

## 車いすの移動に伴う疲れ指標の比較評価

## Comparative evaluation of fatigue indexes caused by driving a wheelchair

辻 紘 良\*, 野 沢 成 裕\*\*

Hiroyoshi TSUJI, Narihiro NOZAWA

## 要 旨

移動通信技術の進展を背景に歩行者を支援する高度道路交通システム（ITS=Intelligent Transport Systems）の研究開発が進められている。その一環とし、著者らは最も疲れが少ない経路へ車いすを案内するナビシステムの研究を行ってきた。このシステムを構築するにあたり、車いすの移動に伴う疲れを表す指標が必要となる。ところが、一般に車いすを漕ぐときの疲れを直接表す量は存在しないので、間接的に疲れを表す指標を設定し適用することになる。

これまで著者らは、生理的疲れを表す上腕の積分筋電位を用いてきた。しかし、この指標が適切であるか否かは十分検討されていなかった。そこで、ここでは、車いすの移動に伴う疲れを表すと見られる複数の指標を取り上げ、実験収集したデータを用いて相互の関連性を統計的に分析し、これにより疲れ指標としての妥当性を検討した。あわせて、車いすのナビシステムとして成立するための要件を考慮し、適切な疲れ指標であるための比較評価を行なった。

キーワード：車いす ナビゲーション・システム 疲れ指標 積分筋電位

## 1. まえがき

移動通信技術の進展を背景に歩行者を支援する ITS の研究開発が進められている。その一環とし、著者らは最も疲れが少ない経路へ車いすを案内するナビシステムの研究を行ってきた [辻ら、2003、2004、2005a、2005b、2007、2011、2013]。このシステムを構築するにあたり、車いすの移動に伴う疲れを表す指標が必要となる。ところが、一般に車いすを漕ぐときの疲れを直接表す量は存在しないので、間接的に疲れを表す指標を設定し適用することになる。

これまで著者らは、生理的疲れを表す上腕の積分筋電位を用いてきた。しかし、この指標が適切であるか否かは十分検討されていなかった。そこで、ここでは、車いすの移動に伴う疲れを表すと見られる複数の指標を取り上げ、実験収集したデータを用いて相互の関連性を統計的に分析し、これにより疲れ指標としての妥当性を明らかにする。あわせて、車いすのナビシステムとして成立するための要件を考慮し、適切な疲れ指標であるための検討を行うものとする。

## 2. 疲れ指標の先行研究

街路区間を車いすで移動するときの負荷を表す指標としてこれまで提案されているものには、移動の心理的

\* 愛知淑徳大学人間情報学部 tsujih @ asu.aasa.ac.jp

\*\* 岡崎市役所

負荷あるいは身体的負荷を取り入れた指標がある。南ら [2002] は、車いす利用者の選択できる経路が車いす利用者の身体状況に応じて、路上障害物や施設水準によって限定されることに着目し、移動水準を設定している。さらに、対象エリアから通行可能な道路を抽出し、そこを最小移動負荷水準でいく経路として最適経路を求めている。木村ら [2000] は、身体的・心理的負担要因を取り上げ、車いすによるルート走行実験を行ってデータを収集し、層別階層分析法 (AHP 法) を用いて負担要因のウエイトを求めている。縦断勾配や横断勾配は勾配 (%) と距離 (m) のレベルで各々複数に水準化されている。長瀬ら [2003] は、上腕筋電図から車いすを漕ぐときの負担度を求める方式を採用している。

上記のように、これまでの研究は心理的・身体的評価量から障害要因や経路要因にウエイトを付ける方式が採られていて、街路区間を移動するときの疲れ量を感覚的疲れ感と直接関連付けるものではなかった。

一方、車いすを対象に経路情報を提供する案内システムの開発が行われている。林ら [1999] は UTMS プロジェクトにおいて専用携帯端末装置と交差点に設置した専用装置の間で赤外線通信を行い目的地までの経路を概略図で提供するシステムを開発し、実街路で実験を行っている。国土交通省では「自立移動支援プロジェクト」において車いす向けの経路情報提供システムの開発を行い、モデル都市において実証実験を行っている [林ら, 2009]。山本ら [2010] は2つの通信方式を組み合わせたフェロモン情報を用いた車いす支援システムを提案している。しかし、これらのシステムは移動負担量が不明で、経路の選択方式については明らかではない。

著者ら [2004, 2005b] は、身体負荷の心理的な負担要因を取り上げ、メンタルワークロードの主観的な評価法として定評のある NASA-TLX [三宅, 1993] を適用し、街路小区間の車いすの移動負担度を求めている。本方法は一対比較法に基礎がおかれていて各要因のウエイトが心理的評価値に基づいて求められる。また、著者ら [2005a, 2007] は上腕筋電位 (EMG) から積分筋電位を求めそれを車いす移動時の疲れ量、つまり経路コストとみなして最小疲れ経路を求めている。

上記のように、これまでいくつかの車いす移動時の疲れ指標が提示されているが、著者らの研究も含め、疲れ指標が単体で定義されかつ分析されているため、疲れを表す指標として適切か否か判定し難いところがあった。

### 3. 研究の目的

疲れを表すと見られる複数の指標を取り上げ、指標間の関連性を統計的に分析し、疲れを表す指標としてこれらが妥当であるか否かを比較検討する。一方、ナビシステムとして成立するためには、移動疲れ指標を他の移動負荷要因に基づいてよい精度で推定可能であることが必要であり、また経路の移動疲れを推定可能であることも必要である。

そこで、これらの観点も含め、適切な疲れ指標としての比較評価を行い、あわせて最も妥当な疲れ指標を抽出するものとする。そのため、感覚的な疲れを表す指標として疲れ感を取り上げ、実験データを収集し、他の疲れ指標との関連性を比較評価する。さらに、経路の探索アルゴリズムに適した加算可能な最も妥当な疲れ指標を抽出する。

### 4. 研究の方法

これまでの研究を参考に、車いすの移動に伴う疲れを表す指標をいくつか選択し、かつ疲れ指標として妥当と思われる新たな指標を導入し、感覚的疲れ感との関連性を分析する。選択した疲れ指標が感覚的疲れと対応するか否かを判定するため、直感的な疲れを表す指標を設けデータを収集する。設定した指標が妥当であるか否かを定量的に評価するため、車いすの移動障害要因別に、移動負荷条件の異なる小区間 (リンク) を用意し、

被験者が車いすで移動するときの、各疲れ指標に関する実験データを同時に収集する。このデータを用いて、統計的に分析し、疲れ指標間の関連性を求める。また、各指標を疲れ感と比較検討することにより疲れ指標としての妥当性を評価する。

## 5. 疲れ指標

車いすの移動に伴う疲れを表す指標として広範な視点から比較評価するため、心理量、生理量、物理量から指標を一つずつ取り上げる。また、疲れの基準となる量として感覚量としての疲れを直感的に表す指標を一つ取り上げる。

生理量についてはこれまでの著者らの研究を継承し上腕の筋電位 (EMG = Electromyogram) を用いる。EMG は移動負荷の時間軸上の大きさを表しているが累積量である疲れを表していないので、時間積分した積分筋電位 (iEMG) を用いた。iEMG は具体的に次のように求めている。車いすで移動中の EMG を図 1 ①に示す。筋電波形は静電位ドリフトやセンサー部位の変化に伴うノイズ等様々な変動要因がデータに含まれる。これらを除くため、まず筋電位の元波形に高次の移動平均をかけ図 1 ②を求める。ついで元波形 (図 1 ①) からこの曲線を引くことにより、図 1 ③に示すドリフト除去後の波形を得る。この波形を面積積分すると積分筋電位 (iEMG) が求められる。これは図 1 ④の単調増加するグラフで与えられる。グラフの右上端点が該当する実験条件の iEMG を与えている。ここで、さらに筋電位の生理的応答の個人差やセンサー感度の違いなどを取り除くため、所定区間 (無負荷で 10m) を移動したときの基準積分筋電位で 1 実験条件時の iEMG を除した基準化積分筋電位 (iEMG\*) を用いている。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、被験者の個人特性に依存しない負荷の大小による負担量の増減比を表している。

心理量についてはこれまでの研究を継承し動作時の心理的負担を求める NASA-TLX を採用する。ただし、車いすの移動に伴う疲れ計測に適するよう修正した調査方法を採用した [三宅, 1993]。NASA-TLX はメンタルワークロードの主観的な評価方法として定評がある。しかし実験時に一対比較を行うため調査負荷が大きくて実際的ではない。そこで三宅らの発案による 1 回の回答で移動負担量が求められる修正方式 (NASA-TLX/WTL) を適用した。NASA-TLX は設問内容が宇宙パイロットの操作に伴う精神的疲労を把握する目的で設定されているので、ここでは設問は車いすを漕ぐときに感ずる移動負担感を表す内容に変更した [辻ら, 2005b]。

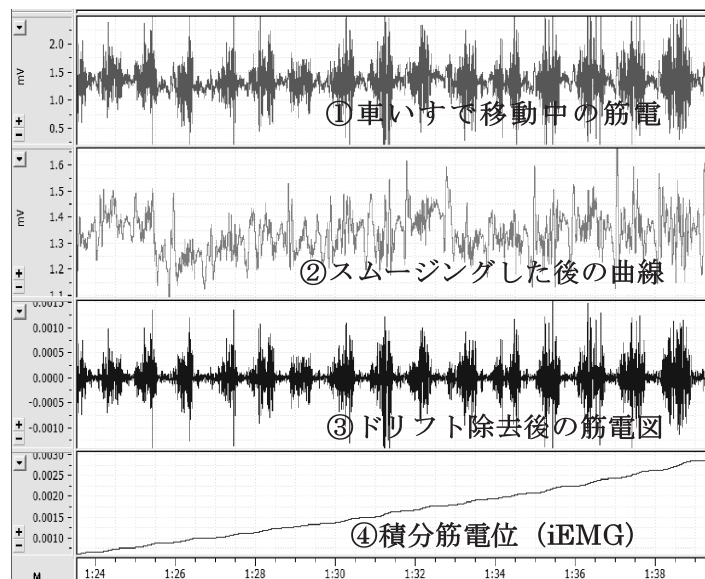


図 1 車いすで移動中の筋電図の例

物理量については小区間を移動するに要する所要時間を用いた。所要時間は長いほど移動負担が大きいと体験的に把握している疲れ量に相当する。所要時間は1実験条件ごとに計測した生理量計測データから求めた。

感覚量は1実験区間を漕ぎ終わったときに感ずる疲れ量を感覚尺度で回答した量を疲労度と定義し使用している。つまり疲れている度合いをそのまま直感的に答えた量を用いている。尺度は「疲れていない」から「大変疲れた」までの9段階とした。

## 6. 移動負担の計測実験

疲れ指標の比較評価のため、移動障害要因(縦断、横断、段差)を車いすで移動するときの移動疲れ指標(EMG、NASA-TLX、所要時間、疲労度)の計測実験を行った。実験は移動負荷要因(縦断勾配、横断勾配、段差高さ、移動距離)を段階的に変えて移動疲れ指標を計測した。EMGと所要時間はAD Instruments社のBioLabを用いて計測した。心理量、疲れ感は1実験ごとに意識調査票に回答してもらい収集した。

### (1) 実験装置および場所

縦断勾配は実験条件に適した勾配、距離を有する坂道を探し適用した。横断勾配は傾斜角度を変更可能な実験装置を作成した。段差は合板を重ねることで高さを可変とした。

縦断勾配：名古屋市平和公園内の坂から選択(縦断勾配 $0^{\circ}$ ～ $8^{\circ}$ 、距離10m～30m)

横断勾配：実験装置(幅90cm×奥行き600cm、横勾配 $0^{\circ}$ ～ $14^{\circ}$ 可変)、大学構内

段差：実験装置(段差0～70mm可変)、棟内廊下

### (2) 使用した車いすの仕様

JIS規格(JIS T9201)に準じた手動式の車いすを使用した。

仕様：全長85cm、座面高さ45cm、後輪直径57cm

### (3) 計測内容

移動障害要因は縦断、横断、段差の3要因とした。これら要因の移動負荷要因を段階的に変えて移動疲れ指標を計測した。詳細を表1に示す。

生理量(EMG)は車いすで移動中の右上腕三等筋にボタンセンサーを貼り付け計測した。計測機器は樹脂ケースに入れて台車に乗せ、車いすの移動と並走させた。心理量(NASA-TLX)はゴール地点に到達した直後に調査用紙を渡し、質問に回答してもらった。所要時間はEMG計測ファイルから算出した。

### (4) 被験者

被験者は、20代の学生6名(男性3名、女性3名)、60代の男性1名の計7名であった。被験者は、日常的に車いすを使用していない一般健常者である。強い勾配や高い段差など、移動負荷要因の大きい実験が含まれているため、実験条件・被験者によっては完走できずデータを一部収集できない場合もあった。そのようなケースもデータとして使用した。

表1 実験条件

移動負荷要因	距離	勾配、高さ
縦断勾配(上り)	10 m、20 m、30 m	$0^{\circ}$ 、 $2^{\circ}$ 、 $4^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$
横断勾配(右下がり)	5 m、10 m、20 m	$0^{\circ}$ 、 $2^{\circ}$ 、 $6^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$ 、 $14^{\circ}$
段差(上り)	登り上がるまで	0～70 mm まで10 mm 間隔



## 7. 疲れ指標の分析

実験収集したデータを用いて移動疲れ指標の分布実態ならびに疲れ指標間の関連性を統計的に分析した。分析には EXCEL 2008、SPSS 18 など統計解析ソフトを用いた。

### 7.1 移動負荷と疲れ指標の関連

#### 7.1 分布図

移動障害要因として縦断を取り上げ、移動負荷要因（縦断勾配、移動距離）と疲れ指標の関連性を知るため両者の分布図を求めた。その結果、移動負荷要因が増加すると各疲れ指標はいずれも指数関数的に増加することがわかった。一例として縦断勾配が増加したときの iEMG\* が変化する様子を図 2 に示す。図は被験者全員の平均でかつ基準化したデータを用いている。縦断勾配に替え距離を変数としたときも指数関数的に増加する傾向は同じである。

移動障害要因が横断のときも同様な傾向にあり、移動負荷要因（横断勾配、移動距離）が増加すると疲れ指標はいずれも指数関数的に増大する。この傾向は、段差の場合も同じで、移動負荷要因（段差高さ）が増加すると疲れ指標はいずれも指数関数的に増大する。これらより、各疲れ指標は移動障害要因によらず、移動負荷量が増加するといずれも指数関数的に増加することがわかる。

一方、被験者個人別に疲れ指標と移動疲れ指標の関連を分析した結果、移動障害要因によらず上記の全員平均の場合と似た傾向が得られた。この傾向は被験者によって差異があり、性別によってもやや異なる。疲れ指標が男性に比べ女性はやや大きめに出る。これは上腕筋力の大きさの違いによると推察される。

図 3 は縦断について被験者平均の NASA-TLX と iEMG\* の関連性を、移動距離をパラメーターとして示している。NASA-TLX と iEMG\* の間に比例的な関連性のあることが確認される。増加の傾向が移動距離別にグループ化されていることがわかる。これは NASA-TLX が心理的な尺度であるため、生理的な疲れ量の増加に対し移動距離が同じという条件のなかの相対的な心理的疲れ感を答えていることによるとみられる。その点、段差では NASA-TLX と iEMG\* の間には直線性が高く段差高さによるグループ化の現象は認められない。

### 7.2 疲れ指標間の相関

7.1 の分析結果、4 種の疲れ指標は移動負荷要因が増大すると、いずれも指数関数的に増加するという傾向を示した。したがって 4 種の疲れ指標は互いに同様な増加傾向を示し、疲れ指標の間で比例的關係性を持つと見

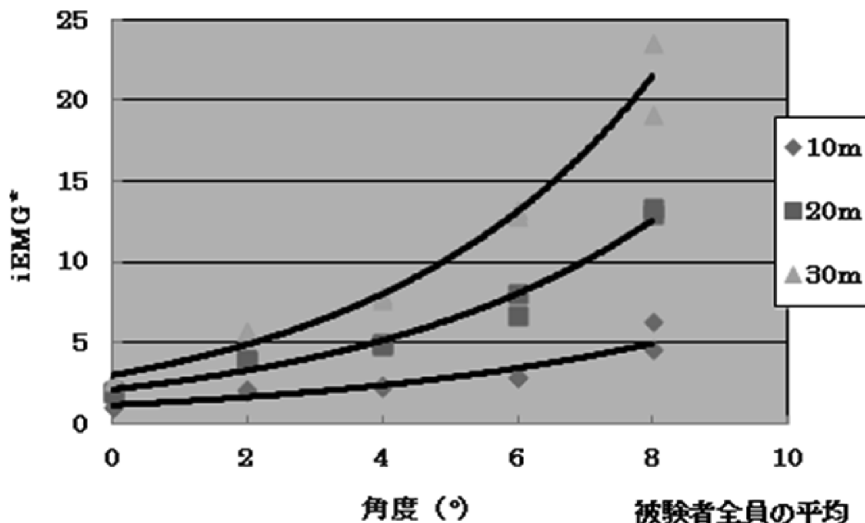


図 2 縦断勾配と iEMG\* の関連

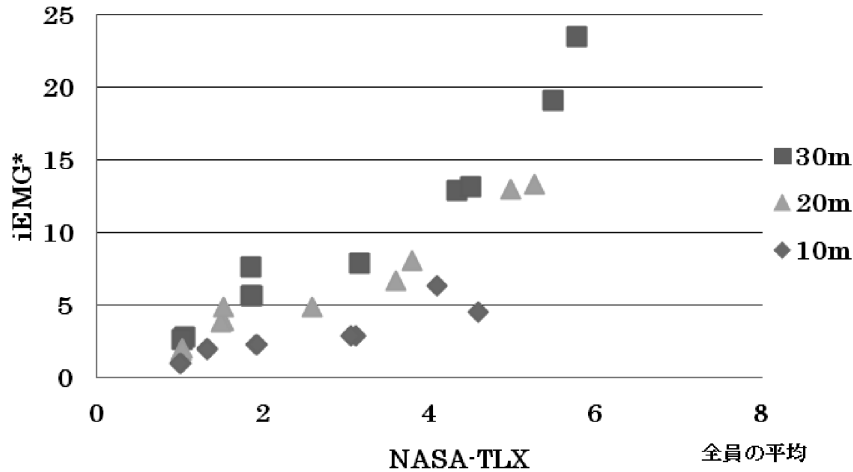


図3 iEMG\* と疲労度の関係—移動距離別の例

られる。そこで、移動負荷条件が同じ場合の4種の疲れ指標間の相関を求めてみた。

### 7.2.1 全員の平均

移動負荷要因として縦断を取り上げ、被験者全員の平均値について各疲れ指標間の相関係数を求めた。その結果を表2に示す。表より疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせでも0.75以上と高く、互いに疲れ指標の増減に対し比例的関係にあることがわかる。また、すべての組み合わせで相関係数は有意水準1%を満たして疲れ指標間に確かな相関の存在が確認される。

感覚的疲れ感を表す疲労度とiEMG\*の相関係数は0.84であり高い相関を示す。両者の線形回帰の決定係数 $R^2$ は0.65とやや小さくてその分布図(図4)もばらつきはやや見られるが関係性は安定している。一方、NASA-TLXと疲労度の相関は0.96と極めて高く、その分布図も安定していて極めて関係性の強いことがわかる。

次に移動障害要因として横断と段差を取り上げ、上記縦断と同手順で被験者全員の平均値について各疲れ指標間の相関係数を求めた。この結果、横断については疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせでも0.71以上とかなり高く、互いに疲れ指標値の増減に対し比例的関係にあることがわかる。iEMG\*と所要時間の相関は0.86とかなり高く、その分布図も安定している。また、すべての組み合わせで相関係数は有意水準1%を満たして、疲れ指標間に確かな相関のあることが確認される。

段差については疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせも0.76以上と極めて高く、互いに疲れ指標値の増減に対し比例的関係にあることがわかる。iEMG\*とNASA-TLXの相関は0.80とかなり高く、その分布図も安定している。また、すべての組み合わせで相関係数は有意水準1%を満たして、疲れ指標間に確かな相関のあることが確認された。

### 7.2.2 個人別

移動負荷要因として縦断を取り上げ、被験者1について各疲れ指標間の相関係数を求めた。その結果を表3に示す。表より疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせでも0.73以上と高く、互いに疲れ指標の増減に対し比例的関係にあることがわかる。また、すべての組み合わせで有意水準1%を満たして疲れ指標間に確かな相関の存在が確認される。

iEMGとNASA-TLXの相関係数は0.77であり高い相関を示す。線形回帰の決定係数 $R^2$ は0.61とやや小さくてその分布図もばらつきはやや見られるが関係性は安定している。NASA-TLXと疲労度の相関は0.98と極めて高く、その分布図も安定していて極めて関係性の強いことがわかる。

表 2 疲れ指標間の相関一縦断

全員の平均				
	iEMG*	NASA-TLX	所要時間	疲労度
iEMG*	1	0.846**	0.969**	0.840**
NASA-TLX	0.846**	1	0.757**	0.967**
所要時間	0.969**	0.757**	1	0.782**
疲労度	0.840**	0.967**	0.782**	1

\*\* 相関係数が1%水準で有意(両側)

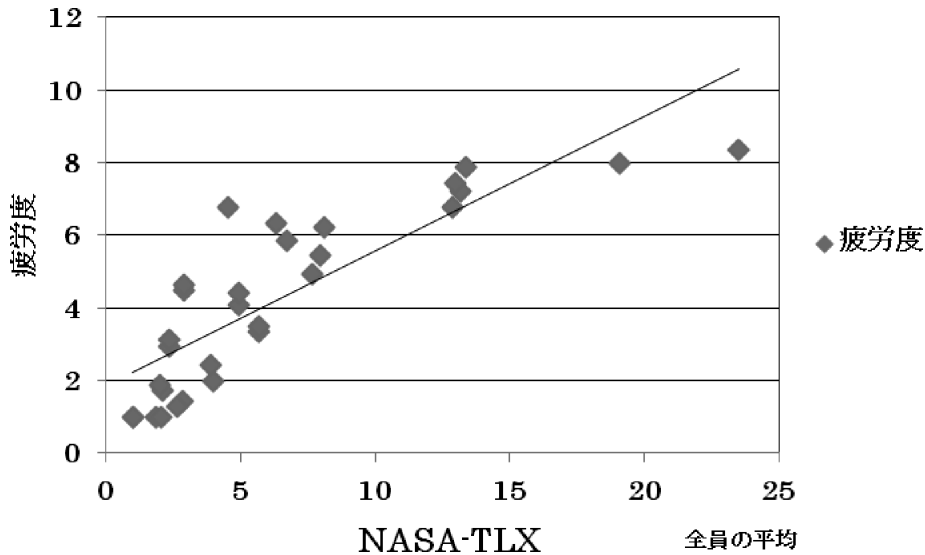


図 4 NASA-TLX と疲労度の関連

移動障害要因として横断と段差を取り上げ、上記縦断と同手順で被験者 1 について各疲れ指標間の相関係数を求めた。横断については疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせでも 0.71 以上とかなり高く、互いに疲れ指標値の増減に対し比例的関係にあることがわかる。iEMG\* と所要時間の相関は 0.94 と極めて高く、その分布図も安定している。また、すべての組み合わせで有意水準 1% を満たしていて、疲れ指標間に確かな相関のあることが確認された。

段差については疲れ指標間の相関係数はいずれの組み合わせでも 0.77 以上と極めて高く、互いに疲れ指標値の増減に対し比例的関係にあることがわかる。iEMG\* と疲労度の相関は 0.84 とかなり高く、その分布図も安定している。また、すべての組み合わせで有意水準 1% を満たしていて、疲れ指標間に確かな相関のあることが確認された。

### 7.3 疲労度との関連性からみた疲れ感指標の相関

感覚的疲れ(疲労度)が疲れ指標のなかで最も車いす移動に伴う負荷を示すのに適切であると判断される。それに依拠すれば、疲労度と相関の高い疲れ指標ほど移動に伴う疲れを表す指標として適切であるといえる。そこで、疲労度を仲立ちとして、移動疲れ指標別や移動障害要因別の相関係数の大きさを対比し、順位を付けてみた。

#### 7.3.1 全員の平均

被験者全員の平均について疲労度と他の疲れ指標との相関を対比した結果を求めた。それを疲れ指標別の棒グラフで表したものを図 5 に示す。これから、疲労度との相関では NASA-TLX が移動障害要因によらず全般的に相関の高いことがわかる。ついで、iEMG\* が全体的に大きい相関を示す。NASA-TLX は相関係数がい

表3 疲れ指標間の相関（縦断：個人）

被験者1				
	iEMG*	NASA-TLX	所要時間	疲労度
iEMG*	1	0.771**	0.979**	0.775**
NASA-TLX	0.771**	1	0.739**	0.985**
所要時間	0.979**	0.739**	1	0.733**
疲労度	0.775**	0.985**	0.733**	1

\*\* 相関係数が1%水準で有意（両側）

ずれも0.93以上あり疲労度と極めて強い関係にある。iEMGの相関係数は段差0.98、縦断0.84、横断0.71の順となっていて、横断はやや低い値を示している。所要時間は他の疲れ指標に比べてやや相関が低い。

同様に、疲労度と他の疲れ指標との相関を求め、移動障害要因別対比した。これによると、疲労度との相関では段差が疲れ指標によらず全般的に極めて相関の高いことがわかる。ついで、縦断が全体的に大きい相関を示す。相関係数はいずれも0.78以上あり疲労度と極めて強い関係にある。横断は他の移動障害要因に比べてやや相関が低い。iEMG\*との相関係数は0.71とやや低い値を示している。

上記から次のことがわかる。一つは他の指標に比べNASA-TLXの相関が極めて高いことがある。これはNASA-TLXが心理量のため、感覚量である疲労度と似た傾向を示すことによると見られる。また、一つは他の障害要因に比べ横断の相関係数がやや小さいことがある。これは、横断の実験が横断勾配14°と厳しい勾配まで範囲に入れているため個人差による差異が生じたことによると見られる。しかし、全体的には相関係数は0.71以上であり、かつ1%有意であるので疲労度との関連性は強いといえる。

### 7.3.2 個人別

被験者1について疲労度と他の疲れ指標との相関を対比しまとめた結果を表4に示す。この表から、疲労度との相関ではNASA-TLXが移動障害要因に依らず全般的に相関の高いことがわかる。ついで、所要時間が全体的に大きい相関を示す。NASA-TLXは相関係数がいずれも0.91以上あり疲労度と極めて強い関係にある。iEMG\*は他の疲れ指標に比べてやや相関が低い。iEMG\*の相関係数は段差0.84、縦断0.77、横断0.60の順となっていて、横断はやや低い値を示している。

同様に疲労度と他の疲れ指標との相関係数を求めているが、その結果段差が疲れ指標によらず全般的に高いことがわかる。ついで、縦断が全体的に大きい相関を示す。相関係数はいずれも0.73以上あり疲労度と極めて強い関係にある。しかし、横断は他の移動障害要因に比べてやや相関が低い。なかでもiEMG\*の相関係数は0.60とやや低い値を示している。

上記から次のことがわかる。一つは他の指標に比べiEMG\*の相関のやや低いことがある。これはiEMG\*が生理量のため、感覚量である疲労度と質的な違いがあることによると見られる。また、一つは他の障害要因に比べ横断の相関係数が小さいことがある。これは、横断の実験が横断勾配14°と厳しい勾配まで範囲に入れているため個人差によるばらつきが大きかったことによると見られる。しかし、全体的には相関係数は0.60以上であり、かつ1%有意であるので疲労度との関連性は強いといえる。

### 7.3.3 個人間の差異

縦断について個人別で疲れ指標間の相関係数を求めている。そのなかからiEMG\*と他の疲れ指標との間の相関を求めた結果、相関係数は一部0.61と低いケースもあるが、多くは0.7以上あり比較的高い相関を示す。いずれも相関係数は1%水準で有意である。しかし、所要時間と他の指標との相関で見ると被験者3については疲労度について相関係数が0.46、NASA-TLXについては0.39など低い相関を示す。ただし、このような場合はやや例外的であり多くは0.70以上の高い相関を示した。



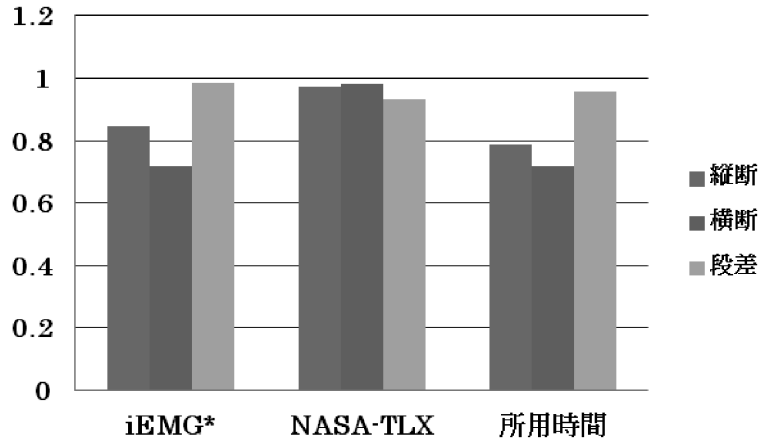


図5 疲労度と他の疲れ指標との相関—疲れ指標別

表4 疲労度と他の疲れ指標との相関

被験者 1

疲れ指標	縦断	横断	段差
iEMG*	0.775**	0.607**	0.843**
NASA-TLX	0.985**	0.98**	0.917**
所要時間	0.733**	0.733**	0.938**

\*\* 相関係数が1%水準で有意 (両側)

移動障害別では段差が全被験者とも相関は一部 0.55 と低い値を示すが他は 0.7 以上であり安定した相関を示している。横断が最も低く被験者 3 が NASA-TLX と疲労度との間に相関が 0.23 と低い値を示す。個人別では一般的には高い相関を示すことが多いが、一部被験者が特異値を示し低い相関を示す場合が混在する。被験者 3 は漕ぎ方が上手く疲れない動きをしているため心理量や感覚量に差異の出ないことが原因していると思われる。

## 8. 疲れ指標の推定

車いすナビシステムを成立させるためには、移動負荷要因から疲れ指標を精度良く推定できることが前提となる。上記 6 章～7 章の分析により疲れ指標間には高い相関があり、疲れを表す量として指標同士互いに支え合っていると判断された。また 2 章の移動負荷要因と疲れ指標の実態分析から移動負荷量が増加するにしたがい疲れ指標は指数関数的に増大することが明らかにされている。そこで、得られた結果を踏えて、回帰分析により移動負荷要因から疲れ指標を推計するモデル式を求め、各モデルの推定精度を比較した。

### 8.1 疲れ指標の推定モデル

#### 8.1.1 推定モデル

これまでの研究を踏襲し疲れ指標に対する指数関数的な関係を、移動距離に対しては冪上で表し、縦断勾配・横断勾配・高さなど移動負荷に対しては指数関数を適用することにする。したがって推定モデルは以下の関係式で与えられる。

$$y = \alpha_1 X_1^{\alpha_2} e^{\alpha_3 X_2}$$

ただし  $y$  : 疲れ指標 (iEMG、NASA-TLX、所要時間、疲労度など)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  : 回帰係数

$X_1$  : 移動距離

$X_2$  : 移動負荷 (縦断勾配、横断勾配、段差高さなど)

上式は距離  $X_1$  が0のときは疲れ指標  $y$  は0となる。移動負荷  $X_2$  が0のときの第2項は1となり、勾配などの実体負荷のない距離を移動するだけの疲れ量となる。このため疲れ指標を与える式として自然の理にかなない都合がよい。

### 8.1.2 非線形回帰結果

8.1.1で設定した非線形回帰モデル式に対し3章で述べた実験計測データを適用して、移動負荷要因から疲れ指標を推計した。被験者全員の平均データを適用して回帰した結果を表5に示す。疲れ指標データは基準化したデータを用いた。

移動障害要因別でみると、縦断では疲れ指標によらず決定係数 ( $R^2$ ) が0.96以上あり極めて回帰精度が高かった。ついで横断ではiEMGの0.678を除けば  $R^2$  は0.91以上有り極めて高い精度が得られた。iEMGがやや低いのは横断の実験に大きい勾配が入っているため、上腕の力の違いによるデータのばらつきがあり、特異データとして混入したことが原因しているといえる。ついで段差では疲れ指標に依らず0.81以上と高い回帰精度が確認された。このように、疲れ指標それぞれが高い回帰精度であることから、疲れを表す指標として互いを支持し合っていることがわかる。なお、3つの回帰係数は一部段差の係数  $\alpha_3$  が0.03前後と小さい値を持つが、他は1.0前後の値を持ち安定した結果が得られている。

同様に被験者1の結果から次のことがわかる。縦断の疲れ指標iEMGの決定係数 ( $R^2$ ) が0.781とやや高まっているが、段差ではiEMGのそれが0.770とやや下がっていて、定まった傾向にはない。全体的には0.770以上と高い回帰精度が得られているとともに回帰係数も安定した値を示している。疲れを表す指標として互いに他を支持し合っていることは上記結果と変わらない。

表5 非線形回帰結果—全員の平均

疲れ指標	縦断		横断	
	式	$R^2$	式	$R^2$
iEMG	$y = 0.048X_1^{1.229} e^{0.238 X_2}$	0.980	$y = 0.809X_1^{0.572} e^{-0.153 X_2}$	0.678
NASA-TLX	$y = 0.490X_1^{0.262} e^{0.198 X_2}$	0.962	$y = 0.823X_1^{0.240} e^{0.116 X_2}$	0.938
所要時間	$y = 0.075X_1^{0.061} e^{0.130 X_2}$	0.976	$y = 0.232X_1^{0.857} e^{-0.101 X_2}$	0.913
疲労度	$y = 0.722X_1^{0.316} e^{0.181 X_2}$	0.943	$y = 1.226X_1^{0.211} e^{0.103 X_2}$	0.929
疲れ指標	段差			
	式	$R^2$		
iEMG	$y = 1.084 e^{0.037 X_2}$	0.867		
NASA-TLX	$y = 1.417 e^{0.021 X_2}$	0.815		
所要時間	$y = 0.516 e^{0.039 X_2}$	0.841		
疲労度	$y = 0.752 e^{0.029 X_2}$	0.858		

## 9. 考察

ナビとしてシステムが成立するには、最小コスト経路を探索できることが要件となる。ここでコストとは疲

れ指標の値を指している。一般に経路探索アルゴリズムはリンクごとのコストが与えられていることを前提とする。リンクとは道路網の1格子区間を指し、経路を構成している街路小区間を意味する。およそ交通信号機間の数100m前後の道路区間にあたる。対象道路網内の各リンクコストがわかっていると、たとえばDijkstra法などにより最短経路が求められる。このさい、リンクコストはリンク間で互いに影響がなく独立であることと、加算可能であることが要件となる。

まず、加算性については、計測可能なスカラー値であれば問題はない。たとえば物理量をベースにする筋電位や旅行時間は加算可能であるといえる。筋電位から得られるiEMGも加算可能となる。一方、心理量や感覚量は非線形でスカラー量ではないので単に加算することはできない。したがってNASA-TLXや疲労度は加算できなくて経路コストを求めることはできない。

リンクコストの独立性については問題がある。疲れ指標は距離など移動負荷の増加に対しいずれも指数関数的な増加傾向を示す。このため、複数のリンクで構成されている経路は、リンクを連結した一つの距離として捉える必要がある。したがって、加算可能なiEMGや所要時間も、リンクを跨いで単に加算する訳にはいかない。

じつは、他に同様な問題があって、たとえば疲れ指標の値がリンク内で変動したとき、車いす利用の移動に取っては一連の負荷であるため連続した負荷として捉える必要がある。一方、システムでは別区間の別コストとして疲れ指標を推計することを考えている。

しかし、そのような疲れ指標の変化の組み合わせに対してモデル式を準備するのは組み合わせが多すぎて実際的ではない。一方、回帰式を見ると距離の項の冪上(回帰係数)は平均の場合縦断では1.229、横断では1.274と1.0近傍にあって大きく冪上が効いているという状態ではない。したがって疲れ量はおよそ距離に比例的であるとみなされる。つまり、大まかには個別に区切っても誤差は大きくないとみられる。リンク距離も実態的には100m程度といえるので、この程度で信号機などにより移動が止まるなど、一旦移動の区切りが入り連続性のなくなることが多いといえる。そこで、当面複雑さを避け独立性は深入りしないでおくものとする。したがって、加算性の点から判定すると疲れ指標としてiEMGと旅行時間が選択される。

次に、疲れ量という観点から比較すると、iEMGは生理的なエネルギー消費量を与えているので、疲れを説明する量として適切で整合性があると認定される。一方、所要時間は単なる物理量に過ぎないので生理的疲れを説明する指標としては特質が離れていて適切ではない。したがって、移動の疲れを説明する指標としてiEMGが最もかなっていると判断される。

## 10. まとめ

- (1) 移動負荷量(縦断勾配、横断勾配、距離、段差高さ)の増加に伴い移動疲れ指標(iEMG、NASA-TLX、所要時間、疲労度)は移動障害要因(縦断、横断、段差)によらず指数関数的に増加することが確認された。
- (2) 疲れ指標間の相関は被験者平均のときは横断の場合では0.7台とやや小さいが、縦断や段差では0.8~0.99と極めて高い相関が得られた。個人別では相関にばらつきが見られ、被験者によってはやや低い場合が出現するが、他の組み合わせはかなり高い結果が得られた。

また、疲れ推定の目標となる感覚量である疲労度と他の疲れ指標の間も横断でiEMGの相関が0.6台であることを除けば0.7以上と高く、全員の平均の場合と同様な結果が得られている。これらの結果から、疲れ指標間の相関は移動負荷要因や移動疲れ要因によらず全般的に高く、疲れ要因同士が互いに疲れを表す指標として支え合っていることが確認された。

- (3) 上記を踏まえて、移動負荷要因から疲れ指標を推定する非線形モデル式を立て回帰分析を行った結果、決定係数( $R^2$ )は横断のiEMGで0.6台とやや小さい値を示したが、他の場合は移動障害要因によらず0.7~0.99とかなり高い値が得られた。したがって、移動負荷要因から移動の疲れ指標を精度良く推定可能である

ことがわかった。

(4) ナビシステム成立の要件であるリンクコストの加算性とリンク独立性を満足させる疲れ指標は経路の特性から存在しないが、加算性と疲れの説明力という観点から生理量である iEMG（積分筋電位）が最も適切として抽出される。独立性は問題となるが、ここでは実態面での判断から複雑さを避けておくことにする。

(5) 上記の結果を総合して、生理量である iEMG\*（基準化積分筋電位）は車いす移動に伴う疲れを代表し、かつ道路の移動負荷量から高い精度で推定可能であり、車いすナビシステムにおける移動の疲れ指標として最も適切な指標であると判断される。

## 11. あとがき

車いすの移動の疲れを最小にする経路を探索するには移動の疲れの推定が必須である。ここでは、各種の疲れ指標を比較することにより、それらが移動の疲れを表して互いにそのことを支え合う関係にあることがわかった。かつ、移動負荷要因から疲れ指標を精度良く推定可能であることが示された。しかし、実験がリンクの長さでしか行われていなくて、システムが要請する複数のリンクで構成される経路を移動するさいの疲れ量を推定する場合の疲れ指標になり得るかは不明である。ここでは簡明を旨としてその点の取り込みを避けてきたが、今後は経路の疲れを対象に適切な指標や推定法を究明することが必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、実験や資料収集・分析などで協力を得たゼミ生の皆さんに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 木村一裕他（2000）, 「車いす走行におけるバリアフリー度の評価方法に関する研究」, 土木計画学研究論文集, 17, pp. 973-980
- 辻紘良他（2004）, 「歩行者支援システムにおける移動負担度の推定」, 第24回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 301-304
- 辻紘良他（2005a）, 「車いすの移動に伴う生理負担量の計測—計測法の基礎検討—」, 愛知淑徳大学・現代社会学部論集, 10, pp. 66-82
- Hiroyoshi Tsuji et al. (2005b), "Estimation method of traveling loads originated from driving a wheelchair for a pedestrian assistance system", 5<sup>th</sup> Conference on Gerontechnology, ps1a-3, 4p., Nagoya
- Hiroyoshi Tsuji et al. (2007), "Estimation model of physiological travelling load for a wheelchair navigation system", 14<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Transport Systems, ID3080, 8p., Beijing China
- 辻紘良他（2012）, 「車いすナビにおける移動負担を表す視覚的色彩の推定」, 日本色彩学会誌 第36巻 supplement pp. 156-157
- 辻紘良他（2011）, 「車いすナビゲーションシステムの研究」, ITS ワールド2011（愛知県 ITS 推進協議会）, 愛知県内大学研究成果発表, ポートメッセなごや
- 辻紘良（2013）, 「疲れを色彩で表現する—車いすナビの経路表示法—」, 日本色彩学会平成25年度第1回研究会
- 辻紘良（2013）, 「車いすのナビゲーションシステム」, TLIFES ワークショップ, 名城大学
- 長瀬浩明他（2003）, 「動作特性にもとづく車いす等の傾斜路面適合化技術（第2報）—車いす用ハンドリング補助装置の開発—」, 長野県情報技術試験場研究報告, 19, 6p
- 林琴也（1999）, 「歩行者支援情報システム（PICS）」, 交通工学, 34(6), pp. 28-31
- 林隆史他（2009）, 「自立支援プロジェクトにおける取り組みと今後の展開について」, 国土交通省政策グループ報告書
- 南正昭他（2002）, 「身体状況を考慮した車椅子利用者の経路選択支援に関する研究」, 土木計画学研究・論文集, 19(4), pp. 699-706
- 三宅晋司他（1993）, 「メンタルワークロードの主観的評価方法—NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案—」, 人間工学, Vol. 29 No. 6



## 車いすの移動に伴う疲れ指標の比較評価

- 山本浩司他 (2010), 「2つの通信方式を組み合わせたフェロモン情報を用いた車いす支援」, 人工知能学会論文誌, 25, 3D
- 横井哲他 (1999), 「縦断勾配が車いす走行に与える影響に関する研究」, 土木学会論文集, 611(142), pp. 21-32