

Original article

Association between Early-Morning Urinary 6-Sulfatoxymelatonin Changes and Sports Performance during Tours to the UK and GermanySatoshi Hosoi^{1,2)}, Naruto Yoshida¹⁾, Yusuke Maruyama¹⁾, Haruyasu Kato¹⁾,
Atsushi Kanno³⁾, Tomonori Tada⁴⁾, Atsuhiko Hattori¹⁾

1) Rikkyo University, College of Sport and Wellness, Department of Sport and Wellness

2) Jikei Gakuen Educational Institution, Tokyo College of Medical & Sports

3) Japan Football Association, Physical Fitness Project

4) JFA Academy Fukushima

Glycative Stress Research 2025; 12(3): 92-100

(c) Society for Glycative Stress Research

(原著論文：日本語翻訳版)

イギリス遠征およびドイツ遠征に伴う早朝尿中サルファトキシメラトニンの変動とスポーツパフォーマンスとの関連細井 聡^{1,2)}、吉田成仁¹⁾、丸山雄介¹⁾、加藤晴康¹⁾、菅野 淳³⁾、多田智典⁴⁾、服部淳彦¹⁾

1) 立教大学・スポーツウエルネス学部・スポーツウエルネス学科

2) 学校法人滋慶学園 東京メディカル・スポーツ専門学校

3) 公益財団法人日本サッカー協会 フィジカルフィットネスプロジェクト

4) JFAアカデミー福島

抄録

エリートスポーツ選手は、タイムゾーンを跨いだ移動を繰り返すことが多く、大会で最高のパフォーマンスを出すためには、時差の解決は避けて通れない課題である。現状の時差ぼけ対策は、出発前から時間をかけて行うものと、移動時や現地に着いてから行うものがあるが、どの方法が良いのかは残念ながら未解決のままである。松果体から分泌されるメラトニンは、概日時計の指令を受けて夜間のみ分泌されるため、概日時計の針としての役割を持つほぼ唯一の指標である。早朝尿中のサルファトキシメラトニン(6SMEL)は夜間に分泌されたメラトニンの総量を反映しており、この量を測定することにより、時差環境にどの程度同調しているかを測定する指標となりえる。そこで本研究では、育成世代のアスリートを対象に、実際にイギリス遠征とドイツ遠征に伴う時差環境下での早朝尿中6SMELを経日的に測定し、同時にフィジカルパフォーマンスも測定することにより、どのような要素がスポーツ選手のパフォーマンスの時差ぼけ対策に重要であるかを明らかにすることを目的とした。

その結果、早朝尿中の6SMELは、イギリス遠征・ドイツ遠征ともに移動翌日では移動前と比べ有意に減少し($p < 0.05$)、移動3日目、5日目と徐々に回復していった。しかし、イギリス遠征においては、移動後の

連絡先：責任著者 服部淳彦

立教大学・スポーツウエルネス学部・ウエルネス学科

〒352-8558 埼玉県新座市北野1-2-26

TEL: 048-471-7335 e-mail: ahattori1005@rikkyo.ac.jp

共著者：細井 聡 satoshihosoi@hotmail.co.jp; 吉田成仁 naruto-y@rikkyo.ac.jp;

丸山雄介 ymaruyama@rikkyo.ac.jp; 加藤晴康 harukato@rikkyo.ac.jp;

菅野 淳 atsushi.kanno@jfa.or.jp, 多田智典 tomoredog@gmail.com

Glycative Stress Research 2025; 12(3): 92-100

本論文を引用する際はこちらを引用してください。

(c) Society for Glycative Stress Research

いずれのタイミングにおいても早朝尿中の6SMEL量が移動前レベルには戻らなかったのに対して、ドイツ遠征においては、移動3日目には移動前レベルまで回復し、5日目には逆に移動前よりも有意に増加していた。この両遠征の違いを生んだ要因の一つが、到着後の日光を浴びていた（外で活動していた）時間の長さにある可能性が示された。次に、方向転換走（COD15m）のレベルに個人差が大きかったイギリス遠征の移動3日目において、尿中6SMELとCOD15mの間の相関を調べると有意な（ $p < 0.05$ ）相関関係を示し、6SMELの高い選手の方がCOD15mの値が良いことが分かった。このことは、新しい環境に早く同調した選手の方が良いパフォーマンスを示すことを表わしていると思われる。

KEY WORDS: 海外遠征、時差、サルファトキシメラトニン、パフォーマンス

1. 緒言

現代において、エリートサッカー選手の多くは、タイムゾーンを跨いだ移動を繰り返し、試合に向けてコンディションを整えていく中で、時差の問題に悩まされている。

時差の問題は、時差症候群いわゆる時差ぼけと言われており、Janse van Rensburg DCらがまとめた共同声明では「3つ以上のタイムゾーンを東または西へ急速に移動することに伴う、睡眠と覚醒、およびその他の生物学的機能の一時的な障害」と定義されている¹⁾。時差ぼけの最も一般的な症状は、胃腸の不快感、日中の疲労感/眠気、精神的または身体的パフォーマンスの低下、睡眠不足であり^{2,3)}、症状の強さと持続時間は、通過するタイムゾーンの数が増えるにつれ悪化すると言われている^{4,5)}。

松果体から分泌されるメラトニンは概日時計の指令を受けて夜間のみ分泌され、概日時計の針の役割として血液、唾液や尿から取れるほぼ唯一の指標である。早朝尿中のサルファトキシメラトニン（6SMEL）は夜間に分泌されたメラトニンの総量を反映しており⁶⁾、この量を測定することにより、時差環境にどの程度同調しているかの指標となりえる。一般に、個体が示す概日リズムは、一定時刻に与えられる外部刺激（同調因子）、例えば光により位相変位を起こし、新しい環境のサイクルに合わせることができる。メラトニンに関しても位相変位が認められ、しかも光に対する位相反応曲線とはちょうど逆の関係、すなわち主観的夜（夕方から就寝の数時間前）のメラトニン投与が位相の前進を引き起こすことが報告されている。このような同調因子として位相変位を起こす作用は、概日時計の存在部位である視交叉上核におけるメラトニン受容体MT2を介した作用であることが示唆されている⁷⁾。

タイムゾーンを跨いだ移動後のパフォーマンスについて着目してみると、バスケットボールのフリースロー成功率が悪化するという報告⁸⁾や6つのタイムゾーンを跨いだ東向きのフライトの後、最初の4日間は270 mスプリントにかかる時間が増加した⁹⁾、5つのタイムゾーンを跨いだ西向きのフライトの後、背筋力と脚力、反応時間が悪化したという報告¹⁰⁾がある。これらの研究は、時差ぼけが運動能力や身体的・精神的パフォーマンスに悪影響を及ぼした結果だと考えられる。しかし一方で、長距離移動後に行った

30 mスプリントでは変化が見られなかったという報告¹¹⁾や長距離移動後にエリートアスリートは時差ぼけを感じ、様々な生理学的指標の乱れを経験するもパフォーマンスへの影響は限定的であったという報告¹²⁾もあり、アスリートにおける時差ぼけがパフォーマンスに悪影響を及ぼすのか、及ぼさないのか両論存在する。

また、日本人アスリートを対象とした基礎的な研究や実際のフィールドでの研究は、非常に限られている。星川らは日本人トップアスリートを対象に、海外遠征時の質問紙調査を行い、時差による体調不良に「よく困っている」選手が74名（10.8%）、「症状はあるがそれほど困っていない」選手が398名（58.0%）いたと報告しているものの¹³⁾、客観的な指標を基にした研究ではない。また、Yamanaka Yらも時間隔離実験室を使用して、被験者の生活リズムをずらし、メラトニンリズムの同調について着目した時差ぼけに関する研究を行っているものの¹⁴⁾、タイムゾーンを跨ぐ海外への遠征など、実際にアスリートを対象とした研究ではない。

そのような状況で、現在推奨されている時差対策は、トップアスリートにとって実践が難しいものばかりであり、タイムゾーンを跨いだ移動を行う際の対策について検討していくことは非常に重要である。そこで本研究では、実際にイギリス遠征とドイツ遠征に伴う時差環境下でのアスリートの早朝尿中のサルファトキシメラトニン量とフィジカルパフォーマンスの変動を比較することにより、どのような要素がフィジカルパフォーマンスに重要な影響を与えているかを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2-1. 研究デザイン

本研究は、オプトアウト方式の同意を用いた観察研究とし、日本からイギリスもしくはドイツへタイムゾーンを跨いだ移動を伴った遠征時の男子育成年代サッカー選手の睡眠・疲労・メラトニン・パフォーマンスの変化について分析した。移動日前日（日本）から移動2日目（イギリスあるいはドイツ）までの選手のタイムスケジュール（フライトスケジュールも含む）をFig.1に示した。

2-2. 対象

イギリス遠征においては、育成年代エリートサッカーチームに所属する中学3年生男子サッカー選手19名のうち、外傷・障害なくプレー可能な選手18名を対象とした(対象者の身体特性:身長171.4 ± 7.4 cm、体重59.4 ± 9.6 kg、筋肉量50.7 ± 6.4 kg、体脂肪率9.5 ± 4.0 %、BMI 20.2 ± 2.5 kg/m²)。

ドイツ遠征においては、育成年代エリートサッカーチームに所属する中学3年生男子サッカー選手18名のうち、外傷・障害なくプレー可能な選手17名とした(対象者の身体特性:身長168.8 ± 7.7 cm、体重55.8 ± 7.0 kg、筋肉量46.8 ± 5.1 kg、体脂肪率11.0 ± 2.5 %、BMI 19.5 ± 1.1 kg/m²)。

両遠征におけるチームの特異的特徴として、全寮制である点が挙げられる。そのため、遠征前後においても対象者全員が同じスケジュールで生活し、トレーニングや試合を行っていた。

2-3. 測定方法と測定項目

2-3-1. 測定方法

本研究は、対象チームにて実施されたイギリス遠征・ドイツ遠征にて実施した測定データを解析したものである。対象チームでは、この解析介入の前から、コンディションチェックという目的で測定を実施している。

2-3-2. 測定項目

●主観的アンケート

ONE TAP SPORTS (ユーフォリア社、東京) というアプリケーションを用いて、毎朝コンディション情報を収集した。各選手が、毎朝インターネットを通じてアプリケーションを使用し、アンケートに答える形とした。アンケート項目は、主観的疲労感、主観的睡眠の質、夜中に起きた回数、1日の排便回数とした。

●尿

睡眠や覚醒リズムなどの概日リズム(サーカディアンリズム)の調整作用があるとされる「メラトニン」をターゲットにした。メラトニンは、松果体から血中に分泌され、肝臓で水酸化され、スルファトキシメラトニン(6-sulfatoxy melatonin; 6SMEL)として尿中に排泄される。また、メラトニンは日中にはほとんど分泌されず、夜間に多く分泌される^{6,15-17}。そのため、早朝尿を用いれば、非侵襲的に、移動後の環境への同調状態を把握することが可能である。そこで、今回は、早朝尿を用いて、尿中の6SMEL量を測定することとした。

採尿方法

起床時(早朝)に選手各自が、尿を紙コップに採取し、1 mLスポイトでチューブに移した。そのチューブを対象

UK tour		Time difference - 8 hours		Bright	Dark																						
Day/Japan time	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4		
10/17 Japan			wake up	school											TR (16:45~18:45)												
			sunrise (5:48)												sunset (17:04)												
10/18 traveling	traveling								departure 9:55									UK arrival									
									(flight 14h05m)									(local time 16:00)									
10/19 D+1	sleeping										wake up	TR (local time 9:30~11:30)		sight seeing (local time 12:00~17:00)													
10/20 D+2	sleeping										wake up																
											sunrise (local time 7:30)										sunset (local time 18:00)						
German tour		Time difference - 7 hours																									
Day/Japan time	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4		
4/28 Japan		sunrise (4:52)	wake up	TRM (10:30~12:30)														sunset (18:25)		sleeping							
4/29 traveling		wake up	traveling														departure 16:25 (flight 4h40m)		Hong Kong arrival			Hong Kong departure (local time 23:55) (flight 13h20m)					
4/30 traveling											Frankfurt arrival (local time 7:15)			sight seeing (12:30~13:30)							TR (16:30~18:30)						
5/1 D+1	sleeping										wake up	practice observation (10:30~11:30)					TRM (14:30~16:30)										
5/2 D+2	sleeping										wake up																
											sunrise (local time 5:30)										sunset (local time 20:30)						

TR: taining, TRM: training match.

Fig.1. Time schedule for expedition to the United Kingdom and Germany.

UK, United Kingdom; TR, training; TRM, training match.

チームのトレーナーが回収し、最大7日間冷蔵保存して、帰国後解析した。事前に7日間の冷蔵保存では6SMELは変化しないことは確認済みである。

LCMS測定用の尿サンプル作成手順

尿検体100 μL をメタノール400 μL で5倍希釈してよく攪拌した後、Centrifuge5417R (Eppendorf 社、ハンブルク、ドイツ)を使用して遠心分離(4°C, 14,000 rpm, 20 min)した。その上清100 μL を0.22 μm のフィルターチューブ Ultrafree-MC-GV (Merck Millipore社、バーリントン、マサチューセッツ)に移し、再度遠心(4°C, 10,000 rpm, 2 min)したろ液をLCMSに供した。

LCMSを用いた6SMELの定量

得られたサンプルは、質量分析計LCMS-8050(島津製作所社、京都)と高速液体クロマトグラフNexeraX2(島津製作所社)にて解析した。なお、LCMSを用いて尿中の6SMELの測定を行うことは、簡便かつ再現性の高い高感度な定量方法である¹⁷⁾とされている。

LCの条件

酢酸アンモニウム5%水溶液とメタノールを溶媒として5%(0分)-50%(20分)のグラジエント条件で逆相カラムTSKgel ODS-100V 3 μm (東ソー株式会社、東京)を用いて分離を行った。

MSの条件

6SMEL: 6-Sulfatoxy Melatonin Sodium Salt (Toronto Research Chemicals, Inc., North York, Canada)から検量線を作成し、 m/z 327.0をプレカーサーイオン、 m/z 161.0をプロダクトイオンとして尿中6SMELの定量を行った。

クレアチニン補正

排出量を補正するためにクレアチニンの濃度測定を行った。尿サンプル中のクレアチニン濃度の測定は、クレアチニン測定キットLabAssay Creatinine(富士フィルム和光純薬株式会社、大阪)を用いて行った。その後、6SMEL濃度をクレアチニン(Cre)1 mgあたりの排出量として補正を行った。

●パフォーマンステスト(5m×3方向転換走: COD15m)

パフォーマンステストでは、5m×3方向転換走(Change of direction; 以下、COD15m)を用いた。測定方法については、公益財団法人日本サッカー協会(以下、JFA)フィジカルフィットネスプロジェクトのフィジカル測定¹⁸⁾を参照し、実施した。

5mの距離にマーカーを2つ置き、そこから0.6m離れたところにゴールの目印となるポールを立てた。ポールから10m離れた位置にiPadあるいはiPhone(アップル社、クパティーン、カリフォルニア)を設置し、スローモーション(1080p/240fps)で試技を撮影した(Fig. 2-a)。

対象選手は、スタート地点から30cm後方に置かれたマーカーに手をつけて静止した状態から3点スタートを行い、5mのマーカー間を1往復半する形で測定を実施した。試技中の注意点として、1回目のターンは右手で、2回目のターンは左手でマーカーをタッチすることとした(Fig. 2-b)。

試技は、1日1回のみとした。COD15mのタイムは、iPadあるいはiPhone12のスローモーション撮影によって撮影されたスタートからゴールまでのコマ数(フレーム数)をカウントすることで算出した。

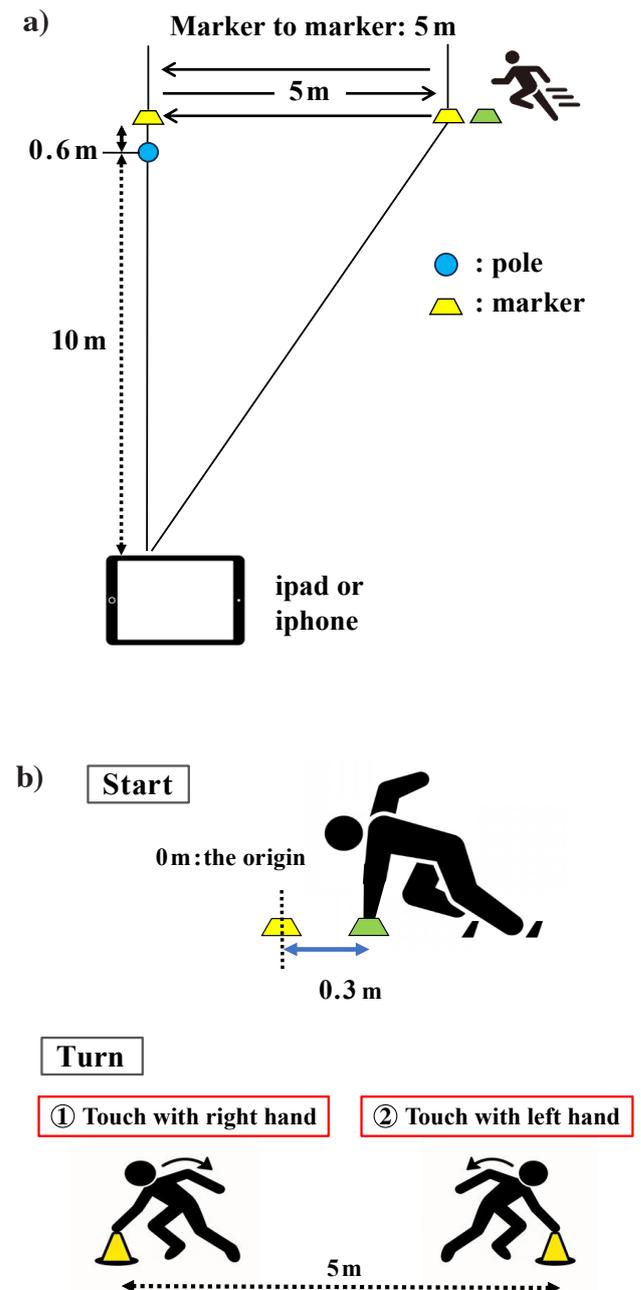


Fig. 2. Arrangement of equipment for COD15m measurement (a) and specific measurement methods (b).

COD15m, 5 m × 3 Change of Direction Run (Performance Test).

2-3-3. プロトコル

イギリス遠征における主観的アンケートについては、期間中毎朝回答することとし、出発までのデータの平均をPreDデータとした。尿採取については、出発前 (PreD)、移動翌日 (D+1)、移動3日後 (D+3)、移動5日後 (D+5) に行った。また、パフォーマンステスト (COD15m) については、PreD, D+3, D+5に測定した。

また、ドイツ遠征における主観的アンケートについては、期間中毎朝回答することとし、出発までのデータの平均をPreDデータとした。尿採取については、出発前を基準値データとして用い (PreD)、移動翌日 (D+1)、移動3日後 (D+3)、移動5日後 (D+5) に行った。また、パフォーマンステスト (COD15m) については、PreD, D+1, D+3に測定した。

2-3-4. 統計処理

6SMELとCOD15mタイムにおいて、個人差によるデータのばらつきを整えるために、PreDの値を100%とした補正値を採用し、PreDデータとD+1, D+3, D+5データでノンパラメトリックのWilcoxonの符号付き順位検定をStatistical Package for the Social Science (以下SPSS) (IBM社、アーモック、ニューヨーク) にて行った。その後、ボンフェローニ補正を行った。

イギリス遠征においてはCOD15mのデータにばらつきが大きかったことから、PreDと比較して、D+3タイムが「悪化する群」と「変化なし・改善する群」の2つに分けて、分析することとした。また、その時に6SMELの値とCOD15mスコアの間に関連があるかどうかを調べた。

その他のデータについては、ノンパラメトリックのマーンホイットニー検定をSPSSにて行った。全て有意水準は5%未満とした。

2-3-5. 倫理規定

本研究は、立教大学スポーツウエルネス学部倫理委員会の承認を得て行なった。

3. 結果

3-1. 6SMELの変化

イギリス遠征におけるPreD値は 57.8 ± 37.3 ng/mgCreであった。そこでその値を100%とし、D+1, D+3, D+5での値を割合で算出した。各時点での早朝尿中の6SMELの値は、D+1ではPre値の 29.8 ± 15.2 %, D+3は 51.0 ± 25.0 %, D+5は 70.0 ± 28.1 %であり、PreDに対して、D+1, D+3, D+5いずれのタイミングも6SMEL量が有意に減少していた ($p < 0.05$, Fig. 3-a)。

ドイツ遠征におけるPreD値は 31.6 ± 16.6 ng/mgCreであった。その値を100%とすると、各時点での早朝尿中の6SMELの値は、D+1では 40.2 ± 26.1 %と有意に ($p <$

0.05) 減少していたが、D+3は 105.6 ± 39.6 %とほぼPreDレベルまで回復し、D+5になると 137.7 ± 36.2 %とPreDに対して、有意に増加していた ($p < 0.05$, Fig. 3-b)。

3-2. パフォーマンス変化 (COD15m)

イギリス遠征においては、PreD値は 4.3 ± 0.1 secであり、その値を100%として補正値を採用した。採用値において、100%以下はPreDに比べてタイムが速く、100%以上はPreDに比べてタイムが遅いこととなる。イギリス遠征において、D+3は 101.4 ± 6.1 %, D+5は 103.5 ± 2.7 %であり、PreDと比べ、タイムが悪化した。一方、ドイツ遠征においては、PreD値は 4.4 ± 0.2 secであり、その値を100%とすると、D+1は 97.6 ± 2.5 %, D+3は 99.8 ± 2.3 %であった。PreDよりも速いタイムとなった。しかし、いずれの値もPre値に対して有意差はなかった。

3-3. イギリス遠征におけるCOD15mのタイムで2群に分けた時の6SMEL量の比較

次に、ドイツ遠征はPreDと比較して移動1日目 (D+1) よりCOD15mのタイムが悪化することはなかったが、イギリス遠征では移動3日目 (D+3) でも遅いタイムであり、また個体間のばらつきが大きかったので、D+3のタイムがPreDと比較して「悪化する群(Worse; W群)」と「変化なし・改善する群 (Better; B群)」の2つに分けて (Fig. 4-a) 分析

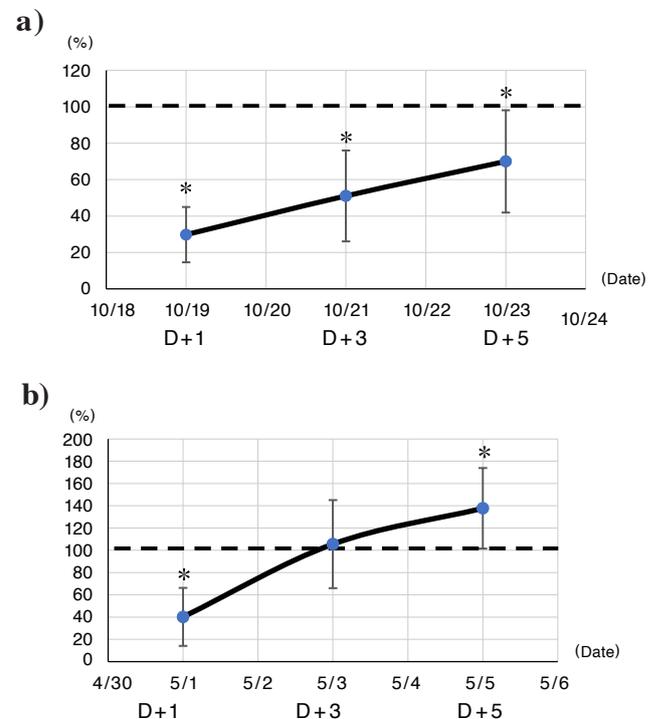


Fig. 3. Changes in 6SMEL in early morning urine during the UK (a) and German (b) tours.

% values are expressed as 100% of the values before the expedition (Pre), means \pm SD, n = 18. * $p < 0.05$ vs PreD by Wilcoxon signed-rank test. 6SMEL 6-sulfatoxymelatonin. UK, United Kingdom; SD, standard deviation.

することとした。なお、W群とB群の身体的特徴に、群間に有意な差はなかった。

W群とB群で分けた時の6SMELの値をFig. 4-bに示した。W群がD+1にて $27.8 \pm 13.6\%$ 、D+3にて $39.1 \pm 23.5\%$ 、D+5にて $58.6 \pm 18.3\%$ 、B群ではD+1にて $32.2 \pm 18.5\%$ 、D+3にて $64.5 \pm 22.1\%$ 、D+5にて $84.3 \pm 34.3\%$ であった。D+1では、両群ともに減少し、両群間に差はなかったが、D+3ではW群がB群に比べ6SMEL量が低値を示し($p = 0.054$)、またD+5では、W群がB群に比べ有意に($p < 0.05$)6SMEL量が低値を示した(Fig. 4-b)。一方、ドイツ遠征に関しても同様の検討をしたが、6SMELの値に両群に差はなかった。

イギリス遠征においては、D+3だけでなく、その後のD+5の時点においてもW群のタイムの方が有意に遅かった($p < 0.05$ 、データ提示なし)。

3-4. イギリス遠征における尿中6SMELとパフォーマンス(COD15m)との相関

そこで、イギリス遠征においてD+3とD+5の時点で早朝尿中の6SMEL値とパフォーマンス(COD15m)の間に関連があるかどうか調べた。その結果、D+3では $r = -0.546$ ($p < 0.014$, Fig. 5-a)、D+5では $r = -0.502$ ($p < 0.034$, Fig. 5-b)であり、6SMELとパフォーマンスに相関関係がみられた。両日ともに、6SMELの値が高い選手ほどパフォーマンスが良いことが明らかとなった。

3-5. その他のアンケートデータの比較

その結果をTable 1に示した。イギリス遠征、ドイツ遠征共にアンケート項目(主観的疲労感、主観的睡眠の質、夜中に起きた回数、1日の排便回数)において、移動前日(PreD)から移動5日目(D+5)までに有意な変化はなかった。

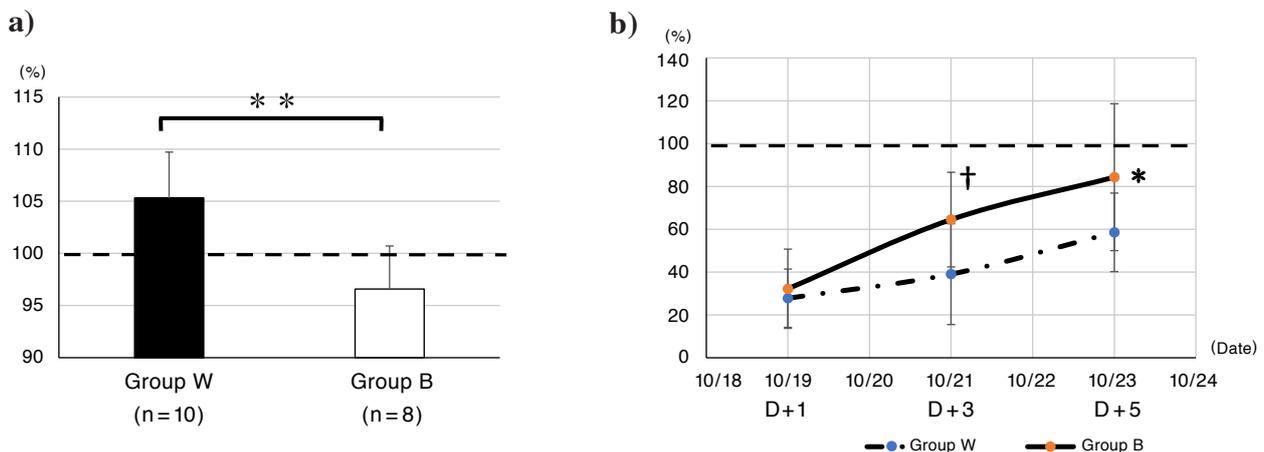


Fig. 4. COD15m values for D+3 in the worse (Group W) and better (Group B) groups (a) and daily changes in 6SMEL in the two groups after the tour (b).

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ compared Group W to Group B, † $p = 0.054$ compared Group W to Group B by Wilcoxon signed-rank test. 6SMEL 6-sulfatoxymelatonin; COD15m, 5m \times 3 Change of Direction Run (Performance Test).

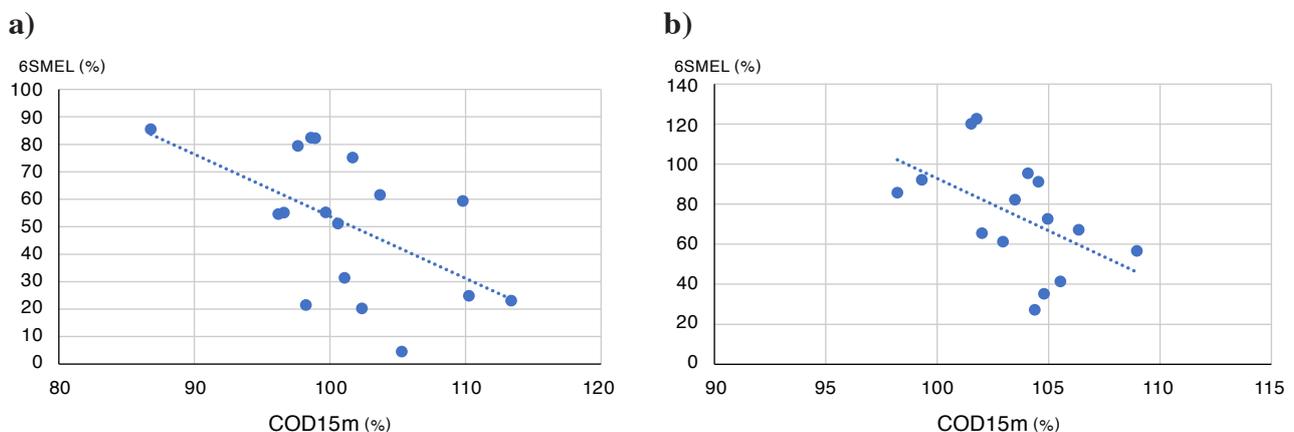


Fig. 5. Correlation between 6SMEL and COD15m for each individual at D+3 (a) and D+5 (b).

a: $y = -2.2578x + 279.58$, $r = -0.546$, $p < 0.014$, $n = 18$. **b:** $y = -5.2199x + 614.81$, $r = -0.502$, $p < 0.034$, $n = 18$. 6SMEL 6-sulfatoxymelatonin; COD15m, 5m \times 3 Change of Direction Run (Performance Test).

Table 1. Results of fatigue, sleep and defecation (UK and German tours).

UK	PreD	Moving day	D+1	D+2	D+3	D+4	D+5
Fatigue (Subjective) (0-100)	48.5 ± 12.0	49.3 ± 12.3	53.7 ± 10.6	49.6 ± 11.2	52.9 ± 11.4	54.5 ± 6.6	51.0 ± 9.4
Quality of Sleep (Subjective) (0-100)	58.8 ± 14.6	47.2 ± 15.1	53.6 ± 11.5	51.9 ± 11.2	54.9 ± 11.2	55.3 ± 12.0	52.4 ± 14.4
No. of wake up during night	0.1 ± 0.2	0.3 ± 0.7	0.6 ± 0.9	1.2 ± 0.9	0.9 ± 0.8	1.1 ± 1.1	0.6 ± 0.8
No. of defecation	2.7 ± 1.1	2.4 ± 0.9	2.0 ± 1.3	1.9 ± 0.8	1.9 ± 1.3	1.4 ± 1.2	1.9 ± 1.3
Germany	PreD	Moving day	D+1	D+2	D+3	D+4	D+5
Fatigue (Subjective) (0-100)	45.6 ± 21.9	63.4 ± 26.0	46.9 ± 20.3	47.6 ± 22.7	47.4 ± 21.2	45.7 ± 23.4	48.6 ± 24.2
Quality of Sleep (Subjective) (1-5)	3.8 ± 0.7	2.6 ± 0.6	3.3 ± 1.0	4.1 ± 0.8	3.5 ± 0.5	3.6 ± 0.8	3.6 ± 0.9
No. of wake up during night	0.2 ± 0.4	1.2 ± 1.4	0.7 ± 1.1	0.2 ± 0.4	0.3 ± 0.5	0.1 ± 0.2	0.1 ± 0.3
No. of defecation	2.4 ± 1.2	1.7 ± 1.4	2.3 ± 1.4	2.4 ± 1.3	2.4 ± 1.3	2.2 ± 1.4	2.3 ± 1.4

Values are expressed as means ± SD, n = 18. UK, United Kingdom; SD, standard deviation.

4. 考察

4-1. イギリス遠征とドイツ遠征における6SMEL変化

本研究においては、タイムゾーンを跨いだ遠征先での体内時計の同調指標としてメラトニンの代謝産物である尿中スルファトキシメラトニン (6SMEL) を利用した。イギリス遠征においては、PreDに対して、D+1, D+3, D+5いずれのタイミングも早朝の6SMEL量が有意に減少していた。一方、ドイツ遠征においては、PreDに対して、D+1にて早朝6SMEL量が有意に減少したのに対して、D+5では逆に早朝尿中の6SMEL量が有意に増加していた。その時のCOD15mのパフォーマンスを全体として見ると、ドイツ遠征の方がイギリス遠征より良いタイムを示していた。さらに、イギリス遠征の移動3日目において、尿中6SMELとCOD15mの間の関連を見ると有意な相関関係を示し、6SMELの高い選手の方がCOD15mの値が良いことが分かった。このことは、早く新しい環境に同調した選手の方が良いパフォーマンスを示すことを表わしていると思われる。

本研究におけるイギリス遠征では日本との時差は-8時間、ドイツ遠征では-7時間であり、イギリスやドイツにて就寝する時間帯は日本にて朝方、起床する時間帯は日本にて午後にあたり、6SMELの結果からも、タイムゾーンを跨いだ移動を行ったことにより、移動の初期には体内時計と外界環境リズムに「ずれ」が生じている状態、つまり時差ぼけ状態であったと考えられる。Härmäらは、ヘルシンキからロサンゼルスへ西回りの長距離移動を行った後、メラトニンリズム (概日周期頂点位相) が飛行前と比べて遅れていたことを報告している¹⁹⁾。本研究において得られた6SMELの変化は、Takahashi Tらの結果だけでなく、29歳から45歳の6名の日本人男性を対象に、

日本からロサンゼルス飛行に伴う1日目と5日目のメラトニンリズムを調べた先行研究の結果²⁰⁾と同様の結果であると思われる。すなわち、育成年代の日本人アスリートにおいても、タイムゾーンを跨ぐ移動を行うことで、6SMELを指標とした時差ぼけ症状が生じていると考えられる。

しかし、イギリス遠征とドイツ遠征における6SMELの変化を比較していくと、大きな違いが見られた。本研究における両遠征では、対象者がそれぞれ異なるため、比較については注意が必要ではあるが、全体的な傾向として、イギリス遠征においては6SMELの回復が遅く、ドイツ遠征においては早いという結果であった。山仲らは、いくつかのタイムゾーンを跨いだ移動を行うことにより、出発地の明暗サイクルに同調していた中枢時計 (振動体I) と到着地の明暗サイクルの間で外的脱同調が生じることと、到着地の生活リズムにすばやく再同調する睡眠覚醒リズム (振動体II) と時間をかけて再同調する生体リズムとの間で内的脱同調が生じることで、時差ぼけが発生すると報告し、振動体Iは高照度光、振動体IIは厳密な生活スケジュールや運動といった社会的因子が同調因子となると述べている²¹⁾。本研究においては、イギリス遠征・ドイツ遠征ともに、チームでのスケジュールが日々決まっており、対象者全員が強制的な規則正しい生活スケジュールを送り、同程度の運動も毎日行っていたため、振動体IIに対する同調因子は、イギリス遠征とドイツ遠征で差があるとは考えづらい。しかし、振動体Iの同調因子と言われる高照度光、日光について検討してみると、イギリス遠征を実施した時期の日照時間は約10時間30分 (7:30頃日の出、18:00頃日の入)、ドイツ遠征を実施した時期の日照時間は約15時間 (5:30頃日の出、20:30頃日の入) であり、日照時間に大きな違いが見られた (Fig. 1)。高照度光を同調因子とする振動体Iについては、深部体温リズムとメラトニンリズムを制御

しているとされており、日照時間の長かったドイツ遠征にて、外的脱同調からの再同調が起き、6SMELの回復がイギリス遠征よりも早く見られたと考えられる。

またもう一つの要因として、現地に到着してからスケジュール (Fig. 1) が挙げられる。イギリス遠征においては、日本を9:55に出発しイギリス現地時間16:00に到着し、その後日没時の18:00までにホテルへ移動したのに対して、ドイツ遠征においては、日本を16:25に出発し香港にてトランジットをした後、ドイツ現地時間7:15に到着し、到着後ホテルへ移動・昼食後、午後に日光を浴びながら18:30までトレーニングを含め活動を行っている。このように両遠征では現地の到着時刻とその日の活動や高照度光を浴びている時間について違いがあったと言える。光曝露は、生体リズムの最も強力な調整因子とされており²²⁻²⁴⁾、到着後のスケジュールの違いによって、イギリス遠征とドイツ遠征の6SMELの回復に差が出た可能性が考えられる。

本研究においては、チームとして特に時差対策を実施していないため、イギリス遠征とドイツ遠征における違いは、高照度光による可能性が高い。タイムゾーンを跨ぐ移動を行う前から、睡眠時間をずらしたり、移動中から生活リズムを現地時間に合わせたりすることを行うよりも、現地に到着してから、日光などの高照度光をできるだけ浴びるスケジュールで生活すること、それが叶わない場合でも、到着後に運動をするなど他の対応を講じることが非常に重要になると考えられる。

4-2. イギリス遠征とドイツ遠征におけるパフォーマンス変化

両遠征にて、パフォーマンステストであるCOD15mを同日で実施できているのはD+3のみであった。そこで、D+3にてデータを見ていくと、イギリス遠征ではデータのばらつきが大きく、ドイツ遠征ではデータのばらつきが小さいという傾向が見られた。

Forbes-Robertsonらは、旅行前、旅行中、旅行後の特定の時間に明るい光を使用したり、メラトニンを摂取したりすることで、概日リズムを新しい時間帯に合わせることを加速し、パフォーマンスの低下を緩和すると報告している²⁵⁾。先述した通り、本研究におけるイギリス遠征においては、現地の日照時間やフライトスケジュール・チームスケジュールの影響から高照度光を浴びる時間が短く、6SMELの回復も遅かったが、ドイツ遠征においては、高照度光を浴びる時間が長く、6SMELの回復も速かった。そのため、概日リズムを現地時間にフィットしていない選手が多かったイギリス遠征においては、パフォーマンスの悪化と選手間のタイムのばらつきが大きく、現地時間にフィットしてきている選手が多かったドイツ遠征においては、パフォーマンスの悪化と選手間のタイムのばらつきが小さかったと考えられる。

4-3. パフォーマンスと尿中6SMELとの関連

パフォーマンスについて、より詳細を見ていくために、

イギリス・ドイツ遠征ともに、COD15mタイムがPreDと比べてD+3で「悪化している(Worse: W群)」選手と「維持・改善している(Better: B群)」選手に群分けして比較検討を行った。

COD15mのタイムについて、群間比較すると、イギリス遠征でD+3、D+5において、W群がB群に比べ、有意に遅いタイムであった。また、群分けした際の人数については、W群は10名、B群は8名で大差なく、やはりタイムゾーンを跨いだ移動を行った後に、パフォーマンスが「維持できる選手」と「維持できない選手」が存在することは明らかであると考ええる。では、その違いはどこから生まれてしまうのか。

イギリス遠征においてD+3とD+5の時点で早朝尿中の6SMEL値とCOD15mの成績(すなわち方向転換走にかかった時間)の間に関連があるかどうか調べたところ、D+3では $r = -0.546$ ($p < 0.014$, Fig. 5-a)、D+5では $r = -0.502$ ($p < 0.034$, Fig. 5-b)であり、6SMELの値とパフォーマンスの数値に相関関係がみられた。つまり、6SMELの値が高い選手ほどパフォーマンスが高いことが明らかとなり、現地に早くフィットしてきている選手のパフォーマンスが良好であることを示していると考えられる。

4-4. 時差ぼけ対策

現状の時差ぼけ対策では、出発前から行うものと、移動時や現地に到着してから行うものがある。先行研究にて推奨される時差対策としては、出発のおよそ1週間前から睡眠時間帯を到着での睡眠時間帯に徐々に近づける^{26,27)}、機内にて食事摂取のタイミングや睡眠時間の調整を行う^{3,28-30)}、到着後の光を浴びる時刻の調整を行う^{31,32)}などといったことが挙げられる。チームでの活動を行っている時、出発の1週間前から睡眠時間を調整することはまず難しい。また、機内での食事摂取や睡眠のタイミングの調整を行うことで、合計の睡眠時間が短くなるケースが散見される。そのような場合、移動に伴う疲労が思うように回復されないまま、現地に到着することになり、パフォーマンスが悪くなってしまうことも考えられる。本研究の結果は、現地に到着後浴びる光の量と到着時刻の重要性を示していると思われる。今後の研究においては、到着後に浴びる光の量とタイミングのさらなる検討や移動中や移動後の睡眠についても、より客観的なデータを用いて検討していくことが重要であると考ええる。

5. 研究限界

一般に体内時計の同調因子としては、光(日光)、食事、社会的要因(環境)が挙げられる。本研究では朝食を含む食事は全員が摂取したが、両遠征で食事のメニュー(例えば摂取タンパク量)まで同一に(あるいは比較する)ことができなかった。また、全員昼寝はしていないが、宿泊施設などの環境要因も両遠征では異なっている。この点は、

実際のアスリートを対象にした遠征での研究の限界であり、今後は実験施設などを用いた詳細な検討が必要であると思われる。

6. 結語

本研究では、育成年代日本人アスリートにおいて、タイムゾーンを跨いだ移動を行った際に、これまでの報告と同様に時差ぼけが生じることが明らかになった。また、移動後のパフォーマンスの回復については、早朝尿中6SMELの値と相関がみられ、早く6SMELが回復した選手の方が良いパフォーマンスを示すことが明らかと

なった。また、6SMELの回復を促すためには、現地到着後に日光を浴びる時間を長くすることと浴びる時刻の重要性が示唆され、今後この点を明らかにする必要がある。

利益相反申告

特になし。

競争的資金獲得状況

特になし。

参考文献

- 1) Janse van Rensburg DC, Jansen van Rensburg A, Fowler PM, et al. Managing travel fatigue and jet lag in athletes: A review and consensus statement. *Sports Med.* 2021; 51: 2029-2050.
- 2) Waterhouse J, Reilly T, Edwards B. The stress of travel. *J Sports Sci.* 2004; 22: 946-966.
- 3) Waterhouse J, Reilly T, Atkinson G, et al. Jet lag: Trends and coping strategies. *Lancet.* 2007; 369: 1117-1129.
- 4) Sack RL. Clinical practice. Jet lag. *N Engl J Med.* 2010; 362: 440-447.
- 5) Lemmer B, Kern RI, Nold G, et al. Jet lag in athletes after eastward and westward time-zone transition. *Chronobiol Int.* 2002; 19: 743-764.
- 6) 服部淳彦. メラトニンとエイジング. 比較生理生化学. 2017; 34: 2-11.
- 7) Hattori A, Suzuki N. Receptor-mediated and receptor-independent actions of melatonin in vertebrates. *Zool Sci.* 2024; 41: 105-116.
- 8) Gliniski J, Chandy D. Impact of jet lag on free throw shooting in the National Basketball Association. *Chronobiol Int.* 2022; 39: 1001-1005.
- 9) Wright JE, Vogel JA, Sampson JB, et al. Effects of travel across time zones (jet-lag) on exercise capacity and performance. *Aviat Space Environ Med.* 1983; 54: 132-137.
- 10) Reilly T, Atkinson G, Budgett R. Effect of low-dose temazepam on physiological variables and performance tests following a westerly flight across five time zones. *Int J Sports Med.* 2001; 22: 166-174.
- 11) Bullock N, Martin DT, Ross A, et al. Effect of long haul travel on maximal sprint performance and diurnal variations in elite skeleton athletes. *Br J Sports Med.* 2007; 41: 569-573.
- 12) Rossiter A, Warrington GD, Comyns TM. Effects of long-haul travel on recovery and performance in elite athletes: A systematic review. *J Strength Cond Res.* 2022; 36: 3234-3245.
- 13) 星川雅子, 内田直, 平野裕一. 日本人トップアスリートの海外遠征とコンディショニング—質問紙調査の結果から—. *JSCSM.* 2017; 25: 435-444.
- 14) Yamanaka Y, Hashimoto S, Masubuchi S, et al. Differential regulation of circadian melatonin rhythm and sleep-wake cycle by bright lights and nonphotic time cues in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2014; 307: R546-557.
- 15) Cipolla-Neto J, Amaral FGD. Melatonin as a hormone: New physiological and clinical insights. *Endocr Rev.* 2018; 9: 990-1028.
- 16) Clausturat B, Leston J. Melatonin: Physiological effects in humans. *Neurochirurgie.* 2015; 61: 77-84.
- 17) van Faassen M, van der Veen A, van Ockenburg S, et al. Mass spectrometric quantification of urinary 6-sulfatoxymelatonin: age-dependent excretion and biological variation. *Clin Chem Lab Med.* 2020; 59: 187-195.
- 18) 宮脇晴己. 育成年代におけるエリートサッカー選手の選抜基準の検討. 筑波大学大学院人間総合科学研究群体育学学位プログラム令和3年度修士学位论文. 2021.
- 19) Härmä M, Laitinen J, Partinen M, et al. The effect of four-day round trip flights over 10 time zones on the circadian variation of salivary melatonin and cortisol in airline flight attendants. *Ergonomics.* 1994; 37: 1479-1489.
- 20) 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.* 1999; 53: 257-260.
- 21) 山仲勇二郎. 時間生物学: ヒトの生物時計と生体リズム. 体力科学. 2020; 69: 343-350.
- 22) Sack RL. The pathophysiology of jet lag. *Travel Med Infect Dis.* 2009; 7: 102-110.
- 23) Brown GM, Pandi-Perumal SR, Trakht I, et al. Melatonin and its relevance to jet lag. *Travel Med Infect Dis.* 2009; 7: 69-81.
- 24) Best J, Kim R, Reed M, et al. A mathematical model of melatonin synthesis and interactions with the circadian clock. *Math Biosci.* 2024; 377: 109280.
- 25) Forbes-Robertson S, Dudley E, Vadgama P, et al. Circadian disruption and remedial interventions: Effects and interventions for jet lag for athletic peak performance. *Sports Med.* 2012; 42: 185-208.
- 26) Eastman CI, Gazda CJ, Burgess HJ, et al. Advancing

- circadian rhythms before eastward flight: A strategy to prevent or reduce jet lag. *Sleep*. 2005; 28: 33-44.
- 27) Burgess HJ, Crowley SJ, Gazda CJ, et al. Preflight adjustment to eastward travel: 3 days of advancing sleep with and without morning bright light. *J Biol Rhythms*. 2003; 18: 318-328.
- 28) Stokkan KA, Yamazaki S, Tei H, et al. Entrainment of the circadian clock in the liver by feeding. *Science*. 2001; 291: 490-493.
- 29) Ruscitto C, Ogden J. The impact of an implementation intention to improve mealtimes and reduce jet lag in long-haul cabin crew. *Psychol Health*. 2017; 32: 61-77.
- 30) Roach GD, Sargent C. Interventions to minimize jet lag after Westward and Eastward flight. *Front Physiol*. 2019; 10: 927.
- 31) Yamanaka Y, Waterhouse J. Phase-adjustment of human circadian rhythms by light and physical exercise. *J Phys Fitness Sports Med*. 2016; 5: 287-299.
- 32) 星川雅子. 国際的に活躍するアスリートの時差対策の実際. 睡眠医療. 2020; 14: 45-51.