

第 8 章 総括

高度情報化社会の中，経済不況などのストレス因子により，うつ病などのストレス関連疾患が急増している[1]．ストレス関連疾患は長期にわたる休職や過労死などとの関連性があり，ストレス関連疾患は精神疲労を伴っていることが多いと報告されている[2]．

過労死は，厚生労働省の労災補償請求件数[3]によると年間 800 件にもものぼっており，過労自殺とともに社会問題となっている．よって，過労死の予防の観点からストレス関連疾患に陥らないために，精神疲労を予防することは重要であり，そのためには，精神疲労の状態を評価することが必要である．

一般的に，労働の場における精神疲労の評価は主観的側面，さらには生理的側面および他覚的側面の三側面からのデータを総合的に検討して評価する方法が採用されているが，その確かな評価法は確立されていない．従来は主に質問調査票および問診票などによって，主観的疲労が把握されている．問診票は，疲労の高まりの自覚症状を表現することによって，調節機能の維持の限界を知らせる警告と言われている．より早く疲労に反応を示す生体信号より疲労を示し，総合的に評価を行える，精神疲労の定量的な評価方法の確立が求められている．

本研究は，その解決手法を提案するもので，精神疲労の定量的な評価方法の確立を行うために，主観的な疲労感を数字で示す視覚的アナログ尺度 (Visual analog scale VAS) を「疲労度」と定義し，疲労の情報を含んでいるいくつかの生体信号を組み合わせることで，生体信号より視覚的アナログ尺度の「疲労度」を自動的に定量的に推定する工学的評価方法を構築し，さらに実用化に向けて評価手法を取り入れた「疲労度ソフトセンサ」を開発した．

まず，研究の対象を決めるために疲労の特性について検討した．疲労は，急性期，亜急性期，慢性期と経過をたどる．また疲労の種類は，精神疲労，肉体疲労，免疫学的疲労とある．本研究の対象をストレス関連疾患と関連が深い精神疲労の急性疲労期とした．また，生体を取り扱う疲労研究として，十分な実験方法についても検討し設定した．

つぎに，生体信号に疲労の情報が含まれているか検討するために，二元配置分散分析による検討を行い，疲労感が顕著に現れなくても生体への負担を増大させることを確認した．よって，測定した生体信号を疲労に関連する情報を得るための原信号とした．その上で，精神疲労の評価方法の構築として，統計的に独立な原信号に疲労に関する情報が含まれると推定し，VDT (Visual Display Terminals) 作業実験と暗算作業実験の生体信号より，独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) を用いて疲労に関連する信号を抽出した．疲労に関連する信号を抽出したことより，測定した生体信号には疲労情報を含んでいると判断した．

この結果に基づき，疲労情報を含んでいる生体信号から精神疲労の定量的な評価方

法を構築できる可能性がある」と推察し、精神疲労の数値化を目的に大規模データベースオンラインモデリング (Large-scale database-based Online Modeling: LOM) によって「疲労度」を推定する手法を構築した。これは、主観的な疲労感を数字で示す視覚的アナログ尺度を「疲労度」と定義し、疲労の情報を含んでいる生体信号より視覚的アナログ尺度の「疲労度」を自動的定量的に推定する手法である。この提案手法が実際の疲労度判定に適用できることを示した。さらに進んで、実用化に向けて、LOM による「疲労度」の推定手法を取り入れた「疲労度ソフトセンサ」を開発した。

開発した「疲労度ソフトセンサ」を使用して、急性疲労期の精神疲労の疲労度判定を行い、適用できることを示した。本論文は、その研究成果をまとめたもので、以下に本研究で得られた知見を各章ごとに要約して示す。

第 1 章は、序論であり、ストレス関連疾患と精神疲労の問題、精神疲労の定量的な評価方法の研究の必要性和研究対象について明らかにした。ストレス因子によるストレス関連疾患の急増とその影響による休・退職者の増加、過労死等の問題、ストレス関連疾患と精神疲労との関係について説明し、精神疲労の予防の重要性と精神疲労の定量的な評価方法の研究の必要性について述べた。疲労の予防という観点から、急性疲労期における精神疲労の評価方法を研究対象とした。

第 2 章は、精神疲労の評価方法に関する従来の研究と評価方法の考え方について説明し、精神疲労の評価方法に関する従来の研究と疲労状況下の生体情報を収集する実験の考え方について述べた。従来から、生体信号による疲労の定性的評価方法、生化学的方法、「自覚症しらべ」などの質問調査票および問診票などの評価方法がある。これらの評価方法を総合的に検討して評価する方法が採用されているが、その確かな評価方法は確立されていない。そこで、主観的な疲労の評価方法に加えて、いくつかの生体信号を組み合わせて精神疲労の定量的な評価方法を構築し、総合的に評価することを課題とした。また精神疲労の評価方法を研究する上で、作業負荷を与えた生体信号の測定が必要であり、作業負荷方法の選定、生体情報の選定と測定機器、被験者の選定について検討した。生体を取り扱う疲労研究として、十分な実験方法を設定して精神疲労の評価方法を行なうことを検討した。本研究では、ISO(国際標準化機構)10075[4]に準拠した課題作業による作業負荷を与えることを選択し、生体信号は、急性疲労に速く反応する自律神経系の前額部および鼻尖部の表面皮膚温度、心拍数または脈拍数、皮膚血流量、呼吸数の 5 項目とした。被験者の選定に当たっては、条件を統一することによって出来る限り個人差を排除して目的とする外的刺激に対応した生体信号を測定できる条件とした。

第 3 章は、生体信号データの分散分析による精神疲労の評価を検討するために、第 2 章で選定した作業負荷方法、生体信号項目、被験者の条件で VDT 作業実験を行った。VDT 作業に自己遂行能力に基づく一回当たりの平均所要時間値を作業指示時間とする規制作業を作業負荷条件として設定して、急性期の精神疲労を誘発させやすくした。

測定した生体信号を使用して標準実験および負荷実験の条件間と時間変化を 2 要因とする二元配置分散分析を行った。実験の結果、1) 作業量・ミス入力数より、負荷実験において、ミスの発生率が高く、疲労の発現に結びつくものと推察される、2) 標準実験負荷実験とも疲労感は顕著に出現していない、3) 心拍数、鼻尖部表面皮膚温度、皮膚血流量より、負荷実験において緊張や不安が持続した、4) 前額部表面皮膚温度の結果より、負荷作業が中枢系の活動を活発にすると考えられた、5) 疲労感が顕著に現れなくても生体への負担を増大させることが示唆され、本実験から得た生体信号を疲労に関する情報を得るための原信号とした。このことから、負荷実験では、たとえ自覚症状が現れなくても生体への負担を増大させていることより、生体信号から疲労に関する情報を得られる可能性があることを明らかにした。また、生体情報収集のため開発した VDT 作業ソフトは、企業でも実用された。

第 4 章は、独立成分分析による疲労に関連する信号の抽出について述べた。第 3 章より、生体信号から疲労に関する情報を得られる可能性があることから、VDT 作業実験で測定した生体信号を、疲労に関連する情報を得るための原信号とし、疲労は一定の作業を負荷し続けることにより、精神的負担に続いて発生し、作業成績や生理・心理機能の低下、特有の疲労感、行動の変化を伴い、休息により回復するという考え方に基づいて、作業負荷によって時間とともに漸増し、回復期に減少する独立成分を選び疲労に関連する信号とした。VDT 作業実験から収集した生体信号を使用し、疲労に関連する信号の抽出を試みた。また、暗算作業実験において、その被験者数を 10 人と増やし、一人の被験者に同じ条件で 4 回の計 40 回の実験を行った。その結果、1) VDT 作業実験では、全実験(16 回)中、18.8%(3 回)より、疲労に関連する信号を抽出した。疲労に関連する信号を抽出した実験の被験者は、疲労感を示しかつミス率が高かった。疲労感を示さなかったもしくはミス率が低かった実験からは疲労に関連する信号は抽出されなかった、2) 暗算作業実験では、全実験(40 回)中、72.5%(29 回)の結果より疲労に関連する信号を抽出した。この 29 回の内、疲労感を示した実験は 26 回であった。被験者 1 名につき 4 回の実験中、3 回以上疲労に関連する信号を抽出した被験者は、10 名中 7 名であり再現性を示した。疲労に関連する信号と実測の疲労感との相関係数は、0.635~0.993 と強い相関を示したことを明らかにした。よって、精神疲労の急性疲労期を対象として、生体信号の前額部および鼻尖部の表面皮膚温度、心拍数、皮膚血流量、呼吸数の 5 項目より、ICA を使用して疲労に関連する信号を抽出できることを明らかにすることにより、ICA により生体信号から疲労に関連する信号を抽出できる可能性をより具体的に示した。

第 5 章は、大規模データベースオンラインモデリングによる疲労度の推定について述べた。第 4 章で疲労に関連する信号が抽出できたことより、生体信号には疲労の情報を含んでいることが示唆され、疲労の情報を含んでいる生体信号より精神疲労を定量化できる可能性があると推察した。そこで、第 4 章で用いた 0~9 の数字で示す主観的な疲労感を視覚的アナログ尺度の「疲労度」と定義し、データベースに蓄積した過去の「生体信号」に

基づいた統計モデルによる「疲労度」の推定手法について検討した。第 4 章の実験データからデータベースを作成し、局所的にモデル構築を行う LOM の手法を使って「疲労度」を推定した。その結果、1) データベースに、暗算作業実験で得られた「生体信号」および「疲労度」を格納する。推定対象は現在の「疲労度」とした。データの入力変数は、変数ごとに時間を遅らせた変数を生成し、ステップワイズ法によって疲労度に対し寄与率(F 値)10 以上の変数を選択し、相空間の低次元化による計算負荷の低減を図る。「疲労度」の推定は、要求点データに類似した近傍データセットを検索し、局所重回帰モデルによって行う。「生体信号」(7453 点)から近傍データセットを抽出し、「疲労度」を推定した、2) 全 40 回の実験中、27 回は問診票の「自覚症しらべ」および「疲労感の変化」が疲労を示した。その内 17 回の実験は、「疲労度」の実測値と推定値の相関係数が 0.8 以上であった。これは、重回帰分析の相関係数が 0.1018 などと比べ、きわめて高かった、3) 全 40 回の実験中、問診票の「自覚症しらべ」および「疲労感の変化」が疲労を示した 27 回の実験の内、10 回の実験は、「疲労度」の実測値と推定値の相関係数が 0.8 未満であった。10 回の実験について検討したところ、要求点データと過去の近傍データセットとのユークリッド距離を「データ距離」(Similarity)と定義し、Similarity の大きい推定値は、推定誤差も大きく、近傍データが少なかった。また、Similarity が小さい推定値は、推定精度が高く、推定値の信頼度が高いことを明らかにした。これらの結果により、LOM により生体信号から「疲労度」の推定ができることを明らかにし、問診票の疲労感と生理的な生体信号からの「疲労度」を合わせて総合的に評価を行える新しい精神疲労の定量的な評価方法を構築した。

第 6 章は、実用化に向けて、第 5 章で構築した LOM による「疲労度」の推定手法を取り入れた「疲労度ソフトセンサ」を試作し、放射線科医師の画像診断作業中の「疲労度」を推定して、「疲労度ソフトセンサ」の推定性能を評価した。第 5 章で作成したデータベースを「疲労度ソフトセンサ」に格納し LOM によるシステムを構成し、放射線科医師の画像診断作業時の生体信号から、要求点データと設定情報を取得し、要求点データに類似した近傍データセットをデータベースから検索し、「疲労度」をグラフに表示した。放射線科医師が 20 歳代で、問診票の「自覚症しらべ」および「疲労感の変化」が疲労を示した 8 回の実験中 6 回(75.0%)は、「疲労度」の実測値と推定値の相関係数が 0.8 以上であった。要求点データと過去の近傍データセットとの Similarity も小さく、「疲労度」の推定が可能であることを示した。「疲労度ソフトセンサ」に格納したデータベースが 20 歳代の被験者の結果を使用しており、モデル構築に用いている要求点に類似した実質的なサンプル数が多かったと推察された。今後、データベースの拡張により推定精度の向上が見込まれ、「疲労度ソフトセンサ」の実用化が期待できる。

第 7 章は、疲労の研究、「疲労度ソフトセンサ」の実用化、「疲労度ソフトセンサ」を用いた疲労分析や疲労の予防・治療について、今後の展望を述べた。本研究では、これまで疲労の研究では行われなかった、疲労の情報を含んでいる生体信号より視覚的アナログ

尺度の「疲労度」を自動的定量的に推定する LOM による手法を構築し、LOM による推定手法を取り入れた「疲労度ソフトセンサ」を開発した。「疲労度ソフトセンサ」の実用化には、いくつかの課題がある。20 歳代の被験者の「疲労度」の推定は可能であるが、それ以外の年代の被験者にも適用する必要がある。データベースを拡張し、各年齢層の生体データをグループ化することより、「疲労度」を推定する前に適用年齢を選択して、被験者が属するデータベースから「疲労度」を推定する方法が上げられる。また、生体信号項目を簡素化し測定を簡易し、小型センサの開発や無線センサ化が望まれる。携帯電話などの身近な機器に実装し、活用範囲の拡大も実用化の課題である。これらの課題を解決することにより、「疲労度ソフトセンサ」は、脳画像を用いた疲労分析、過重労働の実態調査と過重労働対策の実施、疲労の治療や薬の開発、疲労の予防教育、疲労しやすい作業内容の改善などに役立つものと思われる。今後、この疲労度推定手法は、脳研究と共に発展することが期待される。

第 8 章は、本研究で得られた成果について示し、総括した。疲労には主観的要因も関わることから、個人差も大きく、その定量化は難しいと考えられてきた。従来は主に質問調査票および問診票などによって主観的疲労が把握され、生体信号より「疲労度」を推定する手法は報告されていなかった。本研究によって生体信号より「疲労度」を自動的定量的に推定する工学的評価方法を構築した。提案した LOM による「疲労度」の推定手法により、疲労感を示した実験の「疲労度」の実測値と推定値の相関係数が 0.8 以上であった。実用化を目指して開発した「疲労度ソフトセンサ」に格納したデータベースと同じ 20 歳代の被験者で疲労感を示した実験は、「疲労度」の実測値と推定値の相関係数が 0.8 以上であった。この成果は、主観的な側面を捉える問診票の疲労感と生理的な生体信号からの「疲労度」を合わせて総合的に評価を行える精神疲労の定量的な評価方法として、大いに役立つことと期待できる。今後は、LOM による疲労度推定手法の更なる推定精度の向上を行うことにより、「疲労度ソフトセンサ」を実用化できるように発展させ、今後の疲労研究に貢献できるものと思われる。

第 8 章参考文献

- [1] 久保千春, 吉原一文, “ストレス関連疾患と慢性疲労症候群”, 医学の歩み, Vol. 228, NO. 6, p. 687, 2009.
- [2] 田中喜秀, 脇田慎一, “ストレスと疲労のバイオマーカー”, 日本薬理学雑誌, Vol. 137, p. 185, 2011.
- [3] 厚生労働省労働基準局労災補償部補償課, “脳血管疾患及び虚血性心疾患等(「過労死」等事案)の労災補償状況”, 厚生労働省平成 21 年度広報資料, pp. 1

-12, 2011

[4] 芳賀繁, “メンタルワークロードの理論と測定”, 日本出版サービス, p. 36, 2001.