

# 博士論文

( 2014年 3月 28日 提出)

論文題目 蓄積疲労の兆候を検出する簡便なシステムの開発と現場での  
運用を通じた実用性の検証

指導教員 大須賀 美恵子



大学院 工学研究科  
博士後期課程 生体医工学 専攻

申請者氏名 山田 晋平



大阪工業大学大学院

## 目次

1. 緒言	…1
1.1. 背景および対象とする疲労の定義	…2
1.2. 疲労の検出手法と計測指標	…4
1.3. 目的と本論文の構成	…9
2. 疲労に対応して変化する指標の探索	…11
2.1. はじめに	…12
2.2. 方法	…12
2.2.1. 実験参加者	…12
2.2.2. 作業負荷	…12
2.2.3. 計測項目	…14
2.2.3.1. 主観指標	…14
2.2.3.2. 数値探索テスト	…14
2.2.3.3. 生理指標	…14
2.2.4. 実験手順	…15
2.2.5. データ解析	…16
2.2.5.1. 作業負担に関するデータ解析	…16
2.2.5.2. 疲労に関するデータ解析	…16
2.3. 結果	…17
2.3.1. 作業負担に関する結果	…17
2.3.2. 疲労に関する結果	…17
2.4. 考察	…38
2.4.1. 作業負担に関する考察	…38
2.4.2. 疲労に関する考察	…38
2.5. おわりに	…40
3. 長期間に亘る計測による蓄積疲労に対応して変化する指標の探索	…41
3.1. はじめに	…42
3.2. 方法	…42
3.2.1. 実験参加者	…42
3.2.2. 実験条件と実験日時	…42
3.2.3. 計測項目	…42

3.2.3.1. 主観的疲労	…42
3.2.3.2. 負荷・負担	…43
3.2.3.3. 作業成績	…43
3.2.3.4. 生理指標	…43
3.2.4. 実験手順	…44
3.2.5. データ解析	…44
3.3. 結果	…44
3.3.1. 主観的疲労	…44
3.3.2. 負荷・負担	…44
3.3.3. 作業成績	…44
3.3.4. 生理指標	…44
3.4. 考察	…49
3.4.1. 主観的疲労	…49
3.4.2. 負荷・負担	…49
3.4.3. 作業成績	…49
3.4.4. 生理指標	…49
3.5. おわりに	…51
4. 過重労働対策のための蓄積疲労の簡便な検出手法	…53
4.1. はじめに	…54
4.2. 方法	…54
4.2.1. 実験対象者と実施期間	…54
4.2.2. 計測システム	…55
4.2.3. 計測指標の定量化	…57
4.2.4. 蓄積疲労の兆候を検出する手法	…59
4.3. 結果	…61
4.3.1. 計測システムの使用状況	…61
4.3.2. 蓄積疲労の兆候の検出結果	…62
4.4. 考察	…66
4.4.1. 計測システムの受容性について	…66
4.4.2. 蓄積疲労の兆候を検出する手法の妥当性について	…67
4.5. おわりに	…68
5. 検出システムの現場での運用のための改良と評価	…69
5.1. はじめに	…70

5.2. 方法	…70
5.2.1. 計測システムの改良	…70
5.2.1.1. 設置手順の簡略化	…70
5.2.1.2. 立ち上げ手順の簡略化	…70
5.2.1.3. 計測における操作性の向上	…71
5.2.1.4. 計測時間の短縮	…71
5.2.2. フィールドと対象者の選定	…71
5.2.3. 実験方法	…72
5.2.4. 提案手法にて検出された日の妥当性の外的基準	…73
5.3. 結果	…76
5.3.1. 計測システムの設置	…76
5.3.2. 計測システムの立ち上げ手順	…77
5.3.3. 計測システムの操作性	…78
5.3.4. 計測時間	…78
5.3.5. 計測システムの運用状況	…79
5.3.6. 各指標の運用試験期間中の推移	…79
5.3.7. 提案手法による検出日の妥当性を検証するための外的基準	…79
5.3.8. 提案手法による検出日と外的基準の該当日との一致	…92
5.4. 考察	…105
5.4.1. 計測システムの運用状況の評価	…105
5.4.2. 提案手法の妥当性の評価	…105
5.4.3. 本手法を組み込んだスクリーニングシステムの開発に向けて	…107
5.5. おわりに	…109
6. 結語	…111
謝辞	…114
参考文献	…115
付録	…120
業績	…125



## 第 1 章 諸言

### 1.1. 背景および対象とする疲労の定義

労働において、疲労は作業効率の低下とメンタルヘルスの悪化などの一因となる。また近年、過重労働と過労死が社会的に問題となっている[1]。過重労働の対策として、平成 18 年度に改正された労働安全衛生法（第六十六条の八）では、労働者の健康の保持を考慮して厚生労働省令で定める要件に該当する労働者に対し、事業者には医師による面接指導の実施を義務付けている。この要件は「時間外労働が月 100 時間を超え、疲労の蓄積が認められ、申出を行った者」と定められており[2~5]、過労の原因となる負荷や負担の一部と本人の主観という限られた要因によって対象者が選定されている。この選定要件では面接が必要な労働者を見逃す恐れがあると考えられる。

効率的な過重労働対策を行うには疲労の蓄積を評価する方法が必要となるが、現状では確立されていない。その一因として「疲労」を扱う領域は、生理学、心理学、産業保健、人間工学、経営工学、安全工学、臨床医学など多様であり、これらの領域あるいは研究者の専門領域による疲労概念の相違が少なくないことが挙げられる[6]。井谷ら[6]は生理学と心理学における疲労の違いに関して Grandjean の論文[7]より「生理学者は疲労を単純に身体的なパフォーマンスの低下として捉えており、心理学者は精神・身体的活動性の低下をきたすものであり、自覚症状や意欲を含む」ものとして捉えている。また経営工学では疲労を作業効率に影響を与える経済的要因として扱い、臨床医学では労働や行動に起因する疲労ではなく疾病に伴う症状としての疲労感を扱っており、一言に疲労と言っても対象とする範囲が大きく異なる。さらに肉体疲労と精神疲労といった分類や、その現れる側面から倦怠感、不快感、脱力感などを自覚的疲労、作業能力の量的または質的低下を他覚的疲労、そして生理的機能の変化を生理的疲労とする分類[8]や、急性疲労、亜急性疲労、日周性疲労、慢性疲労といった休息要求の違いによる時間軸での分類（図 1.1）[9]が

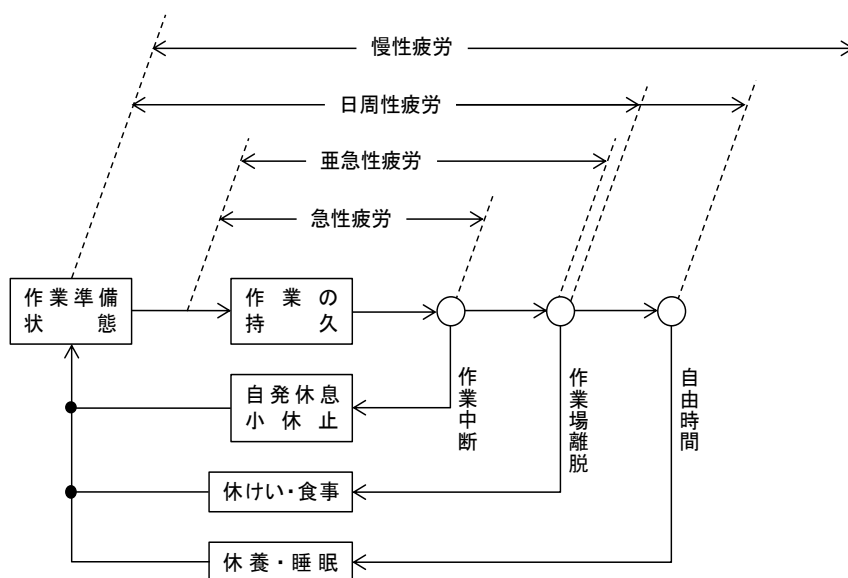


図 1.1 休息要求による疲労の分類（小木 1994）[9]

Fig.1.1 Classification of fatigue by request for rest (Kogi 1994) [9]

されている。研究に際しては、まず評価対象の定義とその要因を明確にする必要がある。本研究の目的は、過重労働対策として行われている医師による面接指導の対象者をスクリーニングするために疲労の蓄積を捉える手法を確立することと、この手法を組み込んだ労働の現場で運用可能なシステムを開発することである。この観点から対象とする疲労について整理する。

日本工業規格の「人間工学-精神的作業負荷に関する原則-用語及び定義」[10]（ISO10075[11]の日本語訳）に、精神的負荷(mental stress)や精神的負担(mental strain)などと共に、精神疲労(mental fatigue)の定義が示されている。精神的負荷は「外部から人間に対して作用を及ぼし、かつ、精神的に効果を与える評価可能な影響の全体」と定義されており、精神的負担に関しては「精神的負荷によって個々の人の内部に直ちに起こる効果であって、各人の対処様式を含み、個人の習慣及びそのときの事前条件に依存するもの」と定められている。精神疲労は、「先行する精神的負担の強さ、持続期間及び時間的パターンに依存する、精神的及び身体的機能の効率の一時的な減退。精神疲労の回復は、活動の変化よりむしろ回復作用によって達成される」とある。このように精神疲労は明確に定義されている。

しかし先行研究の多くにおいて、精神疲労と精神的負担は明確には区別されていない。これは精神的負荷を課している状態では、精神的負荷によって直ちに起こる精神的負担と、先行する精神的負担に依存する精神疲労が定義上、同時に存在することに起因していると考えられる。

ここで精神的負担と精神疲労を分けて検討するために、精神的負荷を課している時点ではなく精神的負荷後について考察する。精神的負荷の強度が小さく、作用している時間が短い場合には、精神的負荷を取り除けば精神的負担も速やかに消失すると考えられる。一方、精神的負荷が一定以上の強度を持ち、長時間持続してあるいは繰り返し作用した場合には精神的負担の蓄積が起これ、原因（精神的負荷）を取り除いても、直ちにその効果（精神的負担）が消えないと考えられる。この消えないで残った効果、その中でも「精神的及び身体的機能の効率の一時的な減退」にあたるものが精神疲労と考えられる。

しかし、平成13年12月12日付けの厚生労働省労働基準局長からの都道府県労働局長宛の通達[12]において、「脳・心臓疾患の発症に影響を及ぼす業務による明らかな過重負荷として、長期間にわたる疲労の蓄積を考慮すること」との記載があり、疲労を「一時的な」と定義するのは過重労働を念頭においた本研究では適さない。また長時間労働と脳血管疾患および虚血性心疾患等の発症との関係について複数の報告[13~15]があり、労働現場においては、疲労を一時的なものとしてではなく蓄積するものとして扱う必要があると考えられる。

ここで日本工業規格の精神疲労の定義を基に疲労の蓄積について整理する(図1.2)。先行する負担の大きさによっては、負荷後においても精神的および身体的機能の効率が減退したままとなる。この状態は負担を含まず疲労のみで構成されていると考えられる。この疲労に対して休養や睡眠が十分でない場合には、効率の減退は完全には解消されない可能性がある。この状態において新たに負荷が加われば、この疲労は回復せずに新たな疲労が発生すると考えられる。本研究ではこの回復に至らなかった疲労の中でも翌日以降に繰り返しているものを蓄積疲労とする。また休養



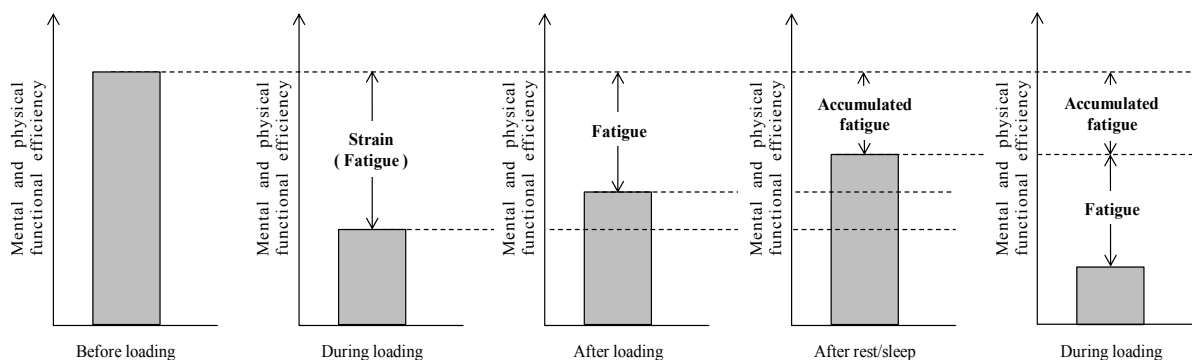


図 1.2 蓄積疲労の発生機序

Fig.1.2 Occurrence mechanism of accumulated fatigue

や睡眠が十分に得られないまま、新たな負荷が加わることが続き、精神的および身体的機能の効率の減退が慢性化した状態を慢性疲労として扱う。本研究で用いる疲労の検出手法は、疲労に関連する複数の指標の個人内変動を基にしているため慢性化した状態の検出には適さない。また予防の観点から慢性疲労に至る前の蓄積疲労の段階での検出が望ましいと考え、本研究では主に蓄積疲労を対象とする。

図 1.1 で示した休息要求の違いによる急性疲労、亜急性疲労、日周性疲労、慢性疲労の分類においても疲労の回復に要する時間によって同様に分類できると考える。

## 1.2. 疲労の検出手法と計測指標

疲労に関しては、様々な客観的評価法やマーカーが検討されているが、現時点では検証が十分とは言えない[16]。これは、疲労の概念が複合的で単独の指標による評価が適さないことと、指標値は個人差が大きく、絶対値による評価が困難であることが原因として考えられる。そこで本研究では、複数の指標について平均点と標準偏差で規格化した標準得点の変化をもって蓄積疲労兆候の検出を試みる。標準得点を用いて評価するには複数回の計測が必要となるため、特定の施設での専門家による計測は負担が大きく実用的ではない。そのため実験室に限らず家庭や職場などで計測が行えるシステムの開発が必要となる。そこで計測指標の選定に際しては、条件として実験室のような整った環境でなくても計測が行えるかについて考慮した。

疲労の現れ方は、①疲労感として、客観的には②出来高の量的または質的低下、および③作業能力または生理的機能の低下という三つの目印を持つ[17]と言われている。これは先ほどの自覚的疲労、他覚的疲労、生理的疲労の考え方や、日本工業規格にある精神的および身体的機能の効率の一時的減退にも通じる。これらの疲労の定義やその要因から、疲労を評価するには、疲労感などの主観的な訴え、作業能力の量的または質的な低下、身体的・生理的機能の変化を捉えるのが有効と考えられる。またこれらの原因となる先行する精神的負担の強さ、持続期間および時間的パターンも疲労を左右する要因として重要である。しかし、現行の過重労働の対策として行われている面接指導の対象者は、「時間外労働が月 100 時間を超え、疲労の蓄積が認められ、申出を

行った者」と定義されており、負担の持続時間および時間的パタンの一部と主観的な訴えしか考慮されておらず、作業能力や身体的・生理的機能の観点で抜け落ちている。

以上の観点を踏まえた上で評価指標を検討するに際して、精神疲労を対象とした先行研究の実験デザインについて整理する。岡本[18]や栗盛ら[19]の研究では、長時間の暗算作業を課した条件と、読書、テレビ視聴、音楽聴取などを行わせた条件とを比較して作業中の精神疲労について論じている。しかし、日本工業規格の定義と照らし合わせた場合には、精神疲労ではなく精神的負担の有無に関する検討となっている。また、吉村ら[20]は、作業中だけでなく作業前後の計測も行っており、先の定義における精神的負担だけでなく精神疲労も取り扱える研究デザインになっているが、作業中の指標値の推移に主眼が置かれている。作業前後の比較により、精神的負荷を取り除いても、直ちに消えない効果（精神的負担）としての精神疲労が検討されている研究はいくつか[21~25]ある。しかしこれらの研究では精神疲労の評価指標の検討ではなく、騒音強度[20]、事前に行った運動強度[22]、性格特性[23]といった条件の違いの検討が中心となっている。伊藤ら[24]や下野ら[25]の研究では、精神疲労の検討が主体となっているが、回復作用に関する検討はなされていない。

一方、植竹・村田ら[26,27]の研究、八谷ら[28]の研究では、日本工業規格における精神疲労の定義に基づいた実験デザインを用いている。植竹らは、事象関連電位 P300 を用いて検討を行っているが、P300 が精神疲労の指標として適切であるとの検証には至っていない。八谷らの研究では、作業前後と回復を経た後の3つの時点と比較しているのは主観指標のみで、生理指標については作業中の変化のみ調べている。以上より精神的負担の効果と、その蓄積によって起こる精神疲労を区別した実験デザインとなっている研究はいくつかある[21~28]が、主観指標、生理指標の両方について作業前後だけでなく回復作用を含めて検討を行っている研究は確認できなかった。

次に精神疲労を評価し得る指標の候補について述べる。これには精神疲労を対象とした研究に限らず、精神的負担の研究で用いられている指標が参考になる。これまで挙げた研究の多くで、主観指標は作業前後や条件間で有意な変化を示している。複数の研究にて用いられているものとして、Visual Analogue Scale(VAS)を用いた質問紙[18,19,20,29,30]がある。VASとは右側に「高い」や「非常に当てはまる」、左側に「低い」や「まったく当てはまらない」と表示した一定の長さの線分と設問を呈示し、設問への回答として線分上の該当する位置に印を付けさせる主観的な強度や程度の評価方法である。気分や情動を評価するものとして、日本語版 POMS (Profiles of Mood States) [30,31, 付録参照]がある。緊張-不安、抑うつ-落込み、怒り-敵意、活気、疲労、混乱の6項目からなり、疲労に限らない回答時の主観的側面の評価が行える。NASA-TLX (Task Load Index) [23,30,32,33]は、精神的要求、身体的要求、時間的圧迫感、作業達成度、努力、不満の6項目からなるメンタルワークロード（作業負荷・負担）の主観的評価尺度である。疲労を直接評価するものではないが、疲労は先行する負担によって発生するため疲労に関する研究においても有用性がある。

疲労に特化したものとしては、自覚症しらべ[34~37, 付録参照]、労働者の疲労蓄積度自己診断

チェックリスト[38,39, 付録参照], 蓄積的疲労兆候インデックス[40, 付録参照]などの質問紙が用いられている。自覚症しらは日本産業衛生学会産業疲労研究会で作成されたねむけ感, 不安定感, 不快感, だるさ感, ぼやけ感の 5 群からなる主観的疲労に関する質問紙である。各群 5 項目ずつ計 25 項目の設問に, 「まったくあてはまらない」から「非常によくあてはまる」までの 5 段階で回答を求める形式となっている。過去やここ最近の状態ではなく回答時の状態について回答を求める質問紙であり急性や亜急性の疲労を対象としている。対して, 労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストと蓄積的疲労兆候インデックスは蓄積疲労に着目した質問紙となっている。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストは, 厚生労働省労働基準局長名で出された「過重労働による健康障害防止のための総合対策について (基発第 0212001 号)」[41]の別紙 1 にて「過重労働による健康障害防止のための周知啓発」の一環として広く周知することとされた質問紙である。自覚症状に関する 13 項目と勤務状況に関する 7 項目の質問からなる。選択肢は「ほとんどない」, 「時々ある」, 「よくある」の 3 択で, それぞれ 0, 1, 3 点として 13 項目の合計点をもって自覚症状の評価を行う。このチェックリストは最近 1 か月間の症状や状況について尋ねる質問紙である。蓄積的疲労兆候インデックスは労働科学研究所にて開発された, 気力の減退 (9 項目), 一般的疲労感 (10 項目), 身体不調 (7 項目), イライラの状態 (7 項目), 労働意欲の低下 (13 項目), 不安感 (11 項目), 抑うつ感 (9 項目), 慢性疲労兆候 (8 項目) の 8 つの特性に分類される 81 の質問からなる質問紙である。近頃の自分について「あてはまる」, 「あてはまらない」の 2 択で回答する形式となっている。

作業能力の量的または質的な低下については, 精神的負荷として課した暗算作業の正答率や解答数が精神的負担の指標として用いられている。事象関連電位を用いた研究では, 作業前後に Oddball 課題を行わせ, 反応時間を指標としているが[18,26], 有意な差が示されていない。精神疲労を生じさせるための精神的負荷に加え, さらに別の作業を課し, その成績をもって評価する手法が試みられている。この観点での利用が検討されているものとして, ATMT (Advanced Trail Making Test) と呼ばれる視覚探索課題[42,43]がある。ATMT は実験参加者にタッチパネル上にランダムに配置された 1 から 25 までの数字に 1 から順番に触れさせ, ある数字に触れてから次の数字に触れるまでに要した探索時間を評価指標としている。手順としては, 1 に触れた時点で 1 を消して代わりに 26 を表示し, 次に 2 に触れた時点で 2 を消して代わりに 27 を表示させている。これを 25 に触れるまで繰り返させる。また数字に触れる度に, すべての数字の配置を変更させている。

生理指標に関しても, 精神疲労に限らず精神的負担を対象とした研究で用いられている指標も候補となり得る。心拍と心拍変動指標[19,20,30,44~53], 呼吸[20,25,28], 血圧 [19,20,29,45,46], 脈波 [22,28,44,46], 皮膚の電気伝導度 [30,45,46], 末梢の血液量や血流量[28,30,46]などの自律神経系指標, 脳波の  $\alpha$  帯域の平均周波数 [22],  $\beta$  波の振幅 [18]や事象関連電位 P300 の潜時 [18,26], フリッカー値 [19,20,22,24,55]などの中枢神経系指標, 血漿コルチゾール [18], 唾液中のコルチゾール [56,57]やアミラーゼ活性[58], 尿中カテコールアミン[19]などのバイオマーカー

など様々な指標が用いられている。フリッカー値とは高い周波数で点滅している光を、点滅していると知覚するか、それとも点滅していない連続光として知覚するかの閾値にあたる点滅周波数のことである。覚醒水準の低下によって周波数が低くないと点滅が知覚できなくなることを利用して疲労の評価に用いられる。

心電図は計測が容易なため、多くの研究で用いられている。また心臓の拍動のリズムは交感神経と心臓副交感神経の拮抗支配を受けていることから、この変動を基にこれらの神経の働きについての検討が試みられている。たとえば R-R 間隔変動係数(Coefficient of Variation of R-R interval:  $CV_{R-R}$ )を用いて評価が行われている。これは、心電図において最も振幅が大きい R 波の間隔における連続する 100 拍での変動係数（一定期間のデータにおいて、標準偏差を平均値で割り、100 をかけたもの）である。R-R 間隔またはこれから求めた瞬時心拍の周波数解析を行い、算出された特定の周波数帯のパワー値をもって自律神経系の評価が行われている。一般的に用いられている周波数帯域は 0.1Hz 前後 (0.04~0.15Hz) の低帯域周波数成分 (LF) とそれより高いおよそ 0.15~0.4Hz の範囲の高帯域周波数成分 (HF) である。LF は起立試験（横たわっている状態から強制的に身体を起す試験）により増加する[59]。身体を起こした際に脳への血流を維持するためには、交感神経の働きによって血圧の上昇や心拍数の増加といった反応が起こる。その際に LF が増加することから、LF は交感神経の活動に伴って変化することが知られている。しかし精神負荷や情報処理負荷の高い作業で減少するとの報告[60]もある。この一因として LF は、血圧の MayerWave が副交感神経のフィードバック系である圧受容体反射を関して心拍に現れるものであることから交感・副交感両方の支配を受けているためである。その機序から MWSA (Mayer Wave related sinus arrhythmia) と呼ばれる。また研究者によってはより狭い範囲 (MF:0.08- 0.12Hz 程度) を対象としている (図 1.3) [60]。HF は副交感神経遮断薬であるアト

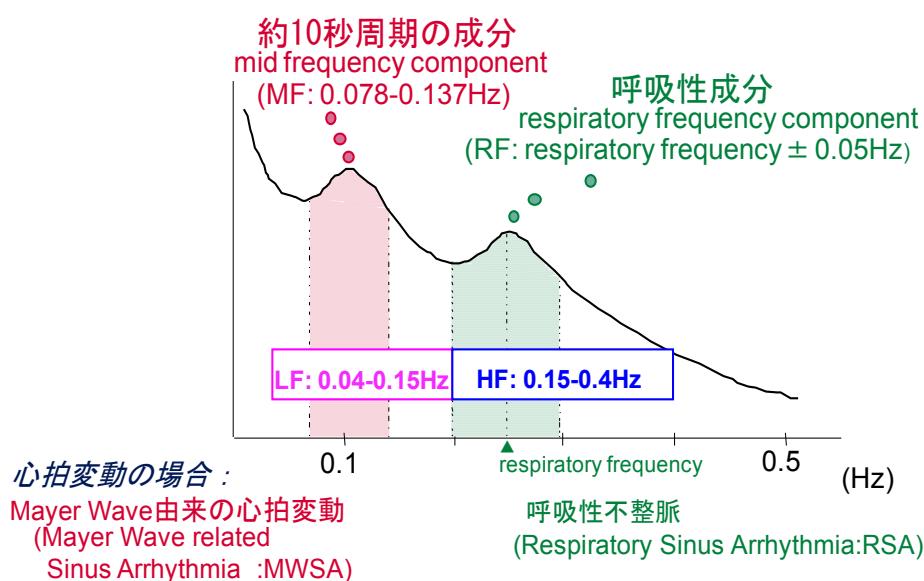


図 1.3 心拍変動指標

Fig.1.3 Heart rate variability

ロピンの投与によって消失することから副交感神経系の活動を反映する指標として用いられている。しかし呼吸周波数依存性が大きく、帯域の定義と呼吸周波数の関係にも依存し[60]、呼吸性不整脈（RSA: Respiratory sinus arrhythmia）や RF（呼吸周波数帯域成分）とも呼ばれる。また HF（RSA もしくは RF）に限らず、LF も呼吸の影響を強く受ける。これらの指標は統計解析を行うにあたって分布を正規分布に近づけるために対数を取る場合がある。また LF と HF の比は交感神経活動や交感・副交感のバランスの指標とされることがあるが、変化の要因が多様であり安易に用いない方がよいとの指摘がある[60]。心拍変動指標は呼称の違いだけでなく、その定義や定量化方法も異なるため研究結果を見る際には注意を要する。

疲労との関連についても脈波波形の拍動の間隔から算出したものを含め、様々な検討がされており [19,20,30,47~53]、群間比較では蓄積疲労の多い群で、心拍上昇、心拍変動指標の HF の低下、LF あるいは LF/HF の増加が報告されているもの[49,50]はあるが、個人内の変化に関する報告[53]は少ない。

これらの先行研究における心拍変動指標の結果に一貫した傾向がみられないのは、呼吸の統制が行われていないことに起因している[54]と考えられる。そのため計測の際には呼吸周期の統制もしくは呼吸波形の記録が必要と考えられる。

脈波、皮膚電気伝導度、末梢の皮膚組織血液量や血流量は、作業の継続に伴って有意な変化を示すこと[30]と、作業の難易度による違いが報告[46]されている。本研究では第 2 章にて光電式指尖容積脈波（Plethysmogram: PTG）、皮膚電気伝導水準（Skin Conductance Level: SCL）、鼻尖部皮膚組織血液量（Tissue Blood Volume: TBV）、鼻尖部皮膚組織血流量（Tissue Blood Flow: TBF）の計測を行った。PTG は校正脈波計(日本光電工業 MLV-2101A)を用い、DC 増幅で左手第 3 指より計測し、脈波の拍動波成分の振幅(計測波形から基線変動成分を除去した波形の標準偏差値)を指標として用いた。また脈波伝達時間（PTT: Pulse Transit Time）[60]を R 波のピークから速度脈波のピークまでの時間より算出した。PTT は血管の硬さと血圧によって決まり、この逆数が血圧の代用値として用いられることがある[60]。SCL は左手の拇指球と小指球間に電極（Ambu Blue Sensor NF-00-S）を装着し、皮膚電気活動測定ユニット(デジテックス研究所 AP-U030)にて計測した。TBV と TBF はレーザ血流計(OMEGAWAVE OMEGAFLOW FLO-C1) 31)を用いて鼻尖部より計測した。重心動揺は、装置に乗るだけで測れるため労働現場での計測は容易である。特にゲーム用のインタフェースとして開発された安価な Wii ボードでも重心動揺が精度良く測れることが報告されている[61]。蓄積疲労との関連については、過重労働者は重心軌跡外周面積が有意に大きいと報告されている[62]。重心動揺指標としては他にも、距離、面積、速度、振幅分布、ベクトル、パワースペクトルなどが評価に用いられている[63,64]。本研究では、重心の x, y 座標に FFT（Fast Fourier Transform）をかけて振幅スペクトルを求め、0.08~0.15 Hz の低周波数帯域成分（GR-LF）、0.15~0.5 Hz の高周波数帯域成分（GR-HF）を求めた。

脳波に関連する指標やフリッカー値などの中枢神経系の指標は本研究では検討対象から除外する。計測者の技量が未熟な場合、計測データにノイズが乗ることや、正確に測れないことがある

指標は、本研究が目指している労働者自身が精神疲労に関する計測を行う産業医による面接指導の対象者のスクリーニングシステムには適さないためである。

疲労やストレスに関連する内分泌系の指標は、いくつか報告 [18,19,56~58,61,65]されているが、採血や採尿が必要となり、労働現場において日常的に計測することは困難である。そこで簡易モニタを用いて、簡単な手技で計測が可能な唾液中のアミラーゼ活性(saliva Amylase Activity: sAA)を指標とする。sAA は、唾液アミラーゼモニター（ニプロ CM-2.1） [58]を用いて計測した

### 1.3. 目的と本論文の構成

本研究の最終目標は過重労働対策の一環である産業医による面接指導の対象者をスクリーニングするシステムの開発である。そのために本研究では、「蓄積疲労の兆候を検出する手法の確立」と「労働の現場で運用できるシステムの開発」の2つを目的とする。これらの目的の達成のために本研究では以下の手順（図 1.4）で検討を進める。本研究では複数の指標の組み合わせによって

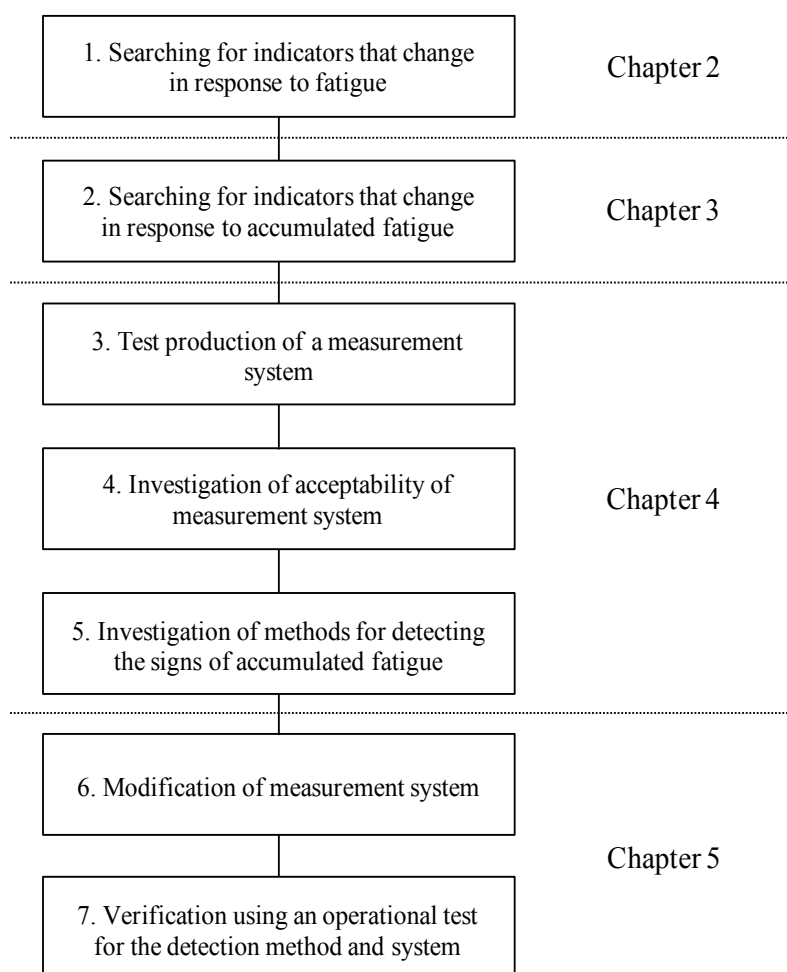


図 1.4 研究の手順

Fig.1.4 Study procedure

蓄積疲労の兆候の検出を試みる。そのためには、まず組み合わせる指標を見つける必要がある。また蓄積疲労を対象とする場合は実験参加者を長時間観察する必要があり、指標を探索する段階においては労力がかかりすぎる。そこで、まず第2章では「1. 疲労に対応して変化する指標の探索」をし、ここで見つかった指標を主な対象として、第3章にて「2. 蓄積疲労に対応して変化する指標の探索」を行った。第4章では、ここまでの探索で選別した指標を用いた「3. 計測システムの試作」を行い、学生を対象にした運用を通して「4. 計測システムの受容性の検討」と「5. 蓄積疲労の兆候を捉える手法の検討」を進めた。第5章においては第4章での検討を踏まえ、労働現場で運用できる実用性の確保を目標に「6. 計測システムの改良」を実施した。また実際に労働者を対象に運用を行い、検出手法の妥当性およびにシステムの受容性について「7. 検出手法とシステムの運用試験による検証」を行った。

## 第 2 章 疲労に対応して変化する指標の探索



## 2.1. はじめに

本章では、疲労に対応して変化する指標の探索を行う。それに伴い、まず本章で扱う疲労の定義を確認する。日本工業規格では、精神疲労を「先行する精神的負担の強さ、持続期間及び時間的パターンに依存する、精神的及び身体的機能の効率の一時的な減退。精神疲労の回復は、活動の変化よりむしろ回復作用によって達成される」[9]と定義している。また精神的負担を「精神的負荷によって個々の人の内部に直ちに起こる効果であって、各人の対処様式を含み、個人の習慣及びそのときの事前条件に依存するもの」[9]と定めている。

この章ではこの定義に基づき、負荷中だけでなく負荷後においても精神的および身体的機能の効率が減退したままの状態を疲労として扱う（図 1.2）。ここではこの疲労に対応して変化する指標の探索を目的とする。実験参加者に疲労が十分に生じると考えられる強さと持続期間および時間パターンを持つ精神的負荷（20 分間×5 セットの暗算作業）を課す。この前後（PRE, POST1）と回復作用を経た（休息を取った）後（POST2）の 3 つの時点と比較することで、精神的負担ではなく疲労に対応して変化する指標の探索を試みる。この実験デザインにおける疲労の要件は、作業前（PRE）に比べて作業後（POST1）で有意に増大（減少）し、休息後（POST2）で元の状態に戻る（山型もしくは谷型の変化パターンを示す）ことである。ただし、必ずしも休息後（POST2）に完全には元の状態に戻らなくとも構わない。これは疲労の大きさに比べて休息の時間が短い、もしくは休息の質が悪い場合には回復が十分に起こらないと考えられるためである。なお本章においては実験デザインからも明らかなように、疲労の中でも急性疲労もしくは亜急性疲労を対象としている。

## 2.2. 方法

### 2.2.1. 実験参加者

実験参加者は 18~24 歳（平均年齢 21.0 歳）の健康な男子大学生 15 名である。事前に文書と口頭により実験内容を説明し、文書による承諾を得た。また実験終了後には定額の謝金を支払った。実験の参加に際しては、十分な睡眠を取り実験の前日および当日は過度の運動とカフェインの摂取を控えるよう指示し、実験前に指示が守られていることを口頭で確認した。なお本実験は産業医科大学倫理委員会の承認を得た上で行われた。

### 2.2.2. 作業負荷

実験参加者に疲労を起こさせるための精神的負荷として MATH と呼ばれる暗算課題[66]に基づいた暗算作業を 100 分間（20 分間×5 試行）行わせた。液晶モニタ上に計算式（図 2.1）を 2 秒間、次に「EQUALS」の文字を 1.5 秒間提示した後に解答（図 2.2）を 1.5 秒間表示する。応答はマウスで行い、解答が正しければ左クリック、間違っていれば右クリックする。なお応答の有無や正誤に関わらず、解答表示 1.5 秒後には次の計算式を提示する。計算式の難易度は 2 桁同士の加算からなる Level 1 から 3 桁から 2 桁を引く減算からなる Level 5 までの 5 段階からなる。

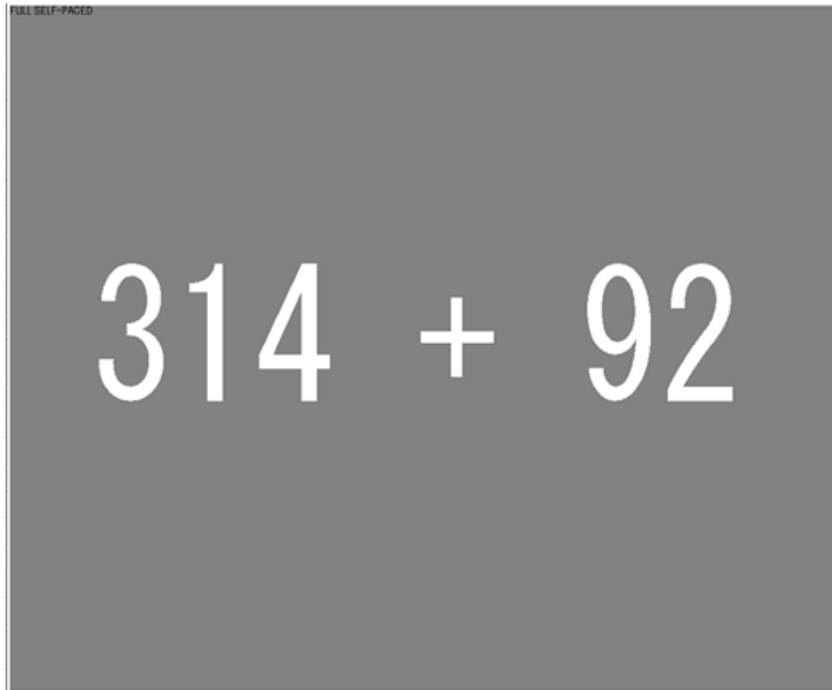


図 2.1 計算式の呈示画面の一例

Fig.2.1 Screen image of calculating formula



図 2.2 解答の呈示画面の一例

Fig.2.2 Screen image of solution

この Level を応答の有無や正誤によって上下させることにより、実験参加者の計算能力に応じた精神的負荷をかけることができる。本章ではパフォーマンスの指標に正答率と正解した計算式の Level（難易度）の平均値（以下、正答レベル）を用いた。

### 2.2.3 計測項目

#### 2.2.3.1 主観指標

VAS による主観評価では、疲れ、眠気、いらいら、緊張、うんざり、憂うつ、不安、努力の 8 項目について、液晶モニタ上に右側に「高い」、左側に「低い」と表示した線分を提示しマウスを用いて線分上のスライダーの位置を操作させた。VAS は生理指標と対応させるため回答時点ではなく、その直前の安静中や暗算作業中の状態について回答するように教示した。

日本語版 POMS[付録参照]は実験デザインに従い、PRE、POST1、POST2 の直後の 3 つの時点で回答時の状態について回答させた。また設問は液晶モニタに表示しマウスにて回答させた。

NASA-TLX は作業負荷が精神的なもので身体的負担がかかっていないことを確認するために、合計 100 分間の暗算作業について回答させた。

#### 2.2.3.2 数値探索テスト

数値探索テスト(Sequential Digit Search Test: SDST)は、ATMT (Advanced Trail Making Test) のアルゴリズムに基づいた視覚探索課題である。1 に触れてから 25 に触れるまでの 24 個の探索時間の平均 (T) を評価指標として算出した。また、2 桁の数字の中から、1 桁の数字を探すのは容易であり、探索時間が短くなると考えられるため、1 に触れてから 9 に触れるまでの 8 個の探索時間の平均 (T<sub>1-9</sub>) と、9 に触れてから 25 に触れるまでの 16 個の探索時間の平均 (T<sub>10-25</sub>) を算出した。なお実施に際しては、数字が出る位置の違いに因る探索時間のばらつきを考慮して、25 まで触れるテストを 3 回連続で行わせた。このテストは作業負荷 (MATH) に伴う作業能力の低下を評価するために行わせた。

#### 2.2.3.3 生理指標

心電図 (Electrocardiogram: ECG)、呼吸 (Respiration: RSP)、光電式指尖容積脈波 (Plethysmogram: PTG)、皮膚電気伝導水準 (Skin Conductance Level: SCL)、鼻尖部皮膚組織血液量 (Tissue Blood Volume: TBV)、鼻尖部皮膚組織血流量 (Tissue Blood Flow: TBF)、唾液のアミラーゼ活性 (saliva Amylase Activity: sAA) の計測を行った。心電図は胸部 CM<sub>5</sub> 導出により計測した。評価指標として、心拍変動指標を算出した。本研究で用いた心拍変動指標の算出方法は以下の通りである。心電図波形から R 波を検出して R-R 間隔トレンドグラムを作成した上で、デジタルフィルタにより約 0.04Hz 以下の基線変動成分を除去した。その上で 3 次スプライン補間を行い、500ms で再サンプリングし、等時間間隔時系列に変換した。その後、次数を 10 次に固定して自己回帰スペクトルを求め、総パワー値 (Total Power: T-P) を算出すると共に、その要

素波から 0.1Hz 付近にピークを持つ低周波成分 (LF:0.05~0.15Hz) と高周波成分 (HF:0.15~0.40Hz) を抽出し, LF/HF 比を算出した. なお要素波に分解する過程で解が収束しない場合は, 随時次数を 1 つずつ下げて計算をやり直した. 次数が 7 次以下となった場合には, 11 次から順に 13 次まで算出して, 適切な次数について検討した. また, それぞれの対数値 ( $\ln(T-P)$ ,  $\ln(LF)$ ,  $\ln(HF)$ ,  $\ln(LF/HF)$ ) と, R-R 間隔変動係数( $CV_{R-R}$ ), 心拍数 (HR) を算出した.

呼吸の計測は, 呼吸ピックアップ (株式会社デジテックス研究所 AP-CO21) を腹部に装着して行った. 心拍変動指標を検討する際には, 呼吸振幅と呼吸の速さが HF 成分に影響を与えることから, 呼吸の統制が望ましい. しかしながら本実験においては呼吸統制を意識しすぎると暗算作業への集中が疎かになる恐れがあるため呼吸統制は行わず, 呼吸曲線の記録に留めた. 呼吸の周期 (Resp Period: RSP-P) と振幅 (Resp Amplitude: RSP-A), およびその不安定性を示す指標として, それぞれの標準偏差 (RSP- $P_{SD}$ , RSP- $A_{SD}$ ) を求めた. ECG, RSP, PTG, SCL のデータの記録は, 小型生体アンプ(デジテックス研究所 Polymate AP1124)を用い, TBV, TBF はデータロガー (キーエンス NR-2000) を介して, 全ブロックのデータをパソコンに記録した. サンプル周波数は ECG: 1000Hz, RSP: 500Hz, PTG: 100Hz, SCL: 100Hz, TBV, TBF: 100Hz とした.

#### 2.2.4 実験手順

実験前に実験環境に慣れさせるために 10 分間の順応時間を取り, その後, 作業前の安静 (PRE1), 100 分間 (20 分間×5 試行) の MATH による作業 (TASK1~5), 作業後の安静 (POST1), 20 分間の休息, 休息後の安静 (POST2), 5 分間の暗算作業 (TASK6) の順に実施した (図 2.3). TASK6 は 100 分間の暗算作業により低下した正答率と正答レベルの休息による回復をみるために実施した. 順応と休息は座位にて行わせ, 「楽にしてください」と教示し, 開眼と閉眼については指示しなかった. 安静は開眼座位にて行わせ, 「正面のモニタの中心を眺め, できるだけ動かないように」と教示した.

実験中は, ECG, RSP, PTG, SCL, TBV, TBF の記録を行った. sAA を計測するための唾液の採取, 各種主観指標 (VAS, POMS) への回答, SDST の実施は図 2.1 に示す時点・順序で行った. TASK5 後の SDST を行う前に TASK1~5 全体について NASA-TLX の回答を求めた. この順序で行ったのは TASK ではなく SDST について評価してしまうのを防ぐためである. なお作業後の SDST と POMS は POST1 の回復作用を避けるため, POST1 の前, つまり TASK5 後のデータを採用した.

sAA と VAS は採取や回答した時点ではなく, その前の状態を反映しているため, この順序で行った. 暗算作業, SDST, 各種主観評価の実施には, これらを統合したプログラムセット S.I.M.P.L.E. を用いた [67]. なお MATH と SDST は作業内容と応答方法の理解のため, 実験日の前日までに数分間の練習を行わせた.

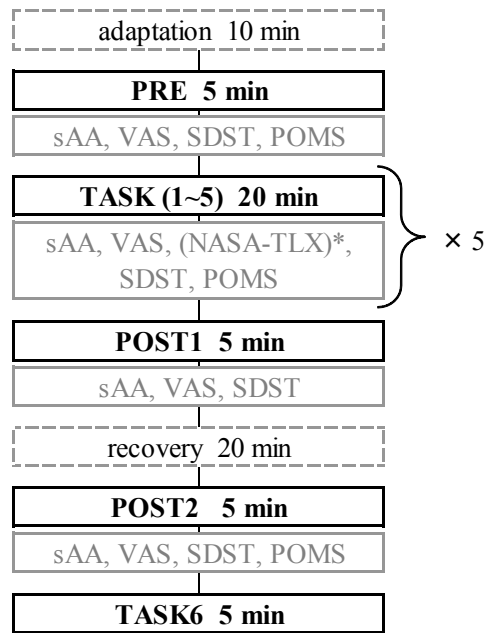


図 2.3 実験手順

Fig.2.3 Experimental procedure

sAA: saliva Amylase Activity, VAS: Visual Analog scale, SDST: Serial Digit Search Test, POMS: Profiles of Mood State, NASA-TLX: NASA Task Load Index

Physiological signals were continuously recorded during all experimental blocks.

\*: NASA-TLX was answered after TASK5.

## 2.2.5 データ解析

### 2.2.5.1 作業負担に関するデータ解析

暗算による作業負担が適切であったことを確認するため、暗算作業に伴う変化を主観指標を用いて検討した。TASK1~5の後に行われたVASとSDSTの5回分のデータと、TASK1~6における暗算作業の成績(正答率, 正答レベル)について繰り返しのある一元配置分散分析を行った。Mauchlyの球面性検定の結果、球面性の仮定が成り立たないときはGreenhouse-Geisserの自由度の補正をし、主効果が認められたものは多重比較(Bonferroni法)を行った。有意水準は5%として統計解析ソフトウェアのSPSS(11.0J)を用いて解析した。

### 2.2.5.2 疲労に関するデータ解析

「2.1はじめに」で述べたように、精神的負担ではなく疲労に対応して変化する指標を探索するために計100分間の暗算前(PRE)、暗算後(POST1)と休息後(POST2)の3時点で比較を行う。主観指標(VAS, POMS), SDSTの探索時間, 各種生理指標について、作業負担と同様の統計解析を行った。

## 2.3. 結果

### 2.3.1 作業負担に関する結果

VASによる8項目(疲れ, 眠気, いらいら, 緊張, うんざり, 憂うつ, 不安, 努力)の主観評価の分散分析の結果(図 2.4~2.11), 疲れ, 眠気, うんざり, 憂うつにおいて主効果が認められた(疲れ( $F(2.72,40.81) = 8.64, p < 0.001, \epsilon = 0.68$ ), 眠気( $F(2.14,32.04) = 4.66, p < 0.05, \epsilon = 0.53$ ), うんざり( $F(2.16,32.32) = 3.89, p < 0.05, \epsilon = 0.54$ ), 憂うつ( $F(2.33,34.88) = 5.34, p < 0.01, \epsilon = 0.58$ )). うんざりと憂うつは多重比較において有意差が認められなかった. その他の項目(いらいら, 緊張, 不安, 努力)には主効果が認められなかった.

作業成績については暗算作業(TASK1~6)における正答率(図 2.12)と正答レベル(図 2.13)の分散分析の結果, 正答率に主効果が認められた(正答率( $F(2.37,35.49) = 4.80, p < 0.001, \epsilon = 0.47$ )). 暗算作業(TASK1~5)に対応した時点におけるSDSTの探索時間(T, T<sub>1-9</sub>, T<sub>10-25</sub>)(図 2.14)の分散分析の結果, 主効果は認められなかった.

### 2.3.2 疲労に関する結果

VASの8項目(疲れ, 眠気, いらいら, 緊張, うんざり, 憂うつ, 不安, 努力)(図 2.15~2.22)については, 疲れ, 緊張に主効果が認められた(疲れ( $F(2,30) = 6.65, p < 0.01$ ), 緊張( $F(1.19,17.82) = 5.37, p < 0.05, \epsilon = 0.59$ )). POMSの6項目(緊張-不安, 抑うつ-落込み, 怒り-敵意, 活気, 疲労, 混乱)(図 2.23-2.28)については, すべての項目で主効果が認められた(緊張-不安( $F(1.22,17.03) = 12.10, p < 0.01, \epsilon = 0.61$ ), 抑うつ-落込み( $F(2,28) = 3.85, p < 0.05$ ), 怒り-敵意( $F(2,28) = 7.28, p < 0.01$ ), 活気( $F(2,28) = 10.53, p < 0.001$ ), 疲労( $F(2,28) = 28.55, p < 0.001$ ), 混乱( $F(2,28) = 9.60, p < 0.05$ )).

PRE, POST1, POST2におけるSDSTの探索時間(T, T<sub>1-9</sub>, T<sub>10-25</sub>)(図 2.29)は, T, T<sub>1-9</sub>, T<sub>10-25</sub>のすべてに主効果が認められた(T( $F(2,30) = 5.09, p < 0.05$ ), T<sub>1-9</sub>( $F(2,30) = 4.87, p < 0.05$ ), T<sub>10-25</sub>( $F(2,30) = 3.64, p < 0.05$ )).

各種生理指標についても分散分析の結果, 複数の指標で主効果が認められた. 心拍変動指標(ln(T-P), ln(LF), ln(HF), ln(LF/HF), CV<sub>R-R</sub>)(図 2.30~2.34)については, ln(T-P), ln(LF), CV<sub>R-R</sub>に主効果が認められた(ln(T-P)( $F(2,18) = 6.41, P < 0.01$ ), ln(LF)( $F(2,18) = 4.37, P < 0.05$ ), CV<sub>R-R</sub>( $F(2,18) = 5.61, P < 0.05$ )). またHR(図 2.35)も主効果が認められた(HR( $F(2,18) = 13.47, P < 0.001$ )). 呼吸に関する指標(RSP-P, RSP-P<sub>SD</sub>, RSP-A, RSP-A<sub>SD</sub>)(図 2.36~2.39)では, RSP-P<sub>SD</sub>の主効果に有意傾向が認められた. その他の生理指標(PTG, SCL, TBV, TBF, sAA)においては, TBF(図 2.40)のみに主効果が認められた(TBF( $F(1.02,14.21) = 4.68, P < 0.05, \epsilon = 0.51$ )). しかし, 多重比較に有意差は認められなかった. またTBV(図 2.41)の主効果に有意傾向が認められた. なお, 心拍変動指標とHRについては心電図にノイズが混入した対象者を解析から除外したためn数が10となった. またTBFとTBVについては実験中にセンサの外れた対象者を除外し, n数が15となった.

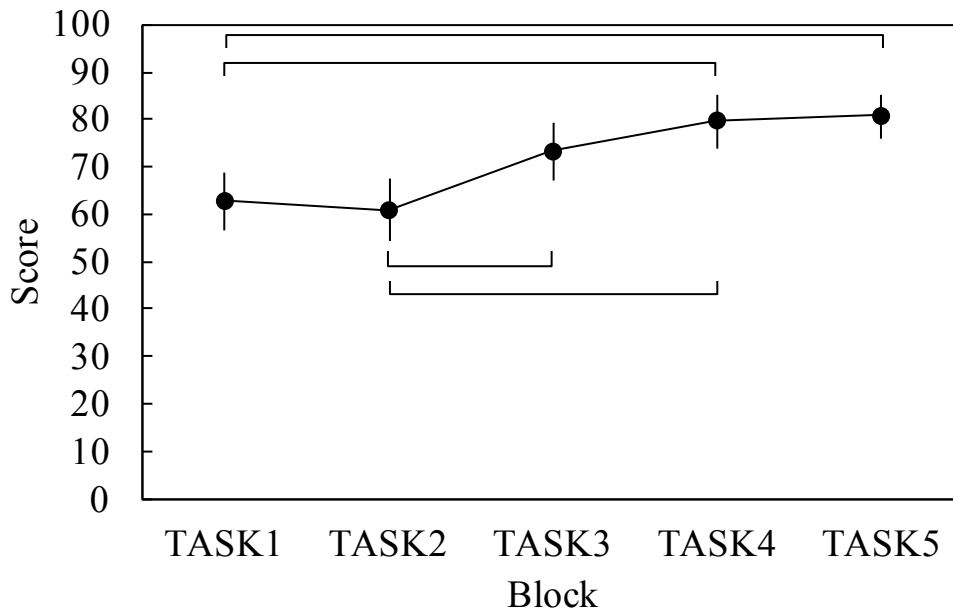


図 2.4 VAS の疲れの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.4 Change in VAS (Visual Analog Scale) fatigue (n=16, mean±SE)

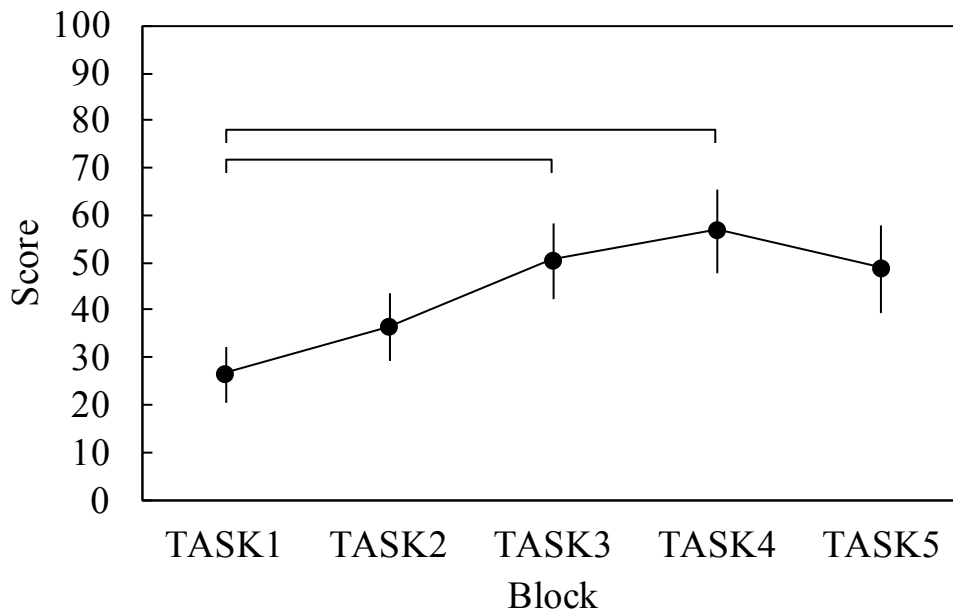


図 2.5 VAS の眠気の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.5 Change in VAS (Visual Analog Scale) sleepiness (n=16, mean±SE)

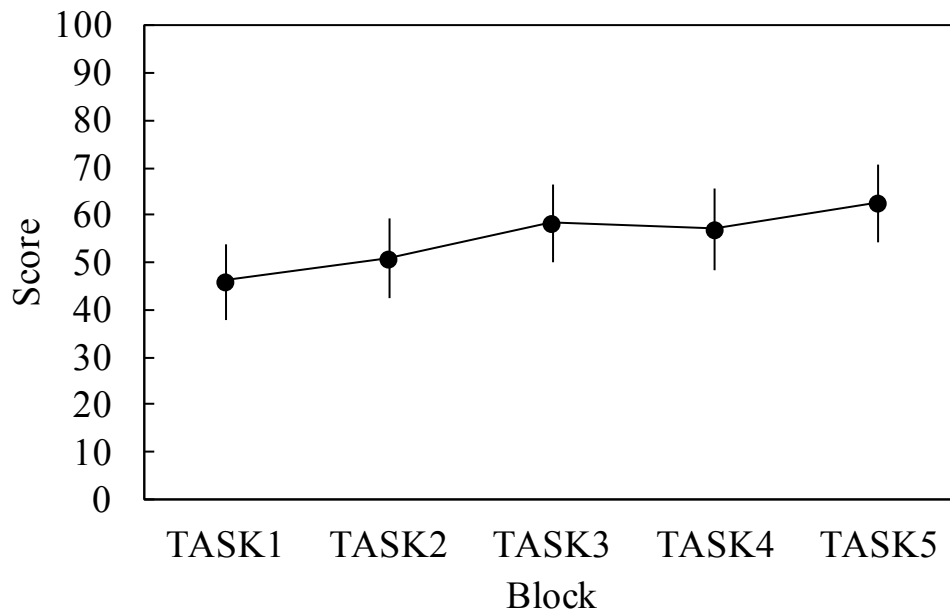


図 2.6 VAS のいらいらの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.6 Change in VAS (Visual Analog Scale) irritation (n=16, mean±SE)

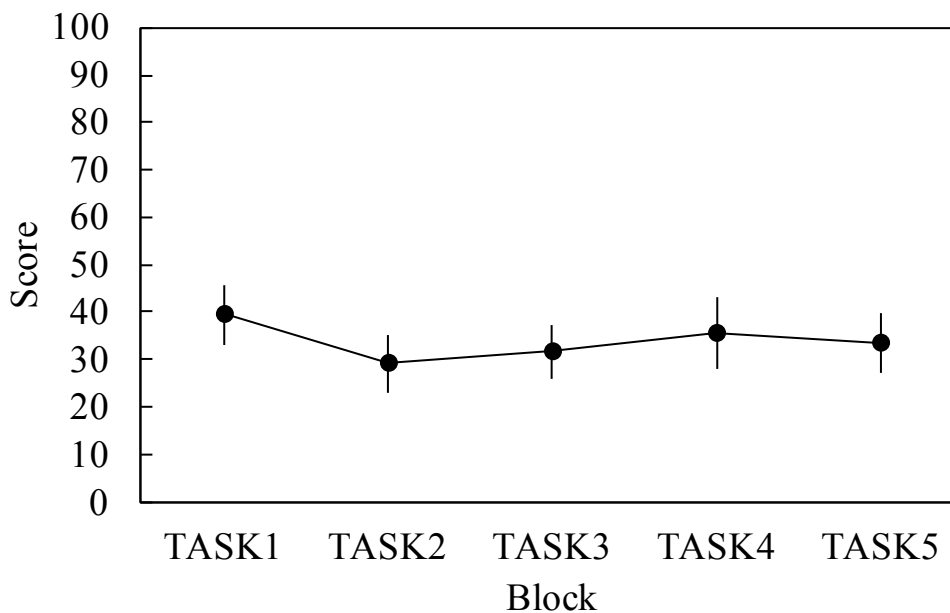


図 2.7 VAS の緊張の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.7 Change in VAS (Visual Analog Scale) tension (n=16, mean±SE)



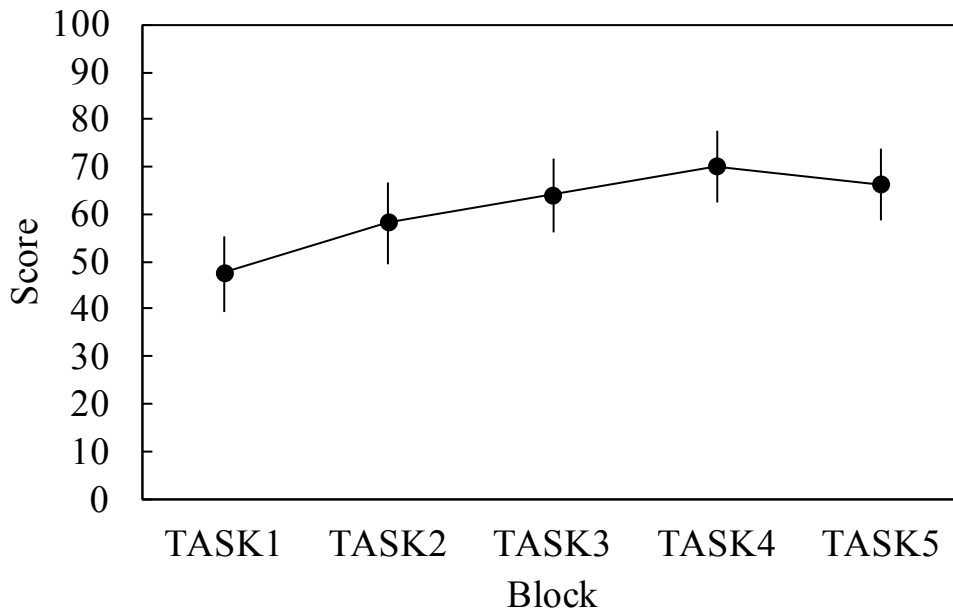


図 2.8 VAS のうんざりの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.8 Change in VAS (Visual Analog Scale) boredom (n=16, mean±SE)

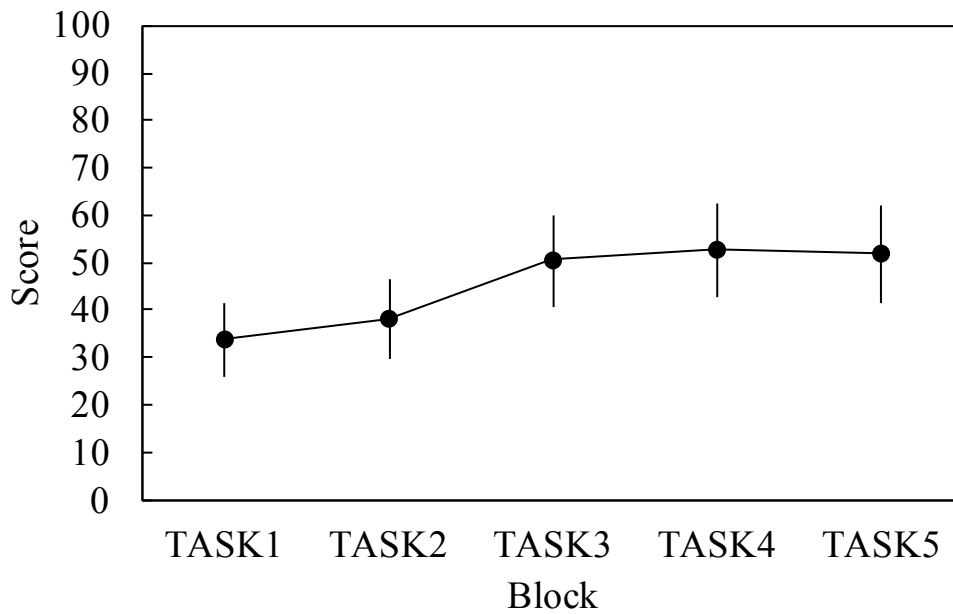


図 2.9 VAS の憂うつの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.9 Change in VAS (Visual Analog Scale) depression (n=16, mean±SE)

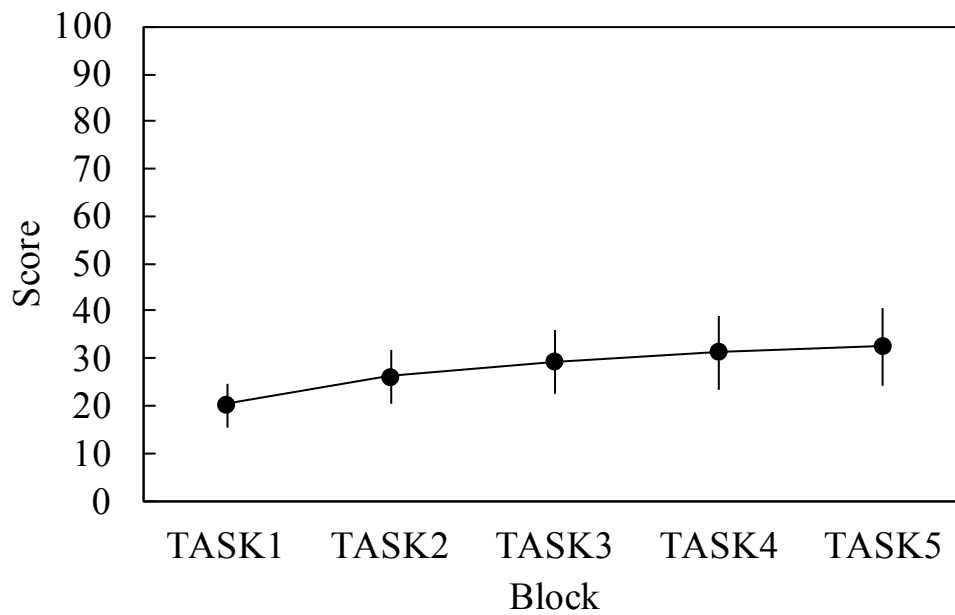


図 2.10 VAS の不安の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.10 Change in VAS (Visual Analog Scale) anxiety (n=16, mean±SE)

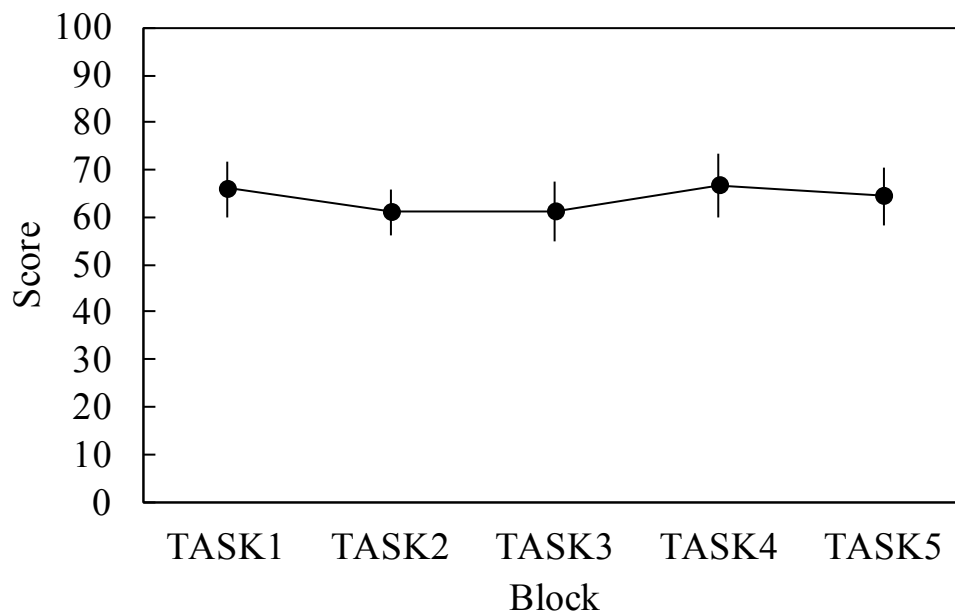


図 2.11 VAS の努力の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.11 Change in VAS (Visual Analog Scale) effort (n=16, mean±SE)

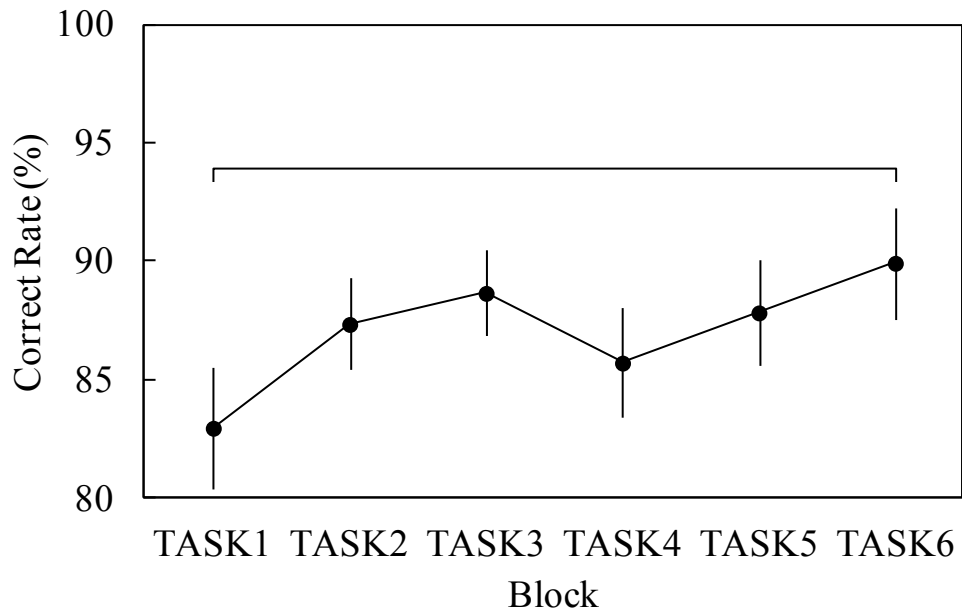


図 2.12 正答率の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.12 Change in correct rate (n=16, mean±SE)

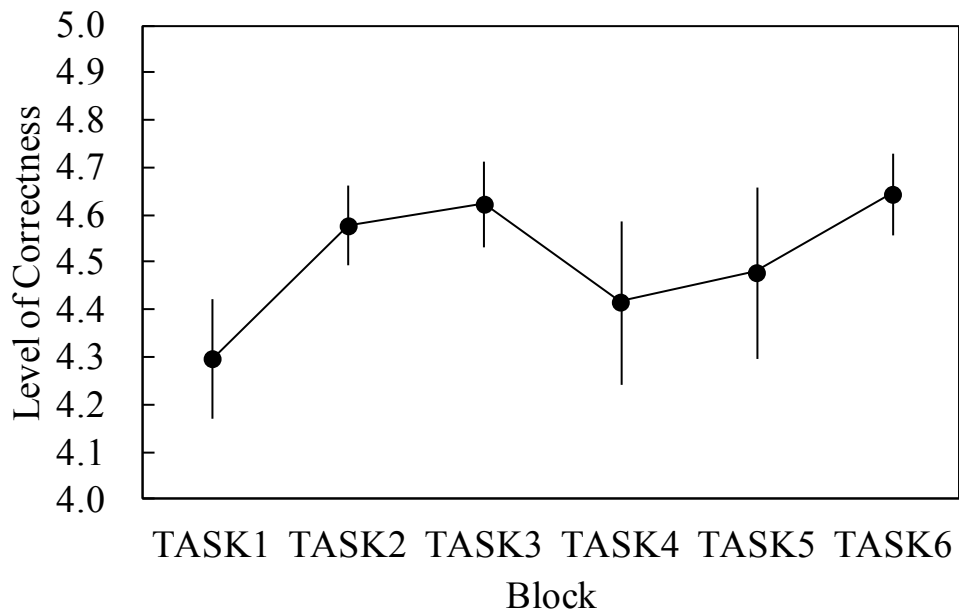


図 2.13 正答レベルの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.13 Change in level of correctness (n=16, mean±SE)

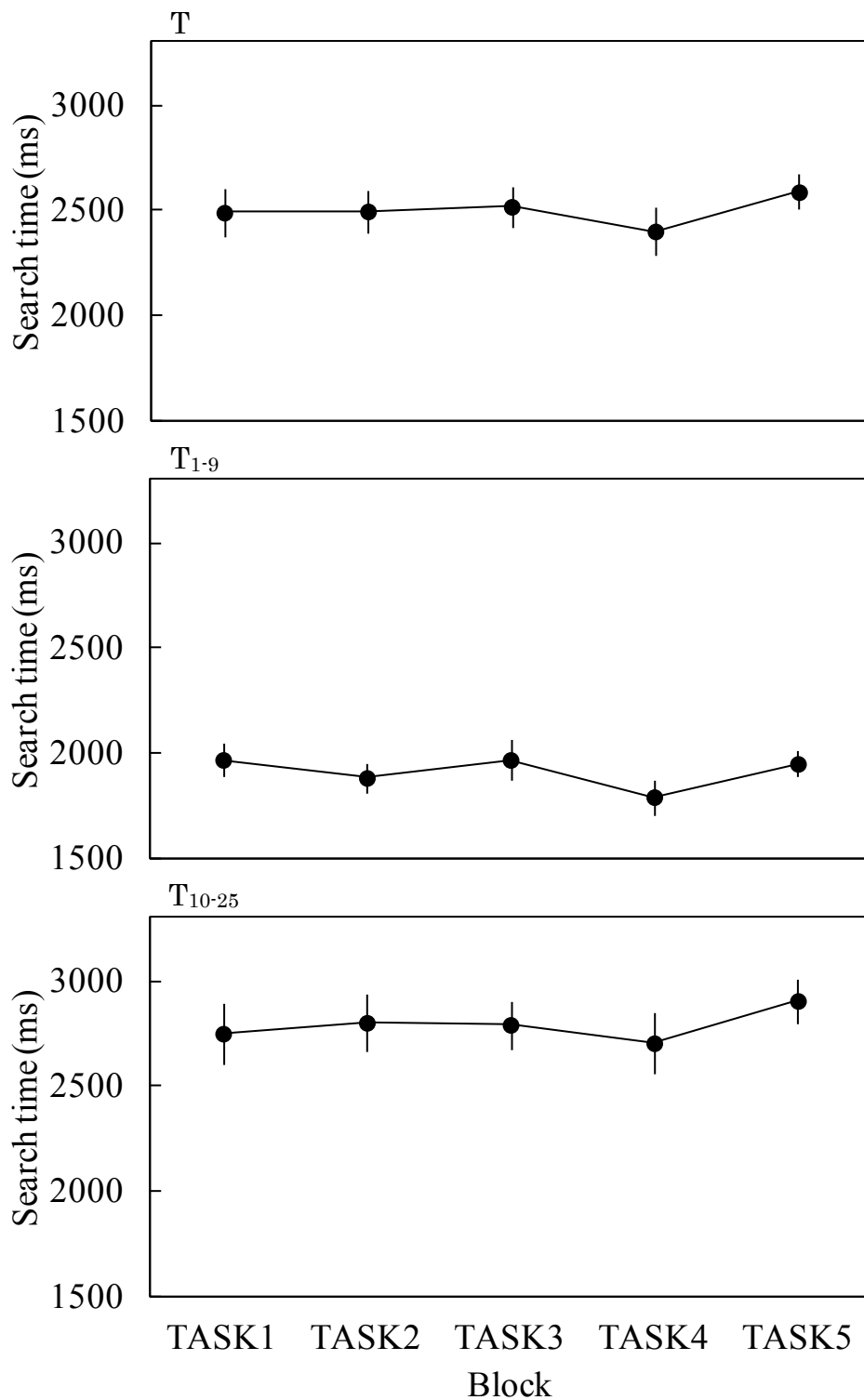


図 2.14 探索時間の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.14 Change in search times (n=16, mean±SE)

T: The mean search time of all. T<sub>1-9</sub>: The mean search time of the series 1 to 9. T<sub>10-25</sub>: The mean search time of the series 10 to 25.

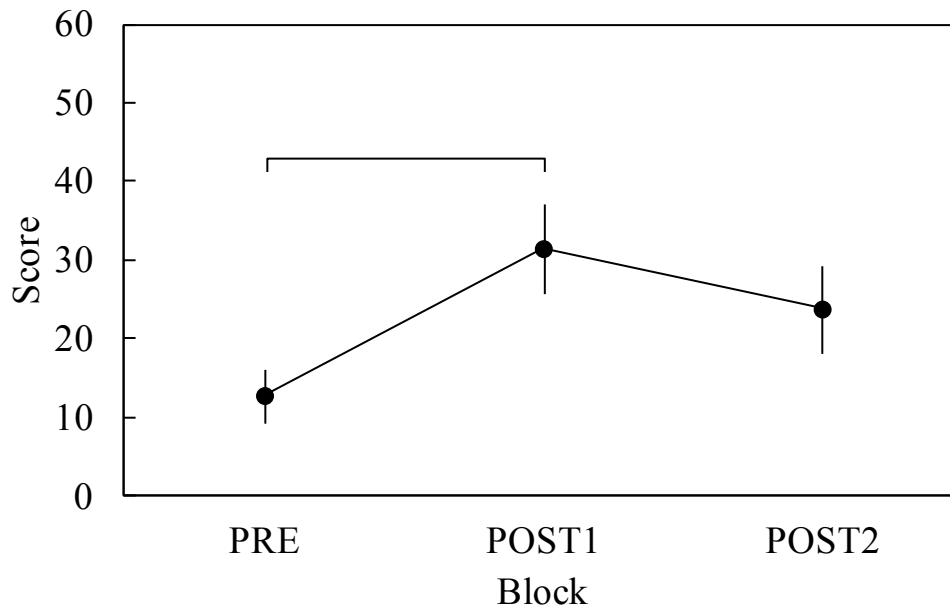


図 2.15 VAS の疲れの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.15 Change in VAS (Visual Analog Scale) fatigue (n=16, mean±SE)

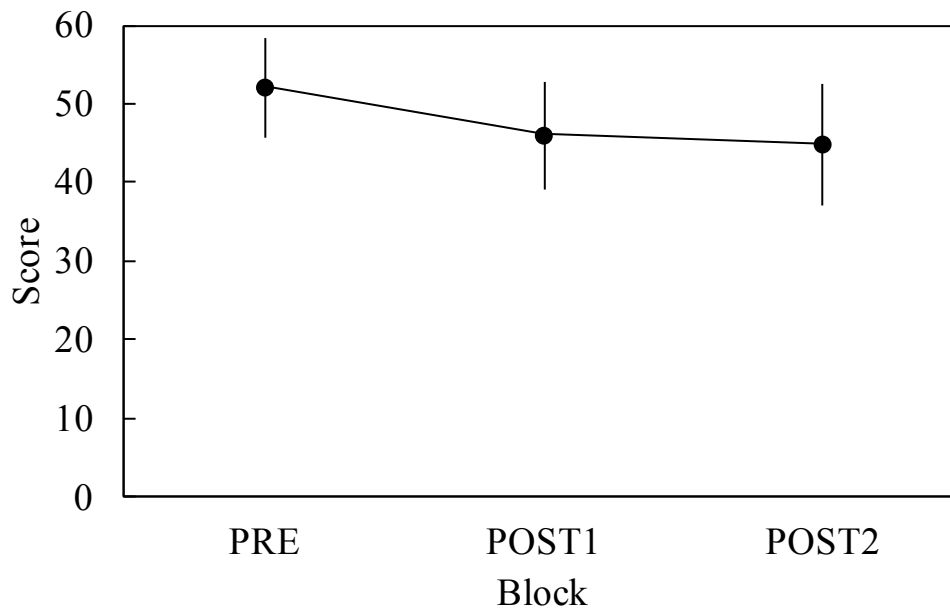


図 2.16 VAS の眠気の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.16 Change in VAS (Visual Analog Scale) sleepiness (n=16, mean±SE)

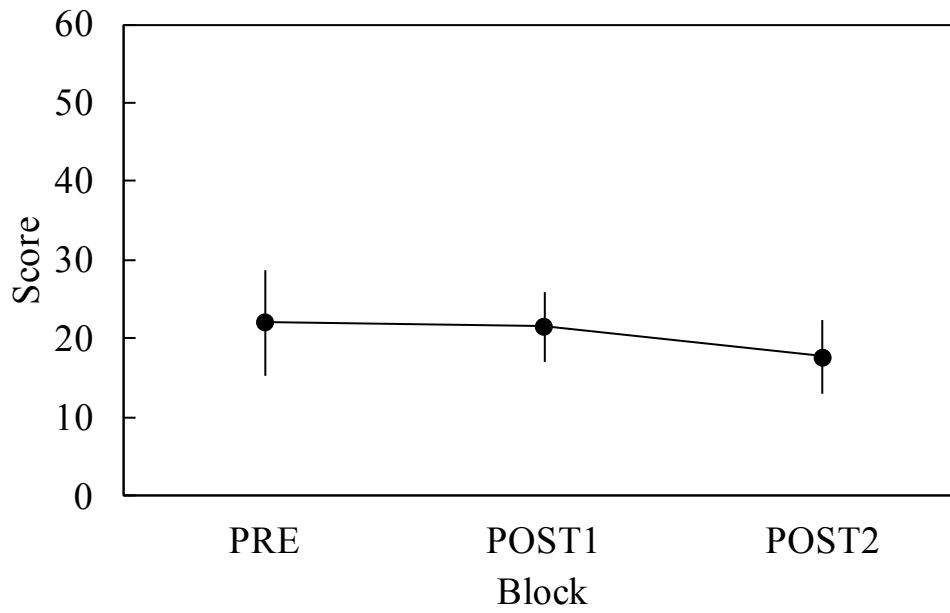


図 2.17 VAS のいらいらの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.17 Change in VAS (Visual Analog Scale) irritation (n=16, mean±SE)

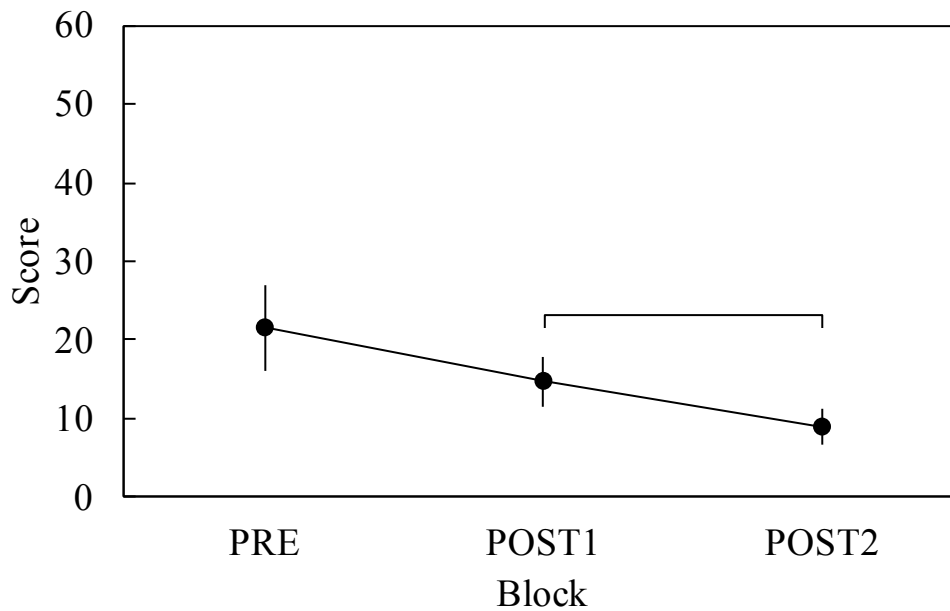


図 2.18 VAS の緊張の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.18 Change in VAS (Visual Analog Scale) tension (n=16, mean±SE)

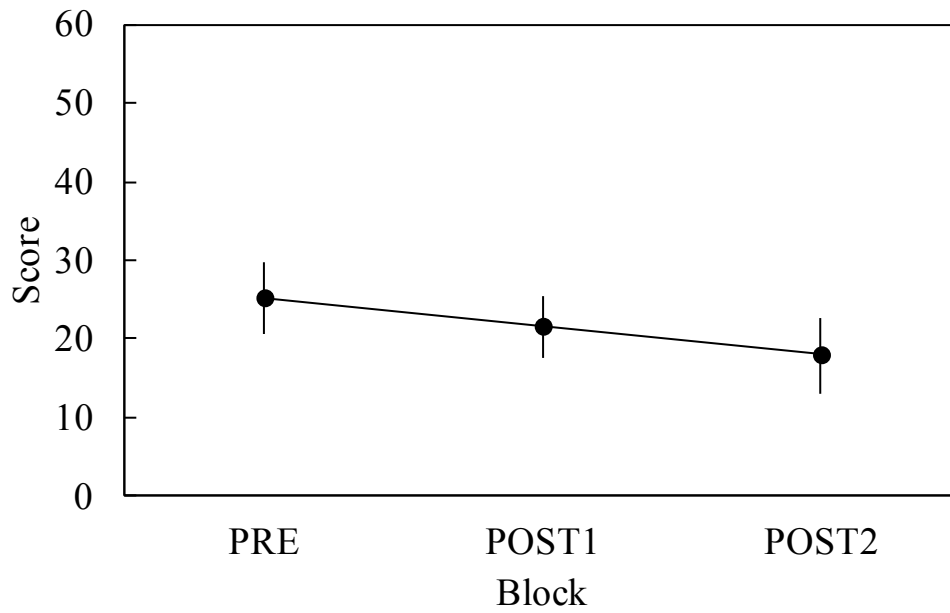


図 2.19 VAS のうんざりの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.19 Change in VAS (Visual Analog Scale) boredom (n=16, mean±SE)

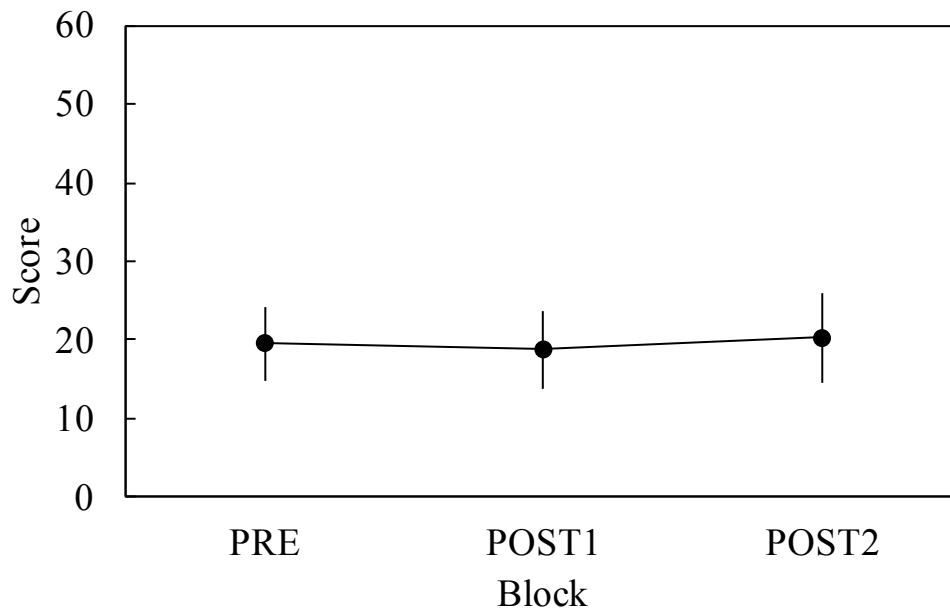


図 2.20 VAS の憂うつの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.20 Change in VAS (Visual Analog Scale) depression (n=16, mean±SE)

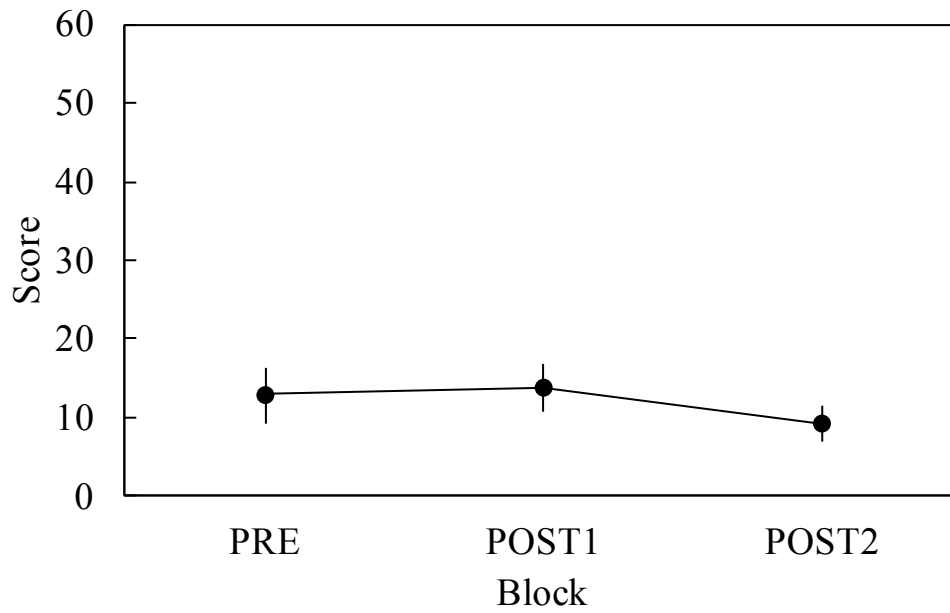


図 2.21 VAS の不安の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.21 Change in VAS (Visual Analog Scale) anxiety (n=16, mean±SE)

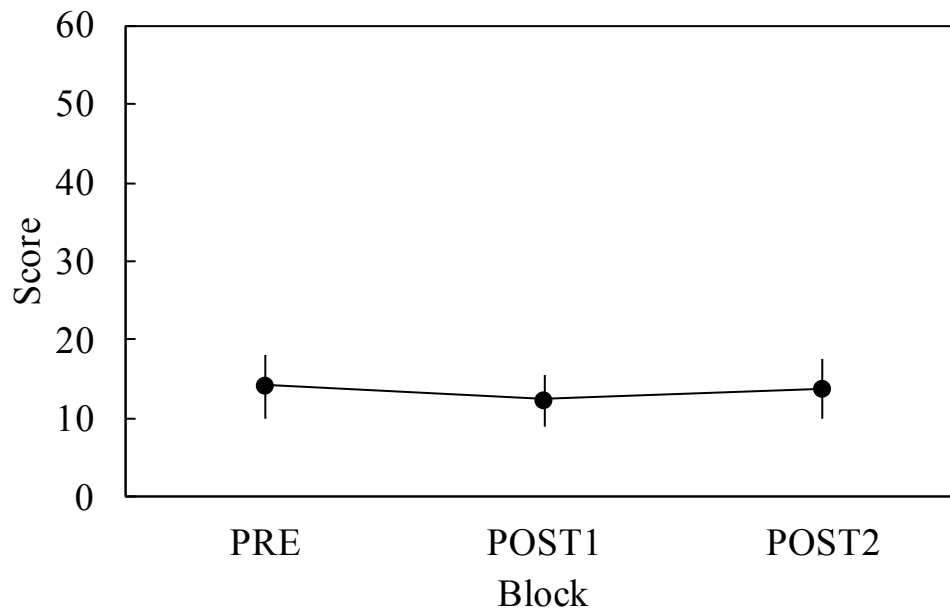


図 2.22 VAS の努力の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.22 Change in VAS (Visual Analog Scale) effort (n=16, mean±SE)



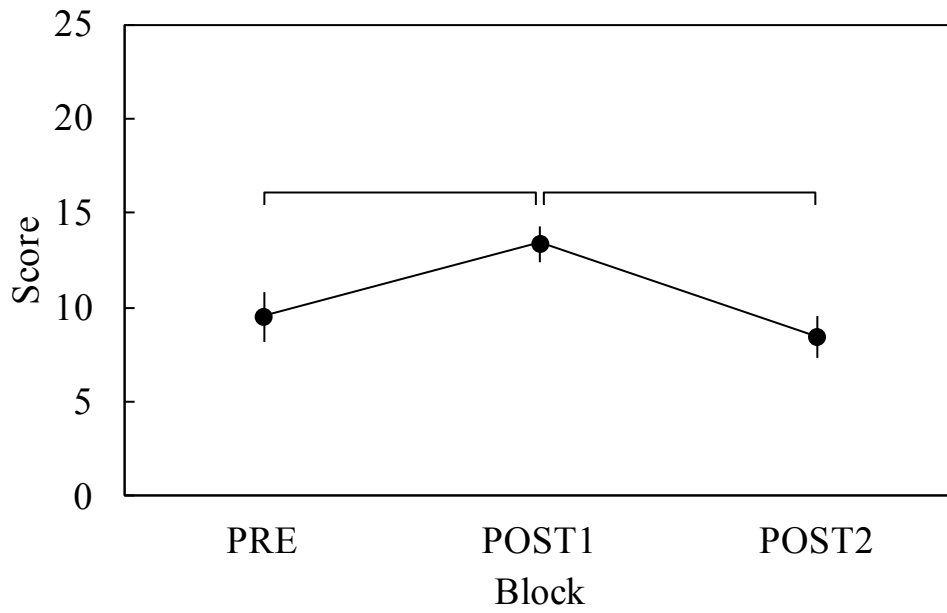


図 2.23 POMS の緊張-不安の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.23 Change in POMS (Profiles of Mood State) tension-anxiety (n=16, mean±SE)

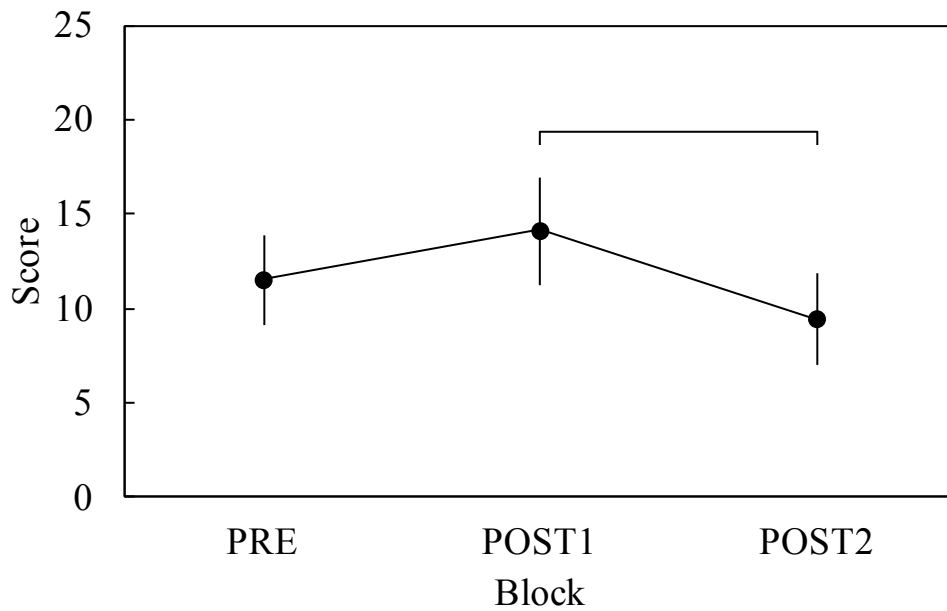


図 2.24 POMS の抑うつ-落込みの変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.24 Change in POMS (Profiles of Mood State) depression-dejection (n=16, mean±SE)

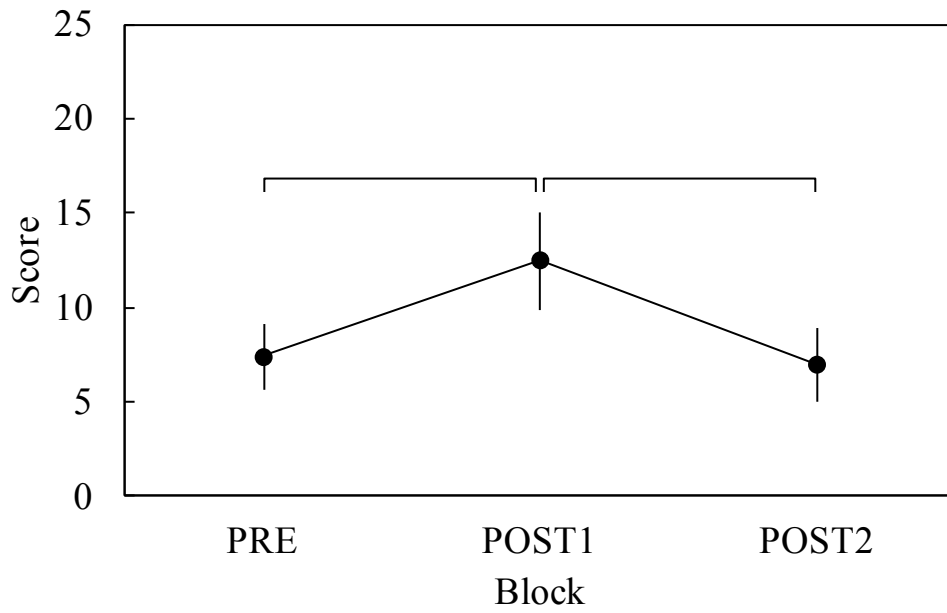


図 2.25 POMS の怒り-敵意の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.25 Change in POMS (Profiles of Mood Stete) anger-hostility (n=16, mean±SE)

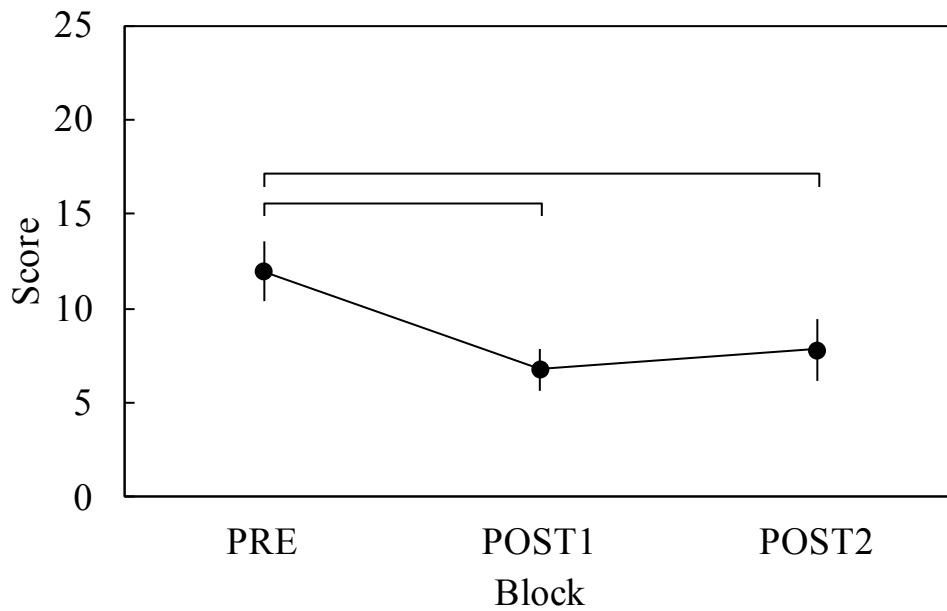


図 2.26 POMS の活気の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.26 Change in POMS (Profiles of Mood Stete) vigor (n=16, mean±SE)

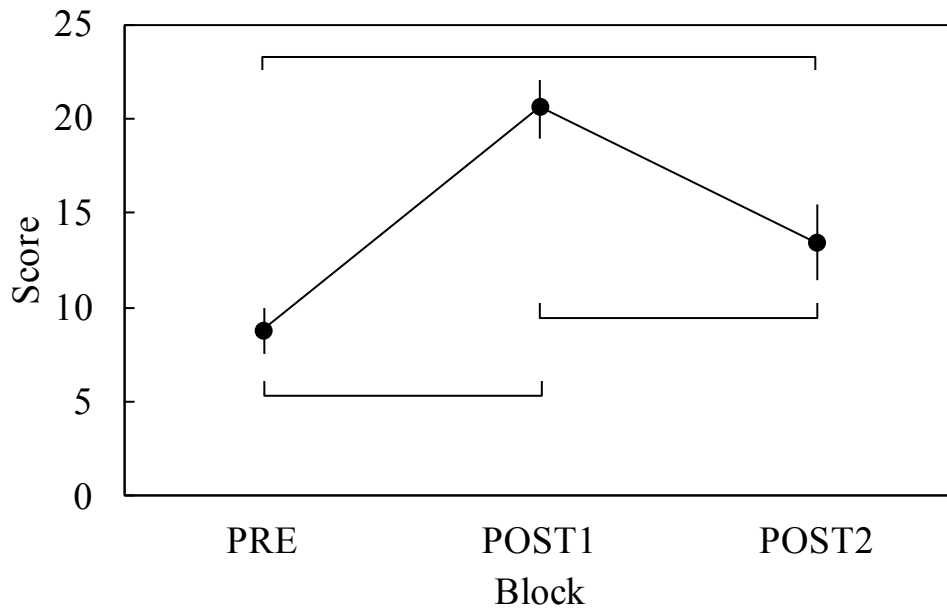


図 2.27 POMS の疲労の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.27 Change in POMS (Profiles of Mood Stete) fatigue (n=16, mean±SE)

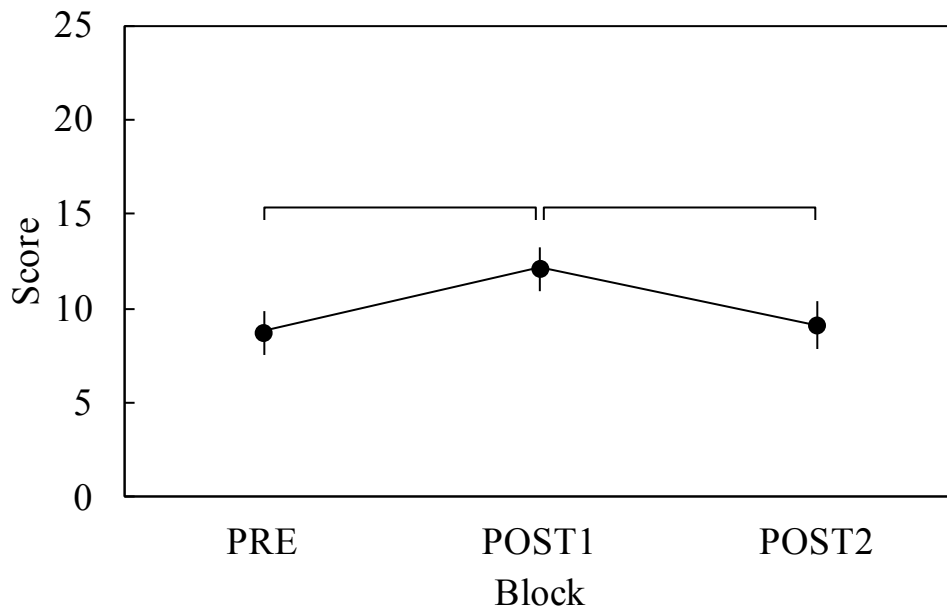


図 2.28 POMS の混乱の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.28 Change in POMS (Profiles of Mood Stete) confusion (n=16, mean±SE)

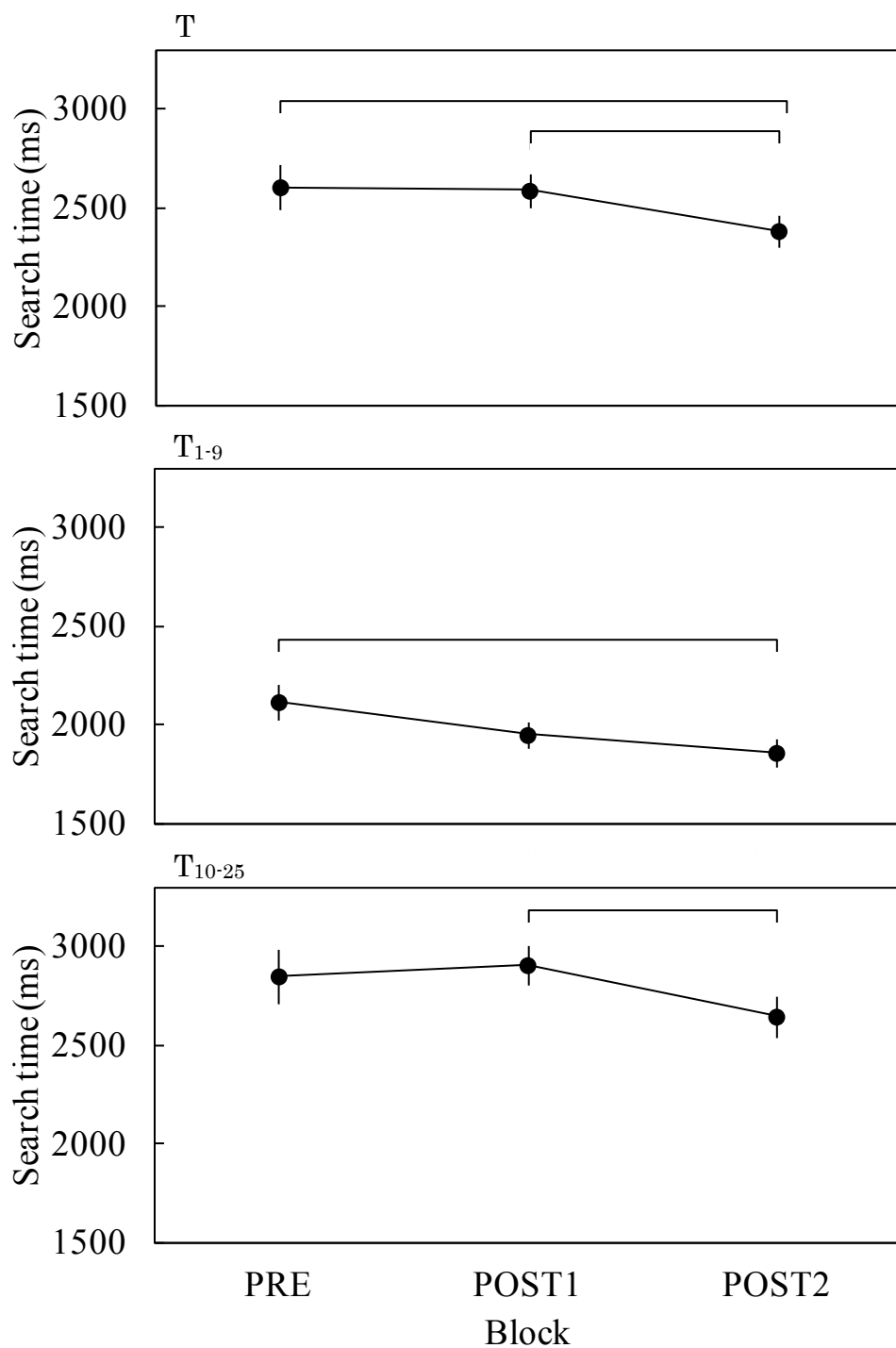


図 2.29 探索時間の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.29 Change in search times (n=16, mean±SE)

T: The mean search time of all. T<sub>1-9</sub>: The mean search time of the series 1 to 9. T<sub>10-25</sub>: The mean search time of the series 10 to 25.

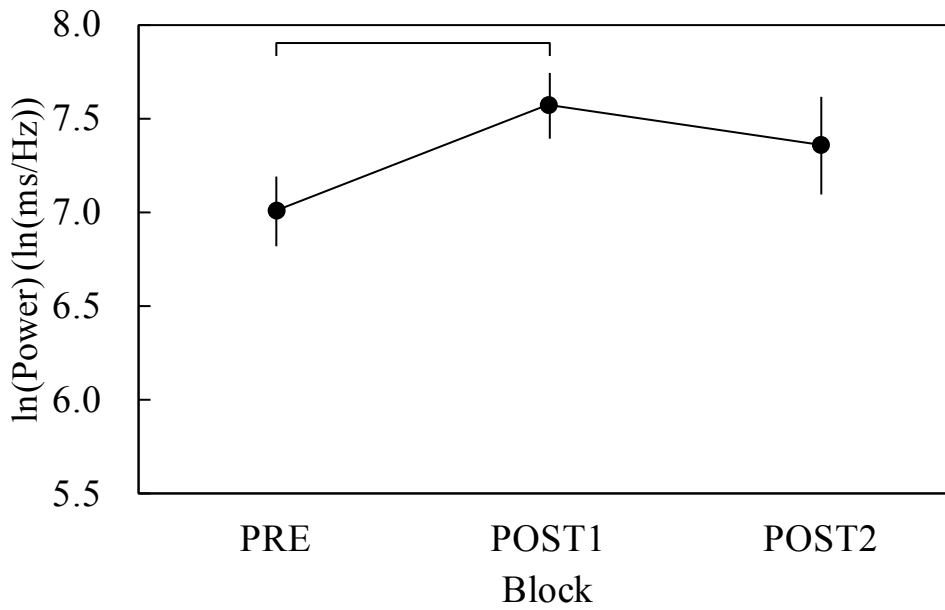


図 2.30 ln(T-P)の変化(n=10, mean±SE)

Fig.2.28 Change in ln(T-P) (n=10, mean±SE)

T-P: Total Power

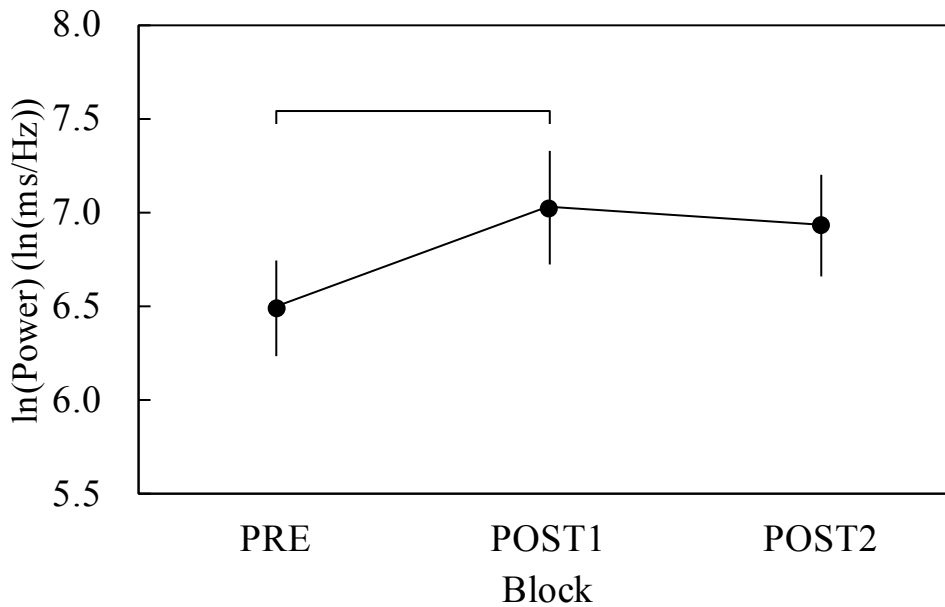


図 2.31 ln(LF)の変化(n=10, mean±SE)

Fig.2.31 Change in ln(LF) (n=10, mean±SE)

LF: Low Frequency

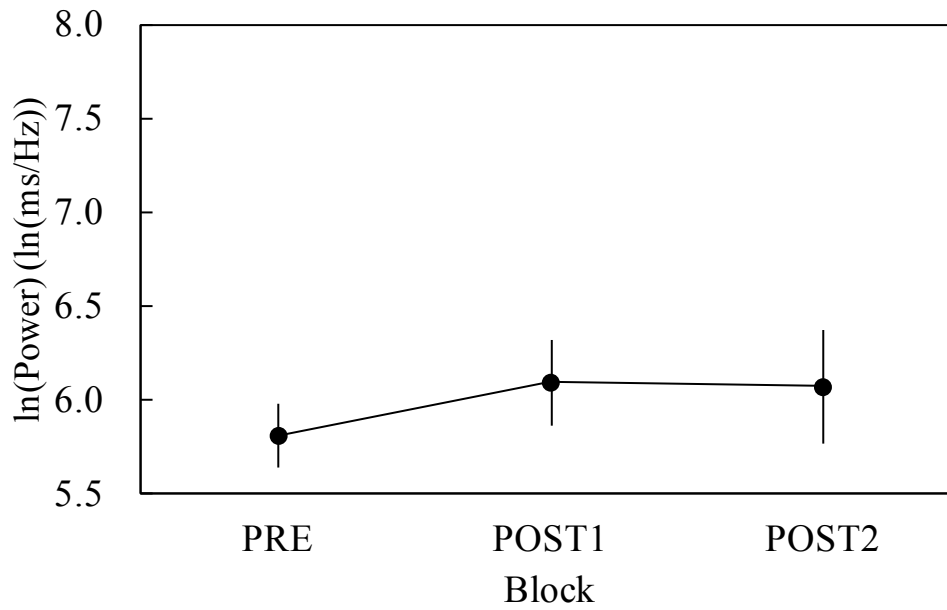


図 2.32  $\ln(\text{HF})$ の変化( $n=10$ ,  $\text{mean} \pm \text{SE}$ )

Fig.2.32 Change in  $\ln(\text{HF})$  ( $n=10$ ,  $\text{mean} \pm \text{SE}$ )

HF: High Frequency

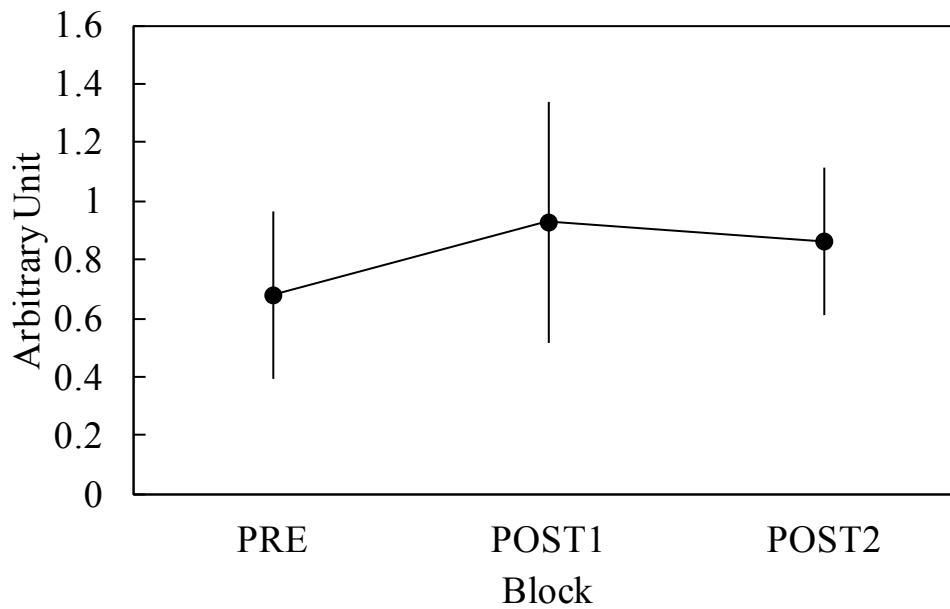


図 2.33  $\ln(\text{LF}/\text{HF})$ の変化( $n=10$ ,  $\text{mean} \pm \text{SE}$ )

Fig.2.33 Change in  $\ln(\text{LF}/\text{HF})$  ( $n=10$ ,  $\text{mean} \pm \text{SE}$ )

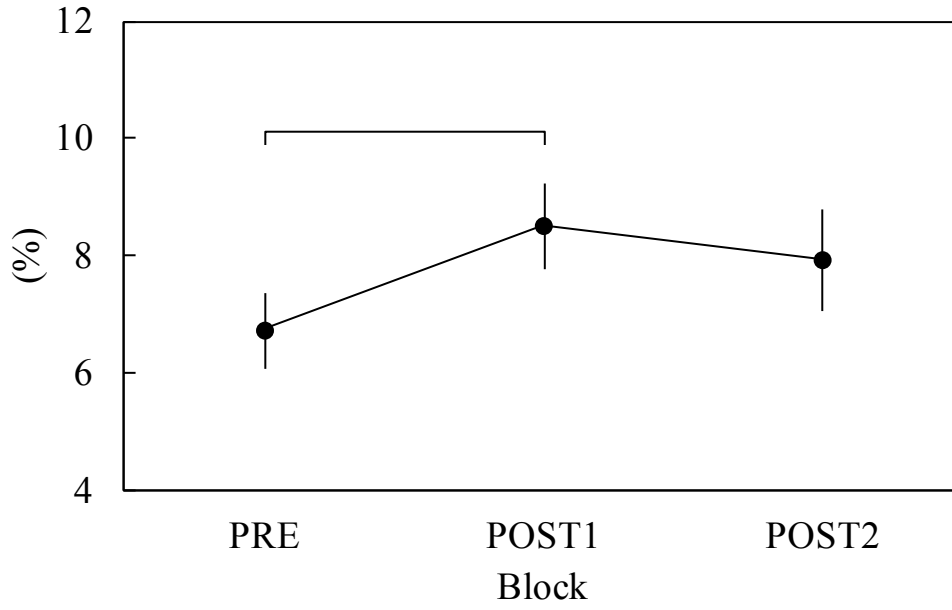


図 2.34 CV<sub>R-R</sub> の変化(n=10, mean±SE)

Fig.2.34 Change in CV<sub>R-R</sub> (n=10, mean±SE)

CV<sub>R-R</sub>: Coefficient of Variation of R-R interval

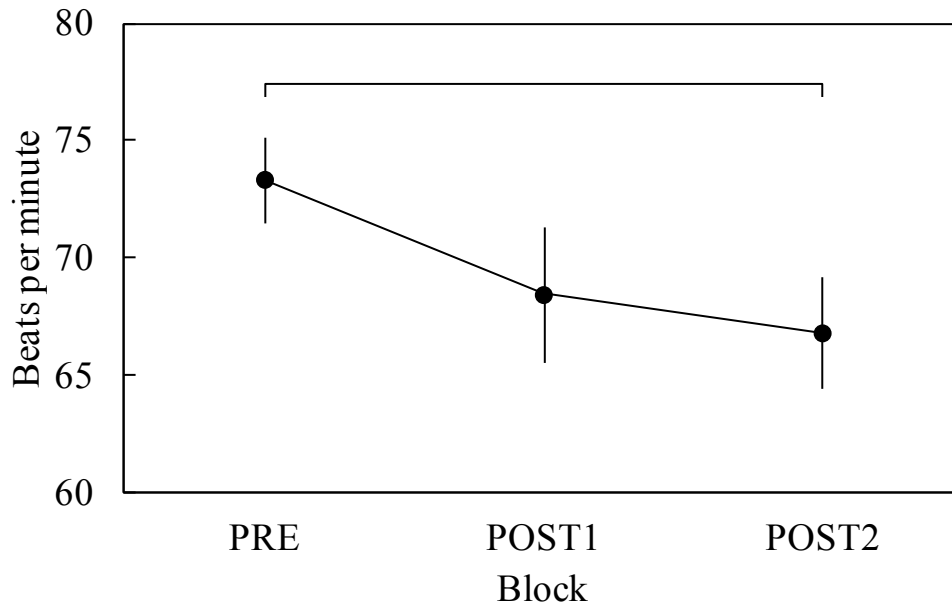


図 2.35 HR の変化(n=10, mean±SE)

Fig.2.53 Change in HR (n=10, mean±SE)

HR: Heart Rate

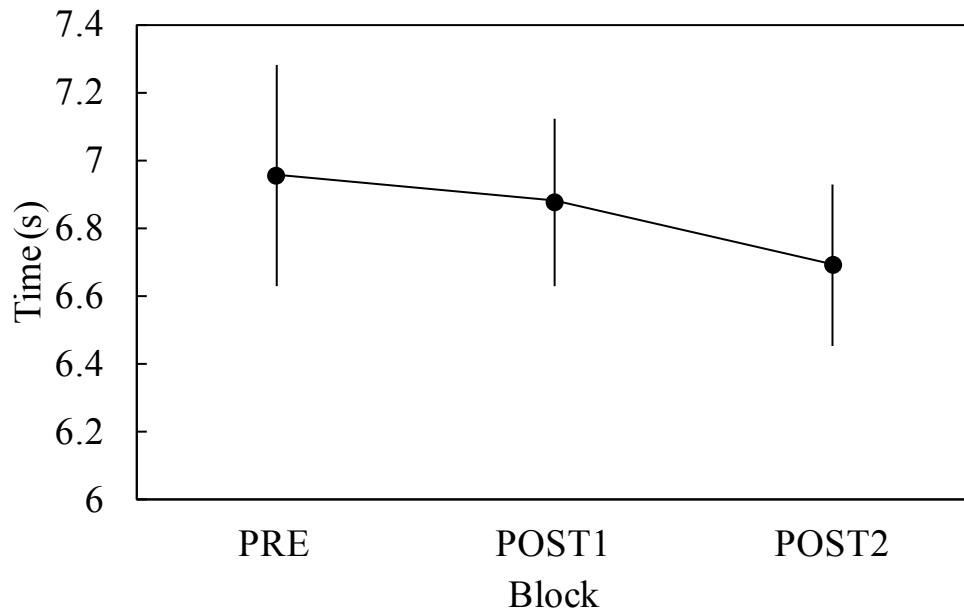


図 2.36 RSP-P の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.36 Change in RSP-P (n=16, mean±SE)

RSP-P: Resp Period

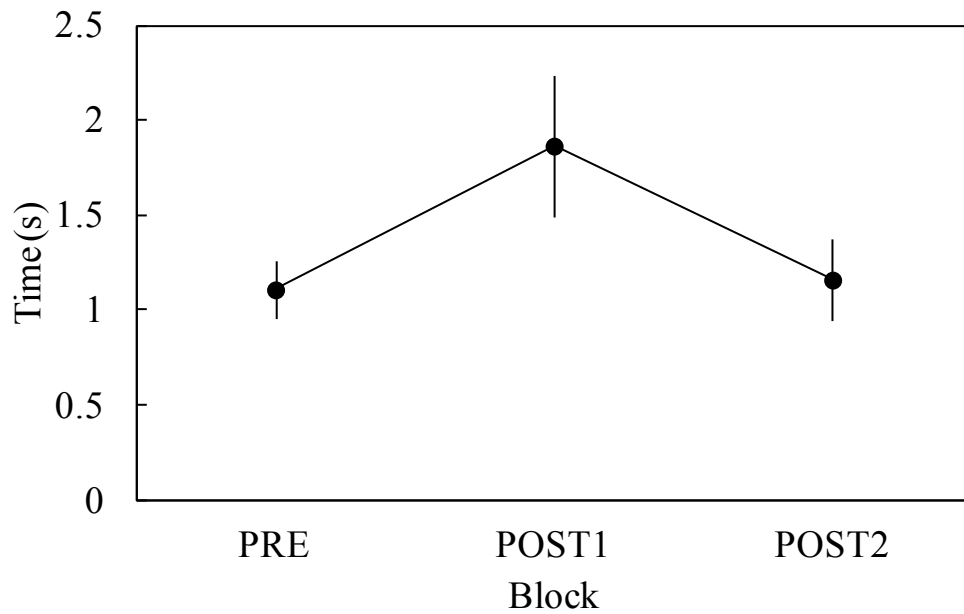


図 2.37 REP-PSD の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.37 Change in REP-PSD (n=16, mean±SE)

REP-PSD: Standard Deviation of Resp7 Period



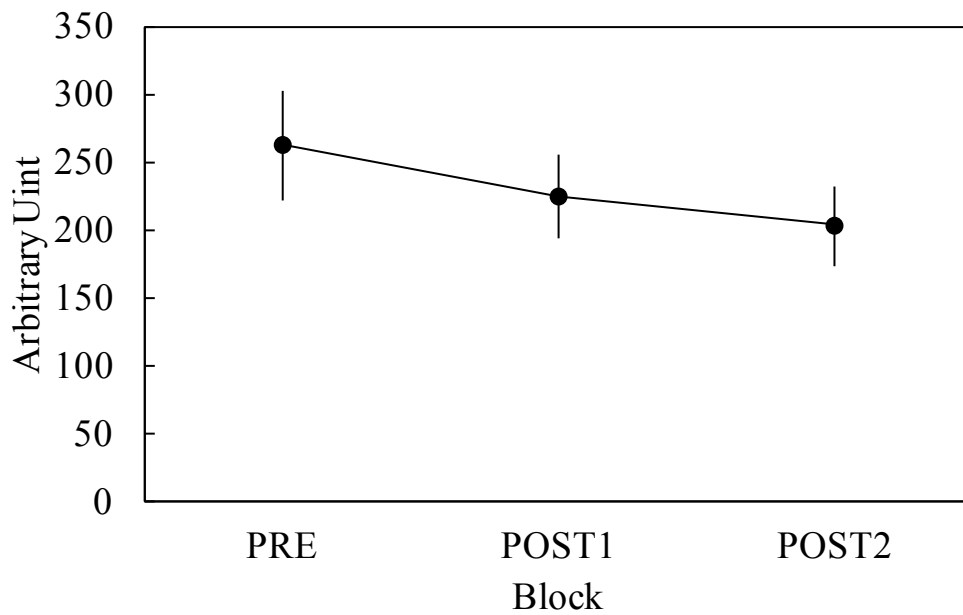


図 2.38 RSP-A の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.38 Change in RSP-A (n=16, mean±SE)

RSP-A: Resp Amplitude

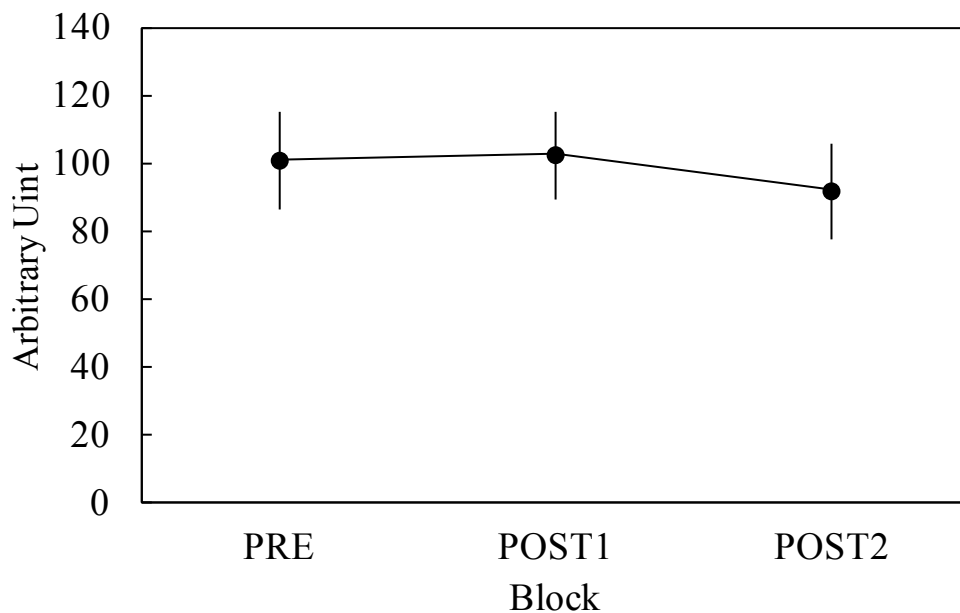


図 2.39 REP-ASD の変化(n=16, mean±SE)

Fig.2.39 Change in REP-ASD (n=16, mean±SE)

REP-ASD: Standard Deviation of Resp Amplitude

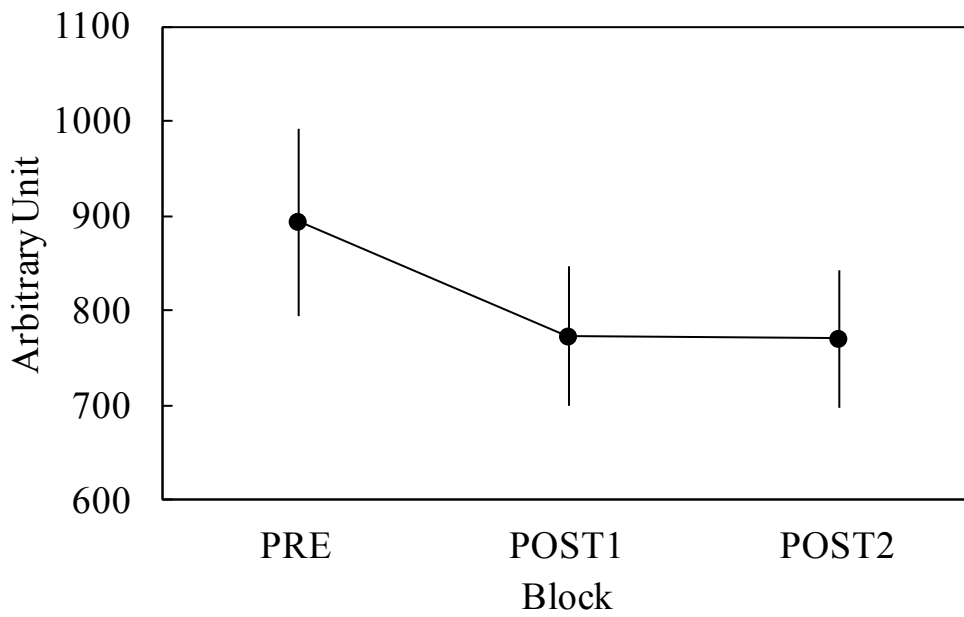


図 2.40 TBF の変化(n=15, mean±SE)

Fig.2.40 Change in TBF (n=15, mean±SE)

TBF: Tissue Blood Flow

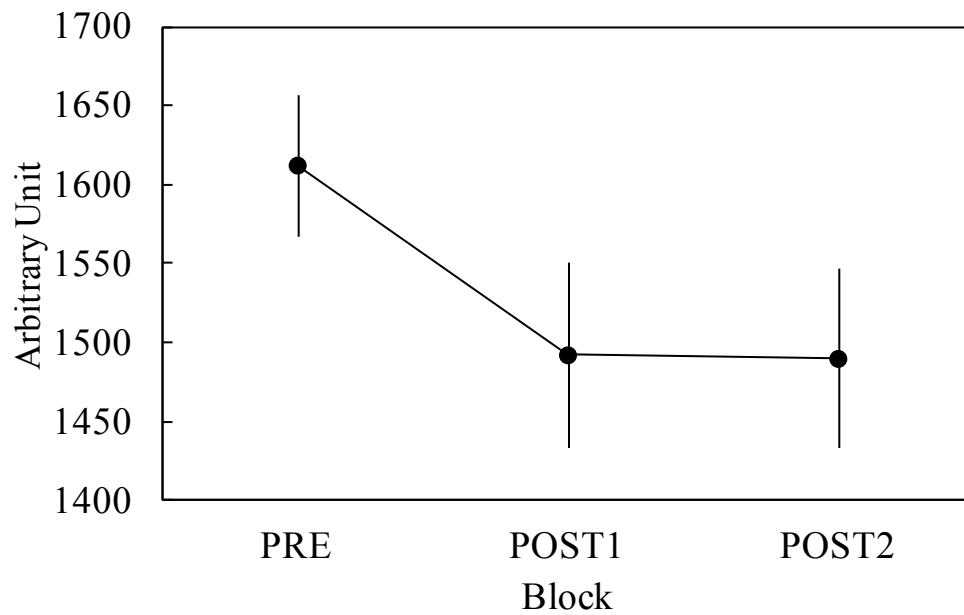


図 2.41 TBV の変化(n=15, mean±SE)

Fig.2.41 Change in TBV (n=15, mean±SE)

TBV: Tissue Blood Volume

## 2.4. 考察

### 2.4.1 作業負担に関する考察

本研究は疲労の変化に対応して変化する指標の探索を目的としているため、疲労の発生が担保されている必要がある。そこで TASK1~5（暗算作業の作業成績のみ TASK1~6）における主観指標と作業成績（暗算作業の正答率と正答レベル、SDST の探索時間）の推移から、作業が疲労を起こすのに十分な負担を生じていたかについて検討を行った。

主観指標は、VAS の疲れと眠気において、暗算作業の序盤（TASK1 と TASK2, TASK1 のみ）に対して暗算作業の中盤以降（TASK3~5, TASK3,4）で有意に増加している。このことから暗算作業終了時には、計 100 分間の暗算による精神的負担の蓄積（疲労）が生じていたと考えられる。

作業成績は、作業の持続に伴う精神的負担の増加によって低下すると考えられる。しかし暗算作業の正答率は TASK1 に対して TASK6 で高くなっている。これは暗算作業の習熟が不十分で TASK1 の正答率が低かったためだと考えられる。SDST の探索時間（T, T<sub>1-9</sub>, T<sub>10-25</sub>）も作業の持続に伴う成績の低下（探索時間の延長）は認められなかった。しかし連続減算法、クレペリン精神検査用紙を用いた簡単な暗算作業を課した先行研究においても作業成績は維持もしくは有意な上昇を示している [18,19]。また本研究で用いた暗算作業と類似した（ただし回答時間に制限がない）パソコンを用いた暗算作業においても疲労感の増加は認められるが作業成績は低下していない [20]。このように精神作業の持続に伴う成績の低下は必ずしも観測されない。これは作業成績は、あるレベルまでは努力によって維持できるためだと考えられる。

以上より、本研究で用いた暗算作業は疲労を起こすのに適切であったと考える。

### 2.4.2 疲労に関する考察

各指標の暗算前後（PRE から POST1）の有意な変化は疲労の発生を、暗算後から休息後（POST1 から POST2）の有意な変化は疲労の休息による回復を表していると考えられる。疲労の指標の選定要件を満たした指標、つまり、PRE, POST1, POST2 の 3 時点で山型（あるいは谷型）のパターンを示した指標は、POMS の緊張・不安、怒り・敵意、疲労、混乱のみである。これらの指標は疲労の発生と回復の両方を捉えることができたと考えられる。VAS の疲れと POMS の活気は休息後に有意な低下を示しておらず山型にはなっていない。また POMS の疲労も山型にはなっているが回復後に暗算前のレベルには戻っていない。これらの指標（VAS の疲れ、POMS の活気と疲労）の変化から疲労が休息後も残っていたことが推察される。VAS の結果が POMS と異なるのは回答時点の違いにより VAS には POST1（安静）の回復効果が含まれているためと考えられる。

SDST の探索時間は PRE に対して POST1 で遅延が認められず、山型を示さなかった。これは PRE では習熟が十分でなかったために習熟と疲労による影響が相殺された可能性が考えられる。しかし POST1 の時点で十分に習熟した可能性があり、POST1 と POST2 との差に習熟の影響はないと仮定すると、T と T<sub>10-25</sub> において POST1 に対して POST2 で短縮が認められたのは休息によって疲労が回復したことを示していると考えられる。T<sub>1-9</sub> は 2 桁の数字の中から 1 桁の数字を

探索するので難易度が低く、疲労を捉えられなかったと考えられる。以上の観点から SDST は、十分に習熟させた上で、探索させる数字を 2 桁のみにすれば疲労を評価するテストとしての利用できると考えられる。

生理指標は暗算作業開始直後は交感神経系の賦活と副交感神経系の抑制に伴う変化を示し、その後、暗算という単調な作業の持続に伴い、副交感神経系の亢進を示す変化が現れると考えられる[25]。これらの変化が暗算作業後においても継続し、休息後に暗算作業前の状態に戻ることで山型（指標によっては谷型）のパターンを描くことが予想される。

PTG, SCL, sAA は作業前後と休息後の 3 つの時点の変化に主効果が認められず、仮説に沿った疲労に伴う変化は確認できなかった。

心拍変動指標 ( $\ln(TP)$ ,  $\ln(LF)$ ,  $CV_{R-R}$ ) は休息後の変化は有意ではないが、仮説に近い山型を示している。一方、HR と TBF は暗算作業で有意ではないが低下を示し、休息後も低下した状態が続き谷型を示していない。心拍変動指標は主に心臓副交感神経系の活動を、HR は心臓交感神経系、副交感神経系の両方の活動を反映し、TBF は末梢交感神経系の活動を反映すると考えられる。これらの指標変化から自律神経系の変化を考察する。まず長時間の暗算作業によって、心臓副交感神経系の賦活と末梢交感神経系の賦活が起こったことが推察され、これは妥当な結果である。ただし呼吸の不安定性の指標である RSP-PSD に主効果が認められ、心拍変動指標と類似した変化を示していることから、これらの変化は心臓副交感神経系の変化だけでなく、呼吸の影響を受けている可能性もある[25]。休息では、心臓副交感神経系と末梢交感神経系は十分な回復が起こらず、作業前の水準には至らなかった。心臓交感神経系の活動は短時間の暗算作業では亢進するが、長時間の精神負荷では、いらいらや怒りが強いときは賦活し、そうでなく諦めが強いときには低下すると考えられている[25]。心臓交感神経系の活動のみを反映する指標を計測していないため、HR と心拍変動指標の変化から推察することになる。暗算作業後の HR が低下し休息後も HR が低下した状態が続いたことから、暗算後に心臓交感神経系活動の亢進があったが心臓副交感神経系の亢進ほどではなかったと考えられ、休息により心臓交感神経系活動の亢進が収まったと推察される。以上より、20 分間の安静という休息の効果は、心臓交感神経系の回復には有効で、末梢交感神経系と心臓副交感神経系の回復には不十分であったと考えられる。VAS の眠気は有意な変化を示していないが他の項目より評価値が高い。このことより覚醒低下が各生理指標変化に影響した可能性は多いにある。副交感神経系と末梢交感神経系の亢進が休息後も収まらなかったのは、座位姿勢で 20 分間過ごす休息では時間が短かったことも考えられるが、休息の質についても問題があったと考えられる。またこの亢進を収めるには活性化させる休息が有効である可能性が高い。

以上の主観指標、SDST の探索時間、そして生理指標の変化から、休息により作業成績が回復しても疲労による疲労感や生理反応が残っている場合があることを示唆している。この疲労に伴う反応は過労が起こる一因である可能性が考えられる。疲労は休息要求によって、急性疲労、亜急性疲労、日周性疲労、慢性疲労の 4 つに区分される[9]。このうち本研究で用いた暗算作業によ

る疲労は急性疲労か亜急性疲労に該当する。しかし、本研究においては、休息によって十分な回復を示さなかった指標（POMS の疲労と活気，VAS の疲れ，心臓副交感神経系が関与している指標（ $\ln(T-P)$ ， $\ln(LF)$ ， $CV_{R-R}$ ，HR）と末梢交感神経系の指標（TBF））が確認されている。これらの指標は蓄積疲労につながる様態を示している可能性があり，急性疲労の評価だけでなく過労や過重労働の評価への応用も検討する余地がある。

## 2.5. おわりに

主観指標，作業成績，生理指標について，精神的負荷（100 分間の暗算作業）を課し，その後と，回復作用をもたらすと考えられる休息（20 分間の座位）を経た後といった精神的負荷がかかっていない 3 つの時点の比較から疲労に対応して変化する指標の探索を行った。その結果，主観指標では POMS の全項目（緊張-不安，抑うつ-落込み，怒り-敵意，活気，疲労，混乱），VAS の疲れと緊張，作業成績では SDST の探索時間 ( $T$ ， $T_{10-25}$ )，生理指標では  $\ln(T-P)$ ， $\ln(LF)$ ， $CV_{R-R}$ ，HR，TBF で有意な変化が確認され，これらは疲労の「効率の一時的減退」やその回復に伴う反応であると考えられた。これらの生理指標の変化から疲労により，心臓交感神経系，副交感神経系，末梢交感神経系の亢進が起こることが推察された。また 20 分間の休息によって作業成績は回復が認められたが，主観指標の一部や生理指標は作業前の水準まで戻らなかった。心臓交感神経系の活動については休息後に作業前の水準に戻る方向へ推移した可能性があるが，末梢交感神経系の指標は作業後の状態を保っており，疲労の回復に伴う変化は自律神経の中でも系（副交感神経系，心臓交感神経系，末梢交感神経系）によって異なることが示唆された。

本章では，疲労の中でも実験的検討を行いやすい急性疲労を対象に，疲労に伴って変化する指標の探索を行った。しかし過重労働対策に用いるためには蓄積疲労に対応して変化する指標を探索する必要がある。そこで次章では，本章にて疲労に伴って変化したと考えられた指標を中心に蓄積疲労に対応して変化する指標を探索を行う。

### 第3章 長期間に亘る計測による蓄積疲労に対応して変化する指標の探索

### 3.1. はじめに

疲労は休息要求によって、急性疲労、亜急性疲労、日周性疲労、慢性疲労に分類される[9]。第2章ではこのうち急性疲労もしくは亜急性疲労に分類される疲労に対応して変化する指標について検討を行った。そこで主観指標、作業成績、生理指標のそれぞれについて疲労に伴って変化する指標が確認されたが、過重労働対策においては日周性疲労や慢性疲労といった蓄積した疲労を捉える必要がある。これらの指標が本研究の最終目標である過重労働対策の一環である産業医による面接指導の対象者のスクリーニングに用いることができるかどうかについては、更なる検討が必要となる。先行研究と第2章での検討を踏まえ、第3章では生理指標は心電図と重心動揺を、作業成績はATMTを模した視覚探索課題を、主観指標としては自覚症しらべ[付録参照]、労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト[付録参照]、蓄積的疲労兆候[付録参照]インデックスについて日周性疲労から慢性疲労に及ぶ範囲の蓄積疲労に対しても変化を示すかについて検討する。しかし過労や慢性疲労といった長期に亘って蓄積する疲労を実験的に発生させるのは、実験参加者の健康への悪影響を考えると倫理的な観点から難しい。

そこで大学生を対象とし、試験やレポートの締切りが集中する定期試験期間を実験期間に含めることで代用した。また疲労を評価するには、その原因となる負荷・負担の質と量を捉えることも有効と考え、試験の負担に関する主観的評価と前日の就寝時刻と当日の起床時間の記録を行わせた。本章ではこれらの項目に関して定期試験を含む期間とそれ以外の期間で統計検定を行うことで、過労の主な要因である疲労の蓄積に対応して変化する可能性がある指標の探索を行う。

## 3.2. 方法

### 3.2.1 実験参加者

産業医科大学の倫理委員会の承認の下、事前に文書により実験内容を説明してインフォームドコンセントを得た健康な大学生、男性8名(18.4±0.5歳)、女性6名(18.5±0.8歳)を対象とした。

### 3.2.2 実験条件と実験日時

通常の講義が行われている期間(2009年6月15日から7月9日:以下、通常期)と疲労の蓄積が見込まれる定期試験を含む期間(2009年8月31日から9月30日:以下、繁忙期)に月曜日と水曜日、または火曜日と木曜日の週2回、朝(8~9時)、昼(12~13時)、夕方(16~18時)のいずれかの時刻帯に実験を行った。曜日と時刻帯は実験参加者ごとに固定した。計測回数は各々の期間で8回ずつとした。

### 3.2.3 計測項目

#### 3.2.3.1 主観的疲労

自覚症しらべ(25項目)、労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト(13項目)、蓄積的疲

労兆候インデックス（81項目）の3つの質問紙に回答させた。自覚症しらは計測の度に実施した。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストは週に一度、直前の1週間の症状について回答を求めた。蓄積的疲労兆候インデックスは疲労蓄積度自己診断チェックリストと同様に週に1度、回答を求めた。

自覚症しらは質問紙を構成する5群のスコアを、蓄積的疲労兆候インデックスは8群のスコアを算出した（各群については1.2.に記載）。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストは全項目の合計を算出した。

### 3.2.3.2 負荷・負担

試験やレポートの負担については、Visual Analog scale(VAS)を用いて回答させた。本実験では左端を「非常に小さい」、右端を「非常に大きい」とした10cmの線分上の該当する位置に線を引くように指示した。回答は試験およびレポートの度に行うように指示し、試験日時もしくはレポートの提出日と共に記録させ、試験期間終了後に提出させた。線が引かれた箇所を左からmm単位（0～100）で読み取り、評価値とした。また試験やレポートの負荷・負担を反映する指標として前日の就寝時刻と当日の起床時間についても回答させ、前日の睡眠時間の記録を行った。

### 3.2.3.3 作業成績（視覚探索課題の反応時間）

ATMT（Advanced Trail Making Test）のアルゴリズムに基づく視覚探索テスト（Sequential Digit Search Test: SDST）を行わせ、作業成績について評価した。1に触れてから25に触れるまでの24個の探索時間の平均（T）を算出した。1に触れてから9に触れるまでの8個の探索時間の平均（ $T_{1-9}$ ）と、9に触れてから25に触れるまでの16個の探索時間の平均（ $T_{10-25}$ ）についても算出した。

### 3.2.3.4 生理指標

生理指標は、心電図（Electrocardiogram: ECG）、呼吸（Respiration: RSP）、重心動揺（Center of Gravity: CoG）を計測した。ECGとRSPの信号は小型生体アンプ（デジテック研究所 Polymate AP1124）を介しパソコンのハードディスクに記録し解析を行った。サンプリング周波数は、ECG:1000 Hz、RSP:500 Hzで行った。ECGは胸部CM<sub>5</sub>導出（chest lead from manubrium toV5 position）により計測を行った。Total Power、LF(Low Frequency)成分、HF(High Frequency)成分を第2章と同様の手法により算出した。併せて心拍数（HR）とR-R間隔変動係数（ $CV_{R-R}$ ）を求めた。

RSPは胸囲の変化を捉えるセンサにより計測を行った。CoGは、バランスWiiボード（任天堂）を用いて計測し、データはBluetoothを介してパソコンに記録した。開眼時と閉眼時における重心座標の前後方向と左右方向の標準偏差を算出して、CoGの評価指標とした。



### 3.2.4 実験手順

各実験参加者には指定の日時に実験室に来室後、①各種電極やセンサの装着（約 15 分）、②各種質問紙およびアンケートに回答（約 10 分）、③立位にて ECG と RSP の計測（5 分）、④CoG の計測（開眼 1 分間、閉眼 1 分間）、⑤数値探索課題（約 1 分）の実施の順で実験を行わせた。計測は産業医科大学の実験室にて実施し、電極とセンサの装着は実験者が補助した。

### 3.2.5 データ解析

試験とレポートの VAS の評価値は実験参加者ごとに集計した。その他の指標は、実験参加者ごとに通常期、繁忙期を通して標準得点化を行った上で解析した。これらの指標は、通常期と繁忙期の 2 群について等分散を仮定した t 検定を行った。有意水準は 5%として SPSS (11.0J) を用いて解析した。

## 3.3. 結果

繁忙期の計測を 5 回以上欠席した 3 名を解析から除外した。各指標について対応のある t 検定を行った結果、有意差が認められたものと主要なものを以下に示す。

### 3.3.1 主観的疲労

自覚症しらべのだるさ感 (Feeling of local pain or dullness) は通常期に比べ繁忙期において訴えの増加が認められた (図 3.1)。蓄積的疲労兆候インデックスでは、一般的疲労感 (General fatigue) は通常期に比べ繁忙期で訴えが増加し、労働意欲の低下 (Decline in labor eagerness)、不安感 (Anxiety)、抑うつ感 (Depressive feeling) は訴えが減少した (図 3.2)。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストのスコアは通常期に比べ繁忙期で有意な減少が認められた (図 3.3)。

### 3.3.2 負荷・負担

試験とレポートの負担に関する VAS のスコアを表 3.1 に示す。試験とレポートの数は 3~16 回と実験参加者によって差がみられた。また VAS の平均スコアも 49.3~83.5 と大きくばらついた。睡眠時間は通常期と繁忙期で有意差は認められなかった (図 3.4)。

### 3.3.3 作業成績 (視覚探索課題の反応時間)

数値探索課題の反応時間は、T と T<sub>10-25</sub> で通常期に比べ繁忙期で有意に短くなった (図 3.5)。

### 3.3.4 生理指標

HF は通常期に比べ繁忙期で有意に低下した。また通常期に比べ繁忙期で HR の増加が認められた (図 3.6)。CoG は、通常期に比べ繁忙期で閉眼における前後方向の CoG が増加した (図 3.7)。

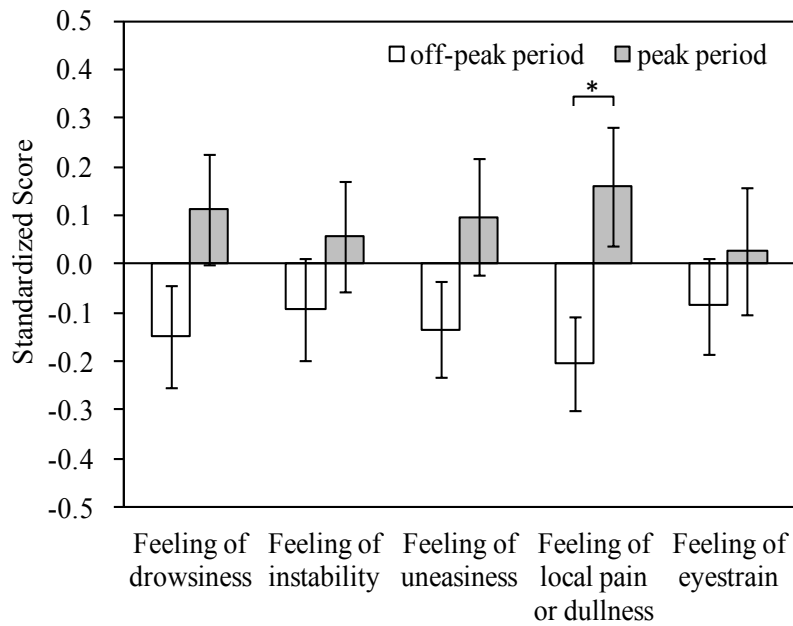


図 3.1 自覚症しらべの変化 (mean ± SE)

Fig.3.1 Changes in subjective feelings of fatigue

\*: p<0.05

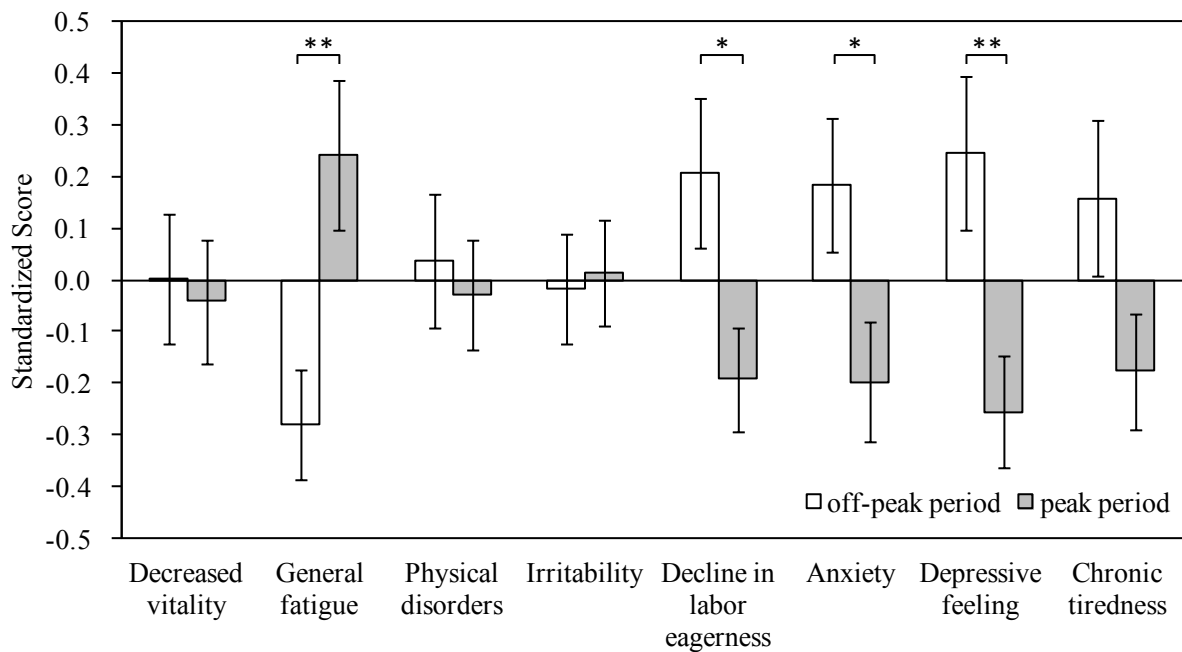


図 3.2 蓄積的疲労兆候インデックスの変化(mean ± SE)

Fig.3.2 Changes in cumulative fatigue symptoms index

\*: p<0.05 \*\*p<0.01

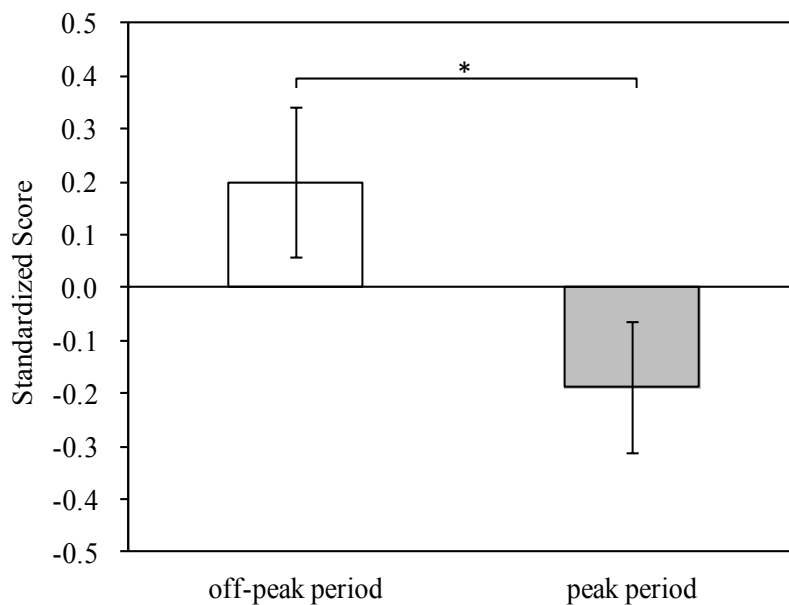


図 3.3 労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストのスコアの変化 (mean ± SE)

Fig.3.3 Changes in score of checklist for the accumulation of general fatigue of the workers

\*:  $p < 0.05$

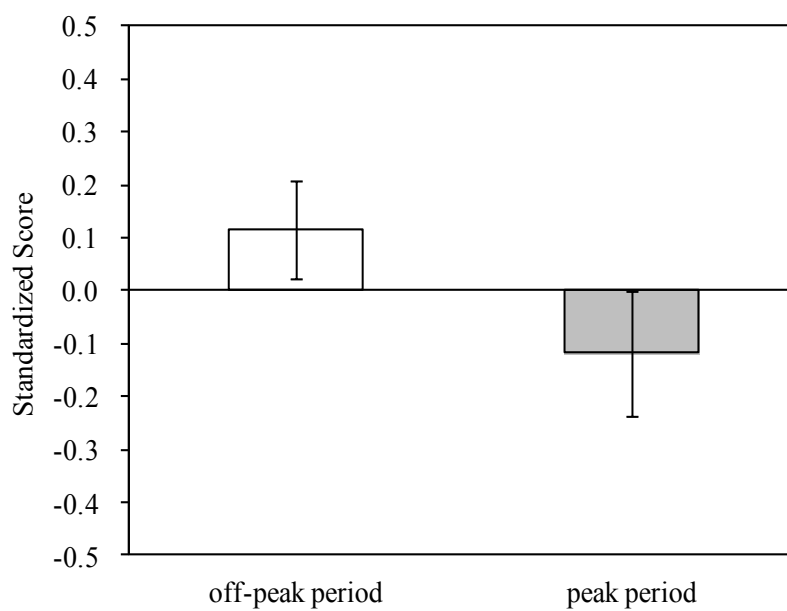


図 3.4 睡眠時間の変化 (mean ± SE)

Fig.3.4 Changes in sleep time

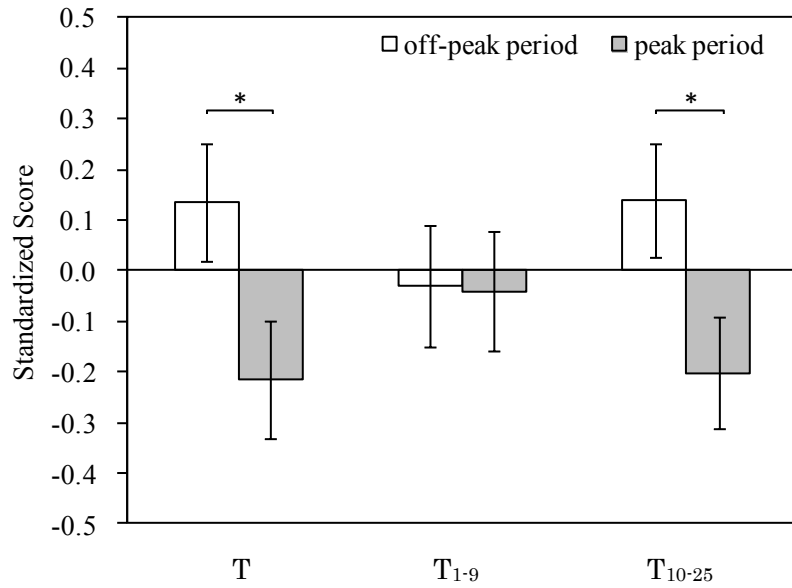


図 3.5 数値探索テストの探索時間の変化 (mean ± SE)

Fig.3.5 Changes in search time of sequential digit search test

The mean search times from touching one target circle to the next was divided into three phases. T phase was from 1 to 25. T<sub>1-9</sub> phase was from 1 to 9. T<sub>10-25</sub> phase was from 10 to 25.

\*: p<0.05

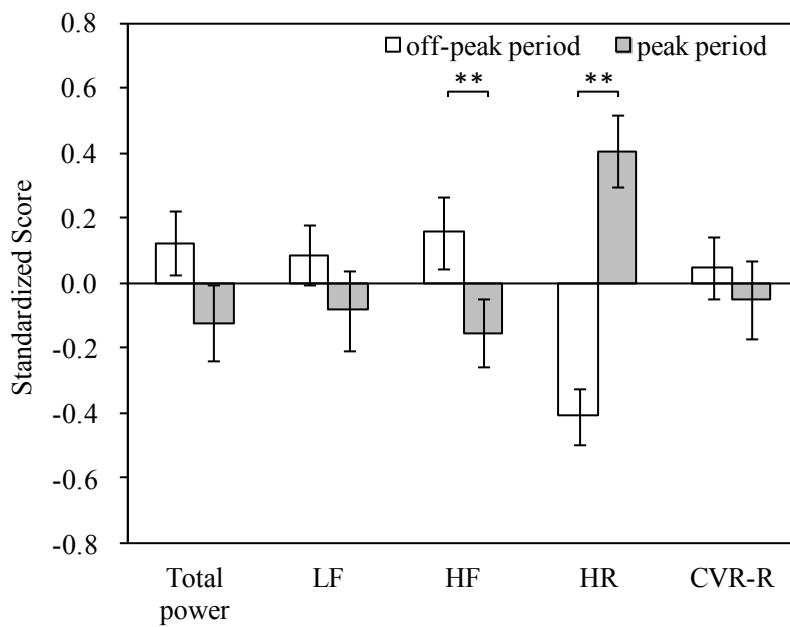


図 3.6 Total power, LF, HF, HR, CV<sub>R-R</sub> の変化 (mean ± SE)

Fig.3.6 Changes in total power, LF, HF, HR, CV<sub>R-R</sub>

LF: Low Frequency, HF: High Frequency, HR: Heart Rate, CV<sub>R-R</sub>: Coefficient of Variation of R-R interval

\*\*p<0.01

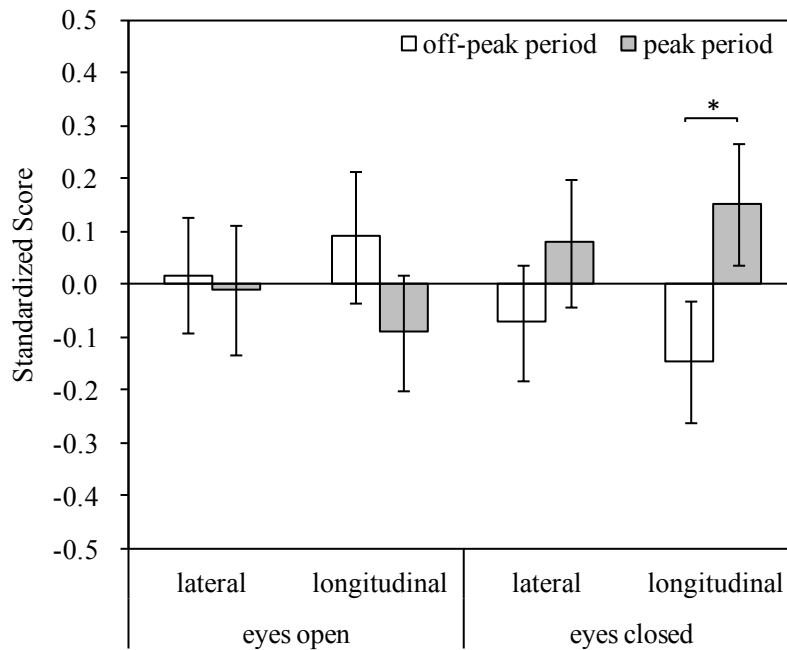


Fig.3.7 Changes in center of gravity (mean  $\pm$  SE)

図 3.7 重心動揺の変化

\*:  $p < 0.05$

Table3.1 The number of tests and reports, and the VAS scores regarding their strain

表 3.1 試験とレポートの回数と、その負担に関する VAS のスコア

Participant	Number of tests and reports	VAS score			
		Mean	Standard deviation	Maximum	Minimum
A	10	58.7	19.9	87	31
B	10	66.3	25.9	88	22
C	12	59.9	23.3	86	23
D	10	58.5	34.6	98	6
E	14	53.3	31.9	89	3
F	10	55.2	31.3	96	2
G	5	52.4	28.7	81	5
H	13	83.5	18.0	100	54
I	13	68.5	34.1	100	15
J	16	76.6	25.1	99	47
K	3	49.3	42.4	84	2

### 3.4. 考察

#### 3.4.1 主観的疲労

蓄積的疲労兆候インデックスの労働意欲の低下，不安感，抑うつ感と労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストが繁忙期で減少した原因は不明であるが，試験が刺激となって主観的な活性が高まった可能性が考えられる．自覚症しらべのだるさ感と，蓄積的疲労兆候インデックスの一般的疲労感は繁忙期において通常期に比べ訴えが増加しており（図 3.1,3.2），試験やレポートによる疲労を捉えられたと考えられる．これらの項目は主観的な側面から蓄積疲労を捉えることができると考えられる．

#### 3.4.2 負荷・負担

試験とレポートの回数と主観的負担の大きさは実験参加者によって大きく異なっていた（表 3.1）．このことから，実験参加者によっては試験やレポートが疲労の蓄積を起こすほどの負担になっていなかった可能性が考えられる．また睡眠時間において通常期と繁忙期で有意差が認められなかったことから（図 3.4），繁忙期における負荷・負担がそれほど大きくなかったことが伺える．

#### 3.4.3 作業成績

視覚探索時間の反応時間は  $T$  と  $T_{10-19}$  において繁忙期の方が短かった（図 3.5）．これは習熟による変化と考えられる．また試験による負荷・負担がそれほど小さくなく，主観的にはむしろ活性化している可能性があることから，試験が適度な刺激となって作業成績の向上に繋がっているとも考えられる．

ただし，一部の実験参加者において，繁忙期で睡眠時間の短縮に伴い反応時間の延長がみられた（図 3.8,3.9,3.10）．有意な相関は認められていないが，この結果は習熟の影響がなく，負荷・負担が十分であれば，蓄積疲労による作業成績の低下を視覚探索課題の反応時間で捉えられる可能性を示している

#### 3.4.4 生理指標

通常期に比べ繁忙期で HF は有意な減少を，HR は増加が認められた（図 3.6）．これより相対的に交感神経活動が亢進していると考えられる．先行研究[39]においては，蓄積疲労の多い群で交感神経活動が優位であることが示されており本実験結果と一致する．この結果は，負荷・負担がかかっている時点やその直後だけでなく，数週間に亘る負荷・負担によって恒常的に交感神経活動が亢進する可能性を示している．

CoG は閉眼時の前後方向の標準偏差が繁忙期において有意に増加したことから，CoG は蓄積疲労の指標となる可能性が考えられる．

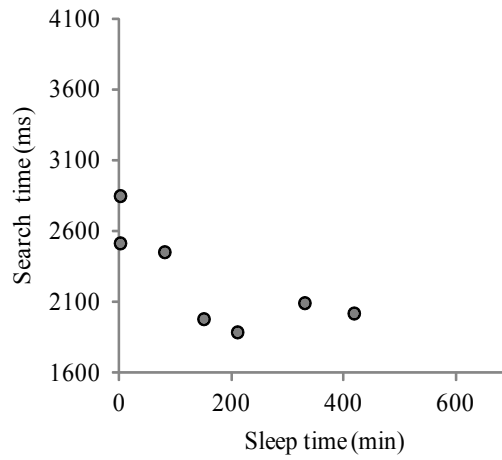


Fig.3.8 Relationship between Search time and Sleep time in subject A on the peak period

図 3.8 繁忙期における対象者 A の探索時間と睡眠時間の関係

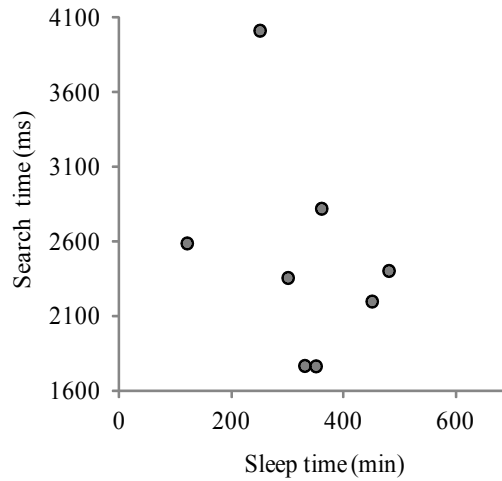


Fig.3.9 Relationship between Search time and Sleep time in subject B on the peak period

図 3.9 繁忙期における対象者 B の探索時間と睡眠時間の関係

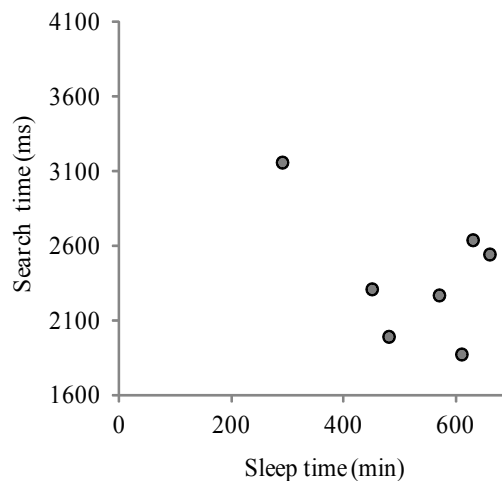


Fig.3.10 Relationship between Search time and Sleep time in subject D on the peak period

図 3.10 繁忙期における対象者 D の探索時間と睡眠時間の関係

### 3.5. おわりに

試験期間を負荷・負担とすることで日周性疲労から慢性疲労といった蓄積した疲労に伴って変化する指標の検討を行った。検討するにあたって試験期間が疲労の蓄積を起こすのに十分な負荷・負担となっているかどうかについて確認した。睡眠時間が通常期と繁忙期で有意な変化を示さなかったことと、試験とレポートの回数やその主観的負担が実験参加者で大きく異なっていることから、実験参加者によって試験期間中に必ずしも疲労の蓄積が発生していない可能性があった。しかし、このような条件にも関わらず、主観指標では自覚症しらべのだるさ感と蓄積的疲労兆候インデックスの一般的疲労感に増加が認められた。また生理指標では HF の減少、HR の増加、閉眼時の前後方向の CoG の増加といった有意な変化が示めされた。これらの指標は蓄積疲労の評価指標となり得ると考えられる。

視覚探索課題の反応時間においては習熟の影響がみられたため、繁忙期における作業成績の低下は認められなかった。ただし一部の実験参加者で繁忙期において睡眠時間の短縮に伴う反応時間の延長がみられた。このことから十分に習熟させた上で用いれば、疲労の蓄積を評価できる可能性がある。

本章において蓄積疲労を評価できる可能性のある指標が複数確認された。しかしこれらの指標を面接指導の対象者のスクリーニングに用いるためには、その値を超えたときに疲労の蓄積が認められると判定するための閾値が必要となる。次章以降で閾値の設定を絶対値ではなく、各個人の平均値と標準偏差で規格化した標準得点と設定した閾値との比較によって有意な変化を検出する手法を検討している。しかし変化量を算出するためには、個人ごとに複数回の計測を行う必要がある。本章での計測は実験室にて 30 分以上の時間を掛けて行っており、この計測方法では労働現場でスクリーニングを行うことは困難である。そこで次章では、労働現場で運用可能な計測システムの開発を行う。その際、システムに組み込む指標は、主に本章で蓄積疲労を評価できる可能性があると考えられた指標を用いる。





#### 第4章 過重労働対策のための蓄積疲労の簡便な検出手法

## 4.1. はじめに

第3章で疲労の蓄積を捉えられる可能性がある指標が確認された。しかし、実験室で30分以上の時間をかけて計測する現在の手法では労働現場で過重労働対策の一環として実施するのは難しい。また疲労の評価する指標や方法の検証が現時点では十分とは言えない[16]のは、単一指標の絶対値による評価では疲労を捉えきれないためだと考えられる。そこで第4章では蓄積疲労に伴って変化する複数の指標を簡便かつ短時間で計測できるシステムの試作を行う。

また平均値と標準偏差で規格化した変化量（標準得点）を得るには当然ながら複数回の計測が必要となる。そこで本研究において試作した計測システムが対象者に無理なく継続的に利用できるものとして受け入れられたか（計測システムの受容性）について検討する。計測システムを簡便かつ短時間で行えるものとする理由は、本研究では過重労働対策の一環として行われている産業医による面接指導の対象者のスクリーニングシステムの開発を最終的な目標としているからである。そのための計測システムの要件としては、計測に際して専門家の補助を必要としない、専門知識がなくても戸惑うことなく計測ができる、実験室ではなく家庭や職場で計測できるなどが挙げられる。

以上を踏まえた上で、開発した計測システムから得られた計測データを基に、複数の指標の標準得点と設定した閾値との比較から指標の有意な変化を検出して蓄積疲労の兆候を捉える手法の検討を行う。この際、スクリーニングとしての利用を想定しているため、産業医の面接を受けることが望ましい状態を検出することと、対応が必要な労働者を見落とさないことに留意して検討を行う。

## 4.2. 方法

### 4.2.1 実験対象者と実施期間

実験は、大阪工業大学ライフサイエンス実験倫理委員会の審査を経て実施した。対象は、大阪工業大学卒業研究を行っている大学生、男性3名（22～23歳）、女性1名（22歳）である。計測は2011年1月10日から3月11日にかけて行い、本研究の実施に際して試作した計測システムを用いた。この計測期間は、前半に卒業論文の提出日や卒業研究の発表会といったイベント（表

表 4.1 蓄積疲労の原因になり得るイベントが起きた日

Table 4.1 Dates of events expected to be the cause of accumulated fatigue.

Dates	Event
Jan. 25	review of graduation thesis
Jan. 29	submission of graduation thesis
Feb. 2	review of oral presentation
Feb. 9	rehearsal of oral presentation
Feb. 12	oral presentation

4.1) が集中している忙しい期間と発表会後の余裕のある時期を含む期間を設定した。対象者は生理計測の専門家ではないが、授業や研究を通して若干の生理計測の経験を有していた。対象者には週3~5回、大学に着いた時点で(研究室に宿泊した場合は起床後すみやかに)計測するように、またできるだけ同じ時間帯に計測するように指示した。計測後に、可能な範囲で生活状況についてのメモを依頼した。全計測終了後には自由記述にて計測システムに関して回答させた。

#### 4.2.2 計測システム

第3章での検討において疲労に伴って変化している可能性があると考えられた指標を中心に、計測指標の選定を行った。予備検討では計測しなかったが血管交感神経活動を評価できる指標として脈波伝達時間を追加することにした。血管交感神経活動の指標として血圧を加えることも検討したが、計測に伴う拘束がより少ない脈波伝達時間を採用することとした。

自覚症状については、使用した3つの質問紙(自覚症しらべ[付録参照]、労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト[付録参照]、蓄積的疲労兆候インデックス[付録参照])の各質問項目の中から、評価値の標準偏差が大きかった項目(表4.2)を抽出することで、回答時間の短縮を図ることとした。計測システムは、実験準備室の洗面台に設置した(図4.1a)。家庭や職場で洗面所を利用する際に計測してもらおうという想定である。対象者の斜め前に液晶タッチパネルモニタを設置し、同じ画面を小型液晶プロジェクターを用いて、対象者の正面の洗面台の鏡に設置したーフミラーに投影した。

重心動揺は、これまでの実験と同様にWiiボードを使用した。洗面台の前の床に設置して乗るだけで計測できるようにした。データはBluetoothを介して、四隅のロードセルの出力をパソコンに記録した。

心電図は、導電性テープ(DF7007CFR-25,日本ジッパーチュービング)をWiiボードの両足の足底(参加者には素足でWiiボードに乗ってもらおう)が接する位置に2箇所とポインティングデバイスの掌が当たる位置(図4.1b,c)に貼り付けて導出することで、胸部に電極を貼らずに計測が行えるようにした。導出した信号は、生体アンプ(BA1008m,ニホンサンテック)で増幅し、A/D変換器(NI USB6009, National Instruments)を介して、サンプリングレート1000 Hzでパソコンに記録した。脈波は反射型の光電センサ(ニホンサンテック)をマジックテープに組み込むことで、容易に指に巻きつけられるようにして計測した。また呼吸ピックアップ(TR-751T,日本光電)を腹部にベルトで巻きつけさせて呼吸周期の計測を行った。

心電図、脈波、呼吸は計測準備が整ったところで、これらの信号が正常に取得できているか確認するための計測を短時間行わせ、この信号の波形を対象者に呈示した。その後、信号波形に不備があった場合には、正面の鏡に計測状況を確認する手順に進むように指示する画面を表示した。

主観指標は、鏡に投影した画面に質問を呈示し(図4.1d)、ポインティングデバイスを用いて選択・回答させる形式とした。

作業成績については、予備検討と同様の課題(図4.1e)をタッチパネルで行わせ、探索時間を

記録した。1回の計測に要する時間は、そのときの対象者の状態や個人差によるが、1～2分とな

表 4.2 選定した主観指標  
Table 4.2 Selected subjective measures

Subjective Feelings of Fatigue 自覚症しらべ	overall lethargy wants to lie down restless anxious heavy-headed feeling mental dullness stiff shoulders heavy arms dry eyes tired eyes	全身がだるい 横になりたい おちつかない気分だ 不安な感じがする 頭がおもい 頭がぼんやりする 肩がこる 腕がだるい 目がかわく 目がつかれる
Cumulative Fatigue Symptoms Index 蓄積的疲労兆候インデックス	Impatient Lethargic Shoulders are often stiff Sleep is shallow with many dreams Head is heavy of late Worried about personal health Easily angered over small things Set off by noise and people's voices Dissatisfied with many things Going to work every day is incredibly difficult Worried about many things Feel an urge to let loose Unavoidably sleepy of late No time to relax	根気がつづかない 動くのがおっくうである よく肩がこる 眠りが浅くよく夢を見る このところ頭が重い 自分の健康のことが心配だ ちよっとした事でも、すぐにおこりだすことがある 物音や人の声がカンにさわる いろんなことが不満だ 毎日出勤するのが大変つらい 心配事がある 何かでスパーっとさばらしたい このところ毎日眠くしてしようがない くつろぐ時間がない
Checklist for the Accumulation of General Fatigue of the Workers 労働者のための疲労蓄積度自己診断チェックリスト	Overcome by strong drowsiness while working Exhausted upon getting up in the morning Easily tired of late	仕事中に、強い眠気に襲われる 朝、起きた時、ぐったりとした疲れを感じる 以前とくらべて、疲れやすい

るよう作業量を設定した。

センサの装着，主観指標への回答，生理指標の計測，視覚探索課題の実施の順で計測を行わせた。生理指標の計測は呼吸の周期を統制しながら4分間行った。4秒周期で直径が正弦波状に変化する円を対象者正面の鏡に投影（図4.1f）し，これに合わせて呼吸させることで呼吸周期を統制した。

#### 4.2.3 計測指標の定量化

平均心拍数（HR）は，心電図よりR波のピークの検出を行い，R-R間隔より算出した。心拍変動指標については，計測時間が1分程度と短いため第2，3章で用いた手法での算出は困難である。そこでここではR-R間隔より瞬時心拍率を求め，3次スプライン補間で等時間間隔データに変換した上でバンドパスフィルタを用いてLF（0.08～0.15 Hz）とHF（0.15～0.5 Hz）成分を抽出した。これを絶対値変換して低域通過フィルタ（カットオフ周波数0.04 Hz）をかけて平滑化し区間内の平均をとり，これを平均心拍数で除したものを心拍変動指標（HRV-LF，HRV-HF）として評価に用いた。また，R波のピークから速度脈波のピークまでの時間を脈波伝達時間（PTT）として求めた。

重心動揺については，心拍変動指標と同様に重心の制御に自律神経が関与していることから，重心のx, y座標にFFT（Fast Fourier Transform）をかけて振幅スペクトルを求め，0.08～0.15 Hzの低周波数帯域成分（GR-LF），0.15～0.5 Hzの高周波数帯域成分（GR-HF）を求めた。

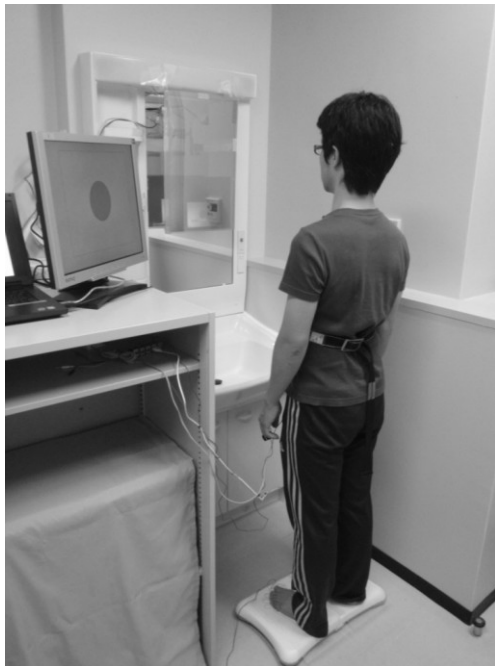
主観指標は自覚症しらべから抽出した10項目（表4.2）の評定値（1：まったくあてはまらない～5：非常によくあてはまる）の合計を求めた。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストと蓄積的疲労兆候インデックスから抽出した質問項目（表4.2）については，解析より除外した。その理由は，複数の対象者より回答しづらいとの意見が出され，信頼性のある回答が得られない可能性が考えられたためである。この2つの質問紙は数週間から1カ月程度の長期に亘る状態について回答を求める形式であるため，週に3～5回の回答を求める今回の調査に適さなかったと考えられる。

睡眠時間は，計測前日の就寝時刻と当日の起床時刻を回答させ，算出した。余暇時間は計測日前日の余暇時間を回答させた。

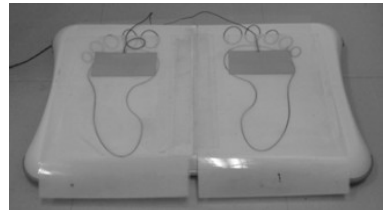
作業成績は，視覚探索課題の探索時間の中央値を評価値とした。中央値としたのは，まれに次の数字を見つけるのに平均探索時間の数倍の時間がかかる場合が見受けられたためである。

これらの指標については，対象者ごとに，全計測日の平均値と標準偏差を求め，標準得点（Standardized score もしくはZスコア）を算出した。標準得点（ $S_i$ ）は，各計測日の値を $x_i$ ，その平均値を $\bar{x}$ ，標準偏差を $\sigma$ としたとき，式4-1で表される。

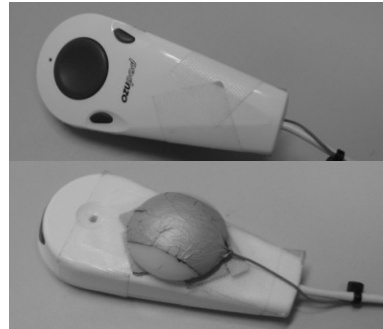
$$S_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (4-1)$$



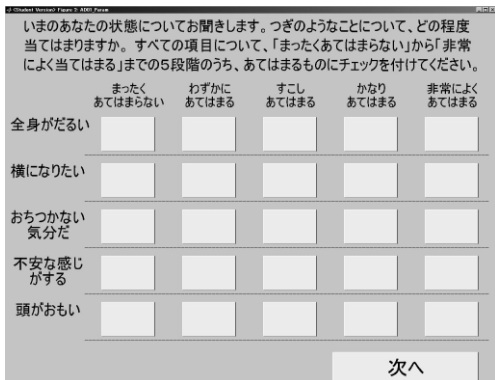
a 測定システム外観  
a Appearance of the system



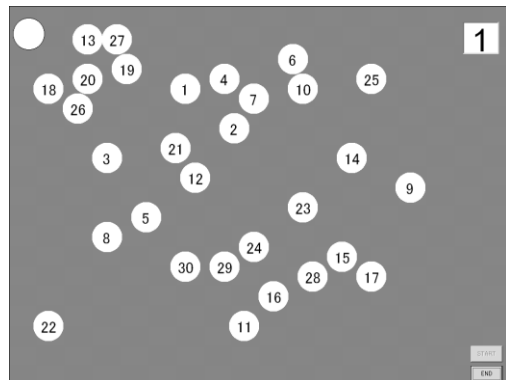
b 足底部の導電性テープの位置  
b Position of the conductive tape on the Wii board for the soles



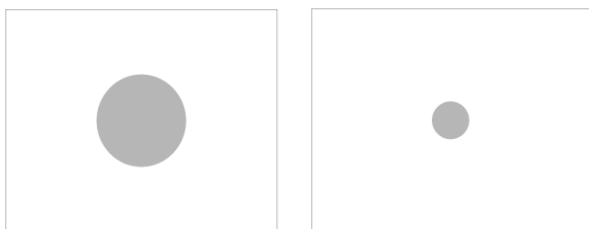
c 手掌部の導電性テープの位置  
c Position of the conductive tape on the pointing device for the palm



d 主観指標の呈示画面の一例  
d Screen image of subjective check list



e 数値探索課題の画面の一例  
e Screen image of ATMT



f 呼吸周期を統制するために呈示する円  
f Displayed circles for the respiration control

図 4.1 試作した多次元測定システム  
Fig.4.1 Prototype of the multi-dimensional measurement system

#### 4.2.4 蓄積疲労の兆候を検出する手法

本研究では、疲労状態の判定に、有意な変化が示された指標の個数を用いた。「有意な変化」は、各計測指標の標準得点が対象者ごとに定めた閾値  $c$  (表 4.3) を超えた時とする ( $c$  の設定基準は後述)。ただし単純に個数とすると、重心動揺のように算出指標が複数(4 指標 =  $x, y$  座標  $\times$  GR-LF, GR-HF 成分) ある指標が過大な寄与をしてしまう。そこで、1) 疲労感, 2) 余暇と睡眠の時間, 3) 作業成績, 4) 重心動揺, 5) 心拍数と脈波伝達時間, 6) 心拍変動指標の 6 つの指標に分類した (表 4.3)。これらは、1)は自覚的疲労の指標である主観指標, 2)は外的な負荷・負担に関し

表 4.3 蓄積疲労の判定に用いた 6 つの分類指標

Table 4.3 Six sorted indices used for the detection of accumulated fatigue.

Index category	Measurrment	Criteria
Feelings of Fatigue	SFF score	Standardized score $> c$
Leisure & Sleep time	Leisure time	Standardized score $< -c$
		or
	Leisure time	Standardized score $< c$ and
	Sleep time	Standardized score $< -c$
Work performance	Search time in SDST	Standardized score $> c$
Center of Gravity	Longitudinal	GR-LF
		GR-HF
	Lateral	GR-LF
		GR-HF
HR & PTT	HR	Standardized score   $> c$
		or
HRV indices	PTT	Standardized score   $> c$
	HRV-LF	Standardized score   $> c$
	HRV-HF	Standardized score   $> c$

SFF: Subjective Feelings of Fatigue, SDST: Sequential Digit Search Test, GR-LF: 0.08~0.15 Hz component of the amplitude spectrum of center of gravity, GR-HF: 0.15~0.5Hz component of the amplitude spectrum of center of gravity, HR: Average heart rate, PTT: Pulse Transit Time, HRV-LF: 0.08~0.15Hz component / HR, HRV-HF: 0.15~0.5Hz component / HR,



て変化する要因, 3)は他覚的疲労の指標として作業成績, 4)~6)は生理的疲労の指標として生理指標から構成している。

そして, 6 つに分類した指標の半数, つまり 3 つ以上に有意な変化が認められた場合を蓄積疲労の兆候が検出された日と判定することとした。

疲労感 は 自覚症 しらべ の 標準得点 を用い, 疲労 の 主観的 な 評価指標 とした。疲労感 の 増加 に より 閾値  $c$  を 超えた 場合 に 有意 な 変化 とした。

余暇 と 睡眠 時間 は 負荷 に 対応 する 指標 として 設定 した。忙しい と まず 余暇 に 費やす 時間 が 減り, それでも 足りない 場合 に 睡眠 時間 が 減ると 考えられる。そこで 余暇 時間 が  $-c$  より 短い 場合 を 有意 な 変化 とした。また 余暇 時間 が ある 程度 維持 された まま 睡眠 時間 が 減る 場合 も 考えられる ため, 余暇 時間 が  $c$  より 短く, かつ 睡眠 時間 が  $-c$  より 短い 場合 も 有意 な 変化 とした。

作業成績 は, 疲労 に 伴う 出来高 の 減少 や 効率 の 減退 を 捉える 指標 として SDST の 探索 時間 を 用いた。探索 時間 が  $c$  より 延長 した 場合 に 有意 な 変化 と判定 した。

重心動揺, 心拍数 と 脈波伝達時間, 心拍変動指標 は 生理的機能 の 評価指標 として 選定 した。重心動揺 は 疲労 に よって 重心 の 動揺 が 増加 すると 考えられる ため 前後左右 の GR-LF 成分, GR-HF 成分 の いずれか が  $c$  を 超えた 場合 に 有意 な 変化 とした。

心拍数 (HR) と 脈波伝達時間 (PTT) は, 蓄積疲労 の 影響 の 中 でも 負荷 や 負担 に 対応 する べく 交感神経系 を 賦活 させた 場合 に 影響 を 受ける 指標 として 選定 した。一方, 心拍変動指標 (HRV-LF, HRV-HF) は 蓄積疲労 に より 眠気 を 感じる など の 休息 を 求める 反応 を 想定 し, 副交感神経系 の 働き の 影響 を 受ける 指標 として 選定 した。これらの 指標 は 交感神経活動賦活 で, HR が 増加 し, PTT が 短縮 し, HRV-LF, HF が 低下 する。また 副交感神経賦活 で HR が 減少 し, PTT が 延長 し, HRV-LF, HF が 増加 する。これらの 指標 は  $c$  より 大きい 場合 も  $-c$  より 小さい 場合 も 有意 な 変化 とした。自律神経系 は ホメオスタシス の 維持 に あたる システム であり [68], 正 と 負 どちら の 変化 も 閾値 を 超えている 場合 には 生体 に 大きな 負荷・負担 が かかっていると 考えられる ため である。

各指標 の 推移 を 図示 する 際は, 各指標 の 標準得点 ( $S_i$ ) が 閾値  $c$  を 超えている か どうか を 判断 し やすい よう に 表 4.3 を 基準 として 以下 の 方法 に て プロット する 値 ( $P_i$ ) を 設定 する。

疲労感, 作業成績 は 以下 の 通り である。

$$P_i = S_i \quad (4-2)$$

余暇 と 睡眠 の 時間 は, 余暇 時間 の 標準得点 ( $S_L$ ) が  $-c$  より 小さい 場合 には

$$P_i = -S_{Li} \quad : S_L < -c \quad (4-3)$$

とする。  $S_L$  が  $c$  より 小さく, 睡眠 時間 の 標準得点 ( $S_S$ ) が  $-c$  より 小さい 場合 には

$$P_i = -S_{Si} \quad : S_L < c \text{ and } S_S < -c \quad (4-4)$$

とする。それ以外の場合には,  $S_L$  より  $S_S$  が 小さい 場合 には

$$P_i = -S_{Si} \quad : S_L > S_S \quad (4-5)$$

とし,  $S_S$  より  $S_L$  が 小さい 場合 には

$$P_i = -S_{Li} \quad : S_S > S_L \quad (4-6)$$

とし、 $S_S$ と $S_L$ が等しい場合には

$$P_i = -S_{Li} = S_{Si} \quad : S_S = S_L \quad (4-7)$$

とする。

重心動揺は、前後方向の GR-LF, GR-HF と左右方向の GR-LF, GR-HF の中で最大の値を GR-MAX, そのときの標準得点を $S_{GR-MAX}$ とし、

$$P_i = S_{GR-MAXi} \quad (4-8)$$

とする。

心拍数と脈波伝達時間は、心拍数の標準得点を $S_{HR}$ , 脈波伝達時間の標準得点を $S_{PTT}$ とした場合、 $S_{HR}$ の絶対値が $S_{PTT}$ の絶対値より大きい場合には

$$P_i = |S_{HRi}| \quad : |S_{HR}| > |S_{PTT}| \quad (4-9)$$

$S_{PTT}$ の絶対値が $S_{HR}$ の絶対値より大きい場合には

$$P_i = |S_{PTTi}| \quad : |S_{PTT}| > |S_{HR}| \quad (4-10)$$

$S_{HR}$ の絶対値と $S_{PTT}$ の絶対値が等しい場合には

$$P_i = |S_{HRi}| = |S_{PTTi}| \quad : |S_{HR}| = |S_{PTT}| \quad (4-11)$$

とする。

心拍変動指標は、HRV-LF の標準得点を $S_{HRV-LF}$ , HRV-HF の標準得点を $S_{HRV-HF}$ とした場合、 $S_{HRV-LF}$ の絶対値が $S_{HRV-HF}$ の絶対値より大きい場合には

$$P_i = |S_{HRV-LFi}| \quad : |S_{HRV-LF}| > |S_{HRV-HF}| \quad (4-12)$$

$S_{HRV-HF}$ の絶対値が $S_{HRV-LF}$ の絶対値より大きい場合には

$$P_i = |S_{HRV-HFi}| \quad : |S_{HRV-HF}| > |S_{HRV-LF}| \quad (4-13)$$

$S_{HRV-LF}$ の絶対値と $S_{HRV-HF}$ の絶対値が等しい場合には

$$P_i = |S_{HRV-LFi}| = |S_{HRV-HFi}| \quad : |S_{HRV-LF}| > |S_{HRV-HF}| \quad (4-14)$$

とする。

検出される日数は、閾値  $c$  の大きさによって左右される。閾値  $c$  を大きくすると見落としが増加し、小さくすると誤検出が増加することになる。本研究では、閾値  $c$  は、1.0 を初期値とし、検出される日が 3 日以下になるように 0.1 刻みで増加させた。また指標を数える条件は指標の意味を勘案して、 $c$  以上のみ、 $-c$  以下のみ、もしくは  $c$  以上と  $-c$  以下の両方の 3 つの条件 (表 4.3) を使い分けた。

この蓄積疲労の兆候を検出する手法の妥当性は、検出された計測日が、卒業論文の提出日や卒業研究の発表会といったイベントの日程 (表 4.1) や、参加者のメモから判定した疲労の蓄積の可能性のある日と符合するかどうかで判定した。

### 4.3. 結果

#### 4.3.1 計測システムの使用状況

対象者 4 名全員が一人で計測でき、計測に要する時間は全体で 10 分程度となった。計測回数(日

数)は、約2ヶ月に亘る実験期間中に16日から21日行われた。また蓄積疲労の原因になり得るイベントの日(表4.1)の多くで計測が実施されていた。ただし、計測時刻にはばらつきがみられた。また卒業研究発表会後は来学の頻度の減少に伴いデータ数が減少した。

電極を装着しないで計測した心電図は計測開始時に立ち位置や手の握りを調整する必要が生じたが、正面の鏡に投影したガイダンスを参照し対象者自身で容易に対応が可能であった。しかし計測開始後に一部にノイズが混入した。立ち方や手の握りが変わったり、力が入ったりしたため筋電が混入したと考えられる。それでも、8割以上のデータにおいてR波の検出が連続して1分以上行える区間が確保されており、HRV-LF、HF成分の算出が可能であった。その他の計測はほぼ問題なかった。

#### 4.3.2. 蓄積疲労の兆候の検出結果

6つに分類した指標(表4.3)の標準得点を対象者ごとに図4.2~4.5に示した。判定基準を満たした計測日には、網掛け表示した。なおプロットした値の算出方法は4.2.4に基づく。

3名が口頭発表予行演習の前日の2月8日に検出され、2名が当日の2月9日が検出された。その他の検出は、卒業論文提出の前日と当日(1月28,29日)、口頭発表練習の当日(2月2日)、ポスター発表練習の当日(2月12日)に各1名と、指導教員による卒業論文の確認を行った1月25日に2名となり、述べ12日のうち11日はイベントに関わる日であった。残り1日(2月19日)は卒業論文に関連するイベントがすべて終了した後であった。検出された延べ12日において、分類した6つの指標すべてが検出に寄与していた(表4.4)。内訳は、疲労感は5回、余暇と睡眠の時間は6回、作業成績は5回、重心動揺は8回、心拍数と脈波伝達時間は12回、心拍変動性指標は8回であった(表4.4)。

また検出された計測日は、心臓循環器系の交感神経活動が優位な日と副交感神経活動が優位な日に分けられる(表4.5)。交感神経系が優位と考えられる日は、対象者Aの2月2日、対象者Bの1月28日、対象者Cの2月9日の3日間であった。

これらの計測日は、心拍数が高いか、脈波伝達時間が短い、もしくはその両方を示していた。この3日間の内、対象者Aの2月2日と対象者Bの1月28日の2日間は、さらにHFが小さく、副交感神経系の活動が少ないと考えられ、相対的に交感神経系が優位であることが示唆された。

その他の9日間は、交感神経活動が優位と考えられる3日間とは反対に心拍数が低いか、脈波伝達時間が長い、もしくはその両方を示しており、副交感神経活動が優位と考えられた。さらに対象者Bの2月8日と対象者Cの2月19日においては、HFが大きいことから、副交感神経系が優位と推察された。

この2日間以外では、LFが高い計測日が5日間みられる。LFは、交感神経活動と副交感神経活動の両方の影響を反映するが、心拍数と脈波伝達時間の結果から、副交感神経系の活動の影響を受けて高い値を示していると推察された。

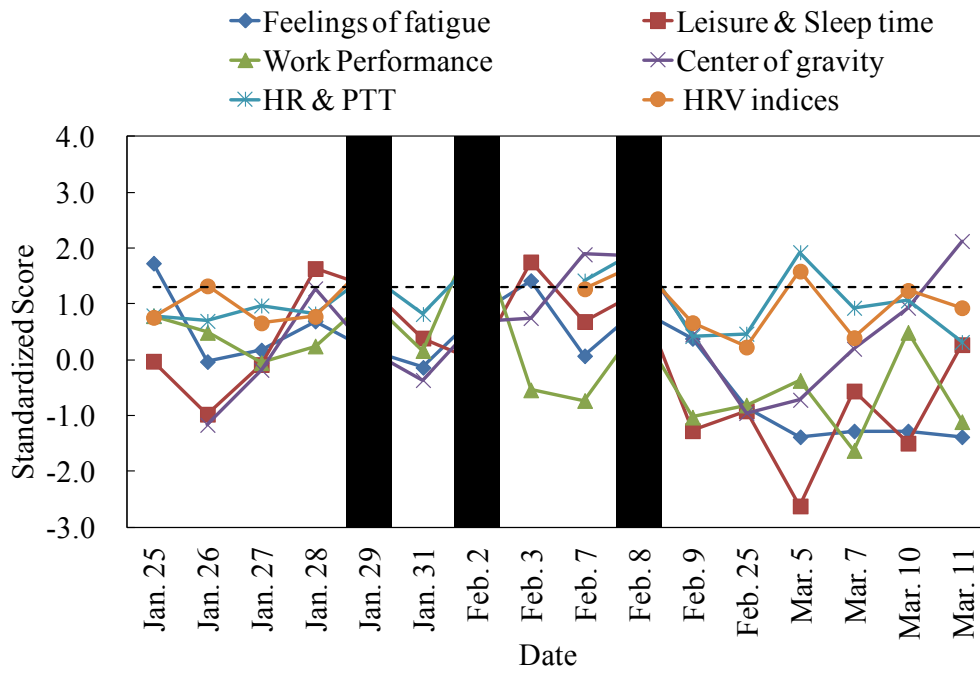


図 4.2 対象者 A の各指標の時系列変化

Fig.4.2 Changes of six indices in subject A

---: Threshold value C      ■: Dates detected by this system

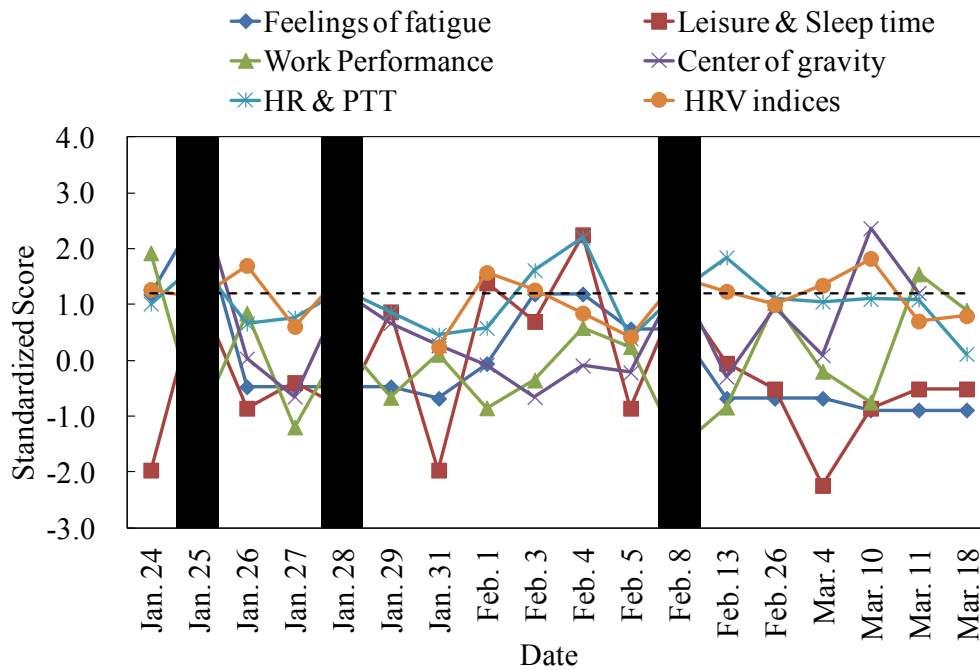


図 4.3 対象者 B の各指標の時系列変化

Fig.4.3 Changes of six indices in subject B

---: Threshold value C      ■: Dates detected by this system

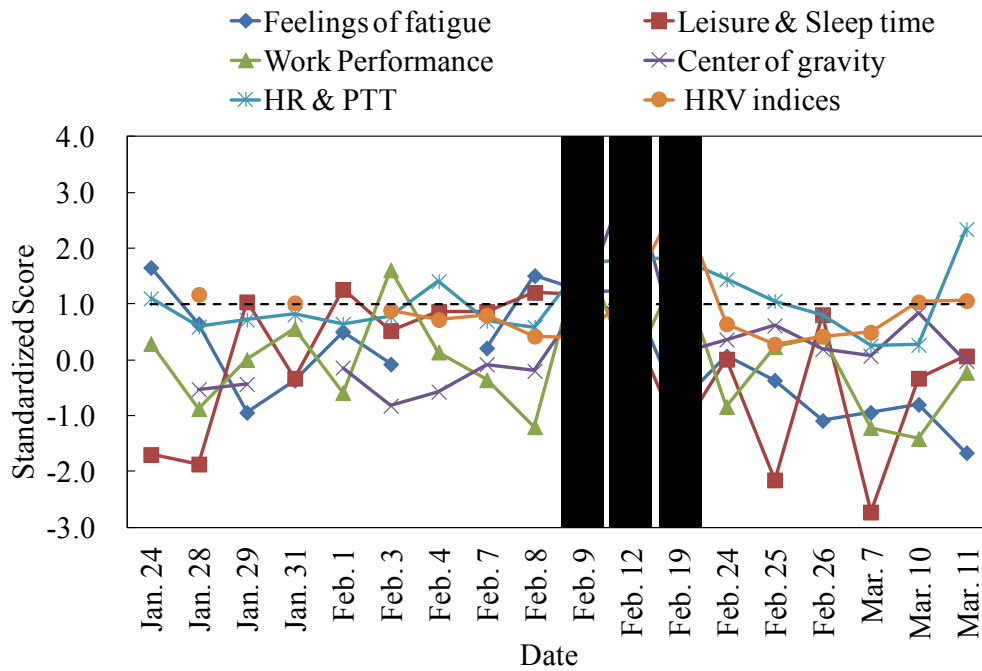


図 4.4 対象者 C の各指標の時系列変化

Fig.4.4 Changes of six indices in subject C

---: Threshold value C      ■: Dates detected by this system

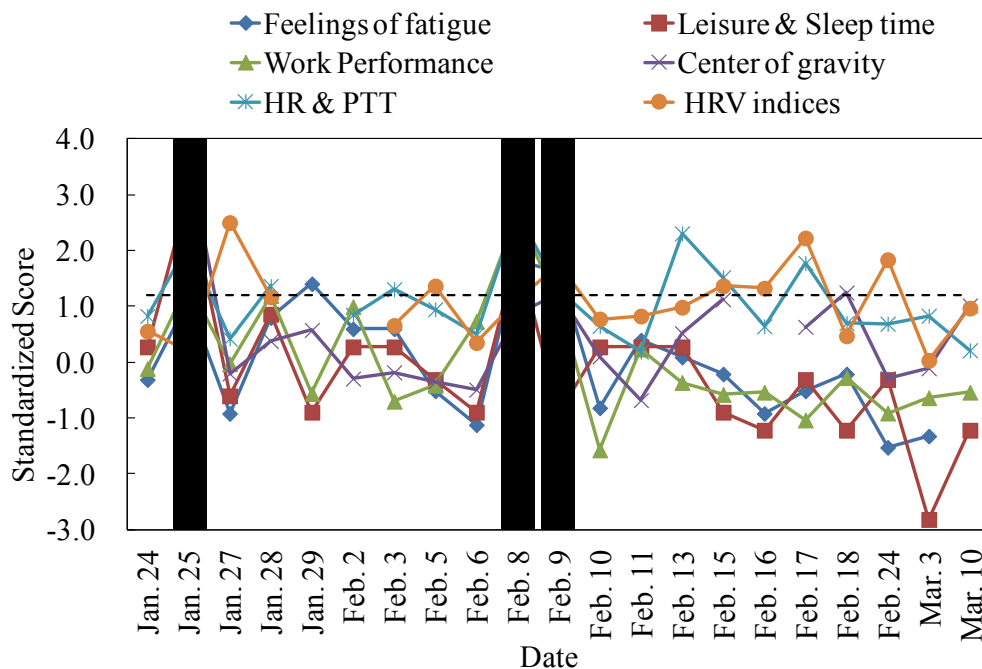


図 4.5 対象者 D の各指標の時系列変化

Fig.4.5 Changes of six indices in subject D

---: Threshold value C      ■: Dates detected by this system

表 4.4 蓄積疲労の兆候を検出する手法によって検出された測定日と検出に寄与した指標

Table 4.4 Detected dates by this system

Participants		A		B		C		D						
Threshold value (c)		1.3		1.2		1.0		1.2						
Date		Jan.29	Feb.2	Feb.8	Jan.25	Jan.28	Feb.8	Feb.9	Feb.12	Feb.19	Jan.25	Feb.8	Feb.9	
Indices	Measurment & criterion	Sum												
<b>Feelings of Fatigue</b>	<b>SFF score &gt; c</b>	—	—	—	✓	—	—	✓	✓	—	—	✓	✓	5
	<b>Leisure time &lt; -c</b> <b>or</b> <b>Leisure time &lt; c and Sleep time &lt; -c</b>	✓	—	—	✓	—	✓	✓	—	—	✓	✓	—	6
<b>Leisure &amp; Sleep time</b>	Leisure time < -c	✓	—	—	—	—	—	✓	—	—	—	✓	—	
	Leisure time < c	—	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	
	Sleep time < -c	—	—	—	✓	—	✓	—	—	—	✓	—	—	
<b>Work performance</b>	<b>Search time in SDST &gt; c</b>	—	✓	—	—	—	—	✓	—	✓	✓	✓	—	5
	<b>Center of Gravity</b>													
<b>Center of Gravity</b>	<b>any criterion &gt; c</b>	—	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—	✓	8
	Longitudinal GR-LF > c	—	—	—	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	
	Longitudinal GR-HF > c	—	—	✓	—	—	—	—	✓	—	✓	—	—	
	Horizontal GR-LF > c	—	—	—	✓	—	—	—	✓	—	✓	—	—	
	Horizontal GR-HF > c	—	—	✓	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—	—	
<b>HR &amp; PTT</b>	<b> HR  &gt; c</b> <b>or</b> <b> PTT  &gt; c</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	HR < -c	✓	—	✓	✓	—	✓	—	—	✓	✓	—	✓	
	HR > c	—	✓	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	
	PTT < -c	—	✓	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	—	
	PTT > c	—	—	✓	—	—	—	—	✓	—	—	✓	—	
<b>HRV indices</b>	<b> HRV-LF  &gt; c</b> <b>or</b> <b> HRV-HF  &gt; c</b>	✓	✓	✓	—	✓	✓	—	✓	✓	—	—	✓	8
	HRV-LF < -c	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	HRV-LF > c	✓	—	✓	—	—	—	—	✓	✓	—	—	✓	
	HRV-HF < -c	—	✓	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	
	HRV-HF > c	—	—	—	—	—	✓	—	—	✓	—	—	—	

Indices that contributed to the detection of fatigue are indicated by check marks by the proposed method.

SFF: Subjective Feelings of Fatigue, SDST: Sequential Digit Search Test, GR-LF: 0.08~0.15 Hz component of the amplitude spectrum of center of gravity, GR-HF: 0.15~0.5Hz component of the amplitude spectrum of center of gravity, HR: Average heart rate, PTT: Pulse Transit Time, HRV-LF: 0.08~0.15Hz component / HR, HRV-HF: 0.15~0.5Hz component / HR,

表 4.5 本手法によって検出された測定日における自律神経活動の分類

Table 4.5 Classification of autonomic nervous system activity on the measurement dates detected by the method

Participants	A			B			C			D		
Threshold value (c)	1.3			1.2			1.0			1.2		
Date	Jan.29	Feb.2	Feb.8	Jan.25	Jan.28	Feb.8	Feb.9	Feb.12	Feb.19	Jan.25	Feb.8	Feb.9
↑: HR > c, ↓: HR < -c	↓	↑	↓	↓	↑	↓	-	-	↓	↓	-	↓
↑: PTT > c, ↓: PTT < -c	-	↓	↑	-	-	-	↓	↑	-	-	↑	-
↑: HRV-LF > c, ↓: HRV-LF < -c	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	-	-	↑
↑: HRV-HF > c, ↓: HRV-HF < -c	-	↓	-	-	↓	↑	-	-	↑	-	-	-
S: sympathetic activation, P: parasympathetic activation	P	S	P	P	S	P	S	P	P	P	P	P

HR: Average heart rate, PTT: Pulse Transit Time, HRV-LF: 0.08~0.15Hz component / HR, HRV-HF: 0.15~0.5Hz component / HR

#### 4.4. 考察

##### 4.4.1 計測システムの受容性について

全対象者において、計測を試みたすべての機会に計測が単独で行えた。また卒業研究に関する各種締め切りが集中している時期においても継続的に計測が実施されていることから、本研究で用いたシステムの受容性は十分にあったと考えられる。しかし計測時刻にばらつきがあった。これは研究室に宿泊するなどの生活の乱れに起因するものである。自律神経指標は日内変動や摂食の影響を受けるため、今回の結果は蓄積疲労の影響に加えてこれらの影響が含まれている可能性を考慮する必要がある。しかし実用において対象となる一般的な労働者では起床時刻や出勤時刻は学生に比べ安定しているため大きな問題にならないと考えられる。

全計測終了後に回収したシステムに関する自由記述形式のアンケートにおいて、計測時間が長いとの記載があった。また今回の対象者は若干とは言え、生理計測の経験を有しており、研究の目的や意義に関する理解も深く協力的であったため、一般の労働者においても同様の結果が得られるとは限らない。実用化に際しては、受容性を高めるために計測時間の短縮が望ましいと考えられる。そのためには以下の4点が有効と考える。

##### a. 質問項目の整理

長期間に亘る症状に関する質問が多く、回答しづらいとの意見があった質問項目を削除することで計測時間の短縮を図る。

##### b. 生理指標の計測時間の短縮

センサ形状の見直しや計測手法の変更により安定した計測が行えるようにし、1分間程度の連続したデータが取得できれば終了するように改良する。

##### c. 呼吸の計測の省略

映像呈示により呼吸周期の統制が行えることが確認できたため、呼吸の計測は省略する

#### d. 手順の説明の省略

計測回数や頻度に合わせて説明を簡略化したり、ユーザの要求があるときだけ説明を出したりするようにする。

#### 4.4.2 蓄積疲労の兆候を検出する手法の妥当性について

検出された12日中11日は蓄積疲労の原因となり得るイベントに関連しており、特に口頭発表予行演習の前日(2月8日)もしくは当日(2月9日)が全対象者において検出された。参加者のコメントからも発表会(2月12日)直前はすでにほぼ準備が整った状態で、さほど負担が大きくなり、発表練習(2月2日)後に指摘された修正を行い口頭発表予行演習(2月9日)に臨む時期が最も負担が高かったと推定され、判定基準の妥当性を支持する結果であった。しかし、これらのイベントによって疲労が蓄積していったと考えると、1つ目のイベント(1月25日:指導教員による卒業論文の確認)で蓄積疲労の兆候が検出された対象者が4名中2名おり、イベントがある期間の後半に検出日が集中していないこと(図4.2~4.5)に疑問が生じる。これは各イベントには2~6日の間隔があるため、この間に疲労の回復が起こり、疲労の蓄積が連続して起こらなかったと考えられる。また計測は帰宅前、もしくは就寝前に行われているのではなく、大学に着いた時点(研究室に宿泊した場合は起床後)に実施している。そのため検出は、前日もしくはこれまでの疲労が翌日まで持ち越されている日に限られる。これらの観点から、検出日が分散していることは、必ずしも本研究で用いた判定基準が蓄積疲労を捉えられなかったことを意味しない。

6つの統合指標(疲労感、余暇と睡眠の時間、作業成績、重心動揺、心拍数と脈波伝達時間、心拍変動性指標)の間に、一貫した関連は見受けられなかった。しかしこの結果は本研究の仮説を支持するものである。本研究は、「疲労の概念が複合的で単独の指標による評価ができないことと、指標値には個人差が大きく、絶対値による評価が困難であること」を蓄積疲労の評価を難しくしている要因として仮定している。今回、各統合指標間に一貫した関連は見受けられなかったのは、これら6つの統合指標が独立していることと、対象者や計測日によって蓄積疲労の影響が現れる指標が異なることを示唆していると考えられる。これを示す特徴的な結果として、疲労感が計測日の検出に寄与した日が12日間中5日間しかないことが挙げられる。これは、蓄積疲労が疑われる状態にあっても、疲労感を訴えない場合があることを示唆している。

検出された計測日について心臓循環器系の交感神経活動が優位な日と副交感神経活動が優位な日に分類した結果、両方に分類された(表4.5)。この相違に関しては、更なる検討が必要と考えられるが検出された計測日と蓄積疲労の原因となり得るイベントが行われた日が符合していたことから、個人ごとに平均値と標準偏差で規格化した変化量と設定した閾値との比較により自律神経系の活動が大きく変動した場合を蓄積疲労の兆候とする手法の有効性が示されたと考えられる。

卒業研究の終了後に検出された参加者Cの2月19日は、蓄積疲労の原因となり得るイベント



がすべて終了しているため、誤検出の可能性が考えられる。この日は表 4.4 より、検出された 12 日中で唯一余暇時間が閾値より長いこと（余暇時間が $<-c$  と $<c$  の双方において✓である）から、前日に余暇を長時間取っており、そこでの余暇活動による疲労が原因で検出されたと推察できる。蓄積疲労のスクリーニングシステムとしては意図していない仕事や業務に因らない検出を減らすためには、データ数を増やし様々な誤検出のパターンを収集して検出精度を上げていく必要がある。ただし 12 日中 11 日で、妥当な検出日が得られている。また本研究の最終的な目標はスクリーニングシステムであり、誤検出より、対応が必要な対象者の見落としの方が問題であると考えられるため、本手法の有効性を否定する結果とまでは言えない。

以上の観点から、本研究で設定した判定基準には更なる検討が必要であるが、閾値を超えた指標の個数をもって蓄積疲労の兆候を検出する手法が有効であることが示されたと考える。しかし、本研究では対象者が 4 名と少ないこと、対象者は卒業研究前で蓄積疲労が認められる状況にはあったが労働者が産業医を受診する必要がある水準に達しているとは言えないため、定量的な閾値と指標の個数については今後フィールド実験を行い決定していく必要がある。判定基準は、見落とし（検出漏れ）と誤検出をともに最小にするのが望ましいが、これらはトレードオフの関係にある。誤検出をどの程度まで許容できるかは、スクリーニングシステムを利用する組織体と運用方法に依存する。

#### 4.5. おわりに

本章で開発した計測システムは、全対象者において計測を試みたすべての機会に計測が単独で行え、繁忙期においても継続的に計測が実施されていることから、その受容性は十分にあったと考えられる。また本システムが、自覚症状、労働による負担、作業能力、生理的機能の 4 つの観点に対応する疲労感、余暇と睡眠の時間、数値探索課題の探索時間、心拍数、脈波伝達時間、重心動揺、心拍変動性指標を長期間に亘り継続して計測が行えることが確認された。

蓄積疲労の兆候を検出する手法については、検出された計測日は、すべて蓄積疲労の原因となり得るイベントに関連しており、本研究で用いた判定基準の妥当性を支持する結果であった。今回用いた判定基準は、複数の指標の規格化した変化量が個人ごとに設定した閾値を超えた個数によって規定されている。この手法は、従来用いられてきた単一指標による絶対値での評価では、検出できない疲労の兆候を捉えられる可能性が示された。

しかし本章にてシステムを使用したのは学生であり、労働者においても十分な受容性が得られるかについては検討の余地がある。また対象者が 4 名と少なく、検出閾値の設定方法と複数の指標の組み合わせによる評価方法の確立には至っていない。そこで次章では、計測システムに更なる改良を加えた上で労働者を対象とした運用試験を行い、蓄積疲労の兆候の検出手法と計測システムの実用性の検証を行う。

## 第 5 章 検出システムの現場での運用のための改良と評価

## 5.1. はじめに

第4章にて複数の指標を計測する計測システムの開発を行い、学生を対象に蓄積疲労の兆候の検出方法について検討を行った。検出方法は、指標の変化量を対象者ごとの平均値と標準偏差で規格化を行った上で、機序の異なる複数の指標において変化量が設定した閾値を超えた場合とした。この手法は検出閾値の設定方法に検討の余地が残るが、蓄積疲労の兆候を捉えられる可能性が示された。

また開発した計測システムの運用上の問題点についても検討した。企業に設置して継続的に利用してもらうためには、計測に対する動機付けの強化と計測に伴う時間や手間の更なる軽減が必要と考えられた。また学生を対象とした検討では、過重労働の対策の一環として行われている産業医による面接指導の対象者のスクリーニングシステムの検証としては不十分であることは明らかである。

そこで本章では計測システムの更なる改良を進めた上で、実際に企業にて長期間（1か月以上）に亘る運用を試みて、改良した計測システムの受容性を確認すると共に、個人ごとに平均点とした変化量と設定した閾値との比較を用いた蓄積疲労の検出手法の実用性を検討することを目的とする。

## 5.2. 方法

### 5.2.1. 計測システムの改良

企業で計測することを前提に計測システムの構成を見直すと共に、計測に伴う時間と手間の短縮のために計測項目と計測方法の見直しを行った。見直しの要点は以下の通りである。

#### 5.2.1.1. 設置手順の簡略化

第4章の計測システムは可搬性に乏しい据え置き型の装置となっている。しかし、企業に設置する場合には、オフィスの片隅や更衣室などのその職場に合わせた任意の場所に設置できることが求められる。そこで計測システムは限られたスペースでも設置できる大きさにした上で、設置や移設が容易な構成とする。

#### 5.2.1.2. 立ち上げ手順の簡略化

第4章の計測システムは、各種計測機器をすべて個別に立ち上げる必要がある。また計測システムで用いているプログラムもデータの記録や数値探索テスト（SDST）の制御など用途によって独立しており、その立ち上げや設定もある程度の専門知識を必要とする。企業において運用するためには特別な知識を必要しないのはもちろん、計測システムの立ち上げに要する時間と手間の軽減が必要と考えられる。そこで各種計測機器の立ち上げ手順の整理・統合を進めるとともに、計測プログラムにおいても自動化を進め、簡単な操作で計測が開始できるようにする。

### 5.2.1.3. 計測における操作性の向上

第4章での対象者は若干とは言え生理計測の経験を有しており、一般の労働者に比べると計測装置の扱いに慣れている。一般の労働者においては計測手順や方法の説明をより適切に行う必要があると考えられる。また4章の計測システムでは心電図と脈波の計測波形を画面に呈示して確認させていた。ノイズの混入の確認でありそれほど難しい作業ではないが、混入の程度によっては判断に迷う場合も考えられる。改良するシステムでは、計測波形からR波が検出できるか、速度脈波のピークの検出が精度よく行えているか、脈波伝達時間（PTT）が正しく算出されているかを自動で判定できるようにする。

### 5.2.1.4. 計測時間の短縮

本研究は翌日まで残っている疲労を対象としているため、計測は出勤時に行うことを想定している。しかし、第4章の計測システムでの計測に要する時間は15分ほどであり、現状では業務に支障が出る場合や、計測が後回しにされ蓄積疲労ではなく当日の疲労が計測データに影響する恐れがある。そこで計測に要する時間を5分程度に収めることを目標に計測項目の絞り込み、計測手法の変更などを行う。

## 5.2.2. フィールドと対象者の選定

対象とするフィールドは以下の条件が満たされていることが望ましい。

- a. 医師による面接指導の対象となるような従業員がいる
- b. 運用試験の期間中に蓄積疲労がない（疲労が翌日以降に繰り越されない）日が続く期間と蓄積疲労が発生する（疲労が翌日まで残りそれが蓄積していく）期間の両方が含まれている
- c. 日勤の労働者である（夜勤が含まれていたり、交代制勤務ではない）
- d. 企業が管理している勤務時間のデータの提供が得られる
- e. スクリーニングシステムの導入に理解があり、対象者への働きかけが期待できる

a.は提案手法によって現行の基準に相当する従業員が検出できるか検討するために必要となる。

b.は本研究で提案しているスクリーニング手法における蓄積疲労兆候の検出原理に起因する。

本手法は、負担が増大した際の疲労感、余暇と睡眠の時間、作業成績、重心動揺、心拍数と脈波伝達時間、心拍変動指標の6つの指標について平均点と標準偏差で規格化した変化量と設定した閾値との比較から蓄積疲労の兆候を捉えている。そのため運用試験時に忙しい期間がまったくない場合はもちろん、常に忙しい場合においても検出が行えない。これはこの手法の欠点だが、過労が社会的問題になっているにも関わらず疲労を評価できる指標やその評価閾値が確立していない現状において、個人ごとの平均点と標準偏差で規格化した変化量と設定した閾値との比較を用いた評価方法の検討は社会的な意義があると考えられる。

c.については評価指標に心拍、脈波伝達時間、心拍変動指標、重心動揺といった自律神経に関わる指標が含まれており、食事や起床からの経過時間を考慮する必要がある。また概日リズムの

影響を考えると計測時刻にも留意すべきである。これらを一定に保つという観点だけを見れば常に夜勤であっても問題ないが、企業での最初の運用試験であることから最も一般的な勤務形態である日勤が望ましいと判断した。

d.の勤務時間のデータの提供は、本手法による検出と現行の基準とを比較するために必要となる。現行の産業医による面接指導は、月 100 時間超の時間外・休日労働を行い、疲労の蓄積が認められる者が申し出ることによって行われている。本研究では複数の評価指標を組み合わせることで、この基準の満たす対象者を漏れなく検出すると共に、従来の基準では取りこぼしていた対象者を抽出することを最終的な目標としており、現行の基準に挙げられている勤務時間は検討を行う上で必須のデータとなる。

e.は継続した計測に欠かせない条件だと考えられる。第 4 章の考察で言及したように本手法は一定期間繰り返し計測する必要があるため、計測への動機づけと計測の継続を促す働きかけが重要となる。また改良に伴い、計測時間は短く設置場所を選ばない仕様になったとは言え、業務と関係のない作業を従業員に課すことに対しての理解を得る必要がある。なお運用試験に先立ち、過重労働の問題についてこの手法の導入で期待される効果の説明と共に、対象者には運用試験終了後に自分のデータの推移をレポートにまとめて報告することを伝え動機づけの強化を図った。

これらの本手法の検証のために必要な条件の他に、何らかのトラブルが生じた際にサポートに行ける距離であることを考慮して、福岡県内にある材料や環境の調査および解析を業務とする企業を対象とした。しかし対象とした事業所は、必ずしも a. b. c. d. e.のすべてを満たしていない可能性が高い。当該事業所の役職者も運用試験に際して、「残業は発生するが月の超過勤務時間が 100 時間を超えることは稀である」と報告している。しかし、面接指導の対象者となる基準を満たす従業員が多数いる事業所が調査を受け入れる可能性は低いと考えられる。実際、部外者が会社を訪問し従業員に対して直接疲労調査を行うことや、勤務簿などのデータの提供することに難色を示し、調査の受け入れを断る企業が複数あった。

本研究では、必ずしも提案するスクリーニング手法の検証に最適な条件が整っているとは言えないが、月 100 時間を超える可能性は低いながらも、超過勤務が発生することが予想されることと、その他の条件を満たしていることから当該事業所にて運用試験を実施することとした。なお本研究は産業医科大学倫理委員会の審査を経て実施し、事前に文書と口頭により実験内容について説明を受けた上で、文書にて実験参加を承諾した 20 名を対象にして行った。

### 5.2.3. 実験方法

運用試験の期間は 2013 年 7 月 22 日（月）から同年 8 月 30 日（金）までの 6 週間とし、対象者にはこの期間中に週 2 日以上頻度で延べ 15 日以上計測するように指示した。また、蓄積した疲労を捉えるため入社時に計測を行うように依頼した。計測項目は、「5.3.4. 計測時間」で述べる項目以外は第 4 章の計測システムと同等である。解析方法および蓄積疲労の兆候を検出する手法も同様である。

また計測システムとは別に計測日と毎週金曜日に、提案手法によって検出された日の妥当性を検証するためのアンケートへの回答を求めた。計測日に回答させたアンケート用紙には、昨日または今日、疲れているように見えた対象者の氏名に○印をつけさせた。また特に疲れているように見えた対象者には◎印をつけるように指示した。それに加え、自由記述にて昨日もしくは今朝、普段と異なることがあれば記載させた。毎週金曜日に回答させたアンケートの項目は、その週について「疲れていた」、「体調がすぐれなかった」、「仕事が忙しかった」のそれぞれについて「大変当てはまる」から「まったく当てはまらない」までの7段階で評価させた。また、「大変当てはまる」、「当てはまる」、「やや当てはまる」と回答した場合には、その原因について回答を求めた。疲れに関しては、「仕事」、「プライベート」、「わからない」、「その他」の4択で、体調に関しては、「仕事」、「一過性の病気（風邪など）」、「慢性疾患（持病など）」、「わからない」、「その他」の5択で、仕事に関しては、「納期がせまっている」、「慢性的に業務量が多い」、「トラブルが発生した」、「その他」の4択で回答させた。また、「産業医の面談を希望する」についても「大変当てはまる」から「まったく当てはまらない」までの7段階で評価させて、希望する場合にはその原因について「仕事に関連すること」、「一過性の病気（風邪など）」、「慢性疾患（持病など）」、「その他」の4つから選択させた。またこの運用試験や計測システムについて気になる点についても自由記述にて回答を求めた。また運用試験終了後に、企業から勤務時間および出張や休日出勤のデータの提供を受けた。

#### 5.2.4. 提案手法にて検出された日の妥当性の外的基準

ここで4章で用いた疲労が蓄積している日の検出方法を確認する。4章では閾値を調整することにより計測システムの運用期間から3日間を抽出している。つまり原理的には疲労の蓄積の有無に関わらず、必ず3日間の検出日が抽出される。この検出方法は、運用期間中に疲労の蓄積が起こっていることを前提にできる集団（卒業研究の追い込みの時期の大学生）を対象している場合のみ成立する。しかし社会人を対象とする場合には必ずしも疲労の蓄積が起こるとは限らないため、スクリーニング手法の検出原理の見直しが必要となる。そこで、5.2.2のbを満たしていない、または以下の2つの条件の両方を満たす疲労の蓄積が起こっている可能性が低いと考えられる対象者は提案手法の妥当性の検証の対象外とした。

〈 除外基準 〉

- ・睡眠時間の最大値と最小値の差が1時間以下
- ・1日当たりの最大超過勤務時間が2時間以下もしくは平均超過勤務時間が30分以下

睡眠時間に関しては、その長さ自体を条件とすることも検討したが、個人差が大きく一律の基準を定めるのが難しい。そこで運用期間中に仕事による負担が大きい期間がある場合には、睡眠時間の変動が大きくなると考え、最大値と最小値の差を用いて条件を設定した。ただし、この条件のみだと運用期間中において定常的に睡眠が不足している場合も除外されてしまうため、1日

当たりの最大超過勤務時間が2時間以下を条件に加えた。さらに2時間以上の超過勤務が発生していたとしても残業が常態化していなければ疲労の蓄積は行わないと考え、平均超過勤務時間が30分以下も条件に加えた。本スクリーニング手法は現行の超過勤務時間を用いた基準では取りこぼされる対象者の抽出を目標に挙げているため、超過勤務時間による対象からの除外は過大にならないように配慮した。

またこの除外基準とは別に計測不備によって、以下に示すi～ivの基準に該当する日で表4.3に示した6つの指標のうち2つ以上の値が得られなかった場合も除外した。

除外されなかった対象者について提案手法によって検出された日の妥当性を以下の基準(以下、外的基準)に該当するかどうかで評価した。

#### ＜ 外的基準 ＞

- i. 産業医による面談を希望しており、かつ5時間/日の超過勤務があった翌日
- ii. 企業より提供を受けた情報より出張や休日出勤など負担が大きいと考えられるイベントがあった翌日
- iii. 同僚から疲れているように見えた日
- iv. 仕事に関連する疲労に繋がる可能性のあるイベントがあった翌日

これらは計測システムとは別に回答を求めたアンケートの結果と企業より提供を受けた勤務時間などの情報との対応を基に判断した。

現行の産業医による面接指導の対象者は、月100時間以上の時間外・休日労働を行い、疲労の蓄積が認められ本人からの申し出がある者である。これを基準に、iでは仕事に起因する理由により産業医の面談を希望した週で、前日の超過勤務時間が5時間以上(=100時間/月÷5日間/週÷4週間/月)の日を本手法で取りこぼすことなく検出できているかを検討することとした。

iiは企業から提供を受けたデータより、iiiとivはアンケートより設定する。なおivは検出するのが望ましい仕事に起因する疲労の発生が考えられる記載が自由記述にあった翌日(以下、検出するのが望ましい日)を該当日とする。

ii以降の外的基準は基準を緩めて該当日を多くすることも意図している。対象としている企業では現行の基準に相当する該当日が少なく、提案するスクリーニング手法の検討が十分に行えない可能性があるためである。なお、超過勤務時間に関しては超過勤務があった当日ではなく翌日をスクリーニング手法の外的基準の該当日とした。これは計測システムによる計測を出勤時に行っており、超過勤務の影響は翌朝の計測結果に現れるためである。同様の理由により、出張に行った日、休日出勤した日についても翌日を該当日として設定した。

検討においてはi～ivのそれぞれの外的基準ごとに該当する日がすべて検出されるまで閾値を2.0から0.1刻みで減少させ、その際の検出漏れや誤検出を集計する。なお自由記述において疲労との関連が不明で必ずしも検出しなくてもいいと考えられる記載があった翌日(以下、必ずしも検出しなくていい日)は誤検出と検出漏れともに対象外とする。

提案手法の妥当性の評価のポイントは三点ある。

一点目は現行の基準に相当する  $i$  を取りこぼすことなく検出できるか。二点目は現行の基準には該当しないが疲労の蓄積が疑われる日を  $ii$  以降の外的基準で検出できるか。これは提案手法で検出されなかった  $i \sim iv$  の外的基準の該当日（以下、検出漏れ）の日数で評価できる。三点目は医師による面接指導が過剰な対応になると考えられる日が検出されていないかである。これは提案手法によって検出された日のうち外的基準の該当日以外の日（以下、誤検出）の日数が評価指標となる。ただし二点目と三点目は独立して検討できない。検出漏れをなくするために閾値を下げると必然的に検出日数が増え、それに伴い誤検出が増加してしまう。検討に際しては閾値を操作して検出漏れと誤検出をともに少なくできるかどうかポイントとなる。

しかし、ここで誤検出の判定が問題となる。この誤検出は外的基準の該当日以外が検出された場合を指す。つまり、外的基準に該当しない要因によって疲労が蓄積している日を提案手法が検出した場合も誤検出となってしまふ。検討に際して、自由記述の記載内容から必ずしも検出しなくてもいい日と考えられたが検出された場合は誤検出の対象外とすることでこの問題の影響の軽減を図る。しかし、それでも外的基準に当てはまらない日を検出した場合が誤検出とは限らない。これは対象者が必ずしも自由記述に疲労に関する要因をすべて記載するとは限らないことと、そもそも本人が申告しない疲労も検出することを目的としているからである。

以上の事由により、本研究における誤検出は、外的基準の該当日と自由記述の記載内容から必ずしも検出しなくてもいいと考えられた日以外を検出した場合のみを意味しており、誤検出とは本質的に異なる。しかし便宜上、誤検出との表記を用いる。よってこの誤検出の数は妥当性の指標とはならない。

検出日数が増えると該当日が偶然検出される確率が増加すると考えられる。そこで計測日から該当日が検出される期待値を算出した。この期待値と外的基準の該当日数との比が 1 以下である場合は提案手法による検出は偶然による抽出と同等以下で提案手法が機能していないことを示す。この比が大きいくほど提案手法が蓄積疲労の兆候を捉えていると考えられる。

期待値の算出方法を以下に示す。

計測日数を  $m$ 、検出日数を  $d$ 、該当日数を  $a$ 、該当日を検出日が一致した日数（以下、正検出）を  $i$  とすると期待値  $E$  は

$$E = \sum_{i=1}^a \left\{ \frac{a C_i \times {}_{m-a} C_{d-i}}{{}_m C_d} \times i \right\} \quad (5-1)$$

となる。

${}_a C_\beta$  は  $\beta$  個の集合から  $a$  個取ってくる組み合わせの数を示す。ここでの分母は計測日  $m$  から検出日  $d$  を取ってくるすべての組み合わせの数となる。分子の第 1 項は該当日  $a$  に正検出  $i$  が含まれる組み合わせを表す。第 2 項は検出したくない日（計測日数  $m$  から該当日数  $a$  を引いた数:  $m - i$ ）から誤検出（正検出  $i$  以外の検出日:  $d - i$ ）を取ってくる組み合わせを意味する。分子の第 1



項と第 2 項を掛け算すると、正検出  $i$  を取ってくる組み合わせが算出される。これ（分子）を全組み合わせ（分母）で割ると正検出  $i$  の確率が求まる。

実現する値（ここでは  $i=1\sim a$ ）にその値が取る確率を掛け合わせ、その総和を求めたものが期待値となる。

### 5.3. 結果

#### 5.3.1. 計測システムの設置

改良した計測システムはタブレットパソコン（WindPad, 110W-017JP, MSI Computer Japan Co., Ltd）を中心に構成した（図 5.1, 5.2）。計測システムの制御、計測に伴う指示や質問項目の

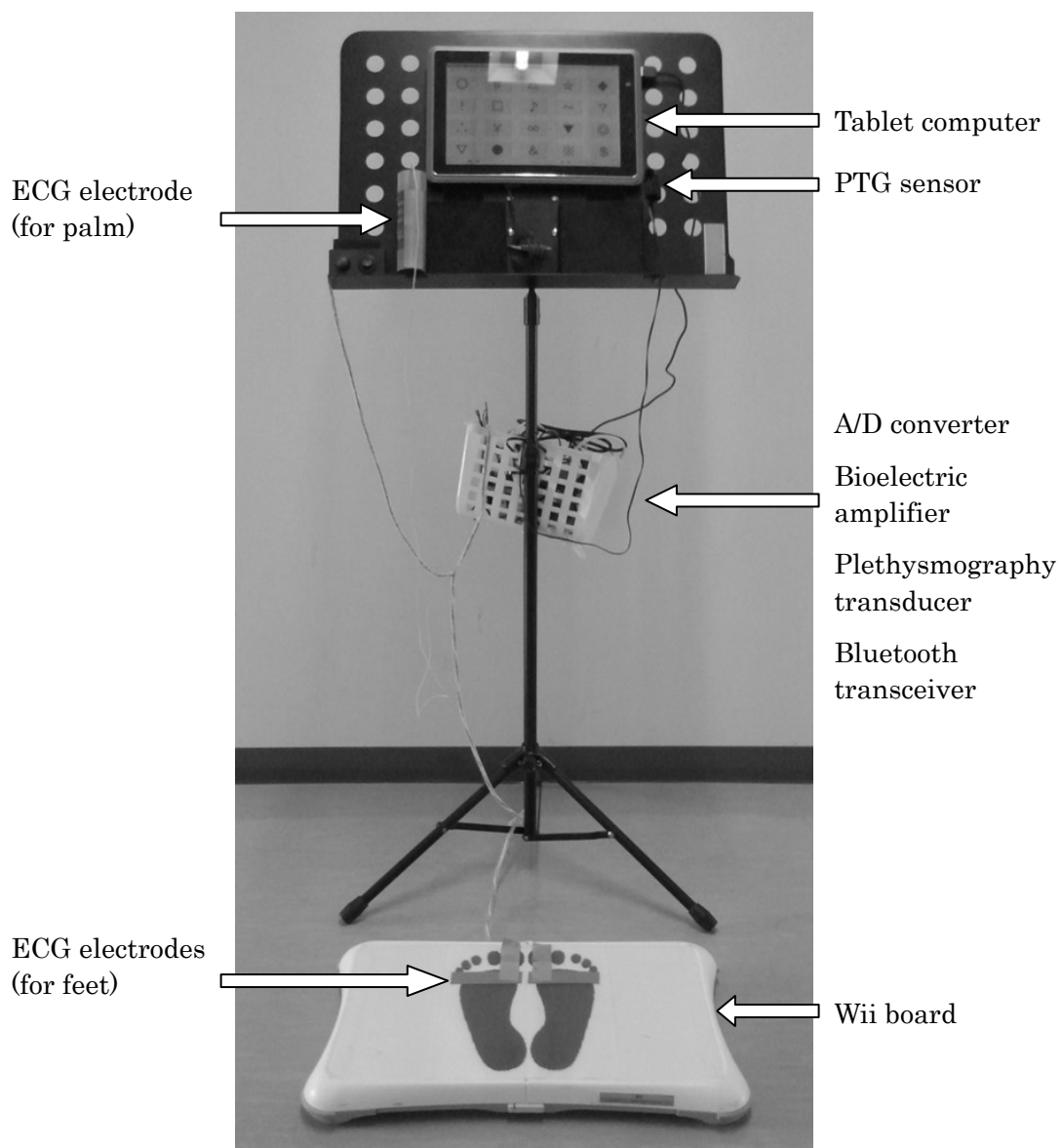


図 5.1 計測システム外観

Fig.5.1 Appearance of measurement system

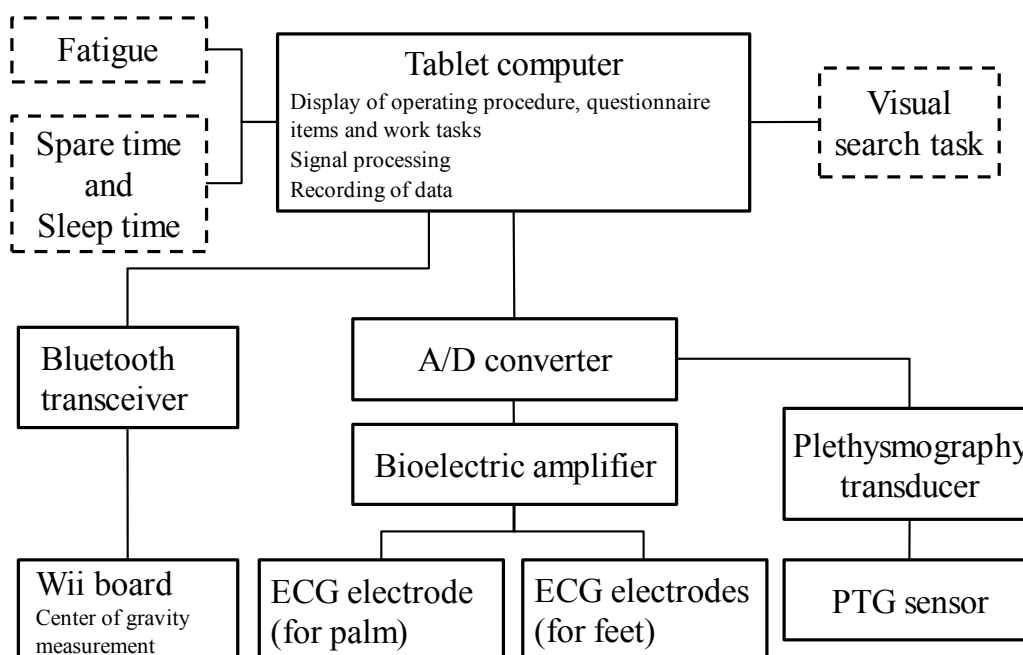


図 5.2 システムの構成

Fig.5.2 System configuration

呈示, 数値探索課題の実施を 1 つのユニットで行えるようにし, 従来の計測システムに比べて持ち運び易いものとした. また可搬性を高めると共に, 心電図などに混入するノイズへの対策のために計測システムの駆動をタブレットパソコンの内蔵バッテリーとモバイルバッテリー

(RK-DLF11, ラディウス株式会社)で行った. これによりオフィスのようなアースが取り難い環境であっても計測システムの設置が可能となった. また, タブレットパソコンは譜面台(M300B, 株式会社キョーリツコーポレーション)に固定することで, 画面が見やすくタッチしやすい高さへの調整と可搬性の両立を図った.

### 5.3.2. 計測システムの立ち上げ手順

計測手順を 1. タブレットパソコンの起動 (スリープからの復帰), 2. 計測プログラムの立ち上げ, 3. 各種計測装置の電源投入, 4. タブレットパソコンと Wii ボードとの Bluetooth での通信の確立の 4 つに集約し, それぞれについて自動化と作業の単純化を行った. 1.と 2.に関しては Windows に標準で装備されているタスクスケジューラを用いて, 計測が予定されている時間の前に完了するように設定した. 3.については 5.3.1 で述べたモバイルバッテリーの採用により Wii ボードの電池交換の手間を省いた上で, 各種計測機器の電源スイッチを 1 つにまとめたスイッチボックスを作成し譜面台に設置した. またこのスイッチボックスに Wii ボードのリセットスイッチを併設することにより, 4.における Bluetooth での通信を確立する際に Wii ボードを裏返して電池ボックス内にあるリセットスイッチを押す手間を省いた.

### 5.3.3. 計測システムの操作性

心電図や脈波の信号波形の確認は、従来の計測システムでは計測波形を画面に呈示して対象者に確認させていたが、本計測システムでは自動的に判定を行うように改良した。自動判定の方法は、まず導出された心電図波形の出力値の上位 2%の値を R 波の検出閾値として設定する。この閾値を用いて検出された R-R 間隔の中央値が 0.5 秒未満もしくは 1.5 秒以上の場合は再計測とする。また中央値がこの範囲にあった場合においても、中央値の 0.8 倍以下および 1.2 倍以上の R-R 間隔が 10%以上観測された場合も再計測とする。この中央値の 0.8 倍以下および 1.2 倍以上を基準した自動判定は、脈波と脈波伝達時間においても採用している。自動判定の結果、再計測となった場合には信号の状態に合わせたチェックリストをタブレットパソコンの画面に呈示し、チェック項目を確認した上で再度計測するように指示する。なお、再計測は 1 回のみとした。これはチェックリストに挙げた項目を実施してもなお計測不備がある場合には対象者が対処するのは困難な状況が推定されることと、1 名の計測に時間が掛かりすぎると順番待ちの時間が長くなり、次の対象者が計測を行わなくなる可能性があるためである。

また生理指標の計測の手順を含むすべての操作を画面で指示した。これ以外にも、自覚症しらべ【付録参照】の回答、余暇時間と睡眠時間の記録、数値探索作業もタブレットパソコンの画面にてタッチ操作で行えるようにした。

以上の改良により計測に必要な操作は、タッチパネルに触れる、Wii ボードに乗る、グリップを握るの 3 つに留めることができ、生理指標の計測の経験がない場合や機械の操作が苦手な人でも簡単に使える計測システムとなった。

### 5.3.4. 計測時間

まず主観指標では質問項目の絞り込みを行った。労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト【付録参照】と蓄積的疲労兆候インデックス【付録参照】から抽出した質問項目をシステムから除外した。これらの質問項目は 4.4.1 の a.に示したように長期間に亘る症状に関する質問が多く、週に何度も回答を求める形式だと回答しづらいとの意見があったものである。これにより質問は 27 項目から、自覚症しらべから抽出した 10 項目となった。生理指標では計測項目の選別と計測手法の変更を行った。第 4 章での検討においてシステム側から呼気と吸気のタイミングを指示することにより呼吸周期を統制できていたため、本計測システムでは計測項目から呼吸を外した。

次に心電図の計測手法を容量結合型電極を用いたものに変更した。容量結合型電極を用いた心電図の計測は対象者に直接電極を貼らずに心電図の計測が行えるため、多くの先行研究において検討が進められている【69～75】。本計測システムでは電極として導電性テープ（2191FR, 住友 3M）を、絶縁体として実験参加者が履いている靴下（もしくはストッキング）を用いて、人体と電極間に静電容量結合を形成し、これを介して心電図の計測を行った。回路構成は、計装アンプと反転増幅回路付きハイパスフィルタの 2 段構成で、回路全体で 1653 倍の増幅率を持ち、ハイパスフィルタの遮断周波数は 1Hz とした。また容量結合部での電圧損失を軽減するために、入力

部には  $1T\Omega$  の入力インピーダンスを持つオペアンプを使用した。なお、この回路は安田らがドライビングシミュレータの座席において容量結合型電極で心電図を計測した研究[70]で用いた回路と同様の設計である。この導出方法の採用により導電性テープを貼った Wii ボードに乗る際に靴下を履いたままでも R-R 間隔の検出が可能となった。

また生理計測の計測時間を 4 分から 65 秒に短縮した。また従来の計測システムは入力にポインティングデバイスを用いていたが、新たな計測システムではタブレットパソコンの画面をタッチで操作する方法を採用した。

以上の改良により、1 回あたり 15 分以上掛かっていた計測時間を 5~7 分程度に短縮できた。

### 5.3.5. 計測システムの運用状況

対象者の期間中の計測日数は、 $16.3 \pm 0.3$  日で、指定した 15 日を下回った対象者は 1 名のみで計測日数は 14 日、最も多い対象者では 26 日となった (表 5.1)。自覚症しらべから抽出した 10 項目、視覚探索課題の探索時間、睡眠時間、余暇時間はすべての計測日で問題なくデータが記録できた。しかし、心電図、脈波、重心動揺は、解析に支障が出るほどのデータの欠損があった (表 5.1)。心電図は全計測日中 23.7% の計測日においてノイズの混入などにより R 波の検出が行えなかった。特に対象者 A はノイズの混入が多く全計測日で R 波の検出が行えなかった。しかし R 波が検出ができた日が 7 割に満たない実験参加者は 20 名中 6 名に留まった。脈波は対象者 L を除き、ほぼ問題なく計測が行えた。重心動揺は検出できた日が 7 割に満たなかった実験参加者が 6 名確認された。

また気になる点についての自由記述で計測システムについて、「タッチ操作の際に譜面台が揺れる」、「再計測の頻度が高く、その理由が自身の健康状態に因るのではないか」、「選択肢にない自覚症状があるので、新たに加えて欲しい」といったコメントが記載されていた。

### 5.3.6. 各指標の運用試験期間中の推移

第 4 章で示した手法により計測結果を 6 つの分類指標にまとめ、運用試験期間中における推移を対象者ごとに図 5.3~5.22 に示した。図中の印はそれぞれ 5.2.4 の外的基準の該当日を示す。◆は i, □は ii, ○は iii, ▲は iv を示す。なお、△は自由記述の記載内容から必ずしも検出しなくてもいいと考えられた日を示し、グレーの印は外的基準の i ~ iv に該当するが計測していなかった日の印を表している。

心電図の R 波が検出できなかったケースにおいては心拍変動指標と心拍数相当の指標として脈波波形の差分のピークから算出した値を使用した。

### 5.3.7. 提案手法による検出日の妥当性を検証するための外的基準

「5.2.4. 提案手法にて検出された日の妥当性の外的基準」に示した基準に該当する日数を整理した (表 5.2)。外的基準として設定した現行の産業医による面接指導の対象者の条件に準拠する

表 5.1 計測日数と計測データに欠損があった日数およびその割合

Table 5.1 Number of days of measurement and number of days with failures of measurement data, and their proportions

Participant	Measurement days (Days)	Electrocardiogram		Plethysmogram		Center of Gravity	
		(Days)	(%)	(Days)	(%)	(Days)	(%)
A	16	<b>0</b>	<b>(0.0)</b>	16	(100.0)	13	(81.3)
B	15	13	(86.7)	15	(100.0)	11	(73.3)
C	15	<b>8</b>	<b>(53.3)</b>	14	(93.3)	13	(86.7)
D	15	13	(86.7)	14	(93.3)	12	(80.0)
E	26	<b>15</b>	<b>(57.7)</b>	26	(100.0)	19	(73.1)
F	14	12	(85.7)	14	(100.0)	13	(92.9)
G	15	<b>10</b>	<b>(66.7)</b>	15	(100.0)	<b>10</b>	<b>(66.7)</b>
H	15	11	(73.3)	14	(93.3)	12	(80.0)
I	15	14	(93.3)	14	(93.3)	<b>9</b>	<b>(60.0)</b>
J	15	<b>10</b>	<b>(66.7)</b>	14	(93.3)	12	(80.0)
K	15	11	(73.3)	14	(93.3)	11	(73.3)
L	15	<b>8</b>	<b>(53.3)</b>	<b>7</b>	<b>(46.7)</b>	11	(73.3)
M	15	13	(86.7)	14	(93.3)	11	(73.3)
N	16	16	(100.0)	16	(100.0)	<b>11</b>	<b>(68.8)</b>
O	16	15	(93.8)	15	(93.8)	<b>9</b>	<b>(56.3)</b>
P	16	14	(87.5)	15	(93.8)	<b>11</b>	<b>(68.8)</b>
Q	17	16	(94.1)	17	(100.0)	13	(76.5)
R	24	21	(87.5)	24	(100.0)	21	(87.5)
S	15	14	(93.3)	14	(93.3)	12	(80.0)
T	15	14	(93.3)	14	(93.3)	<b>9</b>	<b>(60.0)</b>
All	325	248	(76.3)	306	(94.2)	243	(74.8)

「仕事に起因する理由により産業医の面談を希望」しており、かつ月 100 時間以上の超過勤務に相当する「1 日の超過勤務時間が 5 時間以上 (=100 時間÷5 日間÷4 週間)」を満たす日はなかった (表 5.2 の 4 列目 a.かつ b.)。対象者 I は企業から提供を受けた入社時刻と退社時刻のデータから 5 時間以上の超過勤務が確認されたが、翌日に計測が行われていなかった (表 5.2 の 2 列目 a.超過勤務時間が 5 時間/日以上の日数)ためスクリーニング手法の妥当性を検証することができなかった (計測システムによる計測と外的基準は独立しているため、外的基準の該当日に計測が行われているとは限らない)。また産業医との面談を希望していなかった (表 5.2 の 3 列目 b.仕事に起因する理由により産業医の面談を希望した回数)。対象者 M は毎週金曜日に計 6 回に亘って回答を求めたアンケートにおいて、毎回、仕事に関連することで産業医との面談を希望していた (表 5.2 の 3 列目 b.仕事に起因する理由により産業医の面談を希望した回数)が、最大超過

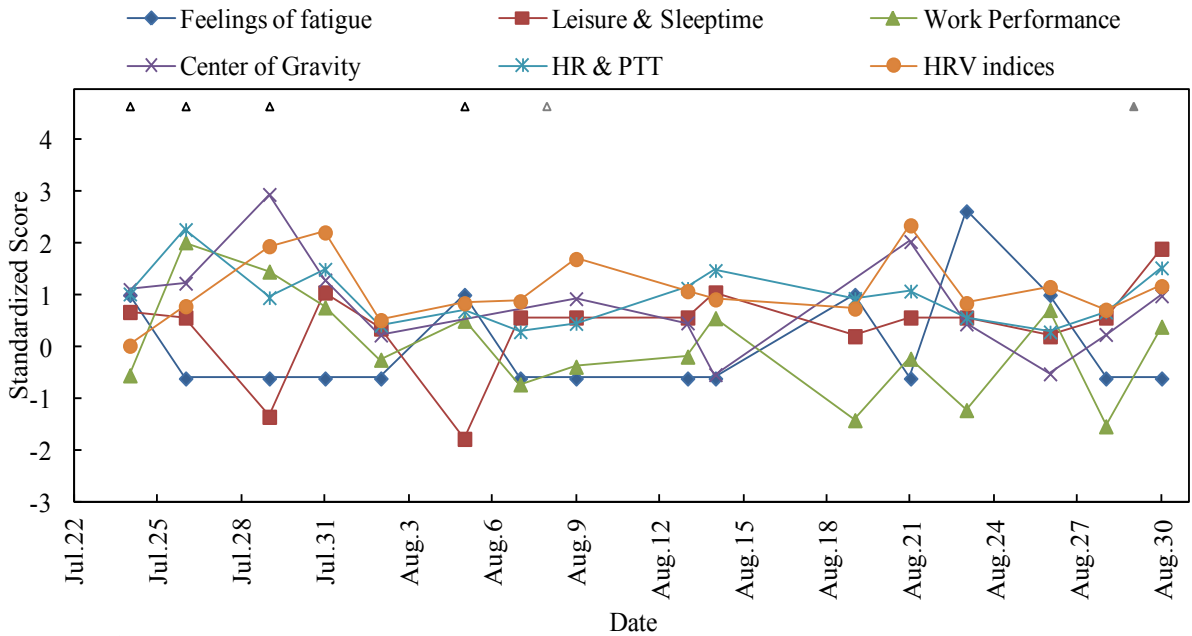


図 5.3 対象者 A の各指標の時系列変化

Fig.5.3 Changes over time in each indicator for subject A

○: Days on which the subject appeared tired to coworkers. △: Days on which the subject was thought to be burdened based on the contents of free response descriptions. □: Days after a business trip or working on a holiday. ◆: Days with overtime of at least 5 hours/day. The black marks indicate the days on which measurements were taken among the days on which the external criteria were applicable. The gray marks indicate the days on which measurements were not taken among the days on which the external criteria were applicable.

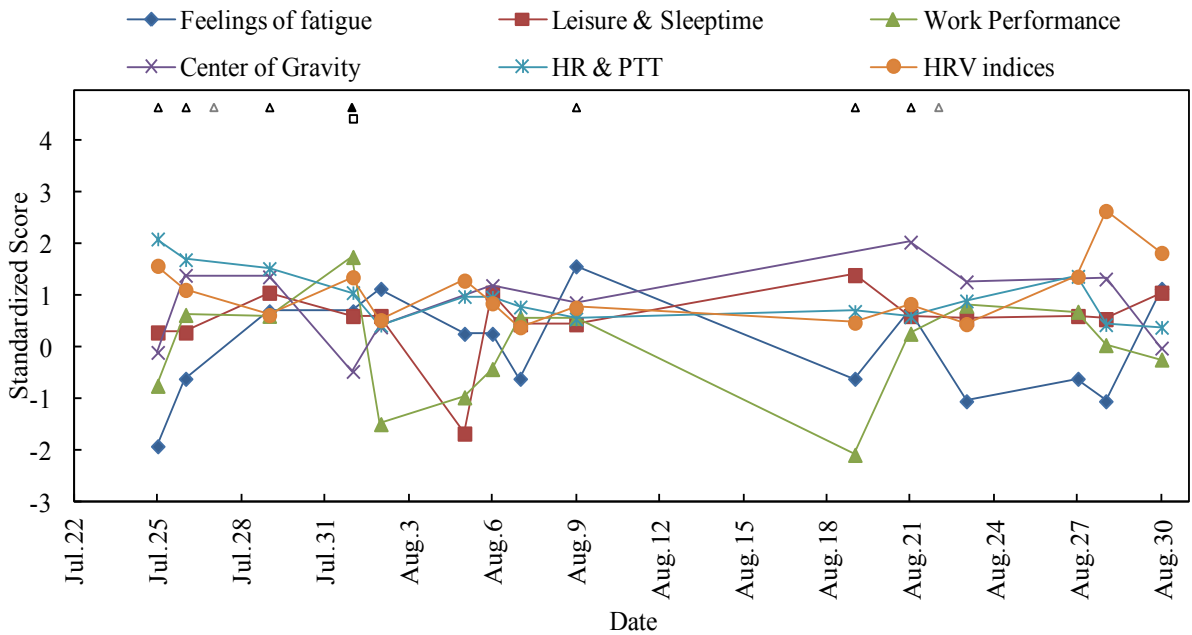


図 5.4 対象者 B の各指標の時系列変化

Fig.5.4 Changes over time in each indicator for subject B

See the caption of Fig.5.3.

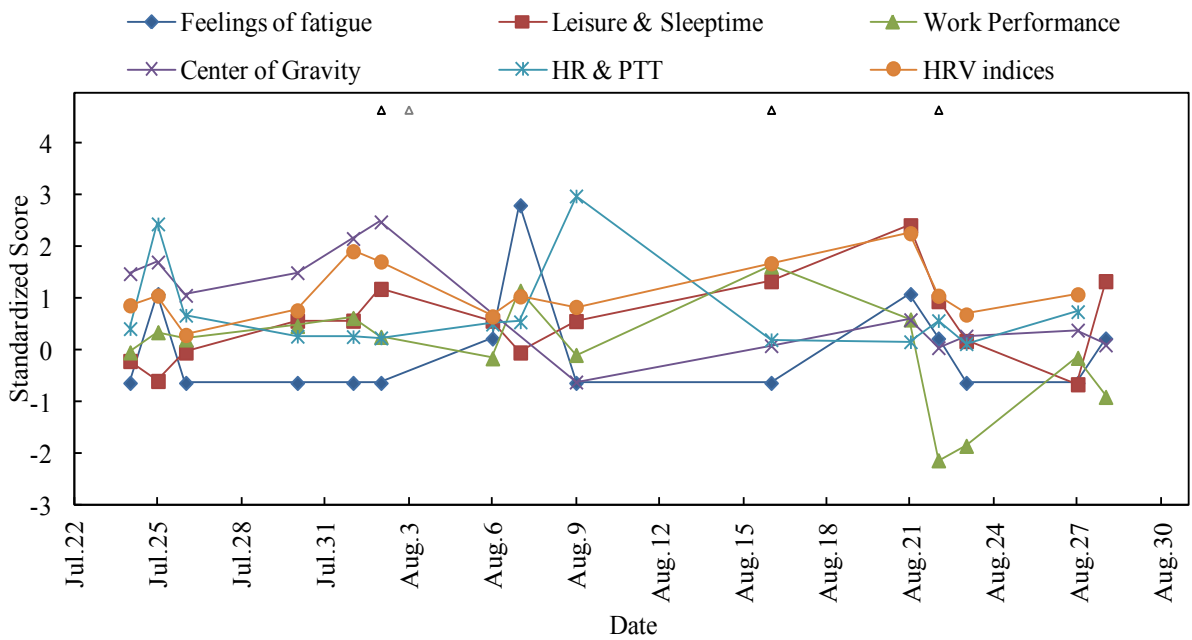


図 5.5 対象者 C の各指標の時系列変化

Fig.5.5 Changes over time in each indicator for subject C

See the caption of Fig.5.3.

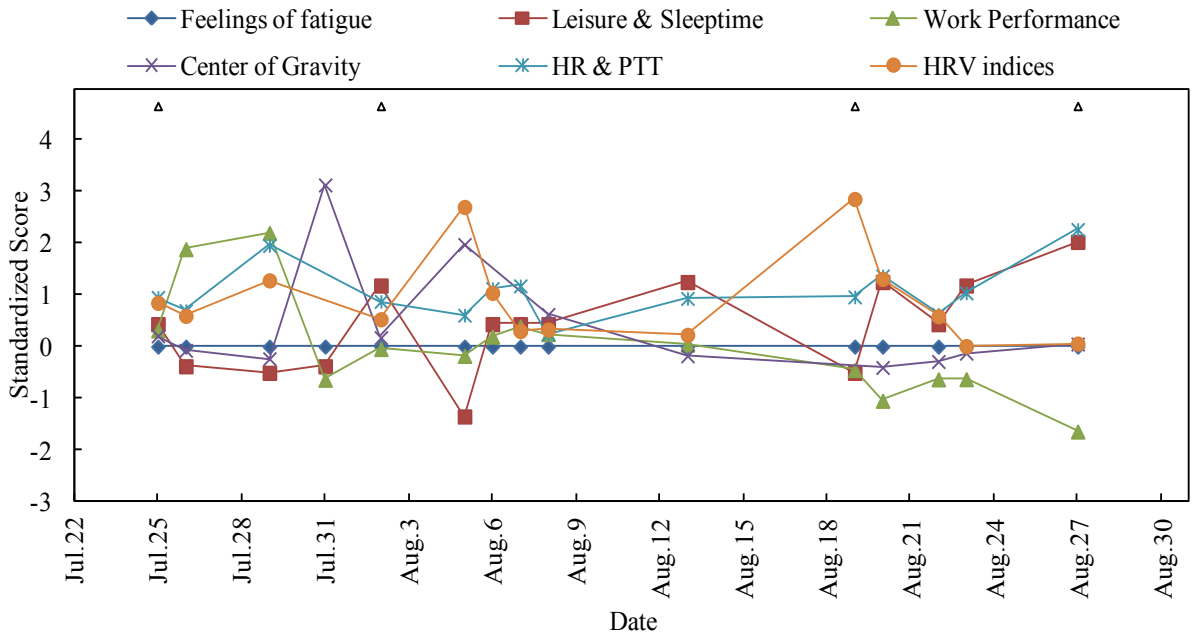


図 5.6 対象者 D の各指標の時系列変化

Fig.5.6 Changes over time in each indicator for subject D

See the caption of Fig.5.3.

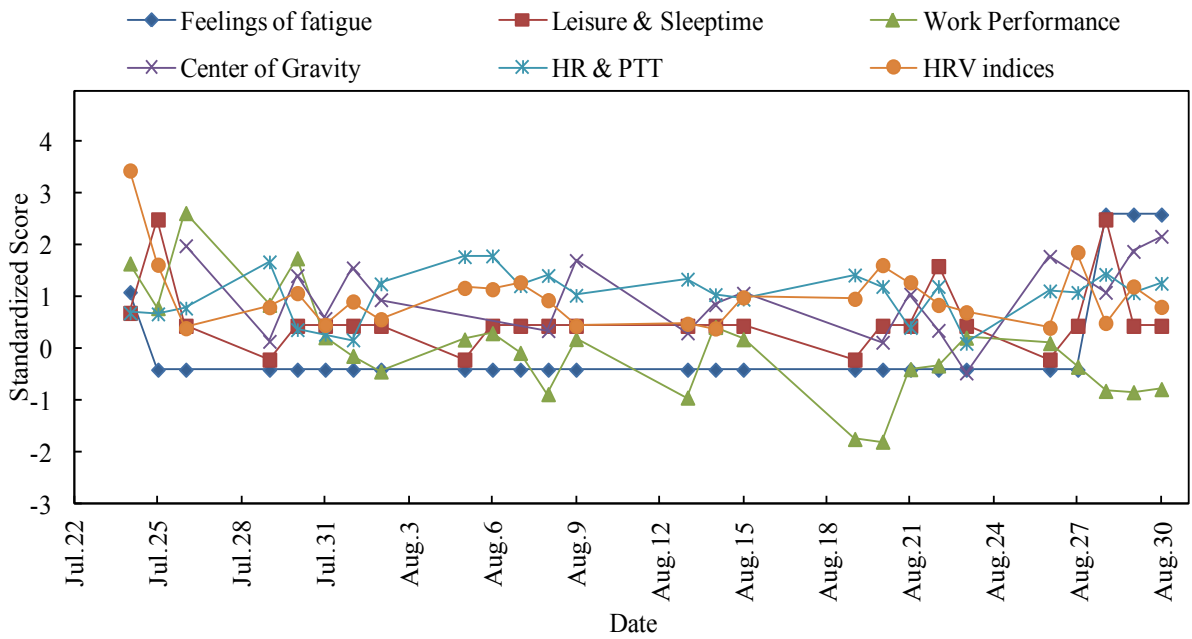


図 5.7 対象者 E の各指標の時系列変化

Fig.5.7 Changes over time in each indicator for subject E

See the caption of Fig.5.3.

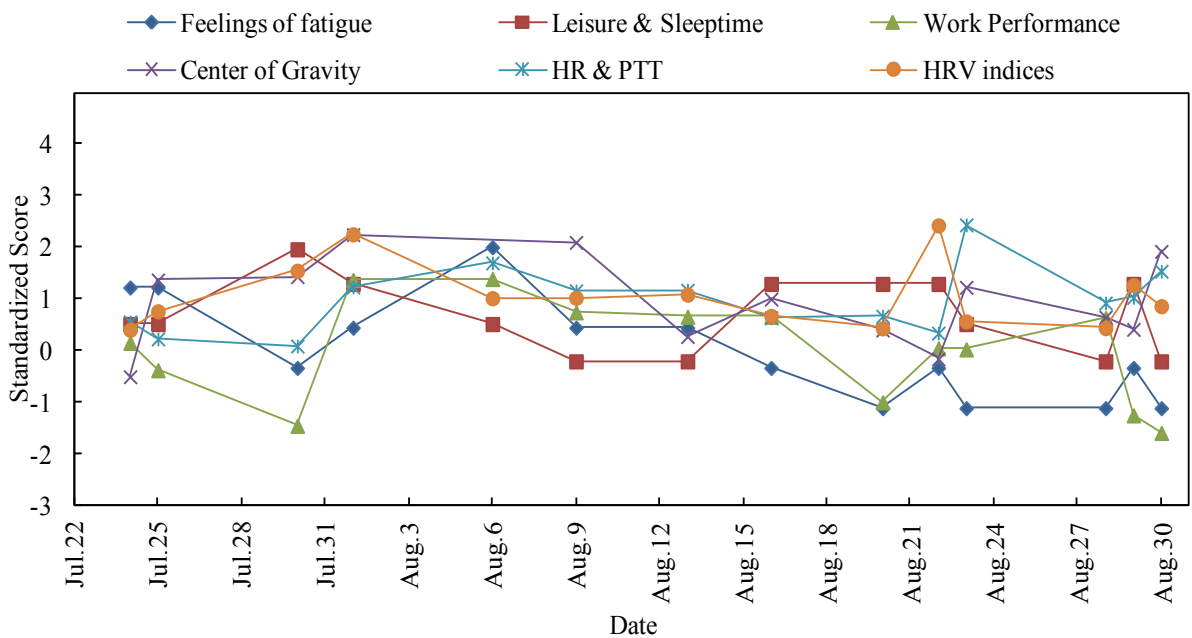


図 5.8 対象者 F の各指標の時系列変化

Fig.5.8 Changes over time in each indicator for subject F

See the caption of Fig.5.3.



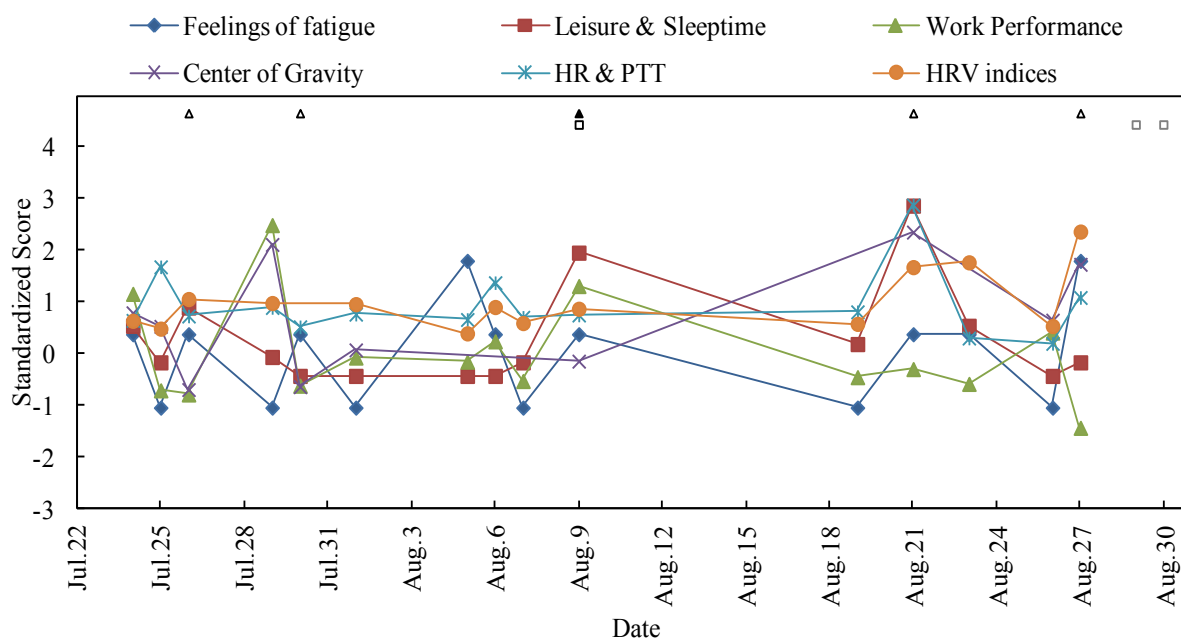


図 5.9 対象者 G の各指標の時系列変化

Fig.5.9 Changes over time in each indicator for subject G

See the caption of Fig.5.3

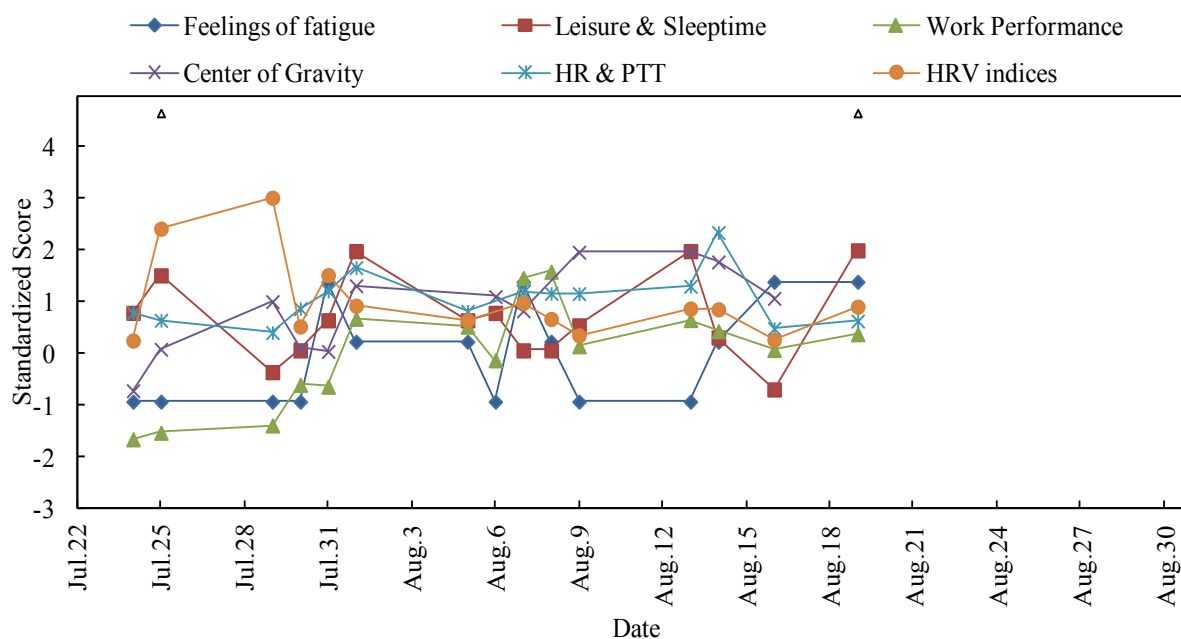


図 5.10 対象者 H の各指標の時系列変化

Fig.5.10 Changes over time in each indicator for subject H

See the caption of Fig.5.3

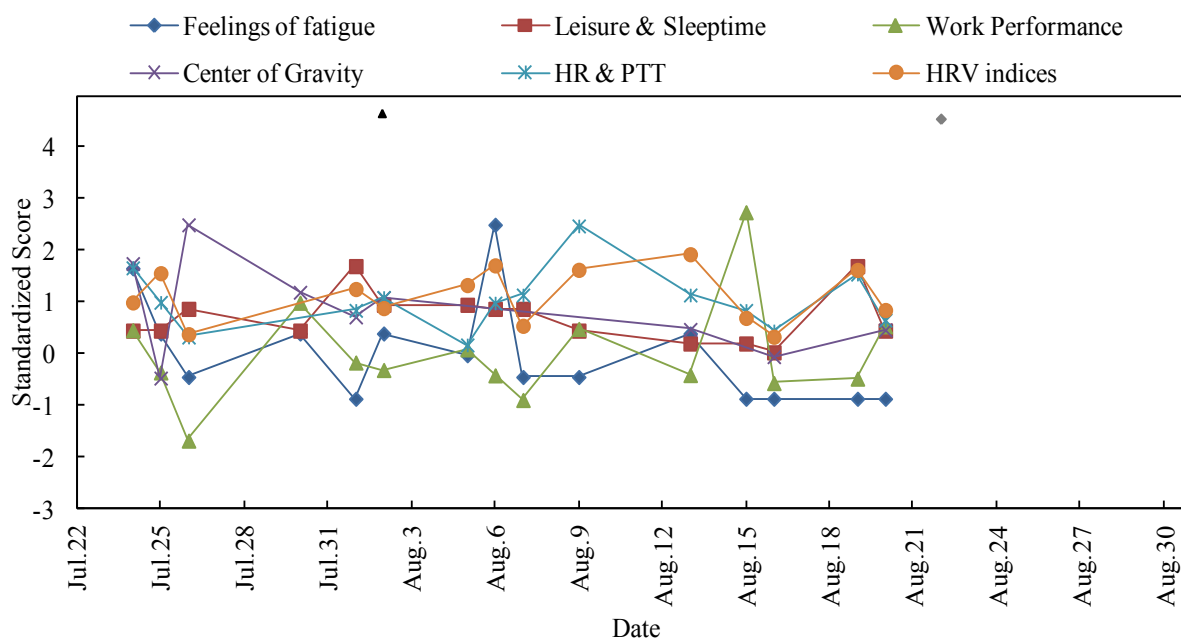


図 5.11 対象者 I 各指標の時系列変化

Fig.5.11 Changes over time in each indicator for subject I

See the caption of Fig.5.3

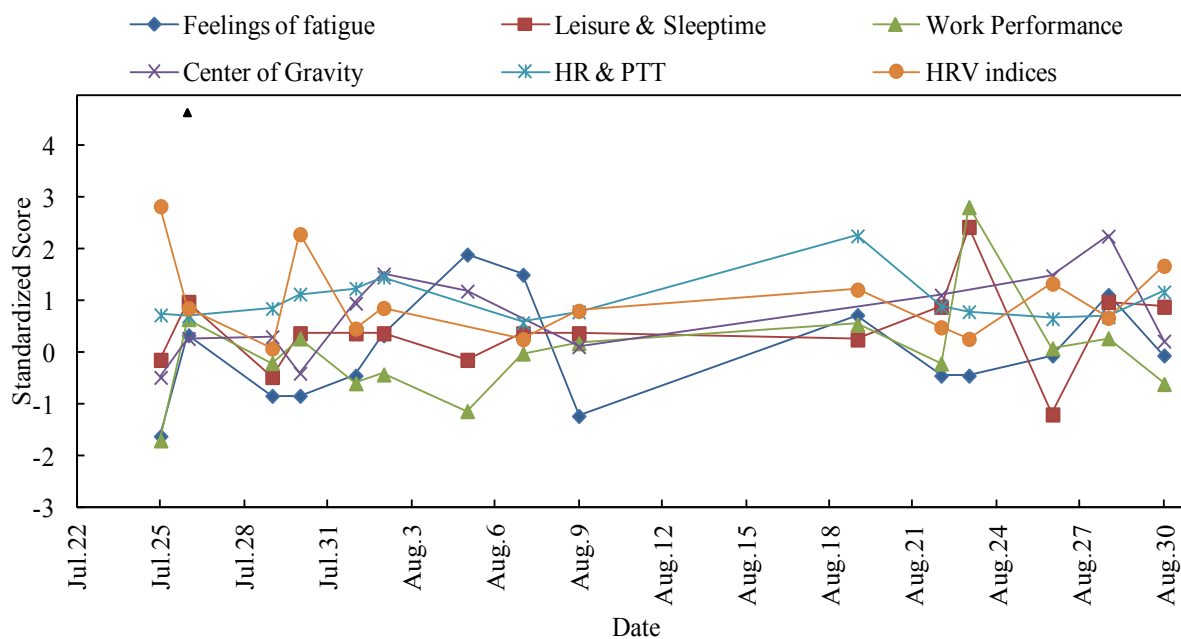


図 5.12 対象者 J 各指標の時系列変化

Fig.5.12 Changes over time in each indicator for subject J

See the caption of Fig.5.3

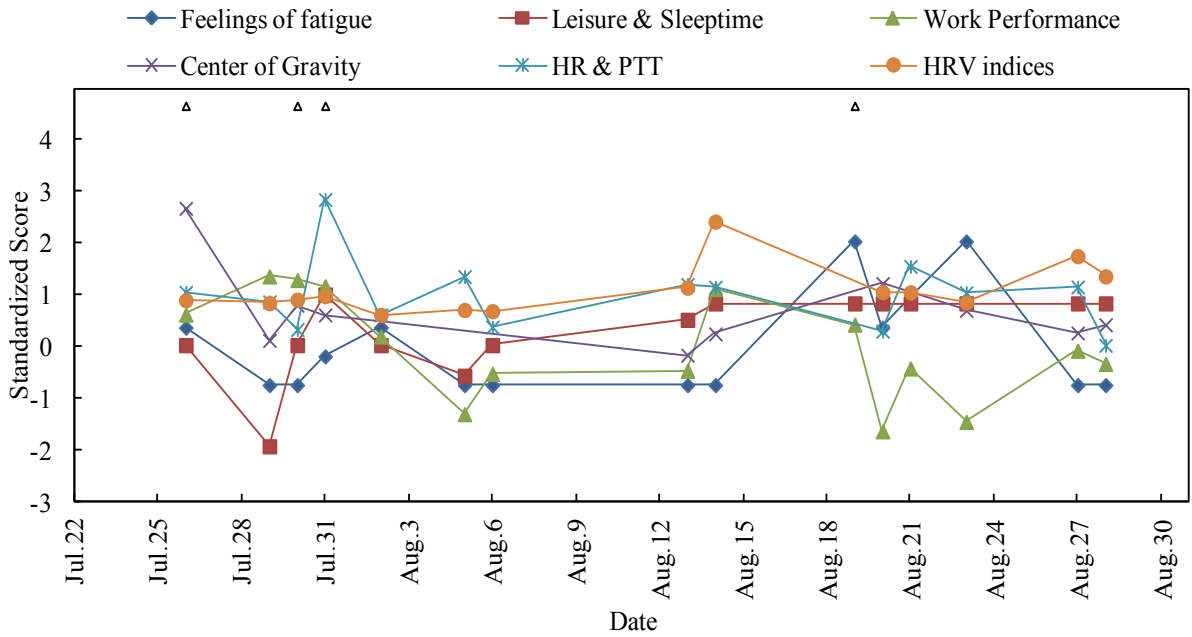


図 5.13 対象者 K 各指標の時系列変化

Fig.5.13 Changes over time in each indicator for subject K

See the caption of Fig.5.3

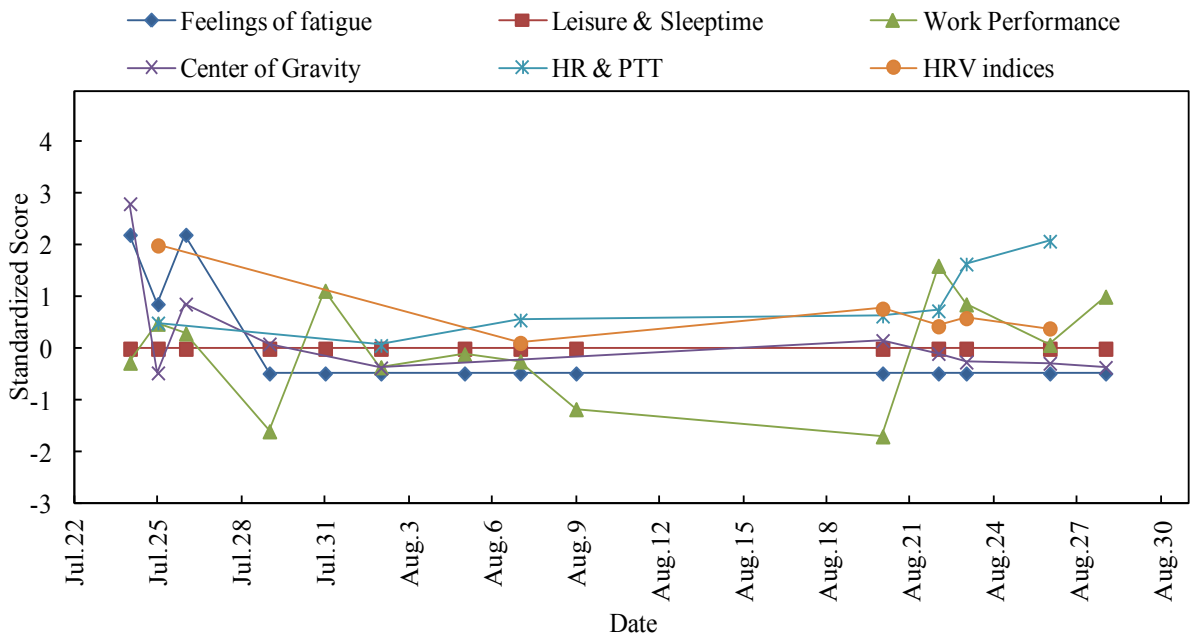


図 5.14 対象者 L 各指標の時系列変化

Fig.5.14 Changes over time in each indicator for subject L

See the caption of Fig.5.3

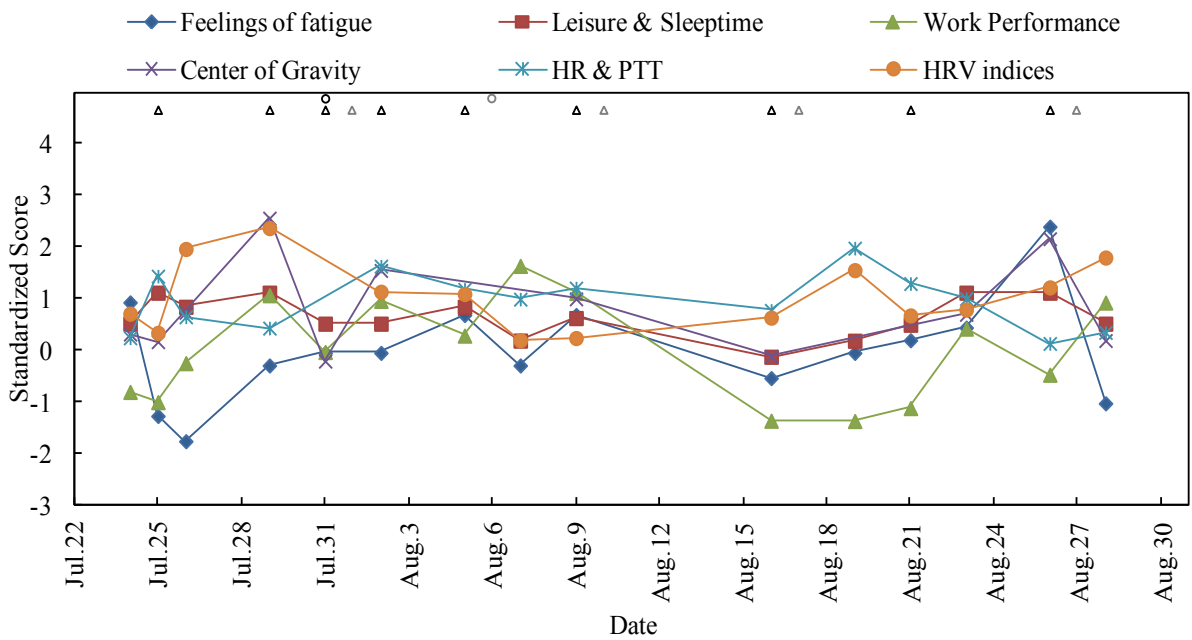


図 5.15 対象者 M 各指標の時系列変化

Fig.5.15 Changes over time in each indicator for subject M

See the caption of Fig.5.3

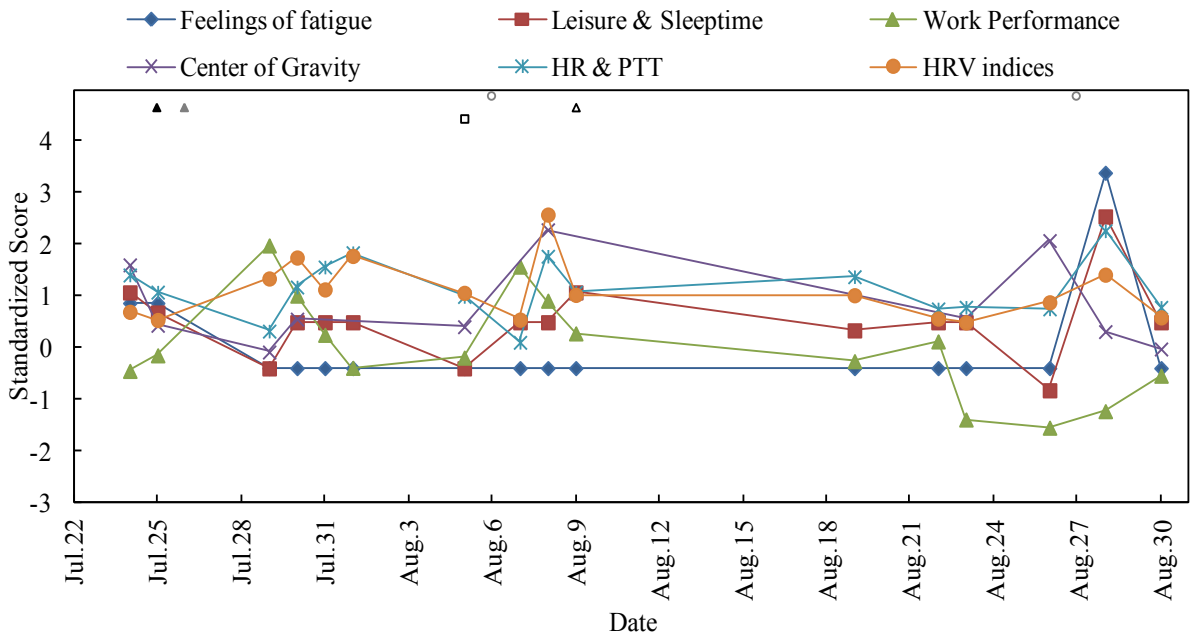


図 5.16 対象者 N 各指標の時系列変化

Fig.5.16 Changes over time in each indicator for subject N

See the caption of Fig.5.3

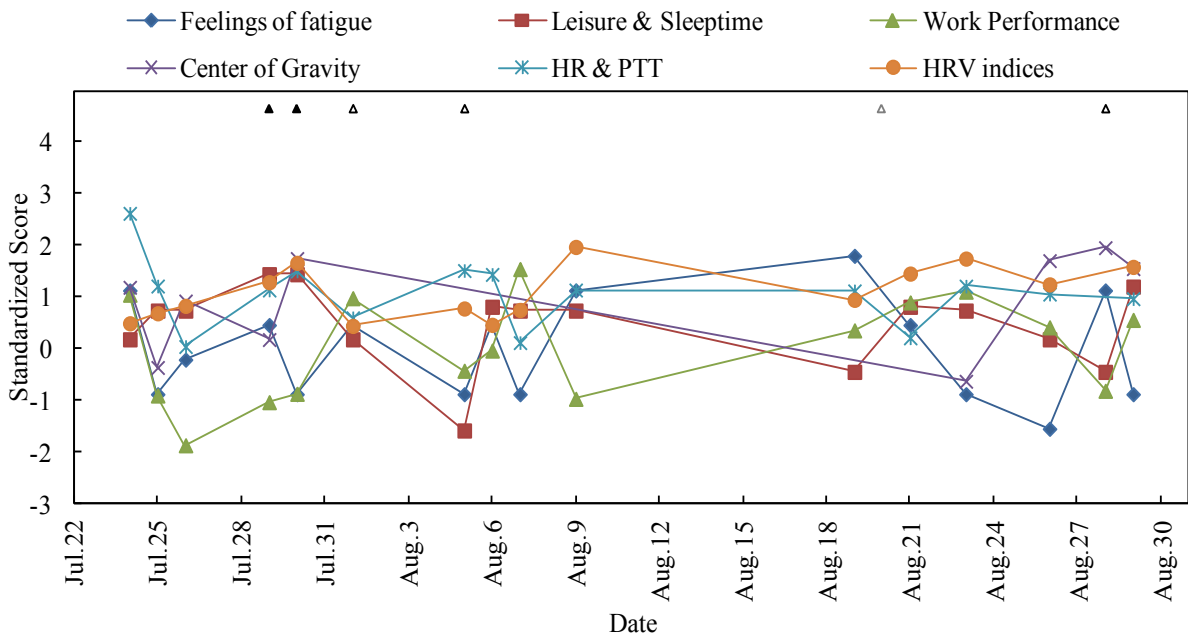


図 5.17 対象者 O 各指標の時系列変化

Fig.5.17 Changes over time in each indicator for subject O

See the caption of Fig.5.3

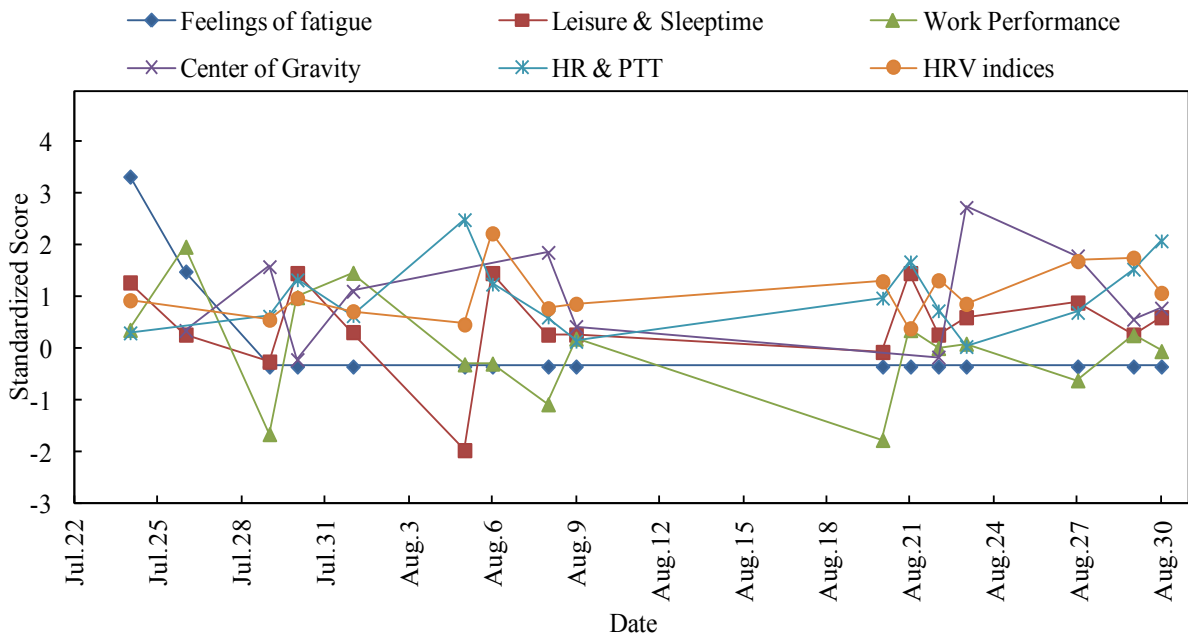


図 5.18 対象者 P 各指標の時系列変化

Fig.5.18 Changes over time in each indicator for subject P

See the caption of Fig.5.3.

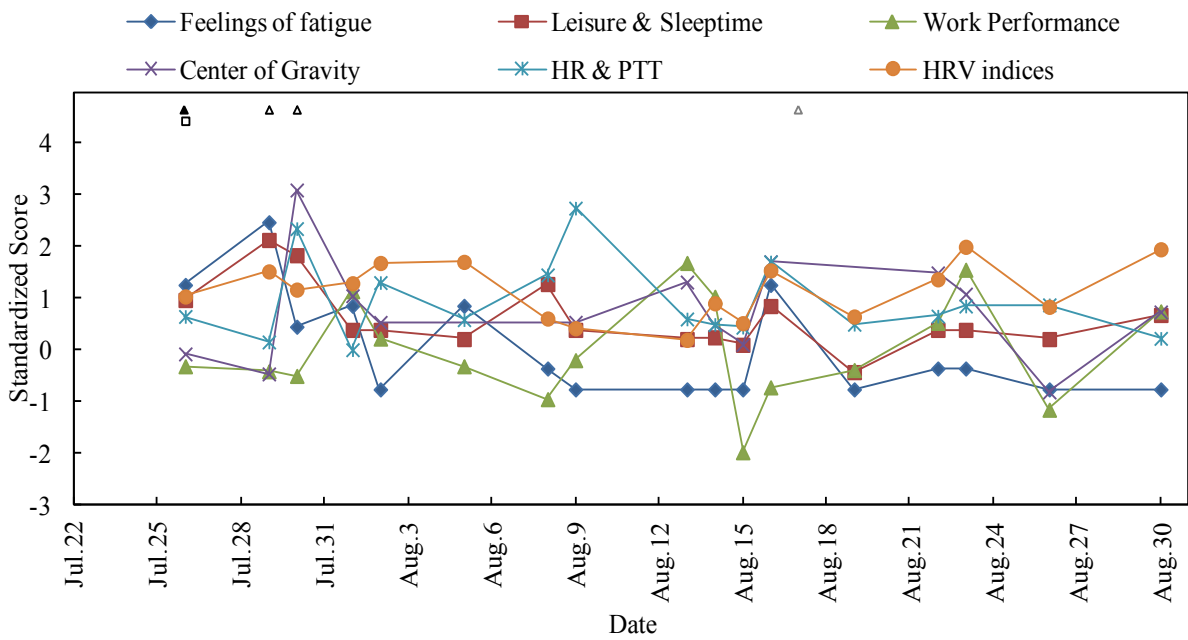


図 5.19 対象者 Q 各指標の時系列変化

Fig.5.19 Changes over time in each indicator for subject Q

See the caption of Fig.5.3

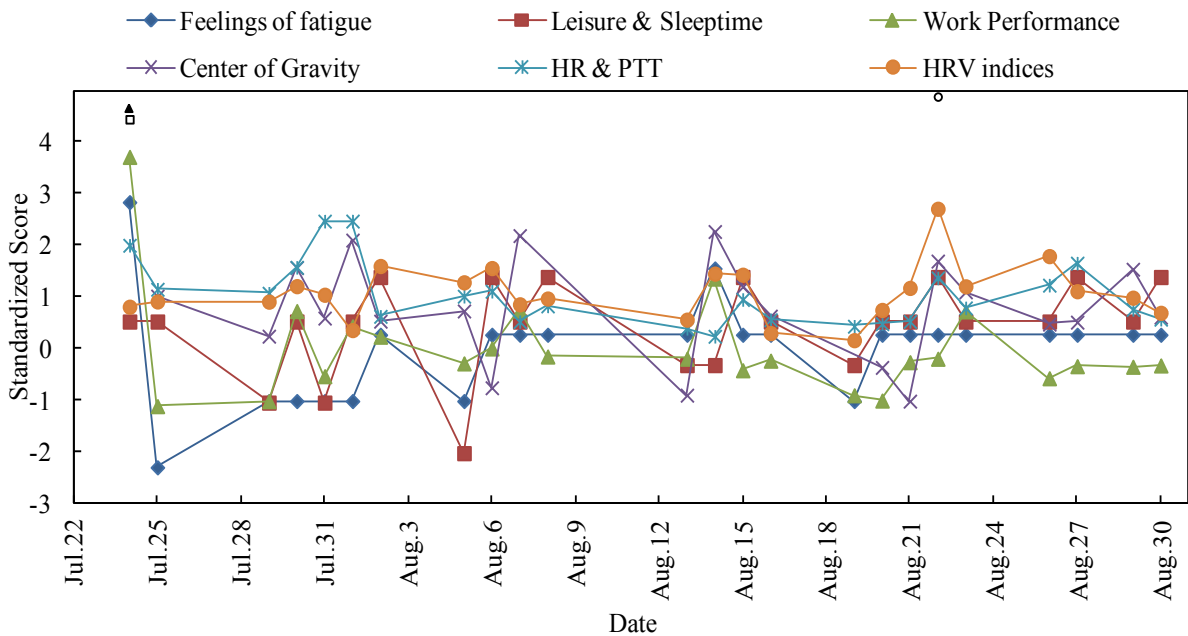


図 5.20 対象者 R 各指標の時系列変化

Fig.5.20 Changes over time in each indicator for subject R

See the caption of Fig.5.3.

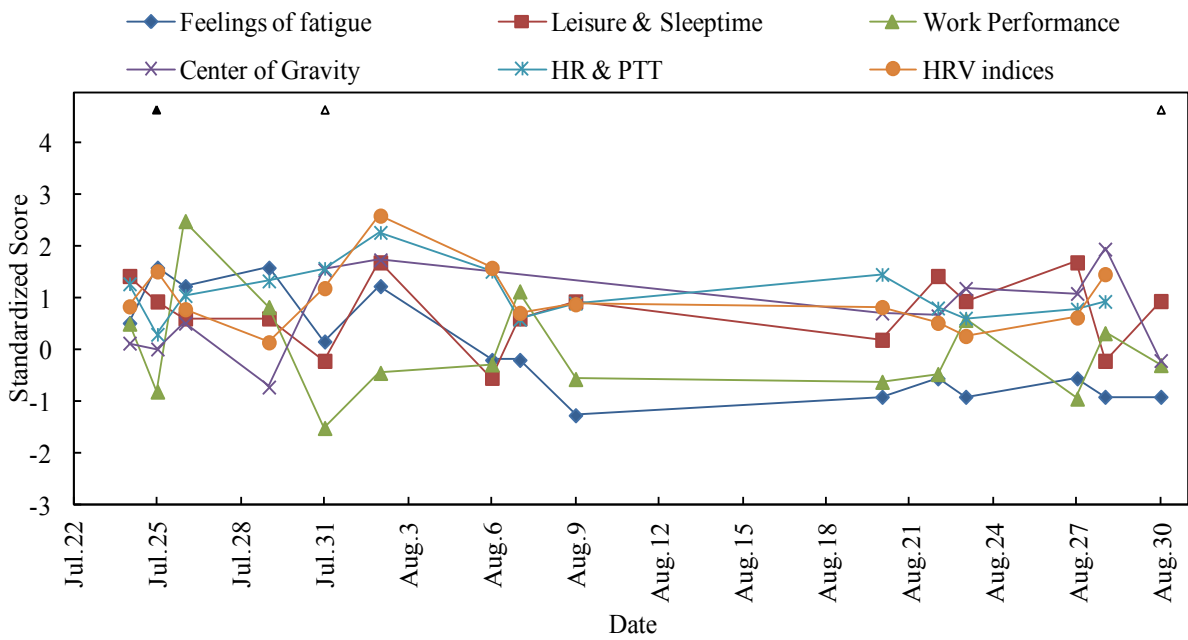


図 5.21 対象者 S 各指標の時系列変化

Fig.5.21 Changes over time in each indicator for subject S

See the caption of Fig.5.3

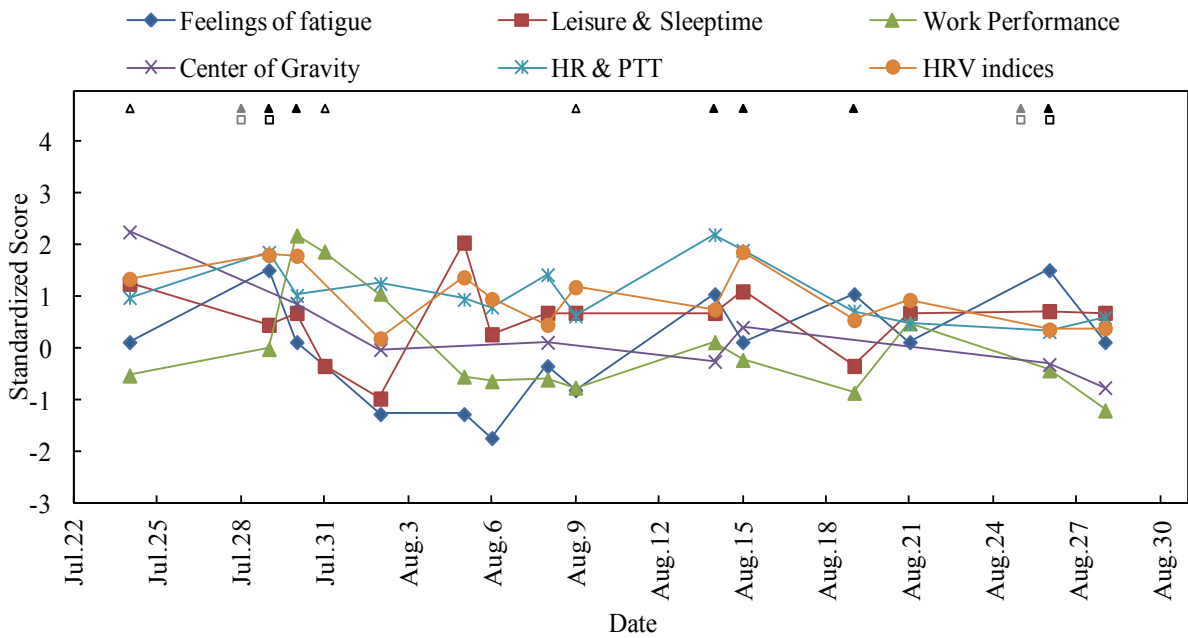


図 5.22 対象者 T 各指標の時系列変化

Fig.5.22 Changes over time in each indicator for subject T

See the caption of Fig.5.3.

表 5.2 スクリーニング手法の外的基準に該当した日数

Table 5.2 Numbers of days on which the external criteria of the screening method were applicable

Experimental participant	a. Number of days with overtime of $\geq 5$ hr/day	b. Number of times a consultation with an occupational physician was requested due to work-related reasons	a. and b.	Number of days on which the worker went on a business trip	Number of days on which the worker worked on a holiday	Number of days on which the worker looked tired to coworkers	Number of days on which they were thought to be burdened based on the contents of open-ended method	Number of “days on which they were thought to be burdened based on the contents of open-ended method” that should have been detected	Number of “days on which they were thought to be burdened based on the contents of open-ended method” that did not necessarily need to be detected
実験参加者	a. 超過勤務時間が5時間/日以上の日数	b. 仕事に起因する理由により産業医の面談を希望した回数	a. かつ b.	出張に行つた日数	休日出勤した日数	同僚から疲れているように見えた日数	自由記述での記載内容から負担がかかっていると考えられた日数	自由記述での記載内容から負担がかかっていると考えられた日のうち検出するの が望ましい日数	自由記述での記載内容から負担がかかっていると考えられた日のうち必ずしも検出し なくていい日数
A	0	0	0	0	0	0	4 (2)	0	4
B	0	0	0	1	0	0	7 (2)	0	6
C	0	0	0	0	0	0	3 (1)	0	3
D	0	0	0	0	0	0	4	0	4
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	0	0	0	1 (2)	0	0	5	0	4
H	0	0	0	0	0	0	2	0	2
I	(1)	0	0	0	0	0	1	0	1
J	0	0	0	0	0	0	1	0	1
K	0	0	0	0	0	0	4	0	4
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	0	6	0	0	0	1 (1)	9 (4)	0	8
N	0	0	0	0	1	(2)	2 (1)	0	2
O	0	0	0	0	0	0	5 (1)	1	4
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	0	0	0	1	0	0	3 (1)	0	2
R	0	0	0	1	0	1	1	0	0
S	0	0	0	0	0	0	3	1	2
T	0	0	0	2 (2)	2 (2)	0	9 (2)	2	5
Total	(1)	6	0	6 (4)	3 (2)	2 (3)	63 (13)	4	52

( )は外的基準に該当するが計測日ではなかった日数を表す。

The numbers in brackets indicate the number of days without measurement on which the external criteria were applicable.



勤務時間は2時間で平均超過勤務時間は $1.44 \pm 0.77$ 時間であり外的基準に該当しなかった。

出張は対象者 B,G,Q,R,T の5名で延べ10日あり、その内翌日に計測を行っていた日は6日あった(表 5.2 の5列目 出張に行った日)。休日出勤は対象者 N と T において行われていた(表 5.2 の6列目 休日出勤した日)。T については出張が土日であったため「出張に行った日数」と「休日出勤した日数」が重複していた。

同僚から疲れているように見えた対象者は M,N,R の3名いた(表 5.2 の7列目 同僚から疲れているように見えた日数)。その内、翌日に計測を行っていたのは対象者 M と R のみで、それぞれ1回ずつ確認された。

自由記述の記載内容から負担がかかっていると考えられた日は、16名において延べ76日にあり、計測日と一致したのは63日あった(表 5.2 の8列目 自由記述の記載内容から負担がかかっていると考えられた日数)。「自由記述での記載内容から負担がかかっていると考えられた日」に関しては、記載内容から検出するのが望ましい日(表 5.2 の9列目)と必ずしも検出しなくてもいい日(表 5.2 の10列目)に分けた上で検討を行った。これらは計測日と一致しない日や出張や休日出勤と重複する日は除外した。

検出するのが望ましい日は、まず単なるイベント(例: 嫁とけんかした, 昨日ゴルフにいった。など)の記載を除き、その上で仕事に起因する負担を示す記載がされている場合、中でも”忙しい”や”疲れた”といった記載(朝一番から忙しく働いた, 仕事中にイライラする, 資料づくりがあつて疲れています, (仕事が)進まず疲れています)がある4日間を選定した。該当日を有する対象者は O,S,T の3名となった(表 5.2 の9列目)。

### 5.3.8. 提案手法による検出日と外的基準の該当日との一致

提案手法にて検出された日と「5.2.4. 提案手法にて検出された日の妥当性の外的基準」に挙げた外的基準に該当する日との比較から提案手法の妥当性の検証を行った。

ただし、対象者 D, E, F, K, L は 5.2.4. に挙げた睡眠時間と超過勤務時間により定めた除外基準に該当するので、検討対象から外した。またこれらの対象者は外的基準に該当する日が1日もなかった。この他に A, C, H, I, J, P も外的基準に該当する日がなく検討が行えなかった。また M は外的基準 i ~ iv に該当する日で表 4.3 で示した6つの指標のうち2つ以上の値が得られなかったため検討対象から除外した。よって検討対象は B, G, N, O, Q, R, S, T の8名となった。

表 5.2 に示したように、外的基準 i として設定した現行の産業医による面接指導の対象者の条件に準拠する「仕事に起因する理由により産業医の面談を希望」しており、かつ月100時間以上の超過勤務に相当する「1日の超過勤務時間が5時間以上(=100時間÷5日間÷4週間)」を満たす日はなかった。そのため現行の基準に該当する日が提案するスクリーニング手法で漏れなく検出できるかについての検討は行えなかった。

外的基準の ii, iii, iv に該当する日に関しては、5.2.4 の手順にて閾値を変化させて検出日が該当日と一致した際の閾値、検出日数、誤検出、検出漏れ、期待値、期待値と外的基準の該当日数

の比を整理した (表 5.3). その際の閾値と 6 つの指標値を図 5.23~5.34 に示す. これらの図に関しては検出日と該当日との一致を検討することが目的であるため, 外的基準の i ~ iv に該当するが計測していなかった日の印 (○, △, □, ◆) と, 出張や休日出勤の翌日の自由記述の印 (▲) を除いた上で閾値を点線で示してある.

対象者 N においては閾値が 0.4 となり検出日数と誤検出が多く, 期待値と該当日数の比も低かった (表 5.3). 対象者 T も該当日をすべて検出するためには, 閾値を 0.3 まで下がる必要があり, N と同様に検出日数と誤検出の増加, およびに期待値と該当日数の比の低下がみられた (表 5.3, 図 5.34). その他の対象者は誤検出, 検出漏れともに少なかった (表 5.3, 図 5.23, 5.24, 5.26~5.30). 特に対象者 B, G, R, S は検出漏れが 0 の状態において誤検出が 1 日または 2 日となっていた.

外的基準の該当日に有意な変化と判定された指標を表 5.4 に示す. 提案手法は 6 つの指標のうち 3 つが有意な変化を示したときに蓄積疲労の兆候としている. 該当日が検出された際の蓄積疲労の兆候の検出に寄与した指標は異なっていた. また 6 つの指標はいずれかが検出に寄与してお

表 5.3 出張や休日出勤があった対象者における外的基準の該当日とスクリーニング手法による検出日との対応

Table 5.3 Correspondence between the days on which external criteria were applicable and the days of detection based on the screening method in subjects who had business trips or work on holidays

Participant	Threshold	Number of days of detection	Number of days of agreement (D.A.)				False-positive	False-negative	Expectation value (E)	D.A./E
			Business trip or work on holiday	Coworker	Free response	Should be detected				
B	1.0	4	1/1	0/0	0/0	2/6	1	0	0.27	3.75
G	0.8	4	1/1	0/0	0/0	2/4	1	0	0.27	3.75
N	0.4	14	1/1	0/0	0/0	2/2	11	0	0.88	1.14
O	1.1	6	0/0	0/0	1/1	1/4	4	0	0.38	2.67
Q	0.9	6	1/1	0/0	0/0	2/2	3	0	0.35	2.83
R	2.0	1	1/1	0/1	0/0	0/0	0	1	0.08	12.00
R	1.3	3	1/1	1/1	0/0	0/0	1	0	0.25	8.00
S	0.9	5	0/0	0/0	1/1	1/2	2	0	0.33	3.00
T	1.5	1	1/2	0/0	0/2	0/5	0	3	0.27	3.75
T	0.7	6	1/2	0/0	1/2	3/5	0	2	1.60	1.25
T	0.5	8	1/2	0/0	2/2	4/5	1	1	2.13	1.41
T	0.3	12	2/2	0/0	2/2	4/5	4	0	3.19	1.25

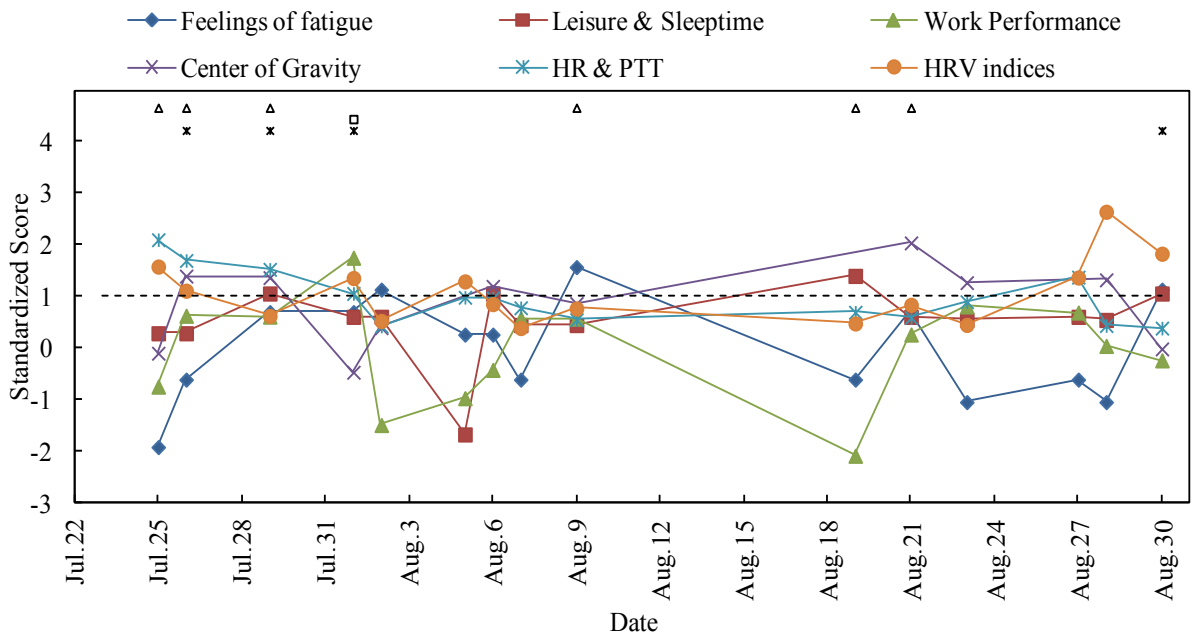


図 5.23 対象者 B の各指標の時系列変化

Fig. 5.23 Changes over time in each indicator for subject B

○: Days on which the subject appeared tired to coworkers. △: “days on which they were thought to be burdened based on the contents of free responses” that did not necessarily need to be detected. ▲: “days on which they were thought to be burdened based on the contents of free responses” that should have been detected. □: Days after a business trip or working on a holiday. ---: Threshold value C. \*: Days on which detection was made by the present system.

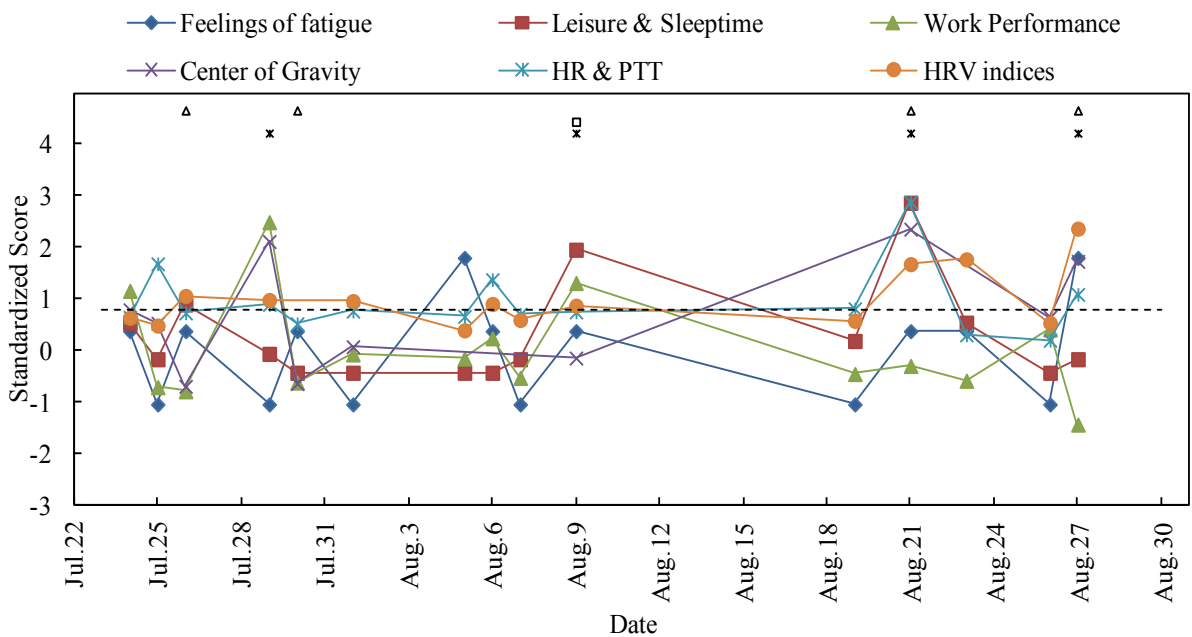


図 5.24 対象者 G の各指標の時系列変化

Fig. 5.24 Changes over time in each indicator for subject G

See the caption of Fig.5.23.

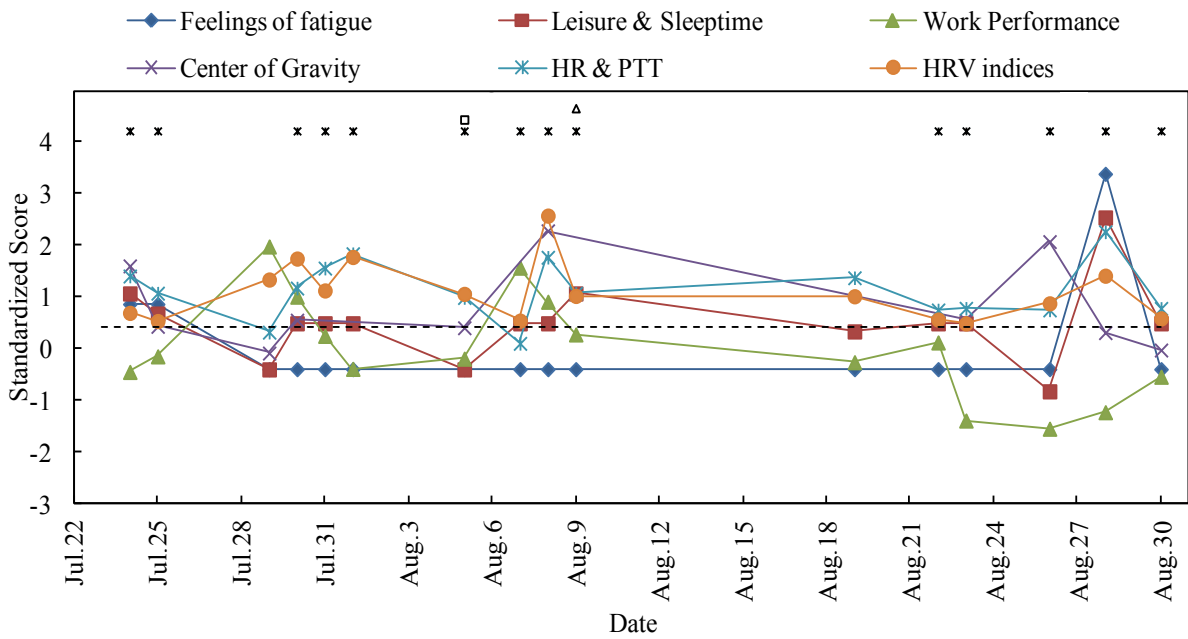


図 5.25 対象者 N の各指標の時系列変化

Fig. 5.25 Changes over time in each indicator for subject N

See the caption of Fig.5.23.

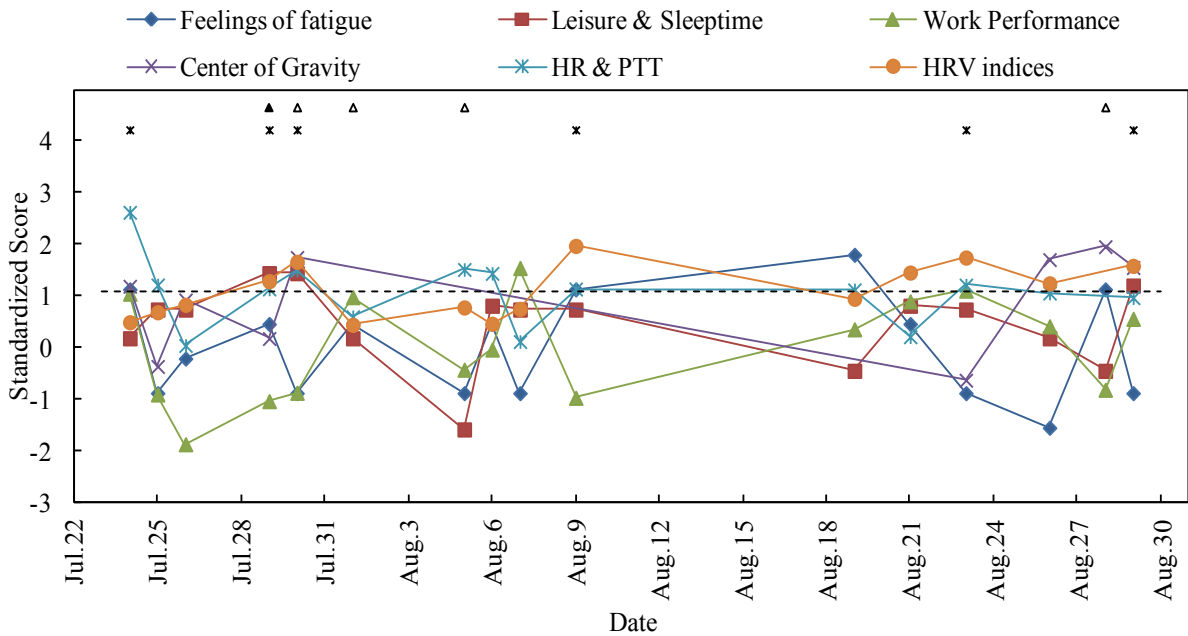


図 5.26 対象者 O の各指標の時系列変化

Fig.5.26 Changes over time in each indicator for subject O

See the caption of Fig.5.23.

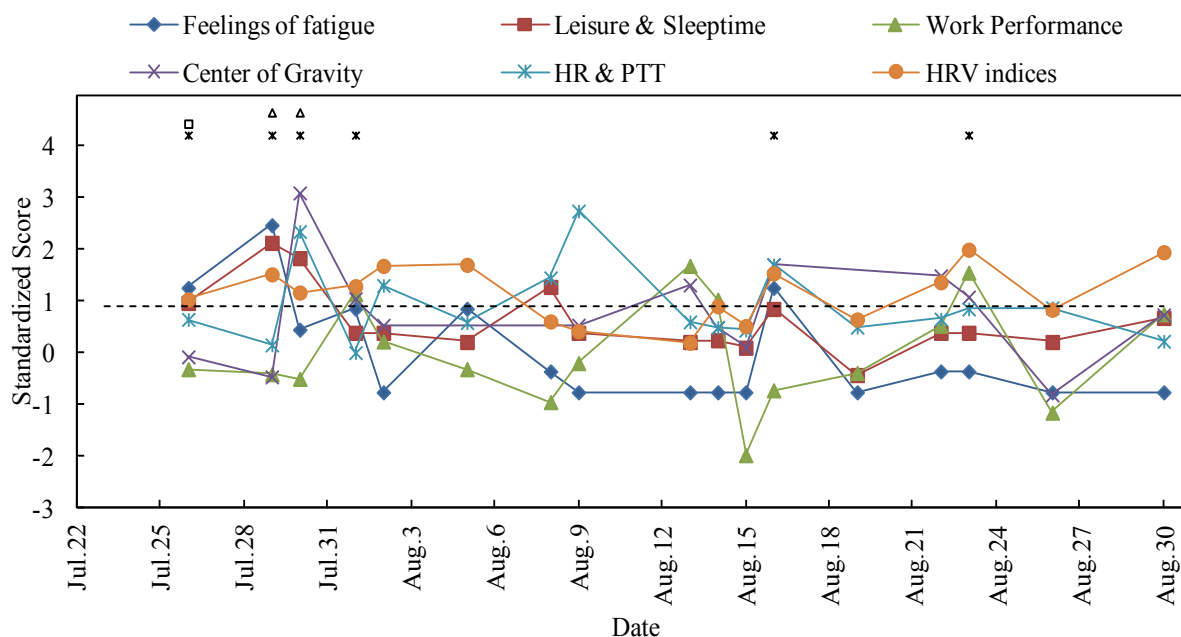


図 5.27 対象者 Q の各指標の時系列変化

Fig. 5.27 Changes over time in each indicator for subject Q

See the caption of Fig.5.23

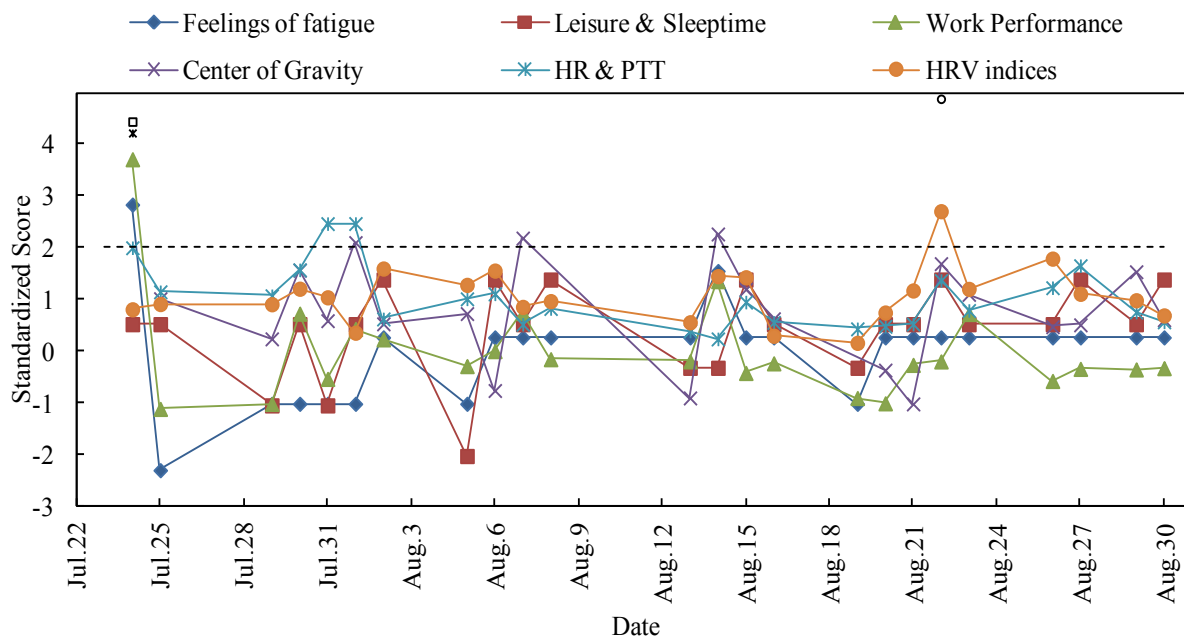


図 5.28 対象者 R の各指標の時系列変化

Fig. 5.28 Changes over time in each indicator for subject R

See the caption of Fig.5.23.

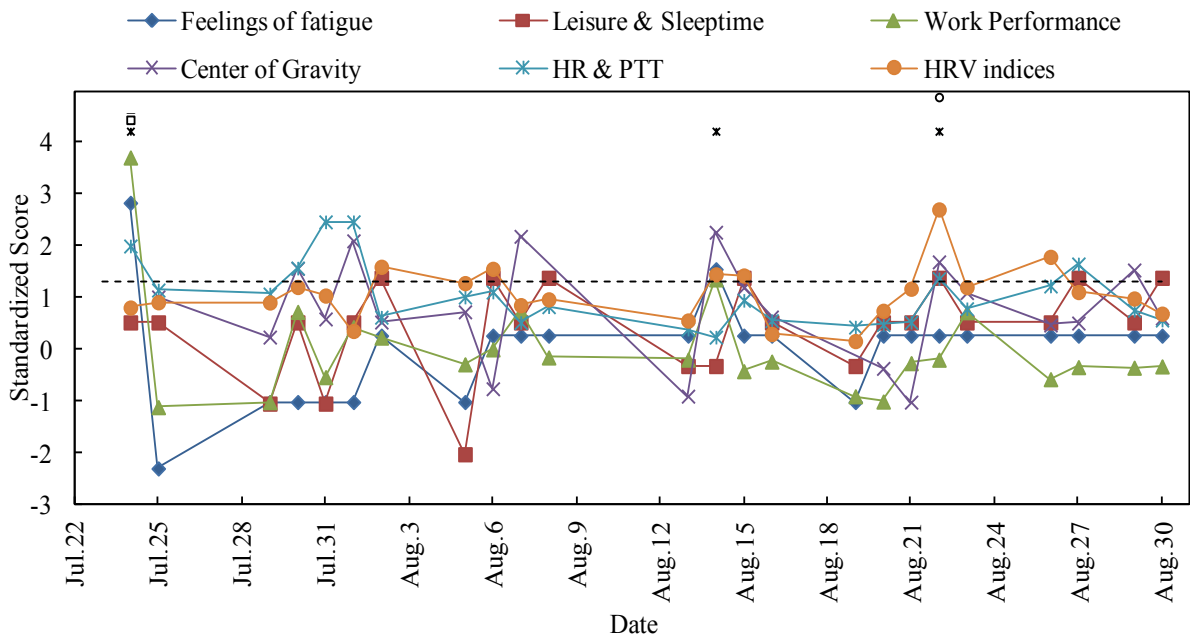


図 5.29 対象者 R の各指標の時系列変化

Fig.5.29 Changes over time in each indicator for subject R

See the caption of Fig.5.23.

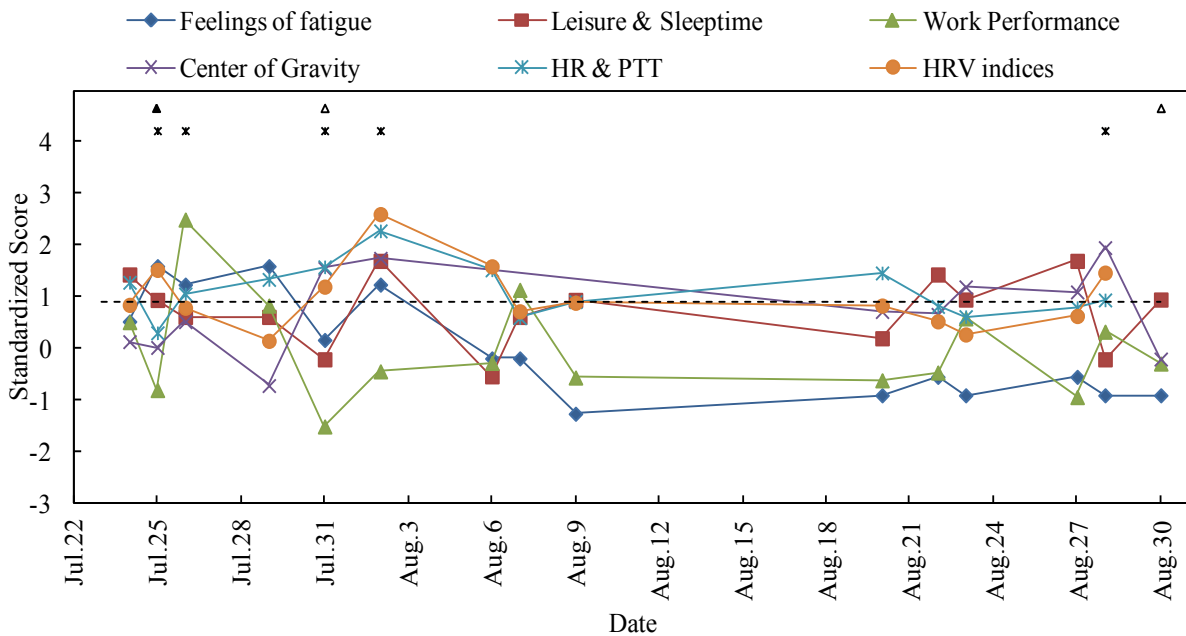


図 5.30 対象者 S の各指標の時系列変化

Fig.5.30 Changes over time in each indicator for subject S

See the caption of Fig.5.23

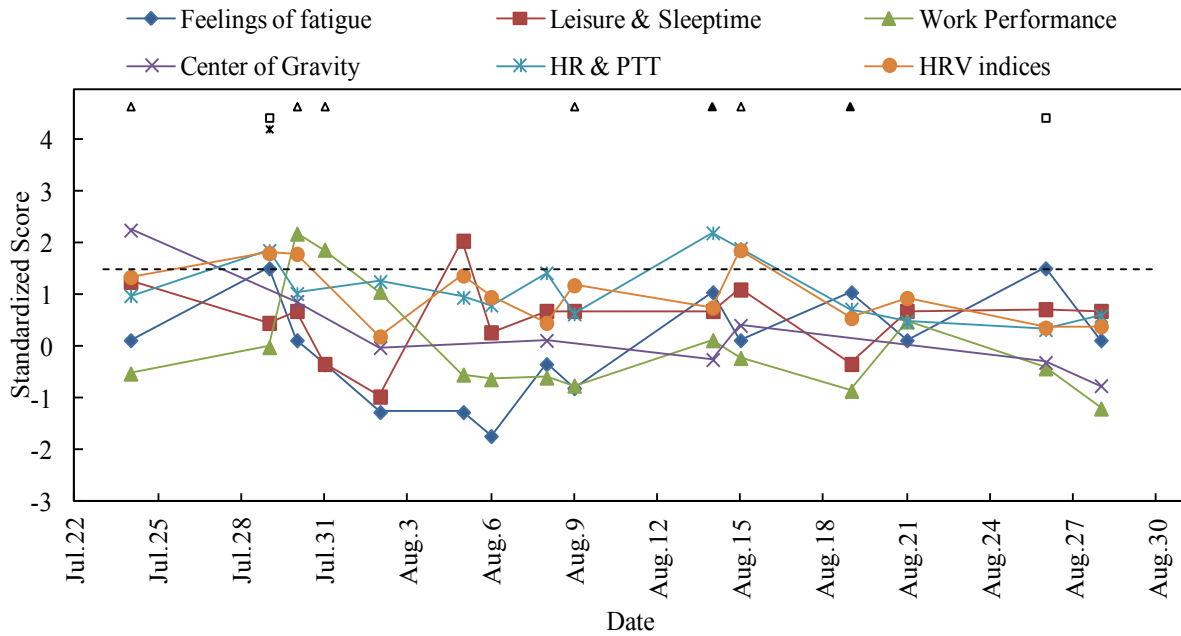


図 5.31 対象者 T の各指標の時系列変化

Fig.5.31 Changes over time in each indicator for subject T

See the caption of Fig.5.23

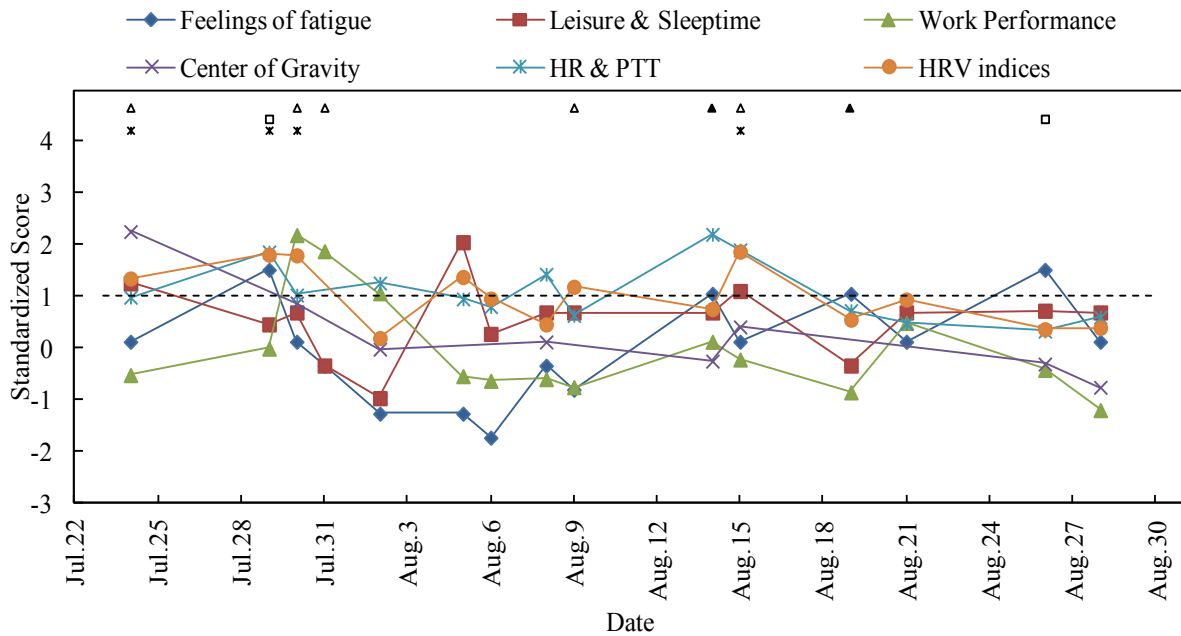


図 5.32 対象者 T の各指標の時系列変化

Fig.5.32 Changes over time in each indicator for subject T

See the caption of Fig.5.23

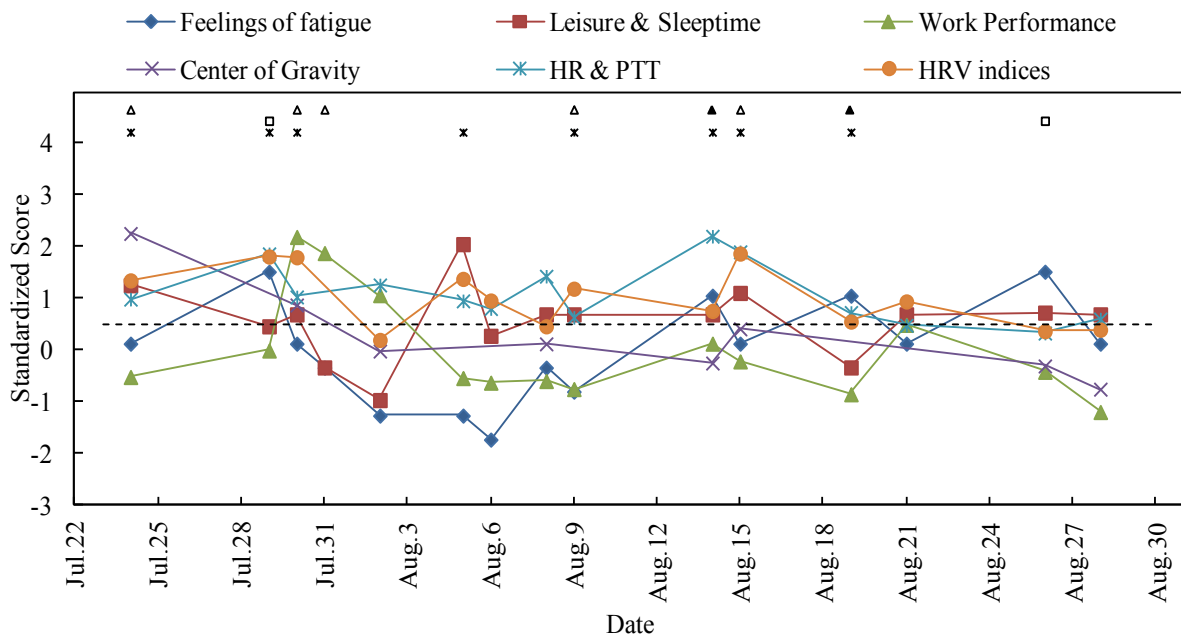


図 5.33 対象者 T の各指標の時系列変化

Fig.5.33 Changes over time in each indicator for subject T

See the caption of Fig.5.23

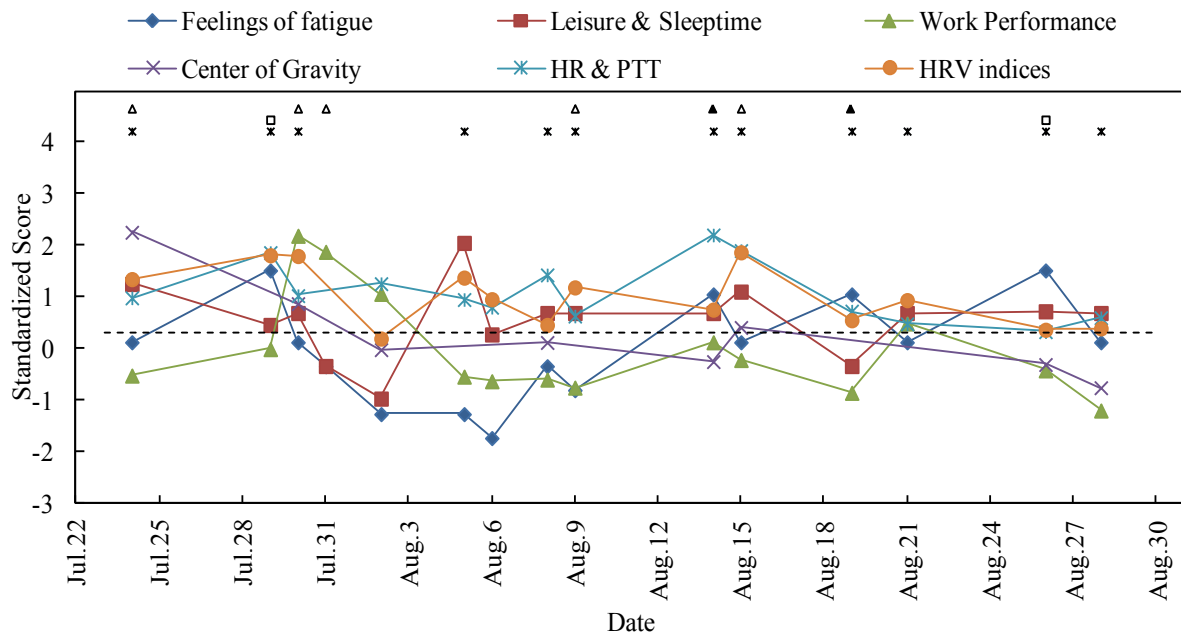


図 5.34 対象者 T の各指標の時系列変化

Fig. 5.28 Changes over time in each indicator for subject T

See the caption of Fig.5.23



り、一度も寄与しなかった指標はなかった。ただし HR&PTT において HR が閾値を超えることによって検出に寄与していたケースはなかった。また HR, PTT, HRV-LF, HR の変化より交感神経が優位と考えられる日と副交感神経が優位と考えられる日に分類したところ、交感神経が優位な日が 5 日、副交感神経が優位な日が 6 日、判定不能（交感神経と副交感神経の双方の賦活を示した日）が 1 日あった。

また検討対象となった 8 名において、提案手法で外的基準の該当日が検出された閾値における検出日数、外的基準の該当日と検出日が一致した日数、誤検出、検出漏れ、期待値、期待値と外的基準の該当日数との比を整理した(表 5.5)。“-”は検出日が 0 となり期待値が算出できなかったことを示している。

閾値ごとに期待値と該当日数の比の平均値を算出した(表 5.5)。対象者 8 名全員の期待値が算出されている閾値における最大値は、閾値 0.8 での 2.11 となった(表 5.5)。

表 5.4 蓄積疲労の兆候の検出に寄与した指標

Table 5.4 Indices that contributed to the detection of accumulated fatigue

Participants	B	G	N	O	Q	R	R	S	T	T	T	T	Sum
Threshold value (c)	1.0	0.8	0.4	1.1	0.9	2.0	1.3	0.9	1.5	0.7	0.5	0.3	
<b>Feelings of fatigue</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>
<b>Leisure &amp; Sleep time</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
<b>Work performance</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>
<b>Center of Gravity</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>
<b>HR &amp; PTT</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>9</b>
HR<c	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	3
HR>c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PTT<c	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	5
PTT>c	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
<b>HRV indices</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>11</b>
HRV-LF<c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
HRV-LF>c	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	4
HRV-HF<c	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
HRV-HF>c	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	5
Autonomic nerve activity	S	S	S	P	P	S	P	P	-	S	P	P	

S: Sympathetic activation, P: Parasympathetic activation

表 5.5 各閾値における検出結果

Table 5.5 The detection result on each threshold

Parti- cipant	Thre- shold	Number of days of detection	Number of days of agreement (D.A.)			False- pos- itive	False- nega- tive	Expec- tation value (E)	D.A./ E	
			Business trip or work on holiday	Coworker	Free response Should be detected					Does not necessarily need to be detected
B	0.1	15	0	1	0	6	8	0	1.00	1.00
G	0.1	12	0	1	0	3	8	0	0.80	1.25
N	0.1	16	0	1	0	2	13	0	1.00	1.00
O	0.1	14	0	0	1	2	11	0	0.88	1.14
Q	0.1	16	0	1	0	2	13	0	0.94	1.06
R	0.1	23	1	1	0	0	21	0	1.92	1.04
S	0.1	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15
T	0.1	14	0	2	2	4	6	0	2.93	1.36
Ave.										1.13
B	0.2	15	0	1	0	6	8	0	1.00	1.00
G	0.2	11	0	1	0	3	7	0	0.73	1.36
N	0.2	16	0	1	0	2	13	0	1.00	1.00
O	0.2	14	0	0	1	2	11	0	0.88	1.14
Q	0.2	15	0	1	0	2	12	0	0.88	1.13
R	0.2	23	1	1	0	0	21	0	1.92	1.04
S	0.2	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15
T	0.2	13	0	2	2	4	5	0	3.35	1.19
Ave.										1.13
B	0.3	13	0	1	0	5	7	0	0.87	1.15
G	0.3	11	0	1	0	3	7	0	0.73	1.36
N	0.3	16	0	1	0	2	13	0	1.00	1.00
O	0.3	14	0	0	1	2	11	0	0.88	1.14
Q	0.3	14	0	1	0	2	11	0	0.82	1.21
R	0.3	21	1	1	0	0	19	0	1.75	1.14
S	0.3	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15
T	0.3	12	0	2	2	4	4	0	3.19	1.25
Ave.										1.18
B	0.4	13	0	1	0	5	7	0	0.87	1.15
G	0.4	8	0	1	0	3	4	0	0.53	1.88
N	0.4	14	0	1	0	2	11	0	0.88	1.14
O	0.4	14	0	0	1	2	11	0	0.88	1.14
Q	0.4	14	0	1	0	2	11	0	0.82	1.21
R	0.4	21	1	1	0	0	19	0	1.75	1.14
S	0.4	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15
T	0.4	10	0	1	2	4	3	1	2.67	1.13
Ave.										1.24
B	0.5	11	0	1	0	4	6	0	0.73	1.36
G	0.5	6	0	1	0	3	2	0	0.40	2.50
N	0.5	7	0	0	0	2	5	1	0.44	0.00
O	0.5	12	0	0	1	1	10	0	0.75	1.33
Q	0.5	12	0	1	0	2	9	0	0.71	1.42
R	0.5	20	1	1	0	0	18	0	1.67	1.20
S	0.5	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15
T	0.5	8	0	1	2	4	1	1	2.13	1.41
Ave.										1.30

表 5.5 各閾値における検出結果 (続き)

Table 5.5 The detection result on each threshold (cont.)

Partici- pant	Thre- shold	Number of days of detection	Number of days of agreement (D.A.)			Free response Should be detected	Does not necessarily need to be detected	False- pos- itive	False- nega- tive	Expec- tation value (E)	D.A./ E
			Business trip or work on holiday	Coworker	Free response						
B	0.6	9	0	1	0	4	4	0	0.60	1.67	
G	0.6	6	0	1	0	3	2	0	0.40	2.50	
N	0.6	7	0	0	0	2	5	1	0.44	0.00	
O	0.6	12	0	0	1	1	10	0	0.75	1.33	
Q	0.6	10	0	1	0	2	7	0	0.59	1.70	
R	0.6	15	1	1	0	0	13	0	1.25	1.60	
S	0.6	13	0	0	1	1	11	0	0.87	1.15	
T	0.6	7	0	1	1	4	1	2	1.87	1.07	
Ave.										1.38	
B	0.7	7	0	1	0	3	3	0	0.47	2.14	
G	0.7	5	0	1	0	3	1	0	0.33	3.00	
N	0.7	6	0	0	0	1	5	1	0.38	0.00	
O	0.7	11	0	0	1	1	9	0	0.69	1.45	
Q	0.7	7	0	1	0	2	4	0	0.41	2.43	
R	0.7	13	1	1	0	0	11	0	1.08	1.85	
S	0.7	10	0	0	1	1	8	0	0.67	1.50	
T	0.7	6	0	1	1	3	1	2	1.60	1.25	
Ave.										1.70	
B	0.8	6	0	1	0	2	3	0	0.40	2.50	
G	0.8	4	0	1	0	2	1	0	0.27	3.75	
N	0.8	5	0	0	0	1	4	1	0.31	0.00	
O	0.8	9	0	0	1	1	7	0	0.56	1.78	
Q	0.8	6	0	1	0	2	3	0	0.35	2.83	
R	0.8	9	1	1	0	0	7	0	0.75	2.67	
S	0.8	8	0	0	1	1	6	0	0.53	1.88	
T	0.8	5	0	1	1	2	1	2	1.33	1.50	
Ave.										<b>2.11</b>	
B	0.9	5	0	1	0	2	2	0	0.33	3.00	
G	0.9	3	0	0	0	2	1	1	0.20	0.00	
N	0.9	5	0	0	0	1	4	1	0.31	0.00	
O	0.9	8	0	0	1	1	6	0	0.50	2.00	
Q	0.9	6	0	1	0	2	3	0	0.35	2.83	
R	0.9	8	1	1	0	0	6	0	0.67	3.00	
S	0.9	5	0	0	1	1	3	0	0.33	3.00	
T	0.9	5	0	1	1	2	1	2	1.33	1.50	
Ave.										1.92	
B	1.0	4	0	1	0	2	1	0	0.27	3.75	
G	1.0	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00	
N	1.0	5	0	0	0	1	4	1	0.31	0.00	
O	1.0	7	0	0	1	1	5	0	0.44	2.29	
Q	1.0	5	0	0	0	2	3	1	0.29	0.00	
R	1.0	7	1	1	0	0	5	0	0.58	3.43	
S	1.0	3	0	0	0	1	2	1	0.20	0.00	
T	1.0	4	0	1	1	2	0	2	1.07	1.88	
Ave.										1.42	

表 5.5 各閾値における検出結果 (続き)

Table 5.5 The detection result on each threshold (cont.)

Partici- pant	Thre- shold	Number of days of detection	Number of days of agreement (D.A.)		Free response		False- pos- itive	False- nega- tive	Expec- tation value (E)	D.A./ E
			Business trip or work on holiday	Coworker	Should be detected	Does not necessarily need to be detected				
B	1.1	1	0	0	0	1	0	1	0.07	0.00
G	1.1	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.1	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.1	6	0	0	1	1	4	0	0.38	2.67
Q	1.1	3	0	0	0	2	1	1	0.18	0.00
R	1.1	7	1	1	0	0	5	0	0.58	3.43
S	1.1	2	0	0	0	1	1	1	0.13	0.00
T	1.1	3	0	1	0	2	0	3	0.80	1.25
Ave.										0.92
B	1.2	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.2	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.2	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.2	2	0	0	0	0	1	1	0.13	0.00
Q	1.2	3	0	0	0	2	1	1	0.18	0.00
R	1.2	4	1	1	0	0	2	0	0.33	6.00
S	1.2	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.2	2	0	1	0	1	0	3	0.53	1.88
Ave.										1.13
B	1.3	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.3	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.3	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.3	1	0	0	0	0	0	1	0.06	0.00
Q	1.3	3	0	0	0	2	1	1	0.18	0.00
R	1.3	3	1	1	0	0	1	0	0.25	8.00
S	1.3	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.3	1	0	1	0	0	0	3	0.27	3.75
Ave.										1.68
B	1.4	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.4	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.4	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.4	1	0	0	0	0	0	1	0.06	0.00
Q	1.4	3	0	0	0	2	1	1	0.18	0.00
R	1.4	2	0	1	0	0	1	1	0.17	6.00
S	1.4	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.4	1	0	1	0	0	0	3	0.27	3.75
Ave.										1.39
B	1.5	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.5	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.5	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.5	1	0	0	0	0	0	1	0.06	0.00
Q	1.5	3	0	0	0	2	1	1	0.18	0.00
R	1.5	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	1.5	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.5	1	0	1	0	0	0	3	0.27	3.75
Ave.										2.25

表 5.5 各閾値における検出結果 (続き)

Table 5.5 The detection result on each threshold (cont.)

Partici- pant	Thre- shold	Number of days of detection	Number of days of agreement (D.A.)		Free response		False- pos- itive	False- nega- tive	Expec- tation value (E)	D.A./ E
			Business trip or work on holiday	Coworker	Should be detected	Does not necessarily need to be detected				
B	1.6	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.6	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.6	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.6	0	0	0	0	0	0	1	-	-
Q	1.6	1	0	0	0	1	0	1	0.06	0.00
R	1.6	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	1.6	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.6	0	0	0	0	0	0	4	-	-
Ave.										2.40
B	1.7	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.7	2	0	0	0	2	0	1	0.13	0.00
N	1.7	2	0	0	0	0	2	1	0.13	0.00
O	1.7	0	0	0	0	0	0	1	-	-
Q	1.7	1	0	0	0	1	0	1	0.06	0.00
R	1.7	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	1.7	1	0	0	0	0	1	1	0.07	0.00
T	1.7	0	0	0	0	0	0	4	-	-
Ave.										2.40
B	1.8	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.8	1	0	0	0	1	0	1	0.07	0.00
N	1.8	1	0	0	0	0	1	1	0.06	0.00
O	1.8	0	0	0	0	0	0	1	-	-
Q	1.8	1	0	0	0	1	0	1	0.06	0.00
R	1.8	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	1.8	0	0	0	0	0	0	1	-	-
T	1.8	0	0	0	0	0	0	4	-	-
Ave.										3.00
B	1.9	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	1.9	1	0	0	0	1	0	1	0.07	0.00
N	1.9	1	0	0	0	0	1	1	0.06	0.00
O	1.9	0	0	0	0	0	0	1	-	-
Q	1.9	0	0	0	0	0	0	1	-	-
R	1.9	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	1.9	0	0	0	0	0	0	1	-	-
T	1.9	0	0	0	0	0	0	4	-	-
Ave.										4.00
B	2.0	0	0	0	0	0	0	1	-	-
G	2.0	1	0	0	0	1	0	1	0.07	0.00
N	2.0	1	0	0	0	0	1	1	0.06	0.00
O	2.0	0	0	0	0	0	0	1	-	-
Q	2.0	0	0	0	0	0	0	1	-	-
R	2.0	1	0	1	0	0	0	1	0.08	12.00
S	2.0	0	0	0	0	0	0	1	-	-
T	2.0	0	0	0	0	0	0	4	-	-
Ave.										4.00

## 5.4. 考察

### 5.4.1. 計測システムの運用状況の評価

指定した計測日数を下回ったのは1名のみであり、自由記述においても計測システムに関する強い不満はなく、本計測システムは企業で受け入れられたと考えられる。これは計測システムの改良により計測に伴う手間と時間が軽減されたことと、職場の理解と担当者の積極的な働きかけがあったことが理由として考えられる。また自由記述において、結果に関する個別のフィードバックを期待するコメントが複数あったことから、結果をレポートにまとめて報告することを確約したことが計測への動機づけの強化に繋がったと考えられる。

心電図と重心動揺以外の指標については、ほぼ問題なく計測が行えた。心電図は計測に伴う手間を軽減するために静電容量を用いた計測方法を採用したが、全計測日においてR波が検出できた対象者がいる一方で、全計測日において検出できなかった対象者や5割近い割合で検出できなかった対象者がいた(表5.1)。このことから計測環境におけるノイズの発生状況だけでなく、足底の形状や靴下の厚さと、体動による足底とセンサとの接地面積や靴下の厚さの変化に伴う静電容量の変動が影響している可能性が考えられる。本システムにおいては心拍変動指標や心拍数などを蓄積疲労の兆候の検出に用いているが、これらは脈波間隔から算出した値により代用できる。ただし脈波伝達時間に関しては心電図のR波と脈波のピークの双方が必要となるため、R波が検出できなかった場合にはデータが欠損する。しかし、脈波伝達時間のデータが欠損した場合においても本システムの検出手法では心拍数と組み合わせて1つの指標としているため、脈拍数が算出できていれば蓄積疲労の兆候の検出に用いている6つの分類指標の欠損は回避できる。

重心動揺のデータの欠損は計測システムの不備によるものだった。Wiiボードは加重がない状態が一定時間続くと通信が切れる仕様となっており、本システムでは計測時に通信が途絶えていた場合には再度、通信を行う設定にしていたが通信再開後に送信される信号がすべて0になる不具合があった。

計測時にデータを確認する処理を組み込まなかったことが心電図と重心動揺にデータの欠損が発生した一因として挙げられる。しかし、これはタブレットパソコンの処理能力が十分ではなく、計測時の処理落ちや数値探索課題の動作が不安定になるのを防ぐための措置であった。

20名中19名の対象者において既定の回数以上の計測が行われていたことと、心電図と重心動揺にデータの欠損があるものの、6つの分類指標の時系列変化によって蓄積疲労の兆候を検出する手法を検討することができるだけのデータが得られた。このことから計測方法やプログラムに改善の余地があるが、本計測システムは企業での運用に耐えられるものであったと考える。

### 5.4.2. 提案手法の妥当性の評価

スクリーニング手法の妥当性の評価のポイントは三点ある。一点目は現行の面接指導の対象者の基準に相当する日を取りこぼすことなく検出できるか。二点目は現行の基準には該当しないが疲労の蓄積が疑われる日を検出できるか。三点目は医師による面接指導が過剰な対応になると考

えられる日が検出されていないかである。

一点目に関しては、現行の基準である「月 100 時間以上の時間外・休日労働を行い、疲労の蓄積が認められる本人から申し出があった者」に相当する基準として、仕事に起因する理由により産業医の面談を希望した週で、前日の残業時間が 5 時間以上 (=100 時間÷5 日間÷4 週間) の日がシステムで検出できているか検証を試みたが、延べ 325 日間の計測において基準に該当する日が 1 日もなく検討が行えなかった。「5.3.2 フィールドの選定」に挙げた条件を満たす企業において過重労働が日常的に行われている可能性は低く、本スクリーニング手法の検証に適した企業を選定するのは難しいと考えられ、それを裏付ける結果となった。一点目の検証は過重労働が発生している職場があり、その実体を外部の機関に開示することを厭わない企業で、なおかつ対象者への働きかけを期待できる調査の受け入れ先を見つけるところから始める必要がある。もしくは過重労働が発生している職場に勤務する個人の家に計測システムを設置して、勤務時間に関する記録と合わせて計測を行ってもらう方法が考えられる。

二点目と三点目に関しては、「5.2.4. 提案手法にて検出された日の妥当性の外的基準」で示した外的基準 ii, iii, iv に該当する日と検出日の対応によって検討できる。二点目に関しては検出漏れが少ないほど、現行の基準には当てはまらない疲労が蓄積している可能性がある日を検出できていることを示す。三点目に関しては誤検出が少ないほど、医師による面接指導が過剰な対応となる日を検出していないことを示す。本研究で目指しているのはスクリーニングシステムの開発であることから、リスクのあるものを漏れなく検出することをより重要視する。

すべての該当日を漏れなく検出した場合、対象者 B,G,R,S では誤検出が 1,2 日に留まり提案する手法の妥当性を示す結果となった (表 5.3, 図 5.23, 5.24, 5.28, 5.30)。誤検出はあるが、ここでの誤検出は検出された日に外的基準の ii, iii, iv に該当する日がなかったことのみを示している点に留意すべきである。外的基準は出張、休日出勤、同僚から疲れているように見えた、本人の自由記述といった限られた項目からなり、これらに該当しない疲労の蓄積を提案手法が捉えた可能性がある。対象者 O,Q の誤検出もこの要因によるものである可能性が考えられる。

対象者 N は該当日である出張の翌日を検出するためには閾値を 0.4 まで下げる必要があり、それに伴い検出日数が 14 日になり、誤検出が 11 日と大量に発生した (表 5.3, 図 5.25)。この結果は提案手法の妥当性が低いのではなく、該当日の出張による負担が疲労の蓄積を起すほどではなかったことを示している可能性が考えられる。外的基準は疲労が蓄積している可能性が高い日を選定する基準である。発生した疲労が計測のあった翌朝までに回復している場合において該当日の検出を試みると、このケースのように大量の誤検出が発生すると考えられる。

対象者 T もすべての該当日を検出すると閾値が 0.3 まで下がり、検出日数と誤検出の増加が見られた (表 5.3, 図 5.34)。しかし検出する該当日を出張や休日出勤があった 1 日と、自由記述の記載内容から検出が望ましいと考えられた 1 日に留めた場合には、検出漏れは 2 日となるが閾値が 1.0 となり、検出日数は 4 日に留まり誤検出も 0 となった (表 5.3, 図 5.32)。この結果も対象者 N のケースと同様に、残る 2 日の該当日に疲労の蓄積がなかった可能性が考えられる。ただし、

対象者 T は土日に 2 度出張が入っており、さらにその準備に追われていたことが自由記述より伺え、調査期間を通して常にある程度の疲労を有していた可能性がある。5.2.2.の b で挙げたように、提案手法は個人ごとの標準得点を用いているため調査期間中に常に疲労している場合には蓄積疲労の兆候が検出できない。対象者 T の結果は、蓄積疲労の兆候の検出に疲労していない期間のデータを必要するという本提案手法の要件により、適用できる範囲に限界があることを示している可能性がある。

外的基準の該当日の検出が偶然によるものかどうかを検討するために、期待値と外的基準の該当日数の比（以下、D.A./E.）を算出した（表 5.3）。検討対象とした 8 名中、対象者 N を除く 7 名で D.A./E. が 2.5 を超えるケースが確認されたことから、提案手法が蓄積疲労の兆候を検出できることが示された。また各閾値における D.A./E. の平均値を算出したところ、閾値が 0.8 のときに最大値（2.11）となった（表 5.4）。このことから平均的には閾値が 0.8 のときに検出力が高いと考えられる。ただし、これは限られた対象者から算出された参考値に過ぎないことに留意すべきである。

3 つ目の産業による面談が過剰な対応となる場合を防ぐために、睡眠時間の最大値と最小値の差と、1 日当たりの最大超過勤務時間の長さおよび平均超過勤務時間によって、疲労の蓄積が考え難い対象者を除外している。この除外基準に対象者 D, E, F, K, L の 5 名が当てはまり、この全員が外的基準に該当する日が 1 日もなかった。このことから睡眠時間や超過勤務時間によって検討の対象を選定するのは有効と考えられる。ただし、睡眠時間と超過勤務時間による除外基準は検討の余地が残っている。除外した上で残った 15 名で最も平均超過勤務時間が長かった者でも 2.4 時間/日、対象者の平均では 55.4 分/日と非常に短く、月当たりに換算すると最も長かった対象者で 48 時間（=2.4 時間×5 日×4 週）となり、現行の月 100 時間の超過勤務時間の半分に満たない。スクリーニングを目的としているため除外基準を厳し過ぎるのは問題があるが、過重労働対策用の基準としては実用性に疑問がある。除外基準においても一点目での考察と同様に過重労働が発生している職場での検討が必要と考えられる。

交感神経が優位と考えられる日が 4 日、副交感神経が優位と考えられる日が 6 日が確認された（表 5.4）。交感神経と副交感神経のそれぞれが優位と考えられる日が外的基準の該当日の検出に寄与していることから 4.2.4 で示した「心拍数と脈波伝達時間」、そして心拍変動指標については絶対値を用いて評価する方法が有効であったと考えられる。また副交感神経活動が優位な日の 6 日中 5 日において「余暇と睡眠の時間」が閾値を超えており、余暇や睡眠が十分ではないことによる副交感神経が優位な状態（眠気やだるさを感じるような状態）を捉えられていると考えられ、妥当な結果と言える。

#### 5.4.3. 本手法を組み込んだスクリーニングシステムの開発に向けて

計測が簡便かつ短時間で行えたとしても、動機付けが十分でなければ継続的な計測が行われな可能性が高い。そこで、提案手法を組み込んだスクリーニングシステムを現場に導入するにあ



たつては動機付けの観点からの工夫が必要となる。例えば計測後に計測結果を時系列で表示して最近の自己の状態を一覧できるようにすることで計測への関心を高められる。その他の取り組みとして、運用体制の構築が必要である。計測システムの計測結果は、産業医を中心とした産業衛生スタッフが管理することが想定される。計測が継続的に行われていない対象者がいた場合には、スクリーニングシステムから通知を出して、該当する対象者に産業保健スタッフが計測を働きかけるといった運用が望ましい。またスクリーニングシステムの導入に際しては、対象者への教育が必要と考えられる。まず、現行の過重労働対策の一環として行われている面接指導の対象者の選定基準は不十分であることを知ってもらう。その上で、この計測システムで得られるデータと、そこから得られる評価は、産業衛生スタッフがサポートする際の資料として活用されることを伝え、自身の健康と安全を守るために有益であることを示す必要がある。経営者や管理者に対しては、本スクリーニング手法は現行の選定基準に比べて多面的な評価を行っているため、過労に伴い休業する可能性がある労働者を見逃すリスクが少ない上に、疲労感といった主観的な指標に拠らず、生理的機能の変化と作業成績の低下などの客観的指標による評価が行える点を伝え、運用体制の構築への理解と協力を求めることが有効と考えられる。しかし、現状では導入実績がなく、適切な運用方法や導入による効果の検討はできていない。さらに対象者の個人情報管理にも留意する必要がある。今後、計測システムの改良と共に、現場での運用試験を行っていく必要がある。

また、現場での運用に関しては、スマートフォンの活用が考えられる。例えば、産業衛生スタッフからのメールの受信やアプリによる計測時刻の通知といった動機づけの強化と利用の促進に利用できる。またアプリの作成により主観指標、就寝および起床時刻や余暇時間、数値探索課題といった指標のデータの取得が可能となる。むしろ、据え置き型の計測システムに比べ、通勤時に電車の中で回答するといった、場所にしばられない運用が行える。さらに、3軸の加速度センサとジャイロセンサの組み合わせにより、重心動揺と相関があるデータ取得できる可能性があり、その他の生理指標（心拍数、脈波伝達時間、心拍変動指標）に関しても、センサと生体アンプをユニット化し、通信機能を付与してスマートフォンと組み合わせることで計測できる可能性がある。

本研究において提案手法は蓄積疲労の兆候を検出できると考えられたが、実用に際しては課題が残っている。個人ごとの標準得点を用いるため、すでに疲労が蓄積している対象者は検出できない恐れがある。また有意な変化であると判定する際に用いる閾値の設定方法も確立できていない。

すでに疲労が蓄積している対象者が検出できない恐れがあることに関しては、疲労の蓄積が考え難い時期に数週間の計測を行っておき、その時期の標準偏差を得ておくのが有効と考えられる。この手法も事前にデータの蓄積が必要なことから実用性に欠ける。しかし手法として限界があるとしても疲労の蓄積を客観的かつ定量的に評価する方法がない現状において、過労死に代表される過重労働への対策の一環となり得る本提案手法は社会的な意味があると考えられる。また n 数を増

やしていき、一般的な平均値と標準偏差を得ることで、この問題に対応できる可能性がある。計測値から一般的な平均値と標準偏差を用いて標準得点に相当する数値を算出することで提案手法を適用し、蓄積疲労の兆候が検出されれば産業医の面接を促すという運用が考えられる。この手法は個人差を無視しているので誤検出となる可能性がある。しかし実際の運用では、誤検出は面談を実施した産業医によって判断できるが、検出漏れは欠勤や発病、もしくは自殺といった形で現れることから、誤検出より検出漏れを防ぐことが重要であり、この手法も検討する必要があると考えられる。

閾値の設定方法については、実用的には現場で運用しながら調整していくことになると考えられる。検出漏れのリスクを考えるとある程度の誤検出は許容されるべきである。しかし事業所ごとに過重労働対策にさける労力は異なり、許容できる誤検出の量にも違いがある。よって閾値を調整することで面接対象者の人数を産業医をはじめとする産業保健スタッフが対応できる範囲にコントロールしていく運用が想定される。

また、これまでの検討では主に 1.1 で定義した蓄積疲労を対象としており、より長期に亘り蓄積した慢性疲労は十分に検討できていない。慢性疲労を対象とする場合には単発の蓄積疲労の兆候の検出ではなく、検出される頻度を指標とするなどの更なる検討が必要と考えられる。

## 5.5. おわりに

日勤の労働者 20 名中 19 名が、本計測システムにて週 2 回以上、計 15 回以上の計測を行うことができ、指標によってはデータに欠損がみられたが、疲労の蓄積を検討するに足るデータを継続的に得ることができた。本システムは改良により企業に導入できるだけの受容性を有し、現場の理解と計測への動機づけによって継続的な運用が行えることが示された。ただし、R-R 間隔と重心動揺については、検出手法の検討と計測システムの改良が必要である。

蓄積疲労の検出については、現行の基準では該当しない疲労が蓄積している状態を検出できる可能性が示された。また疲労が蓄積していると考えられる日が偶然検出されているわけではないことを期待値との比較によって確認した。しかし、現行の基準の該当者がいなかったため、現行の基準の該当者を漏れなく検出できるかについての検討は行えなかった。ただし、超過勤務時間と睡眠時間の絶対値に閾値を設けることで誤検出を減らせる可能性が考えられた。

蓄積疲労の兆候の検出手法の検討のためには、過重労働がある現場での運用試験が欠かせないと考えられる。今後は、データを安定して計測できるシステムの開発を行うと共に、提案手法の運用試験を重ね、実用的なスクリーニングシステムの開発を目指す。



## 第 6 章 結語

本研究の目的は、過重労働の対策として行われている医師による面接指導の対象者をスクリーニングするために疲労の蓄積を捉える手法を確立することと、この手法を組み込んだ労働の現場で運用可能なシステムを開発することである。そのために以下の事項について検討を行った。

1. (急性もしくは亜急性の) 精神疲労を評価できる指標の探索
2. 蓄積疲労を評価できる指標の探索
3. 蓄積疲労の兆候を検出する手法の検討
4. 計測システムの開発と改良
5. 計測システムの運用上の問題点の抽出

1.については第2章にて、主観指標は日本語版 POMS[付録参照]と VAS、作業成績は SDST の探索時間、生理指標は  $\ln(\text{Total Power})$ ,  $\ln(\text{LF})$ ,  $\text{CV}_{R-R}$ , HR, TBF が精神疲労を評価できる可能性がある指標として抽出された。

これらの指標を軸に第3章では2に挙げた疲労の蓄積を評価できる指標の探索を行った。実験参加者によっては負担が少なく必ずしも疲労の蓄積が生じていない可能性が考えられたが、主観指標では自覚症しらべ[付録参照]のだるさ感と蓄積的疲労兆候インデックス[付録参照]の一般的疲労感が、生理指標では HF, HR, 閉眼時の前後方向の重心動揺が有意な変化を示し、これらの指標は蓄積疲労の評価指標となり得ると考えられた。また、視覚探索課題の反応時間においては習熟の影響がみられたため繁忙期における作業成績の低下は認められなかった。しかし一部の実験参加者で繁忙期において睡眠時間の短縮に伴う反応時間の延長がみられたことから、十分に習熟させた上で用いれば、疲労の蓄積を評価できると可能性が示された。

3, 4, 5 については第4,5章で検討を行った。第4章においては、第2章までの検討にて選定した指標を労働の現場で計測できるシステムの開発を行い、男性3名、女性1名の大学生4年生を対象に前半に卒業論文の提出日や卒業研究の発表会といったイベントが集中している忙しい期間を、後半に発表会後の余裕のある時期を含む期間を設定して計測を行った。開発した計測システムは、全対象者において、計測を試みたすべての機会に計測が単独で行え、繁忙期においても継続的に計測が実施されていることから、その受容性は十分にあったと考えられる。また、本システムが、疲労の定義にある疲労感などの主観的な訴え、作業能力の量的または質的な低下、身体的・生理的機能の変化の4つの観点に対応する疲労感、余暇と睡眠の時間、数値探索課題の探索時間、心拍数、脈波伝達時間、重心動揺、心拍変動性指標を長期間に亘り継続して計測が行えることが確認された。また、標準得点と設定した閾値を用いた蓄積疲労の兆候を検出する手法によって検出された計測日は、蓄積疲労の原因となり得るイベントに関連していた。ここで用いた判定基準は、複数の指標の規格化した変化量が個人ごとに設定した閾値を超えた個数によって規定されている。この手法は、従来用いられてきた単一指標による絶対値での評価では、検出できない疲労の兆候を捉えられる可能性があると考えられる。しかし、対象者が4名と少ないことと、

生理計測の専門家ではないが、授業や研究を通して若干の生理計測の経験を有していたことから、企業で実施するためにはシステムの改良による計測時間の短縮や運用体制の構築による計測への動機付けの強化が必要になる。

第5章では、企業で無理なく運用できる水準まで計測に伴う時間と手間の軽減を図ったシステムを行った。その上で実際に企業にて長期間に亘り運用することでシステムの受容性を確認すると共に、個人ごとの標準得点と設定した閾値を用いた蓄積疲労の兆候検出の妥当性について検証を行った。対象は福岡県内にある材料や環境の調査および解析を業務とする企業の同一事業所に勤務する成人20名である。システムの運用期間は2013年7月22日(月)から同年8月30日(金)までの6週間とし、対象者にはこの期間中に週2日以上、頻度で延べ15日以上計測するように指示した。20名中19名が、本システムにて週2回以上、計15回以上の計測を行うことができ、指標によってはデータに欠損がみられたが疲労の蓄積を検討するに足るデータを継続的に得ることができた。本システムは改良により企業に導入できるだけの受容性を有し、現場の理解と計測への動機づけによって継続的な運用が行えることが示された。ただし、R-R間隔と重心動揺については、検出手法の検討とシステムの改良の必要性が認められた。蓄積疲労の検出については、現行の基準では該当しない疲労が蓄積している状態を検出できる可能性が示されたが、今回の対象者は超過勤務時間が少ないため、現行の基準の該当者を漏れなく検出できるかについての検討は行えなかった。また誤検出については、対応が必要な状態の見落としとトレードオフの関係にあるが、超過勤務時間と睡眠時間の絶対値に閾値を設けることで、誤検出の量をコントロールできる可能性が考えられた。これは、従来の基準を満たしているいないに関わらず、産業保健スタッフの余力に合わせて疲労が蓄積している可能性がある従業員に対応するといった運用が行える可能性を示している。すでに疲労が蓄積している対象者が検出できない恐れがあることに関しては、疲労の蓄積が考え難い時期に数週間の計測を行っておき、その時期の標準偏差を得ておくのが有効と考えられる。またn数を増やしていき一般的な平均値と標準偏差を得ることで、計測値から標準得点に相当する数値を算出して提案手法を適用することも検討の余地がある。

本システムの実用性の検証には、現行の面接指導の対象者の要件を満たす労働者がいる職場での検討が必要と考えられる。しかし、実際に企業において6週間の運用が行えたことと、疲労が蓄積していると考えられる日においても計測が行われていたことから、計測システムは実用に足るだけの受容性を有していると考えられる。また、個人ごとの標準得点と設定した閾値を用いた提案手法についても蓄積疲労の兆候の検出が行えており、運用実績の蓄積に伴い検出精度の向上が期待できる。

本システムは、現行の基準では見落とされてしまう産業医などの産業保健スタッフからのサポートが必要な労働者を捉えられる可能性があり、今後、現場での運用を重ねることで実用性と妥当性を備えた過重労働対策のツールとなり得ると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導ご鞭撻をいただきました大須賀美恵子教授に心より感謝致します。また、研究のデザインや解析方法に関して多くの助言をくださった三宅晋司教授に深謝いたします。筒井博司教授におきましては本質的な事項に関して有用なコメントをいただき大変感謝しております。蓄積疲労の判定方法、特に生理指標の意味についての的確なご指摘をいただいた松村潔教授に深く感謝いたします。

研究室の後輩の皆様が忙しい時期に実験に参加してくれたお蔭で、システムの問題点が明らかになりました。ありがとうございました。現場で運用試験が行える水準までシステムの完成度を上げることができたのは、プログラムの開発に際して多大な協力をしてくれたウエルネス研究室の棒谷英法様のお蔭です。心より感謝しております。

皆様のご指導、ご協力により、疲労を評価するシステムの開発を進めることができました。心より感謝致します。ありがとうございました。

## 参考文献

1. 寶珠山務: 過重労働とその健康障害: いわゆる過労死問題の現状と今後の課題について. 産業衛生学. 45: pp. 187-193, 2003.
2. 厚生労働省労働基準局長: 過重労働による健康障害防止のための総合対策について 基発第0317008号. 〈<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/roudou/an-eihou/dl/ka060317008a.pdf>〉 [accessed November 12, 2012]
3. 厚生労働省労働基準局長: 「過重労働による健康障害防止のための総合対策について」の一部改正について 基発第0307006号. 〈<http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei12/pdf/05.pdf>〉 [accessed November 12, 2012]
4. 面接指導の対象となる労働者の要件等. 労働安全衛生規則. 第六章 健康保持増進のための措置. 第一節の三 面接指導等. 第五十二条の二.
5. 面接指導の実施方法等. 労働安全衛生規則. 第六章 健康保持増進のための措置. 第一節の三 面接指導等. 第五十二条の三.
6. 井谷徹, 武山英麿: 産業疲労と概念と検査法. 産業医学レビュー. 11(2): pp. 81-94, 1998.
7. Grandjean E: Fatigue in industry, British Journal of Industrial Medicine. 36: pp. 175-186, 1979.
8. 南山堂医学大辞典 第19版. 南山堂, 東京, pp.2136, 2006.
9. 小木和孝: 現代人と疲労. 紀伊国屋書店, 東京, pp. 90-92, 1994.
10. 日本工業規格, JIS Z 8502 人間工学-精神的作業負荷に関する原則-用語及び定義.
11. International Organization for Standardization, ISO10075 Ergonomic principles related to mental work-load – General terms and definitions
12. 厚生労働省労働基準局長: 脳血管疾患及び虚血性心疾患等(負傷に起因するものを除く。)の認定基準について基発第1063号. 〈<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2002/09/s0906-5b2.html>〉 [accessed November 30, 2013]
13. Uehata T: Long working hours and occupational stress-related cardiovascular attacks among middle-aged workers in Japan. Journal of Human Ergology. 20(2): pp. 147-153, 1991.
14. 半田肇, 西川方夫: ストレスと脳卒中発生の因果関係に関する研究. 日本災害医学会会誌. 35: pp. 246-254, 1987.
15. Watanabe T, Sugiyama Y, Sumi Y, Watanabe M, Takeuchi K, Kobayashi F, Kono K: Effects of vital exhaustion on cardiac autonomic nervous functions assessed by heart rate variability at rest in middle-aged male worker. International Journal of Behavioral Medicine. 9(1): pp. 68-75, 2002.
16. 倉恒弘彦, 久保千春, 伴信太郎, 渡辺恭良: 神経・内分泌・代謝からみた検討と疲労の客観的評価法. 日本疲労学会. 3(2): pp. 8-20, 2008.



17. 橋本邦衛: 疲労. コロナ社, 東京, pp.7-8, 1960.
18. 岡村法宜: 長時間の計算作業による精神疲労が事象関連電位 P300 に及ぼす影響. 産業衛生学. **49(5)**: pp. 203-208, 2007.
19. 栗盛静江, 岡龍雄, 柿崎敏雄: 精神作業による負担と疲労の評価 2. 11 時間の非規制計算作業負荷実験. 産業医学. **36(1)**: pp. 9-15, 1994.
20. 吉村勲, 友田泰行: VDT 作業における疲労度評価に関する研究-休憩時間の長さの検討において. 人間工学. **31(3)**: pp. 215-223, 1995.
21. 藤井健生, 佐伯徹郎, 山口静馬: 無意味雑音存在下での単純計算作業時におけるうるささ・疲労感および作業成績. 人間工学. **37(1)**: pp. 19-28, 2001.
22. 山本撰, 梅村守: 動的筋作業が精神的疲労に与える影響. 人間工学. **35(1)**: pp. 35-39, 1997.
23. 石橋基範, 土居俊一: 向性と精神的負荷が精神疲労に及ぼす影響. 人間工学. **45(1)**: pp.19-28, 2008.
24. 伊藤謙治, 圓川隆夫, 秋庭雅夫: 視覚認知作業におけるチャンネル・キャパシティの減衰に基づいた精神疲労測定方法. 人間工学. **25(2)**: pp. 87-100, 1989.
25. 下野太海, 大須賀美恵子, 寺下裕美: 心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討. 人間工学. **34(3)**: pp. 107-115, 1998.
26. 植竹篤志, 村田厚生: 事象関連電位から抽出された特徴パラメータに基づく精神疲労評価の試み. 人間工学. **38(4)**: pp. 187-195, 2002.
27. Murata A, Uetake A, Takasawa Y: Evaluation of mental fatigue using feature parameter extracted from event-related potential. International Journal of Industrial Ergonomics. **35(8)**: pp. 761-770, 2005.
28. 八谷百合子, 泉博之, 大貝晴俊, 森晃爾: 独立成分分析を用いた VDT 作業時の疲労関連信号抽出方法の検討. 産業医科大学雑誌. **31(3)**: pp. 265-279, 2009.
29. Ahsberg E, Gamberale F, Gustafsson K: Perceived fatigue after mental work: an experimental evaluation of a fatigue inventory. Ergonomics. **43(2)**: pp. 252-268, 2000.
30. 山田晋平, 三宅晋司: 長時間暗算の生理指標,主観指標,作業成績におよぼす影響. 産業医科大学雑誌. **29(1)**: pp. 27-38, 2007.
31. 横山和仁, 荒記俊一: 日本版 POMS 手引, 金子書房, 東京, 1994.
32. Sandra G.H. Lowell E.S.: Development of NASA-TLX (TASK Load Index): results of experimental and theoretical research. Advances in Psychology. **52**: pp.139-183, 1988.
33. 三宅晋司, 神代雅晴: メンタルワークロードの主観的評価法 NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案. 人間工学. **29(6)**: pp. 399-408, 1993.
34. 久保智英, 城憲秀, 武山英麿, 榎原毅, 井上辰樹, 高西敏正, 荒薦優子, 村崎元五, 井谷徹: 「自覚症しらべ」による連続夜勤時の疲労感の表出パターンの検討. 産業衛生学雑誌. **50(5)**: pp. 133-144, 2008.

35. 酒井一博. 日本産業衛生学会産業疲労研究会撰「自覚症しらべ」の改訂作業 2002. 労働の科学. **57(5)**: pp. 295-298, 2002.
36. 城憲秀. 新版「自覚症しらべ」の提案と改訂作業経過. 労働の科学. **57(5)**: pp. 299-304, 2002.
37. 井谷徹: 新版「自覚症しらべ」の活用法. 労働の科学. **57(5)**: pp. 305-308, 2002.
38. 労働基準局安全衛生部労働衛生課: 労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリストの公開について. 〈<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2003/05/dl/h0520-3a.pdf>〉 [ accessed November 30, 2013]
39. 中尾睦宏: 職場のメンタルヘルス 情報サービス業従事者における過重労働が心理・行動・身体面に及ぼす影響. 日本心療内科学会誌. **9**: pp. 141-145, 2005.
40. 越河六郎, 藤井亀: 労働と健康の調和 CFSI (蓄積的疲労兆候インデックス) マニュアル. 労働科学研究所出版部, 東京, 2002.
41. 厚生労働省労働基準局長: 過重労働による健康障害防止のための総合対策について 基発第 0212001 号. 〈<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2003/05/dl/h0520-3c.pdf>〉 [ accessed November 30, 2013]
42. 梶木修身: 疲労の定量化法. 医学のあゆみ. **204(5)**: pp. 377-380, 2003.
43. Tajima, S, Sasabe, T, Watanabe, Y: Central nervous system fatigue alters autonomic nerve activity. Life Sciences. **84(7-8)**: pp. 235-239, 2009.
44. 金海燕, 勝浦哲夫, 岩永光一, 下村義弘, 杉浦康司, 堀口明伯: 情報認知作業の精神負担及び作業成績に及ぼす不警報混在の影響. 日本生理人類学. **11(1)**: pp. 7-12, 2006.
45. 鈴木伸一, 熊野宏昭, 坂野雄二: ストレス対処過程における effort-distress 次元が心理・生理的反応に及ぼす影響. 心身医学. **38(8)**: pp. 597-605, 1998.
46. 曾我知絵, 三宅晋司, 和田親宗: 計算課題遂行における自律神経系指標の変化. 人間工学. **45(5)**: pp. 294-302, 2009.
47. Togo F, Takahashi M: Heart Rate Variability in Occupational Health - A Systematic Review. Industrial Health. **47**: pp. 589-602, 2009.
48. 南谷晴之, 林佐千男, 永田隆信: ストレス・疲労にともなう心拍変動:ニューラルネットによる自律神経活動の評価. 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティックス. **98(672)**: pp. 115-122, 1999.
49. 山口浩二, 笹部哲也, 田島世貴, 渡辺恭良: 疲労の生理学的測定:加速度脈波. 医学のあゆみ. **228(6)**: pp. 646-653, 2009.
50. 山口浩二, 田島世貴, 渡辺恭良: 特異な睡眠障害 慢性疲労症候群. Clinical Neuroscience. **27(2)**: pp. 186-187, 2009.
51. 林佐千男, 南谷晴之, 申健洙: 蓄積疲労による心拍変動の自律神経指標の評価. 第 11 回生体・生理工学シンポジウム論文集. 計測自動制御学会, pp.397-400, 1996.
52. 林佐千男, 南谷晴之, 申健洙: 蓄積疲労による心拍変動の自律神経指標の評価 (第 2 報). 第

- 12 回生体・生理工学シンポジウム論文集. 計測自動制御学会, 東京, pp. 213-216, 1997.
53. 堀礼子: 過重労働による健康障害へのアプローチ. 心身医学. **50(7)**: pp. 635-639, 2010.
54. Hirsch J. A, Bishop B: Respiratory sinus arrhythmia in humans: How breathing pattern modulates heart rate. *American Journal of Physiology*. **241(4)**: pp. H620-629, 1981.
55. Saito K: Measurement of Fatigue in Industries. *Industrial Health*. **37(2)**: pp. 134-142, 1999.
56. Nicolson NA, Van Diest R: Salivary cortisol patterns in vital exhaustion. *Journal of Psychosomatic Research*. **49(5)**: pp. 335-342, 2000.
57. 永岑光恵, 室田真男, 清水康敬: 暗算課題遂行中における唾液中コルチゾールと心拍数を用いた心理変数の評価. 電子情報通信学会技術研究報告 ET 教育工学 **101(706)**: pp. 157-164, 2002.
58. Yamaguchi. M, Deguchi. M, Wakasugi. J, Ono S, Takai. N, Higashi. T, Mizuno Y: Hand-held monitor of sympathetic nervous system using salivary amylase activity and its validation by driver fatigue assessment. *Biosensors & Bioelectronics*. **21(7)**: pp. 1007-1014, 2006.
59. Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S and Piccaluge E. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *American Heart Association*. **59(2)**: pp. 178-193, 1986.
60. 大須賀美恵子: 生理実験入門 第4回 自律神経系の指標の計測. ヒューマンインタフェース学会誌. **7(4)**: pp. 285-290, 2005.
61. Clark RA, Bryant AL, Pua Y, McCrory P, Bennell K: Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance. *Gait & posture*. **31(3)**: pp. 307-310, 2010.
62. 中尾睦宏: 職場のメンタルヘルス 情報サービス業従事者における過重労働が心理・行動・身体面に及ぼす影響. 日本心療内科学会誌. **9**: pp. 141-145, 2005.
63. 出村慎一, 北林保, 野田政弘: 健常者のための重心動揺測定とその評価. 教育医学. **51(3)**: pp. 223-233, 2006.
64. 鈴木淳一, 松永喬, 徳増厚二, 田口喜一郎, 渡辺行雄: 重心動揺検査の Q&A, 手引き(1995). *Equilibrium research*. **55(1)**: pp. 64-77, 1996.
65. 梶本修身: 疲労の生化学的バイオマーカー (血液, 尿) . 医学のあゆみ. **228(6)**: pp. 659-663, 2009.
66. Turner. JR, Hewitt. JK, Morgan. RK, Sims. J, Carrol. D, Kelly. KA: Graded mental arithmetic as an active psychological challenge. *International Journal of Psychophysiology*. **3(4)**: pp. 307-309, 1986.

67. 三宅晋司: 実験室実験用主観指標と精神課題プログラム S.I.M.P.L.E.について. 日本人間工学会第 43 回大会抄録集. 日本人間工学会, pp.332-333, 2002.
68. 自律神経機能検査 第 4 版. 文光堂, 東京, pp.2, 2007.
69. 中村英夫, 塩見玲雄: 回路モデルによる心電図測定のための容量結合性電極形状の検討. 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス. **110(120)**: pp.27-30, 2010.
70. 安田翔太, 棒谷英法, 小林裕之, 大須賀美恵子, 飯田就, 栗谷川幸代, 景山一郎: 容量結合型電極を用いたドライバの心拍情報計測. 自動車技術会 学術講演会前刷集. **12(35)**: pp.5-8, 2012.
71. 棒谷英法, 小林裕之, 大須賀美恵子, 飯田就, 栗谷川幸代, 景山一郎: 容量結合型電極を用いたドライバの心拍情報計測 (第 2 報). 自動車技術会 学術講演会前刷集. **12(94)**: pp.1-4, 2012.
72. 棒谷英法, 小林裕之, 大須賀美恵子, 栗谷川幸代, 景山一郎, 伊藤生佳, 杉山慎二: 容量結合型電極を用いたドライバの心拍情報計測 (第 3 報). 自動車技術会 学術講演会前刷集. **13(88)**: pp.5-8, 2013.
73. 植野彰規, 塩谷祐希, 石山陽事: ホームヘルスケアのための寝具組込型非接触心電図モニタの基礎的検討. 電気学会論文誌 C. **127(10)**: pp.1792-1799, 2017.
74. 富田豊, 狩生咲, 牛場潤一: 非接触心電計測とその応用. 電子情報通信学会技術研究報告 MBE. **108(10)**: pp.33-35, 2008.
75. 松田敏之, 伊藤雄太, 野村圭居, 牧川方昭: 静電容量型電極による運転中の心拍変動の非接触計測. 第 23 回生体・生理工学シンポジウム論文集. pp.233-236, 2008.

## 付録

### 自覚症しらべ

回答時点の疲労に関連する自覚症状を問う質問紙である。5群からなり各群5項目、計25項目からなる。各群の質問項目は以下の通りである。

I群 ねむけ感：ねむい、横になりたい、あくびがでる、やる気がとぼしい、全身がだるい

II群 不安定感：不安な感じがする、ゆううつな気分だ、おちつかない気分だ、いらいらする、考えがまとまりにくい

III群 不快感：肩がいたい、頭がおもい、気分がわるい、頭がぼんやりする、めがいがする

IV群 だるさ感：腕がだるい、腰がいたい、手や指がいたい、足がだるい、肩がこる

V群 ぼやけ感：目がしょぼつく、目がかれる、目がいたい、目がかわく、ものがぼやける

自覚症しらべ					
					No.
氏名	_____ (男・女 _____ 歳)				
記入日・時刻	_____ 月 _____ 日	午前・午後	_____ 時 _____ 分	記入	
<p>いまのあなたの状態についてお聞きします。つぎのようなことについて、どの程度あてはまりますか。すべての項目について、1「まったくあてはまらない」～ 5「非常によくあてはまる」までの5段階のうち、あてはまる番号1つに○をつけてください。</p>					
	まったくあてはまらない	わずかにあてはまる	すこしあてはまる	かなりあてはまる	非常によくあてはまる
1 頭がおもい	1	2	3	4	5
2 いらいらする	1	2	3	4	5
3 目がかわく	1	2	3	4	5
4 気分がわるい	1	2	3	4	5
5 おちつかない気分だ	1	2	3	4	5
6 頭がいたい	1	2	3	4	5
7 目がいたい	1	2	3	4	5
8 肩がこる	1	2	3	4	5
9 頭がぼんやりする	1	2	3	4	5
10 あくびがでる	1	2	3	4	5
11 手や指がいたい	1	2	3	4	5
12 めまいがする	1	2	3	4	5
13 ねむい	1	2	3	4	5
14 やる気がとぼしい	1	2	3	4	5
15 不安な感じがする	1	2	3	4	5
16 ものがぼやける	1	2	3	4	5
17 全身がだるい	1	2	3	4	5
18 ゆうつな気分だ	1	2	3	4	5
19 腕がだるい	1	2	3	4	5
20 考えがまとまりにくい	1	2	3	4	5
21 横になりたい	1	2	3	4	5
22 目がかれる	1	2	3	4	5
23 腰がいたい	1	2	3	4	5
24 目がしょぼつく	1	2	3	4	5
25 足がだるい	1	2	3	4	5

日本産業衛生学会産業疲労研究会, 2002年

## 蓄積的疲労兆候インデックス

一過性の疲労ではなく、蓄積的な疲労を対象とした質問紙である。質問はある期間に亘って感じる、またはときおり感じる疲れに関連する心身の違和感についての体験の有無を問う形式になっている。8つの特性に分類される全81項目の質問からなる。8つの特性とその特性の質問項目の一部を以下に示す。

気力の減退（9項目）：根気が続かない、動くのがおっくうである、仕事が手につかない

一般的疲労感（10項目）：全身の力がぬけたようになることがある、しばしば目まいがする、腰が痛い

身体不調（7項目）：このところ食欲がない、このところ頭が重い、胃・腸の調子がわるい

イライラの状態（7項目）：ちょっとしたことでもすぐにおこりだすことがある、気がたかぶっている、なんというかイライラする

労働意欲の低下（13項目）：やっている仕事が短調すぎる、いろいろなことが不満だ、毎日出勤するのが大変つらい

不安感（11項目）：心配ごとがある、理由もなく不安になることがときどきある、なんとなく落ち着きがない

抑うつ感（抑うつ状態）（9項目）：生きていてもおもしろいことはないと思う、一人きりでいたいと思うことがある、自分がいやでしょうがない

慢性疲労兆候（8項目）：このところ毎日眠くてしょうがない、このごろ全身がだるい、くつろぐ時間がない

## 労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト

労働者自身が疲労度を把握して健康管理を行うためのツールとして、簡便に疲労の蓄積度を自己診断できるものとして開発されたチェックリストである。自覚症状に関する13項目と勤務状況に関する7項目からなる。

### 労働者の疲労蓄積度自己診断チェックリスト

記入年月日 \_\_\_\_\_年\_\_月\_\_日

**1. 最近1か月間の自覚症状について、各質問に対し最も当てはまる項目の口に✓を付けてください。**

1. イライラする	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
2. 不安だ	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
3. 落ち着かない	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
4. ゆううつだ	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
5. よく寝れない	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
6. 体の調子が悪い	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
7. 物事に集中できない	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
8. することに間違えが多い	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
9. 仕事中、強い眠気に襲われる	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
10. やる気が出ない	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
11. へとへとだ (運動後を除く)	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
12. 朝、起きた時、ぐっすりした疲れを感じる	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)
13. 以前とくらべて、疲れやすい	<input type="checkbox"/> ほとんどない (0)	<input type="checkbox"/> 時々ある (1)	<input type="checkbox"/> よくある (3)

<自覚症状の評価> 各々の答えの ( ) 内の数字を全て加算してください。 **合計**  点

<b>I</b>	0～3点	<b>II</b>	4～7点	<b>III</b>	8～14点	<b>IV</b>	15点以上
----------	------	-----------	------	------------	-------	-----------	-------

**2. 最近1か月間の勤務の状況について、各質問に対し最も当てはまる項目の口に✓を付けてください。**

1. 1か月の時間外労働	<input type="checkbox"/> ない又は適当 (0)	<input type="checkbox"/> 多い (1)	<input type="checkbox"/> 非常に多い (3)
2. 不規則な勤務 (予定の変更、突然の仕事)	<input type="checkbox"/> 少ない (0)	<input type="checkbox"/> 多い (1)	—
3. 出張に伴う負担 (頻度・拘束時間・時差など)	<input type="checkbox"/> ない又は小さい (0)	<input type="checkbox"/> 大きい (1)	—
4. 深夜勤務に伴う負担 (★1)	<input type="checkbox"/> ない又は小さい (0)	<input type="checkbox"/> 大きい (1)	<input type="checkbox"/> 非常に大きい (3)
5. 休憩・仮眠の時間数及び施設	<input type="checkbox"/> 適切である (0)	<input type="checkbox"/> 不適切である (1)	—
6. 仕事についての精神的負担	<input type="checkbox"/> 小さい (0)	<input type="checkbox"/> 大きい (1)	<input type="checkbox"/> 非常に大きい (3)
7. 仕事についての身体的負担 (★2)	<input type="checkbox"/> 小さい (0)	<input type="checkbox"/> 大きい (1)	<input type="checkbox"/> 非常に大きい (3)

★1: 深夜勤務の頻度や時間数などから総合的に判断して下さい。深夜勤務は、深夜時間帯 (午後10時～午前5時) の一部または全部を含む勤務を言います。

★2: 肉体的作業や寒冷・暑熱作業などの身体的な面での負担

<勤務の状況の評価> 各々の答えの ( ) 内の数字を全て加算してください。 **合計**  点

<b>A</b>	0～2点	<b>B</b>	3～5点	<b>C</b>	6～8点	<b>D</b>	9点以上
----------	------	----------	------	----------	------	----------	------

※ このチェックリストは疲労の蓄積を自覚症状と仕事の側面から評価し、その負担度を見えています

## 日本語版 POMS

回答時の気分を 6 つの尺度で評価する質問紙である。

緊張-不安 (9 項目) : 気がはりつめる, 不安

抑うつ-落込み (15 項目) : ゆうつだ

怒り-敵意 (12 項目) : 怒る, すぐけんかしたくなる

活気 (8 項目) : 生き生きする

疲労 (7 項目) : ぐったりする

混乱 (7 項目) : 頭が混乱する



## 略語表

ATMT	Advanced Trail Making Test	視覚探索課題の一種
CoG	Center of Gravity	重心動揺
CV <sub>R-R</sub>	Coefficient of Variation of R-R interval	R-R間隔変動係数
D.A.	Number of days of agreement	外的基準に当てはまる日と提案手法により検出された日とが一致した日数
E	Expectation Value	期待値
ECG	Electrocardiogram	心電図
FFT	Fast Fourier Transform	高速フーリエ変換
GR-HF	Gravity-High Frequency component	重心の振幅スペクトルの0.08~0.15 Hz帯域の周波数成分
GR-LF	Gravity-Low Frequency component	重心の振幅スペクトルの0.15~0.5 Hz帯域の周波数成分
HF	High Frequency component	自律神経系指標に含まれる0.15~0.5Hz帯域の周波数成分
HR	Heart Rate	心拍数
HRV	Heart Rate Variability	心拍変動解析
HRV-HF	Heart Rate Variability - High Frequency component	自律神経系指標に含まれる0.15~0.5Hz帯域成分
HRV-LF	Heart Rate Variability - Low Frequency component	自律神経系指標に含まれる0.08~0.16Hz帯域成分
LF	Low Frequency component	自律神経系指標に含まれる0.08~0.15Hz帯域成分
MF	Mid frequency component	自律神経系指標に含まれる0.08~0.12Hz帯域成分
MWSA	Mayer Wave related sinus arrhythmia	Mayer Wave由来の心拍変動
NASA-TLX	Task Load Index	アメリカ航空宇宙局で開発されたメンタルワークロードの主観的評価尺度
POMS	Profiles of Mood States	気分に関する質問紙
PTG	Plethysmogram	光電式指尖容積脈波
PTT	Pulse Transit Time	脈波伝達時間
RF	Respiratory frequency component	自律神経系指標に含まれる呼吸性周波数帯域成分
RSA	Respiratory sinus arrhythmia	自律神経系指標に含まれる呼吸性不整脈に由来する周波数帯域成分
RSP	Respiration	呼吸
RSP-A	Resp Amplitude	呼吸の振幅
RSP-A <sub>SD</sub>	Resp Amplitude standard deviation	呼吸の振幅の標準偏差
RSP-P	Resp Period	呼吸の周期
RSP-P <sub>SD</sub>	Resp Period standard deviation	呼吸の周期の標準偏差
sAA	saliva Amylase Activity: sAA)	唾液中のアミラーゼ活性
SCL	Skin Conductance Level	皮膚電気伝導水準
SDST	Sequential Digit Search Test	数値探索テスト
SFF	Subjective Feelings of Fatigue	自覚症しらべ
TBF	Tissue Blood Flow	鼻尖部皮膚組織血流量
TBV	Tissue Blood Volume	鼻尖部皮膚組織血流量
T-P	Total Power	心拍変動の総パワー値
VAS	Visual Analogue Scale	主観評価の方法の一種

## 業績

### 論文

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 蓄積疲労兆候検出システムの現場での運用. 投稿準備中 (第5章)

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 精神疲労を評価する指標の探索. 人間工学. **48(6)**: pp. 295-303, 2012. (第2章)

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 過重労働対策のための蓄積疲労の簡便な検出手法. 生体医工学. **50(6)**: pp. 552-563, 2012. (第3,4章)

Miyake S, Yamada S, Shoji T, Takae Y, Kuge N, Yamamura T: Physiological responses to workload change. *Applied Ergonomics*. **40(6)**: pp. 987-996, 2009.

山田晋平, 三宅晋司: 長時間暗算の生理指標, 主観指標, 作業成績におよぼす影響. 産業医科大学雑誌. **29(1)**: pp. 27-38, 2007.

### 国際学会発表

Yamada S, Miyake S, Ohsuga M: Evaluation of mental fatigue induced by mental arithmetic tasks. 17th World Congress on Ergonomics(CD-ROM). International Ergonomics Association. Beijing, 2009.

Yamada S, Fujimoto M, Shoji S, Miyake S: Effects of a wooden odor on task performance, mood and physiological parameters. Proceedings IEA2006 Congress (CD-ROM). International Ergonomics Association. Nederland, 2006.

### 国内学会発表

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 蓄積疲労の兆候を検出する簡便なシステムの開発 -労働現場での運用を通しての評価-. 日本人間工学会第54回大会講演集. 日本人間工学会, 千葉, pp. 218-219, 2013.

倉岡宏幸, 山田晋平, 三宅晋司: 異なる種類のローテーションによる作業成績と疲労感の検討. 日本人間工学会中国・四国支部九州・沖縄支部合同開催支部大会. 日本人間工学会, 下関, 2011.

山田晋平, 大須賀美恵子, 三宅晋司: 過重労働対策のための疲労蓄積兆候の簡易検出システムの開発. 第26回生体・生理工学シンポジウム論文集(CD-ROM). 計測自動制御学会, 滋賀, 2011.

山田晋平: 疲労兆候検出に関する検討. 日本人間工学会第51回大会講演集. 日本人間工学会, 札幌, pp. 492-493, 2010.

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 疲労の兆候を検出するシステムの検討. 生体医工学シンポジウム 2010(CD-ROM). 日本生体医工学会, 札幌, 2010.

山田晋平, 三宅晋司, 井上裕美子, 大須賀美恵子: 疲労の経時的な変化を捉えるシステムの検討: Wii ボードを用いた重心動揺の経時的測定. 第37回日本バイオフィードバック学会学術総会プロ

グラム・抄録集. 日本バイオフィードバック学会, 大阪, p. 39, 2010.

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 長時間暗算作業における精神的疲労の評価. 日本人間工学会第 50 回記念大会講演集. 日本人間工学会, 茨城, pp. 486-487, 2009.

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 精神疲労の評価 -精神負荷作業時の生理反応の変化-. 第 48 回生体医工学会大会プログラム・抄録集. 日本生体医工学会, 東京, p. 292, 2009.

山田晋平, 三宅晋司, 大須賀美恵子: 精神疲労に対する自律神経系指標反応パタンの個人差 -主成分分析を用いて-. 生体医工学シンポジウム 2009(CD-ROM). 日本生体医工学会, 千葉, 2009.

山田晋平, 吉積宏治, 川島正敏, 大久保堯夫, 三宅晋司, 東敏昭: 中高齢女性における個人特性と作業条件の違いが生理的指標および主観的作業負担に与える影響. 第 81 回日本産業衛生学会講演集(CD-ROM). 日本産業衛生学会, 札幌, 2008.

三宅晋司, 山田晋平: 異なる精神作業遂行中の生理反応および指標間の相関. 第 25 回日本生理心理学会大会. 日本生理心理学会, 札幌, p. 192, 2007.

山田晋平, 三宅晋司: 精神作業負荷時における生理指標の多次元的解析. 第 25 回日本生理心理学会大会. 日本生理心理学会, 札幌, p. 128, 2007.

三宅晋司, 庄司卓郎, 山田晋平, 高江康彦, 久家伸友, 山村智弘: 精神作業に対する生理反応の多次元的評価. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集(CD-ROM). ヒューマンインタフェース学会, 岡山, 2006.

山田晋平, 三宅晋司: 長時間暗算時の生体反応. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集(CD-ROM). ヒューマンインタフェース学会, 岡山, 2006.

山田晋平, 三宅晋司: 暗算作業に伴う疲労が生体指標に与える影響. 日本人間工学会第 47 回大会講演集. 日本人間工学会, 大阪, pp. 164-165, 2006.