

衝突シミュレーションで用いる 鉄道用の人体モデルの開発

中井 一馬* 鈴木 大輔* 榎並 祥太*

Development of a Human Model for Railway Collision on Numerical Simulation

Kazuma NAKAI Daisuke SUZUKI Shota ENAMI

Dummy models for numerical simulation of impact has their evaluable direction. For example, when evaluating the collision safety, separate dummy models are employed depending on whether the dummy models are facing in the direction parallel to the travel or perpendicular to the travel. Meanwhile, it is difficult to evaluate the interior components of Japanese railway vehicles because the physiques of dummy models are based on Westerners. Therefore, this study proposed a human model for Japanese to evaluate various situations in a railway vehicle.

キーワード：安全，人間工学，列車衝突，シミュレーション，車内設備

1. 緒言

自動車や航空分野では事故を未然に防ぐ方策だけでなく、事故後の被害を抑える対策が重要な位置を占めている。鉄道においても、欧米では事故後の被害を抑えることを目的とした研究が活発に進められており、欧州規格 EN15227¹⁾ や米国連邦規則 CFR238²⁾ に衝突安全性の要件が規定されている。一方、国内では JIS E 7106³⁾ に車体強度の基準はあるものの衝突事故には対応していない。そのため、衝突事故における被害軽減の観点に基づいた基準策定が求められている。基準策定に向けた検討には、事故時の車内の安全性を適正に評価することが重要となる。

筆者らの研究では、列車衝突で乗客が受ける被害を2つに分けて整理している。1つ目は、列車が他の列車や線路上の障害物などに衝突（以下、1次衝突）した際に、車体変形により乗客が被害を受ける場合であり、2つ目は、1次衝突により車内に発生する衝撃加速度により投げ出され車内設備や他の乗客へ衝突すること（以下、2次衝突）により被害を受ける場合である。本研究では後者の被害に着目した。

被害の程度は、1次衝突後に車内に発生する衝撃加速度、2次衝突する車内設備の特性および乗客の初期配置といったパラメータに依存する。これらのパラメータと被害の程度の関係把握するために、台車上に車内設備と人体を模したダミー人形を配置し、台車自体に衝撃加速度を与えることにより台車上で事故を再現する衝撃試験手法がある。この試験方法や被害評価方法は自動車業界で開発され、航空業界など他の分野でも現在用いられている⁴⁾。様々な条件で試験を実施することによりパラ

メータと被害状況の関係が明確になるが、物理的・コスト的制約が大きいため、試験条件および試番数が限られる。より効率的にケーススタディを行い、試験を補完する方法として衝突シミュレーション⁵⁾がある。車内設備のモデルとダミー人形を模したダミーモデルを用いて、コンピュータ上で衝撃試験を実施する手法である。

シミュレーションに用いるダミーモデルには複数のタイプがある（図1）。座っている乗客に対して前面からの衝撃を想定したタイプと側面からの衝撃を想定したタイプは構造が異なる。また、歩行者の評価には立位用のダミーモデルが用いられる。自動車業界では想定する事故状況に合わせてこれらの複数のダミーモデルを使い分けて衝撃シミュレーションを行っている。しかしながら、列車内の乗客の姿勢や向いている方向の多様性に対応するのが困難な場面がある。また、欧米人体格であることから、2次衝突する箇所が日本人と異なる等、国内の車内設備を対象とした傷害評価や対策の検討には難がある。そこで、これらの問題を解決するための鉄道用の人体モデルを開発した。



(a) 前面衝突用 (b) 側面衝突用 (c) 立位用

図1 シミュレーションに用いるダミーモデル

* 人間科学研究部 人間工学研究室

2. 鉄道用の日本人体格の人体モデルの開発

自動車業界では事故時の人体傷害を詳細に評価するために人体に忠実な構造をもつ人体有限要素モデルが開発されている。そこで ESI Software らが開発した人体有限要素モデルである H-Model⁶⁾ をベースとして、鉄道用の人体モデルを開発した(図2)。以下に、カスタマイズの概要と解析精度の確認結果を示す。

2.1 人体モデルのカスタマイズ

被害状況の把握には、致命傷に繋がる可能性が高い頭部あるいは胸部の傷害評価が重要である。しかし、従来のダミーモデルにおいて胸部は、それぞれが評価する衝撃方向に特化した構造となっており、実際の人体の胸部構造とは異なっている。このことから、実際の人体の胸部と同様の構造をもつ人体モデルであれば、列車内で発生する可能性のある全方位の衝撃を評価できると考えた。H-Model は実際の人体と同様の骨格構造でモデリングされているので、上記の観点から本モデルをベースとすることとした。このモデルは、全方位の衝撃評価が可能ではあるが、立ち座り等の姿勢変更ができない米国成人男性体格(身長約175cm、体重約78kg)である。日本の鉄道を対象とするのであれば、このモデルを日本人成人男性体格にカスタマイズすることが望ましい。

2.1.1 H-model の構造的特徴とカスタマイズ点

H-Model は、身体表面から皮膚、肉、骨のように実際の人体と同様に層になっており、胸部、腹部には内臓も含まれている。皮膚および骨はシェル要素、肋骨部分はビーム要素で構築されており、実際の人体と同様に12対あり、全方位からの衝撃に対して変形する構造となっている。皮膚下の肉と内臓はソリッド要素で構築されている。背骨の繋がりと四肢等の関節は回転ジョイントで模擬されている。H-Model から肩部、骨盤部、膝部の一部のソリッド要素を削除し立ち姿勢から座り姿勢への変更を可能にした。

2.1.2 日本人体格へのカスタマイズ

人体モデルの体格を決めるために日本人の成人男性体格の調査を行った。人間生活工学研究センターが2004年から2006年に約3500人の20代から70代までの男性に対して身長と体重を計測したデータ⁷⁾と、2005年の国勢調査⁸⁾から抽出された20代から70代までの男性の人口から、年齢群毎の平均身長と平均体重の関係を求めた(図3)。平均身長が最も高い年齢群は20代から30代で約172cmであり、平均体重が最も重い年齢群は20代から50代で約68kgであった。このように年齢群によって平均身長や体重にばらつきがみられた。今後は鉄道利用者に占める高齢者の割合が増加することが考えられることから、人体モデルのカスタマイズにおいて

想定する鉄道利用者の年齢の範囲を20代から70代とした。この年代群の平均身長と平均体重を参考に、身長169cm、体重66kgを日本人の成人男性体格とした。

この体格にするために人体各部の質量を調整した。ただし、次節で示す解析精度を保ったままでの調整とした。構築した人体モデルは、節点数が約19000で要素数が約22000となった。

2.2 解析精度の確認

構築した人体モデルの解析精度を確認するために、過去に米国で行われた実際の人体を用いた胸部インパクト試験により得られたデータ^{9)~13)}と比較した。

胸部前面インパクトシミュレーションの結果を図4と図5に示す。比較対象の試験は直径150mm、質量23kgのインパクトを複数の屍体の胸部中心に前面から4.3m/sおよび6.7m/sで衝撃させた際の、胸部のたわみ変位とインパクトが受ける反力荷重を計測している。人体は個体差を持つことから試験結果には幅が見られた。図5は過去の試験と本モデルを用いたシミュレーションにおけるインパクトが受ける反力荷重とインパクト方向の胸部のたわみ変位の関係をそれぞれ示している。これらの図からシミュレーション結果は、試験結果上限と下限の間

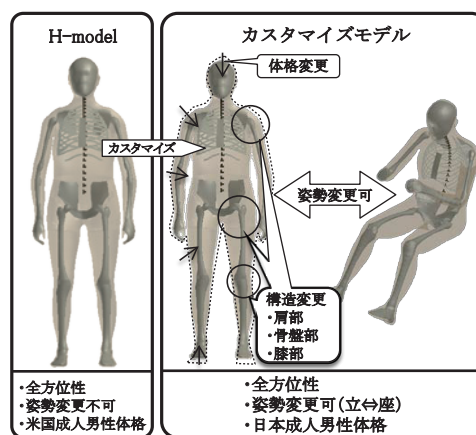


図2 開発した人体モデルの特徴

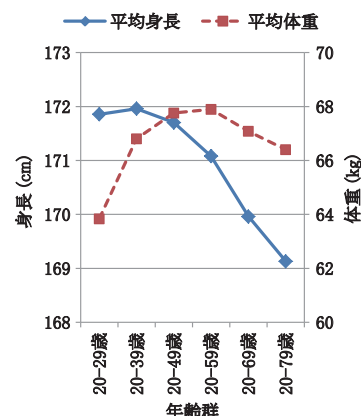


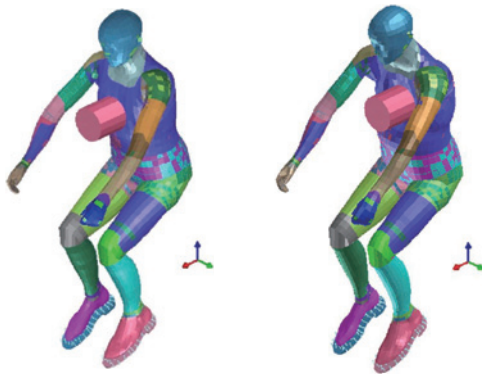
図3 年齢群毎の平均身長と体重の関係

の範囲に概ね収まることを確認した。

胸部側面インパクトシミュレーションの結果を図6と図7に示す。比較対象の試験は前述したインパクトを側面から4.3m/sおよび6.7m/sで衝撃させたものである。図7は試験結果とシミュレーション結果から得られたインパクトが受ける時系列の反力荷重を示している。これ

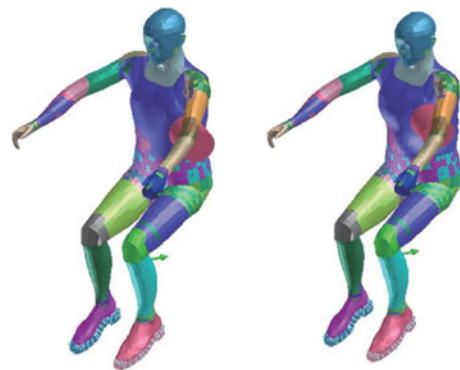
らの図からシミュレーション結果は、試験結果上限と下限の間の範囲に概ね収まることを確認した。

以上のことから前面および側面からの衝撃に対する人体の特性を精度よく表現できており、全方位からの胸部への衝撃の評価が可能であることを確認した。



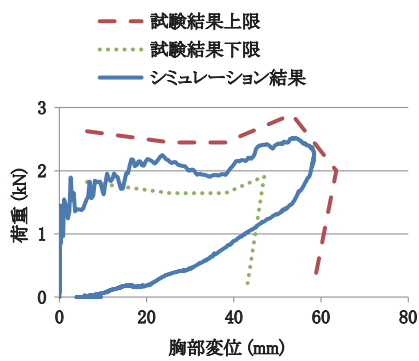
(a) 衝突直前 (b) 衝突後20ms

図4 胸部前面インパクトシミュレーション

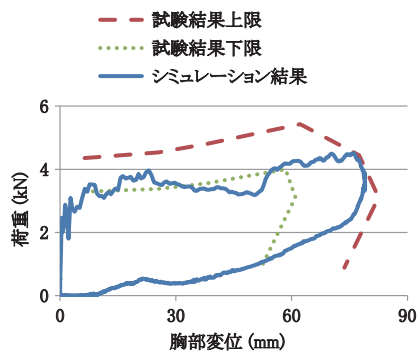


(a) 衝突直前 (b) 衝突後18ms

図6 胸部側面インパクトシミュレーション

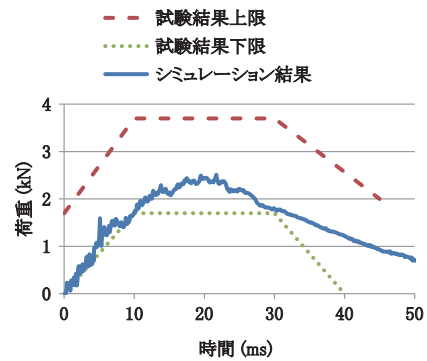


(a) インパクト速度4.3m/s

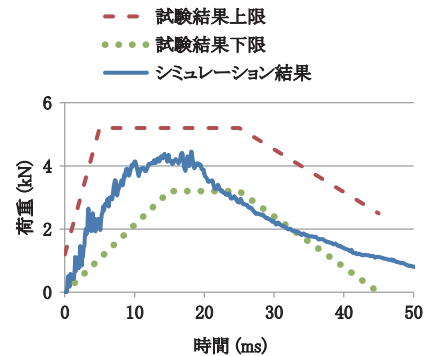


(b) インパクト速度6.7m/s

図5 胸部前面の試験結果とシミュレーション結果の比較



(a) インパクト速度4.3m/s



(b) インパクト速度6.7m/s

図7 胸部側面の試験結果とシミュレーション結果の比較

特集：人間科学

3. カスタマイズした人体モデルを用いた傷害評価

カスタマイズした人体モデルを用いることで所期の目的が達成できるかどうかを確認するために、列車内に特有の様々な被害パターンにおける傷害評価を実施した。

3.1 クロスシートテーブルの傷害評価

(1) シミュレーション条件

図8に示すように従来の着座前面衝突用ダミーモデル(以下、前突用ダミーモデル)と人体モデルを、クロスシートのテーブルに対して正面向き、斜め向き、横向きに着座させて、胸部にテーブルを衝撃させるシミュレーションを実施した。ここで、テーブルの幅は360mm、厚みは20mmで、最上面は床面から800mmの位置として、変形のない剛体と仮定した。衝突時における人体との初期速度として3m/sを床面、クロスシート、テーブルに与えた。前突用ダミーモデルに関しては胸部変位の最大値を傷害評価として用い、人体モデルに関しては背骨に対する肋骨の変位の最大値を傷害評価に用いた。

(2) 結果

図9に前突用ダミーモデルと人体モデルの正面向きのシミュレーション結果を示す。どちらの条件においても、テーブルが胸部に衝撃し乗客が倒れ込む挙動がみられた。衝撃時に出力された最大胸部変位を図10に表す。前突用ダミーモデルは、斜め方向および横方向の胸部傷害を過小に評価するが、開発した人体モデルは全方位の傷害評価が可能であることが確認できた。

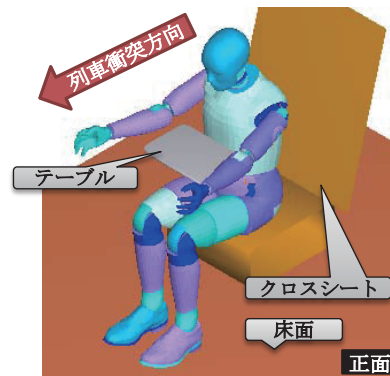
3.2 複数方向からの衝撃に対する傷害評価

(1) シミュレーション条件

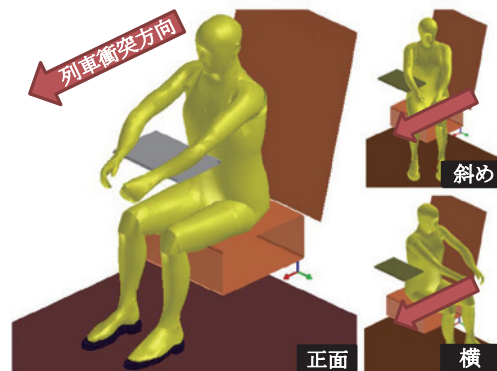
前項の被害パターンの評価では人体に対する衝撃方向は1方向のみであったが、列車内では衝撃により大きく飛ばされ、複数の設備で複数の方向に2次衝突する可能性もある。そこで図11に示すように車内設備1と車内設備2に対して乗客が立っている状況においてシミュレーションを実施した。前項で用いた人体モデルの姿勢を立位に変更して立位乗客とした。ここで、車内設備1と2は共に剛体と仮定し、入力条件として踏切上で約20tの大型自動車に列車が約50km/hで衝突する事故を想定した衝撃加速度を床面、車内設備1および2に与えた。また、人体モデルの背骨に対する肋骨変位の最大値を傷害評価として用いた。

(2) 結果

図12に示すように、人体の前面方向から車内設備1と2次衝突した後、側面方向から車内設備2と2次衝突する挙動が見られた。2次衝突時に出力される各方向の最大胸部変位を図13に示す。前面方向において胸部変

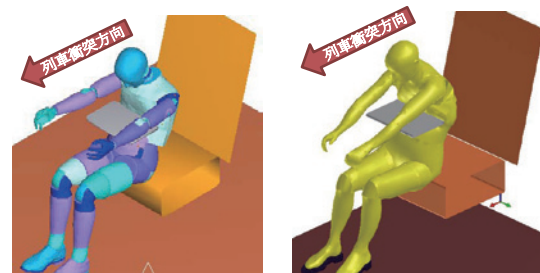


(a) 前面衝突用ダミーモデル



(b) 人体モデル

図8 クロスシートテーブルに対する初期配置



(a) 前面衝突用ダミーモデル (b) 人体モデル

図9 正面向き条件のシミュレーション結果 (テーブル衝突後90ms)

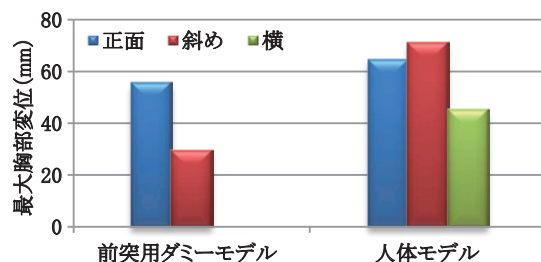


図10 最大胸部変位の前面衝突用ダミーモデルと開発した人体モデルの比較

位が最大となるのは車内設備1との2次衝突時であり、側面方向において胸部変位が最大となるのは車内設備2との2次衝突時である。本シミュレーションでは、車内設備1および2は壁と仮定したが、これらが手すりや他の乗客であっても同様に人体には複数方向からの衝撃が発生すると予想される。このように列車内特有の被害パターンにおいても傷害評価が可能であることを確認できた。

3.3 クロスシートの傷害評価

(1) シミュレーション条件

前項までの全方位からの傷害評価に対して、体格差による挙動評価を実施した。米国成人男性体格のモデルと今回構築した日本成人男性体格である人体モデルを用いて2次衝突する車内設備の位置の比較を行うため、図14に示すように、クロスシート（シート間のピッチ960mm）に着座した乗客におけるシミュレーションを実施した。クロスシートは第3.1項で用いたモデルと同様のモデルを用いており、入力条件として前項で用いた衝撃加速度を床面およびクロスシートに与えた。頭部が2次衝突するクロスシート背面の床面からの高さを評価に用いた。

(2) 結果

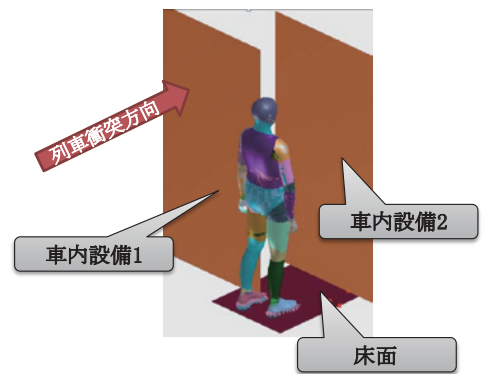
図15に日本人体格の人体モデルにおけるシミュレーション結果を示す。クロスシート背面に膝部が2次衝突し、その後、頭部が2次衝突する挙動がみられた。これは米人体格でも同様であった。図16に示すように体格差により頭部が衝突する高さは約40mm異なった。一般的なクロスシートにおいて、頭部が2次衝突する付近には図17に示すようなテーブルを固定するつまみがある。例えば、頭部の傷害の程度を低くするために、このつまみに2次衝突しないよう配置の検討を実施することが可能である。以上のように本シミュレーションにより、日本人体格に適した車内設備の評価が可能であることが確認できた。

4. 結言

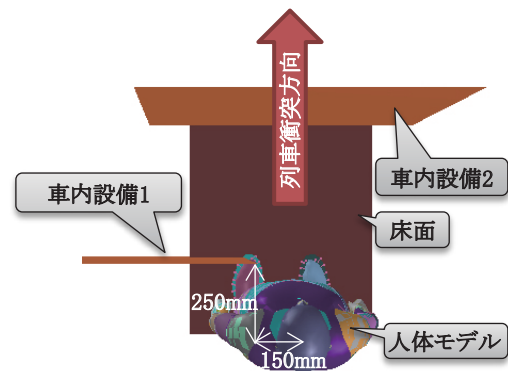
衝突シミュレーションにおいて、従来のダミーモデルでは評価が難しい列車内における2次衝突について、傷害評価が可能な鉄道用の日本人体格の人体モデルを開発した。このモデルは以下の特徴を有している。

- ・立位から座位までの姿勢変更が可能である
- ・全方位からの衝撃評価が可能である
- ・身長169cm、体重66kgの日本人の成人男性の体格である

この人体モデルを用いた列車内に特有の様々な被害パターンにおける傷害評価を実施した。その結果、列車衝



(a) 概観



(b) 上面図

図11 立位乗客の初期配置



(a) 車内設備1と衝突時 (b) 車内設備2と衝突時

図12 立位乗客のシミュレーション結果

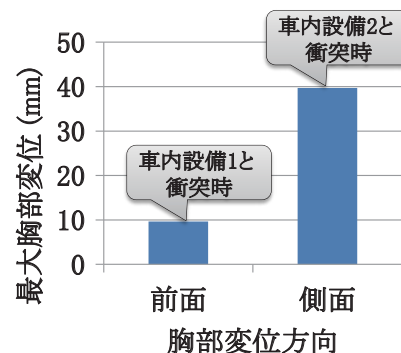


図13 各方向の最大胸部変位

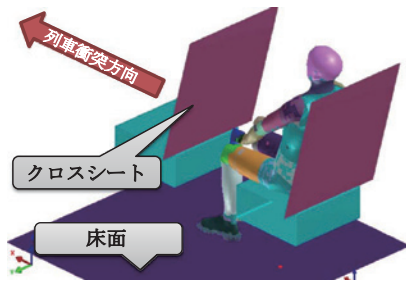
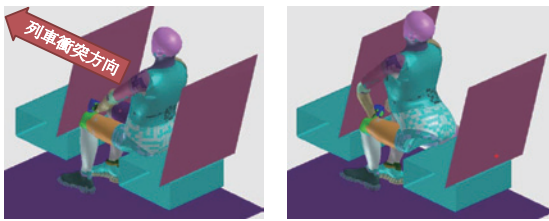


図 14 クロスシート乗客の初期配置
(日本人体格)



(a) 膝部衝突時 (b) 頭部衝突時

図 15 クロスシート乗客のシミュレーション結果
(日本人体格)

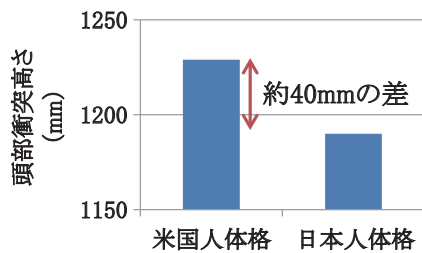


図 16 頭部 2 次衝突高さの比較

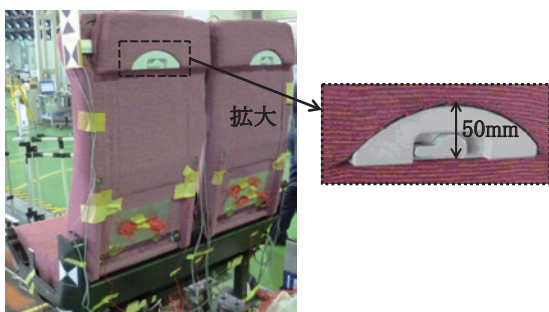


図 17 クロスシートテーブル背面

突時の車内安全性評価が可能であることを確認した。

なお、本文に記載した研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

文献

- 1) CEN, EN15227 Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies, 2008.
- 2) US DOT, 49CFR238 Passenger equipment safety standards, Code of Federal Regulations Title 49 Transportation Part 238, 2009.
- 3) JIS E 7106：鉄道車両－旅客車用構体－設計通則，日本規格協会，2006
- 4) 国土交通省：耐空性審査要領，鳳文書林出版，p.105, 2012
- 5) 中井一馬：車両衝撃時の乗客の動きを推測する，RRR, Vol.70, No.9, pp.20-23, 2013
- 6) Eberhard, H., Hyung-Yun, C., Stephane, R., Muriel, B., “Human Models for Crash and Impact Simulation,” *Computational Models for the Human Body Special Volume of Handbook of Numerical Analysis*, Vol. XII, pp.297-357, 2004.
- 7) 社団法人人間生活工学研究センター：日本人の人体寸法データブック 2004-2006, 2008
- 8) 総務省：男女別人口及び人口性比，平成 17 年国勢調査 最終報告書「日本の人口」統計表，2010
- 9) Charles, K., Dennis, S., Alan, N., “Impact tolerance and response of the human thorax II,” *SAEpaper*, No.741187, pp3724-3762, 1974.
- 10) Raymond, N., “Analysis of chest impact response data and scaled performance recommendations,” *SAEpaper*, No.741188, pp3763-3779, 1974.
- 11) Kent, R., et al., “The Role of muscle tensing on the force-deflection response of the thorax and a reassessment of frontal impact thoracic biofidelity corridors,” *IMechE*, Vol.220, Part D: Automobile Engineering, 2006.
- 12) David, V., “Biomechanical responses and injuries in blunt lateral impact,” *SAEpaper*, No.892432, pp113-141, 1989.
- 13) ISO, “Road vehicles -- Anthropomorphic side impact dummy -- Lateral impact response requirements to assess the biofidelity of the dummy,” *ISO/TR 9790*, 1999.