

# スタミナをアップする脳グリコゲンローディング

## -脳神経の活動に不可欠なグリコゲンを運動で超回復できる-

筑波大学・体育系（運動生化学）征矢英昭 教授  
同 日本学術振興会特別研究員 DC2 松井 崇

### 研究成果のポイント

- ・ 脳グリコゲンの減少はマラソンのような長時間運動時の疲労要因となるが、運動後は超回復する
- ・ 持久力を高めるエアロビクトレーニングは、超回復効果を高め、認知機能を担う海馬などでグリコゲンレベルを増加させる
- ・ 運動や認知機能のスタミナを高める“脳グリコゲンローディング”法の開発につながる新知見

### <概要>

筑波大学・体育系の征矢英昭教授と松井 崇大学院生の研究グループは、脳の貯蔵エネルギーであるグリコゲンが運動時に利用されて減少し、その後、運動前よりも高いレベルにまで回復する“超回復”を起こすことを世界で初めて発見。さらに、持久力を高めるエアロビクトレーニングは、運動後の超回復を繰り返すことで、運動や認知機能を担う大脳皮質と海馬のグリコゲン貯蔵量を増加させることも見出しました。高い脳グリコゲン貯蔵は神経活動の維持に役立つことから、運動が脳神経活動の持久性（スタミナ）を高める可能性を明らかにしました。

これまで、運動トレーニングによる筋のスタミナの向上は、運動後の筋グリコゲン超回復の繰り返しによるものであることがよく知られていました。一方、脳グリコゲンは代謝が速いため正確な測定が困難で、その実態は全く不明でした。昨年、私どもは新たに開発された高エネルギーマイクロ波照射による脳グリコゲン測定法の導入により、長時間運動時に脳グリコゲン濃度が約50%減少し、それが運動時の疲労に関与していることを発見。今回は、その後の休息による回復過程とトレーニング効果を検討したところ、脳グリコゲンが筋と同様に超回復すること、更に、トレーニングは脳グリコゲン貯蔵量を筋と同様に高めることが見出されました。今回の発見は、運動や認知機能のスタミナを高める新たな運動・栄養処方“脳グリコゲンローディング”の開発を促進する画期的な成果です。

本研究成果は、英国の科学雑誌「The Journal of Physiology（ザ・ジャーナル・オブ・フィジオロジー）」電子版（2011年11月7日付け）に掲載されました。

## <研究の背景>

脳の貯蔵糖質であるグリコゲンはアストロサイトに貯蔵されており、ニューロンの重要なエネルギー基質となることが最近になり明らかとなりました（図1）。しかしながら、脳グリコゲンは代謝が速く定量が困難なため、運動時の代謝は全く不明でした。昨年、私どもは強力なマイクロ波を利用した正確な脳グリコゲン定量法を導入し、長時間運動時に脳グリコゲンが利用されることで約50%減少し、その減少が長時間運動時の疲労要因となることを発見しました。※1

筋のグリコゲンは運動時のエネルギーとして利用されて減少し、運動後の休息と糖質摂取により運動前よりも高いレベルにまで回復（超回復）することがよく知られています。更に、トレーニングを積み重ね、運動後の超回復が繰り返されることでグリコゲン貯蔵量が高まります。トレーニングが筋の持久力（スタミナ）を高めるのはこの現象によるものであるとされています。しかしながら、脳グリコゲンが筋と同じように運動後の超回復とトレーニングによる貯蔵量の増加を起こすかは全く不明でした。

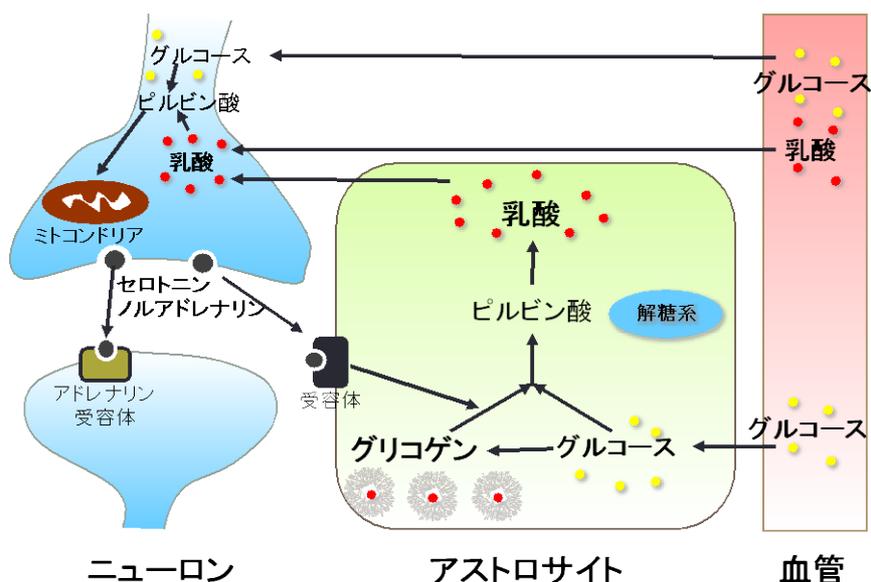


図1 脳内のグリコゲン代謝 ～ニューロンとアストロサイトの代謝連関

脳グリコゲンは血液から取り込まれたグルコースをもとに合成される。最近では、血中乳酸をアストロサイトが取り込んでニューロンに供給し、ニューロンがその乳酸を参加利用することが想定されている。一方、アストロサイトに貯蔵されているグリコゲンも解糖系により乳酸に分解され、その乳酸がニューロンのエネルギー基質となることが明らかとなっていった。脳グリコゲンの分解と利用は、血液からのグルコース供給が不足した場合（低血糖、虚血、長時間運動など）やニューロン活動が増加した場合（視覚刺激、ヒゲ刺激、断眠など）、細胞間液中に増加した興奮性神経伝達物質であるノルアドレナリン、セロトニン、グルタミンなどにより亢進する。

## <研究の内容>

### 1. 運動後の脳グリコゲン超回復（実験1）

長時間運動により減少した脳グリコゲンは運動後に超回復することが想定されたため、高エネルギーマイクロ波による脳グリコゲン定量法を利用し、疲労困憊運動後の脳グリコゲン濃度を時間経緯を追って検討しました。その結果、運動後のグリコゲン超回復は脳でも起こることが初めて明らかになりました（図2）。高い脳グリコゲン貯蔵は神経活動の維持に役立つことから、超回復現象を利用することで、運動や認知機能のスタミナを高める新たな運動・栄養処方“脳グリコゲンローディング”が実現できる可能性があります。

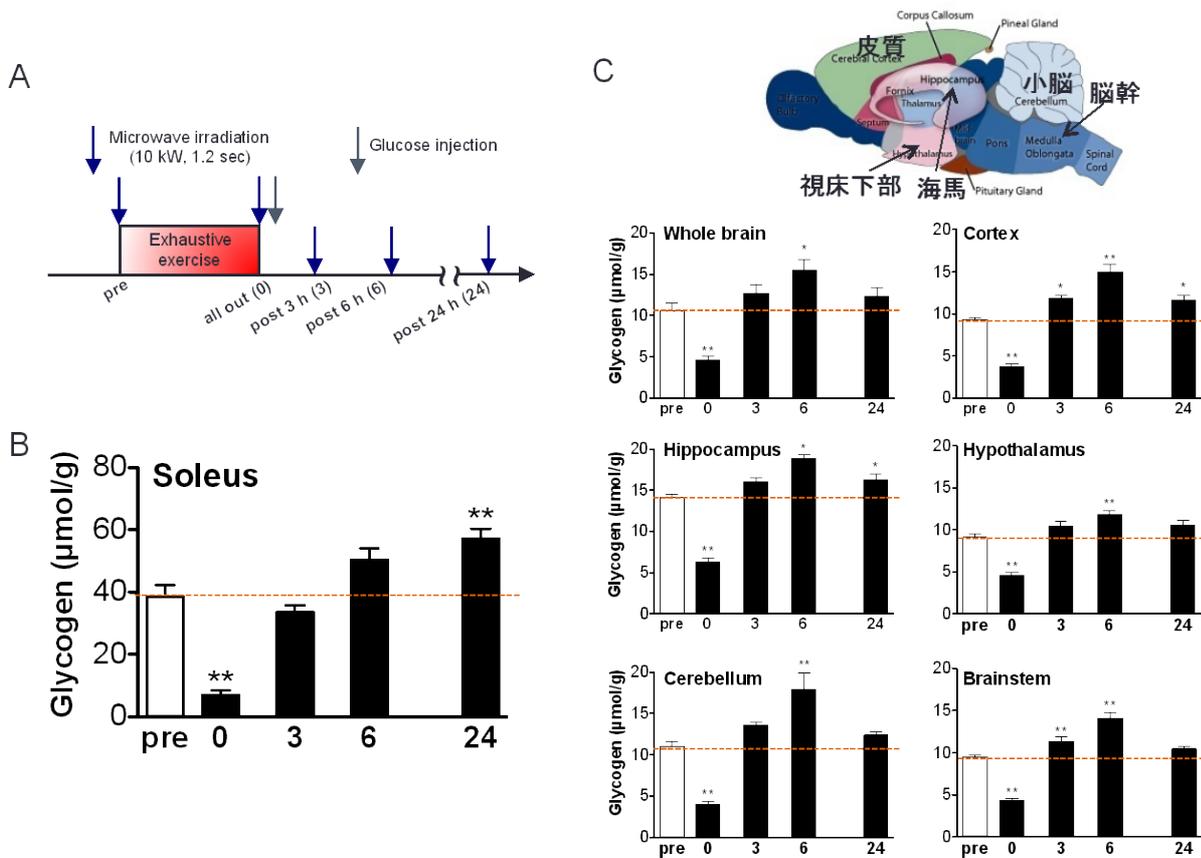


図2 疲労困憊運動後の脳グリコゲン超回復

ラットに疲労困憊に至るトレッドミル運動（分速 20 m）を課し、運動前、運動直後、3、6、12 時間後の筋及び脳のグリコゲン濃度を測定した（A）。筋グリコゲンは運動により枯渇し、その 24 時間に超回復が生じた（B）。このとき、脳グリコゲンは脳全体で運動直後に減少し、運動 6 時間後に超回復した（C）。

## 2. エアロビクトレーニングによる脳グリコゲン貯蔵量の増加（実験2）

実験1において、運動後に脳グリコゲン超回復が生じること、更に、大脳皮質と海馬のそれが運動24時間後まで維持されることが見出されました。したがって、大脳皮質と海馬のグリコゲンは筋と同様にトレーニングにより貯蔵量を増加させることが想定されました。そこで、持久力を高める4週間のエアロビクトレーニング後のラットの脳グリコゲン濃度を測定しました。その結果、前述の仮説の通り、皮質と海馬のグリコゲン貯蔵量がトレーニングによって増加しました（図3）。大脳皮質と海馬は運動や認知機能に関与することから、トレーニングがそれらのグリコゲン貯蔵量を増やすことで、運動や認知機能のスタミナを向上させる可能性が明らかになりました（図4）。

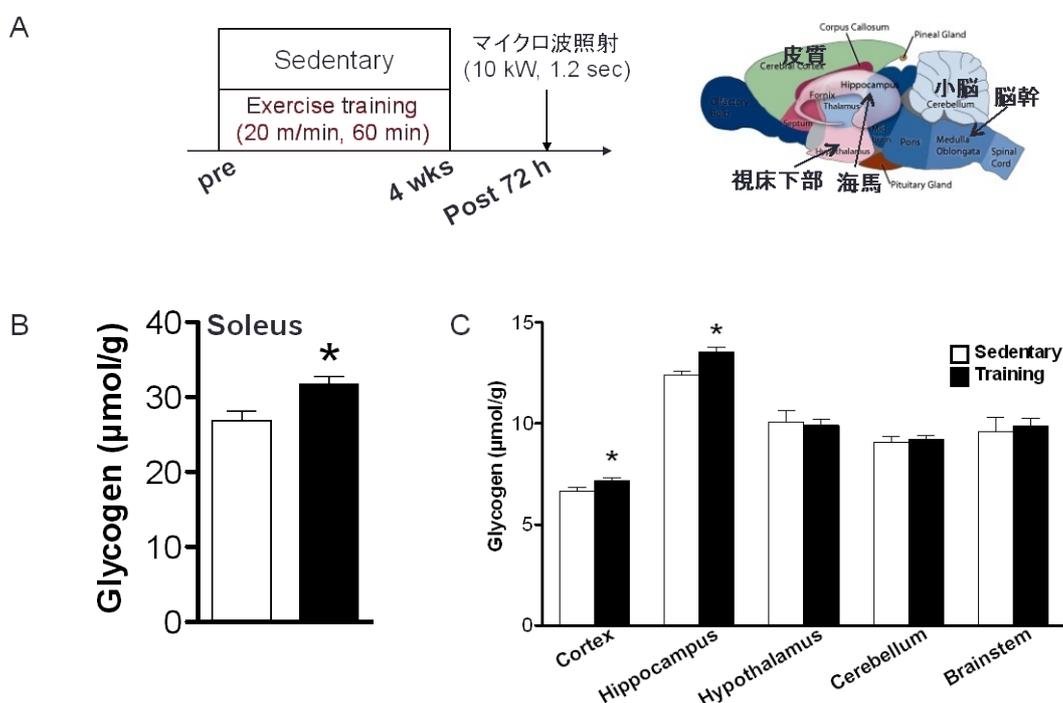


図3 運動トレーニング後の筋および脳グリコゲン濃度

4週間の運動トレーニング後のラットの脳グリコゲン濃度を測定したところ (A)、仮説の通り、筋グリコゲン (B) と同様に皮質と海馬のグリコゲン貯蔵量 (C) が運動トレーニングに伴って有意に増加した。

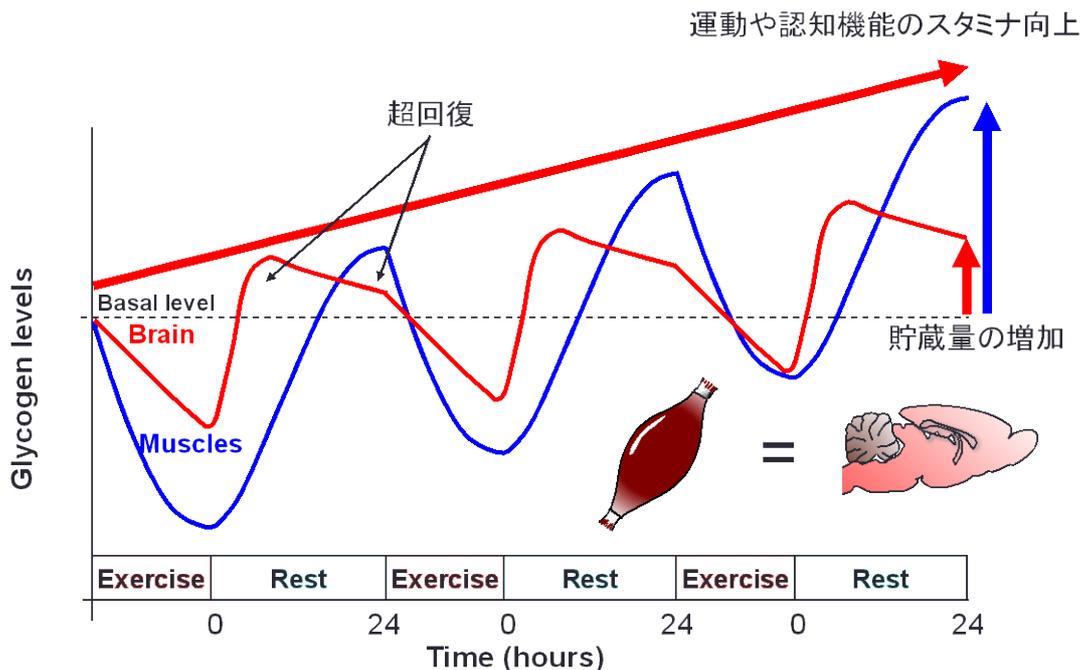


図4 脳でも起こる運動後のグリコゲンの超回復とトレーニング適応

脳グリコゲン（赤線）は筋グリコゲン（青線）と同様に、運動時に減少し、運動後に超回復する。さらに、トレーニングにより筋グリコゲン貯蔵量が増加するのと同様に、運動や認知機能を担う大脳皮質と海馬のグリコゲン貯蔵量も増加する。

## <今後の期待>

本研究では、運動時に減少した脳グリコゲンが運動後に超回復すること、しかもトレーニングが脳グリコゲン貯蔵を増加させることを初めて明らかにしました。

最近、ヒトでも低血糖による脳グリコゲンの減少と超回復が示唆されていることから、本知見のヒトでの応用に期待が膨らみます。高橋尚子さんのようなエリートマラソンランナーの強さの秘密には、脳のグリコゲン、とりわけ注意・集中や判断力、記憶・学習に関係した脳のグリコゲンが増加している可能性が高いことがうかがわれます。ただしこれについては、NMR（核磁気共鳴法）などを用いてヒトでも検証する必要があります。もしかすると、脳グリコゲンローディングで脳内グリコゲンを高めることが、筋のグリコゲンローディングよりも持久力を高め、疲労を防ぐ上で重要である可能性もあります。一方、脳グリコゲンが低下したランナーは疲労しやすいかもしれません。そうなると、アスリートのトレーニングやそれを担うスポーツ栄養学に革命が起こる可能性があり、今後の基礎、応用研究に拍車がかかりそうです。

## <謝辞>

本研究は、科学研究費補助金（平成 22~24 年度）、上月スポーツ・教育財団（平成 21~23 年度）、並びに文部科学省特別経費プロジェクト「たくましい心を育むスポーツ科学イノベーション」（平成 22~25 年度）の支援を一部受けて行われました。

## <本成果の発表論文>

タイトル：

Brain glycogen supercompensation following exhaustive exercise

(疲労困憊運動後の脳グリコゲン超回復)

著者：

松井 崇<sup>1</sup>、石川太郎<sup>1</sup>、伊藤 仁<sup>1</sup>、岡本正洋<sup>1</sup>、井上恒志郎<sup>1</sup>、李ミンチョル<sup>1</sup>、藤川隆彦<sup>2</sup>、  
一谷幸男<sup>3</sup>、川中健太郎<sup>4</sup>、征矢英昭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>筑波大学・体育系、<sup>2</sup>鈴鹿医療科学大学、<sup>3</sup>筑波大学・人間系、<sup>4</sup>新潟医療福祉大学、

掲載誌：

The Journal of Physiology 電子版 (2011 年 11 月 7 日)

※1 平成 23 年 4 月 28 日発表

脳疲労の原因は脳内貯蔵エネルギーの減少 –疲労を伴う長時間運動時の脳グリコゲン減少とその分子基盤の一端を解明– URL : <http://www.tsukuba.ac.jp/public/press/110427.pdf>