

論文・解説

22

自動車乗降時における上半身の身体負担推定手法の提案

Estimated Method of Physical Workload
of Human Upper-body during Ingress and Egress

吉澤公理*1 末富隆雅*2 小竹元基*3

Norimichi Yoshizawa Takamasa Suetomi Motoki Shino

宮沢悠介*4 鎌田実*5

Yusuke Miyazawa Minoru Kamata

要約

乗降動作時の負担を定量的に評価することは、自動車の使いやすさを向上させる上で重要である。これまでに、下半身の肉体負担について筋電位を用いた評価や関節トルクによる負担推定手法を提案し、乗降動作時の下半身の定量評価を実現してきた。

今回、上半身の肉体負担に着目し、乗降動作時の筋負担評価から肉体負担に寄与する動作を抽出し、3次元の乗降動作データから負担の指標として関節トルクを推定する手法を提案した。いくつかの車両寸法に対する乗降動作時の上半身の関節トルクを推定したところ、乗降動作中の筋負担とそのときの負担感がそれぞれ一致する結果が得られ、上半身の肉体負担の定量評価の妥当性を得た。

Summary

The quantitative evaluation about ease of ingress and egress is important to improve the usability of an automobile. We have developed the quantitative evaluation about physical workload of human lower-body as using the EMG (electromyogram) or estimating the joint torque.

This time, we examined the evaluation method about the physical workload of human upper-body. We extracted the motion during the ingress and egress that influenced the physical workload by muscular evaluation, and proposed the method to estimate the workload from ingress and egress motion, assuming joint torques as the index of the physical workload. As a result of the verification test of estimating physical workload, estimated joint torque matched the EMG and the subjective evaluation well.

1. はじめに

車両タイプの多様化と高齢者や女性ユーザの増加に伴い、人間特性を考慮した自動車の使いやすさが求められている。中でも快適性の一つに上げられる乗降性は、車体構造が大きく影響するため、車両寸法の負担への影響を定量的に評価することが重要である。これまでに、下半身の肉体負担について、筋電位を用いた筋負担評価や乗降動作から推定した関節トルクによる評価を提案し、乗降動作における下半身の肉体負担の定量評価を実現してきた⁽¹⁾。しかし、上半身の負担に関して人間特性を考慮した定量評価手法はなく、現状の開発では、人間が感じる主観評価に頼っ

ている。

今回、頸部や腰部の肉体負担に着目し、車両寸法の変更に伴う負担を予測する手法について検討した。乗降時における上半身の動作の特徴から、肉体負担に寄与する頸部と腰部の動作を抽出し、頸部と腰部の関節トルクを負担の指標としてその動作から肉体負担を予測する手法を提案した⁽²⁾。更に、その手法を用いて、いくつかの車両寸法に対する乗降時の肉体負担を予測し、本評価手法の妥当性を検証した⁽³⁾。

2. 負担発生動作の抽出

2.1 実験概要

乗降動作時の上半身の負担に寄与する動作を抽出し、そ

*1, 2 技術研究所
Technical Research Center

*3~5 東京大学大学院
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

の動作と負担との関係を把握するためにFig.1に示す乗降性評価用モックアップを用いて、上半身の負担に影響を与えと考えられる「車両フロアからルーフまでの高さ（以下、ルーフ高とする）」と「頸部と腰部の負担」の関係について検討を行った。

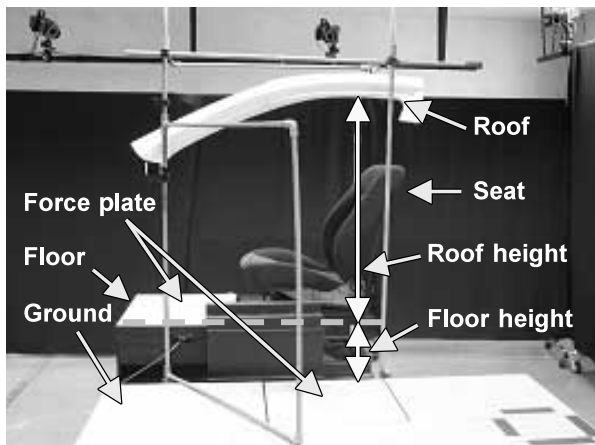


Fig.1 Mock-up for Evaluation of Ingress and Egress

2.2 実験手法

(1) 実験条件

ルーフ高の初期設定を「Base」とし、この「Base」の位置からルーフ高を+50, -10, -20, -30, -40, -50, -100mmと変化させて実験を実施した。他の車両寸法は一般的な乗用車の助手席に設定した。

(2) 被験者

被験者は、20代男性3名（被験者A：身長1,800mm，体重76kg，被験者B：身長1,840mm，体重74kg，被験者C：身長1,810mm，体重76kg）で、事前に実験内容を十分説明し、実験参加へのインフォームドコンセントを得ている。

(3) 計測と評価

条件ごとに5回の乗降動作を被験者にさせ、そのときの「3次元動作」、「筋電位」、「床反力」の計測と条件ごとに負担等に関する「主観評価」を行った。

3次元動作計測用のマーカをFig.2のように貼付し、赤外線式カメラを10台用いてサンプリング周波数60Hzで全身の乗降動作を計測した。

筋電位は頸部と腰部の動作に関係する身体の左右の「胸鎖乳突筋」、「僧帽筋」、第2-3腰椎付近の「体幹起立筋(L2-3)」を被験筋とし、1kHzで計測した（Fig.3）。計測した筋電位は、事前に計測した各被験筋の最大随意筋発揮時の振幅に対する比率：最大筋力比（%MVC）を算出し、整流処理したデータを評価に用いた。

床反力計は、モックアップで想定した地面と車室内のフロアに2枚設置し（Fig.1）、それぞれの面に足が設置するタイミングを把握するために1kHzで計測した。

主観評価は条件ごとに5回の動作後に、頸部や腰部の各部位に関する負担について、負担がない状態を「0点」と

し、最も負担が大きい状態を「3点」として評価させた。ここでは、Fig.4のように乗車を「内足入れ」「着座（シートへ腰を下ろす）」「外足入れ」、降車を「外足出し」「起立（シートから腰を上げる）」「内足出し」の6つのフェーズに分けて評価させた。なお、被験者には手を使わずに乗降するように教示し、各条件での計測直前に習熟試行を行った。



Fig.2 Marker Position

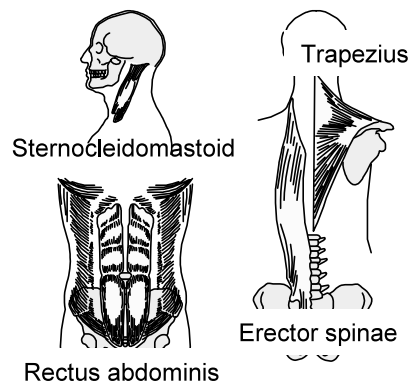


Fig.3 Measuring Points of EMG

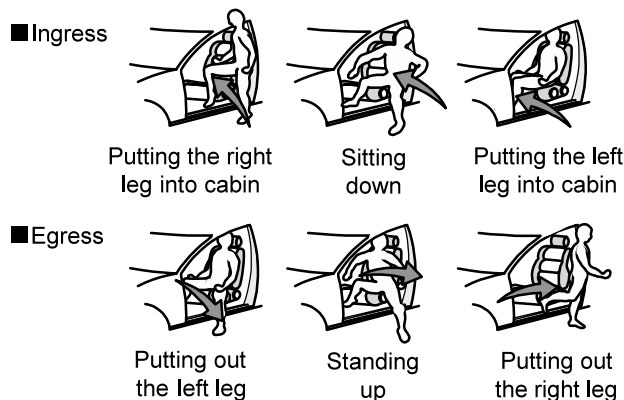


Fig.4 Motion Division of Ingress and Egress

2.3 実験結果

(1) 乗降動作と負担感の関係

Fig.5に各条件の着座と起立のフェーズ（Fig.4）における3名の腰部に関する負担感の平均値をルーフ高に対して示す。

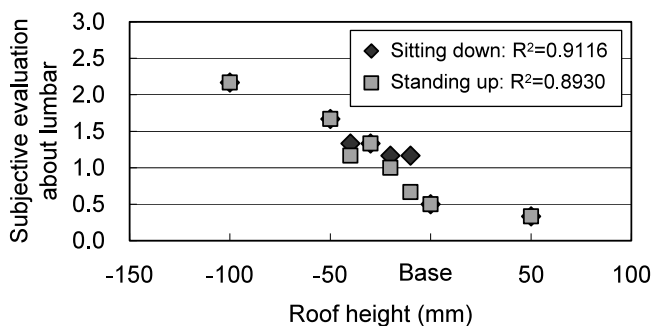


Fig.5 Relation between Roof Height and Subjective Evaluation about Lumbar

ルーフ高が低くなると腰部の負担感が増加する傾向を示した。頸部についても同様な結果を得た。また、その他のフェーズでは3名とも負担感はなく、「着座」と「起立」のフェーズで上半身の負担が発生していることが分かった。

(2) 乗降動作と筋負担の関係

被験者Cのある条件について、動作計測用マーカ(頭頂部と鳩尾に貼付)の鉛直座標と、僧帽筋と体幹起立筋(L2-3)の最大筋力比の時系列変化をFig.6に示す。頭頂部、鳩尾ともに鉛直座標が大きく変化すると、僧帽筋と体幹起立筋の最大筋力比が増加する傾向を示した。これらはルーフをよけて着座、起立するフェーズであり、他の被験者についても、他の条件についても、同様な結果が得られた。また、ルーフ高が低くなると、どの被験者も頭部と鳩尾の通過点は低くなり、着座と起立のフェーズにおける各部位の最大筋力比の時間積分値も増加する傾向を示した。これは、ルーフを避けるために頸部と腰部をそれぞれ曲げ、ルーフ高が低くなれば、その時の筋負担も増加するためと考えられる。

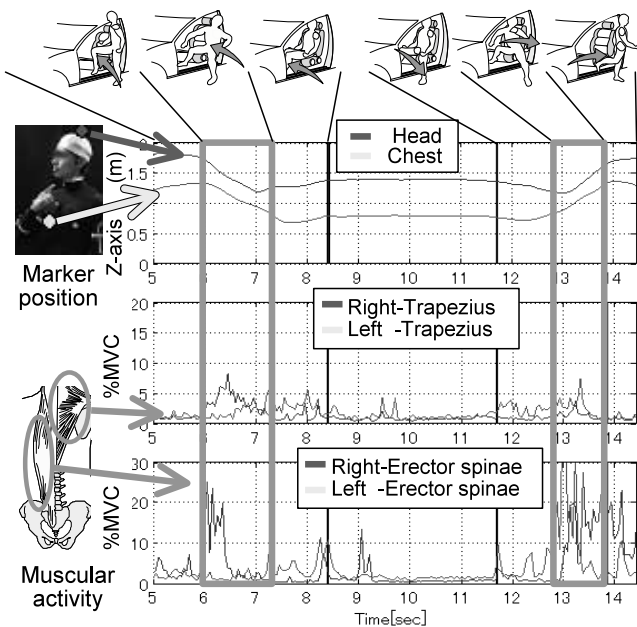


Fig.6 Relation between Motion and Muscular Activity

(3) 負担感と筋負担の関係

筋負担が負担感に影響を及ぼしていることを検証するため、着座と起立のフェーズにおける最大筋力比の時間積分値と各部位の負担に関する主観評価との対応を見た。Fig.7に被験者Cの腰部の結果を示す。両者には高い相関があり、筋負担が増加すると負担感も増加する。頸部についても他の被験者についても同様な結果が得られた。

以上のことから、ルーフ高が低くなると、これを避けるために頸部と腰部をかがめる度合いが大きくなり、この動作や姿勢を維持するための筋負担が増加し、負担感も増加することが分かった。

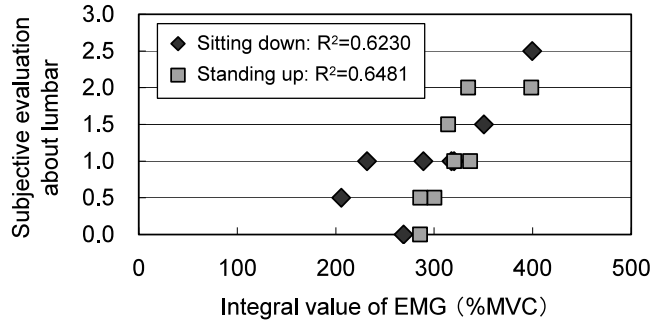


Fig.7 Relation between Muscular Activity and Subjective Evaluation about Lumbar

3. 負担推定手法の提案

3.1 モデルの概要

前章で、上半身の肉体負担は、ルーフを避ける際の頭部や胸部をかがめる動作により頸部や腰部付近の筋活動が負担として発生することを確認した。そこで、上半身を、頭部、胸部、腰部を剛体とし、頸部と腰部に関節を有する剛体リンクモデルとしてモデル化し、頸部と腰部の関節に発生する関節トルクを負担の指標とした負担推定手法を提案する。

頸部と腰部の関節は、理学療法技術ガイド⁴⁾をもとに、それぞれ屈伸(前後に倒したり、伸ばす運動)・側屈(左右に傾ける運動)・回旋(回す運動)の3自由度の運動を表現できることを考慮して決定した。頸部ジョイント位置は第七頸椎(7th cervical vertebrae)と鳩尾(Solar plexus)から正中線にそって150mm上の点との中点、腰部ジョイント位置は、左右の腸骨稜最高点(Top of iliac crest)の中点とした。また、頭部重心位置(Center of gravity of head)は左右のこめかみ(Temple)の中点、胸部重心位置(Center of gravity of chest and lumbar)は頸部と腰部のジョイントの中点とした(Fig.8)。

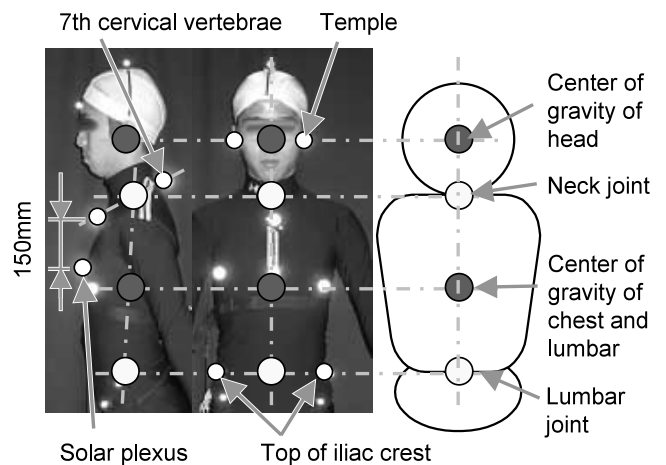


Fig.8 Joint Analytical Model

3.2 負担推定手法

頸部、腰部ジョイントの関節トルクは、3次元動作計測から得られた頭部並進加速度から頸部ジョイントに加わる関節間伝達力を算出し、それを用いて回転運動方程式から推定する。まず、Fig.9に示すようなX-Z平面で考える。

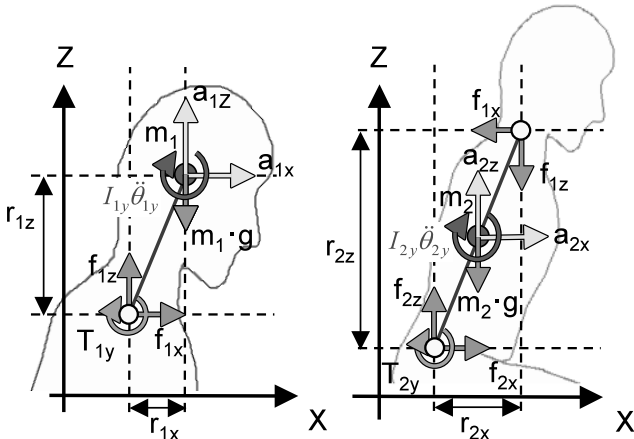


Fig.9 Joint Analytical Model

頭部重心の並進運動と回転運動より、X軸方向、Z軸方向の関節間力は、それぞれ式(1)、式(2)のように表せる。これよりX-Z平面に垂直なY軸回りの頸部の関節トルク T_{1y} は式(3)のように推定できる。

$$f_{1x} = m_1 a_{1x} \tag{1}$$

$$f_{1z} = -m_1 g + m_1 a_{1z} \tag{2}$$

$$T_{1y} = -f_{1z} r_{1x} + f_{1x} r_{1z} + I_{1y} \ddot{\theta}_{1y} \tag{3}$$

腰部に関しても頸部同様に、X軸方向、Z軸方向の関節間力はそれぞれ式(4)、式(5)となり、腰部の関節トルク T_{2y} は式(6)のように推定できる。

$$f_{2x} = m_2 a_{2x} + f_{1x} \tag{4}$$

$$f_{2z} = -m_2 g + m_2 a_{2z} + f_{1z} \tag{5}$$

$$T_{2y} = -f_{2z} r_{2x} / 2 + f_{2x} r_{2z} / 2 - f_{1z} r_{2x} / 2 + f_{1x} r_{2z} / 2 + I_{2y} \ddot{\theta}_{2y} - T_{1y} \tag{6}$$

ここで、 I_i は慣性モーメント、 m_i は質量、 a_i は並進加速度、 $\ddot{\theta}_i$ は角加速度、 g は重力加速度、 f_{ix} はiジョイントにかかるX軸方向の関節間力、 r_i はモーメントアーム長を表す。なお、添字 $i=1$ は頭部および頸部ジョイント、 $i=2$ は胸部および腰部ジョイントをそれぞれ表す。また、頭部、胸部の慣性モーメント、質量のパラメータは、体節の長さや体重から推定する手法により算出した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

以上のモデルはX-Z平面の2次元モデルであることから、絶対座標系の直行する3平面の要素を合成したものを3次元の関節トルクと定義した。

$$T_i = \sqrt{T_{ix}^2 + T_{iy}^2 + T_{iz}^2} \tag{7}$$

ただし、 T_{ix} はiジョイントのX軸周りのトルク、 T_{iy} はiジョイントのY軸周りのトルク、 T_{iz} はiジョイントのZ軸周りのモーメント、 T_i はiジョイントのトルクで、この T_i をiジョイントの負担と定義する。また、算出したトルクの相対座標におけるY軸周りの成分を屈曲・伸展トルク、X軸周りの成分を側屈トルク、Z軸周りの成分を回旋トルクと定義した。

4. 負担推定手法の妥当性検証

4.1 検証実験の概要

提案した剛体リンクモデルの妥当性を検証するため、以下の2つの観点から実測値とモデルの推定値を比較する検証実験を行った。

- ① 姿勢を維持している状態の負担を評価できるか
- ② 動作をしている状態の負担を評価できるか

被験者は20代男性1名(被験者D:身長1,680mm,体重57kg)とし、計測項目は第2章の3次元動作と筋電位とし、筋電位の被験筋として腰部の伸展運動を考慮して腹直筋を加えた。

解剖学に基づき、頸部と腰部について屈伸、側屈の姿勢や運動をそれぞれ規定し、姿勢を維持した状態と運動中の筋負担と関節トルクをそれぞれ比較した。なお、腰部の姿勢変化に股関節の運動が混ざらないように、被験者に座位姿勢をとらせ、骨盤を座面にベルトで固定して計測した。

4.2 姿勢維持における負担の検証(静的負担の検証)

頸部と腰部について姿勢を維持している際の負担を検証するため、規定した屈伸、側屈姿勢を維持している際の最大筋力比の平均値とモデルで推定した関節トルクの平均値を比較した。頸部の屈伸は伸展角40度から屈曲角10度までとし、側屈の限界を30度とし、それぞれ10度ずつ姿勢を維持させた。腰部の屈伸は伸展角30度から屈曲角30度までとし、側屈角を35度とし、頸部同様に10度ずつ姿勢を変化させた。なお、頸部運動に起因する筋は胸鎖乳突筋と僧帽筋、腰部運動に起因する筋は腹直筋と体幹起立筋(L2-3)とした。

規定した姿勢を1秒間維持している状態での各被験筋の最大筋力比の平均値と被験筋に対応する関節トルクの平均値の相関分析を行った。Table 1に各部位の屈伸(Extension/Flection)、側屈(Leteroflection)姿勢維持に必要な各部位の筋負担と関節トルクの相関係数を示す。この結果、それぞれの姿勢維持に必要な筋負担と関節トルクに高い相関関係があり、モデルにより上半身の姿勢維持に必要な筋負担を評価できることを確認した。

Table 1 Correlation Coefficient between Joint Torque and Muscular Activity

	Extension/Flection	Leteroflection
Head&Neck	0.94	0.67
Chest&Lumbar	0.88	0.79

4.3 動作負担の検証（動的負担の検証）

動作中の負担を検証するため、頸部と腰部の能動的限界まで屈伸と側屈を繰り返す運動をそれぞれ行った。動作の統制はメトロノームを用いて0.50Hzと0.66Hzの2種類の周期で計測を行った。

腰部の屈伸運動に寄与する筋の活動（腹直筋と体幹起立筋）と、モデルより推定した腰部関節トルクの時間変化をFig.10に示す。体幹起立筋は腰部の屈曲運動の制動と伸展運動の発動を、腹直筋は伸展運動の制動と屈曲運動の発動の役割を担っており、両筋活動の時間的変化の傾向は、推定した腰部の関節トルクと対応がとれていることが分かった。腰部の側屈運動についても、頸部の屈伸運動と側屈運動についても同様の結果が得られ、本推定手法により上半身の運動に必要な筋負担を評価できることを確認した。

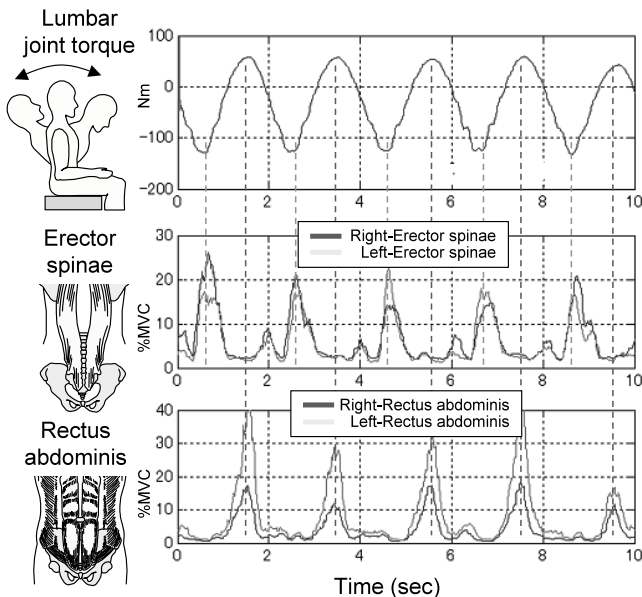


Fig.10 Relation between Lumbar Joint Torque and Muscular Activity During Extension and Flexion

5. 負担推定手法の車両評価への適用

提案したモデルで、姿勢維持と単純動作における筋活動の時間変化を評価できることを確認した。本章では、このモデルを用いて、複雑な動作となる乗降動作の上半身の負担評価が可能か車両寸法を変更して検討した。

5.1 ルーフ高を変化させた際の負担評価

第2章で計測したルーフ高を変更した際の乗降動作データをもとに、頸部と腰部の関節トルクを推定し、筋負担と負担感との比較をそれぞれ行った。Fig.11に被験者Cのある条件での頸部運動と腰部運動にそれぞれ寄与する最大筋力比の合計値（頸部：胸鎖乳突筋と僧帽筋の和、腰部：腹直筋と体幹起立筋の和）と各関節の関節トルクの時系列変化を示す。

この結果、2~3秒の着座フェーズと8~9秒の起立のフェーズにおいて、ルーフを避けるために頸部と腰部をかがめるために筋活動が増加した。これにともない頸部と腰部に対応する部位の関節トルクも増加し、両者に定性的な波形の一致を確認することができた。また、他の条件についても他の被験者についても同様な結果が得られ、本モデルで推定した関節トルクにより、乗降動作における筋活動を簡易的に評価可能であることを確認した。

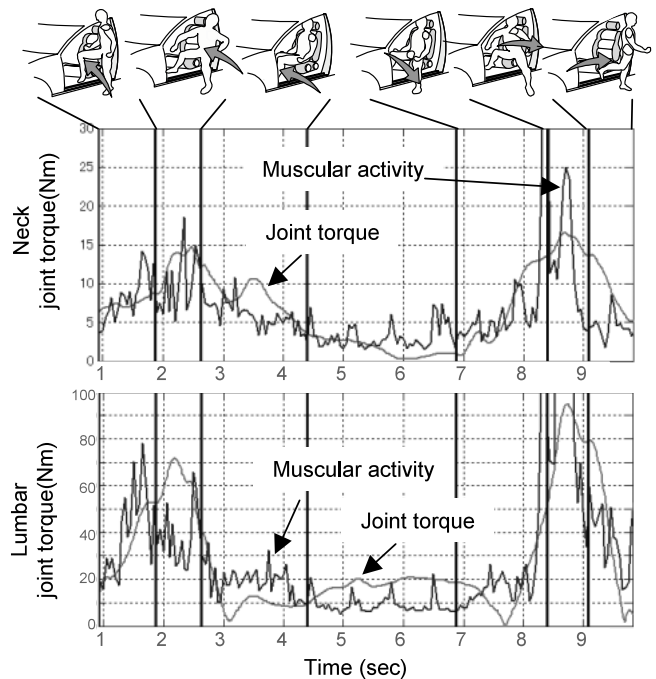


Fig.11 Relation between Joint Torque and Muscular Activity During Ingress and Egress

ルーフ高を変更したときの着座と起立のフェーズにおける被験者Cの腰部運動に寄与する被験筋の最大筋力比の時間積分値と関節トルクの時間積分値の関係をFig.12に示す。両者には高い相関関係があり、筋負担が増加すると関節トルクも増加することが分かった。頸部についても同様な結果が得られた。

関節トルクが負担感に影響を及ぼしているか確認するため、着座と起立のフェーズにおける関節トルクと負担感との対応を見た。腰部の結果をFig.13に示す。両者には高い相関関係があり、関節トルクが増加すると負担感も増加することが分かった。頸部についても他の被験者についても同様な結果が得られた。

以上のことから、ルーフ高が低くなると、これを避けるために首と腰を曲げる度合いが大きくなり、首や腰を曲げた姿勢を維持するための筋活動と同様に、関節トルクが増加し、負担感も増加するという第2章の実験で観察された現象が定量的に分析できた。

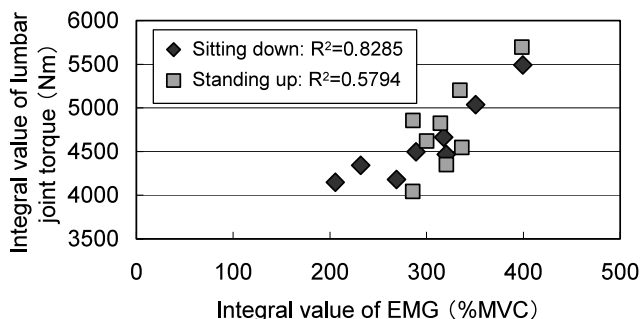


Fig.12 Relation between Muscular Load and Joint Torque about Lumbar

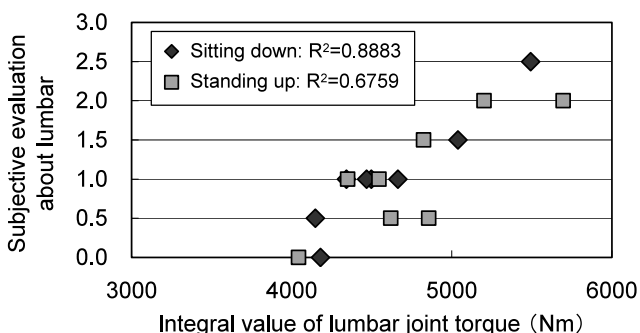


Fig.13 Relation between Joint Torque and Subjective Evaluation about Lumbar

5.2 ルーフ高とフロア高を変化させた際の負担評価

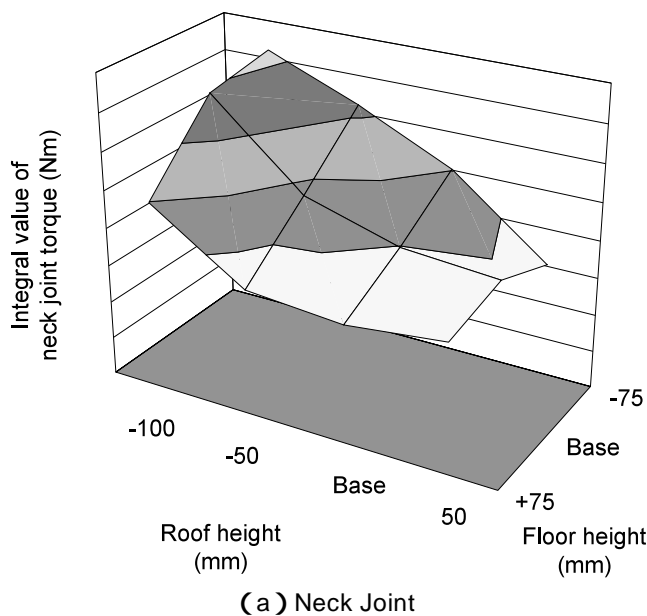
ルーフ高に加え、フロア高 (Fig.1) が上半身の負担に与える影響について検討した。実験方法は第2章の実験と同様とし、3次元動作計測から頸部と腰部の関節トルクをそれぞれ推定した。モックアップの設定は、Table 2に示すようにルーフ高：4設定とフロア高：3設定を組み合わせた12設定とした。被験者は第4章の被験者Dとした。

Table 2 Setting of Mockup (mm)

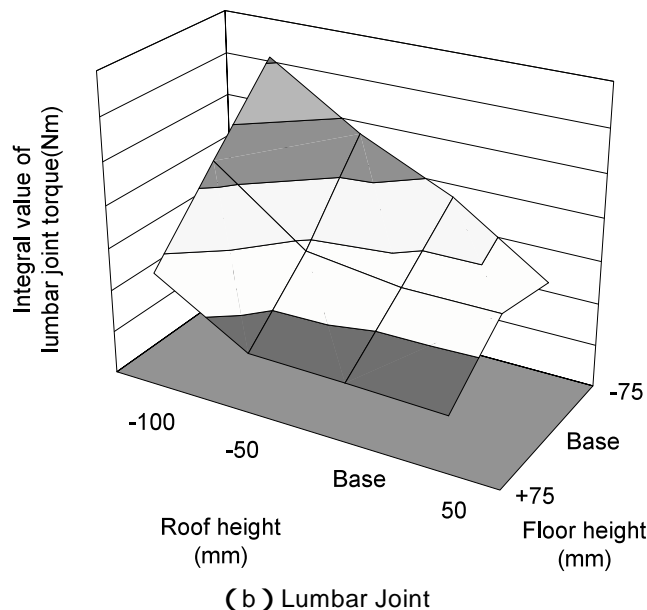
Roof height from floor	-100	-50	Base	+50
Floor height from ground	-75	Base	+75	

ルーフ高とフロア高を変えたときの着座フェーズにおける頸部と腰部の関節トルクの時間積分値の変化をそれぞれ Fig.14に示す。なお、各条件で乗降動作は3試行繰り返し、関節トルクの積分値は3試行の平均値とした。

ルーフ高が低くなると、どのフロア高でも頸部と腰部の関節トルクはそれぞれ増加した。また、フロア高が低いほど、関節トルクの増加する度合いが高い。今回の実験条件では、ルーフ高とフロア高がそれぞれ低いと、関節トルクが最も高く、逆に、ルーフ高とフロア高が高いと関節トルクは低い結果となった。起立のフェーズにおける頸部と腰部の関節トルクについても同様な傾向を示した。



(a) Neck Joint



(b) Lumbar Joint

Fig.14 Relation between Joint Torque and Vehicle Dimension

ルーフ高とフロア高が変化したときの着座動作から関節トルクの発生原因について考察する。Fig.14(a)のように、ルーフ高が低くなるとルーフを避けるために頸部や腰部を曲げて着座するため、関節トルクが増加する。更に、Fig.15(b)のようにフロア高が低くなることでシート位置も低くなり、腰部をかかめるようにして着座するため、関節トルクが増加する。それに対して、フロア高が「Base」の設定は、立位姿勢時 (Fig.15(d)) の腰部の位置とシートの高さが同程度であり、着座時に頸部や腰部を曲げる量が少なくてすむ。更に、フロア高が「+75mm」の設定では体を持ち上げるようにして着座するため、腰部の屈曲量は

小さくなる (Fig.15(c))。ルーフ高が「Base」の設定では、シート座面からルーフまでの鉛直距離が被験者の座高と同程度であり、これより高い「+50mm」の設定では、ルーフ高を避けるために頸部や腰部を曲げる必要も少なく、関節トルクの発生が小さいと考えられる。

関節トルクが負担感に影響を及ぼしていることを検証するため、着座と起立のフェーズにおける関節トルクの時間積分値と主観評価との対応を見たところ、両者には高い相関があり、関節トルクが増加すると負担感も増加することを確認した。

以上のことから、上半身の負担はルーフ高に加え、腰を曲げる動作に起因するフロア高なども影響しているといえる。

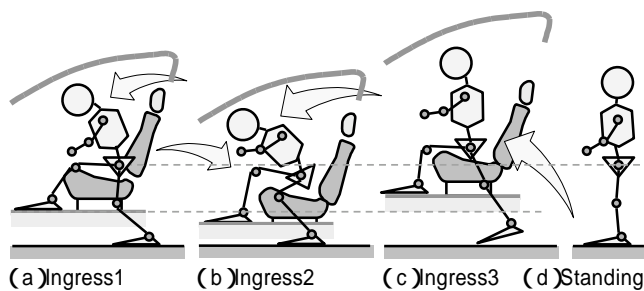


Fig.15 Relation between Vehicle Dimension and Ingress Motion

6. まとめ

乗降動作時の上半身の肉体負担を客観的にかつ定量的に評価するため、頸部と腰部の関節トルクを負担の指標として、動作から負担を推定する手法を構築した。被験者を20代男性とし、乗降動作を一意に統制して、モデルの有効性を検証した結果、以下のことが確認できた。

- ・上半身の肉体負担は、ルーフをよけて着座、起立するフェーズにおいて頸部と腰部付近に発生する。
- ・モデルより推定した頸部と腰部の関節トルクが対応する筋の筋活動とそのときの負担感とそれぞれ一致し、負担推定手法の妥当性を得た。
- ・上半身の肉体負担には、ルーフ高に加え、腰を曲げる動作に起因するフロア高なども影響している。

今後、体格の小さい女性や筋力の衰えた高齢者等の負担も評価可能とするため、体格差や動作の違いを考慮した負担評価の妥当性を検証し、本手法を誰にでも使いやすい自動車の実現に活用していく。

参考文献

- (1) 小竹ほか：自動車乗降動作における身体的負担推定手法の提案とその評価，自動車技術会学術講演会前刷集，No.130-05，p.5-10（2005）
- (2) 小竹ほか：自動車乗降時における上半身の身体負担解明とその評価手法の提案，自動車技術会学術講演会前刷集，No.100-06，p.11-16（2006）
- (3) 吉澤ほか：自動車乗降時における車両寸法と上半身の身体的負担の関係，自動車技術会学術講演会前刷集，No.100-06，p.17-20（2006）
- (4) 石川ほか：理学療法技術ガイド，文光堂，p.47-48（2001）
- (5) 日本機械学会：バイオメカニクス数値シミュレーション，コロナ社，p.190-228（1999）
- (6) 阿江ほか：日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定，バイオメカニズム，11，p.23-33（1992）
- (7) 福林ほか：動きでわかる解剖と機能，医学の日本社，p.101-133（1999）
- (8) 河合ほか：肉単，エヌ・ティ・エス，p.2-39（2004）
- (9) 河合ほか：骨単，エヌ・ティ・エス，p.2-59（2004）

著者



吉澤公理



末富隆雅



小竹元基



宮沢悠介



鎌田 実