

## 第 11 回 運動と体内時計、運動による腸内細菌叢の改善効果

健康を維持するために普段から注意すべき生活項目は、食事・睡眠・運動の 3 点とされています。これまでの本 WEB 講座では、「体調を整える上で食事と睡眠は、タイミングを考慮することがとても大切である」とお伝えしてきました。今回はこれまで触れてこなかった運動について、体内時計との関係から解説したいと思います。また、時間栄養学と密接に関連する項目には、社会・経済的要因や遺伝子、腸内細菌叢などの個人的要因もあります。そこで、健康に大きな影響を及ぼすとされる腸内環境と運動との相互作用についても紹介させていただきます。

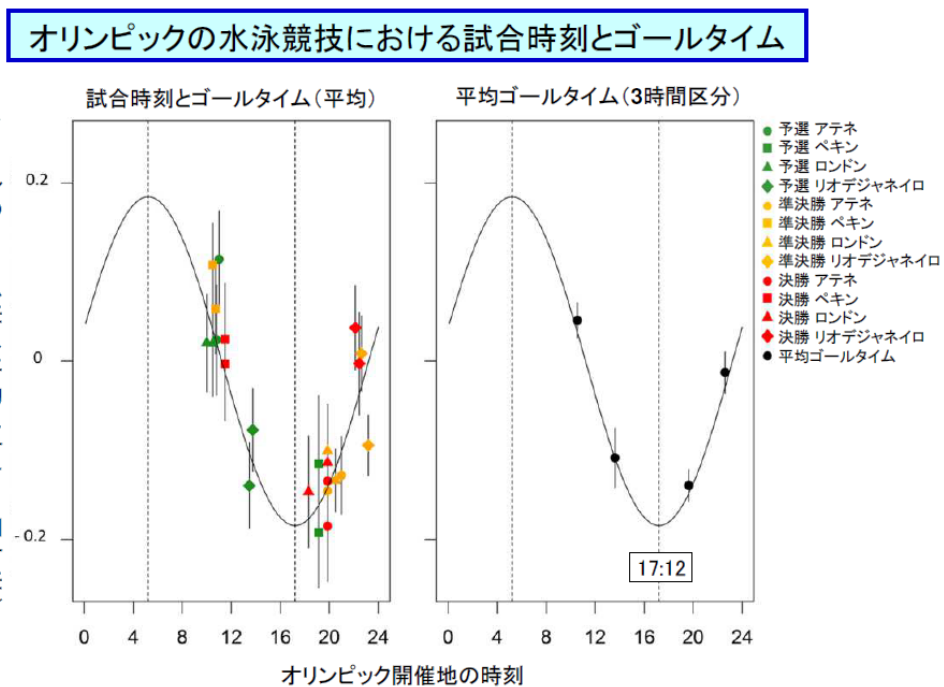
### 運動のパフォーマンスが最大になるのは何時頃？

トップアスリートに限らず良い成績を求めるほぼすべてのスポーツ選手は、パフォーマンスを高めるために規則正しい生活を心掛けているようです。また、アスリートの体内リズムが乱れないようにするための取り組みも広く実施されています。すなわち、スポーツ指導者や関連スタッフは、運動技術に関する指導をするだけでなく、食事の組成・摂取時刻や睡眠の質・量に関するアドバイスをすることが極めて大切で、プロの団体だけでなく、大学や社会人チームが管理栄養士の介入を受けて、成績を向上させるための取り組みをしていることは周知の事実です。さらに、記録や順位が特段に期待される（トップ）アスリートの場合は、実際の大会での試合時刻から逆算した活動すべき時間帯を重視する必要があり、そこに至るまでの長期的な調整法に関してはまだ改善できる余地があるかも知れません。

さて、一般的にフィジカルパフォーマンスが最大になるのは、交感神経の働きが最も活発になる午後 3 時～6 時頃だと言われており<sup>1)</sup>、また深部体温が高まる午後の方が午前中の練習よりも高いパフォーマンスが得られると報告されています<sup>2)</sup>。図 1 は 2004～2016 年にアテネ、ペキン、ロンドン、リオデジャネイロで開催されたオリンピックでの競泳の試合時刻と、そのときの個々の記録（各平均時間に対する相対的な割合）をプロットしたものです<sup>3)</sup>。予選では成績上位者が多少力を抑えて泳ぐこともありますので、予選や準決勝より決勝でのタイムが最も早かったのですが、試合が何時に行われるかによってスイマーの記録に大きな違いが認められました。

記録は夕刻が最短で、午前中と夕刻～20 時頃のタイム差は、40%の競技にお

いては金メダリストと銀メダリストのタイム差より、また 64%の競技においては銀メダリストと銅メダリストのタイム差より、また 61%の競技においては銅メダリストと 4 位入賞者のタイム差より大きい結果でした。データによるとパフォーマンスが最も高くなる時間は午後 5 時 12 分頃で、午前 8 時に行った数値に対して 0.32%も良くなっていました。このような午前より午後のパフォーマンスが高くなることは、筋肉柔軟性や握力、手足の俊敏性や筋力について調べた過去の報告<sup>4,5)</sup>でも明らかにされています。



背泳(100m, 200m)、バタフライ(100m, 200m)、平泳ぎ(100m, 200m)、自由形(50m, 100m, 200m)に出場した男女各72名ずつの1722データ(準決勝で上位16名、決勝で上位8名の予選を含むデータ)を解析した。

Lok, R., et al.: Gold, silver or bronze: circadian variation strongly affects performance in Olympic athletes, *Sci.Rep.*, 10, 16088 (2020)

図1

また、図2は、32人の被検者(BMI > 26 kg/m<sup>2</sup>)に対して12週間のトレーニング(自転車エルゴメーターによる有酸素運動を最大酸素消費量の70%で30分間/週2回、かつ、トレーニング機器を使ったレジスタンス運動を最大随意筋力の60%で10回×3セット/週1回)を午前8~10時、または午後3~6時に行ったときの様々な成績について示しています<sup>6)</sup>。脂肪重量の変化は、午前運動グループ(12人)では平均0.2kgの減少だったのに対し、午後運動グループ(20人)では平均1.2kg減と顕著に減少していました(脂肪の割合はそれぞれ0.3%減、1.0%減)。同時に、最大パワー出力もそれぞれ0.24W/kg体重と

0.40W/kg 体重であり、午後に力が出る有意差が認められました。それらの差が生じた主な理由は、図2のインスリン依存性のグルコース消費量（A：筋肉を中心とした末梢組織でのグルコースの利用状態）、インスリン依存性の炭水化物酸化量（B：グルコース消費に関わる糖代謝活性）、インスリン依存性の脂肪酸濃度（C：脂肪組織でのインスリン感受性状態）の各項目が、午前運動グループよりも午後運動グループで良かったためであると説明されています。したがって、体脂肪を意識した体重の減少を目的とする上で、運動は午後にするのが効果的と考えられます。

午前と午後の運動による脂肪と体力、代謝への影響

	午前運動			午後運動		
	トレーニング		差	トレーニング		差
	前	後		前	後	
脂肪重量(kg)	27.4±4.3	27.2±4.7	-0.2±1.0	28.8±5.6	27.6±5.7	-1.2±1.3*
脂肪率(%)	28.6±2.3	28.3±2.4	-0.3±0.7	29.0±3.2	28.0±3.1	-1.0±0.9*
最大出力(W/kg)	1.9±0.4	2.1±0.3	0.2±0.1	2.0±0.3	2.4±0.4	0.4±0.2*

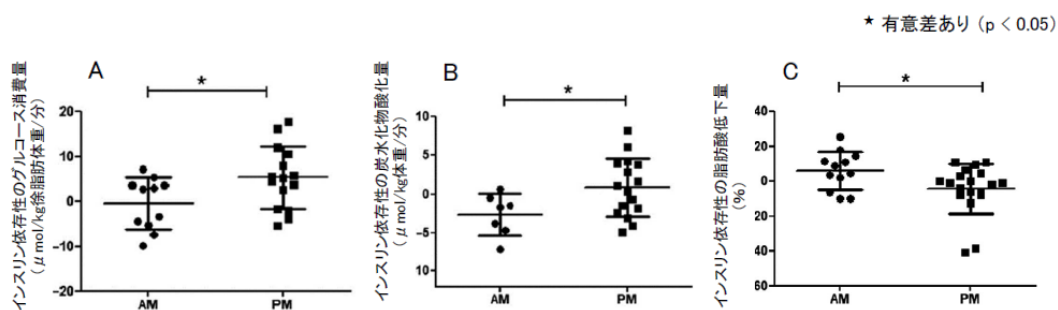


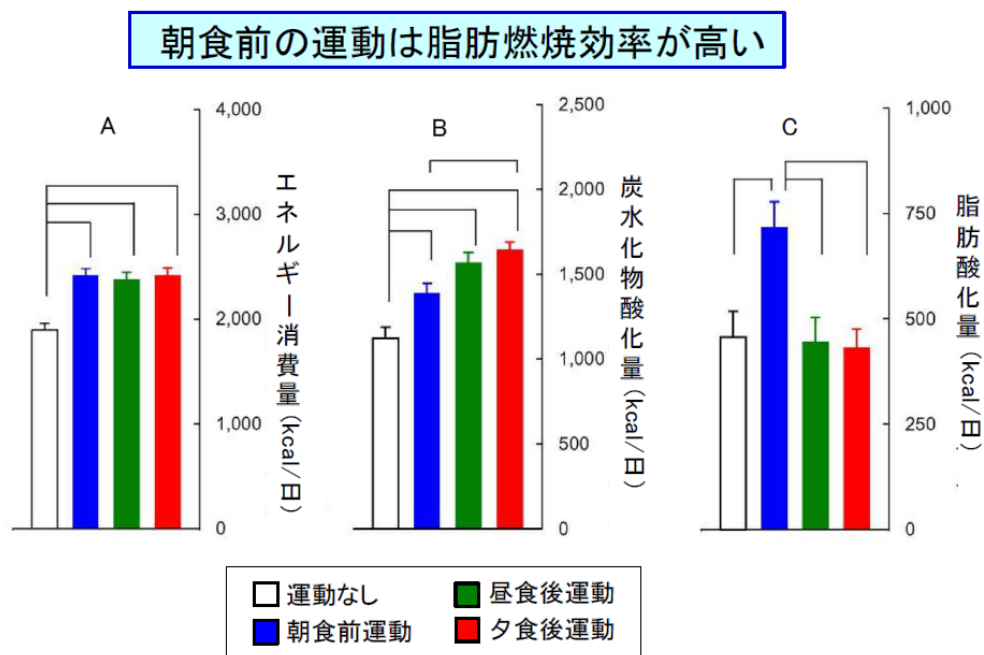
図2 Mancilla, R., et al. : Exercise training elicits superior metabolic effects when performed in the afternoon compared to morning in metabolically compromised humans, *Physiological Reports.*, 8, e14669 (2020)

### 食事と運動のタイミングと体重減少効果との関係

運動をするタイミングは食事をする時刻との関係で考えざるを得ないので、朝食の前と後で運動した場合の違い、昼食後の運動、あるいは夕食前後での運動を比較した成績について紹介します。

図3は、私たちが運動をすることの多い3つの時刻（午前8時の朝食前、12時の昼食後、18時の夕食後）に同じ運動負荷をかけたときの、エネルギー消費量(A)、炭水化物酸化量(B)、脂肪酸化量(C)について調べたものです<sup>7)</sup>。エネルギー

ギー消費量(A)は運動なしと比較していずれも有意に増加し、運動する時刻による消費量の違いは認められませんでした。しかし、炭水化物と脂肪の酸化量(BとC)を比較すると、朝食前の運動は炭水化物の消費は少なく、脂肪の消費が明らかに高い結果でした。ここでは、朝食後や夕食前の運動について調べていませんので、食前に運動することが脂肪を効率良く燃焼させるとは言い切れませんが、これら3つのパターンで運動をするのであれば、朝食前に運動をする  
と脂肪を減らす点で効果が高いと考えられます。



平均年齢23.8歳の男性被検者10人に施設内での厳密な生活コントロールの下で3食を提供し、運動負荷（自転車エルゴメーターを使用して最大酸素消費量の50%になる運動量を60分間）に伴う24時間の熱量測定の変化を記録した。運動は朝食(8時)前、昼食(12時)後、夕食(18時)後の3パターンのいずれかで、それぞれは最低1週間の休息期間を設けた後に別のパターンの1つを同様に言い、さらにその後に残りのパターンでの計測を行った。

図3

Iwayama, K., et al.: Exercise increases 24-h fat oxidation only when it is performed before breakfast, *EBioMedicine*, 2, 2003–2009 (2015)

一方、Sasaki ら<sup>8)</sup>は高脂肪食を摂食させたマウスの実験で、人が活動し始める早朝に相当する時間帯（消灯後からの4時間：食前の運動群）の輪回し運動では体重が減少し難く、昼間の時間帯（消灯後4～8時間の4時間：食後の運動群）や夜遅い時間帯（消灯後8～12時間の4時間：食後で休息前の運動群）に運動した方が、体重と脂肪の減少や筋肉の維持に良い効果が得られることを示しました。この結果では、食後に運動すると良い成績が得られることを示唆していますが、上記の図3の結果では、朝食前でも脂肪の燃焼が十分に行われていました。したがって、人の場合でも朝食後であればさらに良い結果に

なるのか、あるいは人とマウスの違いや運動強度の違いによって結果に差が生じるのかは不明です。ただし、両者には何を食べたのかの違いも存在しており、2つの報告に矛盾がない考え方としては、日本人の平均的食組成に近い炭水化物6割程度の食事をしている場合は朝食前に運動をし、高脂肪食のように飽和脂肪酸の豊富な肉類をたくさん食べた場合は、食後に運動をするのが良いことになるのかも知れません。なお、この論文<sup>8)</sup>では、マウスの実験において、気の向いたときに運動をするよりも決まった時間に運動すると効果が高いと述べられており、人においても毎日特定の時間に運動をするのは良い可能性があります。

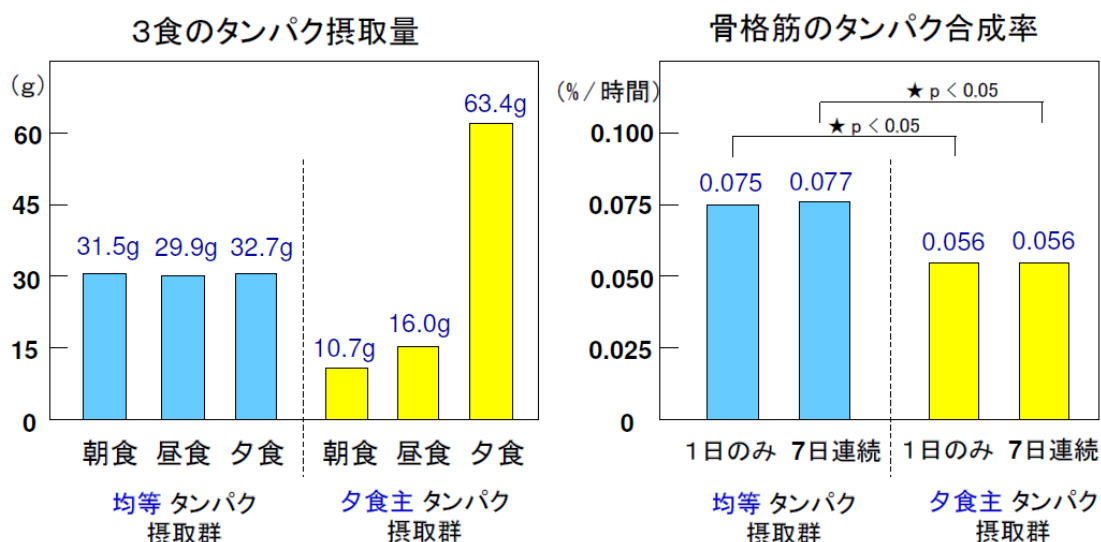
### 筋肉の合成にとって効果的なタンパク質摂取とは

アスリートに限らず、健康を考えて運動をしている多くの人にとって、身体組成が良くなるような食事内容とその摂取時刻を運動とのセットで考えることは大切です。特に、タンパク質を摂取するタイミングについては、サルコペニア（注1）が気になる高齢者にとっても大きな関心事でしょう。では、筋肉の衰えや骨が弱くなるのを防ぐ食事は、運動の前と後のどちらが良いのでしょうか。プロテイン飲料の広告などで明示されているように、一般的には運動後のなるべく早い時間帯にタンパク質を摂取するのが体組成にとって効果的であるとされています。しかし、実際には運動後だけでなく、1日3食においてなるべく均等に摂取するのが良いとの結果が出ています<sup>9)</sup>。図4はタンパク質（約90g/1日）を朝食、昼食、夕食にほぼ均等に摂取した場合（均等摂取グループ）と、7割を夕食に摂取した場合（夕食主グループ）で、（大腿骨外側部）骨格筋タンパク質の合成率を比較した実験です。筋肉のタンパク質合成は、タンパク質を3食均等に摂取したグループが夕食主グループより明らかに高く、それは7日間の摂取で初めてみられる訳ではなく、摂取後たった1日でみられる違いでした。

この実験は、朝食にタンパク質をしっかり（30g強）摂った場合とあまり摂らなかった（10g程度）場合の比較とも言えますので（タンパク質の分解に関するデータは不明ですが）、朝食（や昼食）を疎かにすると、骨格筋のタンパク質合成が低下し、次第に筋肉を維持できなくなる可能性があります。もちろん、運動後の早い時間でのプロテイン摂取が良いとする多くの報告を否定するものではありませんが、その摂取によって3食で摂るタンパク量が減ってしまうのは好ましくありません。さらに、運動をしない場合でも朝昼夕にしか

りとタンパク質を摂ることは、健全な身体組成を構築することに繋がり、高齢者のサルコペニアを予防するためにも非常に大切であると考えられます。

**筋タンパク質の合成は3食を均等に摂取するのがよい**



Mamerow, M.M., et al.: Dietary protein distribution positively influences 24-h muscle protein synthesis in healthy adults, *J.Nutr.*, **144**, 876-880 (2014) を改変

図4

**注1**：サルコペニア：ギリシャ語の筋肉を表す「サルコ」と、消失を表す「ペニア」を組み合わせた言葉で、高齢者で見られる筋肉（骨格筋）量の減少と、筋力や歩行速度などの身体機能が低下している状態のことです。基準（アジア人）は、握力の低下（男性 26kg 未満，女性 18kg 未満）と歩行速度低下（1.0m/秒以下）のどちらかを満たし、かつ骨格筋量が規定値を下回った場合です。

一方、類似の言葉にフレイルがあります。こちらは虚弱を意識しており、加齢に伴い身体能力（予備能力）が低下し、健康障害を起こしやすくなっている状態のことですが、精神活動や認知機能の低下も含まれます。実際には、介護が必要になる前段階（健常と要介護の中間的な状態）を指します。サルコペニアはフレイルの一因です。

さらに、ロコモティブシンドロームは、通称「ロコモ」と言われ、運動器症候群と訳されます。こちらは筋肉に限らず、身体の動作に必要な骨格筋や骨、関節などを含む運動器の機能低下によって、立つ、歩くなどの移動機能が低下

した状態のことです。筋肉量が減少しているサルコペニアはロコモを引き起こす要因の一つです。

### フェノタイプで異なるアスリートの最大パフォーマンス発揮時間

体内時計のリズムには、前回お伝えしたクロノタイプも関与していますので、スポーツ競技者やスポーツトレーナーはこの点についても理解しているのが適当です。

英国人アスリートを対象にして、最大パフォーマンスが発揮される時刻をビーptest（注2）により調べ、質問紙調査の結果から分類された朝型、中間型、夜型のフェノタイプとの関係を検討した論文<sup>10)</sup>では、図5に示すように、朝型の方は午前中から昼前後に、中間型の方は朝型の人よりやや遅れた昼から午後に、また夜型の方は夜遅くに向かって、それぞれのパフォーマンスが高まっていることが判明しました。朝型と中間型の場合は昼付近がやや高いだけで、日照時間であればパフォーマンスにそれほど大きな時間差はありません。しかし、夜型の方は夕刻近くになるまでは明らかにパフォーマンスが低下しているので、日中に開催されることの多い競技会の当日に向かって、長期間の時間的調整が必要になります。

**注2**：ビーptest：「ドレミファソラシド」の合図音が流れる時間内に20m区間を走る持久走試験で、有酸素持久力の評価や最大酸素摂取量を推定するために利用されます。制限時間が次第に短くなるレベル1～21のどこまで達成できたかでスコアが決まります。本論文では、121人の英国人アスリートの中から比較対象に適したクラブ所属のホッケー選手20人（平均年齢20.4歳、クロノタイプの朝型5人、中間型10人、夜型5人）を選んで、午前7時から3時間毎に6回の測定を行い、各人の最大パフォーマンスが発揮される時刻でのスコアに対するそれ以外の時刻でのスコアを相対的割合で表しています。

## クロノタイプで比較したパフォーマンスの日内変動

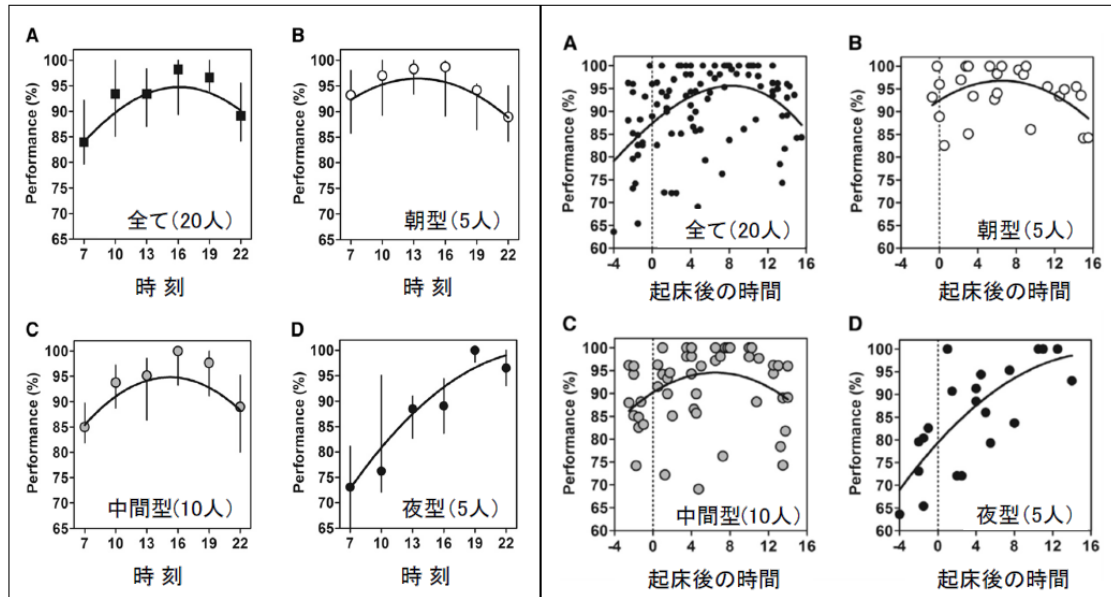


図5

Facer-Childs, E. & Brandstaetter R. : The impact of circadian phenotype and time since awakening on diurnal performance in athletes, *Curr.Biol.*, 25, 518-22 (2015)

### 運動と時計遺伝子の発現は相互に影響を及ぼしている

時計遺伝子の1つである *Bmal1* が働かないマウスでは筋肉量が減少し、早期に運動機能が低下したサルコペニアになるとされており<sup>11)</sup>、筋力の低下はミトコンドリアの機能不全を伴っていると報告されています<sup>12)</sup>。そして、概日リズムやミトコンドリアの異常、サルコペニアの発症は計画的な運動をすることによって予防できることも報告されています<sup>13)</sup>。すなわち、体内時計の中心的な役割を果たす *BMAL1* (タンパク質) とその遺伝子 (*Bmal1*) の働きは、ミトコンドリアによるエネルギー産生や筋肉、運動機能にとって必須であり、この働きを高めることが運動能力の向上にとって極めて重要であると言えます。

逆に、運動によって体内リズムに好影響が現れることもわかってきました。若年健常者を対象にして白血球の時計遺伝子発現に及ぼす運動の影響を調べた報告<sup>14)</sup>によると、最大酸素摂取量の60%で1時間の運動を行うと、*Bmal1* 遺伝子の発現は運動しない場合と比較して、(運動した時刻に関わらず) 運動開始から数時間に渡って増加しました。したがって、運動と体内時計は相互に影響し合うことで、良い効果をもたらすと考えられます。すでにお伝えしてきたよう



に、朝食摂取や睡眠は Bmal1 遺伝子の発現に影響を及ぼしますので、運動のパフォーマンスは食と睡眠によって変動することになります。この報告<sup>14)</sup>では、朝食前の運動では Bmal1 遺伝子発現のピーク時間（移相）が前進し、夕方の運動ではやや後退していました。また、マウスの実験<sup>15)</sup>によると、活動期に当たる暗期にトレッドミル（ベルトコンベアタイプの走行機器）で運動負荷をさせた場合では、時計遺伝子（Per）の発現に影響はないが、休息期の明期に運動させると移相が前進（休息期の後半に運動を強いると逆に移相が後退）すると報告されており、睡眠に適した時間帯に運動をするのは体内時計の働きを乱すことになると推測されます。通常では、人が深夜に運動することは少ないでしょうが、自分のクロノタイプや何時に最大パフォーマンスを発揮したいのかを念頭に置きつつ、自分に適した運動時刻を考えると運動がより楽しく行えるでしょう。

なお、マウスに回転カゴで運動をさせた著者らの実験<sup>16)</sup>を紹介しますと、コレステロールを多く含む高中性脂肪（ChoTG）食を摂取したマウスでは、血中と肝臓中に両脂質が著しく増加しますが、10～20 週間の運動（人が軽いジョギングで週に 4 回、約 3km 走行するのに相当）をしたマウスでは、血中の中性脂肪とコレステロールはそれほど低下しなかったものの、脂肪肝は少し改善しました。一方、ChoTG 食摂取で顕著に増加した悪玉のサイトカイン（血栓形成に関わる PAI-1、第 7 回 WEB 講座図 3 参照）と炎症性サイトカイン（MCP-1）は、運動の期間に応じて明らかに低下しました。特に、人の夕方に相当する時間帯に運動させたマウスの方が、朝方に相当する時間帯に運動させたマウスより、良い効果が認められました。この結果から、軽いジョギング程度であっても軽運動をすることによって、血栓や炎症の発症を予防できる効果があると考えられ、新型コロナウイルス感染症による重症化を防ぐ点からも、皆さんには是非夕刻に早歩きなどの軽運動を続けていただきたいと思います。なお、睡眠時間が少ないと脂肪ではなく、筋肉が減少してしまいますので、しっかりと睡眠の確保をした上で運動をすることが大切です。なお、睡眠と運動に関する総説<sup>2)</sup>によると、睡眠時間を十分にとらないとパフォーマンスが悪くなると述べられています。

### スポーツ選手の記録達成に必要な体内時計のコントロール

午後に限らずパフォーマンスを上げるために行われているのは、練習時間や模擬試合の時間を実際の試合時間に合わせることにより体内リズムを前後に移動させる調整の仕方です。また、試合前だけでなく普段からストレスを如何に

減らすかの取り組みもとても大切で、精神を安定させるセロトニンや、やる気  
を高めるドーパミンの原料になるアミノ酸（タンパク質）を食事から供給する  
ことが必要です。食事や睡眠、運動時刻の調整だけでは不十分な場合は、サプ  
リメントなどを補給して足りない特定の成分を強制的に高めることで、筋肉や  
血管・心臓などの循環器系への好影響を意識する場合もあり得ます。現在、ス  
ポーツドーピングを如何に防ぐかについて、また、ジェンダー（通常は社会的・  
文化的に形成された性のこと）とも関連するテストステロン量のことなど、ス  
ポーツに関わる様々な難しい問題がありますが、ここでは一部を注3に言及し  
ます。

注3：持久力や瞬発力を高める化合物や医薬品、その類似物質は食材にも含  
まれていることがありますし、鍛えることで体内成分を高めた場合とサプリメ  
ントで増加させた場合の区別が難しい場合もあります。また、筋肉増強作用の  
あるステロイドホルモンの服用を止めることでドーピング検査をパスできる状  
態になってからも、筋肉は長期間に渡って記憶を保持している可能性のあるこ  
とが話題になっています。さらに、すでに行われている懸念のある遺伝子ドー  
ピングの検出はとても難しい現状を考えると、今後のスポーツ競技の在り方は  
悩ましい限りです。薬物で性ホルモンをコントロールすることも可能ですが、  
その一方で一人ひとりの性ホルモンのレベルは、年齢や環境により増減してい  
ることも確かです。性は男性と女性、中性に明確に区別できるわけではなく、  
両性の割合が少しずつ濃度勾配になった多様性の状態で存在しているという考  
え方が現在では主流です。2021年11月に国際オリンピック委員会（IOC：  
International Olympic Committee）は、トランスジェンダーの選手たちにオリ  
ンピック出場資格に関する新指針として「テストステロン値の条件を外す」と  
発表しました。今後、男女や年齢区分で競技を行うのではなく、血中の特定成  
分のレベルで分けられたクラスで競うような時代が来るのかも知れませんが（公  
平だけを重要視すると努力が報われなくなって、競技自体に興味がなくなるか  
も知れませんが・・・）。

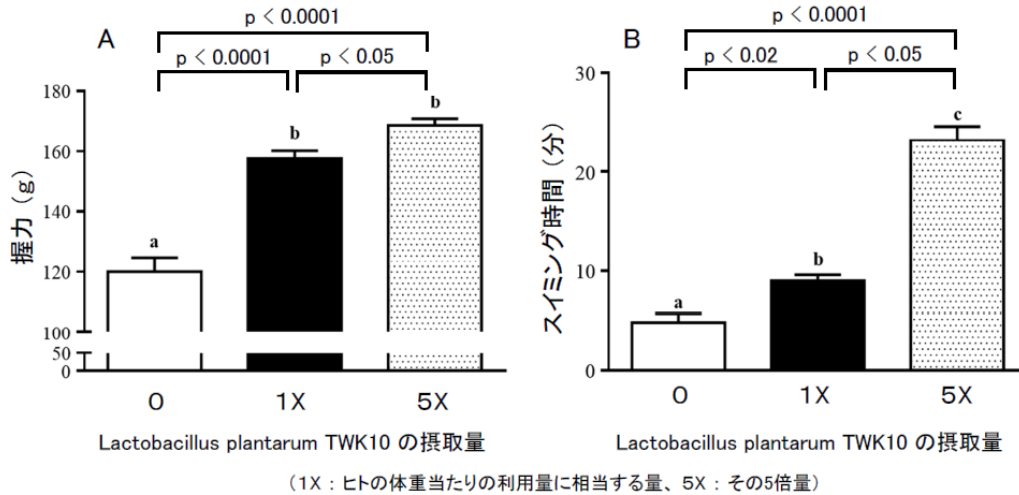
なお、3月8日は、国連が女性への差別をなくしていくことを目的に決めた  
「国際女性デー」です。

## 腸内細菌叢に及ぼす運動の影響と体内時計の関与

腸は独自の神経ネットワークを有し、脳の指令なしに独立して働けることから「第二の脳」とも呼ばれています。また、腸には体内に存在する免疫細胞の約6割が存在し、腸内環境によって免疫力に影響が出ることも知られています。また、コロナ禍の中で「腸活」という言葉を頻繁に耳にするようになりました。それは、香港中文大学の研究者が、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の患者では重症度に応じて免疫調節に関わる腸内細菌が非常に少なく、善玉菌によって産生される短鎖脂肪酸も少なくなっていると報告したことが一因です<sup>17,18)</sup>。腸活とは、人の腸内に存在する100兆個、1000種類にも及ぶとされる細菌の集合体（腸内細菌叢や腸内フローラ（花畑）と言われる）の生育環境を良い状態にするための活動のことです。腸内細菌の数や構成は個人の生活環境や年齢によって大きく変化し、その変動がその人の健康状態や種々疾患の発症にも深く関与します。第6回と8回WEB講座において腸内細菌叢との関連について少しだけ触れましたが、食事（特に腸内細菌の餌になる水溶性食物繊維と生育環境に有用な不溶性食物繊維）や睡眠、ストレスによる影響に加えて、運動が腸内細菌の数と構成を変化させる大きな要因であることもわかってきました。関連する報告には、「腸内フローラが充実すると運動能力が高まる」、また逆の「運動すると腸内フローラが充実する」の2種類がありますので、両者には強い相関関係があると考えられます。

図6(A)は、2型糖尿病モデルマウスにLP10（ラクトバチルスプランタルム、*Lactobacillus plantarum* TWK10、注4）という代表的な乳酸菌（グルコースの50%以上を乳酸に変換できる菌種）を6週間マウスに投与したときの前肢の握力を測定したものです<sup>19)</sup>。また、図6(B)は、同じマウスを用いてスイミングを続けられる時間を記録したものです。いずれも乳酸菌LP10の投与により、その投与量に応じて体力が明らかに向上しました。一方、この2型糖尿病モデルマウスでは、対照マウスと比較して、腸内に最も多いはずの善玉菌のバクテロイデスが少なく、逆に悪玉菌のプロテオバクテリアが多かったのですが、8週間のスイミング訓練をしたところ、腸内環境が顕著に改善して対照マウスに近い状態になりました。類似の論文<sup>20)</sup>では、2型糖尿病マウスの腸管内で短鎖脂肪酸（酢酸、プロピオン酸、酪酸）が減少していること、またそれがスイミングの訓練によって対照マウスと近くなるほどに改善したことが記載されています。

## ラクトバチルス菌投与後のマウスの握力とスイミング時間の改善効果



Chen, Y.M., et al. : *Lactobacillus plantarum* TWK10 Supplementation Improves Exercise Performance and Increases Muscle Mass in Mice, *Nutrients*, 8, 205 (2016)

図6

人においては、アイルランドのラグビー選手の腸内細菌叢を解析したところ、運動をしていない人と比較して腸内細菌叢に多様性があったそうです<sup>21)</sup>。その一方で、軟便で下痢をしやすい日本人ラグビー選手の腸内細菌叢を解析した論文では、対照者と比較して善玉菌のバクテロイデスは少なく、腸の炎症を引き起こすコハク酸が非常に多かったと述べられています<sup>22)</sup>。いずれにしても、適度な運動をすると善玉菌が増加すると共に、腸内細菌叢の多様性が高まるとの報告が多い状況です。運動で腸内細菌叢が良い状態になれば、細菌が作り出す酢酸や酪酸、乳酸、プロピオン酸などの短鎖脂肪酸や抗酸化物質が腸内に多くなり、結果的に免疫系や循環器、神経、筋肉などの機能が高まると考えられています。ただし、激しい運動をすると免疫力が低下する<sup>23)</sup>ことが知られているように、腸内細菌叢に異常が出てくるので注意が必要です。

アスリートの腸内細菌叢を調べた報告は多数ありますが、ほとんどの研究者が指摘しているのは、細菌の種類や数は非常に多様であるということです(注5)。したがって、アスリートの腸内細菌叢の増減と構成の変化については、各自の経時的な変動を調べるのが重要で、今後は食事の影響に関してより明確になると考えられます。

最後に腸内細菌叢と体内時計に関する報告を紹介します。マウスとヒトの糞便中の細菌叢には食事によって影響を受ける日内変動があり、時計遺伝子の機能不全や時差ぼけになると、腸内細菌叢のリズムや構成に異常が生じると報告されています<sup>25)</sup>。また、時計遺伝子 *Bmal1* が働かないマウスでは腸内細菌叢の日内リズムがなくなり、量や構成が変化していました<sup>26)</sup>。さらに、睡眠異常が腸内細菌叢のリズム異常と密接な関係にあることも報告されています<sup>27)</sup>。これらのことから、運動を介した腸内細菌叢への影響は体内時計に影響を及ぼし、また体内時計が正しいリズムを刻まない生活環境にあると、運動のパフォーマンスが低下すると考えられます。

**注4**：ラクトバチルスプラントルムは、植物由来の善玉乳酸菌で日本の漬物や韓国のキムチなどを始め、世界中のさまざまな発酵食品に利用されています。また、一部の菌株においては免疫賦活作用のあることも報告されており、プロバイオティクス (Probiotics) として有用な菌です。「プロバイオティクス」は、1989年に Fuller (英国の微生物学者) によって定義された用語で、「腸内フローラのバランスを改善することによって宿主の健康に好影響を与える生きた微生物」のことです。胃酸や胆汁、膵液などの消化液で死滅しない菌や、改良された一部の乳酸菌 (特定のビフィズス菌やガセリ菌) が主なプロバイオティクスです。ただし、死んだ細菌の多糖体が効果を示すこともあります。

**注5**：通常は4種類 (R、B1、B2、P) のタイプに分類されますが、日本人は欧米人や中国人とは異なっていることを加味して5種類 (R、B1、B2、Bif、P) に分類<sup>24)</sup>することが一般的です。最近では、腸内細菌叢を調べる検査キット (採便試料を郵送して分析) も利用できるようになりましたので、企業からの支援があるトップアスリートは体調管理を目的に使用するようになると考えられます。前述したドーピングに関連しますが、すでにプロスポーツ界では選手の腸内細菌叢の分析や食事組成による細菌への効果について検討されており、近い将来には腸内フローラドーピングが議論されるようになるかも知れません。

## 参考文献

- 1) Ilmarinen, J., *et al.*: Circadian variation of physiological functions related to physical work capacity, *Scand. J. Work Environ. Health*, **6**, 112-122 (1980)
- 2) Thun, E. *et al.*: Sleep, circadian rhythms, and athletic performance, *Sleep. Med. Rev.*, **23**, 1-9 (2015)
- 3) Lok, R., *et al.*: Gold, silver or bronze: circadian variation strongly affects performance in Olympic athletes, *Sci. Rep.*, **10**, 16088 (2020)
- 4) Gifford, L.S.: Circadian variation in human flexibility and grip strength. *Aust. J. Physiother.*, **33**, 3-9 (1987)
- 5) Reilly, T. & Down, A.: Investigation of circadian rhythms in anaerobic power and capacity of the legs, *J. Sport. Med. Phys. Fit.*, **32**, 343-347 (1992)
- 6) Mancilla, R., *et al.*: Exercise training elicits superior metabolic effects when performed in the afternoon compared to morning in metabolically compromised humans, *Physiol. Rep.*, **8**, e14669 (2020)
- 7) Iwayama, K., *et al.*: Exercise increases 24-h fat oxidation only when it is performed before breakfast, *EBioMedicine*, **2**, 2003-2009 (2015)
- 8) Sasaki, H., *et al.*: Combination of meal and exercise timing with a high-fat diet influences energy expenditure and obesity in mice, *Chronobiol. Int.*, **31**, 959-975 (2014)
- 9) Mamerow, M.M., *et al.*: Dietary protein distribution positively influences 24-h muscle protein synthesis in healthy adults, *J. Nutr.*, **144**, 876-880 (2014)
- 10) Facer-Childs, E. and Brandstaetter, R.: The impact of circadian phenotype and time since awakening on diurnal performance in athletes, *Curr. Biol.*, **25**, 518-522 (2015)
- 11) Kondratov, R.V., *et al.*: Early aging and age-related pathologies in mice deficient in BMAL1, the core component of the circadian clock, *Genes Dev.*, **20**, 1868-1873 (2006)
- 12) Andrews, J.L., *et al.*: CLOCK and BMAL1 regulate MyoD and are necessary for maintenance of skeletal muscle phenotype and function, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **107**, 19090-19095 (2010)

- 13) Choi, Y., *et al.*: Re-Setting the Circadian Clock Using Exercise against Sarcopenia, *Int. J. Mol. Sci.*, **21**, 3106 (2020)
- 14) Tanaka, Y., *et al.*: Effect of a single bout of exercise on clock gene expression in human leukocyte, *J. Appl. Physiol.*, **128**, 847-854 (2020)
- 15) Kemler, D, *et al.*: Time-of-day dependent effects of contractile activity on the phase of the skeletal muscle clock, *J. Physiol.*, 598, 3631-3644 (2020)
- 16) 堀江修一 : 女子栄養大学栄養科学研究所年報, **26**, 39-50 (2021)
- 17) Yeoh, Y.K., *et al.*: Gut microbiota composition reflects disease severity and dysfunctional immune responses in patients with COVID-19, *Gut*, **70**, 698-706 (2021)
- 18) Lau, H.C-H. *et al.*: Targeting the Gut Microbiota in Coronavirus Disease 2019: Hype or Hope?, *Gastroenterology*, **162**, 9-16 (2022)
- 19) Chen, Y.M., *et. al.*: *Lactobacillus plantarum* TWK10 Supplementation Improves Exercise Performance and Increases Muscle Mass in Mice, *Nutrients*, **8**, 205 (2016)
- 20) Ling Yang, L., *et al.*: Exercise Ameliorates Insulin Resistance of Type 2 Diabetes through Motivating Short-Chain Fatty Acid-Mediated Skeletal Muscle Cell Autophagy, *Biology (Basel)*, **9**, 203 (2020)
- 21) Clarke, S.F., *et al.*: Exercise and associated dietary extremes impact on gut microbial diversity, *Gut*, **63**, 1913-1920 (2014)
- 22) Morishima, S., *et al.* : Altered Fecal Microbiotas and Organic Acid Concentrations Indicate Possible Gut Dysbiosis in University Rugby Players: An Observational Study, *Microorganisms*, **9**, 1687 (2021)
- 23) Fahlman, M.M. & Engels, H.-J. : Mucosal IgA and URTI in American college football players: a year longitudinal study, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **37**, 374-380 (2005)
- 24) Nishijima, S., *et al.*: The gut microbiome of healthy Japanese and its microbial and functional uniqueness, *DNA Res.*, **23**, 125-33 (2016)
- 25) Thaïss, C.A., *et al.*: Transkingdom control of microbiota diurnal oscillations promotes metabolic homeostasis, *Cell*, **159**, 514-529 (2014)

- 26) Xue Liang, X., *et al.*: Rhythmicity of the intestinal microbiota is regulated by gender and the host circadian clock, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **112**, 10479–10484 (2015)
- 27) Tian, Y., *et al.*: An important link between the gut microbiota and the circadian rhythm: imply for treatments of circadian rhythm sleep disorder, *Food Sci. Biotechnol.* **31**, 155–164 (2022)