

第1章 研究の背景と目的

運動時の骨格筋におけるエネルギー供給源は、高エネルギーリン酸、糖質、脂質、タンパク質であり、これらの貢献度は運動時間や運動強度、運動者の鍛練度、食事の内容に大きく依存する。そのなかでも、運動強度が低強度から中強度の長時間運動では、糖質（血糖、筋グリコーゲン）と脂質（血中遊離脂肪酸、筋内中性脂肪）の両者が主なエネルギー源となる。

生体に蓄積されている糖質の量は、体重70 kg の正常成人の場合、肝臓グリコーゲンとして約80 g、筋グリコーゲンとして約350 g、血糖として約10 g であり総量で約440 g となる。グルコースの熱量を16 kJ/g とすると糖質のエネルギー量は7040 kJ（約1681 kcal）である。これは1回のマラソンで消費されるエネルギー量にも充たない。一方、体重70 kg の一般成人の体脂肪率を15 %とした場合、体脂肪量は10500 g となり、脂肪の熱量を37 kJ/g とすると 388500 kJ（約 92810 kcal）という多大なエネルギー量を生体は有している（Maughan 1997）ことになる。

このように、生体における糖質のエネルギー量は脂質に比べて極めて少ない。したがって、生体に蓄積されている糖質と脂質のエネルギー量の観点からは、長時間運動中は糖質の利用を節約して、脂肪からのエネルギー供給に依存することが望ましいことは明らかである。また、長時間運動では筋グリコーゲンの低下や低血糖といった糖質の枯渇が、運動のパフォーマンスを制限することが報告され（Bergström and Hultman 1967, Bergström 1967）、スポーツにおけるパフォーマンスの観点からも糖質の重要性が指摘される。

このような背景から、これまで長時間運動における糖質摂取の効果について数多くの研究がなされ、運動前や運動中に糖質を摂取することによって、血糖値の低下を抑制して糖質の酸化率を維持し（Bosch 1994, Coggan 1989, Coyle 1986）、あるいは筋グリコーゲン利用を節約し（Hargreaves 1984, Tsintzas 1995）、疲労の発現を遅らせることで、運動パフォーマンスの向上に役立つことが一般に認められている（大森1996）。

一方で、運動前や運動中に糖質を摂取することはエネルギー源を補給し糖質を節約することに貢献するものの、量的に豊富な脂質からのエネルギー利用を妨げることにもなる (Ahlborg 1977, McMurray 1983)。また、運動の30~45分前にグルコースなどの吸収の早い糖を大量に摂取すると、インスリンが急激に上昇し運動前半に低血糖症に陥ることや、遊離脂肪酸濃度が低下するために運動中の筋グリコーゲン利用が促進され糖質の枯渇が早まることにより、パフォーマンスを低下させることも報告されている (Foster 1979, McMurray 1983)。これらのことから、運動前に摂取する糖質はインスリン分泌への刺激が少なく、脂肪の動員をできる限りさまたげないものが望まれるようになった。

単糖類のフルクトースは、摂取後の血糖とインスリンの上昇が緩徐であるために、運動前に摂取しても運動前半に低血糖症を招来しない可能性が示されている (Koivisto 1981, 1985, Levine 1983)。また、グルコースなどの吸収の早い糖質と比べて運動中の脂肪動員が抑制されにくいことから、筋グリコーゲンが節約される可能性も示唆された (Massicotte 1986, Levine 1983, Okano 1988)。これらの知見から、現在では運動前に摂取する糖質として、フルクトースの有効性が認められている (Craig 1993)。このように、長時間運動前に摂取するのに適した糖質の特性は明らかにされているものの、フルクトース以外にはそれに適した糖質は報告されていない。

トレハロースはD-グルコース2分子が1-1結合した非還元性の二糖類に属する難吸収性の炭水化物である。トレハロースはその消化酵素であるトレハラーゼにより腸管で加水分解され、グルコースとして吸収されてエネルギー源となる。そして、熱量はグルコースと同等であることが示されている (塩坂1997, 武内1997)。また、トレハロースは易吸収性の他の二糖類や単糖類より吸収が緩徐であるため、摂取後の血糖値の上昇はグルコース摂取時よりも緩やかであることが認められている (武内1997)。このことから、トレハロース摂取後のインスリン応答は軽微であると考えられ、それゆえ、大量に摂取した後も低血糖症を起こしにくく、さらに吸収が緩徐であるため持続的に血糖を供給できる可能性も考えられる。もし、トレハロースがこのような生理特性を持つのであれば、フルクトー

スと同様に，長時間運動の直前に摂取する糖質として適していると考えられる．しかしながら，これまでこのような観点からトレハロースについて検討した研究はない．

そこで本研究の第一の目的は，長時間運動時のトレハロース摂取が，運動中の血中エネルギー基質や筋グリコーゲン量，エネルギー基質動員に関連するホルモンに及ぼす影響を検討することであった．

ところで，長時間運動における糖質摂取の効果に関する研究が発展した背景には，運動強度が一定でなされる持久運動（一定型持久運動）の生理生化学的応答に関する数多くの研究結果が蓄積されてきたことが挙げられる．しかし，実際のスポーツ競技をしてみると，陸上のトラック競技やマラソン，水泳，自転車などは一定型持久運動であるものの，その他の多くのスポーツでは運動強度が変化しながらなされることが多い．特にサッカー，ラグビー，テニス，バレーボール，バスケットボールなどの球技は，運動強度が低強度から高強度まで頻繁に変化し (Bangsbo 1991a)，競技時間も 60 分以上と長い．このような持久運動を間欠型持久運動と呼び，運動強度の点から一定型持久運動と区別することができるが，生理生化学的応答に関する違いについては明らかにされていない．また，これらのスポーツは競技スポーツあるいは健康増進を目的としたスポーツとして広く普及しているにもかかわらず，間欠型持久運動の生理生化学的応答に関する研究は一定型に比べると必ずしも多くの知見が蓄積されているとはいえない．

その理由の一つに，間欠型持久運動の負荷条件は，運動強度，インターバル時間，繰り返す頻度の条件によって無数の組み合わせがあり，実験条件の設定や研究結果の解釈が複雑になることが挙げられよう．一方，一定型持久運動では運動強度や運動時間が呼吸循環系や骨格筋エネルギー代謝に及ぼす影響については多くの知見が得られ整理されている．したがって，間欠型持久運動の生理生化学的応答を理解する手法として，運動時間と機械的仕事量の条件を同じにした一定型持久運動と比較することが用いられることがある．

このような一定型持久運動との比較によって，運動時間が少なくとも 60 分を越えるような間欠型の持久運動を対象とした系統的な研究としては 1960 年代の Åstrand ら (1960)，

Christensen ら (1960a,1960b) による呼吸循環系の応答を検討したもの,1970 年代後半の Essén ら (1977,1978a,1978b,1978c) による骨格筋エネルギー代謝について検討したものがあある。また最近,Christmas ら (1999a, 1999b) によって,間欠型持久運動中の糖質および脂質のエネルギー酸化率と筋酸素動態についても報告されている。しかし,これらの運動プロトコールはいずれも運動と休息を15 秒間隔で繰り返すものであった。間欠型持久運動の生理生化学的応答を理解するためには,運動強度やインターバルの異なるプロトコールにおいても多くの研究結果を蓄積することが必要であると考えられる。

サッカーのような球技では試合中の筋グリコーゲンの消費が大きいことが報告されている (Jacobs 1982, Saltin 1973)。この点を考慮するならば,間欠型持久運動のプロトコールとしては筋グリコーゲン消費の高いものが望まれるが,運動と休息を5 秒間隔で繰り返す運動プロトコールでは,筋中と血中乳酸濃度の上昇や,筋グリコーゲン利用が少ないことが報告されている (Saltin 1971)。一方,最大下 ($100\% \dot{V}O_{2max}$ 強度以下) であっても,いわゆる AT をこえるような強度で運動時間が数分続くのであれば,解糖系から供給されるエネルギーが優先して利用され筋グリコーゲン分解は促進すると思われる。

そこで本研究の第二の目的として,高強度運動と低強度運動を4 分間ずつ繰り返す運動プロトコールを用い,間欠型持久運動の血中エネルギー基質とそれらに関連するホルモン動態を,運動時間と機械的仕事量が同等である一定型持久運動と比較検討することとした。

運動中のエネルギー基質動態を理解するためには,エネルギー基質動員に関連するホルモン調節について検討することが重要である。しかし,間欠型持久運動に関しては Christmas ら (1999b) によってカテコールアミンについて考察されているのみである。そこで本研究では,カテコールアミン,インスリン,コルチゾール,遊離テストステロンについて検討することとした。

また,球技のスポーツ活動中にもパフォーマンスの向上や疲労の軽減を目的として糖質摂取がなされている。その際の糖質摂取法(糖質の種類,溶液の濃度,摂取タイミングなど)に関しては,一定型持久運動時の糖質摂取の知見が応用されている (Shi 1998)。し

かし、この糖質摂取法は、本来、一定強度での運動持続時間を延長させることを目的としたものである。一方で、球技のような間欠型のスポーツでは高強度運動時のパワー発揮能力が競技力を決定することから、その能力を改善する糖質摂取法が求められる。また、高強度と低強度の運動を繰り返す間欠型持久運動における糖質液摂取では、低強度運動の影響により血糖とインスリン応答が高くなり、運動中に摂取した糖が利用されやすい可能性が示されている (Yaspelkis 1991, 1993)。これらのことから、間欠型持久運動時の糖質摂取法では、一定型持久運動時の場合とは異なる摂取法があるとも思われる。しかし、間欠型と一定型持久運動における糖質摂取の効果を直接比較したものは Mitchell ら (1989) の報告のみであり十分に検討されている訳ではない。そこで本研究では、間欠型持久運動と一定型持久運動における糖質摂取が、血中エネルギー基質とそれらに関連するホルモン動態およびパフォーマンスに対する効果を比較し、間欠型持久運動における糖質摂取法について検討した。

球技のような間欠型のスポーツでは高強度運動時のパフォーマンスが競技力を決定する。例えば、サッカーでは競技力の高い選手ほど間欠型持久運動における高強度運動での移動距離が長いことが報告されている (大森1997)。このような間欠型運動における高強度運動時のパフォーマンス発揮には、先行した高強度運動によって消費した骨格筋のエネルギー源を、休息や低強度運動時にいかに回復できるかが重要であると考えられる。

サッカーのような間欠型持久運動では筋グリコーゲンの消費が大きいことが報告されている (Jacobs 1982, Saltin 1973)。そして、筋グリコーゲンが低下した高強度運動後の骨格筋ではその再合成が亢進しており、そのための基質としては筋中や血中乳酸の貢献度は少なく、血糖が重要であることが示唆されている (Bangsbo 1991b, 1994, 1997, Gaesser 1980)。したがって、筋グリコーゲンが利用される高強度運動後の骨格筋での糖の取り込みについて検討することは、間欠型持久運動の生理生化学的応答を理解するのに重要であると考えられる。

これまで、運動中や運動後の骨格筋における糖の取り込みに関する *in vivo* の研究では、

血流量と血糖の動静脈較差を積算して求めるカテーテル法と筋生検法が主に用いられている。カテーテル法では動静脈血における血糖の差から得られた数値を、また、筋生検法では一部の筋におけるグリコーゲンやグルコースの変動から骨格筋全体を評価している。

ポジトロン CT (Positron Emission Topography : PET) はポジトロンを放出する放射性同位元素で標識された薬剤を生体に投与し、その分布をPET カメラで撮影することによって、脳、心臓など臓器の局所機能を抽出する画像法である。グルコースの疑似化合物でありフッ素ラベルされた ^{18}F -fluoro-2-deoxyglucose (^{18}F -FDG) は、血液から組織に取り込まれるとリン酸化されて蓄積することから (Sokoloff 1977), 得られた画像は組織での糖の取り込みを反映していると考えられている。近年 ^{18}F -FDG を用いて骨格筋における糖の取り込みに関する研究が報告され (Fukimoto 1996, Nuutila 1992), 糖の取り込みの様子を断層画像で得ることができ、筋全体の平均値としてではなく部位別に評価することが可能となっている。このような PET の特性は高強度運動後の糖の取り込みに関する研究において新しい知見を提供するものと考えられる。

そこで本研究の第三の目的は、筋グリコーゲン量を低下させるような高強度運動後の骨格筋での糖の取り込みを ^{18}F -FDG による PET 画像により検討することであった。

以上、本研究の目的をまとめると次の3つである。

1. 長時間運動におけるトレハロース溶液摂取が、運動中の血中エネルギー基質や筋グリコーゲン量、ならびにエネルギー基質動員に関連するホルモンに及ぼす影響を検討すること。
2. 間欠型持久運動の血中エネルギー基質とそれに関連するホルモン応答を、一定型持久運動と比較検討すること。さらに、一定型持久運動と間欠型持久運動における糖質摂取の効果を比較し、間欠型持久運動における糖質摂取法について検討を加えること。
3. 高強度運動からの回復期における骨格筋での糖の取り込みについて PET を用いて検討すること。