

論文・解説

14

ペダル操作における人間特性の研究 A Study of Human Characteristics on Pedal Operation

西川 一 男*¹ 農 沢 隆 秀*² 阿 部 治 彦*³
 Kazuo Nishikawa Takahide Nouzawa Haruhiko Abe
 古 川 浩 二*⁴ 宮 本 克 己*⁵ 宮 崎 透*⁶
 Kouji Furukawa Katsumi Miyamoto Tooru Miyazaki

要 約

人間は腕や脚の筋を収縮・弛緩させることによって筋力を制御し、その結果関節トルクを発生させ、手脚の硬さや柔らかさなどの機械インピーダンス特性を巧みに調整し、操作機器を操っている。車の操作機器を設計する場合は、人間側の特性と、ペダルやシフト操作に代表される機械側の特性とをマッチングさせることが重要になる。この考え方をインピーダンスマッチングと呼んでいる⁽¹⁾⁽²⁾。本研究では、足先で踏む、脚で踏む、脚を踏み変える動作を、自動車のアクセルペダル、クラッチペダル、アクセルからブレーキへの踏み変えを例として、まず、足先力のような人間特性を明らかにした。そして、この人間特性とペダルの機械特性とのマッチングによるペダルの操作性向上を試みた。今回の研究により、人間の特性や踏みやすさの要因を解明し、機械側特性を人間に対応させることで、操作性を最適化するという機械と人間のインピーダンスマッチングの考え方が重要であることを明らかにした。

Summary

Humans control their physical muscle forces by contracting and relaxing muscles of arms and legs, and generate physical joint torque, and operate devices, adjusting the characteristics of “machine-impedance” such as hardness, softness. So, it is important to harmonize the human characteristics and the mechanical characteristics when we design vehicular devices. We call this concept “Impedance Matching.” This study cleared up the human characteristics at first, citing the moves from acceleration-pedal, clutch-pedal, through to brake-pedal. Second, the study attempted to improve the “operation comfort” in the pedal operation by harmonizing the human characteristics and the pedal’s mechanical characteristics. Finally, the study concluded that focusing on “Impedance Matching” is important to optimize the operational efforts by adapting the mechanical characteristics to the human characteristics.

1. はじめに

人間は作業を行う環境や目的に応じて、身体の各部位の力や速度を適切に調節し、多様性と柔軟性を兼ね備えた巧みな運動を実現している。詳細に見ると、人間は、腕や脚の筋を収縮させることによって筋力を制御し、その結果関節トルクを発生させ、手足の硬さや柔らかさなどのインピーダンス特性を巧みに調整し、操作機器を操っている。

車の操作機器を設計するためには、人間の身体的特徴を

的確に捉えた人間側の特性と、ペダルやシフト操作に代表される機械側の特性とをマッチングさせることが重要になる。この考え方をインピーダンスマッチングと呼んでいる⁽¹⁾。ペダルの操作性を考えると脚の動きとして、「足先で踏む」、「脚で踏む」、「脚を踏み変える」動作に大別できる。

本研究では、自動車のアクセルペダル、クラッチペダル、アクセルからブレーキへの踏み変えを例として、足先で踏む、脚で踏む、脚を踏み変えるという3つの動作における足の人間特性を明らかにした上で、ペダルの機械特性との

*1, 2, 4~6 車両実研部
Vehicle Testing & Reserch Dept.

*3 マツダモーターヨーロッパ(MME) フランクフルト
Mazda Motor Europe Frankfurt

インピーダンスマッチングによるペダルの操作性向上を試みた。

2. 実験方法

ペダル操作性に関わる「足先で踏む」、「脚で踏む」、「脚を踏み変える」の人間特性を明らかにするために、以下の方法により人の生体反応、動作、機械側の特性を計測した。

2.1 足先で踏む動作

人間特性の計測として、4車種（セダン系2台、RV系2台）におけるアクセル操作性の官能評価と同時に脚の筋電位（EMG:Electromyogram）、シートクッション体圧分布（S.P.D.:Seat Pressure Distribution）、及び右脚の位置の測定を行った。

次に、機械特性としてアクセルの荷重とストローク特性を明らかにし、2車種については、踏力を変えたアクセルペダルも用意した。

上記の詳細な測定を行った被験者は、身長160～175cm、体重60～70kgの男性4名であり、それぞれの測定においては、1周4.3kmの周回路を50km/h、120km/hの一定車速で各2周ずつ走行している。なお、シートポジション、ステアリング位置は被験者の最適位置にセットした。

シートクッション体圧分布、及び、右脚の位置の測定には、10mm間隔に置かれた48×44個の感圧点で構成されたセンサシートをクッション、運転席フロア及びアクセルペダルに装着した。

筋電位計測には表面双極子を用い、一対の電極を25mm間隔に装着した。4組の電極位置は、Fig.1に示すように、アクセル操作時に使用されると考えられる代表的な脚の筋肉①前頸骨筋、②腓腹筋（外側頭）、③大腿直筋、④恥骨筋とした。

2.2 脚で踏む動作

人間特性は、クラッチペダル踏み込み時の多関節運動時の足先力を計測した。被験者は、22～24歳の男子大学生3人と50歳男性の4人である。足先力の計測システムは、関節トルク計測部、EMG計測部、被験者に計測結果をフィードバックするディスプレイから構成される。トルク計測

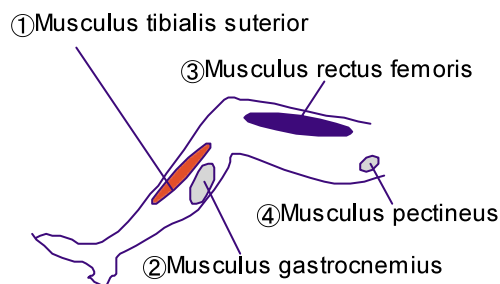


Fig.1 The Location of EMG Electrodes

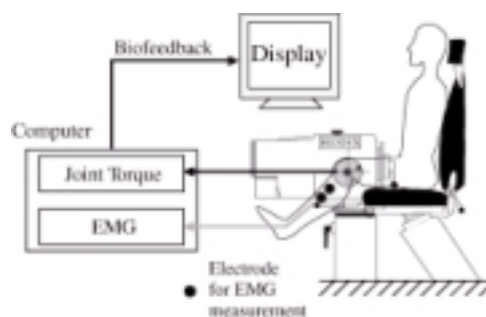


Fig.2 Measurement Systems of Ankle Joint Torque



Fig.3 Measurement Devices of Ankle Joint Torque

部は、BIODEX-SYSTEM-2APを用いた（Fig.2～4）。

機械特性は、クラッチペダルの踏力とストロークの特性を計測した。ペダル表面にロードセルと変位計を装着し、ペダルを踏み込み側と戻し側の全ストローク作動させた時の踏力とストロークを同時に計測した。

2.3 脚を踏み変える動作

アクセルからブレーキペダルへの踏み変えには、ペダル間の距離と段差が大きく影響する。段差による人間の操作のしやすさを調べるためにアクセルペダルとブレーキペダルの段差を0～55mmまで変化させ、それぞれの段差毎に、ペダルを踏み変えた時の前頸骨筋と大腿直筋の筋電位を計測した。また、ペダルの間隔による踏み変え操作の正確さ



Fig.4 Measurement Scene of Ankle Joint Torque

を調べるために、アクセルペダルと身体の中心の距離を50～240mmまで変化させ、ペダルを踏み変えた時のブレーキペダル中心と足裏の中心のズレ量を計測した。被験者は、身長153～180cmの男性7人と女性3人とした。

3. 結果と考察

3.1 足先で踏む動作

4車種の測定データと市場評価を比較したところ、アクセル操作性が良い車、悪い車にはそれぞれ共通した特徴があることがわかった。ここでは、代表的な2車種（良い車：A車/アクセル踏力25N、悪い車：B車/アクセル踏力20N）のある被験者の結果について説明する。まず、Fig.5に筋電位の測定結果を示す。A車では、全体的に筋電位が小さいのに対し、B車では筋電位が高く、特に前頭骨筋の反応が大きいことがわかる。

次に、シートクッション体圧分布と右足の位置の測定結果をFig.6に示す。筋電位が小さいA車では、臀部全体、左右大腿部裏にも均等な圧力がシートクッションからかかっており、下半身をしっかりとサポートした理想的な圧力分布になっている。一方、筋電位が大きいB車では、A車に比べ、臀部全体の圧力が非対称で局所的であり、下半身をシートクッションが十分サポートしていないことがわかる。この状態での長時間走行は、下半身の疲労がより強くなると推察される。

右足の位置は、A車に比べ、B車ではかかとがブレーキ側に寄っており、右足を斜めにし、開足角度を大きくしてアクセルを操作しているといえる。

これらの結果から、アクセル操作性は、アクセルの特性により、使用する筋力の大きさや右足の位置、更には下半身のシートクッション体圧分布まで影響を及ぼしていることが明らかになった。アクセルを踏むという簡単な動作でも、様々な人間特性に影響を及ぼしている。そこで、人間特性として、次の3点の人間の動きに着目し、足先で踏む動作に対する人体への影響のメカニズムを解明することを試みた。

(1) 足首の動き（前頭骨筋反応のメカニズム）

今回の走行状態が定常走行なので、ここではアクセルを踏む縦方向の動きに着目する。この足首の縦の動き（底屈・背屈）と筋活動とを考察する。

人間がアクセルを戻す時は、足の自重に反しながら、前頭骨筋等の弱い筋肉を使用している。踏力が重いA車は、ペダルに足を乗せておくことができるのに対し、B車は踏力が軽いので、ペダルに足を乗せておくと、足の自重により無意識に踏み込んでしまう。よって、それを防ぐため、前頭骨筋を多用し、足首を常に引上げなくてはならない状況が発生していることを筋電位の結果は示している。

(2) 右足の位置（右足かかと位置変化のメカニズム）

アクセル踏力を15N、25Nに変えた時のシートクッショ

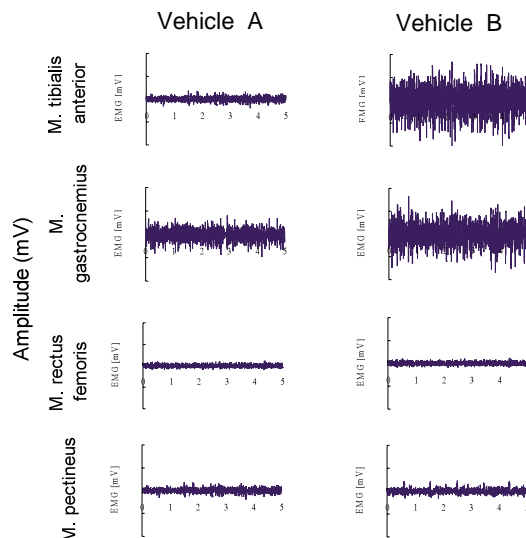


Fig.5 EMG Measurement Result (in 50km/h vehicle speed)

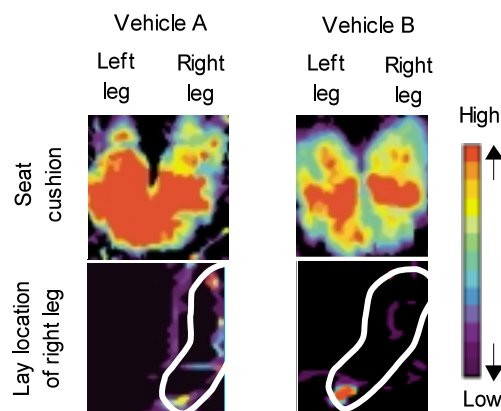


Fig.6 Measurement Result of S.P.D. and the Pressure Distribution in the Right Foot Position (in 50km/h vehicle speed)

ン体圧分布及び右足の位置をFig.7に示す。踏力15Nでは、25Nに比べ、臀部全体、左右大腿部裏に圧力が十分かかっていないことがわかる。右足の置き方に関しても、踏力15Nでは、25Nに比べ、かかとをブレーキ側に寄せて、右足を斜めにして操作をしている。このシートクッション体圧分布と右足のかかとの置き方の結果は、Fig.6のアクセル踏力が重いA車、及び、軽いB車での測定結果と類似している。すなわち、人間はアクセル踏力に応じた筋力を使うため、かかとの位置と足の置き方を変え、機械特性に対して人の特性を使い分けしていると推察できる。しかしながら、Fig.7の結果から、アクセルの踏みやすさでは、人間の足と機械特性が一致しているものの、シートクッション体圧分布は、理想と考えられる左右均等の圧力分布と異なる

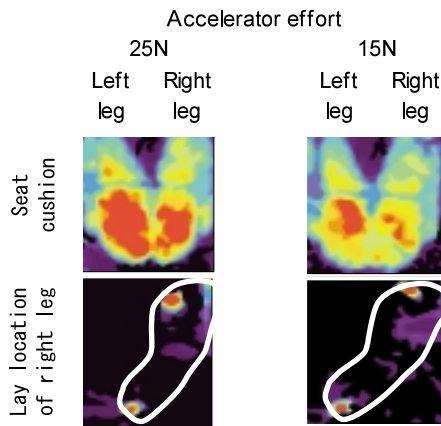


Fig.7 Relationship among Accelerator Pedal Efforts, S.P.D. and the Right Leg Position (in 50km/h vehicle speed)

るため、シートの座り心地等に悪影響を及ぼしていることも考えられる。

(3) 大腿部の動き (S.P.D. 変化のメカニズム)

右足の置き方は、大腿部の動きと連動しシートクッション体圧分布に影響しているため、逆に、シートクッション体圧分布が左右均等になる場合の人の特性に着目する。そこで、シートクッション体圧分布と膝から開いた時の開足角度の関係を測定した。その結果をFig.8に示す。開足角度23度では、臀部右側の圧力が小さく、左右不均等になっているのに対し、徐々に開足角度を狭めていったところ、15度以下では左右均等な体圧分布になることがわかった。この現象は、開足角度が小さくなるにつれ、右足の膝が立つので、臀部右側の前部分と大腿部右側裏の圧力が、臀部の坐骨結節に移動するためと推察される。

このように、アクセルペダル踏力を軽くすると、アクセル操作において前頸筋を多用させるため、操作性が悪くなるばかりでなく、シートクッション体圧分布が左右不均等になり、下半身への疲労も及ぼすことがわかった。よって、アクセルペダルの踏みやすさのみではなく、戻しやすさやシートクッション体圧分布から考えると、脚の開足角

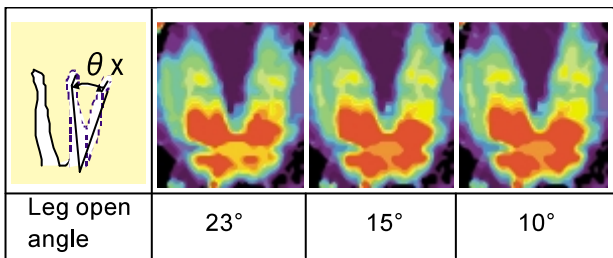


Fig.8 Relationship between Leg Open Angle and S.P.D

度は小さくする必要があり、そのような人間特性をトータルで考えたアクセル踏力の設定が必要である。

3.2 脚で踏む動作

クラッチペダルの操作は、他のペダルと違い脚全体を持ち上げて、クラッチをつなぐ。つなぐ時、クラッチペダルの機械特性と脚の踏力をマッチングさせる必要がある。Fig.9に、機械特性としてクラッチペダルの踏力とストロークの線図を示す。図は、クラッチの踏み始めから踏み終わりまで脚を踏み込んで戻すヒステリシス特性をもっている。また図で太く示した部分が、クラッチをつなぐ領域である。Fig.9から、A車のクラッチをつなぐ部分は、踏力が一定で、全ストロークの中心付近にあるのに対し、B車のつなぐ部分は、踏力が増加傾向で変化している領域にあり、しかも、人体から遠めに設定されている。

一方、このようなクラッチをつなぐ脚の操作における人間の特性として、Fig.4に示したように被験者4人それぞれの脚の位置と脚の踏力を計測した。その測定値をFig.10に示す。図中の○はつま先での、○はかかとでの踏力で、こ

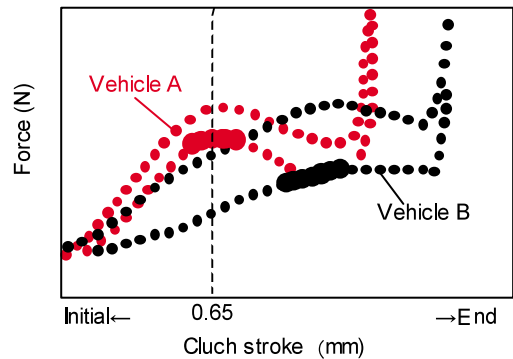


Fig.9 Clutch Pedal Force Stroke Characteristic

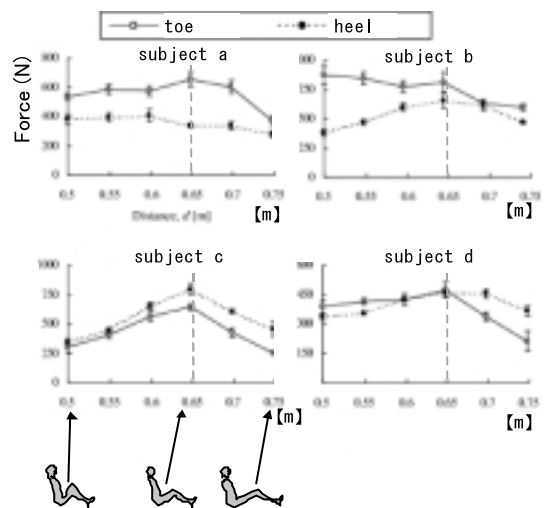


Fig.10 Foot Force on Step

これらの結果を見ると、脚を伸ばした状態からつま先を100mm程度縮めた状態 (d 0.65) で、平均的に踏力が最も大きいことがわかる。

Fig.9とFig.10の人と機械の特性結果からクラッチペダルの操作を解析すると、A車は脚の力が最も大きく、ペダルの踏力が一定のところではクラッチミート操作ができるのに対し、B車は脚の力が弱いところで、しかも、ペダルの踏力が增大している特性の領域でペダル操作を強いられている。この状況では、B車は明らかに人間側に力の調整を強いられており、快適な操作とは言い難い。ペダルを踏むという動作においては、A車のように機械特性を設定することでマッチングすることができる。

3.3 脚を踏み変える動作

(1) アクセルとブレーキペダルの段差による操作性

車を発進させる時は、アクセルペダルを踏み、止まる時は、アクセルペダルからブレーキペダルへ踏み変える。車の運転はこの操作を繰り返すが、この時アクセルペダルとブレーキペダルの段差が大き過ぎると足首の角度が窮屈になり、ペダル操作が難しくなる。

ペダル段差による人間への影響を調べるため、ペダルの段差によるペダル踏み変え時の脚の負担度を測定し、その踏み変えの現象を解析した。Fig.11に、ペダル段差毎の踏み変え時の脚の筋電位を最大筋電位との比として示す。Fig.11を見ると、ペダルの段差が低い時、筋電位は小さいが、ペダル段差がある値(破線の段差)で、脚の筋電位が急増する変曲点が生じている。このことは、ある段差を超えると、脚の負担度が急激に増大することを示している。この時の様子を観察すると、脚の挙動は、Fig.12の模式図のようであった。段差が小さい場合は、スムーズに踏み替えできるが、変曲点を超えたような脚の負担度が大きな段差では、図のように複雑な動きを示した。この操作は、人にとって難しい操作になると考えられる。人間にとっては

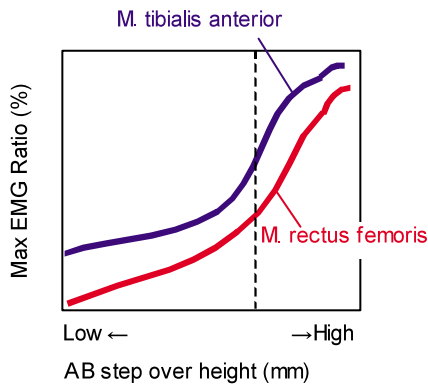


Fig.11 EMG on the Height between Accelerator Pedal and Brake Pedal

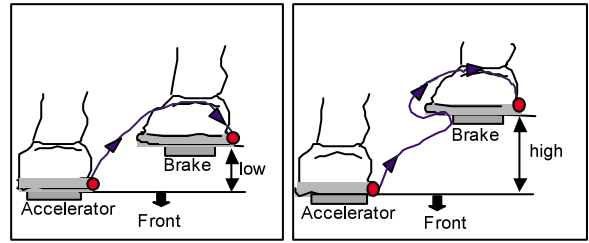


Fig.12 Movement of Foot on the Height between Accelerator Pedal and Brake Pedal

変曲点を超えない段差にすると踏み変えが容易になる。

(2) アクセルとブレーキペダルの距離による操作性

車を運転中に、緊急で車を止めたい時は、アクセルペダルからブレーキペダルへ正確に素早く踏み変える必要がある。この時、ペダルの配置が適切でない場合、ブレーキペダルの中心付近を踏むことができず、的確なブレーキ操作は難しくなる。

踏み変える時の足の動きの正確さを明らかにするため、アクセルペダルと人体の中心の距離によるペダル踏み変え時のズレ量(ブレーキペダル中心と靴中心の距離)を測定した。Fig.13にアクセルペダルの位置毎のブレーキペダルの足裏中心のズレ量を示す。

図中の値はバラツキ上下限值である。Fig.13の結果から、踏み変えのズレ量が0近傍になるアクセルペダル位置が存在することが明らかになった。つまり、アクセルペダルが人体から遠過ぎたり近過ぎたりすると、踏み変えのズレ量が増大し、ブレーキペダルの中心を踏むことが難しいことがわかる。正確さという観点でも、人の操作性を向上できるマッチングが可能である。

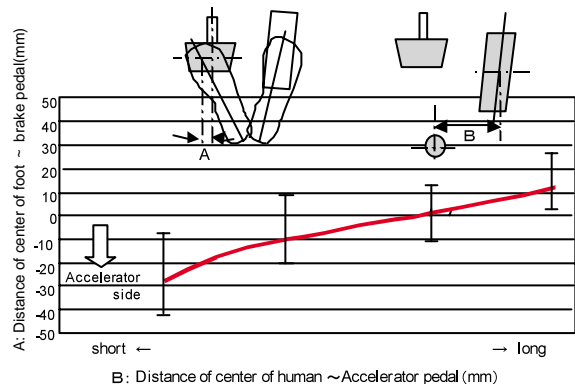


Fig.13 Distance from Center of Foot to Brake Pedal in Each Accelerator Pedal

4. まとめ

アクセルペダルのように足先で踏む操作は、下半身への疲労に強く影響するので、強い力で操作できる場合は、ペダルの操作力をそれ相応に強く、弱い力でしか操作できない場合は、ペダルの操作力を弱くし、人間の出せる力を考慮し、人間特性をトータルで考えたアクセル踏力の設定が必要である。

クラッチペダルのように脚で踏む操作は、脚の踏力が最も大きく、踏力が一定のところクラッチミート操作するのが、足に負担が少なく操作がしやすい。

アクセルからブレーキペダルへ脚を踏み変える操作では、ペダル段差が少なく、アクセルペダル位置が人体から遠過ぎず近過ぎない場合に、正確な操作ができる。

このように、脚を使った動作におけるペダルの操作性を向上するためには、本研究のように、脚の人間特性を明らかにして、機械側の特性を設定することが重要であることがわかった。そして、人間の特性や要因を理解し、機械側特性に対応させることで、操作性を最適化するという機械と人間のインピーダンスマッチングの考え方が重要であることが確認できた。

最後に、本研究の機械インピーダンスマッチングの考え方、脚の踏力測定は、広島大学辻敏夫教授、広島県立保健福祉大学大塚彰教授の協力に基づくもので、ご教授に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 辻 敏夫：姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定，計測自動制御学会論文集，Vol.30，No.3，p.319-327（1994）
- (2) 辻 敏夫：等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析，計測自動制御学会論文集，第32巻，2号，p.271-280（1996）

著 者



西川一男



農沢隆秀



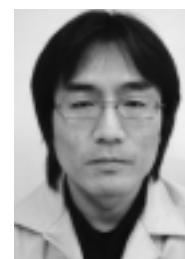
阿部治彦



古川浩二



宮本克己



宮崎 透