

## 技術論文

## 乗員安全解析ソフトウェアの活用事例紹介

### Applications of Occupant Safety Simulation using MADYMO

植田 武男  
Takeo Ueda  
立野井 康人  
Yasuhito Tatenoi  
中西 利和  
Toshikazu Nakanishi

近年、車両のCAEモデルに人体のCAEモデルを組み合わせることで解析を行うことにより、自動車の衝突や横転時の乗員の挙動及び傷害を事前に予測・評価することが可能になってきた。人体のCAEモデルには、大きく分けてマルチボディモデルと有限要素モデルがあり、マルチボディモデルは、比較的簡単に寸法、姿勢や力学的特性の変更が可能でかつ計算時間が短いため、簡便な解析が実施可能であり実用的である。本稿は、マルチボディモデルをベースとする乗員安全解析ソフトウェアMADYMOを用いて、シートベルトの動的試験と車両の横転試験をコンピュータ上で模擬する手法を紹介する。

In recent years, simulation based on the combination of vehicle and human body CAE models has become possible to predict and assess occupant behavior and injury in vehicle collision or rollover. Human body CAE modeling can roughly be divided into two types: one using multi-body techniques and the other using finite element techniques. The multi-body modeling offers simple, easy analysis and is thus more practical as dimensions, posture and dynamic properties can be changed relatively easily and calculation takes less time. This paper attempts to briefly present techniques to simulate dynamic seatbelt and vehicle rollover tests on a computer using MADYMO, the occupant safety simulation software that is mainly based on multi-body techniques.

#### 1. はじめに

機械構造物設計において、強度や性能の要求を満足するために、設計段階において、応力解析（FEA）や流体解析（CFD）、機構・運動解析（MBD）等のCAE技術を用いる事で、開発期間の短縮、品質向上が実現されている。構造物の中でも、建設機械や車両等は、人間が乗って操縦して動かすものであり、作業、運転状況によっては、機械の衝突や転倒による危険が伴う場合がある。機械そのものの設計は、CAEの活用等により耐久性や低騒音化などレベルアップが進んでいるが、乗っている人間の安全性については、これまで、その検討にコンピュータシミュレーションを用いるという事は、あまり着目されることはなかった。これは、人体という生物学的な構造が、既存のCAEで利用されている技術によるモデル化（要素による離散化等）とイメージ的に相いれないという面があったと思われる。これに対し、近年の急速なコンピュータの進歩や、人体のモデル化手法の開発により、忠実に人間の体の動きを表すCAEモデルが実用化されており、自動車業界を中心に利用が進んでいる（図1.1参照）。

このような人体モデルにより、例えば、衝突において予想される人体各部の傷害の程度が評価でき、衝突試験に先立って各種の対策が立案できる。単に構造体の変形量や加速度での評価に対して、より実際に即した判断が可能で、乗員の安全性評価の面からも、開発の効率化が進んでいる。

本報告では、人体モデルにより乗員安全解析ソフトウェアとして、世界的に著名なMADYMOを用いた乗員安全解析の技術的な内容と事例について紹介する。

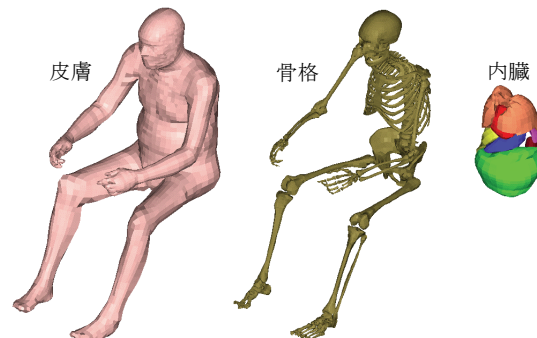


図1.1 実人体CAEモデルの例（MADYMOの有限要素モデル）

## 2. 乗員安全解析ソフトウェアMADYMOの紹介

MADYMO (MAtheMatical DYnamic MOdel) は、オランダTNO Automotive Safety Solutions BV (TASS) が開発した乗員安全解析ソフトウェアであり、ソルバ、衝突ダミー及び実人体モデルのデータベース、プリ・ポストプロセッサ等から構成される。

### 2.1 ソルバ

乗員安全解析に用いる3次元モデルは、大きく分けて、マルチボディモデルと有限要素モデルに分けることができる。マルチボディモデルは、ボディ間の複雑な運動学的結合から成る力学系の3次元運動を、効率的にシミュレートできる利点がある。有限要素モデルは、有限要素の3次元運動だけでなく、有限要素内の局所的な構造変形、応力分布をシミュレートできる利点がある。マルチボディモデルよりも有限要素モデルは、モデルの作成に時間を要し、シミュレーションの実行に多大な計算時間が必要となることが多い。MADYMOのソルバは、マルチボディと有限要素の両方を扱うことができるので、初期設計段階では、マルチボディが短時間で計算可能であることを活かして、多くの設計パラメータを含む最適化の研究に活用できる。また、MADYMOのソルバには、他の有限要素プログラム (LS-DYNA, Pam-Crash, Radioss, ABAQUS) と連携して解析を行うカップリング機能があり、詳細設計段階では車両の変形を考慮した詳細な確認に活用できる。

### 2.2 衝突ダミーおよび実人体モデルのデータベース

人体のCAEモデルには、自動車の衝突試験で用いられるハイブリッドIIIやEuroSIDなどの衝突ダミーを数値モデル化したものと、実際の人体の構造をもとに数値モデル化したものがある。衝突ダミーのCAEモデルは、実物の衝突ダミーの寸法、質量、慣性モーメント、関節可動角、表面の接触荷重特性等を入力して、衝突ダミーの応答特性を再現している。

MADYMOは、マルチボディの衝突ダミーのCAEモデルのデータベースを豊富に備えている。マルチボディモデルは、衝突ダミーの形状を楕円体で表現したモデルと細かな面 (ファセット) を持つモデルの2種類がある (図2.2.1)。これらのダミーは、実物の衝突ダミーで行われている較正試験などを模擬したインパクト試験、スレッド試験のシミュレーションによって、適切に衝突ダミーを表しているかを確認するための検証が実施されている。

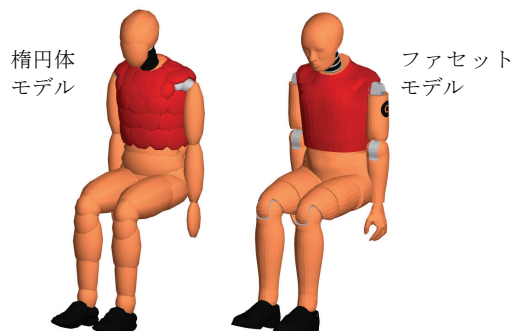


図2.2.1 衝突ダミーのCAEモデルデータベース例

衝突用ダミーは、機械要素で構成されているため、衝突時の人体の挙動や傷害の発生を正確に解析するには限界がある。コンピュータ上では、実際の人体の力学的特性や構造・機能を比較的自在に表現することが可能となっており、衝突ダミーでは表現できなかった実際の人間の応答特性、傷害のメカニズム等を調べることができる。

MADYMOは、マルチボディの実人体 (乗員及び歩行者) のCAEモデルのデータベースも豊富に備えている。マルチボディモデルであるため、比較的簡単に寸法、姿勢や力学的特性の変更が可能である (図2.2.2)。

これらのモデルは、被験者でのインパクト試験、スレッド試験の再現シミュレーションによって、模擬性能の検証が実施されている。

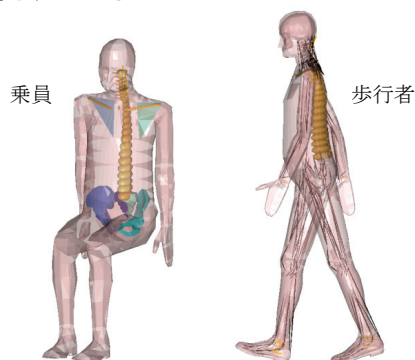


図2.2.2 実人体のCAEモデルデータベース例

### 2.3 プリ・ポストプロセッサ

MADYMOは、MADYMO専用プリ・プロセッサXMADgicとポスト・プロセッサMADPostを備えている。XMADgicの機能の一つに、乗員安全解析の設定を容易にするためのツールとして、ベルト・フィッティングがある。これは、ベルトウェビングの幅、両端位置、接触する部位、通過点などを入力して、座席ベルトモデルを作成し、衝突ダミー等の位置、姿勢に応じて配置を容易に行うことができる。

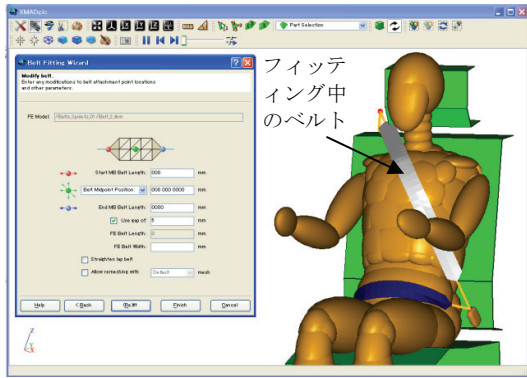


図2. 2. 3 ベルトフィッティング画面

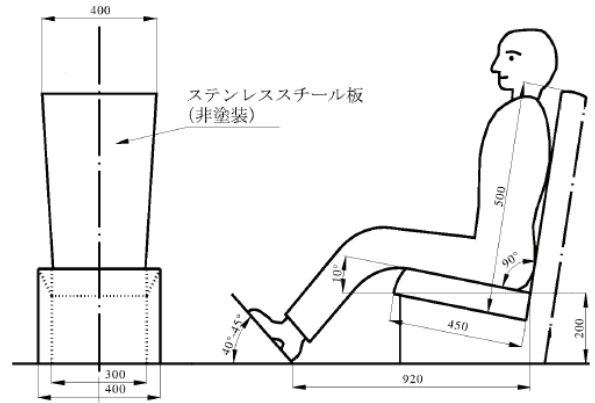


図3. 2. 1 座席の形状

寸法単位: mm / 公差: ±5mm

### 3. 活用事例 1 : シートベルトの動的試験シミュレーション

#### 3.1 目的

道路運送車両の保安基準にある座席ベルトの動的試験は、以前に負荷を受けたことのないベルトアッセンブリで、ベルトは事前に耐蝕試験、巻取装置は耐塵試験、バックルは500回の開閉サイクルなど構成部品に応じて事前に必要な試験を完了したベルトアッセンブリを用いる。実機試験での不合格は、再度部品での試験を実施する必要があるため、実機試験の繰り返し回数の削減を図って、実機試験の前に、評価基準の一つであるマネキンの前方移動量を予測するシミュレーションを行うことにした。

#### 3.2 試験の概要

事前に必要な試験を完了したベルトアッセンブリを、図3. 2. 1に示す座席を備えた台車上に、車両の取付位置と同じように取り付ける。マネキンを着座させ、ベルトアッセンブリをマネキンに取り付ける。

次に台車を、衝突の瞬間の速度が $50 \pm 1 \text{ km/h}$ となるように推進させ、距離 $40 \pm 5 \text{ cm}$ で停止させる。その時の減速度は図3. 2. 2に示す範囲とする。

衝突直前の台車の速度、減速度、マネキンの前方移動量を測定する。

評価基準は、本事例のベルトアッセンブリは、腰ベルトであるため、マネキンの前方移動量が骨盤の高さで80mmから200mmまでの間である。

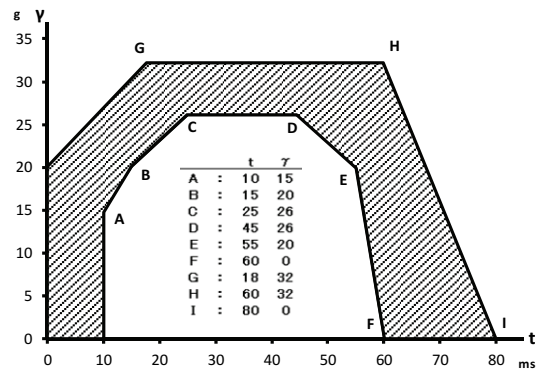


図3. 2. 2 減速度の範囲

#### 3.3 マネキンの CAE モデル

マネキンは、協定規則第16号で、「TNO-10」と呼ばれるダミーをシートベルトへの動的負荷装置として使用することが定められている。このダミーは、大人の男性（身長175cm、体重約76kg）を模擬している。マネキンは、頭部、頸部、胸部（腕部を含む）、2つの大腿部、1つの下脚部からなる。頭部と頸部、胸部と大腿部、大腿部と下脚部の間は、球面と回転ジョイントで結合されている。簡素化のために下脚部は1本とし、腕部は胸部に含まれて、省略されている。

MADYMOの衝突ダミーデータベースには、このダミーのCAEモデル (d\_tno10fc\_inc.xml) が用意されており、このモデルを使用する。このCAEモデルは、既にシミュレーションにより、妥当性が確認されたモデルである。図3. 3. 1にTNO-10のCAEモデルを示す。

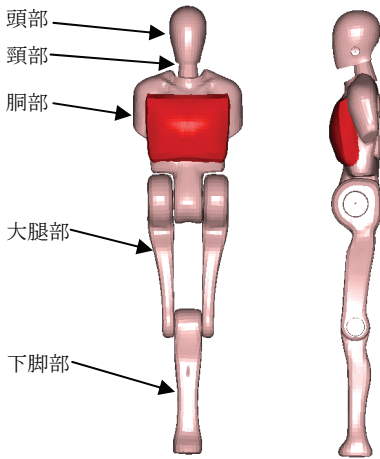


図3.3.1 TNO-10のCAEモデル

### 3.4 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルは、簡略化のために台車を推進して急減速して停止する代わりに、座席及び取付装置を固定しておき、減加速度の加速度場をマネキン及びベルトアセンブリ等に作用させる。したがって、シミュレーションモデルの対象は、座席、床、ベルトアセンブリ、取付装置及びマネキンとする。座席は、図3.2.1に示す形状で、剛体の有限要素でモデル化する。図3.4.1に、シミュレーションモデルを示す。接触する可能性がある部品間には、接触判定、接触時の荷重計算方法、荷重特性、摩擦係数を設定している。本事例では、座席とマネキン、床とマネキン、ベルトアセンブリとマネキンの間に接触判定の設定を行っている。

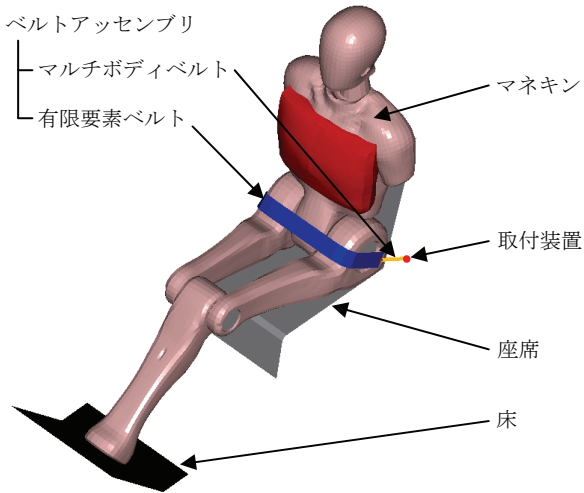


図3.4.1 シミュレーションモデル

本事例のベルトアセンブリは、緊急ロック式巻取装置を備えた腰ベルトである。左右のベルトを結合するバックルは簡略化のために省略している。ベルトウェビングは、マネキンの接触する部分を有限要素ベルトで、両端部は簡略化のためにマルチボディのベルトでモデル化している。MADYMOでは、この形態のベルトを「ハイブリッド・ベルト」と称している。有限要素ベルトとマルチボディベルトのいずれも、ウェビング単体で計測した荷重と伸びの関係をテーブルデータとして入力している。(図3.4.2)

また、ベルトの右端部には緊急ロック式巻取装置を、左端部は取付金具を配置している。緊急ロック式巻き取り装置は、ベルトの引き出し加速度が一定値を超えるとロックが作用し、それ以降は、巻取装置の巻き締め特性（荷重と伸びの関係）をベルトウェビングと同様にテーブルデータとして入力している。

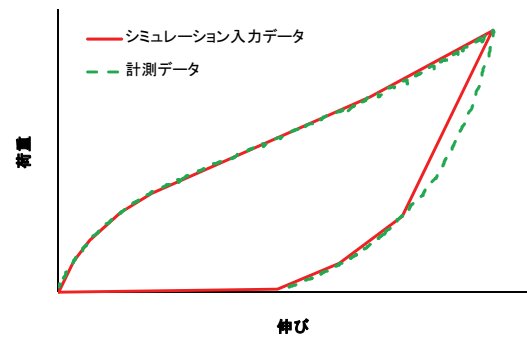


図3.4.2 ベルトウェビングの荷重と伸びの関係

### 3.5 シミュレーション結果

実機試験で計測した加速度波形を入力して実施したシミュレーションと実機試験との比較結果を図3.5.1に示す。また、前方移動量が最大となる時間のアニメーションを図3.5.2に示す。本事例では、マネキンの前方移動量及びベルト張力について良好な再現性を確認することができた。なお、80[msec]のシミュレーションを行うのに要する計算時間は、汎用のPCで約2分であり、十分な実用性があると考えている。

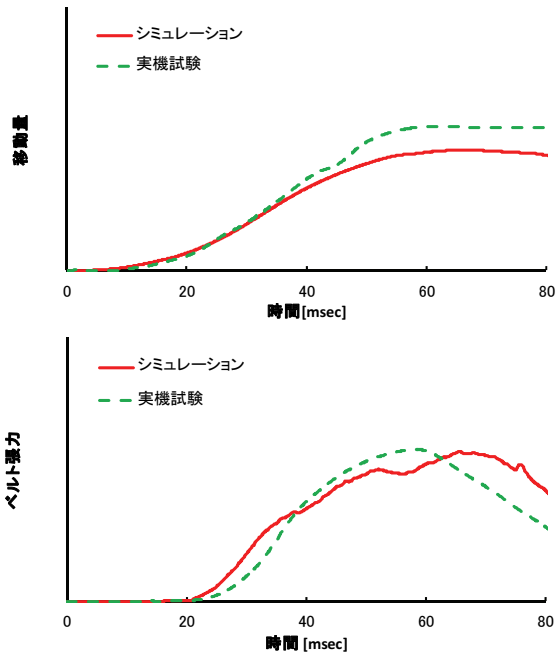


図3.5.1 シミュレーション結果

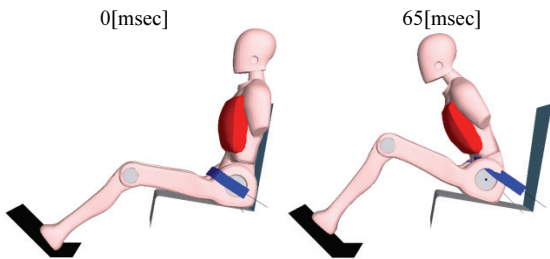


図3.5.2 アニメーション

## 4. 活用事例2： 車両転倒時の乗員挙動予測シミュレーション

### 4.1 目的

本事例は、座席ベルトなどの乗員の傷害を低減する装置の検討に使用するために、車両が横転した時の乗員の挙動を模擬するシミュレーションを行った。本事例で模擬する試験方法と乗員の傷害基準は、米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）の台車を使用したロールオーバー試験（FMVSS 208）を参考にして定めた。

### 4.2 試験の概要

この試験は、試験車両に乗員としてハイブリッドⅢ 50%男性の衝突ダミーを座席ベルトで座席に拘束し、走行方向と直角に23度傾いた台車上に、その試験車両を設置する。この台車を横方向に速度30mph（48km/h）で移動させ、急停止（最低20g、最低0.04秒以内）すると、試験車両は地面に投げ出され、車両のロール軸周りに回転、

転覆する。試験の概要図を図4.2.1に示す。

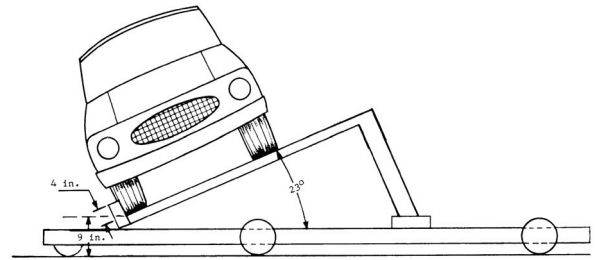


図4.2.1 試験の概要図

### 4.3 シミュレーション手順

本事例では、有限要素プログラム用の車両のCAEモデルを作成して横転時の挙動を計算し、MADYMOで乗員及び座席ベルトのCAEモデルを作成して乗員の挙動及び傷害を計算する。

MADYMOには、このようなシミュレーションを行う方法として、カップリング法とPrescribed Structural Motion法（以下、PSM法と呼ぶ）の2つの方法がある。カップリング法は、有限要素プログラムとMADYMOを同時に計算を行い、定めた時間間隔毎に、MADYMOは有限要素プログラムから接触が生じる対象部位の有限要素の位置を入力し、乗員モデルと対象部位の接触反力を計算して、それらを有限要素プログラムへ出力する。この方法は、車両の運動・変形解析に乗員モデルの影響を加味して計算するために、正確性が高いが、シミュレーションの実行に多大な計算時間が必要となることが多い。

一方、PSM法は、乗員を搭乗しない状態で有限要素プログラムを実行し、有限要素の位置の時系列データを計算しておく。それらを、MADYMOの入力データとし、MADYMO単独で乗員モデルの計算を実行する。この方法は、カップリング法と比較して正確性は劣るが、計算時間の短縮が可能であり、多水準のシミュレーションができる利点がある。

本事例は、車両の運動・変形解析に乗員の影響は小さいと考え、PSM法を用いることにした。車両の運動・変形解析には非線形動的構造計算プログラムLS-DYNAを使用した。

### 4.4 車両運動のシミュレーションモデルとその結果

車両運動のシミュレーションモデルの対象は、車両を設置する台車、地面および車両とする。車両は、地面及び台車と接触する外装およびタイヤを入力し、内装は、乗員と接触する座席、ステアリングホイール、パネル等の部位を入力しておく。台車は、図4.2.1に示す形状で、剛体の有限要素でモデル化し、台車の移動及び急停止を時系列のモーションデータとして入力する。車両には、シミュレーション開始時に台車と同じ初速を与える。台

車が急停止すると、車両は地面に投げ出され、車両のロール軸周りに回転、転覆するので、地面と車両の外装及びタイヤの間、タイヤと台車の間に、接触判定、接触時の荷重計算方法、荷重特性を設定している。図4.4.1に、車両運動の解析モデル、図4.4.2にシミュレーション結果のアニメーションを示す。

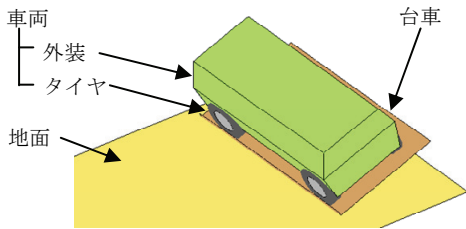


図4.4.1 車両運動の解析モデル

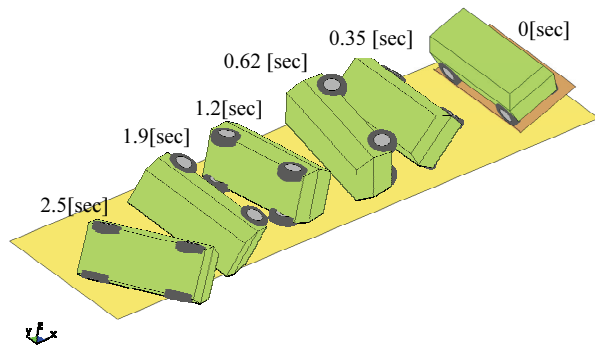


図4.4.2 シミュレーション結果アニメーション

#### 4.5 乗員挙動のシミュレーションモデルとその結果

乗員挙動のシミュレーションモデルの対象は、運転席及び助手席の乗員としてハイブリッドⅢ 50%男性の衝突ダミー、座席ベルト、座席、ステアリングホイール、パネル等の内装及び外装とする。車両の外装及び内装の有限要素及び変位の時系列データの作成は、MADYMO専用ポスト・プロセッサMADPostを使用して、LS-DYNAの出力データd3plotを読み込み、作成した。

ハイブリッドⅢ 50%男性の衝突ダミーは、楕円体モデル (d\_hyb350el\_Q\_inc.xml) を使用し、座席位置と姿勢に合わせて着座させる。衝突ダミーと外装及び内装の間に、接触判定、接触時の荷重特性等を設定している。

座席ベルトは、3項と同様にハイブリッド・ベルトでモデル化する。本事例では、(ア)腰ベルト、(イ)3点式ベルトの2水準のシミュレーションを行い、乗員挙動及び傷害値の比較を行った。図4.5.1に運転席乗員の傷害値の比較結果を示す。図4.5.2に、乗員挙動のシミュレーションモデルとその結果アニメーションを示す。

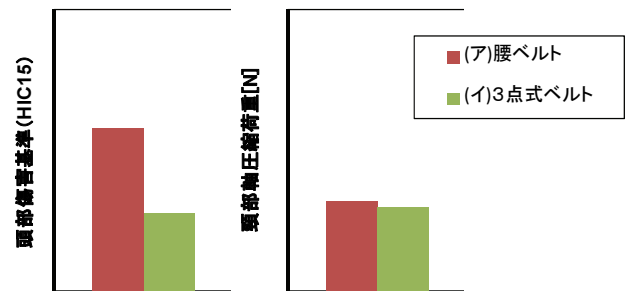


図4.5.1 運転席乗員の傷害値の比較結果

#### 4.6 考察

(ア)腰ベルトと(イ)3点式ベルトを比較すると、腰ベルトの方が傷害値が大きい。これば、腰ベルトだけでは、肩ベルトがある3点式ベルトの水準に比べて衝突ダミーの上半身の移動を抑制できていないため、頭部の外装側面との衝突速度が大きくなり、傷害値が高くなることによると考えられる。

注) 頭部傷害基準 (HIC<sub>15</sub>) は、衝突ダミー頭部に加わる合成加速度を元に算出される値である。頸部軸圧縮荷重は、衝突ダミー頸部に加わる圧縮方向の荷重の最大値である。

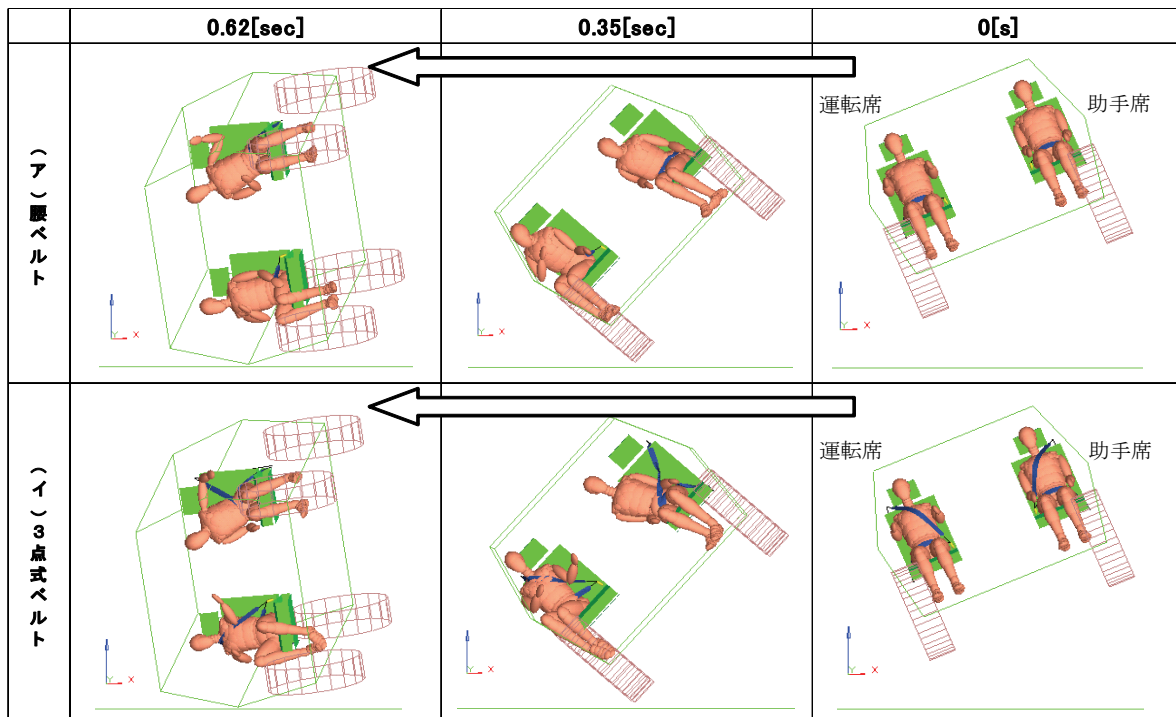


図4.5.2 乗員挙動のシミュレーションモデルと結果アニメーション

## 5. 今後の予定

人に優しい機械を実現するうえで、乗員の安全性の重要性は益々大きくなると考えている。今後は、適用範囲を広げるとともに、シミュレーション精度、再現性の向上など、モデル作成技術のレベルアップを図っていく予定である。

## 6. 謝辞

筆者(植田)は、車両の安全性向上を研究するために、オランダTNO Automotiveに約1年客員研究員として留学する機会を頂いた。その際、受け入れからオランダ滞在中公私にわたり支援頂いたオランダTNO AutomotiveのPeter de Coo氏(現在退任)に、この場をお借りして深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Prof. dr. ir J.S.H.M Wismans他著, 水野幸治・一杉正仁共訳, “交通外傷バイオメカニクス”(2003)
- 2) 社団法人自動車技術会, “工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス～交通事故で人はどのようにして怪我するのか?～”(2007)
- 3) TASS BV, MADYMO Theory Manual Version 7.4.1 (2012)
- 4) TASS BV, MADYMO Reference Manual Version 7.4.1 (2012)

- 5) TASS BV, MADYMO Model Manual Version 7.4.1 (2012)
- 6) TASS BV, MADYMO Human Model Manual Version 7.4 (2011)
- 7) TASS BV, MADYMO Coupling Manual Version 7.4.1 (2012)
- 8) 国土交通省, 「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示」(平成14年国土交通省告示第619号)において技術的要件として引用している協定期則の日本語訳 協定期則第16号 (2012年10月にアクセス)  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE\\_R016J01.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE_R016J01.pdf)  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE\\_R016J02.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE_R016J02.pdf)  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE\\_R016J03.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/ece/ECE_R016J03.pdf)
- 9) Nat'l Highway Traffic Safety Admin., DOT, § 571.208 Standard No. 208; Occupant crash protection. 49 CFR Ch. V (10-1-2008 Edition)

## 筆者紹介



Takeo Ueda  
うえだ たけお  
**植田 武男** 1997年, コマツ入社.  
現在, 特機事業本部 技術研究所所属.



Yasuhito Tatenoi  
たてのいやすひと  
**立野 井康人** 2006年, コマツ入社.  
現在, 特機事業本部 技術研究所所属.



Toshikazu Nakanishi  
なかにし としかず  
**中西 利和** 1986年, コマツ入社.  
現在, 特機事業本部 技術研究所所属. 博士 (工学)

## 【筆者からひと言】

人体モデルによるシミュレーションは、自動車関係では安全性の観点から、さかんに行われているようであるが、当社においては、新しい分野である。このような技術の最先端を短期間で習得出来たことは、海外留学の大きな成果であると考えている。異文化の中で、公私に渡り、充実した生活を送る事ができた。ますますグローバル化が進むなかで、このような研究の機会が増える事を望みます。