

依頼総説

時間栄養学と運動・スポーツパフォーマンス

高橋 将記*1、金 鉉基*2

*1 東京工業大学リベラルアーツ研究教育院

*2 早稲田大学先進理工学部

本稿では、体内時計と栄養・食生活の相互作用（時間栄養学）に着目し、運動・スポーツパフォーマンスの向上に時間栄養学が活用できる可能性について概説する。まず体内時計と生体リズムについては、概日リズムを中心とした特徴を紹介し、体内時計の主観的および客観的評価法について述べる。次に、時間栄養学の2つの側面（体内時計作用栄養学と時間栄養学）について、これまでに報告されている機能性食品や飲料の知見を中心に紹介する。特に我々は、食後代謝を中心に検討を重ねており、朝食と夕食時における代謝応答や制御機構、またカテキン飲料や食物繊維を用いた介入試験からの知見を紹介する。近年では、時間栄養学と同様に運動・スポーツと体内時計の相互作用（時間運動学）に関する知見も示されており、体内時計に作用する運動条件あるいは運動時代謝を高める1日の運動実施タイミングについて報告する。最後に、これまでの体内時計のエビデンスがどのようにスポーツ現場で活用できるかについて運動パフォーマンスの日内変動や朝型・夜型といったクロノタイプに基づく知見から概説した。時間栄養学的視点に基づくスポーツ現場からの報告は十分ではないものの、ヒトレベルでの時間栄養学のエビデンスが蓄積されつつある今、今後のスポーツ現場における時間栄養学の活用が大いに期待される。

キーワード：体内時計 生体リズム 時間栄養学 個人差

I はじめに

体内時計は、生体内に一定の周期（生体リズム）をもたらし、体温、血圧、消化・吸収・代謝、内分泌機能などの様々な生理学的機能を調節している^{1), 2)}。様々な時間単位（年、月、日、時間、分、秒、ミリ秒単位）で起こる周期現象の中でも、約24時間周期で変動する概日リズム（サーカディアンリズム）は、多くの生理学的機能との関連が明らかにされている。また2017年に「体内時計の分子メカニズム解明」にノーベル生理学・医学賞が授与され、応用研究領域でも体内時計が注目されている。

近年、体内時計と栄養学の相互作用を考える時間栄養学（Chrono-nutrition）が提唱され、細胞、動物、ヒト試験と体系的な検証が進められている。時間栄養学は、栄養・食生活により体内時計を調節する側面（体内時計作用栄養学）と体内時計に合わせて栄養・食生活を考える側面（時間栄養学）に大別される。国内では、2020年に日本時間栄養学会が発足し、国内外の関連学会のシンポジウム開催や学術誌による特集なども多く見られるようになった。本稿では、体内時計・時間栄養学の概説とともに時間栄養学のスポーツ現場に

における応用の可能性について紹介したい。また本稿においては、ヒトの研究を中心として紹介するため、細胞・動物試験などを中心とした基礎研究や作用機序に関する研究はその他の論文・総説等をご参照いただければ幸いである。

II 体内時計と生体リズム

体内時計は、脳の視交叉上核（Suprachiasmatic nucleus: SCN）にある中枢時計と肝臓、小腸、筋肉などの末梢組織に存在する末梢時計がある。中枢時計は、網膜からの光情報から体内時計を24時間に同調し、末梢時計の制御を担っている。ヒトは、日中の活動期に体温、血圧、心拍数などが上昇し、夜に低下する。夜は睡眠ホルモンともよばれるメラトニンが体温を低下させ、睡眠・覚醒サイクルを調節する。睡眠中には成長ホルモンが上昇し、起床時にはコルチゾールが上昇することも代表的な概日リズムである。その他には、平日と休日の週単位で生じる生体リズム、月経周期などの月単位で生じる生体リズム、さらには季節により生じる年単位の生体リズムがあり、体内時計研究を実施する上では、概日リズムに関する研究におい

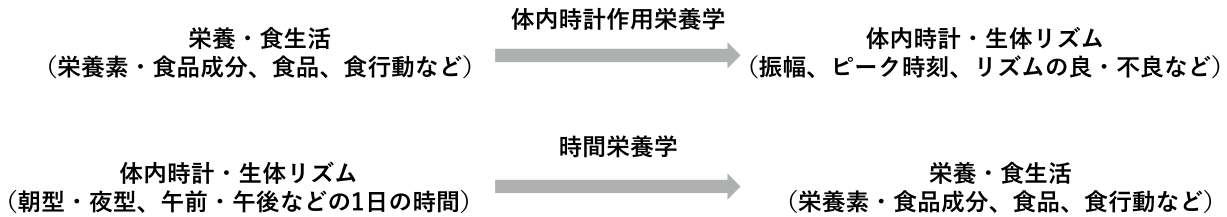


図1 時間栄養学の概念図 (著者作図)

でも週単位、週や月単位の生体リズムを考慮する必要がある。その他の体内時計研究の難しい点として、個々人の体内時計や生体リズムの評価が挙げられる。

体内時計や生体リズムの評価には、日々の就寝・起床時刻の記録、朝型・夜型質問紙、社会的時差ボケなどの質問紙調査、体温や血圧などの生理学的評価、生体試料(血液、唾液、毛包細胞など)からの生物学的評価がある。朝型・夜型質問紙は、個々人がもつ時間的なタイミング、いわゆるクロノタイプを評価するものである³⁾。

次に、社会的時差ボケは、個々人が有する生体リズムと社会環境下における生活リズムの不一致のことである⁴⁾。多くの人が、学校や仕事といった社会的な制約の中で本来、自分が有する生活リズムとは異なる生活を送っている。実際に、皆さんの中でも平日は学校や仕事で早起きをするが、週末や休日には就寝・起床時間の遅れに伴い生活リズムが全体的に後退するといった経験があるのではないだろうか。結果的に、週明けあるいは休み明けに、眠気や倦怠感を強く感じてしまい、学業や仕事のパフォーマンスにも影響を及ぼす。これが社会的時差ボケの代表的な例であり、週間的あるいは平日・休日といった枠組みでの生体リズムの評価として用いられる。

続いて、生体あるいは生物学的試料を用いた体内時計・生体リズムについて紹介する。中枢時計の評価として用いられる体温の経時的な評価、光刺激の影響を除いたメラトニン評価などがあるが、実験室ベースの研究では可能なものの現場ベースの活用は難しい^{5), 6)}。末梢時計の評価として、血液、唾液、毛包細胞を用いた時計遺伝子発現の評価なども経時的な評価を必要とし、採取後の評価も専門的技術が必要となる。我々は、毛包細胞を用いた時計遺伝子発現により体内時計や生体リズムの評価を行ってきており、経時的な時計遺伝子発現リズムから振幅(最大値-最小値:メリハリ)、ピーク時刻、生体リズムの良・不良を評価している^{7), 8)}。これらの生物学的試料を用いた体内時計評価系の妥当性の観点から有用であるが、侵襲性や測定系の観点からは課題も多い。一方で、現在では、血糖値、心拍数、活動量など連続的なデータを簡易かつ低侵襲で評価できるデバイスが多数開発されており、体内時計評価のみならずスポーツ現場でも十

分活用できると考えられる。我々のグループでも、持続血糖モニター(Continuous Glucose Monitoring (CGM))は頻繁に活用しており、1日を通した血糖値管理や間食実験などから時間栄養学的側面も報告している^{9), 10)}。従って、CGM、加速度計、センサー技術を用いた心拍変動ならびに携帯のアプリケーションからのデータを生体リズムとして評価し、時間栄養学やスポーツ栄養に応用することは可能である。

III 時間栄養学

我々は、体内時計と栄養・食生活の相互作用(時間栄養学)を検討するときに大きく二つの側面から考えている。一つは、体内時計に影響を及ぼす栄養・食生活を考える体内時計作用栄養学的側面、二つ目に体内時計に合わせた栄養・食生活を考える時間栄養学的側面である(図1)。前者の代表的な食品成分としてカフェインが挙げられる。カフェインは、朝に摂取しても体内時計への影響は少ないが、夕方や夜に摂取すると体内時計を後退させることがマウスおよびヒト試験で報告されている^{11), 12)}。また柑橘類に含まれるノビレチン、緑茶に含まれるエピガロカテキンガレート(EGCG)も体内時計への作用を介して肥満予防に寄与する可能性が示されている^{13), 14)}。さらに、魚に含まれるDHA/EPAはインスリン系を介した体内時計への作用が報告されている¹⁵⁾。今後、機能性食品・飲料の体内時計への作用がヒトレベルで明らかにされることが望まれる。

次に時間栄養学的側面について、我々は代謝面に着目し、いくつかの検討を行っており、まずこれらの知見について紹介する。食後血糖値は、同じ食事を取っても朝食と比較して夕食時に高いことが明らかになっている^{16), 17)}。これらのメカニズムとしては、インスリン機能が夕方に向け低下すること、小腸におけるグルコーストランスポーターの日内変動の影響が考えられる。また我々は、朝食と夕食時のヒトの血中代謝産物を網羅的に比較し、解糖系、TCAサイクル、アミノ酸代謝に関わる代謝産物の多くが朝食時に高いことを明らかにしている¹⁷⁾。これらの結果から朝食と夕食時の食後血糖値上昇の違いは、内分泌系、消化・吸収系ならびに代謝系機能が相互に作用し引き起こされている

ると考えられる。さらに、我々はカテキン飲料を用いて、朝食と夕食時における食後血糖値抑制作用を比較した結果、夕食時に血糖値抑制作用が高いことを明らかにしており、同様の結果は食物繊維を多く含む菊芋を用いた研究でも示されている^{10), 18), 19)}。従って、機能性食品・飲料の摂取タイミングを考慮することにより、特定の時間あるいは1日の代謝動態を制御できる可能性があると考えられる。近年では食事摂取時刻を制限する時間制限食 (Time-Restricted Feeding: TRF) が、体内時計の同調や疾患予防に効果的であることが示されている²⁰⁾。Suttonらは、1) 午前8時から午後2時までの6時間制限食 (TRF群) と2) 12時間制限食 (コントロール群) を5週間の介入試験で比較し、TRF群において耐糖能、酸化ストレスなど疾患に関わる因子が改善することを明らかにしている²¹⁾。これらの成果を日常生活へ応用できるか否かは今後の課題であるが、1日の食事摂取時間を制限する、また絶食時間を長く保つことが生体における様々な生理機能の制御に効果的であるといえる。

IV 時間運動学

時間栄養学と同様に、体内時計と運動・スポーツとの相互作用を考える時間運動学も知見が蓄積されている。まず、体内時計作用運動学の側面から考えると、高強度運動が体内時計に影響を及ぼすことが明らかになっている。マウスを用いた先行研究で、自発性運動と強制的に運動をさせた条件を比較した結果、両条件で体内時計を前進させたが、その影響は強制的な運動条件で高かった²²⁾。この要因として、強制的な運動条件でストレスとも関連するグルココルチコイドやノルアドレナリン分泌が高かったことが挙げられる。また興味深いことに、末梢時計の中でも運動により影響を受けやすいのは肝臓や腎臓よりも肺や骨格筋であることが示唆されており、組織特異性があると考えられる。次に、運動タイミングに着目してみると、マウス・ヒトともに運動実施タイミングにより体内時計に及ぼす影響が異なることが明らかにされている。例えば、マウスの朝 (活動期の始め) に運動すると体内時計を前進させ、マウスの夜 (活動期の終わりごろ) に運動をすると体内時計を後退させることが明らかにされている²³⁾。またヒトにおいても、朝の運動は時計遺伝子発現リズムを前進させ、夜の運動は後退させることが示されている²⁴⁾。従って、夜や就寝前の運動は体内時計を後退させ、入眠を妨げる可能性があるので注意を要する。

次に、時間運動学的側面について概説する。世界保健機構 (World Health Organization; WHO) ならびにアメリカスポーツ医学会 (The American College of Sports Medicine; ACSM) などのガイドラインで

は、運動の種類、量、実施頻度などに関する内容は含まれているものの、運動実施タイミングに関する言及はない²⁵⁾。一方で、近年では運動時の代謝やホルモン応答が、1日の運動実施タイミングで異なることが示されている。我々は、朝と夕方で一過性運動の脂質代謝に及ぼす影響を検討し、朝の一過性運動時と比較して夕方の一過性運動時においてアドレナリン、ノルアドレナリンなどの脂質分解ホルモン、コルチゾールなどのストレスホルモン、脂質分解の指標として遊離脂肪酸が高くなることを報告している²⁶⁾。一方で、両試行間に脂質酸化量の違いは認められていない。また別の先行研究では、朝食前の運動が、午前、午後、夕食後の運動条件と比較して1日を通じた脂質酸化量を高めることを明らかにしている^{27), 28)}。これらの異なる研究結果は、運動前の食事の有無や絶食時間の違いにより肝臓や筋グリコーゲンからの脂質動員が代謝動態に異なる影響を及ぼした可能性がある。今後、様々な実験条件での検討や定期的なトレーニング効果や適応の差異を検証していく必要がある。

V 時間栄養学のスポーツ現場への応用

スポーツ現場での代表的な生体リズムの乱れに、時差ボケが挙げられる。時差ボケが運動・スポーツパフォーマンスに影響することは多くの報告がある。メジャーリーグで東方移動 (西側のチームが東側に移動) して行う試合では、成績が悪くなることが明らかにされている^{29), 30)}。一方で、西方移動では、その影響は少ない。これは、体内時計を遅らせることへの適応は比較的容易であるが、早めることへの適応は困難であることを示唆している。これらの影響は、移動後4~5日間は影響するとされており、逆に回復にも同程度の日数を要することが明らかにされている。実際に、飛行機のパイロットを対象に8時間の東方飛行後における体内時計の回復を検証した研究では、1日あたり1時間程度の体内時計の変動が観察されている³¹⁾。従って、アスリートの時差ぼけ解消には、移動先との時差を勘案し、適応のための日数を決定する必要があると考えられる。

体内時計とスポーツの関係を考えるときに重要となるのは、スポーツパフォーマンスの日内リズムである。一般的に、スポーツパフォーマンスは、体温の日内リズムと関連して、夕方に最大となることが報告されている³²⁾。運動時の酸素摂取量や心拍数は夕方に低く、主観的運動強度も夕方に低いことが示されている³³⁾。これらの結果は、朝と比較して夕方に一過性運動時の疲労感を感じにくいことが示唆される。トレーニング科学的な視点からは、ヒトにおける朝と夕方のトレーニング効果を比較した研究があり、朝にトレーニングを行った群では朝のパフォーマンスが改善し、

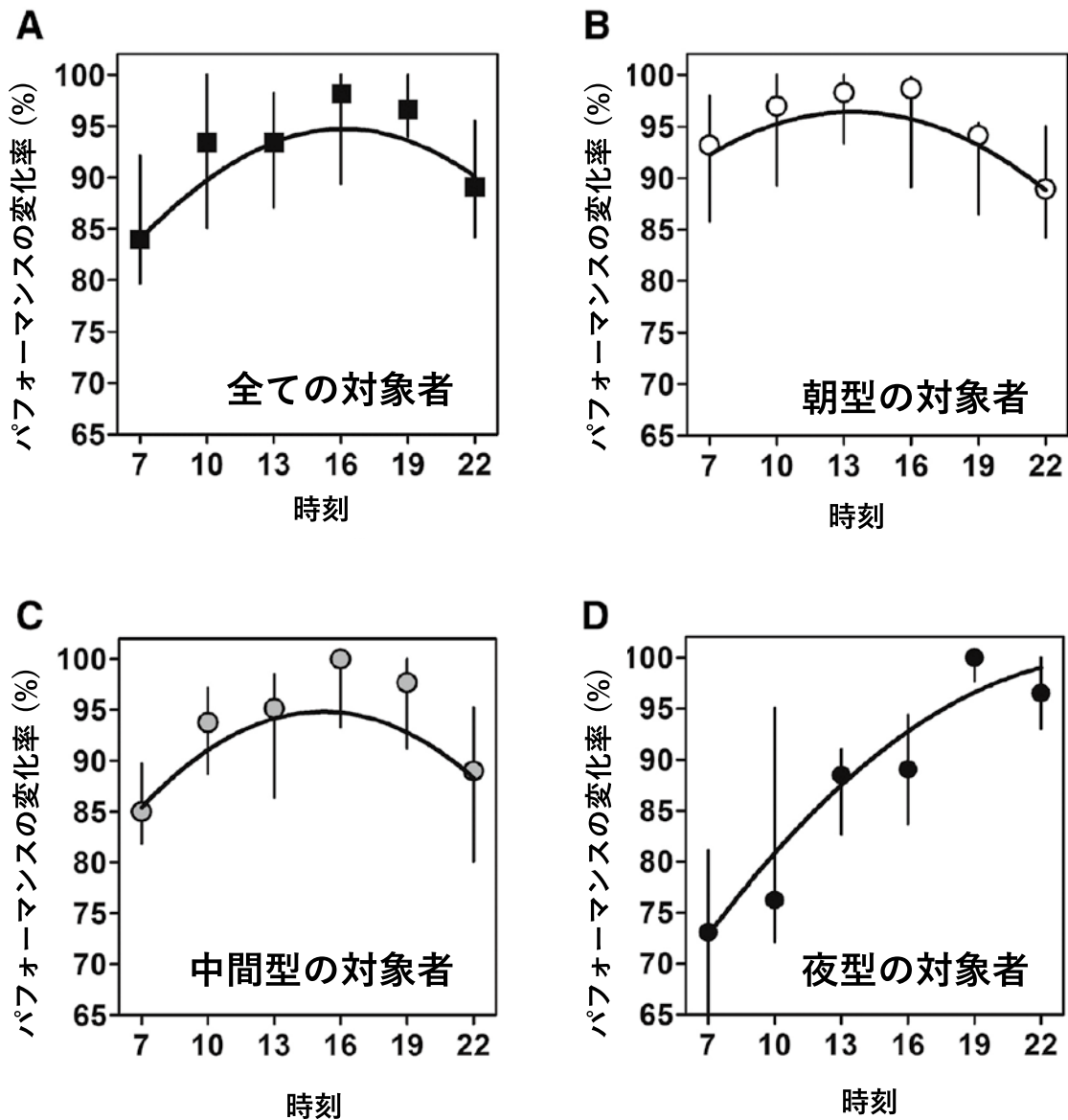


図2 ヒトの運動パフォーマンスは、1日の運動実施時刻で異なり、クロノタイプでも異なる (文献35より引用)

夕方トレーニングを行ったものでは夕方のパフォーマンスが改善することが報告されている³⁴⁾。従って、競技日程、試合時刻に合わせたトレーニングの実施も効果的である可能性がある。

次に、朝型・夜型とスポーツパフォーマンスとの関連を紹介する (図2)。Facer-Childsらの研究では、朝型、中間型、夜型の被験者を対象に、7、10、13、16、19、22時にパフォーマンステストを行い、日内変動をクロノタイプ別に比較している。朝型・中間型の被験者における日内変動が15%程度であったのに対し、夜型の被験者では1日の中でパフォーマンスレベルが26%異なることを報告している³⁵⁾。特に夜型の被験者では、朝のパフォーマンスレベルが低く、夜に高

いという特徴があった。また水泳競技においても、クロノタイプ特異的なパフォーマンスの日内変動がみられることが示されている³⁶⁾。さらにチームパフォーマンスの知見もあり、チームの朝型・中間型・夜型の構成割合からチームのピークパフォーマンスを予測した結果、チームに所属するメンバーのクロノタイプによりピークパフォーマンスが異なることが明らかにされている³⁷⁾。よって、個々人あるいはチームのクロノタイプを考慮することにより、パフォーマンスレベルを改善できる可能性がある。

では、最後にどのように時間栄養学をスポーツ現場に活動できうるかを考える。すでに体内時計を動かす栄養・運動、あるいは体内時計に合わせた栄養・運動

の知見については、ヒトレベルで多く蓄積されつつある。従って、指導者あるいは競技者の目的に合わせた体内時計や時間栄養学の活用は可能と考える。例えば、試合や競技時刻に体内時計を後退させたい場合は、カフェインや夜食を用いる。あるいは、絶食時間が長いほど体内時計や生体調節に及ぼす影響が強いことから、絶食時間を効果的に活用し、エネルギー代謝を最適化するなどが実例として挙げられる。しかしながら、他の食事介入法と同様にトレーニング時に十分効果を確認する必要があると考えられる。我々の実験・介入研究においても様々な機能性食品・飲料は、効果があるヒト（レスポnder）と効果がないヒト（ノンレスポnder）が存在する。すでに個人差の重要性は、十分理解されているが、本稿のテーマである時間栄養学のスポーツ現場への応用についてもエビデンスに基づく活用と実証を組み合わせた活用が望ましい。

VI おわりに

本稿では、体内時計や時間栄養学の知見をどのようにスポーツ現場に活用できるかについて概説した。時間栄養学のエビデンスが蓄積されつつある今、スポーツ現場の選手、指導者が活用できる様々なツールはあり、現場での活用を試みる場合には、トレーニング期に十分な検討をしてから活用が望ましい。また、今回は運動・スポーツパフォーマンスの向上に活かせる内容を中心に紹介した。肥満や糖尿病予防が主目的の場合には、異なる時間栄養学活用法があることから対象者や目的により変更する必要があるだろう。今後も時間栄養学の知見がスポーツ現場で蓄積され、アスリートを対象とした時間栄養学活用に関するガイドライン作成につながることを期待している。

謝辞

研究活動にご協力頂きました関係者の皆様に感謝申し上げます。

利益相反

本総説に関して申告すべき利益相反はない。

文献

- 1) King, D.P., Zhao, Y., Sangoram, A.M., et al.: Positional cloning of the mouse circadian clock gene. *Cell.*, 89, 641-653 (1997)
- 2) Tahara, Y., Shibata, S., Entrainment of the mouse circadian clock: Effects of stress, exercise, and nutrition. *Free. Radic. Biol. Med.*, 119, 129-138 (2018)
- 3) Horne, J.A., Ostberg, O.A.: self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int. J. Chronobiol.*, 4, 97-110 (1976)
- 4) Wittmann, M., Dinich, J., Mellow, M., et al.: Social jetlag: misalignment of biological and social time. *Chronobiol. Int.*, 23, 497-509 (2006)
- 5) Yamanaka, Y., Hashimoto, S., Tanahashi, Y., et al.: Physical exercise accelerates reentrainment of human sleep-wake cycle but not of plasma melatonin rhythm to 8-h phase-advanced sleep schedule. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 298, R681-691 (2010)
- 6) Fukuda, T., Haraguchi, A., Takahashi, M., et al.: A randomized, double-blind and placebo-controlled crossover trial on the effect of l-ornithine ingestion on the human circadian clock. *Chronobiol. Int.*, 35, 1445-1455 (2018)
- 7) Takahashi, M., Tahara, Y., Tsubosaka, M., et al.: Chronotype and social jetlag influence human circadian clock gene expression. *Sci. Rep.*, 8, 10152 (2018)
- 8) Takahashi, M., Haraguchi, A., Tahara, Y., et al.: Positive association between physical activity and PER3 expression in older adults. *Sci. Rep.*, 7, 39771 (2017)
- 9) Kim, H.K., Nanba, T., Ozaki, M., et al.: Effect of the Intake of a Snack Containing Dietary Fiber on Postprandial Glucose Levels. *Foods.*, 9, 1500 (2020)
- 10) Kim, H.K., Chijiki, H., Nanba, T., et al.: Ingestion of Helianthus tuberosus at Breakfast Rather Than at Dinner Is More Effective for Suppressing Glucose Levels and Improving the Intestinal Microbiota in Older Adults. *Nutrients.*, 12, (2020)
- 11) Narishige, S., Kuwahara, M., Shinozaki, A., et al.: Effects of caffeine on circadian phase, amplitude and period evaluated in cells in vitro and peripheral organs in vivo in PER2::LUCIFERASE mice. *Br. J. Pharmacol.*, 171, 5858-5869 (2014)
- 12) Burke, T.M., Markwald, R.R., McHill, A.W., et al.: Effects of caffeine on the human circadian clock in vivo and in vitro. *Sci. Transl. Med.*, 7, 305ra146 (2015)
- 13) He, B., Nohara, K., Park, N., et al.: The Small Molecule Nobiletin Targets the Molecular Oscillator to Enhance Circadian Rhythms and Protect against Metabolic Syndrome. *Cell. Metab.*, 23, 610-621 (2016)
- 14) Li, H., Kek, H.C., Lim, J., et al.: Green tea (-) -epigallocatechin-3-gallate counteracts daytime overeating induced by high-fat diet in mice. *Mol. Nutr. Food. Res.*, 60, 2565-2575 (2016)
- 15) Furutani, A., Ikeda, Y., Itokawa, M., et al.: Fish Oil Accelerates Diet-Induced Entrainment of the Mouse Peripheral Clock via GPR120. *PLoS. One.*, 10, e0132472 (2015)

- 16) Morris, C.J., Yang, J.N., Garcia, J.I., et al.: Endogenous circadian system and circadian misalignment impact glucose tolerance via separate mechanisms in humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*, 112, E2225-2234 (2015)
- 17) Takahashi, M., Ozaki, M., Kang, M.I., et al.: Effects of Meal Timing on Postprandial Glucose Metabolism and Blood Metabolites in Healthy Adults. *Nutrients.*, 10, 1763 (2018)
- 18) Takahashi, M., Ozaki, M., Tsubosaka, M., et al.: Effects of Timing of Acute and Consecutive Catechin Ingestion on Postprandial Glucose Metabolism in Mice and Humans. *Nutrients.*, 12, 565 (2020)
- 19) Takahashi, M., Ozaki, M., Miyashita, M., et al.: Effects of timing of acute catechin-rich green tea ingestion on postprandial glucose metabolism in healthy men. *J. Nutr. Biochem.*, 73, 108221 (2019)
- 20) Jones, R., Pabla, P., Mallinson, J., et al.: Two weeks of early time-restricted feeding (eTRF) improves skeletal muscle insulin and anabolic sensitivity in healthy men. *Am. J. Clin. Nutr.*, 112, 1015-1028 (2020)
- 21) Sutton, E.F., Beyl, R., Early, K.S., et al.: Early Time-Restricted Feeding Improves Insulin Sensitivity, Blood Pressure, and Oxidative Stress Even without Weight Loss in Men with Prediabetes. *Cell. Metab.*, 27, 1212-1221, e3 (2018)
- 22) Sasaki, H., Hattori, Y., Ikeda, Y., et al.: Forced rather than voluntary exercise entrains peripheral clocks via a corticosterone/noradrenaline increase in PER2::LUC mice. *Sci. Rep.*, 6, 27607 (2016)
- 23) Sasaki, H., Hattori, Y., Ikeda, Y., et al.: Phase shifts in circadian peripheral clocks caused by exercise are dependent on the feeding schedule in PER2::LUC mice. *Chronobiol. Int.*, 33, 849-862 (2016)
- 24) Tanaka, Y., Ogata, H., Kayaba, M., et al.: Effect of a single bout of exercise on clock gene expression in human leukocyte. *J. Appl. Physiol (1985).*, 128, 847-854 (2020)
- 25) Haskell, W.L., Lee, I. M., Pate, R.R., et al.: Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 39, 1423-1434 (2007)
- 26) Kim, H.K., Konishi, M., Takahashi, M., et al.: Effects of Acute Endurance Exercise Performed in the Morning and Evening on Inflammatory Cytokine and Metabolic Hormone Responses. *PLoS. One.*, 10, e0137567 (2015)
- 27) Iwayama, K., Kawabuchi, R., Nabekura, Y., et al.: Exercise before breakfast increases 24-h fat oxidation in female subjects. *PLoS. One.*, 12, e0180472 (2017)
- 28) Iwayama, K., Kurihara, R., Nabekura, Y., et al.: Exercise Increases 24-h Fat Oxidation Only When It Is Performed Before Breakfast. *EBioMedicine.*, 2, 2003-2009 (2015)
- 29) Recht, L.D., Lew, R.A., Schwartz, W.J.: Baseball teams beaten by jet lag. *Nature.*, 377, 583 (1995)
- 30) Song, A., Severini, T., Allada, R.: How jet lag impairs Major League Baseball performance. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*, 114, 1407-1412 (2017)
- 31) Takahashi, T., Sasaki, M., Itoh, H., et al.: Re-entrainment of circadian rhythm of plasma melatonin on an 8-h eastward flight. *Psychiatry. Clin. Neurosci.*, 53, 257-260 (1999)
- 32) Atkinson, G., Reilly, T.: Circadian variation in sports performance. *Sports. Med.*, 21, 292-312 (1996)
- 33) Ezagouri, S., Zwihaft, Z., Sobel, J., et al.: Physiological and Molecular Dissection of Daily Variance in Exercise Capacity. *Cell. Metab.*, 30, 78-91, e74 (2019)
- 34) Souissi, N., Gauthier, A., Sesboue, B., et al.: Effects of regular training at the same time of day on diurnal fluctuations in muscular performance. *J. Sports. Sci.*, 20, 929-937 (2002)
- 35) Facer-Childs, E., Brandstaetter, R.: The impact of circadian phenotype and time since awakening on diurnal performance in athletes. *Curr. Biol.*, 25, 518-522 (2015)
- 36) Rae, D.E., Stephenson, K.J., Roden, L.C.: Factors to consider when assessing diurnal variation in sports performance: the influence of chronotype and habitual training time-of-day. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115, 1339-1349 (2015)
- 37) Facer-Childs, E., Brandstaetter, R.: Circadian Phenotype Composition is a Major Predictor of Diurnal Physical Performance in Teams. *Front. Neurol.*, 6, 208 (2015)

Invited Review

Chrono-nutrition and sports performance

Masaki TAKAHASHI ^{*1}, Hyeon-Ki KIM ^{*2}

^{*1} Institute for Liberal Arts, Tokyo Institute of Technology

^{*2} School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

ABSTRACT

This review focuses on the utilization of chrono-nutrition to improve sports performance. First, we introduce the topic of circadian rhythms, which regulate several physiological functions such as body temperature, blood pressure, sleep/wake cycle, and digestion/absorption/metabolism function. In addition, we introduce methods, such as questionnaires and biological sampling, for the evaluation of circadian rhythms in humans. Second, based on our previous reports, we will discuss postprandial metabolism, focusing on the timing of diet and functional food/beverage intake. Recently, circadian rhythms have been shown to be correlated with sports performances, suggesting an interaction between circadian rhythm and exercise/sports performance (chrono-exercise). Thus, several studies have focused on the relationship between circadian rhythms and physiological functions, including sports performance, and evidence of the effects of the timing of acute exercise and exercise training on exercise performance is now accumulating. Here, we also introduce evidence of a relationship between chronotype and sports performance as well as time-of-day variations in sports performance. Finally, we refer to how circadian rhythms and chrono-nutrition can be utilized to optimize sports performance.

Keywords: circadian rhythm, chrono-nutrition, precision nutrition