

氏名	大西 まどか
学位の種類	博士（生涯人間科学）
学位記番号	甲第生7号
学位授与年月日	2018（平成30）年9月23日
学位授与の要件	東京女子大学学位規程第3条第3項第1号
学位論文題目	文字の空間周波数特性と読みやすさ (Spatial frequency properties and legibility of characters)
論文審査委員	主査 教授 小田 浩一 副査 教授 唐澤 真弓 副査 教授 工藤 恵理子 副査 教授 田中 章浩 副査 首都大学東京名誉教授 市原 茂

内容の要旨および審査の結果の要旨

I. 論文内容の要旨

本論文は、文字を読みやすくするにはどのようにデザインすればよいかという実用的で社会的に意義の高い問題について、最近の人間の視知覚に関する基礎研究の知見から解明しようとした論文である。

第1章では、文字のデザインの違いが読みやすさにどのように影響するかということ調べた研究のレビュー、人間が視覚刺激を処理していく視覚情報処理の初期の部分で空間周波数分析を行っているという基本的な研究のレビュー、人間が文字を認識したり読んだりするときに空間周波数分析後の特定の周波数帯域が特に重要な役割を持っている最近の研究のレビューという複数の分野にまたがる先行研究のレビューが行われている。このレビューの中から、人間の視覚情報処理のプロセスが、文字刺激の中にある特定の空間周波数の成分に特に影響を受けるのであれば、その特定の空間周波数の

成分の量が、人間が文字を処理する効率に影響をするはずである、つまり特定の空間周波数の成分から読みやすさを予測できるのではないかという、重要な仮説を得ている。特定の空間周波数帯域とは、アルファベットやカナ文字について3サイクル/文字と定量的に特定されていること、空間周波数刺激に対する人間の感度がコントラスト感度として定量的に測定されていることを第1章のレビューから得ており、これらを使って論文の中で文字の読みやすさを定量的に予測するための枠組みを構成している。

第2章の実証研究1では、一般的に読み易いフォントとして知られているゴシック体の既存書体の中から、字面の大きさと線の太さというデザイン上の重要な2つの要素について、さまざまに異なっている書体を選び、その書体で書かれた文を音読させて読みやすさを比較した。読みやすさの指標としては、読書速度、正読率、閾値文字サイズを使った。この研究は、字面の大きさと線の太さというデザイン上の重要な2つの要素が読みやすさにどのように影響をするのかを定量的に調べたものである。その結果、字面の影響はほとんどなく、線の太さは読める文字の閾値サイズに大きく影響していた。線の太さが読みやすさに与える影響は非線形で、先行研究と同じく最適な線の太さの存在が示唆された。最適値と3サイクル/文字のコントラスト成分の関係、線の太さと3サイクル/文字のコントラスト成分の関係の非線形性などが示唆され第5章の実証研究4で詳しく検討する基礎を作った。

第3章の実証研究2では、第2章で扱わなかった別の次元、文字の色と背景の色のつくる明るさの違い、輝度コントラストが読みやすさに与える影響について検討されている。輝度コントラストを変化させると、3サイクル/文字のコントラスト成分はそれと比例して変化するので、ここでは3サイクル/文字のコントラスト成分が変化したときに読みやすさにどのような定量的な影響があるかを見ている。3%から99%まで0.15対数単位でコントラストを変化させ、文字の大きさを変化させながら、4文字の文節を提示して読み速度の変化を調べた。文字サイズと読書速度の関係は、文字サイズが十分なときには最大速度で一定、ある文字サイズより小さくなると急激に速度が下がるという典型的な曲線を描く。実験の結果、おおまかに言えば、この読書速度曲線は、コントラストが1/2になると文字サイズの軸でおおよそ $\sqrt{2}$ 倍大きくなる方向にシフトすることが分かった。コントラストとサイズシフトの関係は、対数-対数プロットではほぼ直線であることが分かった。この定量的な関係は、3サイクル/文字のコントラスト成分と人間のコントラスト感度の2つから比較的良く予測できることが示され、3サイクル/文

字の成分が文字の読みやすさを定量的に予測できる可能性、そのときに観察者個人の特性はその人のコントラスト感度として組み込める可能性が示唆された。

第4章の実証研究3では、文字を構成するピクセル数、より一般的な用語ではサンプル密度が読みやすさに与える影響を調べ、3サイクル/文字のコントラスト成分を媒介変数として想定することで予測しようとしている。刺激には aceos という形のよく似たアルファベット小文字を用い、1文字を構成するサンプルを6~48 サンプル/文字と変化させながら、コントラスト閾値を測定している。アルファベットの文字を認識するときに重要な空間周波数は3サイクル/文字と言われているので、その周波数情報をサンプルする最小の密度6 サンプル x 6 サンプル (6 ピクセル x 6 ピクセル) から始めて、サンプル数をあげたときに読みやすさがどのように定量的に改善するかを調べたところ、12-16 サンプル/文字まではコントラスト閾値が改善することが繰り返し観察された。3サイクル/文字のコントラスト成分も同様に増加していることが観察され、文字を構成するピクセル数を増やした際の読みやすさの改善は、3サイクル/文字のコントラスト成分の改善を介したものである可能性が示唆された。

第5章の実証研究4では、第2章で文字の読みやすさに組織的に影響を与えていた線の太さについて、3サイクル/文字のコントラスト成分を媒介とした組織的な予測を行うことを狙っている。白い背景に書かれた黒い文字をあたかも矩形波の白黒の波のようにみなすと、線幅は矩形波のデューティ比とみなすことができる。矩形波刺激のデューティ比の変化がコントラスト閾に与える影響は、基本周波数のコントラスト成分からよく予測できるというよく知られた先行研究がある。線の太さを変えたアルファベットの文字刺激のコントラスト閾を測定しながら、同時にアルファベットの3サイクル/文字と同じ基本周波数の矩形波刺激と正弦波刺激についてデューティ比を変えながらコントラスト閾を測定した結果、文字も矩形波刺激もデューティ比によって同じ影響を受けることが分かった。コントラスト閾は、文字の場合は3サイクル/文字、矩形波では基本周波数のコントラスト成分によって良く予測でき、観察者による違いは、観察者ごとに測定した正弦波へのコントラスト感度でよく予測できた。

第6章の総合考察では、4つの実証研究において観察された制御変数と読みやすさ指標の間の量的な関係の中が、文字刺激の3サイクル/文字の空間周波数帯域におけるコントラスト成分という媒介変数によって組織的に予測される可能性をまとめている。個人差については、その空間周波数帯域を処理する観察者個人のコントラスト感度を使

うことができる可能性を指摘している。さらに、それらの量的予測を単純な代数式として記述する試みを行っている。具体的には、最近 Pelli & Bex(2013)が人間のコントラスト感度について包括的に論じるレビュー論文の中で述べている $CAT=k$ (刺激のコントラスト \times 刺激領域 \times 刺激時間が一定) という式を使い、読みやすさ指標である読書視力やコントラスト閾、読書速度のそれぞれについて、刺激と観察者の量的変数のどれをどのように利用すればよいか試みている。最後に、本論文の成果の適用範囲や限界について分析している。

II. 審査の結果の要旨

1. 論文の構成

第1章の先行研究のレビューは、文字デザインの個々の要素を取り上げて、それぞれに条件分析的に読みやすさを検討するという Tinker(1963)からの伝統的な研究の歴史を踏まえ、それが現在まで継続しているといった研究史を説明し、最新の包括的な研究となるものと評価できるであろう。一方、人間の視覚情報処理の基礎研究として文字を扱った研究は、技術的な進歩もあり、最近少しずつ発展しており、その研究の文脈の中で、本論文は文字の読みやすさを説明しようとする研究として位置付けられることが述べられている。研究テーマが大きなものであり、レビューとしては包括的なもので、また2つの別の流れを合流させようという目論見のためにレビューに苦戦していることは否めないが、その後の議論を展開するための先行研究についての紹介と、主要な仮説を説明する最低限の役割は果たしている。

第2章の実証研究1は、申請者の学部時代の卒業研究のデータを、再分析し、科学的に意味のある知見としてまとめあげたものである。照明学会誌に掲載済みの論文であり、意欲的な研究である。日本屈指のフォントデザイナーとデータに基づいて読みやすいフォントをデザインしたいという小田研究室との共同プロジェクトとしてはじまったものである。伝統的な文字の読みやすさ研究として始まったが、細かいデザインの工夫よりも基本的な刺激属性についての基本的で量的な知見を得る研究として展開し、より抽象性を上げた結果、収穫の大きな研究となった。卒業研究時点では、刺激の種類も多く実験回数もデータも大量な上に、既存の文字書体の物理的属性の実測が必要で、十分消化出来ていなかったが、物理的属性が人間にどのように作用するのか、視覚情報処理の空間周波数分析を十分踏まえて分析し直した研究となり、文字の読みやすさ研究に新たな

視点をあたえるものとなった。この研究結果は、文字デザインとして文面のサイズを変更しても読みやすさには影響がなく、線の太さは大きく影響するという科学的知見を文字デザインの世界に与えた意義がある。さらに、デザイン上の細かい工夫でなく、より抽象性の高い要素の影響を調べたことで、特定の空間周波数帯域の成分と観察者のコントラスト感度に関連づける道をつけた重要な研究である。

第3章の実証研究2は、3サイクル/文字のコントラスト成分を組織的に変化させたときの読書関数への影響を調べるという本論文の中で理論的に中核をなす研究となっている。方法論的には Fujita ら(2008)が行った研究と同じであるが Fujita らはコントラストの定量的な影響について踏み込んだ分析をしていない。この実証研究では刺激のレンジを広げ、コントラスト成分と読みやすさの定量的関係を詳しく観察するために変化のステップを Fujita らの半分にし、より踏み込んだ分析が可能となっている。その結果、コントラストと読書関数の位置の関係が対数-対数プロットで直線になることが示された。直線の傾きからコントラストと文字サイズが反比例の関係であること、その関係は観察者のコントラスト感度や視力に依存する可能性が示唆されるという重要な知見をもたらした。この研究は日本視覚学会から発表賞を与えられており、日本視覚学会の機関誌 *Vision* に講演要旨という査読のない論文枠で掲載された。本審査段階で、根本的に再分析して、より理論的に強化したものを国際誌に投稿中である。

第4章の実証研究3は、文字を構成するピクセル数が読みやすさに与える影響が、3サイクル/文字のコントラスト成分を媒介にしたものである可能性を示唆するものである。もともとは視力が低下したロービジョンの人が高精細のディスプレイを読みやすいと評価したエピソードから着想を得て、計画されたものである。研究結果は、文字の認識や読みにとって、重要な要因が3サイクル/文字のコントラスト成分であれば、細かいピクセルが解像できないロービジョンの人でも恩恵を受けられる可能性を示したものであり、高解像度ディスプレイにおける文字表示について重要な示唆を与えている。申請者の修士論文の研究として収集されたデータを、2014年の国際会議でポスター発表した際に、この研究の先駆者でありかつロービジョン研究で高名な Bailey 博士から賞賛と激励を受け、そのコメントを踏まえた上で、文字の認識に重要な3サイクル/文字のコントラスト成分が読みやすさを予測するという本論文の統一的な仮説のもとに分析、考察しなおしたものである。

第5章の実証研究4は、実証研究1で大きな効果のあった文字の太さについてより踏

み込んだ研究である。線の太さを白黒の波のデューティ比とみなすことにより、これまで線幅研究で繰り返されてきた混乱を避けることに成功している。さらに白黒半々のデューティ比では3サイクル/文字のコントラスト成分が最大になるため、閾値で評価した場合には、読みやすさが最大になるという理論的な最適値を明確に示すことができた。実験結果は、数少ない量的な先行研究とも一致しており、また、観察者ごとのコントラスト感度を測定し、個人差の説明にも成功している。文字デザインで読みやすさに大きく影響する線の太さの量的影響について明快な知見を与えた価値は高い。

第6章では、4つの実証研究が、文字の読みやすさが、文字の3サイクル/文字のコントラスト成分という空間周波数特性によって予測できる可能性を支持していることに加え、Pelli & Bex (2013)の新しい理論的な枠組みを本論文で得られた結果に適用し、実証データについて量的に予測するための数式を与える試みを行っている。文字のよみやすさを最新の視覚情報処理の理論的枠組みから説明しようという、本論文の困難な取り組みに一定の成果をあげているということを示す考察となっている。

2. 論文の特徴

上述したように、文字デザインの要素が読みやすさにどのように影響するかという条件分析的に行われてきた比較的デザイン寄りの実用的な視覚研究と、人間の視覚情報処理がどのように文字を処理しているのかという最も基礎的な視覚研究の2つの研究領域のいずれにとっても新しい知見を与えようとしていることが本論文の大きな特徴である。文字の認識が人間の視覚情報処理が初期段階で行っている空間周波数的な分析の影響を受けるために、文字デザインの読みやすさが、その3サイクル/文字のコントラスト成分という1つの媒介変数によって予測できる可能性と、観察者のコントラスト感度や視力に影響されて個人差が予測できる可能性を、4つの実証研究を通して、複数の指標を使って複眼的に示したことに特徴がある。また、多くの文字デザインの研究は、読みやすさを読者の主観にゆだねることが多いが、本論文では一貫して音読させたり、文字認識させたりして、読み速度や正答率を比較してパフォーマンスをもとに評価している点にも特徴がある。さらに、文字デザインと文字の読みやすさについて、3サイクル/文字のコントラスト成分が統計的に有意に影響していることが分かったという段階の説明にとどまらず、3サイクル/文字のコントラスト成分や文字のサイズという量的な変数が読みやすさ指標にどのように量的に影響するかまで踏み込んで考察してい

る点にも特徴がある。その際には、最新の量的な枠組みを利用しながら、個々の実証データにあてはまる具体的な予測式を試作している。この試みは、19世紀から心理学で知られている Ricco-Piper の法則や Bloch の法則と 1950 年代以降の人間の視覚系の MTF 分析と空間周波数解析ならびにコントラスト感度の研究を連続的に扱いながら、文字を読みやすくするという日常的に実用性の高い課題について答えを与えようとしている点も特筆すべきであろう。

3. 論文の評価

上述の 1 と 2 にて具体的に評価してきたように、文字のデザインがどのように読みやすさに影響を与えるかという実用性の高い問題には、細かなデザインの工夫について 1 つずつ条件分析をするという研究の歴史が繰り返されている中で、人間の視覚情報処理の初期過程の特性の最新の知見を取り入れて、3 サイクル/文字のコントラスト成分という 1 つの媒介変数（正確には個人差を説明する観察者のコントラスト感度を入れて 2 つの媒介変数）が、読み速度や文字認識のためのサイズの閾値やコントラスト閾、読書関数のシフトなどの読みやすさの指標の良く予測するという仮説を立てて、4 つの実証研究からそれを検証し、かつ予測式を試作したことは評価できる。個々の実証研究は学会や専門家の間でも好評価を得ているが、実証実験ごとに軸の異なる変数を扱いながら、それらをまとめて 1 つの論として包括的にまとめあげた努力についても高く評価できる。さらに洗練すべき部分はあるものの、結論として本論文は課程博士に十分適切なものと評価する。

4. 最終試験の概要

7月11日午後5時から2時間、公開形式で最終試験が実施された。申請者が1時間論文の概要について発表し、その後審査委員から、以下のような論文の内容に関わる主要な点について質疑応答が行われた。これらのうちの5つは英語による質疑応答であった。

- ・文字の読みやすさ評価と注意や疲労の関係
- ・デューティ比と白黒比とどちらが影響するか
- ・刺激作成に用いた画像サンプリングの方法によるアーチファクトの可能性
- ・漢字仮名交じり文の実験について漢字とかな文字の混じった日本語らしさを生かし

た考察の可能性

・「…から～を説明可能」ということを主として重回帰分析の結果に基づいて論じているが、その要因を直接操作することができれば、それがもっとも強力な検証方法だと考えられる。たとえば **critical band** 成分量などは直接操作することはできないのだろうか？

- ・読みやすさ評価における視認性と可読性の関係
- ・タイプライター時代の研究とコンピュータ時代の研究の違い
- ・既成の書体を使う実験とオリジナルの文字刺激をつくって実施する実験の違い
- ・読むという行動における個人差や文化の影響
- ・文字幅の定義におけるデューティ比の意味
- ・人間が読むときには必ずしも1文字ずつ読んでいないこととの関係
- ・すべての実験刺激はモノクロだが、文字に色をつけた場合も同じかどうか
- ・文字刺激を使って深層学習させた場合の低層の細胞の空間周波数チューニング
- ・読みやすい文字の形についてこの研究から言えること
- ・定量的予測に使った $CAT=k$ の式とコントラスト感度の関係
- ・読みやすさが文字認識に主要な成分に比例するのなら、なぜ成分が最大の文字があまり使われないか

これらの質疑に対して、申請者は論文の限界や今後の検討の可能性を考慮に入れた適切な回答をすることができたと評価され、最終試験は合格とされた。

なお、外国語試験（英語）は、口頭で行われた。各審査委員からの英語の質問に対して、質問者に了解可能な形で英語で回答していた。また試験とは別に、英語の各審査委員からの外国語の質問に対しては、これまで申請者が海外の学術会議で多くの発表を行ってきた実績も外国語能力についての肯定的な評価となった。研究分野における英語能力は十分であるとして、外国語試験も合格であることが確認された。

以上、本大学院人間科学研究科生涯人間科学専攻「カリキュラムポリシー」及び「ディプロマポリシー」を鑑み、博士学位論文審査と最終試験の結果により、学位授与に値すると、審査委員会で決定した。