

脳波を利用したソフトウェアユーザビリティの評価 – 異なるバージョン間における周波数成分の比較

上野 秀剛*¹ 石田 響子*¹ 松田 侑子*¹ 福嶋 祥太*²

中道 上*³ 大平 雅雄*¹ 松本 健一*¹ 岡田 保紀*⁴

Evaluation of Software Usability Using Electroencephalogram – Comparison of Frequency Component between Different Software Versions

Hidetake Uwano*¹, Kyoko Ishida*¹, Yuko Matsuda*¹, Shota Fukushima*²,
Noboru Nakamichi*³, Masao Ohira*¹, Ken-ichi Matsumoto*¹ and Yasunori Okada*⁴

Abstract – In this paper, we measure electroencephalograms (EEGs) for quantitative evaluation of software usability. Two different (newer and older) versions of same software were selected to intentionally differentiate a subjects' mental state in our experiment. The versions have graphical user interfaces (GUIs) for the main window, which is extremely different from each other, such as different name of menus, commands and different appearance of command dialogs. While the older version is easy to use for our subjects, the newer version of the software is more likely to disturb users' tasks because it requires a user to restudy the interface of the software. Therefore, we can easily compare subjects' EEGs in an uncomfortable situation with that in a comfortable situation. In the experiment, we used alpha-wave, beta-wave, and beta/alpha as metrics of subjects' EEGs. As the result, we found significant differences of alpha-wave, beta-wave and beta/alpha between two versions. The results of questionnaires performed after the experiment supports the differences, and we also found the correlation between the metrics and result of the questionnaire.

Keywords : Electroencephalogram, Usability, User experience, Quantitative analysis

1. はじめに

近年ソフトウェアの多機能化・複雑化に伴い、機能的な利便性だけではなくユーザビリティの観点から、システムを利用している際の快・不快や心理的作業負荷 (Mental Workload:MWL) など、ユーザの心理状態を考慮することが重要となっている。従来、対象となるシステムのユーザビリティを評価するための方法として、インタビューを用いる方法やシステム利用後に質問票に回答してもらう方法、対象システムを利用している際の思考状態をリアルタイムに発話してもらう発話プロトコル法^[1]などが用いられている。ユーザビリティの評価に用いられる質問票として代表的なものにはSD法^[2], QUIS^[3], NASA-TLX^[4]がある。また、NASA-TLXに関しては芳賀らによって日本語化

されており^[5], 広く使われている。これらの手法は計測のために特別な機器を必要とせず, 比較的容易に計測できるためユーザビリティの評価によく用いられている。一方で, 得られたデータの分析や評価に多大な時間がかかることや, 再現性が低く, 定性的・主観的な評価になってしまうといった欠点も存在する。

このような主観的評価を補うために人間の心理状態を定量的・客観的に評価する方法として, 人間の生理状態を外部から測る生体計測についての研究が行われている。生体計測では心拍変動や脈波, 発汗, 筋電, 脳波といった人間の生体情報を専用の機器を用いて計測し, その変化や違いを分析する。生体情報は人間の心理状態と密接な関係があるといわれており^[6], 評価対象となるシステムを利用している際の生体情報を用いることで定量的なデータによる心理状態の計測を行うことができる。このような生体情報による定量的な分析と, 従来行われている定性的な分析結果についての関係を調査し, 蓄積していくことで, 定量的なデータによるユーザビリティの評価が可能になると期待される。

本研究ではソフトウェアのユーザビリティを定量的に計測するための方法として, ソフトウェア利用後に

*1: 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

*2: 富士通 株式会社

*3: 南山大学 数理情報学部 情報通信学科

*4: 株式会社 メディカルシステム研修所

*1: Department of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

*2: Fujitsu Ltd.

*3: Department of Information and Telecommunication Engineering, Nanzan University

*4: Medical System Educational Center Inc.

におけるユーザの脳波に着目する。人間の中枢神経系を非侵襲に計測する方法の中でも脳波計測は比較的安価な装置を用いて行うことができ、他の計測方法と比べてユーザの姿勢に制限が少ないため、コンピュータ利用後における脳の活動を計測するのに適している。脳波の周波数成分である α 波と β 波はリラックス状態や精神活動状態によって変動するとされており^[7]、さまざまな作業における心理状態や満足感の計測に用いられている^{[8],[9]}。

本論文の目的は、脳波がユーザビリティを計測するための指標として利用できるかどうかを確認すること、また、脳波の変化が従来の定性的評価方法とどのような関係があるかを明らかにすることである。そこで本論文では、同等の機能であるが異なるインタフェースを持つバージョンの異なる2つのソフトウェアを用いて、(1) ユーザの脳波に違いがみられるかどうか、(2) 脳波の違いと質問紙法のようなユーザビリティ評価方法との間にどのような関係があるかを調べる実験を行う。本実験では、インタフェースの異なる2つのソフトウェアを利用した際の被験者の脳波を計測し、得られた α 波や β 波について分析するとともに、実験後に収集したアンケートとの相関を分析する。実験で用いるソフトウェアの一方のインタフェースについては多くの被験者が学習を終えているためMWLは小さいが、他方のインタフェースについては大半の被験者はほとんど利用したことが無いためMWLが大きくなると予想される。このようなソフトウェアに対する「慣れ」は、ユーザの主観的評価に大きな影響を与えるため、脳波とユーザの主観的評価の関係分析に適していると考えられる。また、バージョンごとに異なるインタフェースを持つ機能の利用をタスクとして設定することで、機能の違いによる影響を受けずにインタフェースの違いによる脳波の違いを計測することができる。ユーザビリティを構成している各要素(学習容易性、効率性、満足度など)と脳波の関係についての分析は今後の課題である。

以降、2.章では工学分野で行われている生体情報を用いた定量的評価について説明し、3.章でソフトウェアに対する「慣れ」による主観的評価の変化について述べる。4.章と5.章では2つの異なるバージョンのソフトウェアを用いた脳波計測実験について説明し、実験結果について述べる。6.章で実験結果についての考察を行い、7.章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 生体情報を用いた心理状態の測定

人間の心理状態を定量的に計測するために、従来さまざまな生体情報を利用した研究が行われている。工学分野でよく使われている生体情報は大きく末梢神経

系、中枢神経系の2つに分類される^[7]。

2.1 末梢神経系

末梢神経系の活動を観察する指標として、心電図、皮膚表面温度、眼球運動、筋電図などがある^{[10]~[13]}。水野らは暗算タスクにおけるMWLの継続による情動ストレスの変化を測定するため、顔面熱画像の鼻部額部差分温度、脳波、心電図の継続的計測を行い、鼻部額部差分温度変動の最大温度変異によるMWLの定量的評価の可能性を示唆している^[11]。Nakayamaらは暗算などのタスク遂行時における眼球運動を計測し、タスクの難易度が高くなるにつれて瞳孔径と瞬目の回数が増加することを示している^[13]。

2.2 中枢神経系

中枢神経系の活動として計測することができる生体反応には脳波(EEG)、脳磁気図(MEG)、機能的核磁気共鳴画像(fMRI)、コンピュータトモグラフィ(CT)などがある。この中でも脳波は他の方法と比べて計測時の姿勢・動作が比較的自由、コンピュータ利用時にも計測が可能、計測装置が安価であることから、ディスプレイ上に表示されたソフトウェアを利用している際の心理状態を計測するのに適している。本研究では脳波の周波数成分のうち、国際脳波学会によって定められた α 波および β 波を用いてソフトウェア利用時における心理状態の定量的評価を行う。

人間の心理状態を観察するための脳波計測においては脳波に対して離散フーリエ変換することで得られた α 波、 β 波のパワースペクトルや、 α 波、 β 波の脳波全体に対する割合、 α 波と β 波の比率である β/α が指標としてよく用いられている。松永らは脳波により人間の満足感を評価する満足感計測システムを開発し、実験により脳が扱う情報処理量が小さいと快が生じ、反対に情報処理量が大きいと不快が生じるという仮説を検証した^[14]。林らは高品位映像の客観的評価指標として脳波を計測し、 α 波のパワースペクトルが主観的評価と相関があることを示している^[15]。Oohashiらは可視聴域を超える高周波成分を含む音を聞いた際に α 波成分が増大し、高周波成分を除去するとそれが弱まることを示している^[9]。

本研究では α 波と β 波それぞれの脳波全体に対する比率と、 β/α を指標として用いる。これらの指標は従来、脳波を用いた研究でよく使われているため、過去の研究で得られた知見と容易に比較することができる。

3. ソフトウェアの「慣れ」による主観的評価の変化

脳波計測のための実験環境と計測手法の有効性を確認するにあたり、アンケートなどの定性的評価から容易に識別可能な、ユーザビリティに影響を与える要因を設定し、主観的評価と脳波計測によって得られる

各種変数を比較することが望ましい。本実験ではソフトウェア利用時の主観的評価に影響を与える要因として、対象ソフトウェアに対する「慣れ」を用いる。ユーザが対象ソフトウェアを日常的に使っている場合、そのソフトウェアのインターフェースや機能について学習が済んでいるため、自分の目的に合った機能の選択が容易であり、選択した機能を効率的に利用することができる。したがって、ユーザは対象ソフトウェアに対して戸惑いが生じにくい（利用による不快感が小さい）と考えられる。一方で、ユーザが対象ソフトウェアを使ったことが無い場合、そのソフトウェアのインターフェースや機能についての学習が必要となり、機能の効率的な選択や利用が難しくなる。その結果、対象ソフトウェアに対して戸惑いが生じやすい（利用による不快感が大きい）と考えられる。

ソフトウェアに対する慣れは利用経験の有無や利用頻度などアンケートによる取得が容易に可能であり、利用頻度によるグループ分けや相関関係の比較がしやすい変数であるため、脳波と主観的評価の関係を比較する指標として適している。本実験ではバージョンの異なる2つのソフトウェアを用いたタスクを行い、それぞれのバージョンを利用した際の主観的評価と脳波の関係を分析する。対象とするソフトウェアはバージョンアップの際に大幅なインターフェースの変更が行われている。同様の機能を利用する際に、一部の機能では2つのバージョンで異なる操作をする必要があるため、インターフェースの変化による主観的評価や脳波の変化を観察することができる。我々は、ユーザビリティの各要素（学習容易性、効率性、満足度など^{[16],[17]}）に大きな影響を与える「慣れ」の違いに着目することで、脳波がユーザの状態計測に適しているかを判断しやすくなると考えた。「慣れ」の異なるソフトウェアを利用している被験者の脳波には大きな差が表れると考えられるためである。本論文では対象としないが、ユーザビリティを構成している各要素（学習容易性、効率性、満足度など）と脳波の関係については今後明らかにしていく必要がある。

4. 脳波計測実験

4.1 概要

本実験ではMicrosoft社製のスプレッドシート作成ソフトウェアであるMicrosoft Office Excel 2003及びMicrosoft Office Excel 2007を用いて被験者に8つのタスクを行ってもらい、タスク終了後の脳波を計測した。Excel 2003とExcel 2007はそれぞれ2003年、2007年にリリースされたバージョンの異なるソフトウェアである。両バージョンは同程度の機能を持つが、Excel 2007では新しいインターフェースが導入されて

おり、メニューやツールバー、作業ウィンドウのデザインが変更されている。そのため同一の機能を利用する際にそれぞれのバージョンで異なる位置・名称のメニューやボタンを選択しなければならない場合がある。また、メニューの位置や名称が変化していなくても、メニュー選択後に表示される作業ウィンドウのデザインが変更されていることがある。本実験では、両バージョンで存在する機能から実験タスクを構成し、メニューやツールバー、作業ウィンドウのデザイン変更がユーザの脳波に及ぼす影響を計測する。

4.2 被験者

本実験の被験者は、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に在籍している大学院生10名である。被験者のExcel 2003およびExcel 2007の利用頻度について集計した結果を表1に示す。Excel 2003については全ての被験者に利用経験があり、基本的な操作方法や機能については理解していた。Excel 2007については半数の被験者が一度も利用したことが無かった。

4.3 タスク

あらかじめ与えられるデータファイルに対して、4種類の作業を2つのバージョンで行ってもらったタスク（計8タスク）を設定した。表2に実験で使用したタスクの一覧を示す。全てのタスクはExcel 2003またはExcel 2007のどちらでも実行が可能であり、全てのタスクで使用するデータファイルは同一のもの（架空の成績表）とした。各タスクの制限時間は5分とし、時間以内に終了できなかった場合は、作業を中断してもらった。また、実施するタスクの選択や、タスクを行う順序については学習効果を考慮し、カウンターバランスを行った。以下の4つの節で各タスクの種類について詳細に説明する。

4.3.1 Same Place タスク

Same Place タスクは両バージョンで同様のメニュー位置・名称をもつ機能を選択するタスクである。指定された機能を実行するためのメニューやボタンを選択すればタスクは完了となる。

4.3.2 Different Place タスク

Different Place タスクではバージョン間で異なるメニュー位置・名称をもつ機能を選択する。*Same Place* タスクと同様に指定された機能を実行するためのメ

表1 Excel 2003及びExcel 2007の利用頻度
Table 1 Subject's Use Frequency of Excel 2003 and Excel 2007.

利用頻度 (人数)	Excel 2003	Excel 2007
一度も無い	0	6
年に数回	2	1
月に数回	3	2
週に数回以上	5	1

表2 実験で使用したタスク一覧
Table 2 Task List Used in The Experiment.

タスク種類	タスク名	タスク内容
Same Place	クリップアートの挿入	クリップアートを挿入するための選択ウィンドウを開く。
	オートフィルタ	各項目の値でフィルタ表示できるように、フィルタを設定する。
Different Place	バージョン情報の表示	Excel のバージョン情報を表示する。
	マクロの記録	新しいマクロの記録を開始する。
Same Interface	セルの書式設定	日付表示を”MM 月 DD 日”から”MM/DD”に変更する。
	ページ設定	印刷時に A4 横向きになるよう設定する。また印刷時における左右の余白を 3.0 に設定する。
Different Interface	条件付書式の設定	60 点未満が”欠席”のセルを赤字で表示する。
	グラフの作成	各学生の点数を積み上げ縦棒グラフで表示し、軸とグラフのタイトルを設定する。

ニューやボタンを選択すればタスク終了となる。

4.3.3 Same Interface タスク

Same Interface タスクで用いられる機能は、メニューを選択した後に表示される設定や必要な情報を入力するための作業ウィンドウの構成が、両バージョンではほぼ同一である。このタスクでは作業ウィンドウを表示するためのメニュー位置や名称について、タスク説明時に与えられる。メニューを選択してから表示された作業ウィンドウ上でタスク内容に沿った設定を完了させるまでをタスクとする。

4.3.4 Different Interface タスク

Different Interface タスクはメニュー選択後に表示される作業ウィンドウの構成がバージョンによって異なるタスクである。*Same Interface* タスクと同様にウィンドウを表示するためのメニュー名称・位置については事前に与えられる。

4.4 実験環境

脳波計測には脳機能研究所製の感性スペクトル解析装置 ESA-16 を用い、サンプリング周波数を 200Hz としてタスク終了後の 2 分間、閉眼安静状態の脳波を記録した。本実験でタスク後に閉眼安静状態で脳波を計測した理由として (1) α 波は開眼状態においては減衰し、閉眼状態において増加する^[7]、(2) マウスやキーボードを操作することによって脳波にアーチファクトが混入する、という 2 点があげられる。Oohashi らはタスクによって変化した脳波が 60 秒から 100 秒の間持続することを報告しており^[18]、タスク後に脳波を測ることでタスクによる脳波の変化を測ることができると考えられる。したがって、本研究では脳波の計測しやすい閉眼安静状態の脳波を計測する。

脳波計測においてはグラウンド電極を額の中心 (Fpz) とし、導出法については基準電極導出法 (片側耳朶法) を用いて、基準電極を右耳 (A2) とした。計測用電極は後頭部 (Pz) に配置した。これは、後頭部には筋電位など脳波以外の生体現象によるアーチファクトが入りにくいからである。また、心電 (ECG) を計測するために両前腕の内側にも電極を配置した。その他のアー

チファクトに対しては、脳波計測に不要な電子機器の電源を抜く、電極の装着不良を防ぐため被験者に頭部用ネット包帯を着用してもらうなどの対策を行った。

被験者はヘッドレスト付きの椅子に座り、デスクトップ PC 上で Excel 2003 と Excel 2007 をマウスとキーボードを用いて操作してもらった。事前にキーボードやマウスの位置、椅子の高さを調整してもらい、筋電位が入りにくいようにした。

4.5 手順

実験の手順を以下に示す。

1. 実験説明・準備
実験についての説明と、脳波計測時の注意を行う。
2. 装置の設定
4.4 節で説明した 5 箇所電極をつけ、脳波計測装置の設定を行う。また脳波が正常に取れているかを確認するために、2 分間、閉眼安静状態の脳波を計測し、アーチファクトの確認を行う。
3. 練習タスク
実験の流れを理解してもらうため、2 種類の練習タスクを行う。練習タスクにおける脳波は分析対象としない。
4. タスクの実施
タスクの内容を説明し、実施してもらう。タスクの内容を記した用紙を渡し、解答例がある場合は表示する。
5. タスク後脳波計測
タスク終了後、閉眼安静状態の脳波を 2 分間計測する。
6. 全タスクの実施
手順 4, 5 を繰り返し、8 つのタスクにおいて終了後の脳波を計測する。
7. アンケート
全タスク終了後、次節で示すアンケートについて記入してもらう。

4.6 アンケート

全タスク終了後に、Excel の利用頻度や、各タスクで利用した機能についてのアンケートを行った。アン

3. Excel2007 について				
●利用頻度				
全く利用していない	年に数回	月に数回	週に数回以上	
●各機能の使い方は理解しやすい				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う
●作業効率がよい(生産性が高い)				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う
●表示される情報(ポップアップやメニュー名など)が明確で分かりやすい				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う
●インタフェースが好ましい				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う
●全体として使いやすい				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う
●全体として満足している				
まったく思わない	1	2	3 4 5 6 7	強く思う

図1 本研究で使用したアンケート
Fig.1 Questionnaire Sheet.

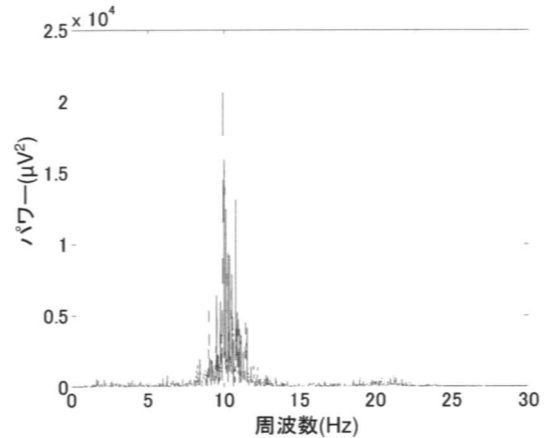


図2 パワースペクトル
Fig.2 Example of Power Spectrum.

ケートは Questionnaire for User Interaction Satisfaction (QUIS) [3] を参考に、各機能や Excel の各バージョンにおけるユーザビリティについての主観的評価や各バージョンの利用頻度を測るための項目を設定した。各アンケート項目は利用頻度について4段階、ユーザビリティについて7段階の選択式とした。アンケートの一部を図1に示す。

5. 実験結果

5.1 脳波データの解析

PCに取り込まれたサンプリング周波数200Hzの脳波に対してパワースペクトル解析を行った。始めにそれぞれの被験者について、各タスク終了後の閉眼安静状態における81.96秒間の脳波を切り出した。安静開始直後は姿勢が変化し筋電位の影響を受けやすいため、脳波の切り出しは安静開始10秒後からとした。次に切り出した脳波に対してフィルタ処理を行った。用いたフィルタはハイパスフィルタ(遮断周波数3Hz, 減衰傾度+6dB/oct), ローパスフィルタ(遮断周波数60Hz, 減衰傾度-6dB/oct), バンドエリミネーションフィルタ(中心周波数60Hz, 遮断域47.5Hz~72.5Hz, 次数2)である。バンドエリミネーションフィルタは交流電流による影響を取り除くために用いた。これらのフィルタ処理を行った脳波に対してハミング窓をかけ、高速フーリエ変換(FFT)を施し、パワースペクトルを求めた。

解析により得られたパワースペクトルの例を図2に示す。得られたパワースペクトルから α 波と β 波それぞれの脳波全体に対する比率(以降、単に α 波, β 波とする)と, β 波を α 波で割った β/α を求めた。 α 波と β 波の周波数成分は国際脳波学会による分類にあわせて、それぞれ8Hz以上13Hz未満および13Hz以上30Hz未満とした。また、脳波全体の範囲を3Hz以上

30Hz未満とした。 α 波と β 波の比率は脳の活動を見るための指標としてよく用いられており[19]~[21], 本研究でも β/α をタスク後の心理状態を測るための指標として用いる。

脳波における α 波や β 波の比率やその強さは個人差が大きく、絶対値による比較は有用ではない。本研究では各被験者の脳波を個人の平均値で正規化し、比較を行う。

5.2 アンケート結果と脳波の相関

アンケートで得られた被験者の主観的評価と脳波の関係を見るため、Excelに対するアンケートの各項目と脳波の相関を分析した。表3にアンケート結果について平均値と標準偏差, およびt検定による検定結果を示す。この表はアンケート項目「作業効率」, 「インタフェース」, 「使いやすさ」, 「満足感」においてExcel 2003とExcel 2007で有意な差があったことを示しており, Excel 2007の方がアンケートによる評価が低かったことを示している。

表4に各アンケート項目に対する回答と脳波の相関を示す。この表は脳波の各指標とアンケート項目「利用頻度」, 「作業効率」, 「インタフェース」, 「使いやすさ」, 「満足感」に有意な相関があることを示している。特に「インタフェース」というアンケート項目との相関が高く, α 波との相関が0.558, β/α との相関が-0.510を示している。

5.3 バージョンによる脳波の違い

異なるバージョンのExcelを利用した際における脳波の違いを分析するために、被験者の α 波と β 波, β/α についてバージョンごとの平均を求めた。バージョンごとの脳波の違いを図3に示す。縦軸は正規化後のパワーの大きさを示しており, 1を超えた値は脳波が各個人の平均よりも大きいことを表し, 1を下回った値は平均よりも小さいことを示している。この図はExcel

表3 アンケート結果
Table 3 A Result of Questionnaire

	利用頻度	理解が容易	作業効率	情報が明確	インタフェース	使いやすさ	満足感
Excel 2003	平均値	3.3	5.0	5.4	4.8	4.9	5.3
	標準偏差	0.82	1.33	1.26	1.32	1.45	1.34
Excel 2007	平均値	1.8	3.5	3.5	4.0	3.1	3.4
	標準偏差	1.14	2.17	1.72	1.63	2.13	1.90
$p < 0.05$	yes	no	yes	no	yes	yes	yes

表4 アンケート結果と脳波の相関
Table 4 Correlation between Result of Questionnaire and EEG.

	利用頻度	理解が容易	作業効率	情報が明確	インタフェース	使いやすさ	満足感
α波	pearson の r	0.436	0.438	0.510*	0.297	0.558*	0.455*
	p 値	0.054	0.054	0.021	0.204	0.011	0.026
β波	pearson の r	-0.493*	-0.310	-0.405	-0.118	-0.437	-0.419
	p 値	0.027	0.183	0.077	0.620	0.054	0.066
β / α	pearson の r	-0.475*	-0.374	-0.462*	-0.212	-0.510*	-0.464*
	p 値	0.034	0.104	0.040	0.370	0.021	0.040

* は危険率 5% で有意差があることを示す。

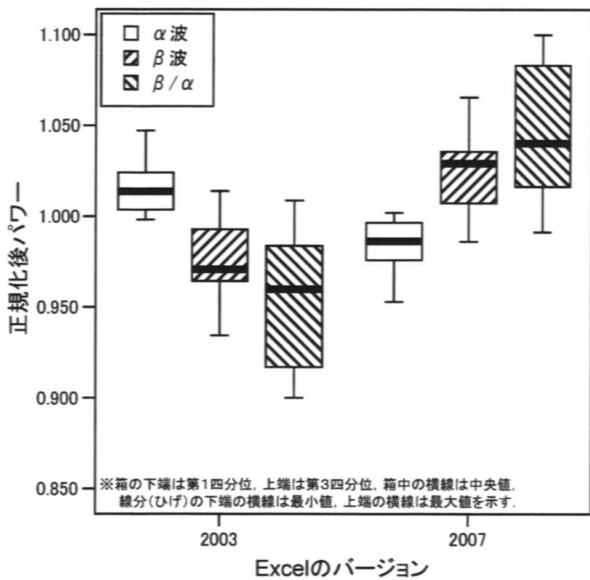


図3 Excel のバージョンによる脳波の違い
Fig.3 EEG Difference between Two Excel Versions.

2003 を利用した際の α 波が Excel 2007 を利用している際に比べて大きく、β 波と β/α は Excel 2007 を利用しているときよりも小さいことを示している。これらの差が有意であるかを調べるために t 検定を行った結果、いずれの差も有意であった (いずれも $p < 0.001$)。

5.4 タスクによる脳波の違い

本実験で行ったタスクは、種類によって被験者の精神的な負荷が異なっていると考えられる。Different Place タスクや Different Interface タスクは Same Place タスクや Same Interface タスクと比べて、Excel 2003 で得たメニューの位置や名称、作業ウィンドウに関する知識や経験を Excel 2007 の操作に利用できない。そのためユーザにとっての負荷が大きく、その違いが脳

波にも現れると考えられる。

各タスクの種類による脳波の違いを見るために、8 つのタスクを種類ごとに分類し、それぞれの種類における被験者の α 波、β 波、β/α を求めた。図 4 と図 5 に異なるバージョン間で同様のメニュー位置や名称、作業ウィンドウを利用するタスクを行った際の脳波を示す。Same Place タスクではバージョンの違いによる脳波の違いは見られなかった。Same Interface タスクでは Excel 2003 を利用したタスクよりも、Excel 2007 を利用したタスクにおいて β 波や β/α が大きかったが、有意差は見られなかった。

図 6 と図 7 にバージョン間で異なるメニュー位置や名称、作業ウィンドウを利用するタスクを行った際の脳波を示す。Different Interface タスクにおける脳波には有意差は見られなかったが、Different Place タスクを行った際の β/α について有意差が見られた ($p = 0.048$)。

6. 考察

本実験で得られた脳波と実験後のアンケートにおける主観的な評価項目「作業効率」「インタフェース」「使いやすさ」「満足感」の間に有意な相関関係が見られた。また、脳波と「利用頻度」の間にも有意な相関関係が見られた。加えて、過去に行われている脳波を用いた研究においても、精神的負荷が多い時や不快に感じている際に α 波が減少し、β 波と β/α が減少することが観察されており、本実験の結果と一致していることから、タスク終了後の脳波はソフトウェアのユーザビリティ評価に用いることが可能だと考えられる。

Excel 2003 と Excel 2007 を利用した後の閉眼安静状態における脳波に有意な差が見られ、α 波は Excel 2007 を利用した際に減少し、β 波と β/α については

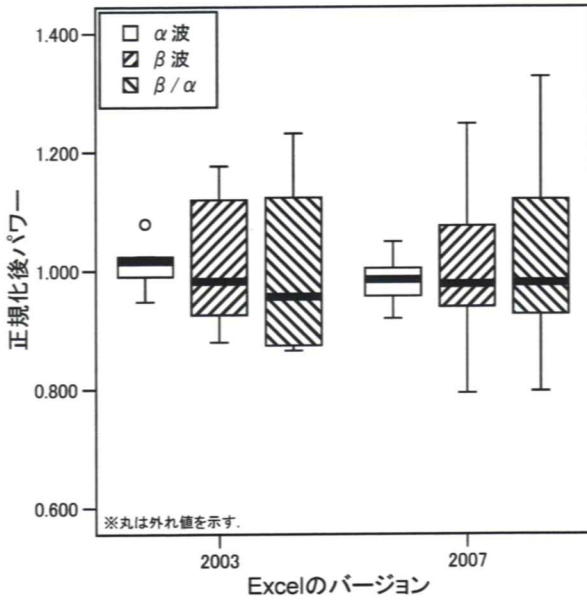


図4 Same Place タスクにおける脳波
Fig.4 EEG Difference at Same Place Tasks.

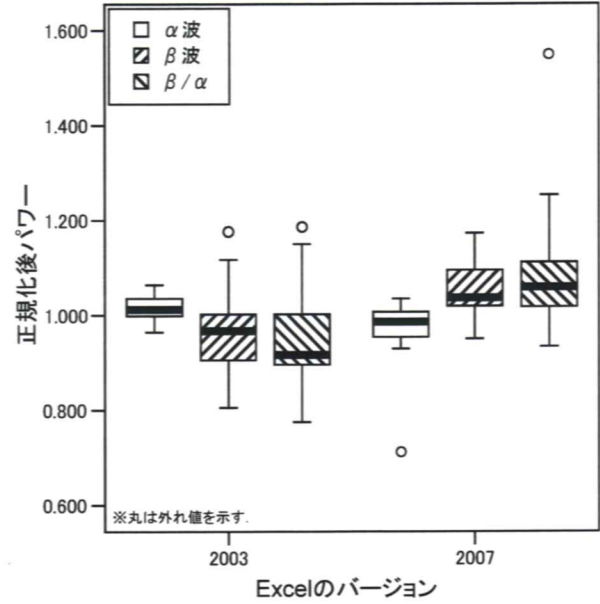


図6 Different Place タスクにおける脳波
Fig.6 EEG Difference at Different Place Tasks.

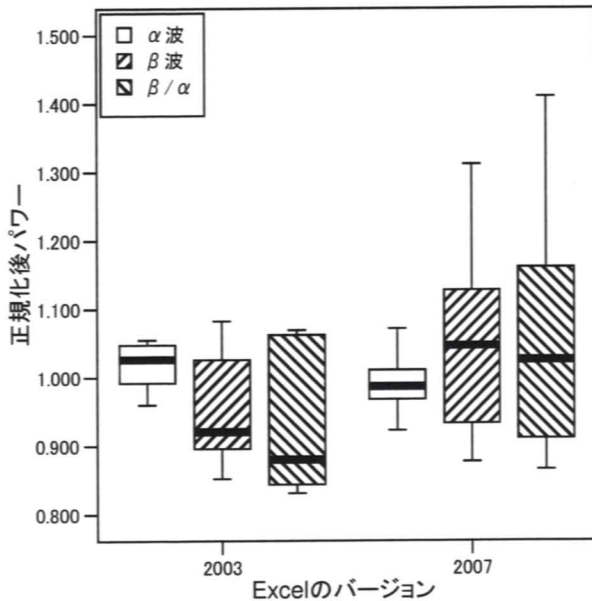


図5 Same Interface タスクにおける脳波
Fig.5 EEG Difference at Same Interface Tasks.

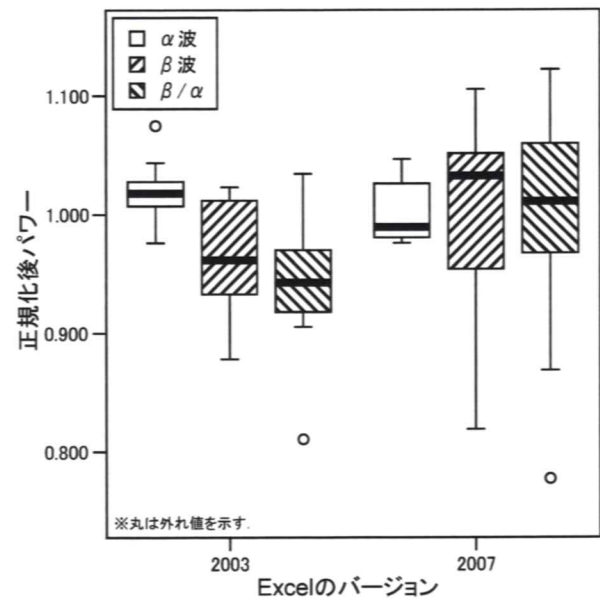


図7 Different Interface タスクにおける脳波
Fig.7 EEG Difference at Different Interface Tasks.

Excel 2007 を利用した際に増加した。これは Excel 2003 を利用したタスクよりも Excel 2007 を利用したタスクのほうが精神的負荷が高いためだと考えられる。アンケート結果についても Excel 2003 より Excel 2007 において、「利用頻度」「作業効率」「インタフェース」「使いやすさ」「満足感」の項目で評価が低く、脳波による結果と一致している。この結果は被験者の半数が Excel 2007 を初めて利用したためにインタフェースに慣れておらず、操作に戸惑ったり各メニュー項目

の構成や名称について考える必要があったためと考えられる。また、Excel 2003 と Excel 2007 とともに利用頻度が「週に数回以上」と回答していた被験者については α 波、 β 波、 β/α のいずれについても Excel 2003 と Excel 2007 の間で大きな差はみられなかった（正規化後の値でそれぞれ 0,004, 0,011, 0,002 の差）。一方で Excel 2003 の利用頻度が「週に数回以上」で、かつ Excel 2007 を初めて利用した被験者の場合、Excel 2003 と Excel 2007 の間で α 波、 β 波、 β/α のいずれ

も差が大きかった（それぞれ 0.039, 0.068, 0.106）。このような結果は双方のバージョンに慣れている被験者の場合、どちらを利用していても精神的負荷に違いがないのに対して、Excel 2007 を初めて利用した被験者の場合、インタフェースなどの違いから大きな精神的負荷を受けたためだと考えられる。

タスクの種類による脳波の違いについては *Different Place* タスク後の β/α において有意差が見られた。これはメニューの位置や名称が変化することで、タスクの実施に必要な機能を発見するのが難しくなり、精神的負荷が大きくなったものと考えられる。アンケートの結果についても、*Different Place* タスクにおけるアンケート項目「理解が容易」「情報が明確」「使いやすさ」「満足感」で Excel 2003 と Excel 2007 の間において危険率 5% で平均値に有意な差が見られた。*Different Interface* タスクにおいては有意差は見られなかった。個別のタスクごとに分析した結果、タスク「グラフの作成」においては β 波と β/α で有意差があった（それぞれ $p = 0.009$, $p = 0.019$ ）が、タスク「条件付き書式の設定」においてはほとんど差は見られなかった。「条件付き書式」においてはアンケートにおいても差は見られず、タスクの設定が適切でなかったために、被験者の心理的な違いが現れなかったと考えられる。

本実験で得られた結果から、ソフトウェア利用後における閉眼安静状態の脳波とユーザの主観的評価には関係があり、ユーザビリティの定量的評価のための指標としての脳波が有用である可能性が示された。脳波によるユーザビリティの評価が可能になれば、定量的なデータを元にした分析が可能になり、分析手順の自動化やモデル検証などが可能になると思われる。従来行われている定性的評価では分析に時間がかかり、また分析者によって結果が異なる可能性があるが、脳波を用いた定量的評価では分析方法を自動化することで、分析の再現性を高め、分析時間を大幅に短縮することができると思われる。

本実験においては脳波の指標として α 波、 β 波、 β/α の 3 つを用いて分析を行った。実験の結果、 β/α についてアンケートにおける各項目との相関が多く見られ、一部のタスクにおいて、 β/α でバージョン間の違いが見られた。また、Excel 2003 をよく利用しているが Excel 2007 を初めて利用した被験者の指標についても β/α が最も差が大きかった。この結果はニオイが人に及ぼす生理的影響の計測^[19] や運転中の覚醒度の計測^[20] に用いられている α 波と β 波の比率がソフトウェア利用者の状態計測にも用いることができる可能性を示している。

7. まとめと今後の課題

本論文ではソフトウェアのユーザビリティを定量的に評価するための方法として生体情報のひとつである脳波に着目し、その実験手法の確認とアンケートによる主観的評価と脳波の関係を分析するための実験を行った。実験の結果、バージョンの異なるソフトウェアを利用したタスク後の脳波に有意な差があることが分かった。この結果は従来行われてきた脳波を利用した研究と一致しており、また、実験後のアンケートからもその有用性が確かめられた。タスクの種類ごとに行った分析からはメニューの位置がバージョンによって異なる際に脳波に有意な差があることが分かった。

本論文で行った実験で対象としたソフトウェアに対する「慣れ」はアンケートから比較的計測しやすく、ソフトウェアを利用した際のユーザの心理状態に影響を与える大きな要因のひとつと考えられる。しかしユーザビリティを構成する様々な要因について、それぞれがどれだけ脳波に反映されているかについては本論文で行った実験では明らかにしていない。今後の実験によってユーザビリティの構成要素について個別に脳波との関係を調べ、脳波によるユーザビリティ評価の有効性を確認していきたい。また、本実験で設定した実験環境と実験方法を用いることで、ソフトウェア以外にも Web サイトのユーザビリティ評価や、利用時の快・不快を測ることも可能と思われる。近年インターネット上に公開される Web アプリケーションが増えてきており、それらのユーザビリティを定量的に評価することも有意義な研究であると考えられる。

加えて、本実験で用いた計測方法はソフトウェアに対する「慣れ」自体を定量的に計測する方法としても有用であると考えられる。ユーザビリティの評価では、被験者の慣れによる影響を排除するために事前に訓練や学習を行ってもらい、システムに対する学習状態や知識を均一にする。しかし、実際にどの程度被験者の状態が統一されているのかについては計測する方法がなく、実験者の主観によって学習時間や方法が決められているのが現状である。本論文で用いた方法によって事前学習の過程における脳波の変化を時系列に観察し、その時間ごとの差分を見ることで、被験者の対象システムに対する慣れの変化を定量的に評価し、慣れの影響を排除した状態でのユーザビリティの評価が可能になると思われる。

今回行った実験では従来の研究や、脳波計測時に波形の変化を観察していた際の様子から、また FFT を効率的に行うために脳波の分析対象時間を 81.96 秒とした。タスク終了からの脳波の変化を時系列に分析し、各成分ごとの変化を見ることで、分析に適した取得時

間についての知見が得られる可能性があり、今後の研究で明らかにしていきたい。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省「e-Society 基盤ソフトウェアの総合開発」の委託に基づいて行われた。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究補助費（基盤研究B：課題番号17300007，若手B：課題番号17700111）による助成を受けた。本研究の一部は南山大学2008年度パッへ研究奨励金I-A-2の助成を受けた。

参考文献

- [1] Ericsson, K. A., Simon, H. A.: Protocol analysis: Verbal reports as data; MIT Press,(1993).
- [2] Osgood, C. E., Suci, G. J., Tannenbaum, P. H., The measurement of meaning, University of Illinois Press,(1957).
- [3] Chin, J. P., Norman, K. L., Shneiderman, B.: Subjective user evaluation of CF PASCAL programming tools, Technical Report (CAR-TR-304),(1987).
- [4] Hart, S. G., Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research; Human Mental Workload (ed. Hancock, P. A., Meshkati, N.), Elsevier, pp.139-183,(1988).
- [5] 芳賀 繁, 水上 直樹: 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定; 人間工学, Vol.32, No2, pp.71-79,(1996).
- [6] 岡田 謙一, 西田 正吾, 葛岡 英明, 中谷 美江, 塩澤 秀和: ヒューマンコンピュータインタラクション, オーム社,(2002).
- [7] 宮田 洋, 藤澤 清, 柿木 昇治, 山崎 勝男: 新生理心理学 - 生理心理学の基礎, 北大路書房,(1998).
- [8] 松永 久, 中沢 弘: 満足感計測のための基礎的研究 - 主観的な満足感と前頭部双極誘導による脳波の関係; 人間工学, Vol.34, No.4, pp.191-201,(1998).
- [9] Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., Maekawa, T., Nakamura, S., Fukuyama, H., Shibasaki, H.: Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: Hypersonic effect; The Journal of Neurophysiology, Vol.83, No.6, pp.3548-3558,(2000).
- [10] 村田 厚生: 情報検索作業における精神的な作業負担の測定; 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol.74, No.4, pp.706-714,(1991).
- [11] 水野 統太, 野村 取作, 野澤 昭雄, 井出 英人: メンタルワークロードにおける情動ストレスの評価; 信学技報, HIP2007-27, Vol.107, No.60, pp.143-147,(2007).
- [12] Hazlett, R. L.: Measurement of user frustration: A biologic approach; CHI '03: Extended abstracts on human factors in computing systems, pp.734-735,(2003).
- [13] Nakayama, M., Takahashi, K., Shimizu, Y.: The act of task difficulty and eye-movement frequency for the 'Oculo-motor indices'; ETRA '02: Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications, pp.37-42,(2002).
- [14] 松永 久, 中沢 弘: メンタルワークロードと脳波により評価される満足感との関係; 日本機械学会論文集. C 編, Vol.66, No.648, pp.2884-2890,(2000).
- [15] 林 秀彦, 國藤 進, 宮原 誠: 高品位映像の評価: 脳波

- を指標とする客観評価法; 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア, Vol.56, No.6, pp.954-962,(2002).
- [16] ISO9241-11 ISO 9241-11: Ergonomic Requirements for office work with visual display terminals (VDT's) - Part 11: Guidance on usability, (1998)
 - [17] ヤコブ ニールセン, ユーザビリティエンジニアリング原論, 東京電機大学出版局, 1999.
 - [18] 大橋 力: マルチメディアと脳; 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol.79, No.4, pp.468-475,(1996).
 - [19] 寺内 文雄, 久保 光徳, 大釜 敏正, 青木 弘行: 針葉樹材のニオイが随伴性陰性変動 (CNV) に及ぼす影響; 材料, Vol.45, No.4, pp.397-402, (1999).
 - [20] Hong J. Eoh, Min K. Chung, Seong-Han Kim: Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation; Industrial Ergonomics, Vol.35, No.4, pp.307-320, (2005).
 - [21] Karel A. Brookhuis, Dick D. Waard: The use of psychophysiology to assess driver status; Ergonomics, Vol.36, No.9, pp.1099-1110, (1993).

(2007年11月1日受付, 2008年3月7日再受付)

著者紹介

上野 秀剛



平成16年岩手県立大学ソフトウェア情報学部卒業, 平成18年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。現在, 奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程に所属。ヒューマンコンピュータインタラクション, ソフトウェア開発におけるヒューマンファクタの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, 各会員。

石田 響子



平成19年同志社大学工学部知識工学科退学。現在, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程に所属。ソフトウェア開発におけるヒューマンファクタに興味を持つ。IEEE 会員。

松田 侑子



平成19年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業。現在, 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程に所属。ヒューマンコンピュータインタラクションに興味を持つ。電子情報通信学会, IEEE, 各会員。

福嶋 祥太



平成 16 年大阪府立大学工学部情報工学科卒業，平成 18 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。現在，富士通株式会社テレコム・ユーティリティソリューション事業本部に所属。

岡田 保紀



昭和 46 年電気通信大学応用電子工学科卒業，同年三栄測器株式会社入社，医用電子機器の研究開発に従事，平成 3 年 NEC メディカルシステムズ研修所所長，平成 12 年から株式会社メディカルシステムズ研修所代表取締役，日本生体医工学会，日本臨床神経生理学会，日本超音波医学会，日本心電学会，日本睡眠学会，各会員。

中道 上



平成 11 年奈良工業高等専門学校専攻科電子情報工学専攻修了。平成 16 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了，平成 19 年同大学博士後期課程修了，平成 11 年住友金属システム開発株式会社（現，アイエス情報システム株式会社）入社。平成 16 年，日本学術振興会特別研究員（DC1），平成 19 年南山大学数理情報学部講師。博士（工学）。Web ユーザビリティ，ソフトウェアプロセスの見える化に興味を持つ。電子情報通信学会，情報処理学会，IEEE，各会員。

大平 雅雄（正会員）



平成 10 年京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科卒業。平成 15 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程修了。同年同大学産学官連携研究員。平成 16 年同大学情報科学研究科助手（平成 19 年より助教）。博士（工学）。ソフトウェア開発におけるヒューマン/ソーシャル・ファクターの研究に従事。電子情報通信学会，情報処理学会，ACM 各会員。

松本 健一



昭和 60 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成元年同大学大学院博士課程中退。同年同大学基礎工学部情報工学科助手。平成 5 年奈良先端科学技術大学院大学助教授。平成 13 年同大学教授。工学博士。エンピリカルソフトウェア工学，特に，プロジェクトデータ収集/利用支援の研究に従事。電子情報通信学会，情報処理学会，日本ソフトウェア科学会，ACM 各会員，IEEE Senior Member。