

# 車いすの移動負担を表す心理的色彩量の推定法

末継 理恵、辻 紘良

携帯電話や無線 LAN など通信技術の普及を背景に、歩行者を対象とする ITS の研究開発が多く進められている。このような中で、著者らは歩行者支援 ITS の一つとして車いすを対象とし移動負担を最小とするナビゲーションシステムの研究を行ってきた。その一環とし、車いすの移動に伴う道路区間の負担度を道路の段差や勾配など移動障害要因から推定する方式の研究を進めてきた。ここではこの研究を継承しつつ、次のステップとして、車いす利用者にナビ表示画面から移動負担が最小となる経路を直感的に伝達することにより、的確に経路の移動負担状況を把握できる表示方式を提案する研究を行うものとした。このため、生理的疲れにつながる移動負担量とそれに相応しい心理的色彩量の関係性を明らかにすることを主なテーマとするとともに、移動障害情報から街路小区内（リンク）を移動するときの疲れに相応しい色彩量を推定する方式を提案することを目標とした。

## 1. はじめに

昨今、情報処理技術や移動通信技術の進展を背景に高度交通システム（ITS=Intelligent Transport Systems）の開発と普及が進められている。従来は自動車交通を対象とした ITS の研究開発が中心であったが、最近は携帯電話や無線 LAN など通信技術の普及を背景に、歩行者を対象とする ITS の研究開発が多く進められている。このような中で、著者らは歩行者支援 ITS の一つとして車いすを対象とし移動負担を最小とするナビゲーションシステムの研究を行ってきた。このなかで、車いすの移動に伴う道路区間の負担度を道路の段差や勾配など移動障害要因から推定する方式の研究を進めてきた。ここではこの研究を継承しつつ、次のステップとして、車いす利用者にナビ表示画面から移動負担が最小となる経路を直感的に伝達することにより、的確に経路の移動負担状況を把握できる表示方式を提案する研究を行うことにした。このため、生理的疲れにつながる移動負担量とそれに相応しい心理的色彩量の関係性を明らかにすることを主なテーマとするとともに、移動障害情報から街路小区間（リンク）を移動するときの疲れに相応しい色彩量を推定する方式を提案することを目標とした。

ここでは言葉による予備的な実験に引き続き車いすの移動に伴う負荷を与える有負荷実験を行い心理的な色彩量との関連性を分析した。

## 2. 生理的負担と心理的色彩の関連性に関するこれまでの研究

これまで、聴覚と味覚などの感覚と視覚的色彩との間に関連性があるか否かを分析する、いわゆる広義の共感覚についての研究がいくつか行われている。たとえば、聴覚と色彩（色相）について、簡単なメロディとテンポの組み合わせを用意し、聴覚刺激として与えたときに連想する色彩（色相）が統計的に有意であることが確かめられている<sup>1)</sup>。他にも、嗅覚と色彩<sup>2)</sup>、

味覚と色彩<sup>3)</sup>、触感覚と色彩との関連性も統計的に有意であることが確認されている。一方、生理的な負荷と色彩（色相）との関連性について研究されたものとして、重さと色相に関する Taylor<sup>4)</sup>や笠岡らの研究がある<sup>5)</sup>。笠岡らは色によって感じる重さが異なるか否か、色相と見かけの重さの関係、および持ち上げたときの重さとの関係を PSE 法（主観的等価点）により測定している。しかし、生理的疲れに直接関わったものではなく、著者らの研究目的に十分対応するとはいえない。これまで資料調査した範囲内では生理的疲れと色彩との関連について研究されたものは見当たらず、この分野での研究はあまり行われていないと推測される。

### 3. 研究の目的

これまでに著者らは車いすの移動に伴う道路区間の負担度を上腕の積分筋電位 (iEMG) を指標として道路の移動障害情報から推定する方式を立案し、実街路を対象に検証を行ってきた<sup>6-10)</sup>。これにより移動負担量を 10 数%の誤差で推定できることを確認している。さらに移動障害情報をもとに複数の代替経路の中から負担度が最小となる経路を提示できることを示している。

そこで、次の研究課題として、車いすナビにおける情報提供のため適切な経路表示方式を提案することを取り上げている。つまり、車いすの移動負担が最小となる経路を利用者に表示画面から直感的に伝達することにより、的確に経路の移動負担状況を把握できる表示方式を提案することをめざしている。このため、移動負担度と色彩の定量的な関連性を実験的に把握することを目的とする。

### 4. 研究の方法

研究の第 1 段階として、これまでに移動負担の大小、いわゆる“疲れ”感の大小と視覚的な色彩感との間に関連性があるか否かについておよその傾向を把握している<sup>11)</sup>。ここでは移動負担は無負荷とし、言葉で負担の大小を提示している。まず、移動負担を表す適切な言葉の抽出を心理調査により行い、その言葉から連想される色相を色彩心理実験により収集した。

今回は研究の第 2 段階として、実際に車いすで移動する実験を行い、そのときの生理的負担量（筋電位）、物理的負担量（移動時間）、心理的負担量（NASA-TLX）、疲労感、色彩情報（HVC）を収集し、疲労度と色彩との関連を調べている。ここで得られたデータにもとづき移動負担から色彩量を推定する方法論を求めている。

### 5. 言葉による車いすの移動負担から想起される心理的色彩の把握実験

研究の第一段階として無負荷（言葉）による移動負担感と心理的色彩との関連性を調べている。なお、この研究結果はすでに発表済み<sup>11)</sup>であるので、ここでは主な結果のみを以下に示す。

#### 5. 1 色彩調査実験の方法

色彩心理実験を行い、車いすで移動するときの疲労や負担度とそれを心理的に感ずる色との関連性を調査した。色彩心理実験では、車いす移動時の心理的な疲労や負担感を与える負荷として予備実験で抽出した言葉を提示した。また、それら負担語に対応する相応しい色彩として、マンセル表色系の色相環から抽出した 10 色の色相を提示し、その中から最も適する色相を選

択してもらった。

移動負担感について性別や年齢別の意識の違いを調べるため、被験者は 10 代後半から 60 代までの幅広い年齢層を対象に調査を行った。被験者は性別、年齢に依らず、主に学生、大学職員、家族を対象とし、各層 30 名以上のサンプル数を収集することを目的に 244 人について調査した。

## 5. 2 移動負担感に相応しい色彩の心理調査

### (1) 全体

被験者全体 (244 名) の集計結果では、「疲れる」「つらい」に相応しい色相では 5R が 122 人と最も多く、次いで 5RP の 62 人が多かった。この上位 2 色相で 184 人 (75.4%) と大半を占めていた。「少し疲れる」「少しつらい」に相応しい色相では、回答数が最も多かったのは 5Y の 96 人、次いで 5YR の 63 人であった。この 2 色相で 159 人 (65.2%) と過半を占め、それ以外の色相を選択した回答数と比べ違いがあった。一方、「疲れない」「つらくない」に相応しい色相では 5GY が 68 人、5PB が 48 人とこの 2 色相を選んだ人 (118 人、47.5%) が多かったものの、全体的に選択色の幅が広がり、回答が分散する傾向が見られた。

### (2) 層別

男女別に層別して集計した結果、「疲れる」「つらい」に相応しい色相では男女ともに 5R が最も多く、次いで 5RP が多くこの 2 色相で大半を占めていた。同様に、「少し疲れる」「少しつらい」に相応しい色相においては、男女とも回答数が最も多かったのは 5Y、次いで 5YR であり過半を占めていた。その他の色相を選択する回答数は少なかった。また、「疲れない」「つらくない」に相応しい色相では男女とも色相の分散する傾向が認められたが、その分布は同傾向であり両者の差はあまりなかった。

一方、年代別に集計した結果「疲れる」「つらい」に相応しい色相として 5R、次いで 5RP が多く、「少し疲れる」「少しつらい」に相応しい色相として 5Y、次いで 5YR が優勢的に選択される傾向が見られた。「疲れない」「つらくない」に相応しい色相では、5GY 次いで 5PB が多かったが、年代全般に色相の分散する傾向が認められた。しかし、どの段階においても年代の違いによる色相選択の差はあまりないことが認められた。

このように、移動負担の度合いを表す 3 つの段階でそれぞれ選択される色相の分布は異なるが、各段階で優勢色が存在し、それら色相に集中することが明らかになった。また、どの段階においても年代や男女別の違いによってあまり差のないことが分かった。

さらに色の選択として移動負荷の小さい方から大きい方に向かいマンセル色相環に沿って反時計回り (G→Y→R)、時計回り (G→B→R)、その他変則的な回りの 3 つの色循環層の存在が確認された。全体では反時計回りが多く 152 人 (62.2%) と半数以上を占めた。これに対し、時計回りは 52 人 (21.3%) と少なかった。選択色の組み合わせの中で最も多かった組み合わせは反時計回りの 5PB→5Y→5R (19 人) であった。次いで時計回り 5GY→5PB→5R (18 人) という組み合わせが多かった。

色循環の傾向は、男女別・年齢別の組み合わせ別に見みると、大半の層で半数以上が反時計

回りを選択し、次いで時計回り、その他の順に多いことがわかった。全体を通して色循環は移動負担量のどの段階においても性別・年齢別による色相選択の差はあまり大きくないことが確認された。

## 6. 車いすの移動に伴う実負担から想起される心理的色彩の把握実験

研究の第2段階として、実際に車いすで移動したときの移動負担量とそこから想起される心理的色彩との関連を調査した。

### 6. 1 実験の概要

#### 6. 1. 1 実験内容

車いすの移動時に障害となる3つの大きな要因は段差、縦断勾配、横断勾配などである。この要因の中で、今回は段差、縦断勾配の2要因を実験対象とした。実道路または実験装置を用いてそれら要因の条件を段階的に変えて移動負担量を計測した。移動負担量は、生理的負担量（筋電位）、物理的負担量（移動時間）、心理的負担量（NASA-TLX）、疲労感、心理的色彩情報（Hue、Value、Chroma）の5種類を取り上げ、全実験においてこれらデータを収集した。

#### (1) 実験日時

2009年1月～5月

段差： 1月30日、2月13日、20日の10時～17時

縦断勾配： 2月27日、3月9日、18日、27日、4月10日、30日、  
5月9日、23日の9時～18時

#### (2) 実験場所

段差： 大学研究棟内の廊下、そこに段差実験装置を設置

縦断勾配： 名古屋市平和公園内「安らぎの園」および「メタセコイア広場」周辺の坂

#### (3) 実験条件

実験条件として、段差、縦断勾配の障害条件を段階的に変え、それぞれ2回繰り返し計測した。段差は高さを、縦断勾配は傾斜角度を段階的に変えた（表6.1）。

表 6.1 実験条件

負担要因	距離	傾斜角度、高さ
段差	1m（登り上がるまで）	0mm～70mm まで10mm 間隔
縦断勾配	10m, 20m, 30m, 40m, 50m	0°, 2°, 4°, 6°, 8°

#### (4) 実験装置および計測方法

縦断勾配は、過去の実験で使用した実験条件に適した勾配、距離を有する坂道を利用した。路面は、アスファルト、石、タイル等であった。段差実験は、過去に作成した段差実験装置を使用した。合板を重ねることにより高さを0～70mmに変更できる。表面は木材

のまま使用した。

筋電位は上腕三頭筋を対象に ADInstruments 社のデータ収録システム (PowerLab 4/20) を用いて計測した。移動の疲れに相応しい心理的色彩情報は日本色研事業社の色表「色彩の定規」を使用して目視により色彩要因 (H,V,C) を回答してもらった。心理量 (NASA-TLX/AWWL) は質問紙を用意し回答を得た。物理量 (移動時間) は筋電位の収録データを用いて 1 実験条件の開始時刻と終了時刻の差から求めた。

#### (5) 被験者

被験者の層別サンプル数を表 6.2 に示す。被験者数は、段差が計 12 名、縦断勾配が計 10 名であった。なお、被験者は、日常的に車いすを利用していない一般健常者とした。過去の研究から、車いす利用者と同程度以上の運動能力を有していれば、被験者として問題ないとされているため、今回の被験者でも車いす利用者の代わりになったものとする。

## 6. 2 負担感に関する分析

### (1) iEMG/iEMG\*

車いすで縦断勾配を移動中の筋電図を図 6.1 ①に示す。車いすをこいだときに出力が大きくなるパケット状波形を成している。しかし、筋電図は車いすをこぎ、移動しながら計測するため、上体の動きに伴い発生する運動生理量の電位や衣服等から発生する静電位によるドリフト、あるいはコード端点に接続したバイオセンサー貼り付け部のコードの揺れ動きに伴う皮膚部のゆれによるドリフト筋電の発生など、様々なノイズやドリフトがデータに含まれる。そこで、これらのうちドリフトを除去するため、まず筋電図の元波形に移動平均をかけ図 6.1 ②を求め、次いで元波形からこの曲線を引くことにより、ドリフトを除いた筋電位波形を得た。その結果、図 6.1 ③に示すドリフト除去後のきれいな波形を得ることができた。筋電図の面積積分は積分筋電位 (iEMG) と呼ばれ、移動負担を表す基本的な生理量となる。しかし、筋電量はセンサー取り付け位置やセンサーの感度に依存し異なる値をとる。つまり、感度依存で実験条件によって異なる不安定な電位量を計測することになる。そのため、ここでは移動障害が無負荷時一定距離 (縦断勾配 : 0% 10m、段差 : 0mm) を被験者が車いすで移動したときの iEMG を基準値とし、その値で同じ被験者が実験条件に従って計測した iEMG を除した値を基準化積分筋電位 (iEMG\*) と称し、使用した。この iEMG\* は同一感度状態で測定した基準値を標準値とし相対化するため、感度依存を除いて負荷の大小による

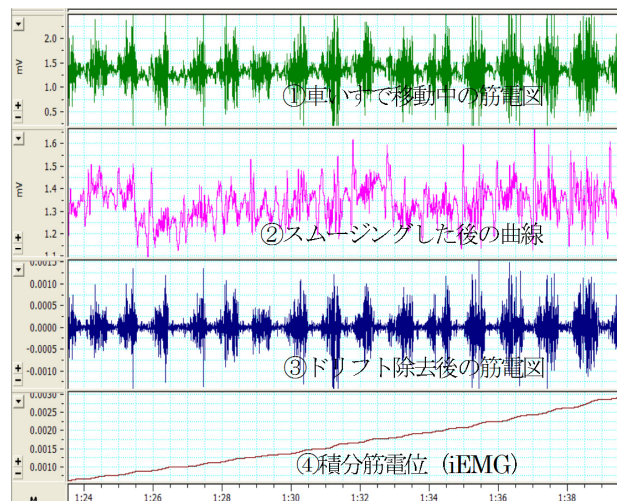


図 6.1 車いすで移動中の筋電図の例

負担量の大小を端的に表しているものといえる。

## 6. 2. 1 障害要因別の計測結果

### (1) 段差

図 6.2 は移動障害である段差の高さと基準化積分筋電位 (iEMG\*)、心理負担量 (AWWL)、疲労感との関連を示す。横軸が段差の高さを、縦軸は iEMG\*、AWWL、疲労感を表している。図より段差が高くなるに従い、iEMG\*、AWWL、疲労感は増加することがわかる。増加の傾向は比例的であった。この傾向は、

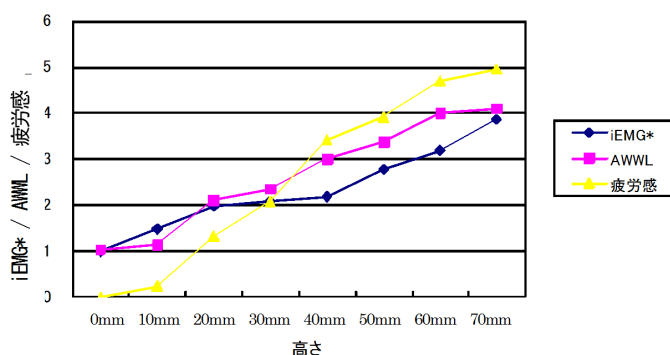


図 6.2 段差の iEMG\* / AWWL / 疲労感

男女別においても同様であった。なお、移動時間は男女別で大きな差は見られなかった。段差を乗り越える時間は短くて、長さ 1m と固定した区間の移動時間に比べさほど小さくなく差異が出なかったためと推測される。

### (2) 縦断勾配

図 6.3、6.4 に縦断勾配の角度と基準化積分筋電位 (iEMG\*) および心理負担量 (AWWL) の被験者全体の平均との関連を示す。横軸は角度、縦軸はそれぞれ iEMG\* および AWWL である。移動距離がパラメータとなっている。図より縦断勾配の角度が増加すると iEMG\* および AWWL も増加することがわかる。また距離が増加すると同様に移動負担の増加することがわかる。角度の増加に対し移動負担はおおよそ指数関数的に増加していることがわかる。距離の増加に対しては比例または指数関数的な増加傾向が認められる。およそべき乗関係にあるとみられる。これらの傾向は、他の移動負担量である物理的負担量 (移動時間) および疲労感についても同様にみられた。

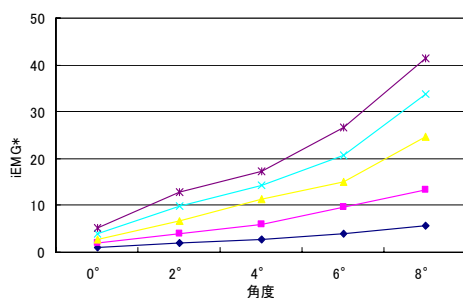


図 6.3 縦断勾配と iEMG\* (平均)

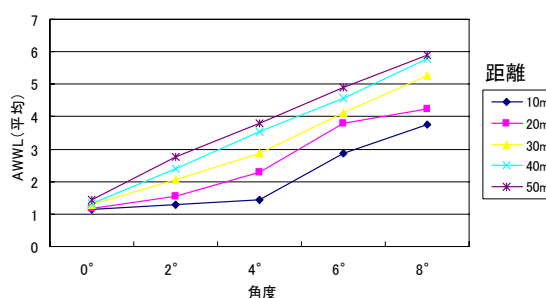


図 6.4 縦断勾配と AWWL (平均)

## 6. 2. 2 層別化したときの計測結果

### (1) 男女別

図 6.5 は縦断勾配の角度と男女別に層別化した後の基準化積分筋電位 (iEMG\*) の平均との関連を示す。黒い線が男性、赤い線が女性を表している。図より、縦断勾配の角度と移動負担度との間には 6.2.1 (2) で述べたと同様、指数関数的またはべき乗的な増加傾向が認められた。これらの傾向は他の負担要因である AWWL、移動時間および疲労感についても同様に見られた。なお、層別化による特徴的なこととして移動距離によらず、男性は女性に比べ iEMG\* が小さい値を示した。また、AWWL においても、8° の場合を除いて男性が女性に比べ低い値を示した。この傾向は、移動時間、疲労度の場合も同様であった。これらのことから、男性は一般的に筋力が大きいので、同じ障害要因なら女性に比べ相対的に負担が少なく感じるものと推測される。

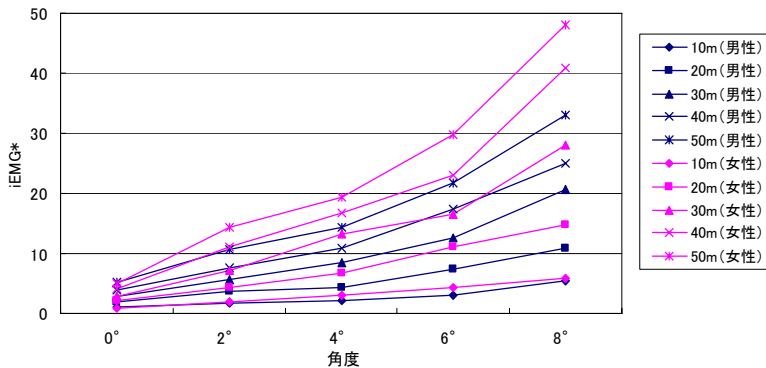


図 6.5 縦断勾配と iEMG\* (平均) —男女別—

### (2) 色循環層別 (反時計回り、時計回り、その他)

5.2 で述べたように無負荷実験により色循環は反時計回り、時計回りその他変則的な回りの 3 層に分類されることが明らかにされている。この分類に従って被験者を層別化し、移動障害要因と移動負担量との関係を求めると図 6.6 に示す結果が得られた。どの層においても縦断勾配変量 (角度) の増加に伴い iEMG\* は増加している。層別化後の被験者数は反時計回りが 5 名、時計回りが 1 名、その他が 4 名であった。いずれの層も統計的 평균を求めるにはサンプル数が不足であることは否めない。

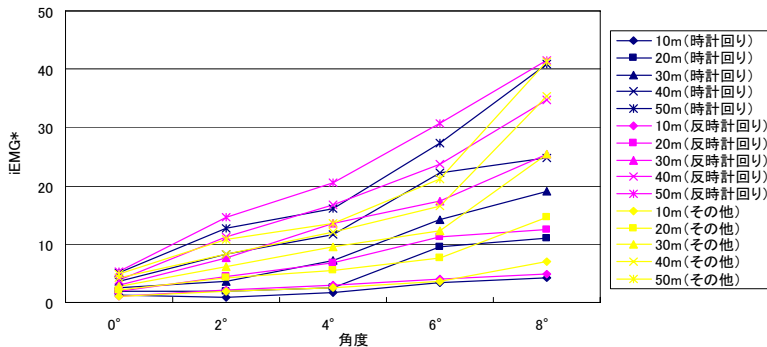


図 6.6 縦断勾配と iEMG\* (平均) —色循環層別—

### 6. 3 心理的色彩の計測結果

$L^*a^*b^*$ の値と  $iEMG^*$ との関係を調べるため、被験者ごとに  $iEMG^*$ と  $a^*$ 、 $b^*$ それぞれの分布を調べた。計測結果から縦断勾配の角度の増加に伴い、 $iEMG^*$ は増加することがわかったので、角度ごとの分布を求めた。図 6.7 に  $a^*$ 、図 6.8 に  $b^*$ と  $iEMG^*$ の関係を表す分布を示す。 $a^*$ 、 $b^*$ が増加するにつれ  $iEMG^*$ も大きな値を示すことがわかる。このことより移動負担が増加するに従い、心理的色彩が青色系から赤色系、または緑色系から黄色系へと分布が遷移していくことがわかる。

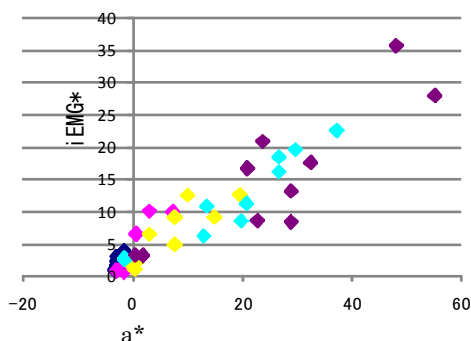


図 6.7  $a^*$ と  $iEMG^*$ の分布図（被験者⑧）

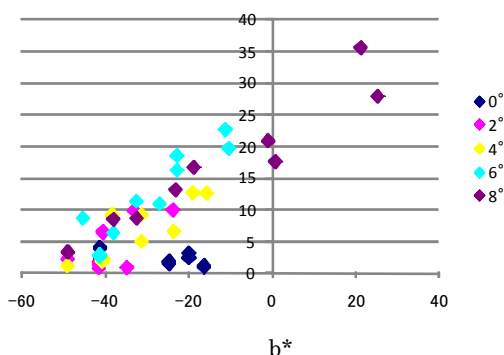


図 6.8  $b^*$ と  $iEMG^*$ の分布図（被験者⑧）

さらに詳しく  $L^*a^*b^*$ の値と  $iEMG^*$ との関係を調べるため、 $a^*b^*$ 面上に  $iEMG^*$ の分布する様子を示した。一例とし、被験者⑥、⑧のサンプル分布を図 6.9,10 に示す。図 6.9 の被験者⑥は緑色系から黄色系を通り赤色系（マンセル表色系における反時計回り）に変化していくことが分かる。一方、図 6.10 の被験者⑧は青色系から紫色系を通り赤色系といったマンセル表色系における時計回りの変化を示している。以上のことから、 $iEMG^*$ の増加が心理的な色彩に影響することが確認された。また、無負荷での実験と同様に、反時計回り、時計回り、その他といった色循環層の存在することが確認された。



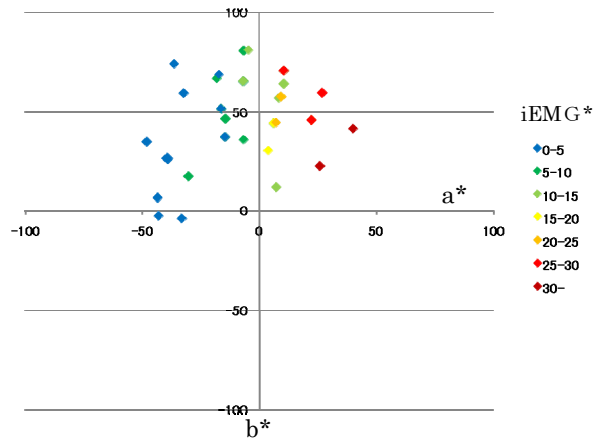


図 6.9 色の分布（反時計回り、被験者⑥）

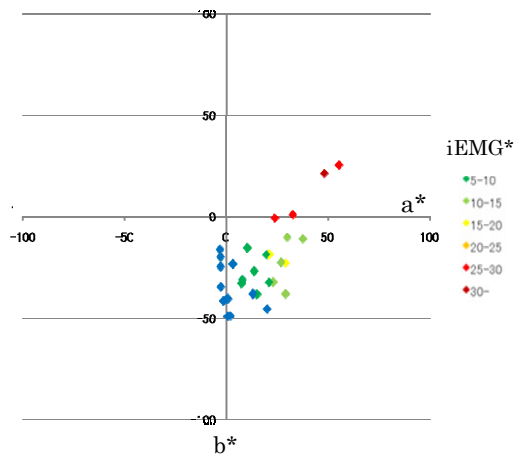


図 6.10 色の分布（時計回り、被験者⑧）

図 6.11 に被験者⑥、⑦の  $iEMG^*$  と  $a^*$ 、 $b^*$  との関係を示す。図から被験者により面の方向は異なるが  $a^*$ 、 $b^*$  の増加または減少に伴い増加的な曲面を形成する傾向のあることが確認された。

このことは  $a^*b^*$  面上において  $iEMG^*$  は連続的に変化していることを示しており、かつ等高線を成して、同じ負担度でも異なる色彩を想起することがあるものと推測される。これは、 $a^*$ 、 $b^*$  を変数とする曲面式で  $iEMG^*$  を説明づけることが可能であることを示している。他の被験者についても同様な面分布を示すことが確認されている。

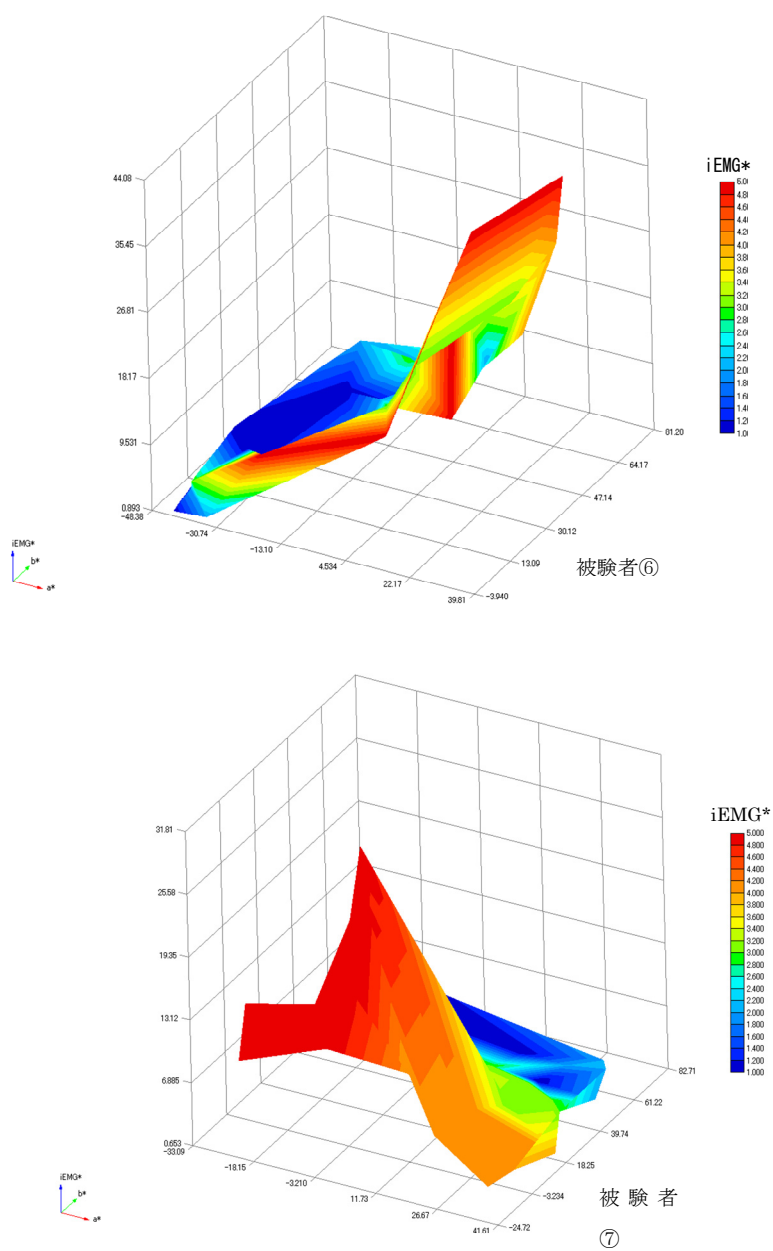


図 6.11  $a^*$ ,  $b^*$ と  $iEMG^*$ の関連図

## 7. 基本コスト推定式の設定

### 7. 1 移動負担量の推定式 (iEMG\*)

ここでは車いすの移動負担量として4種の移動負担量の中から、右上腕三等筋の生理的負担量である iEMG\*を最も“疲れ”を説明づける変数であるとして採用し、移動障害要因から iEMG\*を推定する基本式を求めることにした。なお、この推定式には移動障害要因の変量となる角度に加え、移動障害の存在する距離も説明変数として取り入れることにした。

iEMG\*の基本コスト推定式を以下の通り設定する。実験データを用いた分布図より、縦断勾配 (角度) に対しては指数関数的な関係が認められ、距離に対しては比例的関係とともにやや指数関数的に増加することが認められることから、べき乗的增加傾向を示すと推測された。また、段差の高さに対しては iEMG\*は比例的な関係が認められている。これらのことから、下記の関数モデル式を採用することにした。

縦断勾配:  $Y = \alpha_1 X_1^{\alpha_2} e^{\alpha_3 X_2}$ , ここで  $X_1$ : 距離(m),  $X_2$ : 角度(°),  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ : 係数

段差:  $Y = \alpha_0 + \alpha_2 X_2$ , ここで  $X_2$ : 高さ(mm),  $\alpha_0, \alpha_2$ : 係数

上記のモデル式を適用し、実験データを用いて非線形重回帰分析を行った。被験者別および被験者全体の結果を表 7.1、7.2 に示す。縦断勾配では被験者別の寄与率が1名を除き0.8以上を示し、被験者全体でも0.81と高い値が得られた。一方、段差は被験者全体の寄与率は0.562と低い、被験者別ではほとんどの被験者が0.7以上あり、最高では0.906を示した。

表 7.1 縦断の被験者別基本コスト推定式

被験者	重回帰式	寄与率 (R <sup>2</sup> )
①	$Y = 0.086X_1^{1.234}e^{(0.202X_2)}$	0.901
②	$Y = 0.331X_1^{0.841}e^{(0.156X_2)}$	0.868
③	$Y = 0.199X_1^{0.93}e^{(0.233X_2)}$	0.931
④	$Y = 0.078X_1^{1.176}e^{(0.225X_2)}$	0.941
⑤	$Y = 0.019X_1^{1.204}e^{(0.273X_2)}$	0.745
⑥	$Y = 0.052X_1^{1.185}e^{(0.252X_2)}$	0.971
⑦	$Y = 0.023X_1^{1.228}e^{(0.351X_2)}$	0.932
⑧	$Y = 0.019X_1^{1.447}e^{(0.216X_2)}$	0.956
⑨	$Y = 0.126X_1^{0.994}e^{(0.202X_2)}$	0.965
⑩	$Y = 0.086X_1^{1.327}e^{(0.197X_2)}$	0.951

表 7.2 障害要因別の全体の基本コスト推定式

障害要因	重回帰式	寄与率 (R <sup>2</sup> )
縦断	$Y = 0.088X_1^{1.06}e^{(0.223X_2)}$	0.81
段差	$Y = 1.107 + 0.0287X_2$	0.562

## 7. 2 層別化後の移動負担量推定式

データを層別化したときの回帰精度向上の効果を調べた。

### (1) 男女別

表 7.3 に男女別に層別化後の移動負担量推定式を示す。縦断においては男性 0.882、女性 0.971 と高い数値が得られ、かつ層別化により被験者全体の 0.81 に比べ精度が向上した。段差は男女とも寄与率が男性 0.558、女性 0.671 と層別化前に比べ高くはならなかった。

表 7.3 段差、縦断勾配の基本コスト推定式 ー男女別ー

被験者			重回帰式	寄与率 (R <sup>2</sup> )
性別	男性	縦断	$Y=0.091X_1^{1.095}e(0.203X_2)$	0.882
		段差	$Y=1.104+0.030X_2$	0.558
	女性	縦断	$Y=0.082X_1^{1.12}e(0.238X_2)$	0.971
		段差	$Y=1.087+0.026X_2$	0.671

### (2) 色循環層別 (反時計回り、時計回り、その他)

表 7.4 に色循環層別 (反時計回り、時計回り、その他) に層別化後の移動負担量推定式を示す。縦断においては反時計回り 0.845、時計回り 0.956 と層別化前に比べ高い数値が得られた。段差はどの色循環においても寄与率が反時計回り 0.647、時計回り 0.541 と低く、精度は変わらなかった。

表 7.4 段差、縦断勾配の基本コスト推定式 ー色循環層別ー

色の循環層別			重回帰式	寄与率 (R <sup>2</sup> )
色の循環	反時計回り	縦断	$Y=0.128X_1^{1.092}e(0.195X_2)$	0.845
		段差	$Y=1.099+0.026X_2$	0.541
	時計回り	縦断	$Y=0.019X_1^{1.447}e(0.216X_2)$	0.956
		段差	$Y=1.286+0.078X_2$	0.759
	その他	縦断	$Y=0.078X_1^{1.063}e(0.257X_2)$	0.836
		段差	$Y=1.088+0.031X_2$	0.647

## 7. 3 心理的色彩量 a\*、b\*から移動負担量を推定する式

心理的色彩と移動負担量との関係を求めるため次の分析を行った。心理的色彩 L\*a\*b\*のうち、明度 L は屋外実験であることから天候や時刻による日照が不安定であり推定しがたいため、今回は検討の対象から外すこととし、a\*および b\*のみを取り上げた。移動障害要因別に心理的色彩量 a\*、b\*から移動負担量 (iEMG\*) を与える推定式を導き出すこととした。実験データに基づく iEMG\* (以降 Y とする) と a\*、b\* の関連分布図から Y は a\*、b\* の 2 変量に対し単調増加的な曲面を形成することが認められた。そこで移動負担量を求める推定モデル式として、以下の式を設定した。

$$Y=a_0+a_1a^{*2}+a_2a^*b^*+a_3b^{*2}+a_4a^*+a_5b^* \quad (\alpha \text{ はいずれも係数})$$

上記式を実験データに適用し非線形回帰分析を行い得られた回帰式を表 7.5 に示す。色彩量から移動負担量を与える個人別の基本的なコスト推定式を与えている。この式は  $a^*$ 、 $b^*$  を変数とする 2 次の曲面式を与えているので、実分布の単調増加的な曲面傾向を捉えている。一部の被験者を除き、寄与率は 0.75 以上、最高 0.936 と比較的高い重回帰係数が得られている。

表 7.5 心理的色彩量から移動負担量を与える重回帰式

重回帰式	被験者	寄与率 ( $R^2$ )
$Y=28.234+0.004a^{*2}+0.002a^*b^*+0.006b^{*2}+0.051a^*-0.765b^*$	①	0.774
$Y=12.842+0.006a^{*2}-0.012a^*b^*-0.002b^{*2}+0.597a^*+0.056b^*$	②	0.432
$Y=19.111+0.022a^{*2}+0.01a^*b^*-0.001b^{*2}+0.866a^*+0.283b^*$	③	0.841
$Y=0.673+0.005a^{*2}-0.002a^*b^*+0.001b^{*2}+0.298a^*+0.065b^*$	④	0.803
$Y=3.144+0.003a^{*2}+3.15E-04a^*b^*-4.902E-05b^{*2}+0.106a^*+0.006b^*$	⑤	0.776
$Y=15.021+0.008a^{*2}-0.003a^*b^*+4.96E-04b^{*2}+0.635a^*-0.089b^*$	⑥	0.885
$Y=12.389-0.001a^{*2}+0.003a^*b^*+0.001b^{*2}-0.095a^*-0.205b^*$	⑦	0.376
$Y=3.695-0.013a^{*2}+0.012a^*b^*-0.003b^{*2}+1.005a^*-0.098b^*$	⑧	0.936
$Y=7.868+0.003a^{*2}-0.003a^*b^*-0.001b^{*2}+0.309a^*+0.088b^*$	⑨	0.607
$Y=10.23+0.006a^{*2}+0.005a^*b^*+1.32E-04b^{*2}+0.405a^*+0.176b^*$	⑩	0.903

#### 7. 4 色彩量と移動負担量の関係式から心理的色彩量 $a^*$ 、 $b^*$ を求める方法

本研究の最終目標は移動負担量が既知のときに心理的色彩量を精度よく求めることにある。7. 3 で得られた移動負担量推定式を用いて色彩量  $a^*$ 、 $b^*$  を求めようとしても、1 つの式で 2 つの未知数が存在することとなり  $a^*$ 、 $b^*$  を決定することはできない。そこで、限定的ではあるが移動負担量  $iEMG^*$  と心理的色彩量  $a^*$ 、 $b^*$  に関する実験データが与えられている場合について  $a^*$ 、 $b^*$  を推定する方法を提示する。

実測値データを  $Y_i$  ( $a_i^*$ ,  $b_i^*$ ) ( $i=1, 2, \dots, n$ ) とする。移動障害要因から推定される移動負担量を  $Y_e$  とし、 $Y_e$  に近い実測値データを所定個抽出する。つまり両者の差を  $\Delta Y_i$  とすると、 $\Delta Y_i$  の小さい方から所定個数抽出する。差を  $Y_e$  で基準化し、それを  $\Delta Y_i^*$  とする。 $\Delta Y_i^*$  は目標値  $Y_e$  への遠近を表しているので、その逆数を基準化して平均をとるさいのウエイト  $\omega_i$  とする。この  $\omega_i$  をウエイトとして、計測データの色量 ( $a_i^*$ ,  $b_i^*$ ) ( $i=1, 2, 3$ ) に適用し、加重和を求める。これが第 0 近似の  $Y_e$  に対する心理的色彩量となる。

次に、移動負担量と色彩量の回帰式を  $Y(a^*, b^*)$  とすると、第 0 近似の色度 ( $a_{eo}^*$ ,  $b_{eo}^*$ ) による  $Y$  の値は  $Y(a_{eo}^*, b_{eo}^*)$  となる。このとき  $|Y_e - Y(a_{eo}^*, b_{eo}^*)|$  が誤差となっている。そこで、ここを初期解とし、 $Y(a^*, b^*)$  面上で  $\Delta E = |Y_e - Y(a_{eo}^*, b_{eo}^*)|$  を最小とする点を調べ、最小となる点 ( $a_{opt}^*$ ,  $b_{opt}^*$ ) を求める。求解は最急勾配法による。

この点は 1 点とは限らず複数有り、回帰曲面上の曲線を成す。つまり、回帰曲面上の等高線

を成す。これを  $Y_{opt}$  曲線と呼ぶことにする。次に  $Y_{opt}$  曲線上の  $(a^*, b^*)$  面への投影点を  $(a^*_{opt}, b^*_{opt})$  とすると、初期解  $(a^*_{eo}, b^*_{eo})$  との距離が最小となる点が最も確からしい点となる。

ここで実測データは個人別であり一般性がないが、層別化後の被験者全体の実験条件別の値  $(a^*_i, b^*_i)$  と共通する実測データであるとすれば、一般性が成り立ち人に限定されず適用できることになる。

## 11. 結論

車いす利用者に最も疲れない経路を表示伝達するにあたり、直感的に経路を把握することを目的に、車いすの移動負担量と心理的色彩量の関連性を実験分析した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 有負荷実験において、縦断勾配や段差など移動障害要因の量が増加すると生理的移動負担量 (iEMG\*) など各移動負担量も増加する傾向が確認された。縦断勾配においては両者に指数関数的な関係が認められた。障害の存在する距離に対しては、やや線形的ではあるがべき乗的に増加する傾向が認められた。一方、段差については線形的な関係が認められた。これらの関係は男女別、色循環層別においても同様であった。
- (2) 上記について非線形重回帰または線形重回帰分析を行った結果、縦断勾配においては個人別、全体、層別いずれの場合でも高い精度の回帰式が得られた。段差については個人別では比較的良好な精度の線形回帰式が得られ。
- (3) 心理的色彩量  $a^*$ 、 $b^*$  と iEMG\* のデータ分布を求めたところ、被験者によって向きは異なるが、分布は3次元曲面を成し  $a^*$ 、 $b^*$  の増加とともに分布も増加することが確認された。また、 $a^*$ 、 $b^*$  単独軸上の分布からは  $a^*$ 、 $b^*$  が増加すると、iEMG\* も増加する傾向にあるものが確認された。有負荷実験においても3つの色循環層が確認された。3層の中では反時計回りが最も多かった。
- (4)  $a^*$  および  $b^*$  を説明変数、iEMG\* を従属変数とする関数式の候補モデルを立案し、重回帰分析を行ったところ一部の被験者を除き比較的高い回帰精度が得られた。このなかから、 $a^*$ 、 $b^*$  の2次多項式であって3次元曲面を形成する候補モデル式を最適な推定式であるとして選出した。
- (5) 研究第1段階で得られた結果を取り入れ、データを男女別および色循環層別に層別化し、上記推定式に適用したところ、それぞれ推定精度が向上した。したがって、無負荷実験で得られた色循環の層別化は有効であることが確認された。
- (6) 最終的には iEMG\* の推定値から  $a^*$ 、 $b^*$  を求めることが必要となるが、上記の重回帰式では直接求められないので、この重回帰式と対応する実験データの存在することを前提とし、心理的色彩量を求める方法論を提示した。これにより、移動負担量 iEMG\* が与えられると心理的色彩量  $a^*$ 、 $b^*$  を求めることが可能となることが示された。

上記の結果より、道路の移動障害情報（移動障害地図）が与えられると、街路小区間（リンク）の移動負担量 (iEMG\*) が推定され、ここからさらに心理的色彩量  $a^*$ 、 $b^*$  を求める道筋が付けられたことになる。

## 12. あとがき

今回の研究により車いすの経路案内システムにおいて、表示画面の経路に疲れ度合いに最も相応しい色づけが可能となることが示された。これにより、直感的に疲れない経路を車いす利用者が選択することが可能となるといえる。今後は、統計的に十分な量のデータ収集実験を行うことが必要となる。また、移動障害情報から街路小区内（リンク）を移動するときの疲れに相応しい色彩量を推定する方式（アルゴリズム）をより完全な形に作り上げ、その精度を検証することが必要であると考えます。

## 謝辞

2008年から2010年にかけて10数回にわたって屋外計測実験を行ってきました。実験の実施、被験者、その後のデータ分析など、辻ゼミ生他多くの方々に多大なる支援を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 矢島礼, 郭洋, 齋藤美穂: 音楽と色の組み合わせによる心理的效果、日本色彩学会誌, No. 32, pp. 134-135, 2008
- 2) 三浦久美子, 堀部奈都香, 齋藤美穂: 色と香りの感情次元における調和性、日本色彩学会誌, No. 32, pp. 44-45, 2008
- 3) 山本寿, 福田后紀, 増田久仁子: 食品の味からイメージされる色、同志社女子大学生活科学, Vol. 40, pp. 74-77, 2006
- 4) Taylor, C.D.: Visual perception versus visual plus kinesthetic perception in judging colored weight, Journal of general psychology, vol. 4, pp. 229-246, 1930
- 5) 笠岡愛, 村上心: 色彩が及ぼす軽重感について、日本色彩学会誌, vol. 34 Supplement, pp. 54-55, 2010
- 6) 増岡孝之, 野澤成裕, 辻紘良, 川澄未来子: 車いすの経路誘導システムにおける移動負担度の推定、日本オペレーションズ・リサーチ学会中部支部 第31回中部支部研究会発表会, pp. 9-12, 2004
- 7) 辻紘良, 増岡孝之, 野澤成裕, 川口理恵, 川澄未来子: 車いすの移動に伴う生理負担量の計測、愛知淑徳大学現代社会学部論集, 第10号, pp. 69-82, 2005
- 8) 川口理恵: 車いすの移動に伴う生理負担量の推定—コスト推定法の検討と検証—、愛知淑徳大学大学院現代社会研究科修士論文, 2005
- 9) 辻紘良, 野澤成裕: 車いすの経路誘導システムにおける生理的リンクコストの推定、2006年度第33回OR学会中部支部研究発表会アブストラクト集, pp. 32-39, 2006
- 10) H. Tsuji, N. Nozawa: Estimation Model of Physiological Traveling Load for a Wheelchair Navigation System, 14th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS' 07), 6p, 2007, Beijing
- 11) 継理恵, 川澄未来子, 辻紘良: 車いすの移動負担量と色覚の関連性分析、日本色彩学会誌, vol. 34 Supplement, pp. 84-85, 2010
- 12) 財団法人規格協会: JIS ハンドブック 61 色彩, 2009
- 13) 日本色研事業株式会社: 色彩の定規, 2007