

International society of sports nutrition position stand: nutritional concerns of the female athlete

国際スポーツ栄養学会の公式声明: 女性アスリートの栄養上の懸念事項

Stacy T. Sims, Chad M. Kerksick, Abbie E. Smith-Ryan, Xanne A.K. Janse de Jonge, Katie R. Hirsch, Shawn M. Arent, Susan Joyce Hewlings, Susan M. Kleiner, Erik Bustillo, Jaime L. Tartar, Valerie G. Starratt, Richard B. Kreider, Casey Greenwalt, Liliana I. Rentería, Michael J. Ormsbee, Trisha A. VanDusseldorp, Bill I. Campbell, Douglas S. Kalman & Jose Antonio

翻訳者

鈴木いづみ¹、眞鍋栄一郎²、河村美樹³、田澤 梓¹、寶川美月⁴、佐原和真⁵、斉藤裕子¹、福田志津可²、
松本菜々⁶、大津智仁⁷、新生暁子¹、小井土幸恵⁸、青柳清治⁹

Izumi Suzuki¹, Eiichiro Manabe², Miki Kawamura³, Azusa Tazawa¹, Mizuki Takaragawa⁴, Kazuma Sahara⁵,
Hiroko Saito¹, Shizuka Fukuda², Nana Matsumoto⁶, Tomohito Otsu⁷, Tokiko Shinjo¹, Sachie Koido⁸, Seiji
Aoyagi⁹

翻訳者所属

¹ フリーランス (JSPO 公認スポーツ栄養士) Freelance (JSPO-Sports Dietitian)

² 興和株式会社 KOWA COMPANY, LTD.

³ HPCJC High Performance Center of Japan Cycling

⁴ 順天堂大学院スポーツ健康医科学研究所科学研究科 Juntendo University Institute of Health and Sports
Science & Medicine

⁵ UNITED STYLE

⁶ 東京大学大学院 医学系研究科 侵襲代謝・手術医学講座 University of Tokyo Graduate School of Medicine

⁷ とちぎスポーツ医科学センター Tochigi Institute of Sports Medicine & Science

⁸ 特定非営利活動法人 NSCA ジャパン National Strength and Conditioning Association Japan

⁹ 一般社団法人国際スポーツ栄養学会 International Society of Sports Nutrition Japan

要約

国際スポーツ栄養学会（ISSN）は、その分野の専門家と ISSN より選出されたメンバーによる、女性アスリートの栄養上の懸念に関する文献の包括的なレビューと批判的分析に基づいて、以下の結論を公式声明とする。

- ① 女性アスリートは、特有の予測不可能なホルモンプロフィールを持っており、それは生涯にわたって生理機能と栄養必要量に影響を与える。これらのホルモンの乱れが個人に対してどのように影響するかを理解するために、生殖年齢にある女性アスリートは、トレーニングとリカバリーに対してホルモンの状態(自然な状態、ホルモンに左右された状態)を考慮し、個々のパターンとニーズを決定する。更年期および閉経後のアスリートは、トレーニングとリカバリーの指標を考慮して、個人固有のパターンを決定することを推奨する。
- ② すべてのアスリート、特に女性アスリートのおもな栄養上の考慮事項は、エネルギー必要量を満たし最適なエナジーアベイラビリティ(EA)となるよう、適切なエネルギー摂取を達成することである。そしてそれは、トレーニング適応の向上を目指した運動や、パフォーマンス向上のための運動、アスリートの健康増進のための運動など、各種運動に関連する食事のタイミングに焦点を当てつつ実行されるものである。
- ③ 糖質代謝と脂質代謝に対する性差と性ホルモンの影響は明白であるため、まずはアスリートが月経周期のすべての段階で糖質必要量をしっかり満たすことを推奨する。第二に、経口避妊薬使用者がピルを服用する週と、運動中の糖生成に対する性ホルモンの抑制効果が大きい黄体期には、より多くの糖質摂取とエナジーアベイラビリティに重点を置いて、糖質摂取量をホルモン状態に合わせるようにする。
- ④ 限られた研究論文によると、閉経前の女性アスリート、正常月経の女性アスリート、および経口避妊薬を使用している女性アスリートは、運動誘発性のアミノ酸の酸化を抑制し、筋タンパク質のリモデリングと修復を惹起するために、体重 1kg あたり 0.32~0.38g の高品質なたんぱく質源を、運動開始時および/または運動終了後にできるだけ早いタイミングで摂取することを目指すよう推奨している。正常月経の女性の場合、黄体期のたんぱく質摂取は、プロゲステロンの異化作用およびアミノ酸の必要量増加のために摂取基準範囲の上限を目指すべきである。
- ⑤ 運動開始時および/または運動終了後に、更年期および閉経後のアスリートは、体タンパク同化に対する抵抗性を克服するために、高 EAA 含有(~10 g)のたんぱく質またはプロテインサプリメントをしっかりと摂取することを目指す必要がある。
- ⑥ 毎日のたんぱく質摂取量は、月経期間のすべての段階(閉経前、更年期、閉経後、および避妊薬使用者)の女性の場合、現在のスポーツ栄養ガイドラインの中程度から上限の範囲内にある必要がある(体重 1kg あたり 1.4~2.2 g/日)、そして、1 日の中で 3~4 時間ごとに均等に分散されるべきである。正常月経で黄体期のアスリートと更年期/閉経後のアスリートは、スポーツの種類に関係なく、ガイドラインに示された範囲の上限を目指す必要がある。
- ⑦ 女性ホルモンは、体の水分動態と電解質調節に影響を与える。より低ナトリウム血症になりやすいのは、プロゲステロンが上昇しているとき、および水分を排泄するのが遅い更年期の女性である。さらに、女性は男性よりも発汗によって失う水分量が絶対的および相対的に少ないため、特に黄体期において体水分喪失の生理学的影響がより深刻になる。
- ⑧ 女性に特化した研究が少ないこと、また女性における効果に差があることから、性別に特化したサプリメントのエビデンスは不足している。カフェイン、鉄、およびクレアチンは、女性での使用に関するエビデンスが最も多い。鉄とクレアチンはともに、女性アスリートに非常に有効である。クレアチンは、筋タンパク質の動態、成長因子、衛星細胞、筋原性転写因子、グリコーゲンとカルシウムの調節、酸化ストレス、および炎症に関するメカニズム的な裏付けがあるため、1 日 3~5g のクレアチンサプリメント摂取が推奨される。閉経後の女性は、より高用量のクレアチン (体重 1kg あたり 0.3g/日)を摂取すると、骨の健康、精神の健康、骨格筋のサイズと機能の面で恩恵を受ける。

- ⑨ 女性アスリートを対象とした質の高い研究調査を促進するために、研究者に対してはまず、主要評価項目が性別固有のメカニズムによって直接影響を受けない限り、女性を除外しないことが奨励される。すべての調査シナリオにおいて、月経状態(月経の日数、期間、周期の長さなど)および/またはホルモン避妊薬の詳細および/または閉経を迎えたかどうかを含む、アスリートのホルモン状態を取り巻くより詳細な情報を調査および報告することが世界中の研究者に奨励される。

1. 方法

国際スポーツ栄養学会 (ISSN) のポジションスタンドは、Journal of the ISSN (JISSN) 編集部および研究委員会が JISSN 読者の興味を引くと判断したトピックに関する招待論文である。そのプロセスは、編集者および/または ISSN 研究委員会、包括的な文献レビューを行う筆頭著者または著者チームを特定することからなる。具体的には、この女性アスリートに関する公式声明では、研究デザインが科学的に妥当であるかどうかを精査した [1, 2]。著者らが声明文の草稿を執筆後、その分野の第一人者である専門家に送り詳細なレビューを受けた。その専門家による批判的なレビューの後、論文は著者チームによって修正され、ISSN 研究委員会と JISSN 編集部によって承認され、合意声明として、またこのテーマに関する ISSN の公式見解として公表された。

2. 緒言

科学の進歩の歴史をざっと振り返ってみても明らかのように、生物医学界は長い間、人間の生理学における性差の重要性を軽視してきた。男性は日常的に、あらゆる尺度や基準を設定する際の模範とされてきた。男性偏見の問題は遠く及んでおり、女性がターゲットとされるべき層であったとしても、女性を無視した科学の例が文献に溢れている [3]。例えば、1960 年代半ばに、女性は閉経後にエストロゲンレベルが低下するまで心血管疾患の罹患率が低い傾向にあるという観察がなされ、ホルモン補充が効果的な予防療法であるかどうかを調査する研究者が現れた。この研究では、男性 8,341 人が登録され、女性は登録されなかった [4]。同様に、多重危険因子介入試験 (MRFIT) では、心血管系疾患を予防するための食事療法と運動療法が検討され、13,000 人の男性が登録されたが、女性は登録されなかった [5]。生物学から行動学に至るまで性差が大きいことを考えると、女性を除外するという行為は、どのような知見も女性に当てはまると仮定することはできないということである。さらに、性差に基づいた分析を行うことで、特定の介入が性差によってどのように異なるかを理解することにより、すべての人にとって重要な科学的ブレイクスルーが起こる可能性がある。幸いなことに、すべての活動的な女性にとって、競技活動の機会や女性中心のヒューマンパフォーマンス研究は急速に拡大している。しかし、女性中心の調査研究や女性被験者の数は、男性に比べまだ大幅に遅れている [3, 6]。

女性を対象とした、健康およびヒューマンパフォーマンス研究はあるが、その研究の焦点はしばしば月経周期の影響についてである。月経と身体活動に関する最も初期の研究報告の 1 つは、1877 年に Mary Putnam Jacobi 博士によって書かれた「月経中の女性の休息に関する問題」である [7]。これらの初期の論文から作られた、身体活動が生殖機能を損ない、女性の健康に害を及ぼすかもしれないという仮定は、今日でもいまだ蔓延している。そのため、女性はほとんどの公式、強度の高い身体活動やスポーツから除外されていた。スポーツのパフォーマンスに関連する女性の月経周期の研究は、1953 年に本格的に開始され、今日までに、このテーマに関する約 400 報の研究が報告されている [8]。男性と比較すると、月経周期に関する試験デザインは「複雑」であるとみなされてきたため、数多くの研究で資金調達が困難であった。しかし、男女間の内分泌学的な違いは明らかであり、月経周期に特化した研究への関心が高まっているにもかかわらず [9]、運動科学や栄養学の研究では、男性で得られた結果を女性に一般化する傾向が続いている [10]。最近、女性の運動パフォーマンスと栄養の研究に関連する科学的デザインと方法論に関するガイドラインが公表された [1, 2, 11]。重要なのは、これらのガイドラインで、どの女性ホルモンを考慮する必要があるかを示していることである [1, 8, 11]。このことは、精神的および身体的パフォーマンスのピークに近づくことに対する女性個人の関心の高まりとともに、生涯にわたってこれらの問題に取り組む研究の増大につながっている [12, 13]。この公式声明の目的は、これらの研究をレビューし、スポーツ栄養のための実用的なエビデンスに基づいた女性特有の推奨事項を提供することである。

(Translated by Izumi Suzuki)

3. 性差の概要

「Sex」と「Gender」という用語は、スポーツと運動の文献で同義語として使用されている。しかし、同じ意味で使用すべきではな

い区別すべき 2 つの概念が存在する。一般に「Sex」とは、染色体、第一性徴、第二性徴、および内因性ホルモンプロフィールの性的特徴に関連する違いに基づく女性と男性の区別を意味する。一方、「Gender」は、女性、男性、またはその他のもの（中性）としての自己認識したアイデンティティを含む内容を指す。これは少なくとも部分的な生物学に基づいており、人に固有の特性である。自分の性同一性の外見上の表現である容姿やその他の行動、そして、性別または性同一性に基づいて社会で果たすことが期待される役割（その詳細は社会文化的状況によって異なる可能性がある）を含んでいる。Gender の議論は確かにスポーツ界においても議論すべき課題であるが、女性アスリートの栄養学に関連した話題は、Sex と人間の性分化に関して議論することでよいであろう。

性染色体遺伝子と性ホルモン(エストロゲン、プロゲステロン、アンドロゲンなど)は、男女間の異なる反応に寄与する。出生後、男の子と女の子の臓器の構造と役割には思春期前から大きな違いが存在し、最終的にはホルモン活性によってさらに違いは強調され、栄養素や食事全般を含む環境刺激に対する性特異的な反応によって制御される。ホルモンの影響から切り離すことは困難であるが、重要な性差はミトコンドリア機能[14-16]、基質利用、インスリン感受性[17-24]、免疫応答[25-28]、筋肉の形態と身体組成[29-32]、鉄代謝[33-40]、体温調節[41-44]、水分補給[45-53]、食欲制御[54-59]、およびエナジーアベイラビリティと内分泌機能[60-65]に存在する。

3.1. 女性ホルモンとホルモンプロフィールの変化

おもな女性ホルモンは、ヒトの主要な内因性エストロゲンである 17 β エストラジオール(E2)とプロゲステロンである。どちらのホルモンも栄養素の需要性と代謝においてアゴニスト（増強的作用成分）もしくはアンタゴニスト（抑制的作用成分）として機能し、エストラジオールとプロゲステロンの比率とレベルは、安静時だけでなく運動中にもエネルギーとして使用される主要栄養素の比率に影響を与える。視床下部の神経核におけるエストロゲンレベルの変動は、食物摂取量、エネルギー消費および白色脂肪組織の分布をコントロールする[22, 66, 67]。骨格筋、肝臓、脂肪組織および免疫細胞におけるエストロゲン作用は、インスリン感受性ならびに脂質蓄積および炎症の予防に関与している[20, 21, 67, 68]。膵臓のランゲルハンス島 β 細胞におけるエストロゲン作用は、インスリン分泌、栄養素の恒常性バランスおよび生存時間をも制御する[66, 69, 70]。しかし、プロゲステロンの代謝への影響の特異的メカニズムについてはあまり知られていない。プロゲステロンは、プロゲステロンを媒介とした代謝率の増加を介してエネルギー利用効率に直接的に影響を及ぼす[71-73]。また、アルドステロンはプロゲステロンを媒介とした増加を介して血清電解質バランスを変化させる[74-77]。加えて、異化作用によりアミノ酸の酸化を増加させ、筋タンパク質の合成を減少させる[78-81]。GLUT1 発現率の増加を介してグルコース代謝に影響を及ぼし、子宮内膜の解糖系代謝を増加させ、骨格および肝臓での解糖系の反応を減弱させる[82-85]。

女性アスリートの代謝と栄養需要に対する女性ホルモンの影響の可能性をよりよく理解するには、生殖可能な年齢の女性アスリートが経験するであろう通常とは異なる多くのホルモンの状態を考慮することが重要である。ホルモン避妊薬を使用していないアスリートの場合(次のセクション参照)、無月経(月経周期の欠如)、稀発月経症(月経周期が 40 日を超えるため、年間 9 サイクル未満)から正常月経(月経周期の長さが 21~40 日)までさまざまである。そして、月経サイクルが正常な女性はホルモンの変動の影響を受けて排卵周期が変動したり、無排卵または黄体期欠乏を伴う月経周期 (MC) の変動(月経困難症)が起こる[2]。

MC とその身体への全身的作用は女性[1]と男性で異なるストレスに対する反応と順応を示すことがよくある。このため、その研究は重要な研究領域として位置づけられている[86, 87]。月経困難症の女性の場合、MC はいくつかのホルモン、特にエストロゲン、プロゲステロンのような性ステロイドの変動を特徴とし、それは次の段階に分けられる:卵胞初期(EF)、卵胞中期(MF)、卵胞後期(LF)、排卵 (OVU)、黄体初期 (EL)、黄体中期(ML)および黄体後期 (LL) 各段階を通して (図 1 参照)、ホルモンの変動は生殖組織だけでなく体のすべての組織の変化を引き起こし、ストレスからのリカバリー能力、代謝、耐性に直接影響を与える可能性がある[1, 88]。確認となるが、通常の月経周期の長さは 21~40 日である[89]。MC の前半は月経期と卵胞期で構成されており、その間のエストロゲンレベルは低く(初期の卵胞/月経)、次に上昇(卵胞中期)とピーク(卵胞後期)、卵胞刺激ホルモンと黄体形成ホルモンがピーク濃度に達する排卵周囲期で上昇は終わる。排卵後、周期の後半は黄体初期 (エストロゲンレベルが一度下がり、プロゲステロンの上昇に合わせて再び上昇)、黄体中期(エストロゲンとプロゲステロンのレベルが後半でのピークに達す)で構成されている。そして最後に、黄体後期(エストロゲンとプロゲステロンのレベルが低下)となる。これらの周期的なホルモンの変化は、多くの身体的および心理的要因に影響を与える可能性があり、最終的にはスポーツのパフォーマンスに影響を与える可能性がある。ただし、その影響は非常に個人差が大きいものである[88, 90, 91]。

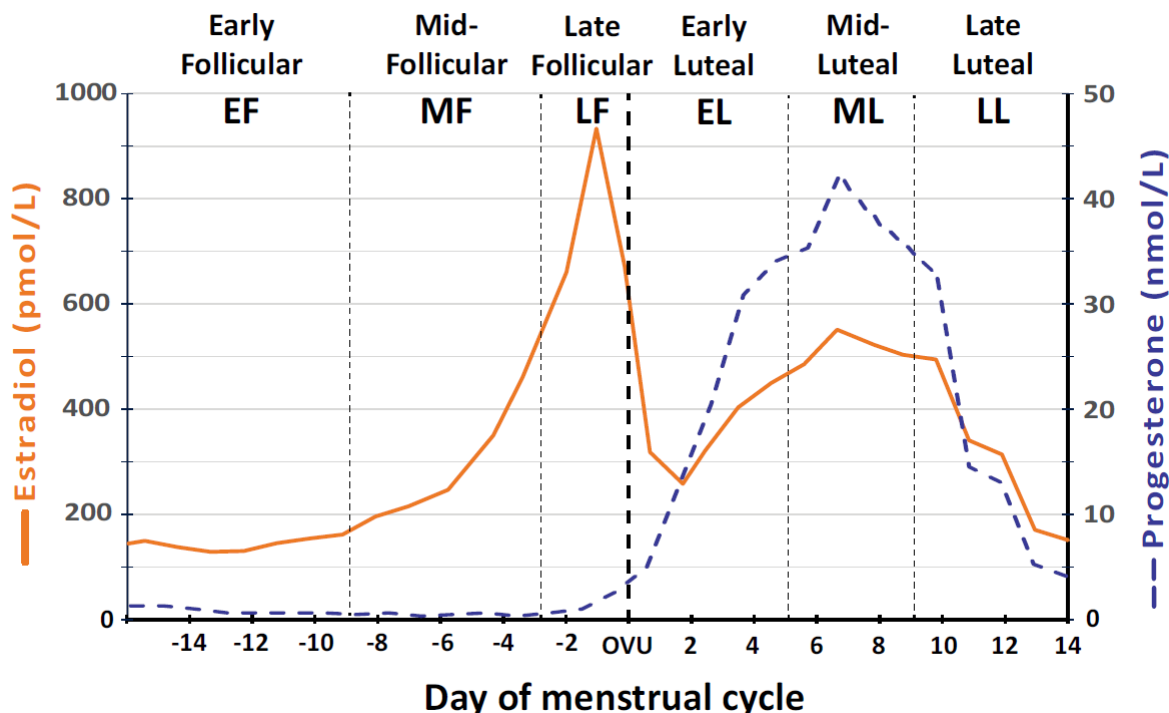


図 1. 典型的な 28 日周期の月経周期の段階を示す図 (Oosthuysen et al [9]より)

3.2. ホルモン避妊薬

多くの女性アスリートは、さまざまな理由でホルモン避妊薬を使用している[92]。ホルモン避妊薬 (HC) にはエストロゲンとプロゲステロン[訳注 1]の誘導体が含まれており、視床下部-下垂体-生殖腺軸の規則的な周期的ホルモン活性を下方制御し、内因性卵巣ホルモンとは異なる生理学的反応を引き起こす[88, 93]。エチニルエストラジオール (EE) とメストラノールという 2 つのエストロゲン(エチニルエストラジオールの方がより頻繁に使われる)と、いくつかのプロゲステロンが現在使われている [94]。HC のさまざまな配合や作用機序に関する全体像はこの公式声明の範囲外であるため、詳細については Regidor [94, 95] および Benagiano [96] を参照されたい。

合成/外因性ホルモンが身体のさまざまなシステムに及ぼす影響については、医師やアスリートにとって細心の注意が必要かもしれない。例えば、内因性エストロゲンとプロゲステロンは体液バランスに対して拮抗作用を持っている。つまり、エストロゲンはレニン-アンジオテンシン系を活性化し、アンジオテンシノーゲンの産生を刺激し、血漿中のアンジオテンシン、アルドステロン、ナトリウムのレベルの上昇 (ナトリウム貯留) を引き起こし[52]、その結果保水力が高まる。一方、プロゲステロン[訳注 2]は強力なアルドステロン拮抗薬であり[47]、ミネラルコルチコイド受容体を刺激してナトリウム貯留を防ぐ。しかし、経口避妊薬 (OC) に含まれるプロゲステロンはエストラジオールのナトリウム保持効果を打ち消すには不十分である。その結果、エストラジオールが体液貯留を引き起こす[97]。さらに、Suh, Casazza ら [98]は、安静時 (90 分) および 2 つの運動強度 (VO_{2peak} 45%および 65%で 60 分間の下肢自転車エルゴメータ) 中の glucose flux [訳注 3]および全身における基質酸化速度に対する OC の効果について縦断的に調べた。OC は運動中の glucose flux を大幅に下方制御し、外因性ホルモンは内因性ホルモンよりも運動時のグルコース代謝に大きな影響を及ぼした。したがって、外因性ホルモンは、内因性卵巣ホルモンとは異なる方法で生理学的適応と栄養の必要性を抑える可能性がある[98]。

エストロゲンとプロゲステロン (経口避妊薬の併用/COC) またはプロゲステロンだけの避妊薬 (プロゲスチン[訳注 4]のみの錠剤、子宮内避妊具 (IUD)、インプラント、注射) の継続投与に関連する性器出血は自然周期的な月経の場合とはまったく異なる。COC を使用する女性は異なる 28 日サイクルとなり、合成エストロゲン (エストラジオールまたはメストラノール) と合成プロゲステロン (プロゲスチンと呼ばれる) の 4 世代のうちの 1 つを 21 日間毎日一定量投与し、その後 7 日間の休薬により消退出血 (本物の月経出血と間違われることが多い) を引き起こすことが特徴である [99]。これにより、合成ホルモンのレベルが 21 日間の摂取期間中に高く、7 日間の休薬期間中に低くなるという規則的なパターンが生じる。以下 2 種の主要な COC 製剤

が利用可能である：単相製剤では、ピルの投薬期間中全体でエストロゲンとプロゲステロンの投与量が変化しない。多相製剤では、ホルモンの用量は有効な錠剤、特にプロゲステロンによって異なる。プロゲステロンはほとんどの避妊効果と関係しており、外因性プロゲステロンの生成、種類、用量がその効力とアンドロゲン性を決定する（例えば、ノルエチンドロンはプロゲステロンの変化が弱い第一世代の薬だが、ノルゲストレルとレボノルゲストレルは、第 1 世代のアプローチよりも強力になるように設計された第 2 世代の薬であり、より大きなアンドロゲン作用を発揮する）[1, 100, 101]。外因性ホルモンの作用機序は、卵巣の機能抑制を引き起こし、黄体形成ホルモン（LH）の急増と排卵を防ぐことである。COC 製剤にはさまざまな種類や世代が存在するため、COC を使用している女性に関する研究はほとんどなく、その研究はその種類の COC に適用できるものであり、すべての COC に適用できるわけではないことを理解することが重要である。

代わって、プロゲステロンと銅製の子宮内器具（IUD）は排卵を阻害しないが、子宮内膜過形成を減少させ、その結果、着床に適さない環境をもたらす[102]。重要なのは、経口投与されたステロイドのみが肝臓の first-pass metabolism[訳注 5]を受けるとのことである。したがって、IUD の局所的なプロゲステロンは、体組成や体重に変化がなく、COC のプロゲステロンと比較して異なる代謝効果を発揮する[103]。IUD の種類と作用機序の完全なレビューはこの公式声明の範囲を超えており、それらは他の論文に書かれている [104–106]。COC と IUD が代謝と栄養要件に及ぼす影響に関する研究は不足しているが、ホルモンの影響を理解することは、正常月経女性の研究から推論を導き出すのに役立つ。

3.3. 更年期および閉経後

更年期、つまり閉経期は、生殖およびホルモンの重大な変化に関連している。閉経が近づくにつれて月経周期の性質と時間が増えることは十分に確立されており、卵胞期が延長する割合が増加し、排卵周期の遅延や排卵周期の全くないことが見られる可能性がある。月経周期の黄体期のホルモンパターンも年齢とともに変化を示し、排卵周期の欠如が大きくなり、黄体期プロゲステロンの減少がより一般的になる[107-109]。プロゲステロンの減少は、エストラジオール：プロゲステロンの比率（E:P）、筋タンパク質合成の同化抵抗、インスリン抵抗性、腹部脂肪の増加、除脂肪体重の減少、骨密度の低下、および エネルギー消費の減少に影響を及ぼす[110, 111]。身体組成の変化の大部分は、閉経（一般に 12 ヶ月間月経がないことと定義される）に至る 4~5 年間に起こり、その後の身体組成の変化はホルモン関連ではなく、加齢に関連したものである[112]。更年期の女性アスリートの生理学的パラメータに対するホルモン変化の影響を理解することで、インスリン感受性を改善し、除脂肪体重と骨密度をサポートする栄養上の推奨事項が、身体組成、健康状態、およびパフォーマンスを積極的に向上させる可能性がある。

(Translated by Miki Kawamura)

4. エネルギー必要量：摂取量とアベイラビリティ

エネルギーは、筋肉活動、熱生産、栄養素などの細胞間の輸送、成長、細胞成分や新しい組織の合成など、さまざまな代謝過程や生理的機能のために必要である。したがって、女性アスリートにとって、適切なエナジーアベイラビリティ（EA）を達成することは、第一に栄養学的配慮すべきである。EA は、食事のエネルギー摂取量と身体活動のエネルギー消費量を考慮した上で、代謝プロセスに利用できるエネルギーとして定義される[61, 113]。具体的に EA は、食事のエネルギー摂取量（EI）から運動エネルギー消費量（EEE）を差し引き、総体重に対する除脂肪体重（FFM）で補正したものと定義されている[65, 114]。長期のエネルギー制限は、生理学的機能の低下、所定のトレーニングへの不適応、および疲労、病気、傷害のリスクの上昇につながるため、特に強化期間中のトレーニングの継続には十分なエネルギーが不可欠であることが広く受け入れられている[61, 64, 114-116]。男女ともに、エネルギーの恒常性は、腸、膵臓、脂肪組織、生殖腺から分泌される様々なホルモンの制御下にある。

この点で、性ホルモンは、エネルギー摂取の調節に関する性差のおもな原因である[117]。おもに女性ホルモンであるエストロゲンは、食物摂取量と体重を減少させるので食事の量に影響を及ぼし [118]、レプチンやグレリンなどの他のホルモンと連携して食物摂取の強い抑制を発揮する [119] ように機能している。月経周期の卵胞期後期には、エストロゲンが高く、プロゲステロンの濃度は低くなる。安静時代謝量（RMR）とエネルギー摂取量が最も少なくなるのはこの時期である。逆に、月経周期の中期黄体期には、エストロゲンとプロゲステロンの濃度がともに上昇し、ピークに達する[58]。したがって、安静時代謝率は上昇し、エネルギー摂取量は一般的に最高値となる[59, 120]。例えば、Barr ら[121]は、レクリエーションレベルで活動する女性の月経周期の黄体期には、自由生活エネルギー摂取量が 300kcal/日ほど増加すると推定している。

4.1. 低エネルギーアベイラビリティ

低エネルギーアベイラビリティ（LEA）は、スポーツにおける相対的エネルギー不足（RED-S）[114]の根本的な病因であり、エネルギー摂取量が運動によるエネルギー消費量を下回る場合に発生する。その結果、身体には、運動以外の生理機能を適切に維持するための十分なエネルギーが残されていない[63, 64]。LEAの影響を調査する研究は、通常、社会心理学的なものや生理学的なもの2つに分類される。アスリートは、ソーシャルメディアからのプレッシャー、コーチ/チームメイト/自分自身からの特定の外見を求めるプレッシャーなどの社会文化的圧力、または体重が少ないほどパフォーマンスが向上するという一般的な信念から、LEAのリスクが高くなる[122-125]。特定のスポーツ美学を達成するために意図的に食事行動を修正することは、LEAの原動力となり得るが、多くのアスリートは、トレーニング量が増加する段階やエネルギー消費量の多いスポーツにおいて、意図せずLEAに陥る可能性がある[113, 114, 126]。意図的であろうとなかろうと、LEAは持久系と筋力系のアスリートにおいて、健康やパフォーマンスに重大な悪影響を及ぼす可能性がある。LEAとRED-Sに関連する健康とパフォーマンスの障害に関する現在の知識のレビューは、他の論文で詳細に議論されている[114, 126, 129, 130]。

栄養感知機能もまた、循環しているエストロゲンの影響を受けやすい。具体的には、視床下部のキスペプチンニューロンの制御と、KISS1遺伝子の発現および放出の代謝制御があげられる。キスペプチンは生殖機能の調節に関わる神経ペプチドで、グルコースホメオスタシス、摂食行動、身体組成の調節にも重要な役割を担っている[131]。ゴナドトロピン放出ホルモン（GnRH）[訳注6]ニューロンのキスペプチンシグナルのダウンレギュレーションの閾値は、男性よりも女性の方が感度が高い[132]。これはおもに弓状核（ARC）[訳注7]と室傍核（AVPV/PeN）[訳注8]におけるニューロンの密度の性差によるものと考えられ、室傍核のニューロンはほぼ女性の脳のみが存在している[133]。エストロゲンは、室傍核におけるKISS1の発現を増加させ、弓状核における発現をダウンレギュレートし、エネルギー摂取量の減少を促す。重要なことは、栄養不足や過剰なエネルギー消費によってエネルギー不足が起こると、KISS1遺伝子がダウンレギュレートされ、その結果、GnRHニューロンが抑制され、生殖軸がダウンレギュレーションされるということである[134, 135]。

運動消費によるエネルギー不足は、脂肪減少を促進する手段として女性よりも男性でより効果的である[136, 137]。これは、運動がエネルギー調整ホルモンや食欲を変化させるという点で、性差があることに起因していると思われる。Hagobianら[57]は、損失を償えないエネルギー不足を伴う中強度の連続運動に対して、自然月経の女性はエネルギー摂取を刺激するアシル化グレリン濃度が高く、インスリン濃度が低いことを証明した。エネルギー不足に対処すると、アシル化グレリンとインスリンのパターンは減衰したが、持続していた。一方男性ではグレリン濃度はエネルギー状態に関係なく、エネルギー不足の状態ではインスリンのわずかな減少とともに変化しなかったし、エネルギーバランスがとれている状態でも変化しなかった[138]。また、追加研究において一相性COCを使用した女性では、中強度の有酸素運動はグレリンとインスリンに同様の影響を与えず、被験者は運動後もエネルギー不足を維持した（すなわち、運動消費量に見合う、あるいはそれを上回るエネルギー摂取量を増やさなかった）[139]。したがって、女性において身体活動に反応してアシル化グレリンが高くなり、インスリン/レプチン濃度が低くなることは、エネルギー不足に対抗して体脂肪貯蔵を保ち、生殖機能を維持するメカニズムであると考えられる。しかし、多くのCOCの主な作用機序が視床下部-下垂体-副腎（HPA）軸の阻害による排卵抑制であることを考慮すると、運動やエネルギー不足に対する視床下部反応は、COCの使用により減弱する可能性がある[114]。したがって、COCを使用しているアスリートにおけるLEAの同定はマスクされる可能性があり、LEAの長期的な影響を治療および/または予防する医師およびアスリートの能力を低下させる。

4.2. LEAの予防と治療に関する推奨事項

試合期にある女子アスリートにとって最適なEAの具体的なガイドラインは確立されていない。しかし、実験室での研究から、エネルギーアベイラビリティの閾値の概念モデルが提案されている[63-65]。少なくとも45kcal/kg FFM/日のEAは、女性アスリートの生理学的機能と体格維持のための最適なEAを確保するための閾値であると考えられる[124]。EAが45kcal/kg FFM/日以上であれば、体重増加や筋肥大に十分なエネルギーが供給される。臨床研究において、30kcal/kg FFM/日のEAは、健康な女性において、わずか5日後に代謝ホルモンの抑制と黄体形成ホルモンの脈動性の低下が観察される閾値であることが立証されている[64, 65, 129, 140, 141]。EA状態の変化を計画的に周期化することは、LEAの負の影響を減衰させ、競技に最適な身体組成と体重あたりのパワーを達成するために有利であると考えられる[142]。シーズンを通して継続的に運動負荷をモニタリングすることは、ストレスとリカバリーの必要性を評価する上でも重要な役割を果たす。なぜなら、高エネルギー消費、高ストレス、そしてカロリーニーズは、プレシーズン（体力が低下しているとき）に生じることが多く、また、遠征や大会の多いブロックに再び生

じることが多いためである[143-145]。さらに、コルチゾール、クレアチンキナーゼ（CK）、性ホルモン、サイトカイン、血液検査項目、栄養素マーカーなどの血液バイオマーカーは、ストレス全般に対する生理的反応を検出し、トレーニング、リカバリー、パフォーマンス成果のバランスを特定するために使用できる [146-149]。更年期前にはエストロゲンとプロゲステロンの比率が変化し、更年期にはエストロゲンとプロゲステロンが消失し、安静時代謝率や身体組成に生物学的影響が及ぶことが知られているため、確立された EA の閾値は、高齢女性の LEA リスク低減には適切ではない場合がある [150]。そのため、栄養素の摂取タイミングに注意しながら、トレーニングのエネルギー消費量とエネルギー摂取量の不一致を減らすことを考慮する必要がある[151]。

EA は（EEE の一部として）トレーニング日間で変化すると考えられ、1 日の EA 値が最適にもかかわらず 24 時間にわたる低エネルギー摂取が健康指標や身体組成の変化に悪影響をおよぼす [62, 152]。月経機能不全の女性は、運動後の栄養摂取が遅れるほど、コルチゾールの上昇、RMR とエストラジオールの減少が大きくなることが研究で証明されている[62]。栄養摂取タイミングは、健康、トレーニング、およびリカバリーの効果を抑制する上で重要な影響を与えることが提案されている[153]。アスリートにおける EA の定量化は困難であり、誤差が大きい可能性があることを指摘することは重要である。EA を決定するためには、アスリートの FFM、EI、運動 EE を正確に測定する必要がある、その際妥当性や信頼性の誤差が生じることは間違いない[150]。さらに、エナジーアベイラビリティの変動を正確に反映させるために、目的を持たない身体活動を含める必要がある。したがって、EA の閾値は、個人のトレーニング負荷、栄養摂取タイミング、リカバリーと適応を確実にするための栄養的な操作がアスリートの栄養戦略上の最重要課題である指針として考慮されるべきである。

4.3. おもな推奨事項

- ホルモンの状態にかかわらず女性アスリートにとって最も重要なことは、個々のトレーニングやパフォーマンスに対する特定の目標や要求を満たす全体的な EA レベルを維持することである。
- 月経周期の黄体期にはエネルギー必要量が増加するため、無月経のアスリートはこの時期に 24 時間のエネルギー摂取量全体を増やすことを考慮すべきである。
- COC の使用は LEA の初期徴候を隠し、さらなる影響を防ぐ機会を減少させる可能性がある。
- 運動に関連した栄養素の摂取タイミングに特に注意を払うことで、計画的なカロリー不足の時でも異化状態にある時間を減らし、その結果、健康、パフォーマンス、トレーニングの適応を改善できるかもしれない。
- トレーニングサイクルのさまざまな時点で、体重と身体組成を最適化するためにエネルギー不足状態にすることが望ましいと認識されているが、女性アスリートおよびコーチは、低栄養密度の神経内分泌反応に及ぼす影響を理解する必要がある。
- トレーニングブロックや競技シーズンをまたいでバイオマーカーをモニタリングすることで、トレーニング、リカバリー、パフォーマンス成果のバランスについてさらなる洞察を得ることができる。

(Translated by Azusa Tazawa)

5. 性ホルモンの影響と基質代謝

基質代謝の調節において、エストロゲンとプロゲステロンが重要な役割を果たすことを証明する確固たるエビデンスが存在する [20, 24, 66, 70, 80, 82, 84, 154-159]。エストロゲン、特に 17 β -エストラジオールは筋と肝臓のグリコーゲンを節約して糖新生の速度を減少させながら、脂肪分解を促進し、脂肪酸の利用能を高める。17 β -エストラジオールは、ミトコンドリア膜の粘性を低下させるが（より流動的な脂質二重層を作り、膜タンパクの動作および機能を促進する）、Miotto ら [14] は、女性の骨格筋には脂肪酸トランスポーターである CD36 が多く存在することを報告している。この性差によって筋収縮時により多くの CD36 タンパクが膜へ移行し、運動中に男性よりも女性で脂質代謝速度が促進することを説明するのに役立つ [160, 161]。さらに、これらはホルモンの作用とは無関係に生じ、運動中における糖質の節約や脂質の酸化を促進させる [155, 162, 163]。

プロゲステロンは、IGF-1 を介した骨格筋へのグルコースの取り込みの感受性を低下させるが、GLUT-4 と GLUT-1 の移行を上方制御することで、胚を支える子宮内膜組織でのグリコーゲン貯蔵を促進する [84]。また、プロゲステロンは、肝グリコーゲン分解を減少させることにより、エストロゲンの糖質節約作用を増強するようである [157]。加えて、プロゲステロンは、特に黄体期のタンパク質代謝にも影響を及ぼし、月経周期の中で黄体期において安静時および運動時のタンパク質酸化が増加するという以前の観察と一致している [81, 164]。この増加は、より高いプロゲステロン濃度（エストロゲン:プロゲステロン比の低下）に起因している。プロゲステロンのおもな作用は、子宮内膜のタンパク質生合成が増加することによって、肝臓による血漿遊離アミノ酸利用を

増強させてタンパク質異化速度を亢進させ、そして血漿アミノ酸濃度は減少し、総尿中窒素排泄量が増加する（アミノ酸尿を伴わない） [157, 165]。

上述したホルモンの影響により、性差や性ホルモン特性（例：月経周期、ホルモン避妊薬の使用）がグルコース動態および正味タンパク質バランスに影響を与えることが実証されており、正常月経である女性アスリートの運動能力やパフォーマンスに影響を与える可能性がある [166, 167]。正常月経である女性では、運動によるエネルギー需要が内因性グルコース産生を促すほど十分に高くなると (> 50% VO₂max)、黄体期では、卵胞期と比較してグルコースの出現・消失速度や総グリコーゲン利用率が低下することが示されている [168-171]。

5.1 糖代謝における性差

全身の糖代謝に関して、一般に、正常月経である女性は男性に比べると、安静時および低～中等度の強度と継続時間の運動中の両方において、相対的に糖質の酸化が少なく、脂質の酸化が多く、ロイシン酸化が少ないことが観察されている [154, 163, 172-174]。女性における最大下運動時のより高い脂質酸化は脂肪組織によるものであるが、安静時の脂肪酸利用が増加するおもな要因は骨格筋によるものである [155]。この性的二形 [訳注 9] は、持久的トレーニングによる一般的な適応変化（筋での糖質利用の低下と脂質酸化の増加）により明らかである。この点において、女性は男性と比較してより多くの脂質を利用し、これは性別特異的なホルモンの影響および持久性運動へのエピジェネティック [訳注 10] な適応に起因するところが大きい [86, 175-177]。さらに、運動に対する応答として、女性は glucose flux [訳注 3] が低いにもかかわらず、男性と同じレベルの血糖値を維持しており [173]、これは女性では男性ほどグルコースクリアランスが増加しないことを示している。

外因性卵巣ホルモンは、内因性ホルモンよりも運動中のグルコース動態に大きな影響をおよぼすようである。混合性経口避妊薬（COC）を最近服用したばかりの女性では、COC 使用前と比較してグルコースの出現・消失の速度が低下することが観察されている [178]。COC の使用と基質利用を調査した研究の結果は、本ポジションスタンドにおける前半のセクションで述べたように、異なるタイプの COC の使用、一相性と三相性との比較、そして COC 配合の違いによって異なる可能性がある。高濃度のホルモンを含む COC は、耐糖能を低下させる可能性があり、特に閉経前の成人女性において、インスリン抵抗性を増強させるというエビデンスがある [179]。さらに、COC を服用している女子オリンピック選手の糖負荷試験では、C 反応性タンパクレベルの増加が観察されており、これは炎症反応の亢進を示唆している [180]。そして、COC を使用している女子アスリートは、生活習慣に関わらず COC を使用していない女子アスリートよりも酸化ストレスが有意に高いことが分かっている [181]。

正常月経である女性アスリートの安静時における筋グリコーゲンは卵胞期に減少する可能性があり [182, 183]、卵胞期中期におけるカーボローディング（8.4～9.0 g/kg 体重/日）は、安静時の筋グリコーゲン濃度を増加させることを示している [184, 185]。一方、黄体期中期に同様のパターンと摂取量を用いたカーボローディングでは、安静時筋グリコーゲン濃度 [182] に変化がなかった、あるいは男性アスリート（18～47%） [185, 187-191] または卵胞期の女性アスリート（17～31%） [184, 185] で一般的に報告されているものと比較してわずかな増加（13%）を示しただけであった [186]。黄体期中期におけるプロゲステロンの増加は、肝臓へのグルコースの往復移動を促進すると同時に、胚を支える子宮内膜組織におけるグリコーゲン貯蔵を促進させる GLUT-4 と GLUT-1 の移行を上方制御すると考えられている [84, 157]。結果として、インスリン感受性の変化や IGF-1 を介したグルコースの取り込みの感度が低下することにより、日常的に 1 日の糖質の摂取レベルを高くしない限り、黄体期中期における骨格筋と肝臓におけるグリコーゲンの超回復を達成することは困難になる可能性がある。月経周期の卵胞期中期における低い筋グリコーゲン貯蔵レベルの低下は、カーボローディングによって克服できるように見えるが、筋内グリコーゲン濃度が高くてタイムトライアルパフォーマンスの向上には結びつかなかった [182, 184]。

COC 使用者の筋グリコーゲン量に対するカーボローディングの影響は、さらに不明である。現時点では、カーボローディングがエチニルエストラジオール濃度やプロゲステロン産生が異なる COC を服用している女性アスリートの筋グリコーゲン濃度にどのような影響を与えるかは明らかではない。これらを考慮するためには、さらなる研究が必要である。

一般的にカーボローディングのために推奨される高用量の糖質摂取量（≥8 g/kg 体重/日）を達成することは、習慣的なエネルギー摂取量が 2000 kcal/日未満の女性にとって困難である [192-194]。なぜなら、この量は体重 60 kg の女性で総エネルギー摂取量の 70～90%以上を糖質として摂取することになるからである。したがって、グルコース動態に対する卵巣ホルモンの影響を考慮し、十分な糖の利用能を確保するためには、すべての女性が持久性運動を開始する 3～4 時間前に、食事または糖を含む軽食を摂取することが推奨される。これは、特に COC 使用者のピルの服薬週間や正常月経である女性の黄体期では、運動

中の糖新生出力に対する性ホルモンの抑制効果が大きくなるため、慎重に行う必要がある [90, 166]。

(Translated by Mizuki Takaragawa)

5.2. おもな推奨事項

- 常に、特に卵胞期（グリコーゲンの蓄積が低下する期間）中や、絶対的なグリコーゲンアベイラビリティがパフォーマンスを制限する可能性がある競技やトレーニングの場面において、正常月経の女性は、パフォーマンスの持続時間、強度、環境要因（暑さ、寒さ、高地など）だけでなく、全体的な健康を維持するために十分な糖質に焦点当てた十分なエネルギーを摂取することに特に注意を払う必要がある。
- COC を使用している女性は、外因性ホルモンに関連した高い酸化ストレスを軽減するために、ピル摂取期間のすべての段階で適切な糖質アベイラビリティを確保する必要もある

5.2.1. 糖質代謝における性差 – 運動中 –

糖質摂取は、血糖値の維持や低血糖の予防、肝グリコーゲンの節約、筋グリコーゲンの枯渇の遅延に役立つため、運動中の糖質アベイラビリティがエルゴジェニック的に働くことはよく知られている[195-198]。しかし、女性はエストロゲンと筋代謝の効果により、顕著な肝グリコーゲンの節約効果とインスリン介在性の貯蔵で糖質の利用が直接的に減少する。そのため、低～中強度運動では間接的に基質利用が脂質にシフトする。さらに、女性ではカテコールアミンの脂肪分解作用の感度が高く、これは（男性と比較して）運動による β 1-（脂肪分解刺激）受容体の上方制御によると考えられている [173,199]。運動中の糖質摂取の推奨量は、運動時間、絶対強度、環境条件（高温、湿度、高度）、および胃腸の耐性によって異なる。しかし、これらのガイドラインはおもに男性のデータから確立され、それが女性にも一般化されているため、女性中心の研究がより必要であるとされている。女性を対象に実施された限られた研究に基づき、女性アスリートが、トレーニング、パフォーマンスやリカバリーに必要な全体的な糖質アベイラビリティを向上させるために、いくつかの推奨事項が存在する。第一に、糖質を多く含む食事（1日のエネルギー摂取量の60%以上）に加え、運動中の糖質摂取により、女性の糖質酸化による総エネルギーの割合が増加し、男性よりもさらに大きな効果があると示されている [200]。この増加は、外因性糖質[訳注 11]酸化の割合が高いことによるものではなく、正常月経女性の運動中の内因性糖質[訳注 12]酸化の減少が小さいことによるものと考えられる [201]。COC を使用している女性は COC を使用していない女性と比較して、外因性糖質による酸化の依存度がわずかに低いと示されている[98, 179, 201]。第二に、女性は男性と比較して、胃排出と腸運動が遅く [202, 203]、運動誘発性胃不全麻痺の発生率が高い [204]。正常月経の女性は、卵胞期初期および黄体期後期では、月経周期の他の段階と比較して、より大きな胃腸障害を経験すると報告されている [205]。第三に、運動中の糖質摂取量は運動特性に応じて調整すべきである。約 1 時間の持続的な高強度運動では、運動前の少量の糖質摂取（～30g） [206]がパフォーマンスを向上させる。糖質のマウスリンスは、男性ではエルゴジェニック的効果があることが示されている[207]が、トレーニングを受けた女性アスリートでは、高強度短時間運動やレジスタンス運動においても、同じようには当てはまらない [208, 209]。男性対象の研究で観察されたとおり、女性でも持続時間の長い（60分以上）スポーツの適切な目標値として、30～60g/時の糖質取を支持するエビデンスがある[210]。しかし、高用量（最大 90g/時）の携帯の糖質混合物が、女性の外因性酸化速度のピークを改善するかどうかは確立されていない[201, 211]。持続的なトレーニングを受けた女性の卵胞期では、糖質を 60g/時摂取した場合に外因性糖質の酸化と内因性糖質の節約が最も大きくなったが、90g/時に増やしてもそれ以上の効果はなかった [212]。最後に、暑熱下での持続的運動中に糖質-電解質飲料を摂取すると、プラセボ飲料と比較して免疫障害が軽減され、月経周期の黄体期ではより顕著であった [213]。さらに、アミノ酸の異化速度は、運動中の糖質摂取により低下するようである。[214]。

5.3. おもな推奨事項。

- 入手可能な限られたデータでは、女性アスリートは自身の月経周期やホルモンの状態を把握し、月経周期全体で胃腸問題が増える時期や、糖質摂取量の上限（60g/時以上）に近い摂取の閾値が消化管耐性にどのような影響をおよぼすかを特定することが重要である。
- 現実的な推奨は、手始めとしてグルコース動態／運動代謝に対する月経周期の影響を相殺するために、運動中に 30～60g/時の範囲で糖質を摂取することである。そうすることで、潜在的な胃腸障害、免疫障害、タンパク異化を抑えることがで

きる。

- 外因性糖質の最大酸化を制限するおもな要因は腸管吸収である。加えて、体循環へ糖質を放出するのに影響する肝臓の限界、運動時のエネルギー需要、腸の健康状態、および糖質摂取に対する耐性など、すべての要素が糖質摂取計画を策定する際に考慮されるべきである。

5.3.1. 糖質代謝における性差 – 運動後 –

運動後の急性リカバリー期において、正常月経の女性は月経周期に関係なく、男性と比較して長時間運動後の血糖値維持能力が高い。これはおもに、女性では運動終了時のグルコース動態（体内での変動）のより即時的な減少が原因であるのに対し、男性では定常的なグルコース恒常性を再構築するのにより多くの時間を必要とするためである[154]。同程度の強度と持続時間での運動において、男性よりも女性は脂質酸化能が高く、リカバリー時の血糖値や glucose flux [訳注 3]制御をより速やかに回復させることを示すエビデンスがある[154, 155]。さらに運動による代謝の乱れは、男性では低～中強度運動を 60～90 分行った後、21 時間経ってもまだ明らかにあるが、女性では 3 時間後には目立たなくなった[155, 172, 215]。

筆者らの知る限り、筋グリコーゲンの再合成に対する月経周期やホルモン避妊薬の影響を検討した研究は限られており、更年期および閉経後の集団では皆無である。この限られたエビデンスでは、適度なトレーニングを受けた正常月経の女性は、黄体期と比較して卵胞期で筋グリコーゲン補充が減少していることから、筋グリコーゲンの再合成に卵巣ホルモンが影響していると示唆されている[216]。男性と比較して、月経周期の卵胞期におけるグリコーゲンの再合成は、グリコーゲン枯渇運動後の急性リカバリー期に 1.2g/kg 体重/日の糖質を摂取した場合も同程度に生じる[195,217]。さらに、卵胞期に 1 週間に 4 回のトレーニングセッションを行った結果、運動後に糖質を 1.2g/kg 体重/日、たんぱく質を 0.1g/kg 体重/日、脂肪を 0.02g/kg 体重/日の割合で補給すると、VO_{2peak}75%での持久性サイクリング中の疲労までの時間が改善された[218]。卵巣ホルモンの影響は運動後の血糖値における性差と比較してわずかなため、更年期および閉経後のアスリートも同様の勧告を守る必要がある。さらに、この期にあるアスリートは、グリコーゲン枯渇が著しい場合、更年期および閉経後に関連するインスリン抵抗性の増加により [219] 運動後 30～40 分続く非インスリン依存性の初動のグリコーゲン合成フェーズを活用すべきである [220]。この点において、グリコーゲンのリカバリーを最大化するためには [221]、他の戦略と同様に、推奨される栄養タイミング [153] をよく考慮する必要がある。

5.4. おもな推奨事項

- 高ボリュームのトレーニングセッションや複数のセッションを行った後、24 時間以内に内因性のグリコーゲン貯蔵物を補充することは、パフォーマンスを最適化する上で極めて重要である。その結果、糖質アベイラビリティを向上させる戦略は、トレーニングの適応や健康の促進に寄与することができる。
- 限られたデータだが、女性アスリートに対して長時間の運動後に少なくとも 1.2 g/kg 体重/日の糖質を迅速に摂取し、消耗した筋グリコーゲンをリカバリーすることを推奨する。
- 更年期および閉経後の女性は、前述のように糖質を迅速に摂取することに焦点を当てるべきであり、栄養摂取のタイミングに密接な注意を払い、グリコーゲンのリカバリーを最大化する必要がある。

(Translated by Kazuma Sahara)

5.5. たんぱく質代謝における性差

骨格筋はアミノ酸 (AA) の主要な貯蔵場所であると考えられており、食事から適切なアミノ酸を供給できないと、毎日のたんぱく質代謝、特に筋タンパク質に反応する身体の問題が生じる可能性がある。必須アミノ酸が少ないときは、骨格筋の分解の割合が増加し、その結果、身体のプロテイン恒常性を保つために必須アミノ酸が放出される。反対に、アミノ酸レベルが高いときは、筋タンパク質合成が増加し、より多くのアミノ酸は筋肉やほかの臓器や組織に取り込まれるようになる。アミノ酸はタンパク質の構成要素で、タンパク質のターンオーバーに重要な役割を果たしているため、筋肉量を維持するために、筋タンパク質の分解 (MPB) と筋タンパク質の合成 (MPS) の割合がバランスよく保たれるように維持することが不可欠である。

簡単にレビューすると、MPS に必要なアミノ酸は 21 個のアミノ酸が必要で、これらのうちの 9 つの必須アミノ酸 (EAA s) は人間の体内で合成できないため、食事から摂取する必要がある。一方で非必須アミノ酸は別の組織でも容易に生成できる。MPS に対するアミノ酸摂取の同化作用は、EAA、特にロイシンに起因し、哺乳類のラパマイシン標的タンパク質 (mTOR) を間接的に

活性する。ロイシンは MPS に必須のシグナル伝達を誘発するが、人の MPS を増加させるにはすべてのアミノ酸が必要であることに注意が必要である[222]。摂食と運動は MPS にとって強力な刺激であるが、摂食誘発性の刺激は一時的なもので、筋タンパク質の増加のみを引き起こすわけではない。主にレジスタンス運動は、MPS を強化する。ただし、運動後のたんぱく質摂取は、MPS の割合と骨格筋肥大の全体的な刺激を最大化するために必要となる[223]。

たんぱく質代謝における性差は、糖質や脂質の代謝と比較して小さいと考えられるが、女性アスリートに関する突っ込んだ研究は不足している。現在、月経周期中やホルモン避妊薬を使用している女性アスリートのたんぱく質必要量に特化した研究はない。正常月経の女性では、エストロゲンとプロゲステロンの濃度が低い卵胞期初期と比較して、エストロゲンとプロゲステロンが高い黄体期では、安静時および有酸素性持久性運動後のタンパク質異化が高いことを示唆する研究がある[81, 164, 223, 224]。さらに、運動中のタンパク質の酸化は黄体期中期でより大きくなり[164, 223]、女性は卵胞期よりも取り込みが低下する黄体期に多くのリジンが必要とし[81]、タンパク質合成のためにアミノ酸を利用する報告がある。COC 使用者の血中アミノ酸組成は非使用者と異なることが示されているが[225]、安静時や運動時のタンパク質代謝の必要性に対する COC の影響はまだ解明されていない。必要量を決定するおもな変数は、避妊薬の処方、特にアンドロゲン作用の違いによるプロゲステロンの生成、そしてこれがトレーニングに対する骨格筋の適応にどのように影響するかである（例えば、第一世代のプロゲステロンはテストステロンに由来し高いアンドロゲン活性を持っている一方で、第三世代のプロゲステロンはアンドロゲン活性が低くなるように改良されている）。また、OC はエストロゲン、プロゲステロン、遊離テストステロンおよびインスリン成長因子-1 (IGF-1) の内因性レベルを低下させるが、コルチゾールを増強させ、これらすべてがトレーニングに対する同化反応の程度に影響を与える [92]。例えば、最近のデータでは、アンドロゲン活性の低いプロゲステロンは、正常月経女性の卵胞期に観察される割合と比較して、安静時および持久性運動 24 時間後における筋原線維タンパク質の FSR (合成速度) を低下させるが、筋原線維タンパク質の分解には影響をおよぼさないことが示されている[226]。追加の研究では、レジスタンストレーニングの適応に対する、2 つの異なる用量の第 3 世代 OC と非使用対照群の効果を比較した。10 週間の監視下では、漸進的なレジスタンストレーニングプログラム中、第 3 世代 OC のエチニルエストラジオール 30 μ g 投与群は、エチニルエストラジオール 20 μ g 投与群および非使用者群と比較して、筋肉量の増加傾向および I 型筋線維面積の有意な増加に関連していたが、トレーニングに関連する筋力の変化は認められなかった。この研究は、エチニルエストラジオールの投与量も、観察される骨格筋の適応に関連して考慮すべき重要な変数である可能性があることを強調している [227]。

運動に対する生理学的適応をサポートするために十分な食事性たんぱく質が重要であることを考慮すると、性差、ホルモン状態、運動の種類、およびトレーニング状態の影響を理解することは、女性アスリートをサポートするために不可欠である。Mercer ら [228]は、有酸素性持久性運動 (1.28~1.63g/kg 体重/日)、レジスタンス運動 (1.49g/kg 体重/日) および間欠性運動 (1.41g/kg 体重/日) において、正常月経のレクリエーション活動および/または競技女子アスリートのたんぱく質摂取の推定平均必要量は同程度であることを示す詳細なレビューを発表し、これらの必要量は現在のスポーツ栄養ガイドライン (1.4~2.0g/kg 体重/日) の中間の範囲内であることを指摘している[229, 230]。さらに、レクリエーションレベルおよび競技者レベルの女性アスリートにおいて有益な適応を得るためには、運動前後に 0.32~0.38g/kg 体重/日のたんぱく質摂取[訳注 13]が推奨されている。男性においても一般的に観察され推奨されているように、高たんぱく質食 (>2.0 g/kg 体重/日) と、激しいレジスタンストレーニングを組み合わせることは、意図的および意図的でないカロリー制限の期間下で、除脂肪体重と安静時エネルギー消費量を維持するために重要であることが示されている[231, 232]。これは、レクリエーションレベルの活動の女性アスリートの間に広まっている[113, 124, 233-236]。もし女性アスリートが骨格筋肥大を望むなら、Bosse と Dixon のレビューによると、集団によっては、このゴールを達成するために、習慣的なたんぱく質摂取量から 60%増加させる必要があるかもしれないと示唆している [237]。高たんぱく質食 (> 2.2g/kg 体重/日) は、健康な女性において、骨密度や腎機能に悪影響をおよぼすことはなかった [238, 239]。

先に述べたように、運動に対する栄養摂取のタイミングは、パフォーマンス、リカバリー、脂質酸化、エネルギー消費に直接影響する[129, 153]。女性アスリートは、様々な理由から特別な食事療法を行ったり [113, 124, 125, 129, 233]、かつ/または絶食状態で運動をすることがある。しかし、特に女性の場合、絶食状態で運動は脂質酸化を鈍らせる可能性があり [240]、一方、摂食状態で運動は、1 日の総エネルギー消費量と脂質酸化を増加させ、身体組成を改善する可能性がある [134, 135]と示されている。最近の分析によると、レジスタンス運動 (9 種類の運動を 70~75%1RM で 4 セット) を 1 回行う 1 時間前に、たんぱく質食 (たんぱく質 18g、糖質 2g、脂肪 1.5g) を摂取すると、糖質食 (たんぱく質 1g、糖質 19g、脂肪 1g) を摂取した場合とは対照的に、たんぱく質食を摂取した場合のエネルギー消費量が有意に増加することが示唆されている [241]。

更年期および閉経後のアスリートは、エストロジールの減少と、身体活動の要求に相まったインスリン抵抗性と無酸素運動のために、推奨値の中間から高い範囲（1.8～2.0g/kg 体重/日）で1日のたんぱく質摂取量を考慮する必要がある[242-244]。高齢女性では、安静時の筋タンパク質合成率は高いが[245]、それでも閉経前後には筋肉量の減少が加速する[246]。これは、閉経後の女性では筋タンパク質合成率が高く、タンパク質分解の上方制御によって相殺される [246] ことが説明できる。閉経前女性と比較して閉経後女性では、筋肉成長調節遺伝子の刺激性および抑制性の両方が上方制御されていることも報告されている[245]。高齢女性の年齢やホルモンが介在する同化感受性の低下を克服する効果的な戦略は、レジスタンス運動と必須アミノ酸摂取の組み合わせである。特に、高齢女性において必須アミノ酸 6～10g の摂取とレジスタンス運動を併用した場合、MPS の割合は 0～2 時間で上昇し、4 時間を通して高い状態を維持した[247, 248]。

(Translated by Hiroko Saito)

5.5.1. 睡眠前のたんぱく質摂取

米国では、成人の少なくとも 30%が 1 日 7 時間未満の睡眠しかとっていないという調査結果が出ている[249]。さらに、多くのエリートアスリートが必要な睡眠時間を下回っており、エリートアスリートのわずか 3%しか、一晩に満足できるほどの十分な睡眠をとれていないと報告されている [250]。さらに、月経がある女性は、月経周期のさまざまな段階を通じて、睡眠不足のリスクがさらに高くなる可能性がある[251]。複数の研究では、月経周期の黄体期に睡眠障害の発生が増加し、睡眠の質が低下することを報告している [252-254]。しかし、すべての研究が同意しているわけではなく、月経周期の各期間で睡眠の質に変化がないと報告しているものもある[255, 256]。しかし、高強度の運動後、特に夜間に睡眠不足になると、リカバリーに悪影響を及ぼし、筋グリコーゲンの補充が損なわれ、筋損傷の修復が低下し、精神疲労の増加と相まって認知機能が低下する可能性がある [257]。

このようなネガティブなアウトカムに対処するため、1 日のエネルギーおよびたんぱく質摂取の必要量を満たし、スポーツによるリカバリー需要をサポートするための睡眠前の栄養を戦略的に操作することを支持するデータが蓄積されている。特に、睡眠前のたんぱく質摂取を検討した研究では、夕方の運動後に摂取すると、夜間の MPS、リカバリーの様々な指標、および筋力とパフォーマンスの縦断的な改善に対する有効性が示されている [258]。近年、Apweiler ら[259]は、健康で活動的な個人において、睡眠前に～40g のカゼインたんぱく質を摂取しても、朝の運動後の機能回復を促進しないことを明らかにした。運動する時間帯が睡眠前摂取戦略の潜在的な有効性に重要な影響を及ぼすことを実証した適切な研究はないが、朝の運動と比較して、夜の運動後に摂取した場合のリカバリーに最も有効であるようだ [258-260]。最近の研究では、睡眠前にたんぱく質を摂取すると、女性では筋肉痛の軽減やリカバリー能力の向上といった有益な反応が得られる可能性があるが、脂肪分解や脂肪酸化には変化がないことが示されている[261]。睡眠前のたんぱく質摂取により、翌朝の安静時代謝量が増加することを支持するデータもあるが、この結果がプラスかマイナスかは不明であり、アスリートの目標に依存する可能性が高い [261]。さらに、等エネルギー・等窒素の高たんぱく食品（カッテージチーズ）を摂取した場合と高たんぱく（カゼイン）の液体混合物を摂取した場合では、朝の安静時代謝率や酸素消費量の増加に違いはない[262]。また、睡眠前にチョコレートミルクを摂取すると、安静時および運動時の糖質酸化が増加することが示されているが、これは女性アスリートにおける翌朝のランニングパフォーマンスの向上には結びつかなかった[261]。チョコレートミルクのエネルギー含有量（355ml、180kcal、30g CHO、12g PRO、0g Fat）は、摂取してから約 8 時間後のパフォーマンスに影響を与えるには低すぎたと思われる。

しかしながら、特に女性アスリートにおいて、睡眠前の栄養が睡眠の量や質に与える影響を検討した研究はほとんどない。10 代の女性における糖質の摂取量の多さと総睡眠時間の減少との間の相関関係を示した研究では、睡眠前に脂質またはたんぱく質を優先させることが、睡眠時間にとってより有益であることを示唆している [263]。しかし、睡眠 4 時間前以降に食品を摂取すること、特に脂質を多く含む食事は、胸やけを誘発し [264]、睡眠導入に悪影響を及ぼす可能性がある。睡眠前の栄養補給は睡眠を妨げるリスクがあるが、食事の量やタイミングだけでなく、主要栄養素の割合を最適化することで、これらの悪影響を減らし、女性のリカバリーとパフォーマンス向上を可能にする可能性がある。

睡眠前のたんぱく質摂取は、一部のアスリートやレクリエーションレベルの活動をする人において好ましい結果をもたらすが、女性アスリートにおいてはまだ解明されていないのが現状である。さらに、アスリートにおいて、睡眠前の栄養摂取と安静時心拍数や心拍変動などのリカバリーに関する内因性のマーカーを追跡したデータはない。これらのデータは、翌日のプレーへの準備と密接に関連しているため興味深いものであると同時に、アスリートが睡眠前の栄養補給を最適化するためのヒントを与えてくれる。さらに、これらのマーカーと月経周期の相に関する知識を組み合わせることで、女性アスリートの栄養推奨のための次の大きな飛躍となる可能性が

ある。

5.6. おもな推奨事項

- 女性アスリートのたんぱく質必要量に対する内因性及び外因性ホルモンの影響については、ごくわずかな研究しか行われていない
- 閉経前の無月経の女性アスリートおよび OC 使用女性アスリートは、運動によるアミノ酸の酸化損失を補充し、筋タンパク質のリモデリングと修復を開始するために、運動後できるだけ速やかに 0.32~0.38g/kg 体重/日の高品質たんぱく質源を摂取することを目指すべきである
- 更年期および閉経後のアスリートは、できるだけ運動終了間際に、同化抵抗性を克服するために、高 EAA (約 6~10g) を含んだたんぱく質食品またはサプリメントの摂取を目指すべきである
- 月経機能のすべての段階にある女性 (閉経前、更年期、閉経後) にとって、1 日のたんぱく質摂取量は、現在のスポーツ栄養ガイドラインの中~上位範囲 (1.8~2.2g/kg 体重/日) に収まるべきである。黄体期にある正常月経のアスリートは、プロゲステロンのタンパク質異化作用の増加を相殺するために、摂取量を 12%程度増やすことを検討すべきである。更年期および閉経後の女性は、スポーツに関係なく、この範囲の上限を目指すべきである。長時間のリカバリー期 (24 時間以上) に筋タンパク質の修復とリモデリングを最大化するために、食事は 3 時間ごとに中程度のたんぱく質 (約 0.3g/kg 体重/日) を摂取する必要がある
- 睡眠前のたんぱく質摂取は、正常なエネルギー摂取状態の女性アスリートにとって特に有益であるとは解明されていないが、低エネルギーアベイラビリティ状態のアスリートは、筋肉痛を軽減しリカバリーを改善するために (睡眠前のたんぱく質摂取が) 有益であると考えられる

(Translated by Shizuka Fukuda)

6. 特別考慮事項

6.1. 電解質の取り扱いと水分補給

月経周期ホルモンは、毛細血管透過性、血管拡張/収縮機能、水分調整に関わるホルモン分泌、血漿浸透圧の変化により身体の水分動態に影響を与える[265]。黄体期の血漿プロゲステロン濃度上昇は、ミネラルコルチコイド受容体をめぐって、プロゲステロンが、アルドステロンと競合することで起こる腎アルドステロン依存性ナトリウム再吸収を阻害する。

エストロゲンとプロゲステロンは共に、神経性・ホルモン性の喉の渇き、水分摂取、食塩欲求、塩分調整に影響を与える。加えて、アルギニンバソプレッシンが合成される視床下部脳室周囲核や〔前視床下部に位置する〕視索上核の細胞自体への刺激や活性には性差があることがわかっている[266, 267]。Stachenfeld らによる 4 つの研究 [48,49,53,268]と Verney らによるもう 1 つの研究 [269]では、エストロゲン関連の喉の渇きを起こす浸透圧性感受性とバソプレッシン分泌の閾値が下がることを実証し、脳における喉の渇きやバソプレッシン分泌に必須である血漿浸透圧の上昇はより小さくても起こることを示した。特にこの変化は OC 使用中に持続する。

さらに、女性は、男性に比べて相対的に運動誘発性脱水が簡単に起こるため、体温調整と心血管系能力に弊害が出るかもしれない。女性の総水分量は平均して男性より少なく (~31L 対~44L) [270]、体格に占める割合 (~49%対 58%) [271] でさえも低い。男性と比べて女性の体水分量は少ないため、運動誘発性脱水で失われる体水分の総量の割合が大きくなることが示唆されている。しかしながら、同様の運動条件下では、血漿量の損失は男女間で同等であるようであり[272, 273]。これは体液のコンパートメント化における性差を表している可能性がある。つまり、男性に比べて細胞外コンパートメントに分布される全身の水分 [274] の割合が低く、全身の水分と血液量が少ない女性は、発汗によって失うことのできる水分の絶対量と相対量が少ないため、水分喪失の生理的結果がより深刻になる [45]。

運動誘発性低ナトリウム血症とは、身体活動中もしくは活動後 24 時間までの血中ナトリウム濃度が臨床的に低下することである。これは、電解質〔主にナトリウム〕の損失や過剰な水分負荷によるものと考えられる[275]。女性は、運動誘発性低ナトリウム血症に対してより大きなリスクを抱えており、この危険性はおもに男性に比べて女性の体重や体格の小ささ、過剰な水分摂取、競技時間の長さに関係している[276]。月経周期の乱れに関連した水分損失の変化を選手が考慮していない場合、月経周期による喉の渇きの変化[277]は、長時間の競技中において、ある時期では他の時期より低ナトリウム血症の危険性を上げる可能

性がある。これらの因子は、女性における低ナトリウム血症の発症により大きく影響する可能性があるが、女性ホルモンによる塩分への別の影響が関連している可能性もある。

6.2. 閉経、加齢、水分補給

閉経に関係なく、加齢は、水分平衡に重要な影響を与える。加齢に伴う、平常時の血漿浸透圧の上昇と、運動中〔や水分枯渇中〕の喉の渇きの感覚の鈍化により、水分の低下〔脱水〕により通常起こる喉の渇きへのメカニズムが障害される[278]。高齢女性は、（閉経前の若い女性に比べて）水分排泄が緩慢で、低ナトリウム血症の危険性が増す[279, 280]。さらに加齢によって腎機能低下や、水分、ナトリウム流動に対するホルモン反応が緩慢になるため、脱水からの回復は遅くなる。エストロゲンを基本としたホルモン補充療法は、平常時の血漿浸透圧の増加、血漿量の拡大、アルギニンバソプレッシン分泌の浸透圧閾値の低下（例えば 280 vs. 285 mOsmol/kg H₂O）を招き、加えて尿量の低下により水分貯留を増やす。しかしながら全体的な水分貯留の増加は、自由水の貯留が増加したことではなく、むしろナトリウム貯留増加によるもので、合成エストロゲンがナトリウム排泄の低下を誘導し[278, 281]、低ナトリウム血症リスクをわずかに減少させる。

(Translated by Nana Matsumoto)

7. サプリメント

女性のサプリメント利用で最も多いのが栄養補助食品である[282]。大学女性アスリートに関する研究によると、半数以上(65.4%)が、一般的な(単独型のビタミン/ミネラルおよびマルチビタミン/ミネラルサプリメント)または非一般的な(ハーブ、植物性、その他動物性の栄養素)スポーツサプリメントを少なくとも月に1回使用している[283]。最近、代表的なスポーツサプリメント[284](β-アラニン、カフェイン、クレアチン、グリセロール、硝酸塩/ビートジュース、重炭酸ナトリウム)の女性アスリートへの摂取量を決定するために標準化された方法で文献の調査が実施されたが、女性アスリート向けのサプリメントの使用と投与量についての見解が不足していることが判明した。栄養補助食品の大部分はおもに男性を対象として評価されるが、次の概要では、生理学的理論と性生理学に基づいて女性に効果的である可能性のある栄養補助食品を紹介する[284]。

β-アラニン

β-アラニン(BA)の科学的根拠は、嫌気性疲労と有酸素疲労の両方の発症を遅らせることによって潜在的なエルゴジェニック効果[訳注 14]を決定し、より長時間および/またはより強度の高いトレーニングセッションを可能にし、より優れた生理学的適応とその後のパフォーマンスの可能性を高める[285, 286]。一方で、女性の筋肉カルノシンレベルは本来低いことが報告されており、女性は男性と比較して、潜在的により大きな効果を得る可能性を示唆している。例えば、Varanoskeら[287]は、レクリエーションに積極的な参加者26人(女性13人)を集め、28日間BA(6g/日)を摂取させた。BAは女性の筋肉カルノシン濃度を高めたが、女性と男性の間で疲労軽減に差は認められなかった。さらに、食事性たんぱく質の摂取量が多く筋肉のカルノシンレベルが高い女性は、カルノシンレベルが低い女性と比較して疲労感を遅らせることができる[288]。現在推奨されているのは、BAの摂取は男女間で差はなく、4週間かけて筋中カルノシン濃度を増加させるために、4~6g/日を少なくとも1~2回に分けて摂取することである[289]。詳細については、ISSN Position Stand Beta Alanine [290]を参照されたい。ただし、サプリメント効果を最適化するために、女性アスリートの特定の投与計画(量、タイミングなど)は、BAの現在の文献で発表されているものを超えて必要になる可能性があり、また、閉経前、更年期、および閉経後の女性全体でも解明する必要がある。

カフェイン

カフェインは最も広く使用されている向精神活性化合物の1つであり、脳内のアデノシン受容体をブロックすることにより、疲労感の軽減や集中力を高める。カフェインの影響に関する完全なレビューはこのポジションスタンドの範囲を超えているため、興味のある読者はISSN Position Stand Caffeine [291]を参照されたい。女性に関してのカフェイン排出に対する月経周期の影響は、黄体期の蓄積が大きく、排泄が遅いことが示されている(ただし半減期に相異はない)[292]。これに加えて、女性に対するカフェインのエルゴジェニック効果[訳注 14]についてエビデンスはまちまちである。例えば、カフェインはレジスタントトレーニングを受けた女性の筋力パフォーマンスを向上させることが示されている[293]。一方、アスリートの1日カフェイン摂取量に相当する量の急性投与を用いない限り、常習的カフェイン使用者においてエルゴジェニック効果[訳注 14]は減少した[294, 295]。さらに、最近の系

統的レビュー[296]は、同じカフェイン摂取量の男性と比較した場合、レジスタンス運動中のカフェインの効果が女性で減少する可能性があることを示した。さらに、カフェイン誘発性興奮効果の一部は、男性よりも女性の方が小規模である[297]。おそらく、カフェインの生理学的応答の状態が、カフェインの効果に大きく関与している可能性があり[298]、効能の発現には体重に対する用量反応関係が必要である[291]。カフェインの摂取、投与量、および/または有効性に対する性差または性ホルモンの影響を判断するには、追加の研究が必要である。

硝酸塩

食品由来の硝酸塩は、スポーツ栄養補助食品として人気が高まっている。無機硝酸塩は多くの食品に含まれており、緑の葉野菜やビートルートに豊富に含まれている。摂取した硝酸塩は、体内で亜硝酸塩に変換され、血中に蓄えられ循環する。酸素の利用可能性が低い状態では、亜硝酸塩は一酸化窒素に変換される可能性があり、これは血管および代謝の制御において多くの重要な役割を果たすことが知られている[299]。食品由来の硝酸塩の摂取は、血漿亜硝酸塩濃度を高め、安静時血圧を下げることを示されている[300]。硝酸塩の摂取は、最大下運動での酸素コストを削減し、男性アスリートにおける運動耐容能とパフォーマンスを向上させる[301]。硝酸塩/ビーツジュースを用いた運動に関する研究では、女性参加者を含む研究や、女性集団に限定して関連する結果を検討した研究はほとんどなく、文献的なギャップが大きい。この点に関して、トレーニングをしていない女性やレクリエーションレベルでトレーニングした女性が硝酸塩の摂取にどのように反応するかを示した証拠は限られている。男性で日常的に観察されるように、訓練を受けていない女性やレクリエーションレベルのトレーニングを受けている女性でも、最大下運動により酸素コストは減少する[302, 303]。あるいは、Wickhamら[304]は、レクリエーショントレーニングを受けたCOC使用者における単回および持続的サプリメント摂取の効果を調査し、単回および持続的サプリメント摂取条件の両方で血漿 $[\text{NO}_3^-]$ および $[\text{NO}_2^-]$ が増加したにもかかわらず、最大以下のサイクリング VO_2 またはタイムトライアルのパフォーマンスに影響をおよぼさないことを発見した。閉経後の女性は、男性や若い女性と比較して、内因性一酸化窒素のバイオアベイラビリティ（生物学的利用能）が低下した特殊な集団である。最近、Proctorらは、二重盲検無作為化デザインを使用して13人の閉経後の女性の握力と筋出力を調査し、 NO_3^- 補給が筋出力を強化し、疲労までの時間を延長することを発見した[305]。この研究は、閉経後女性における NO_3^- 摂取の潜在的な有効性を強調しているが、今後、トレーニングを積んだ女性を対象に、ホルモンの状態（自然周期およびOC周期の位相、更年期、閉経後）をコントロールした研究を実施し、食事による NO_3^- 補給が運動およびパフォーマンスの指標に及ぼす影響を明らかにすべきである。

クレアチン

女性に対するクレアチン摂取の利点を支持するエビデンスは増え続けており、筋力、筋肥大、パフォーマンス、エネルギー的および認知的成果に関連する肯定的な有益性が報告されている[306]。男性と比較して、女性は内因性の筋肉内クレアチン貯蔵が70~80%低く、食事によるクレアチンの摂取量もかなり少ない[307]にも関わらず、筋肉内クレアチン濃度の安静時レベルが高い(~10%)と報告され[308]、高用量の摂取がより効果的である可能性が示唆されている[309]。さらに、クレアチンキナーゼの変動は、月経周期全体のエストロゲンの周期的なパターンと一致することも示されている[310, 311]。筋タンパク質の動態、成長因子、衛星細胞、筋原性転写因子、グリコーゲンとカルシウムの調節、酸化ストレス、および炎症に関して、クレアチン摂取のメカニズム的なサポートを得るためには、黄体期での摂取がより効果的である可能性があることが示唆されている[312, 313]。しかし、この考え方をさらに探求するには、独自の調査が必要である。加えて、ホルモン避妊薬のパターンとクレアチンキナーゼとの関係を調査した研究はない。短期および長期のクレアチン摂取は、プラセボ対照と比較して、トレーニングを受けた女性集団とトレーニングを受けていない女性集団の筋力、筋肥大、および運動パフォーマンスにおいて有意に有益なエルゴジェニックな成果を示した[313, 314]。現在、男性および女性について一貫した推奨用量が示されている。この点に関して、クレアチンの摂取は、通常、1日あたり~20gの負荷量を5日間摂取し(4時間ごとに5gを4回摂取)、その後1日あたり3~5gを摂取するというパターンに従っている[306]。クレアチンの機構的/生理学的効果に関する完全なレビューについては、ISSN Position Stand Creatine [315]を参照されたい。

鉄

鉄欠乏性貧血と鉄欠乏症は、男性と比較して女性アスリートで5~7倍多くみられる[316]。これらの有病率は、性差

[317]、不十分な食事摂取、運動による鉄の損失、鉄調節の月経周期の乱れ[38, 318, 319]と関連している。卵胞期初期（0～5 日目）には、エストロゲンおよびプロゲステロンホルモン濃度が低下し、鉄調節ホルモン活性が低下するため、鉄吸収および再利用が促進される可能性がある [38]。卵胞期後期(6～14 日目)では、エストロゲンの緩やかな上昇によりヘプシジン活性が低く維持され、月経後の数日間の鉄吸収と再利用が可能になる[320]。排卵時には、エストロゲンとテストステロンがピークに達し、鉄の取り込みと赤血球生成の増加に関連する[321]。排卵後、プロゲステロンの増加によりヘプシジン発現が増加し、鉄利用を制限する[322]。月経前の炎症マーカーの増加[1, 38]はヘプシジン活性を悪化させ、鉄利用のさらなる制限を引き起こす可能性がある。以前の研究結果は、排卵後にヘプシジン、血清鉄、トランスフェリン飽和度がリバウンドし、黄体期に安定することを示している [320]。したがって、正常月経の女性アスリートにおける鉄補給は、黄体期よりも卵胞期でより効果的である可能性があるが、生理周期に基づいた補給を解明するには追加の研究が必要である[323]。ホルモン避妊薬の使用は鉄欠乏症を防ぐ効果があるため [324]、経口避妊薬の使用が医師のアドバイスなしに鉄サプリメントを補給することは推奨されない。さらに、閉経後の女性では、運動後の基本的なヘプシジンレベルの回復が最大 24 時間遅くなることが観察されている[325]。したがって、鉄欠乏症を示す閉経後の女性における鉄補給のタイミングを計画することにより、この集団における鉄の恒常性が高まる可能性がある。

8. まとめ

栄養、スポーツ、運動科学の研究において女性の占める割合は低いものの、性差と性ホルモンが女性アスリートの健康、パフォーマンス、リカバリーを最大化するための栄養の要件にどのように影響するかを明らかにするエビデンスは蓄積され続けている。女性アスリートの特異的なホルモンプロフィールに二次的に生じる幅広い個人内差が知られているため、閉経前の女性では、月経周期およびホルモン避妊薬の使用を注意深く追跡することが推奨される。さらに、更年期から閉経後の状態に移行する可能性のある女性アスリートについては、その独特のパターンをよく理解するために注意を払う必要があり、これにより、栄養戦略への個別化アプローチに関する洞察および客観的データを得ることができる。全体的なエネルギー状態に特に注意を払うことが、運動トレーニングの積極的な適応、最適なパフォーマンスの促進、および健康上の成果を促進する最大の推進力となる。そこから、代謝に対する性ホルモンの影響に関して重要な考察がなされるべきである。女性を対象としたパフォーマンス、身体組成操作、およびサプリメント摂取のための栄養戦略を評価する研究は、文献全体を通じて広く欠如している。このポジションスタンドがこれらの重要な分野の多くに光を当て、これらの結果に関わるすべての研究に、より多くの女性を組み入れるよう、将来の科学的調査の動機付けとなることを願っている。

(Translated by Tomohito Otsu)

情報開示

著者による潜在的な利益相反は報告されていない。

資金提供

本論文で取り上げた研究に関連する資金提供はないことを報告した。

訳注

訳注 1

Progestogen プロゲストゲン

黄体ホルモンの総称

訳注 2

Progesterone プロゲステロン

人体によって合成される主要な黄体ホルモン（内因性ホルモン）である。

訳注 3

glucose flux グルコースフラックス

単位時間内に単位面積を通して輸送される物質やエネルギーなどの量を表しており、本翻訳では体内グルコースの輸送量のことを指す。

訳注 4

Progestin プロゲスチン

黄体ホルモン的一种。合成ホルモン（人工的に作られたホルモン）である。おもに避妊用ピルや子宮内膜症の治療、ホルモン療法に使用される。

訳注 5

first-pass metabolism ファースト-パスメタボリズム

初回通過代謝のこと。経口投与された薬剤は、腸管から吸収され、肝一門脈系（hepatic-portal system）に入り、肝臓を通過してから、全身循環に入る。このとき多くの薬剤は肝臓内で代謝され、その結果、全身に分布される薬剤量は減少する。このような肝臓通過による効果は first pass effect（第一通過効果）、first pass metabolism（第一通過代謝）、presystemic metabolism（全身循環以前の代謝）などと呼ばれている。投与方法が経口ではなく、経腔、静脈内、筋注、舌下、エアソールによる吸入などの場合には、肝門脈系を介さないため、first pass effect 発生しない。薬剤に対する first pass effect に影響を与えるのは、消化管腔の状態、消化管壁内酵素、消化管内細菌酵素、肝酵素などである（矢沢瑛二郎. (2011). 連載 Estrogen Series・92 エストロゲンの経口投与 vs 経皮投与: First pass effect について. 臨床婦人科産科, 65(2), 173-173.)

訳注 6

gonadotropin-releasing hormone (GnRH) ゴナドトロピン放出ホルモン (GnRH)

視床下部ニューロンの細胞体で産生され外的・内的環境の変化に応じて正中隆起の軸索終末から下垂体門脈血中に分泌されて下垂体からのゴナドトロピン放出を促進する「脳下垂体刺激ホルモン」

訳注 7

kisspeptin^{ARC} 弓状核

室傍核と弓状核は、脳の視床下部にある神経核の一部である。室傍核は、オキシトシンを産生する神経核であり、視床下部の前部に位置する。一方、弓状核は、下垂体前葉ホルモン調節因子を分泌する漏斗核であり、視床下部の弓状部に位置する。

訳注 8

kisspeptin^{AVPV/PeN} 室傍核

間脳の視床下部を構成する神経核の 1 つである。視床を構成する視床垂核群の一つである視床室傍核

訳注 9

sexual dimorphism 性的二形

雄雌（男女）がわかれている動物において、主として生殖器以外の外的形態が性別によって異なる現象のこと。例えばヒトでは、体の大きさ、筋量、脂肪量、体毛などがあげられる。

訳注 10

epigenetic エピジェネティック

DNA 塩基配列の変化を伴わずに遺伝子発現を調節・維持する仕組みを「エピジェネティクス」といい、エピジェネティックな変化には、DNA を構成するシトシンのメチル化や細胞核内の構造タンパクであるヒストンの化学修飾（アセチル化やメチル化など）があげられる。

訳注 11

exogenous carbohydrate 外因性糖質

運動のために補給される糖質のこと。運動前に摂取されたエネルギーゼリーや運動中に摂取されたエナジージェルに含まれる糖質などのことを指す。

訳注 12

endogenous CHO 内因性糖質

体内に蓄積された糖質のこと。すなわち、筋グリコーゲン、肝グリコーゲンのこと。

訳注 13

運動前後に 0.32~0.38g/kg のたんぱく質摂取

英論文（原文）では、Moreover, pre- and post-exercise protein intakes of 0.32–0.38 g·kg⁻¹ are recommended for beneficial adaptations in recreational and competitive female athletes.となっており、運動の前と運動の後に書かれている。一般的に、運動後のたんぱく質摂取が推奨されることが多いが、複数の文献で「運動に近いタイミングでたんぱく質を摂取すること」が筋合成や筋適応に有効という報告するものもある。そのため、ここではそういった意味を含むものと解釈する必要がある。

訳注 14

erogenicity エロジェンシテイ

おそらくオリジナルの誤表記。前後の文章の内容から、正しくは ergogenicity（エルゴジェニックエイドとしての効果）と記述されるのが適切と考えられる。本翻訳では「エルゴジェニック効果」とした。