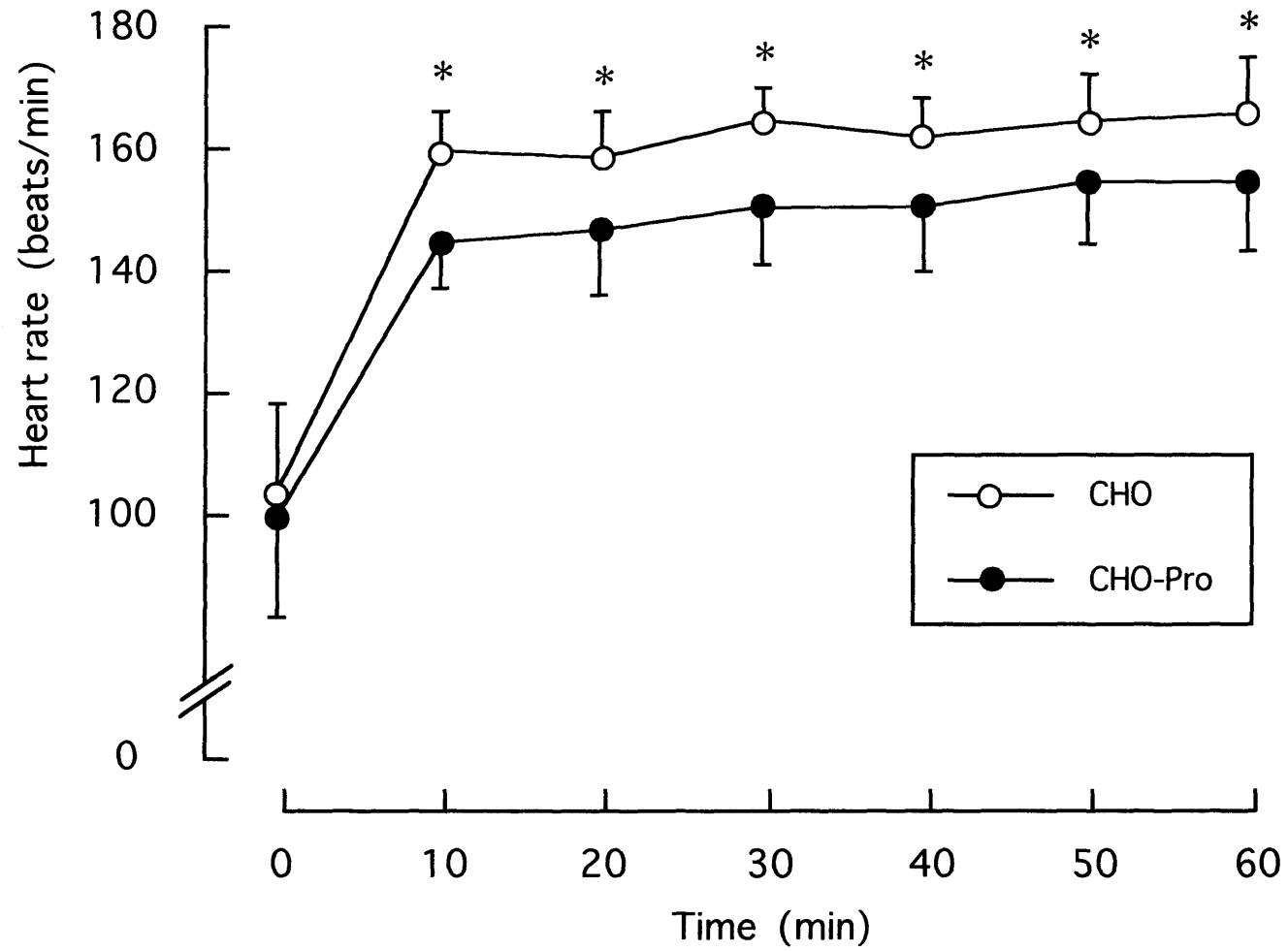


Fig.2. Heart rate during cycling

\* significant difference from CHO

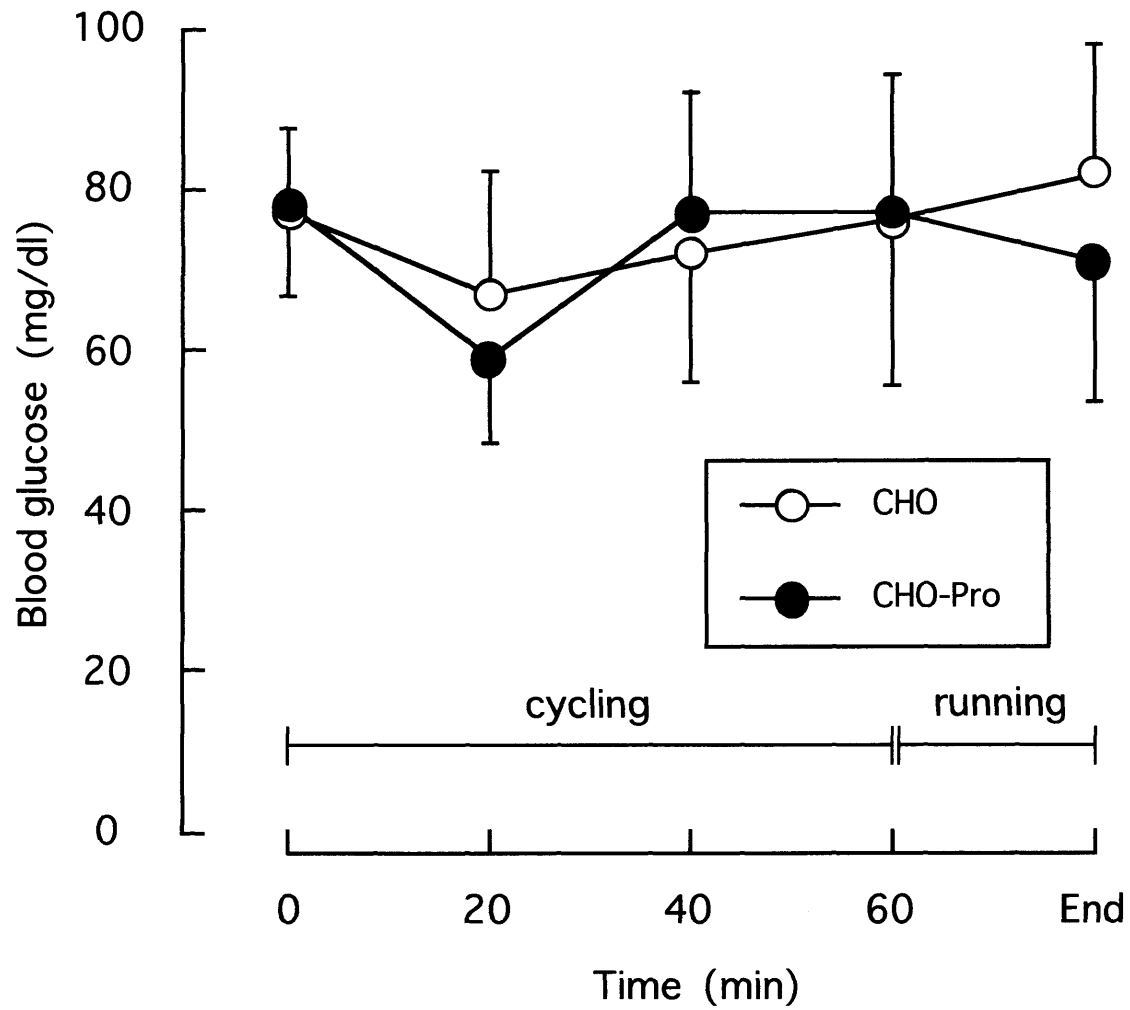


Fig.3. Blood glucose concentration during cycling and after running

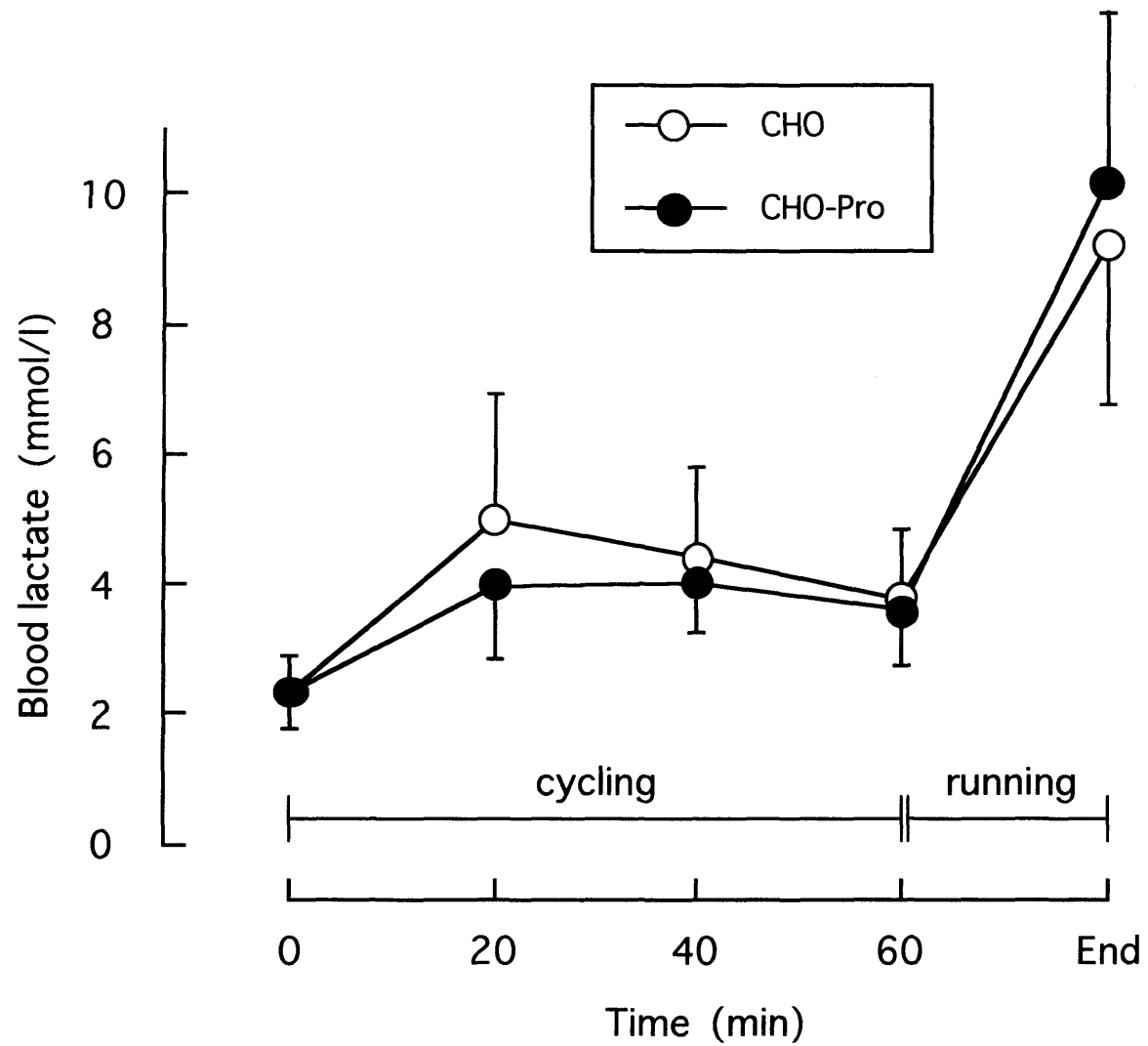


Fig.4. Blood lactate concentration during cycling and after running

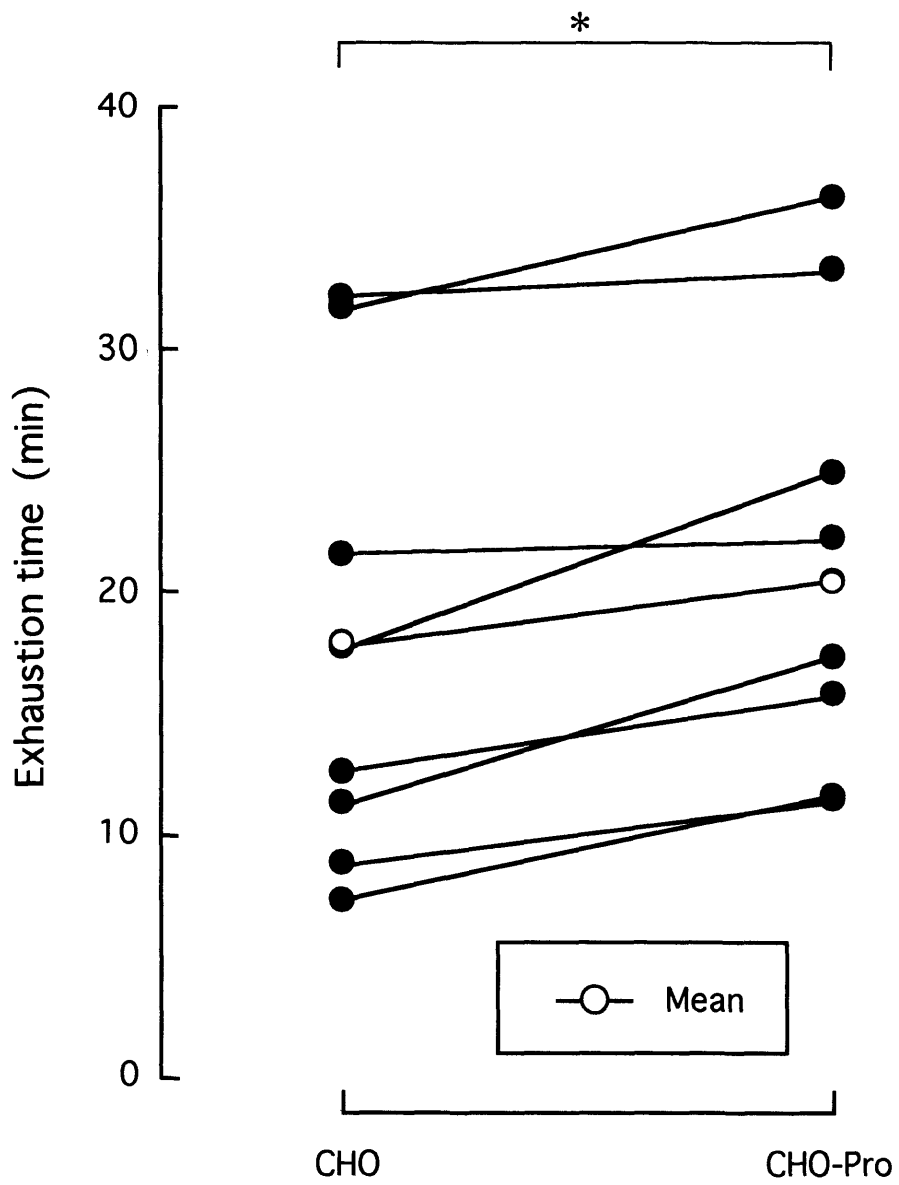


Fig.5. Performance of each subjects

\* significant difference from CHO



付表1 同意書

被験者のお願い

順天堂大学大学院2年 青野 博  
指導教員 青木純一郎

私は、修士論文作成にあたって以下の実験を計画しています。ついては被験者として貴君に協力して頂きたくお願いします。内容を理解され、本研究の被験者として御協力いただける場合には、同意書に署名をお願いします。なお、何か質問がございましたら、遠慮なくお申し出ください。

題名

運動中の糖質 - たん白質混合液摂取と全身持久力

実験の概要

糖質とたん白質の混合液を摂取すると、それぞれを単独で摂取するよりも安静時に高いインスリン反応が得られることが先行研究によって論証されています。しかし、持久的運動中の糖質とたん白質の混合液摂取がパフォーマンスに及ぼす影響についての研究は行われていません。そこで、糖質とたん白質の混合液、または糖質液を摂取しながら65%Vo<sub>2</sub>maxに相当する負荷での自転車運動を60分間行い、その直後に80%Vo<sub>2</sub>maxに相当する負荷でのトレッドミル走を疲労困憊まで行いそのパフォーマンスを記録します。また、運動中の心拍数、酸素摂取量、呼吸交換比および運動前から運動後にかけての血清グルコースおよび血中乳酸濃度を測定し、その効果の生理・生化学的背景を推察します。

なお、疲労困憊まで運動を行うため、運動開始前の体調チェック、運動中の心電図の監視を行うことにより、安全には万全を期します。ただし、途中で気分が悪くなった場合には自発的に運動を中止して結構です。採血は使い捨てブロードランセットおよび採血管を用いて指先で行い、傷口は採血後直ちに消毒および止血処置を行います。

測定には2日必要ですが、日によって摂取する液体の内容が異なるだけで、手順等は全く同じです。

同意書

1998年 月 日

青野 博 殿

私は貴研究の内容を理解し、被験者として協力することに同意します。

氏名 \_\_\_\_\_