

視覚系疲労の少ないヒューマンインタフェース開発に向けた評価法の提案

木村 達洋^{†1} 早坂 明哲^{†1} 瀬川 典久^{†2},
山崎 清之^{†3} 村山 優子^{†2} 宮崎 正俊^{†4}

近年、インターネットの急速な普及にともないコンピュータが家庭にまで浸透し、VDT 作業時間が急激に増加したことで、子供の視力低下や疲労が問題化している。また、ゲームなど強力な動機づけによる長時間使用で健康を害し、極端な場合には死亡例も報告されている。そこでユーザの健康を守る衛生的観点から視覚系疲労を測定し、インタフェースを低負荷なものにする必要がある。本研究では、事象関連電位(ERP)を用いた視覚系疲労の客観的評価法を提案し、VDT 作業による視覚系疲労評価を試みた。ERP は視覚情報の脳内過程を反映する。このうち一次視覚野の反応である P100 成分と、標的を非標的から弁別する際に現れる P300 成分を指標とした。また、眼精疲労の指標として焦点調節能(近点)も計測した。その結果、視覚系疲労条件では、ERP の P100 の振幅は増大し、非標的による P300 の振幅は、標的の場合の振幅に近づき、弁別性の低下が見られた。この傾向は主観的な疲労感との相関が認められた。一方、ERP の振幅や潜時と近点との相関は認められず、両者は独立な情報を含んでいると思われた。このことは眼調節系の疲労、認知機能の低下である中枢性疲労の 2 種類から構成されていることを示している。以上から、本方法を用いれば眼調節系と認知過程の 2 つの処理段階を考慮した視覚系疲労の評価が可能になると考えられた。

A Proposal on an Evaluation Method towards the Development of a Human Interface with Less Visual Fatigue

TATSUHIRO KIMURA,^{†1} YOSHIAKI HAYASAKA,^{†1}
NORIHISA SEGAWA,^{†2} KIYUYUKI YAMAZAKI,^{†3} YUKO MURAYAMA^{†2}
and MASATOSHI MIYAZAKI^{†4}

In order to obtain a guideline for designing low-workload Human Interface (HI). We investigated assessment of visual fatigue induced by performing an interactive task as a model of HI software on personal computers utilizing measurement of Event Related Potentials (ERP) and accommodation. The ERP were measured in this study before and after a visual target detection task in healthy adult participants to assess visual fatigue of the central nervous system. As an index of accommodation, the ophthalmic near point was also measured using an accomodometer. As the experimental task, participants were instructed to click designated targets from a randomly arranged matrix of characters for one hour. All participants reported symptoms of visual fatigue after the task. From the averaged ERP waveform, P100 and P300 components were detected and their amplitudes and peak latencies were analyzed. Amplitude of the P100 component measured after performing the task was larger than that in the control condition. Near points after the task increased in comparison with those before the task. Results indicated that visual fatigue by the experimental task evoked both eye-strain and altered function of the primary visual cortex. Feasibility of applying the present method to a low-workload software development is discussed.

†1 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究所
Graduate School of Software and Information Science,
Iwate Prefectural University

†2 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
Faculty of Software and Information Science, Iwate
Prefectural University

†3 東海大学開発工学部
Department of Bio-Medical Engineering, School of
High-Technology for Human Welfare, Tokai University

†4 情報技術総合研究所
Digitally Advanced Integrated Solution Laboratories

1. はじめに

近年、インターネットの急速な普及にともないコンピュータが家庭にまで浸透し、VDT 作業の時間が急激に増加したことにより、視力低下や疲労が問題化し

Ltd.

現在、東北大学大学院情報科学研究科

Presently with Graduate School of Information Science,
Tohoku University

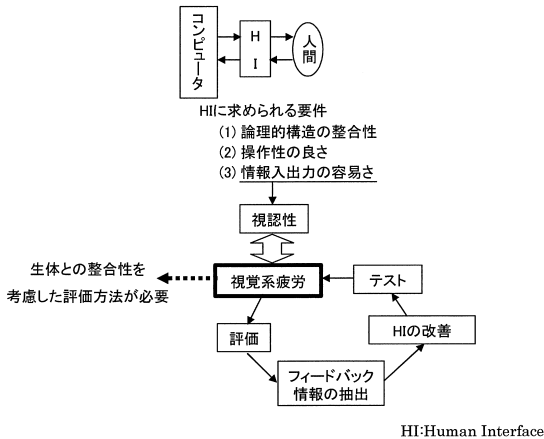


図1 生体負担の客観的評価を組み込んだ低負荷 HI の開発手順モデル

Fig. 1 A model of the low-workload HI development procedure incorporating objective evaluation based on biomedical information analysis.

ている^{1)~5)}。また、コンピュータゲームのように強力な動機づけによる長時間使用で健康を害し、極端な場合には死亡例も報告されている⁶⁾。これからはコンピュータ利用に関し、ユーザの健康を守るための衛生的観点からの研究が必要である。コンピュータと操作者の相互作用を円滑にするための視点から生理学的指標を利用した研究も行われるようになってきている⁷⁾。

以上のような観点から、ヒューマンインタフェース (HI) を合理的に設計するためのガイドラインが求められている⁸⁾。優れた HI の要件としては、① 構造が作業内容に整合していること、② 操作性が良いこと、③ 情報入出力に際して負担が少ないこと、などがあげられる。情報の入力には操作者のキーやマウスによる動作であり、出力は操作者に対する表示である。一般のコンピュータ操作においては、視覚情報の提示は最も重要なチャネルであるといえよう。操作者に負担の少ないシステムを開発するためには、VDT 作業中の視覚系疲労を客観的に測定し、コンピュータの HI に反映させることが重要である⁹⁾。このような本研究のコンセプトを図 1 に示した。

本論文では、HI 操作における操作者への負荷として、視覚情報提示すなわち表示の視認性を重視し、視覚系への負担を人工的に生じさせる負荷課題を用いた実験的検討を行った。負荷課題により操作者に生じた負担 (視覚系疲労) を脳波の視覚入力による誘発成分である事象関連電位 (Event Related Potentials: ERP) を用いて測定した。

視覚系疲労の蓄積は VDT 症候群を引き起こし、頭

痛やめまい、肩こりを誘発する原因でもある。視覚情報処理過程の評価の際には眼調節過程、高次認知過程、反応過程の 3 段階を想定することができる。したがって、VDT 症候群も負担となる処理段階によって複雑な様相を呈するはずであり、視覚情報処理過程の各段階に対応した検討が必要である¹⁰⁾。

これまでの視覚系の疲労の測定方法として、点滅した光を目視させ、これが点滅光として見えるか一様な連続光として見えるかの境界を答えさせる Critical Flicker Frequency (CFF)¹¹⁾ のように、計測手順に主観的な要素を多く含み、視覚情報処理過程全般を計測しているものや、視力や眼調節能の測定のように感覚器官の機能、すなわち眼調節系を中心とした機能低下を測定する方法が用いられてきた。また、近点距離や調節緊張時間、弛緩時間の反復測定値の変動パターン、赤外線オプトメータを用いた調節運動の精密な記録による方法も広く行われている^{12),13)}。視覚情報は眼球から脳に送られ記憶項目との比較や意思決定などの認知的な処理がなされることを考えると、視覚作業による負荷は大脳皮質においても何らかの変化を生じさせていると考えられ、ここでの変化をとらえることで視覚情報処理過程における中枢処理段階、とりわけ高次の認知的処理過程の機能低下を客観的に検討できる可能性が考えられる。

そこで、本研究では ERP を用いた視覚系疲労の客観的な評価方法を検討した。ERP は、視覚情報の入力段階から中枢処理までの機能を反映していると考えられ、特に P300 成分は高次の認知過程を反映するとされている。これにあわせて焦点調節能を計測することで、視覚系の負担をより詳細な段階に分割して検討できると考えられる。ここでは、眼精疲労に限定せず、高次認知過程を含む視覚情報処理に生じる機能低下を総合的にとらえて「視覚系疲労」と呼ぶことにする。

視覚系疲労を ERP を用いて評価することは、これまで行われてきた非拘束、無侵襲の眼精疲労評価に比べて、頭部に電極を装着しなければならぬという問題が生じる。しかし、これに引き比べて認知過程の状態変化を他覚的に検討できる点は大きな利点でもある。ERP は微細な心理過程の研究に広く世界中で用いられてきたこと、本研究ではごく少数の電極しか用いないことなどから、電極装着そのものの被験者への影響は少ないと考えられる。

本論文では ERP および近点計測による方法で、HI 操作に起因する視覚系疲労の評価とその有効性を検討する。以下、2 章では ERP を用いた研究法とその意義について説明し、本研究方法との関連を示す。3 章

では焦点調節のうち近点計測の方法と意義について説明する．さらに，4章では本研究で行った実験方法について説明し，5章で結果を，6章でERPおよび近点計測結果の解釈とそれらのHI開発へのフィードバックに関する問題について論じる．なお，7章に本研究のまとめを示す．

2. 事象関連電位 (ERP)

人間の高次な精神活動の基盤は脳の表面にある大脳皮質であり，その機能はきわめて多数（全体で100億以上）の神経細胞のネットワークによって実現している．大脳皮質の各部位は感覚情報の処理，認知と記憶，運動発現などと深く関連し，情報処理にもなって神経細胞ネットワークが複雑な電気的活動を生じさせる．被験者の頭皮上に電極を装着して高感度増幅器で電位を計測すると，絶え間なく変動する時系列波形が観測できる．これが脳波である．電極は直径約10mmの皿型銀-塩化銀電極が用いられ，そこから観測される脳波は，電極直下の大脳皮質における神経細胞ネットワークの集成的活動を反映していることが分かっている．

ERPは感覚刺激，視覚の場合では閃光刺激やパターン反転刺激などを与えることで誘発される脳波の反応成分の一種である¹⁴⁾．誘発脳波は自発脳波に比べて振幅が小さいため，多数回刺激し，刺激時点を経験原点としてそろえ数十回程度の加算平均処理を行うことでS/N比を改善させ波形を推定するのが一般的である．ERPは刺激視野や刺激強度により，様々な陽性，陰性のピークを持つ．本研究においては，刺激後100ms以降に現れる陽性のピーク（P100）と，300ms以降に現れる陽性のピーク（P300）の計測を行い，ピークの振幅（amplitude）と刺激時点からピークが現れるまでの時間である潜時（latency）を求めた．

P100は一次視覚野における初期反応とされ，刺激に対する注意レベルを反映している¹⁵⁾．P300はオドボール課題（付録参照）とよばれる出現確率の異なる刺激を弁別させる課題を行わせ，刺激の種類ごとに選択的に加算平均処理を行うことで観測することができる．この成分はERPの中でも後期陽性成分とよばれるものの1つであり，入力情報と記憶項目の照合やこれともなう選択的注意，反応選択過程などと関連した測度である．たとえば刺激条件として高頻度刺激と低頻度刺激を用意し，両者をランダムな順序で逐次提示する．低頻度刺激を認めたら，ただちにボタンを押させるなどの課題を用いるのが，典型的なオドボール課題である．この場合の高頻度刺激を非標的（Non-target），低頻度刺激を標的（Target）とよんでいる．

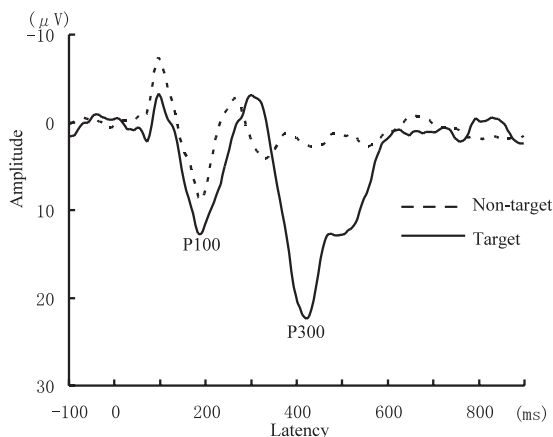


図2 ERP波形の例

Fig. 2 Example of ERP waveform.

図2に本研究で得られる典型的なERP波形を示した．ERPの振幅および潜時は課題によって求められた刺激を弁別し反応を選択するプロセスを反映している¹⁶⁾．また，この作業に必要な短期記憶の照合における注意レベルも影響していると考えられている¹⁷⁾．

視覚系疲労が生じるとこれらの処理過程にも何らかの変化が生じERPの振幅や，潜時の変化が起きることが考えられる．関連研究として，Iwasakiらは1時間のVDT作業による視覚負荷を与え，閃光刺激によるERPを計測した．その結果P100の潜時が有意に延長し，振幅の変化には有意な差がないことを認めている¹⁸⁾．しかし，閃光刺激は刺激強度が大きいので，疲労による脳の状態の変化を検出できなかった可能性がある．また，より高次な脳の情報処理の状態を現していると考えられるP300成分についてはこれまで検討されてこなかった．

そこで，我々は誘発刺激としてチェッカーフラッグの反転刺激を用いた．これは，フラッシュのような強いエネルギーを必要とせずに効果的に誘発反応を観察できること，さらに刺激弁別作業を組み込むことでP300を観察でき，認知過程の疲労状態を観測できる利点があるからである．

3. 焦点調節能について

視覚作業により生じる疲労として，レンズの調節を行う毛様体筋の疲労による調節能の低下がある．近くの対象を見るときには毛様体筋が緊張してレンズを厚くする．逆に遠くを見る場合は毛様体筋が弛緩してレンズを薄くする．これらの焦点調節のメカニズムは疲労によって一時的に機能が低下する．このことを利用して眼精疲労の評価が行われてきている¹⁹⁾．眼と指標

の距離を変化させ被験者のキー押し反応を記録することができるアコモドメータと呼ばれる測定器を用い、視覚指標を被験者に覗かせてその距離を変化させ、焦点が合った状態で見える最も近い距離を測定する。これは近点と呼ばれ、疲労によって延長することが知られている。本研究では近点の機能的特長を利用して眼調節系における簡便な疲労評価項目と考えて採用した。

4. 実験方法

被験者に実験的に視覚系疲労を起こさせるための VDT 作業課題を行わせ、作業前後に ERP の計測を行った。また、まったく同一のタイムスケジュールでアコモドメータによる焦点調節能を計測し、両者の関連性などから情報入力と中枢処理における視覚系疲労について特異的な検討を試みた。

4.1 被験者

視覚に異常のない健康成人 10 名 (男性 5 名, 女性 5 名, 19~26 歳) を被験者とした。

4.2 視覚系疲労課題

被験者に視覚系疲労を起こさせるため、文字検索作業を行わせた。コンピュータの CRT を被験者の眼球から約 30 cm になるように設置し、図 3 に示すような課題画面を表示した。画面には 8 ポイントと 9 ポイントのランダムなアルファベットを横 32 文字、縦 32 文字で表示し、画面左上に指示された 3 種類のアルファベットをマウスでクリックさせた。一度クリックした文字は文字色を薄くして区別できるようにし、どこまで作業を行ったか分かるようにした。被験者の頭部が動かないように顎のせ台を用いて固定すると同時に、位置関係の誤差を防ぐために頭部の位置を変えないで作業するように指示した。この作業を 1 セッション 5 分とし、12 セッション (計 60 分) 行わせた。

ただし、この疲労課題は被験者に目眩や嘔吐感、頭痛などの強度な身体負荷を与えるものではなく、日常生活における視覚系負荷に相当する範囲であることを被験者に口頭で説明し、あらかじめ了承を得た。また、被験者には万一重篤な症状が現れた場合には、すぐに作業を中止するように指示した。

4.3 焦点調節能計測

4.2 節に示した視覚系疲労課題を行わせる前後に、焦点調節能の指標である近点を計測した。NP アコモドメータ (興和製: KOWA NP) を用いて図 4 の実験スケジュールに示すように、課題前に 1 回、課題作業直後に 1 回、10 分おきに 2 回、さらに、20 分おきに 2 回の計測を行った。焦点調節能計測は、指標が近づいてきて焦点が合わなくなり見えにくくなった点を

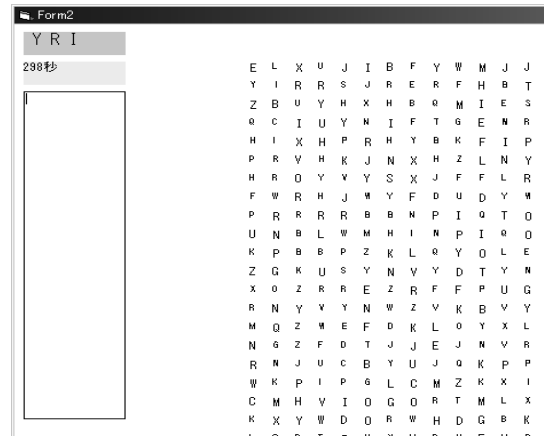


図 3 視覚系疲労の課題画面

Fig. 3 The experimental task for visual fatigue.

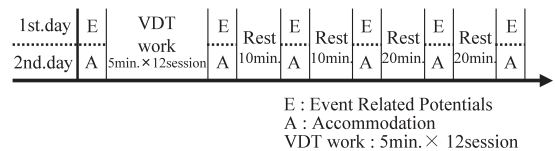


図 4 実験スケジュール

Fig. 4 Experimental schedule.

答えさせる消失近点と、指標が離れていき焦点が合っ て初めて見える点を答えさせる現出近点を計測した。これは眼球におけるレンズ厚を調節する毛様体筋の機能限界を示しており、眼精疲労と関連することが知られている¹⁹⁾。この計測をそれぞれの被験者につき 10 回ずつ計測し平均値を求めた。

本法で扱う NP アコモドメータは視覚系疲労課題実行中など動的過程の計測は不可能であるが、安価で計測が容易であることから採用した。

また、近点計測は主観判断をともなうため計測点がばらつくことが十分に考えられる。そこで、可能な限りばらつきを抑えるため、被験者には事前に近点計測に十分慣れる程度の練習を行わせた。さらに、再現性を確認するため、視覚系疲労課題前と同一の近点計測を後日もう一度行った。

4.4 ERP 計測

焦点調節能計測と ERP 計測を同時に行うと、時間が経過し測定中に視覚系疲労が回復してしまうのを避けるため、焦点調節能計測とは別の日に ERP の計測を行った。ERP 計測は焦点調節能計測時と同じように、同じ実験スケジュールで視覚系疲労課題を行わせる前後において計測した。

ERP は両耳を基準に、国際基準法 ten-twenty 法²⁰⁾による Cz , Pz から計測した。ERP 誘発刺激

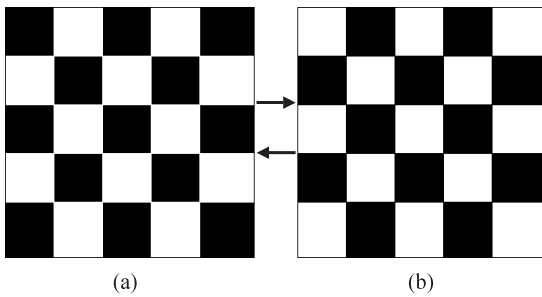


図5 ERP誘発刺激

Fig. 5 Pattern reversal stimulus for ERP measurement.

は図5に示すようなチェッカーフラッグ模様をコンピュータのCRT上に表示し、約2秒に1回の割合で図5の(A)から(B)へと反転させた。反転は100msもしくは200msでもとの(A)の状態に戻した。また、100msの反転と200msの反転は4:1の割合でランダムな順序とし、5分間計測した。このとき被験者には200msの反転が表示された回数を数えさせた。

P100は100msの反転刺激のときの脳波を、刺激開始時点に合わせて加算平均処理を行った(約120回)。また、P300は刺激弁別課題を行っているときに見られる波形であるので、200msの反転刺激のときの脳波を、刺激開始時点に合わせて加算平均処理を行った(約30回)。また、ERPの計測と同時に眼球運動(EOG)を計測した。EOGは眼球を動かしている筋肉の電気的活動状態を計測することにより眼球の動きを知ることができるものである。しかし、脳波に比べると電圧が大きいため、まれに計測脳波に混入してしまうことがある。そこで、EOGの水平、垂直成分を計測し、脳波にノイズとして混入している場合には加算平均処理を行うデータから取り除いた。さらに得られた波形から、P100、P300の振幅と潜時を求めた。

ERP、EOGは脳波計(日本電気三栄製:EEG1A94)を用い、電源ラインなどから測定計への電磁誘導を取り除く目的で静電シールドルーム内で計測し、デジタルデータレコーダ(TEAC製:DR-M3)により精度16ビットで記録した。

4.5 主観評価

視覚系疲労課題終了後、被験者に視覚系疲労について主観の状態を報告させた。被験者には視覚系疲労によって「眼が痛い」、「眼がちらつく」、「視点が定まらない」、「頭が重い」、「肩が凝る」などの症状が現れる²¹⁾ことを示したうえで、上記5項目につきほとんど疲れなかった場合を1、被験者が想定しうる最大の症状を10とし、10段階評定での数値を答えさせた。

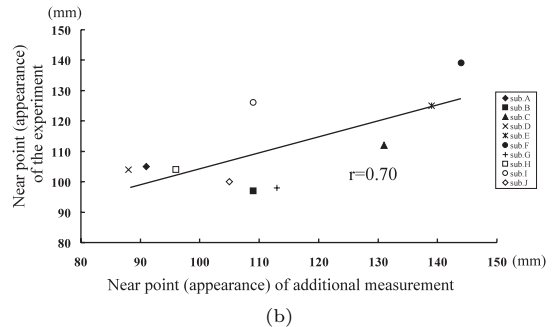
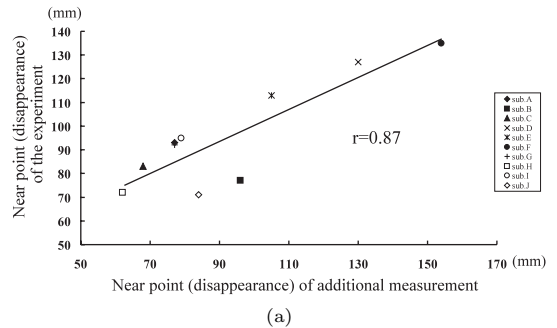


図6 近点計測の再現性(実験時無負荷条件と別日計測の相関)。(a)消失近点、(b)現出近点

Fig. 6 Reproducibility of near point measurement. (a) Near point (disappearance), (b) Near point (appearance).

5. 結果

5.1 焦点調節能

まず、近点測定の実験結果を確認する目的で、視覚系疲労課題前の近点と、後日、同条件下で計測した近点との関係を図6に示した。(a)、(b)はそれぞれ消失近点と現出近点である。なお、両目の測定間ではその平均値に有意差が認められなかった。その結果、相関係数はそれぞれ(a)0.87、(b)0.70であり、再現性の点から比較検討に利用できると判断した。

図7に被験者全員の(a)消失近点、(b)現出近点を示した。縦軸は視覚系課題前の近点を100%とした比率で表した。横軸は焦点調節能計測時点を表している。視覚系疲労課題を行わせる前に比べ、直後において近点が延長しているのが分かる。また、時間経過とともに近点が短縮し、視覚系疲労課題を行わせる前のレベルの近づいているのが分かる。

5.2 ERPのP100振幅

図8に視覚系疲労課題前後におけるERPのP100成分の振幅の変化を示した。視覚系疲労課題後の振幅は視覚系疲労課題前から最大変化した時点を示した。ほとんどの被験者で課題負荷後20分以内に最大の変化が起きた。これによるとERPのP100成分は

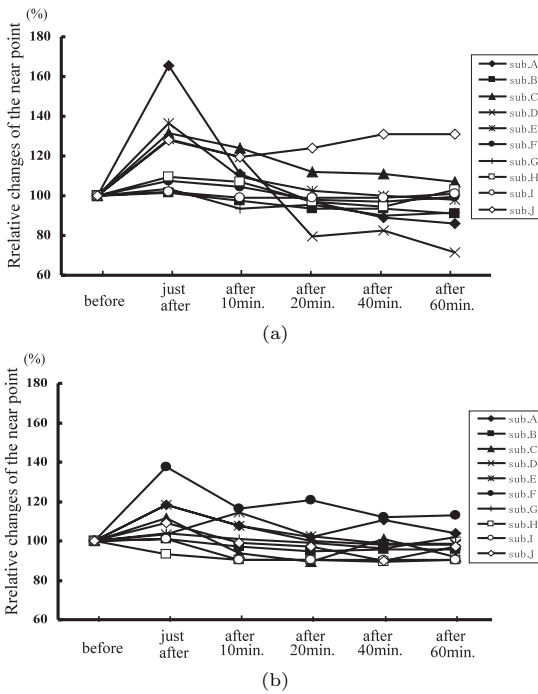


図7 焦点調節能の変化率。(a) 消失近点, (b) 現出近点

Fig. 7 Effect of the experimental task on accommodation before and after the task performance.

(a) Near point (disappearance), (b) Near point (appearance).

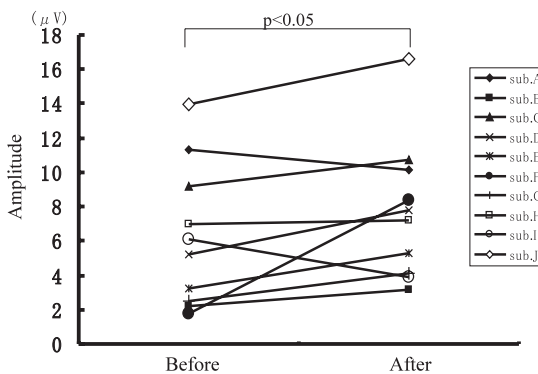


図8 視覚系疲労課題前後におけるP100振幅の変化

Fig. 8 Change of P100 amplitude before and after the task.

視覚系疲労課題後において大きくなること分かる ($p < 0.05$).

5.3 ERPのP300振幅

ERPの誘発刺激において200msの刺激はオドボール課題のターゲット刺激(T)に相当し,100msの刺激はオドボール課題のノンターゲット刺激(NT)に相当する.

図9に視覚系疲労課題前後におけるP300の振幅の

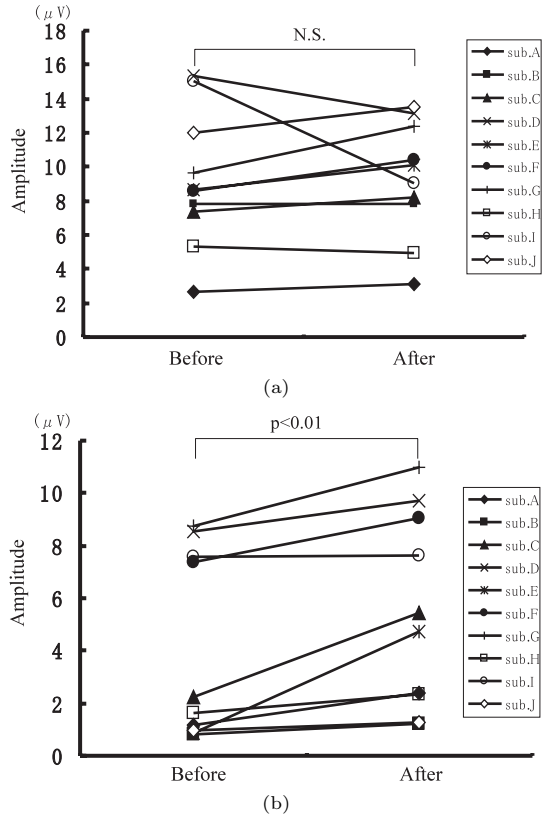


図9 視覚系疲労課題前後におけるP300の変化。(a) T刺激試行, (b) NT刺激試行

Fig. 9 Change of P300 amplitude before and after the task. (a) Target trial (T), (b) Non-target trial (NT).

変化(a) T刺激時,(b) NT刺激時を示した。(a)に示したTの場合には有意な傾向は認められず,(b)に示したNTの場合に関しては,視覚系疲労課題後に大きく異なる有意な差が認められた($p < 0.01$).

5.4 ERPのP300成分の振幅率の変化

図10に視覚系疲労課題前後において,P300の振幅のNT刺激時のものをT刺激時のもので除したものの $A(NT/T)$ を示した.視覚系疲労課題後に大きく1に近づく傾向があった($p < 0.01$).

5.5 ERP潜時

表1に視覚系疲労課題前後のP100,P300の潜時を示した.P100,P300ともにほとんど変化がなく,明らかな傾向は見られなかった.

5.6 焦点調節能とERPの振幅との関係

図11に視覚系疲労課題前後における焦点距離の変化率と,P100の振幅,P300の $A(NT/T)$ の振幅率の散布図を示した.両図とも明らかな傾向は見られず,焦点調節能の変化とERPの変化は独立な性質を

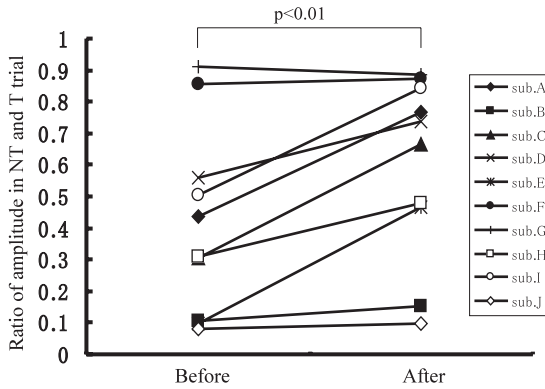


図 10 視覚系疲労課題前後における P300 振幅の変化 $A(NT/T)$

Fig. 10 $A(NT/T)$ of P300 amplitude before vs. after the task.

表 1 P100, P300 潜時の変化 (ms)

Table 1 Mean and SD of ERP latencies (ms).

	before	just after	after 10min.	after 20min.	after 40min.	after 60min.
P100NT	194±16.3	199±12.0	198±10.3	199±9.7	198±9.2	193±12.3
P300NT	471±94.8	444±80.9	465±85.3	444±79.9	453±80.4	464±80.3
P300T	497±74.7	521±84.3	494±78.7	496±91.4	496±78.8	503±76.2

持っていると考えられる。

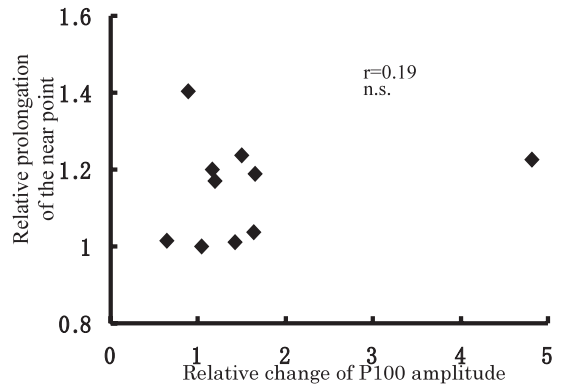
5.7 ERP の P300 成分の振幅率と主観評価の関係

図 12 に主観疲労度と視覚系疲労課題前後における P300 振幅の $A(NT/T)$ の関係を示した。主観評価の増加とともに視覚系疲労課題前後における $A(NT/T)$ の比が大きくなっているのが分かる ($r = 0.71$)。

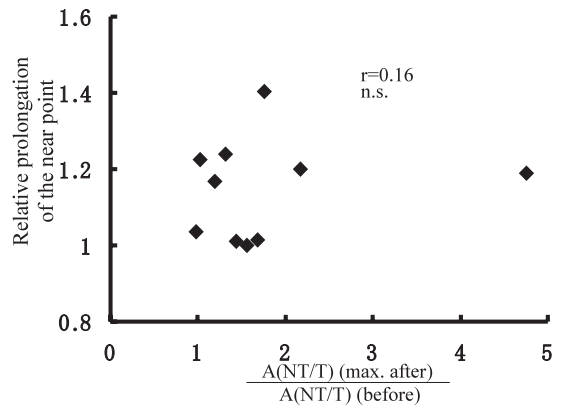
6. 考 察

本研究では、VDT 作業による視覚系疲労での ERP の変化を検討した。その結果 ERP の P100 において潜時に影響は認められず、振幅は増大することが明らかにされた。このことは、視覚系疲労課題により視覚野の機能水準が低下しており、ERP 計測用の刺激により皮質機能が賦括されたと考えることができる。

また、P300 に関しては、潜時に影響は認められず、NT 刺激による振幅は増大傾向が見られた。T 刺激による振幅は変化が認められず、振幅比 $A(NT/T)$ の振幅率が 1 に近づいた。このことは、NT 刺激による P300 の振幅が T 刺激による P300 の振幅に近くなったことを示している。本来 P300 は T 刺激を検出した場合に顕著に見られる。しかし、視覚系疲労により NT 刺激に対しても P300 が出現する傾向が見られたことは、視覚系疲労が選択的注意機能へ影響を及ぼす



(a)



(b)

図 11 焦点調節能と ERP パラメータとの関係。(a) P100 振幅との関係、(b) P300 振幅の $A(NT/T)$ との関係

Fig. 11 Relationship between the near point prolongation and ERP parameters. (a) vs. P100 amplitude, (b) vs. P300 $A(NT/T)$ change.

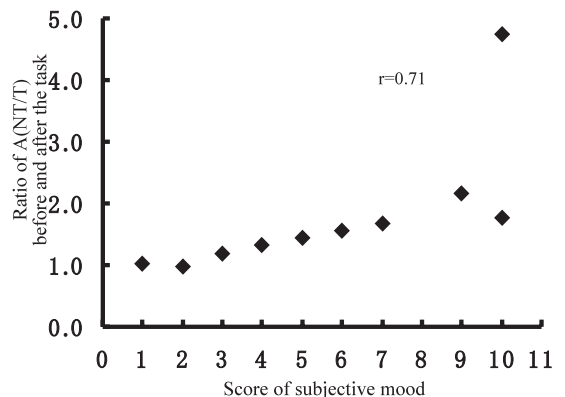


図 12 主観疲労度と P300 振幅の $A(NT/T)$ の関係

Fig. 12 Relationship between subjective mood of visual fatigue and P300 $A(NT/T)$ change before and after the task.

可能性が考えられる。Kok は被験者に処理スピードを要求した場合に、NT 刺激による P300 が出現するこ

とを報告しており²²⁾、処理の難易度が増大すると NT 刺激に対しても P300 が出現すると考えられる。このことから本実験においては、視覚系疲労により相対的に刺激弁別機能が低下し、NT 刺激の認知に対しても多くの注意を払う必要から、P300 が増大したのではないかと考えられる。さらに、P300 振幅の $A(NT/T)$ の課題後の増大が主観的疲労度と強い相関を示した ($r = 0.71$)。このことは、これまでの主観的疲労感を、定量的に示すことが可能であることを示している。

一方、視覚系疲労による近点の変化は、ほとんどの被験者で VDT 作業直後に最も延長し、作業終了後 20 分程度で回復していた。図 7 の (a) および (b) は消失および現出近点の変化を 10 名の被験者につき重ね書きしたものである。消失近点には特に直後で延長にばらつきが多く、個人差が大きいことが分かる。最も大きな変化を示した被験者 A はコンピュータの使用頻度が少ないと報告しているため、負荷課題の効果が大きく現れた可能性がある。しかし、比較的応答の大きい D, E, J と、応答の小さいその他の被験者群の相違については実験後の聞き取り調査では特定の原因は認められなかった。この 2 群については、負荷課題への動機づけや適性などの差が反映している可能性が考えられる。

また、上述の P100 の振幅や P300 の振幅率の変化に時間的な相関は確認できなかった。これは、ERP と近点とが独立な情報を含んでいることを示している。つまり、視覚系疲労は焦点調節能に影響を及ぼす毛様体筋などの筋疲労を含む眼調節系の機能低下と、認知機能に影響を及ぼす視覚情報処理の中枢性疲労の 2 種類から構成されていることが示唆された。また、主観的な疲労感の中枢における認知過程での疲労を大きく反映しているものと考えられる。

中枢性疲労は心理学でいう心的飽和に対応していると思われる²³⁾。心的飽和とは、ある作業や行動を繰り返し行っていくうちにその作業や行動に対する積極的構えが減弱するなど、作業や行動の効率が低下して極端な場合には中断してしまう「飽き」の状態である。一般に神経系においては単調で無害な刺激の連続に対して、入力感度を低下させる「habituation」が生じる²⁴⁾。P300 の $A(NT/T)$ が視覚系疲労後に 1 に近づいたということは、心的飽和すなわち、大脳皮質における habituation が弁別作業効率を低下させたと推測される。

従来から行われてきた視覚疲労評価は感覚器官および眼調節系の測定であり、いわゆる眼精疲労の指標であった。CFE などによる視覚系疲労測定は、視覚情

報処理中枢の疲労を含んではいるが、むしろ覚醒水準の影響を強く受けて視覚系全体の疲労としてとらえられている。しかし、ERP と近点計測を併用することで、眼調節系のレベルと高次認知過程のレベルを分離して、より詳細に検討することができる。

本論文では視覚系疲労による高次認知過程の機能低下を重要な要素と考えている。今回は眼調節系の評価として NP アコモドメータによる近点を簡易的に用いることで中枢指標と対比を行った。しかし、より詳細に高次認知過程を含めた視覚系疲労を評価するためには、次段階で赤外線オプトメータ、オートフラクトメータなどを用いた精密な眼調節指標と対照することも必要であると考えられる。

眼精疲労は調節性、筋性、症候性、不等像性および神経性などに分類されることが多い¹²⁾。本研究が想定している VDT 作業による疲労は、このうち調節性および筋性眼精疲労が関連してくるものと考えられるが、本実験で用いた課題では、いわゆる VDT 症候群として知られる身体症状を被験者にきたすことはなく、通常の生活で生じうる疲労のレベルであったと考えられる。近点の変化に見られる個人差も、負荷のレベルが大きくないことによる影響が考えられるが、ERP の P300 成分に見られる刺激弁別性指標 ($A(NT/T)$) には疲労の影響と見られる変化が認められた。このことは、眼精疲労により生じた刺激の弁別しにくさが、認知過程のパフォーマンスに影響を与えていることを示すものと考えられる。

VDT 作業における中枢性疲労はヒューマンエラーや作業効率の低下につながると考えられ、作業中の中枢性疲労を軽減することは非常に重要なことである。とりわけ、交通システムや医療技術の分野ではヒューマンエラーが人命に関わる重大事態を引き起こしかねないからである。したがって、コンピュータの HI の開発の際には、視覚情報処理の中枢への影響を客観的に評価し、その結果を開発過程にフィードバックすることが重要である。その点において、本実験の ERP による方法は有用であると考えられる。

VDT 作業に関するガイドラインとしては、日本産業衛生学会による報告書が 1985 年に示されている²⁵⁾。ここでは適正な作業環境のための勧告が多角的になされている。ところで昨今の急激なコンピュータ技術の発展は、ヒトとコンピュータの関係を劇的に変化させた。コンピュータゲームやインターネットブラウジングのように高度に動機づけされた認知活動が連続する操作形態が増大し、はじめに述べた死亡例が示すように、本人の自覚以上に負担が蓄積している可能性もあ

る．そこで本研究では，HIの負担が高次の認知過程に及ぼす影響を検討し，ERPの観点から見た視覚情報処理における機能低下を指摘した．これからのIT社会においては，HIの開発のガイドラインに認知的負担を考慮すべきであることを強調しておきたい．

7. ま と め

視覚系に負担の少ないHIの開発のためには視覚系疲労を客観的に評価する必要があるという観点から，HIにおける視覚への負荷を想定して，視覚指標弁別を長時間行わせる課題を用い，被験者に実験的に疲労を生じさせた．

課題前後での焦点調節能の指標である近点，脳内認知処理の指標であるERPのP100，P300成分を計測した．その結果

- (1) 近点の延長
- (2) P100 振幅の増大
- (3) 非標的でのP300の振幅増大(刺激弁別パフォーマンスの低下)

が認められた．(1)~(3)はそれぞれ眼調節系での疲労，大脳一次視覚野での機能変化，高次皮質での機能変化の3段階に対応していると考えられ，本法により視覚系疲労の構造上の特性を分析でき，得られた知見をHIの設計にフィードバックすることで人間の特性に整合させることが可能であることを示した．

今後は多様な感覚情報を利用した高度なソフトウェアにも対応できるように，マルチモーダルな情報チャネルを考慮した方法も検討をしたい．たとえば聴覚といった他の感覚情報を利用した場合の視覚負担の低減などを検討する必要があると考えられる．

謝辞 本研究を進めるにあたり様々なご協力をいただいた東海大学開発工学部の学生諸君に感謝いたします．また，様々なご助言をいただいた東海大学開発工学部医用生体工学科の池田研二先生に謹んで感謝いたします．

参 考 文 献

- 1) Grandjean, E.: Ergonomics of VDUs: review of present knowledge, *Ergonomics Aspects of visual Display Terminals*, pp.1-12, Taylor and Francis Ltd., London (1980).
- 2) Dainoff, M.J.: Visual fatigue in VDT operators, *Ergonomics Aspects of visual Display Terminals*, pp.95-99, Taylor and Francis Ltd., London (1980).
- 3) Otberg, O.: CRTs pose health problems for operators, *International Journal of Occupa-*

tional Health and safety, pp.24-52 (1975).

- 4) 星野 聖，斎藤正男：瞳孔対抗反応の解析によるVDT作業時の視覚疲労評価，*テレビジョン学会技術報告*，Vol.16, No.20, pp.7-12 (1992).
- 5) 矢野澄男，井手真司：立体画像の見やすさと調節応答から見た視覚疲労，*映像情報メディア学会誌*，Vol.55, No.5, pp.711-717 (2001).
- 6) 人民日報日文版 2002年4月22日．
http://j.people.ne.jp/2002/04/22/jp20020422_16425.html
- 7) 渡辺富夫，大久保雅史：コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価，*情報処理学会論文誌*，Vol.39, No.5, pp.1225-1231 (1998).
- 8) 米村，小川：通信システムにおけるヒューマンインタフェース設計指針の考察，*NTT R&D*，Vol.39, No.2, pp.249-256 (1990).
- 9) 木村達洋，早坂明哲，瀬川典久，山崎清之，宮崎正俊：視覚疲労測定によるヒューマンインタフェースの評価・構築についての提案，平成13年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集，p.289 (2001).
- 10) 木村達洋，早坂明哲，瀬川典久，山崎清之，宮崎正俊：VEPによる視覚疲労測定の検討，*電子情報通信学会 2002年総合大会講演論文集*，A-15-10 (2002) (CDROM).
- 11) 大島正光：疲労の研究，*同文書院* (1967).
- 12) 石川 哲：瞳孔・調節—とくに「VDT作業と眼疲労の他覚的証明法について」，第40回日本自律神経学会総会，pp.248-257 (1988).
- 13) 栗本晋二，岩崎常人，野村恒民，野呂影勇，山本栄，小松原明哲：VDT作業とpaper作業における眼精疲労の比較検討，*臨眼*，Vol.37, No.8, pp.1099-1104 (1985).
- 14) Cobb, W.A. and Dowson, G.D.: The latency and form in man of the occipital potentials evoked by bright flashes, *J. Physiol.*, Vol.152, pp.108-121 (1960).
- 15) Barrett, G., Blumhard, L., Halliday, A.M., et al.: A paradox in the lateralization of the visual evoked response, *Nature*, Vol.261, pp.253-255 (1976).
- 16) Picton, T.W. and Hillyard, S.A.: Human auditory evoked potential II, Effects of attention, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, Vol.36, pp.191-199 (1974).
- 17) Donchin, E. and Coles, M.G.: Is the P300 component a manifestation of context updating?, *Behavioral & Brain Science*, Vol.11, pp.357-427 (1988).
- 18) Iwasaki, T. and Kurimoto, S.: Eye-strain and changes in accommodation of the eye and in visual evoked potential following quantified visual load, *ERGONOMICS*, Vol.31, No.12,

- pp.1743–1751 (1988).
- 19) 齊藤 進: 視覚疲労測定法, *VISION*, Vol.5, pp.27–31 (1993).
- 20) Jasoer, H.: Ten-twenty electrode system of the International Federation, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, Vol.10, pp.371–375 (1958).
- 21) 野田一雄: 目の疲労防止対策, *労働衛生*, Vol.22, pp.13–16 (1981).
- 22) Kok, A.: On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity, *Psychophysiology*, Vol.38, pp.557–577 (2001).
- 23) Kounin, J.S. and Doyle, P.H.: Degree of Continuity of a Lesson's Signal System and the Task Involvement of Children, *Journal of Educational Psychology*, Vol.67, No.2, pp.159–164 (1975).
- 24) Karsten, A.: Psychische Sattigung, *Psychol. Forschung*, Vol.10 pp.142–254 (1928).
- 25) 日本産業衛生学会 VDT に関する委員会: VDT 作業に関する検討委員会報告, *産業医学*, Vol.27, pp.172–194 (1985).

付 録

オドボール課題について

オドボール課題とは、出現確率の異なる識別可能な刺激をランダムに提示し、弁別させる課題を行わせるもので、ERP の P300 成分を測定する場合によく用いられる方法である。

たとえば CRT 画面に“ A ”，“ B ”の 2 種の文字をランダムに選択し一定の時間間隔で次々に提示する場合を考える (図 13 参照) 。“ A ”と“ B ”それぞれの文字の出現確率を 0.2 と 0.8 とし“ A ”が提示されたらボタンを押すように被験者に指示すると、低頻度刺激“ A ”が出現したときに刺激提示後約 300 ms で脳波上に陽性のピーク波形が見られる。これは P300 とよばれ、その振幅や潜時は刺激の弁別処理過程に対応する神経活動を反映していると考えられている。

P300 などの誘発成分の振幅は背景にある自発脳波に比べて約 1/50 程度であり、脳波の時系列波形をそのまま観察しても見ることはできない。刺激提示後の脳波を回数分切り出しておき、刺激提示時点を原点としてそろえてアンサンブル平均を計算することで S/N

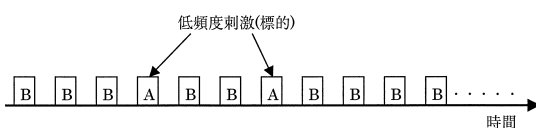


図 13 オドボール課題での刺激手順例

Fig. 13 Schematic illustration of stimuli sequence of the oddball paradigm.

比を改善して推察波形を得ることができる。

(平成 15 年 4 月 16 日受付)

(平成 15 年 9 月 5 日採録)



木村 達洋

1976 年生。1999 年東海大学開発工学部医用生体工学科卒業。2001 年同大学大学院医用生体工学専攻修士課程修了。2001 年岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科博士後期課程在籍。工学修士。生体情報を用いたヒューマンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会会員。



早坂 明哲

1999 年、東海大学開発工学部医用生体工学科卒業。2001 年、同大学大学院医用生体工学専攻修士課程修了。2001 年より岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学専攻博士後期課程に在学中。医用生体工学、生体信号処理の手法を用いたヒューマンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会会員。



瀬川 典久 (正会員)

1971 年生。1997 年 3 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修了。1997 年 4 月より東北大学大学院情報科学研究科在籍。工学修士。1998 年 4 月より岩手県立大学助手。現在に至る。ユーザインタフェース、特にペンコンピューティングに関わるセキュリティの研究に従事。電子情報通信学会、ACM 各会員。



山崎 清之

1989 年東京大学大学院医学系研究科博士課程修了、同年東海大学開発技術研究所講師、1991 年同開発工学部講師、1995 年同助教授、現在に至る。医用生体工学、特に脳波、ERP の人間工学的応用に関する研究に従事。日本 ME 学会、日本人間工学会、日本バーチャルリアリティ学会、ライフサポート学会等の会員。医学博士。



村山 優子(正会員)

津田塾大学学芸学部数学科卒業。三菱銀行および横河ヒューレット・パッカー社に勤務。1984年 University College London 大学院理学部計算機科学科修士課程修了。1990

年同大学大学院博士課程修了。Ph.D.(ロンドン大学)。慶應義塾大学環境情報学部非常勤講師を経て、1994年4月より広島市立大学情報科学部情報工学科講師、1998年4月より岩手県立大学ソフトウェア情報学部助教授。2002年4月より教授。現在に至る。インターネット、ネットワークセキュリティの研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 日本OR学会, 情報知識学会各会員。



宮崎 正俊(正会員)

1938年生。1962年東北大学工学部電気工学科卒業。東北大学大型計算機センター講師, 助教授, 同教養部情報科学科教授, 同大学院情報科学研究科教授を経て, 1998年4月

岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授・学部長(初代, 2002年3月まで)。2003年3月同大学定年退職。2003年5月有限会社情報技術総合研究所を設立, 代表取締役就任, 現在に至る。1972年マサチューセッツ工科大学客員研究員(文部省在外研究員, 1年間)。東北大学名誉教授。工学博士。専門は基本ソフトウェア, 情報システム, システム評価等。所属学会は電子情報通信学会, 日本エム・イー学会, ACM, IEEE等。主な著書に, UNIX 使い方入門(日刊工業新聞社), コンピュータ概説(共著, 共立出版)等多数。