

論文・解説

21

側突クラッシュシミュレータによる衝突安全性能開発 Development of Side Impact Performance Using Crash Simulator

元木正紀*1 福谷和也*2

Masaki Motoki

Kazuya Fukutani

伊東紀明*5 尾川茂*6

Noriaki Ito

Shigeru Ogawa

要約

近年の自動車安全性能への高い市場要求に迅速に対応するため、マツダはより安全な車を短期間で開発できる Virtual Testing に取り組んでいる。この開発では実車現象を精度良く再現できる実験手法を確立し、この実験手法を軸として実車からユニットレベルにカスケードする開発プロセスの構築と、車両テストでは計測が困難な領域のデータを計測することでCAE精度の向上を目指している。

本稿では、新しい衝突実験手法の事例として、力学モデルを使用して解析的に実車の再現精度を向上させた側突クラッシュシミュレータの技術開発について紹介する。

Summary

In order to promptly correspond to high market demands for an automobile safety performance in recent years, Mazda has been working toward further development of the Virtual Testing Technology which can contribute to short-term development of safer cars. The Technology has two aims: one is to develop the experimental methodology which can reproduce collision test phenomena with high precision, and to perform a development process in a unit level with the methodology, and the other is to improve CAE accuracy by measuring such detailed data that cannot be obtained with actual vehicles.

This paper introduces one of applicable examples of a new approach to crash testing, particularly technology development of a side impact crash simulator capable of analytically improving vehicle reproducibility using dynamic models.

1. はじめに

車の衝突時の乗員保護性能は年々向上し、死亡事故率は1980年代に比較して現在では50%近くに低減されている。しかし、側面衝突では、低減率が24%に留まり更なる安全性の向上が必要である。更に近年アメリカではSports Utility Vehicle (SUV) の増加のため、大型車両の事故時の加害性、特に側面衝突時の問題が注目されており、このような社会的背景から、アメリカの保険会社が出資設立したInsurance Institute for Highway Safety (IIHS) は、2002年からSUVが普通乗用車の側面に衝突する状態を模擬した試験を開始した。

IIHS側突試験は、米国道路交通局が従来から実施している側面衝突テスト (LINCAP) の試験方法と比較して、Table 1のオレンジ色の部分に示すようにバリアを高くし、

バリアの前面形状もSUVのような凸形状としている。更に乗員傷害値の計測には、小柄な女性の人体特性を再現させ

Table 1 Comparison of IIHS and LINCAP

Test Mode		IIHS	LINCAP
Test Velocity		50km/h	62km/h
Club Angle		0°	27°
Impact Point Height from Ground		379mm	279mm
Barrier	Shape	Convex surface	Flat surface
	Height	759mm	559mm
	Mass	1500 kg	1367 kg
Dummy		SID-IIIs	SID

*1~6 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

たSID- sダミーを使用するため、乗員保護性能に対してもより厳しい評価になっている。こうした市場の高い安全性要求に応えるべく、マツダはより安全な車を短期間に市場導入できる開発に取り組んでいる。このような乗員保護性能の開発を効率的に実施するためには、クラッシュシミュレータを用いてユニットレベルで開発初期から乗員保護装備の開発を行う必要がある。これまで、技術開発では本装置を活用して前面衝突時の乗員保護性能の向上を図ってきた。本稿では、クラッシュシミュレータの適応を更に側面衝突開発の領域まで拡大するための適用技術開発について、IIHS側突を事例に報告する。

2. クラッシュシミュレータの概要

2.1 側面衝突の現象

実車の乗員保護性能を確認する側面衝突テストは、車を模擬した移動式バリアを、傷害値計測用のダミーを搭載したテスト車両に衝突させるものである。この現象を模式的に表したものがFig.1であり、バリア、ドア、ダミーの順に連続的に衝突し乗員に傷害を発生させる。この傷害レベルをダミーによって計測するようになっている。Fig.2は、この時のバリア、ドア、車体の速度の変化を示している。衝突時にバリアは車体からの反力を受けて緩やかに減速し、逆に車体はバリアからの入力で緩やかに加速し、両者は最終的に一定の速度に収束していく。一方ドアでは、バリアによって急激な局部変形が生じ、これによって乗員に

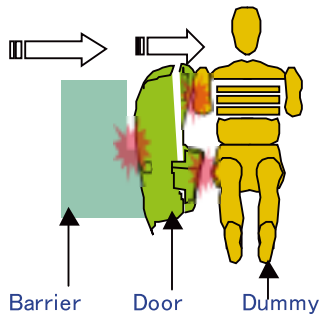


Fig.1 Side Impact Phenomena

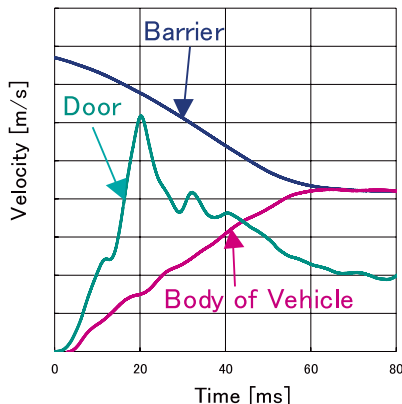


Fig.2 Velocity in the Side Impact Test

傷害を引き起こす。この急激な変形すなわちドアの進入速度を合わせることが、クラッシュシミュレータで側面衝突の乗員傷害値を再現させる重要なポイントになる。

2.2 クラッシュシミュレータの仕組みと性能

Fig.3のクラッシュシミュレータは、近年各自動車メーカーや市場評価テスト機関が導入を進めている衝突テストの台上評価試験装置である。本装置は、アキュムレータに蓄圧された油圧を制御し衝突波形を再現する機能を持ち、実際の車を衝突させずに乗員の保護性能を実験的に評価できる。側突クラッシュシミュレータは、Fig.2のドア速度波形を再現させるため、強力な減速ブレーキを装備している。本装置の能力は、600kgの積載質量時に1,000m/s²の加速と400m/s²の減速が可能である。

2.3 側面衝突現象の台上再現方法

Fig.4に示すように側突クラッシュシミュレータは、スレッド台車に入力する油圧ピストン、同台車に固定したドア、同台車上に搭載する計測用ダミーの3つの部分から主に構成されている。これらが、下記の順で作動し側面衝突現象を再現する。

- (1) スレッド台車は目標波形に合うように、ピストンからの入力で加速され、ブレーキによって減速される。

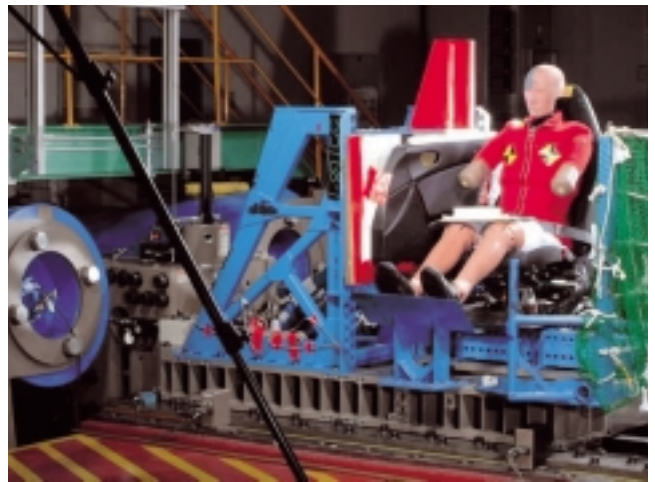


Fig.3 Side Impact Crash Simulator

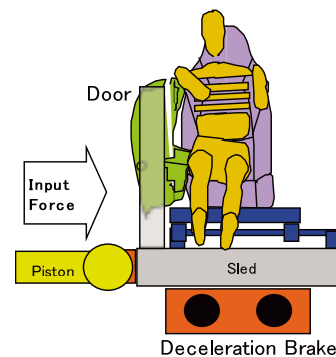


Fig.4 Methodology of Side Impact on Crash Simulator

(2) ドアも台車とほぼ等しい速度になりダミーと衝突する。この時ダミーは、スライドレール上にセットされているため、衝突まで動かず初期の位置でドアと衝突する。

2.4 IIHS側突再現の問題と課題

IIHS側突は従来のLINCAPと比較して、バリアの地上高および全高がいずれも高くかつ、バリアの前面形状が凸形状のため、試験車両側面のドアとBピラーに対して大きな変形を生じさせる。このため、乗員の胸部ダメージが大きく、胸部傷害低減技術の開発が急がれる状況である。そこで、側突クラッシュシミュレータでドアの進入速度を車両テスト状態に合わせて再現テストを実施したが、Fig.5に示すように車両テストの結果と大きな差が生じた。これを精度良く再現させるために、今回は、Fig.6に示す技術開発の考え方に基づき、SID- sダミーの傷害値発生メカニズムを力学モデルに置換えて解くことで明確にした上で、各種パラメータの傷害値への寄与度分析を行い、実車再現精度を向上させる方法を検討した。

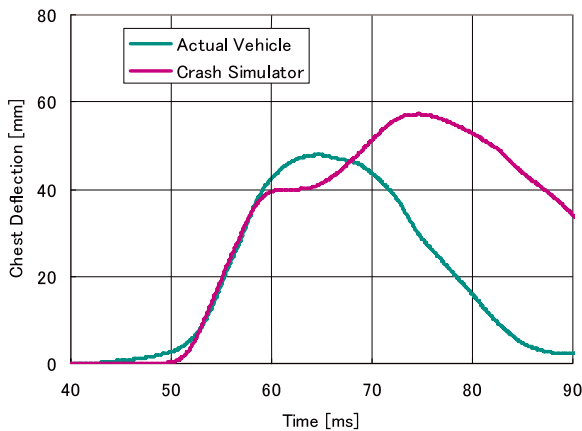


Fig.5 Chest Deflection Comparison of Actual Vehicle and Crash Simulator

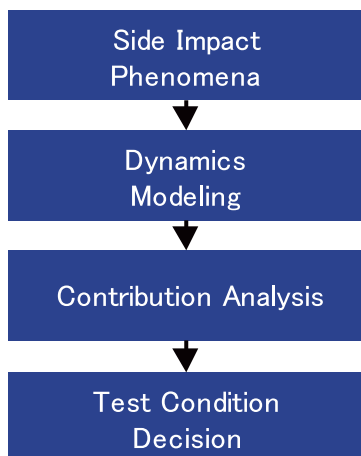


Fig.6 Methodological Development Process in Crash Test

3. メカニズムの分析とモデルの精度検証

3.1 SID- sの構造と胸部たわみ量発生メカニズム

SID- sは小柄な女性の人体特性に基づいて設計されたダミーで、Fig.7に示すように従来のLINCAPで使用するSIDと比較すると肩部荷重、胸部および腹部たわみ量、腰部荷重等の多くの入力を計測できるダミー構造となっている。これによってダミーへの入力が計測できるため、車両テストとクラッシュシミュレータテストの再現状態の比較や、力学モデルの入力データとして活用できる。

SID- sの胸部たわみ量は、Fig.8の胸部断面図¹⁾に示すように肋骨 (Rib) と背骨 (Spine) の間に取り付けられた変位計によって計測される。このダミー構造から考えられる胸部たわみ量は、Ribの移動量からSpineの移動量を差し引いた量となる。

このメカニズムを要因図にまとめると、Fig.9のようになり、胸たわみ量の力学モデルの基本的考え方となる。これに基づき、外力とダミー構造部品のバネ定数や質量を計測し運動方程式を立てた。これを解くことによって、その考え方の妥当性とパラメータの寄与度分析が可能になり、傷害値発生メカニズムの理解を深めることができる。

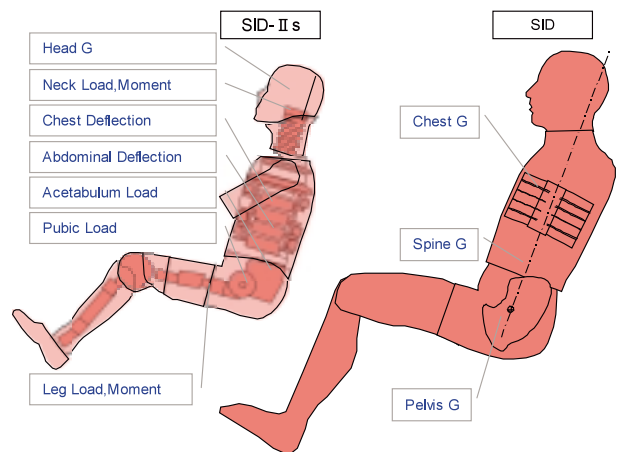


Fig.7 SID- s and SID

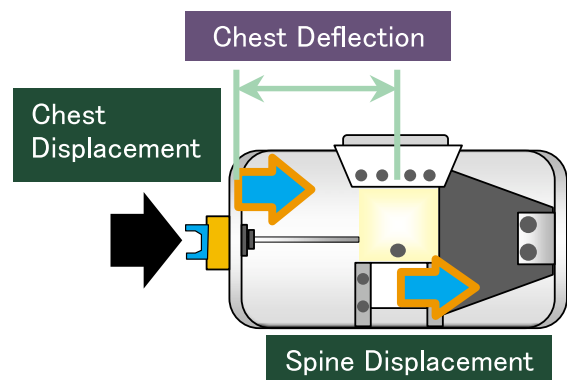


Fig.8 Chest Structure of SID- s

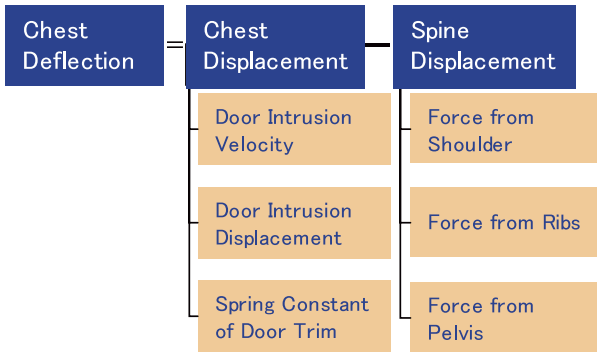


Fig.9 Analysis Chart for Chest Deflection of SID- s

3.2 力学モデルの構築

まず, Fig.10に示す外力が加わる場合の1自由度減衰系のスプリングとマスの運動方程式は, 式(1)のように表すことができる。

このスプリングとマスの組み合わせでSID- sの力学モデル²⁾を考える。しかし, SID- sはFig.11からも分かるように, 多くの部品から構成されており実物に忠実なモデルは, 非常に複雑なモデルになってしまう。今回のモデル化の目的は, メカニズムの考え方の妥当性を確認することなので, できるだけ簡素化し計算結果が実験結果と合わない時のみ, スプリングとマスをモデルに追加し計算精度を向上させた。最終的な胸部たわみ量の力学モデルは, Fig.11の1次元3自由度系のバネマスモデルとした。このモデルは m_1 から m_4 の4つのマスとこれらを結合する k_1 から k_3 の3つのバネ, および c_1 から c_3 の3つのダンパで構成されている。胸部たわみ量は, リブ変位 x_1 とスパイン変位 x_2 の差として求めることができる。このモデルの運動方程式を式(2)に示す。

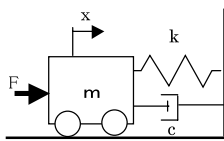


Fig.10 Spring-Mass Model with Single Degree-Freedom-System

$$F = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \tag{1}$$

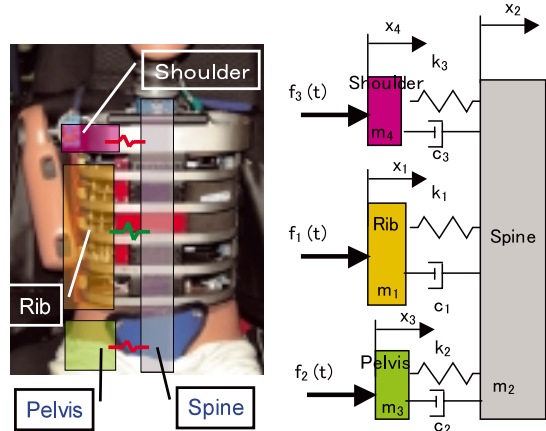


Fig.11 SID- s Spring-Mass Model with Three Degree-Freedom Systems

$$\{F\} = [M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} \tag{2}$$

ここで $[M]$ は質量マトリックス, $[C]$ はダンピング係数マトリックス, $[K]$ はバネ定数マトリックス, $\{F\}$ は入力ベクトル, $\{\ddot{X}\}$ は加速度ベクトル, $\{\dot{X}\}$ は速度ベクトル, $\{X\}$ は変位ベクトルを示す。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 + c_3 & -c_2 & -c_3 \\ 0 & -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & -c_3 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ 0 & -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad \{F\} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{X}\} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} \quad \{\dot{X}\} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \quad \{X\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

この力学モデルの再現精度検証は, 次のプロセスで行った。まず肩, 胸, 腰の個別部位毎に荷重を入力させて胸部たわみ量の実測値と計算値が合うようにパラメータを最適化した。次にこれら部位に同時に荷重を作用させて, 胸部たわみ量を比較した。

3.3 部位別シミュレーションパラメータの最適化

式(2)の連立微分方程式は、計算ソフトを用いて解を求めた。この時、質量やバネ定数等のパラメータは、実測したデータを使用した。このデータを元にしてシミュレーションとユニットテストの比較を行い、ピークレベルと波形パターンが近くなるようにパラメータの最適化を肩、胸、腰の各部位毎に実施した。Fig.12は、胸部のインパクトテストで得られた、胸部への入力荷重を示す。計算はこの値を入力荷重として行い、シミュレーション結果とインパクトテスト時の胸部たわみ量を比較したものをFig.13に示す。両波形はともに似ており、ピーク値の差も10%の範囲にあり良く一致していることが分かる。

このような個別部位テストと計算結果の比較を繰り返すことによって、パラメータの最適値を決定した。

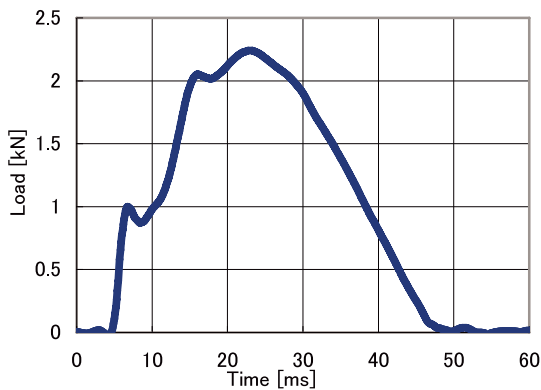


Fig.12 Measured Force for Rib

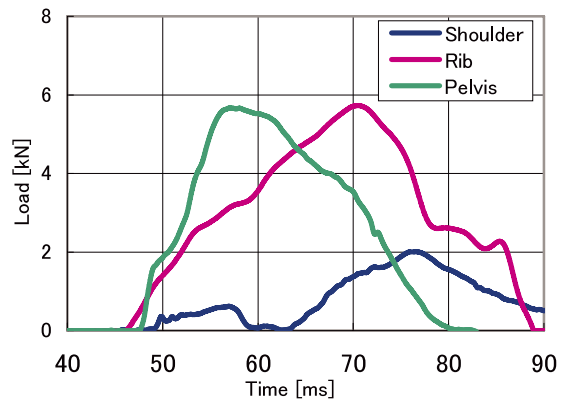


Fig.14 Measured Forces for SID-s

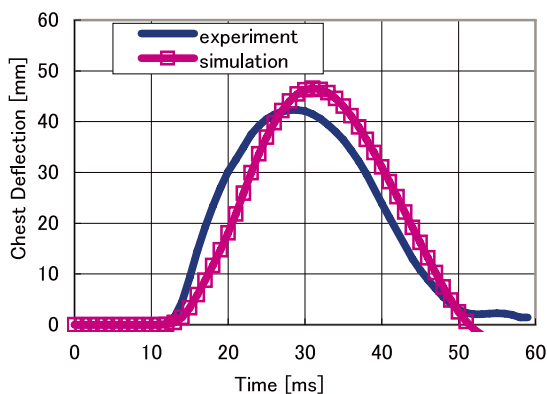


Fig.13 Chest Deflection Comparison of Experiment and Simulation

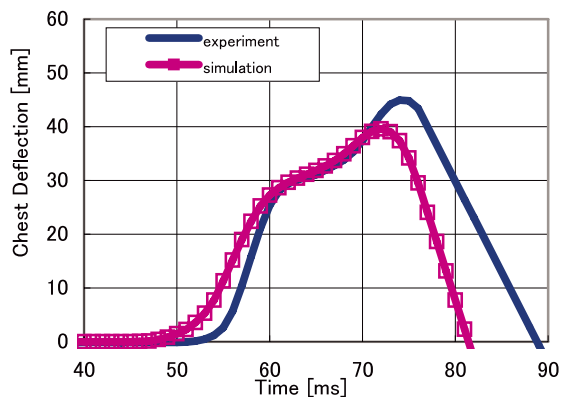


Fig.15 Chest Deflection Comparison of Experiment and Simulation

3.4 モデルの検証と結果

SID-s力学モデルの妥当性の検証は、前述の最適化したパラメータを用いて実施したシミュレーション結果とクラッシュシミュレータの実測値を比較して行った。Fig.14に、クラッシュシミュレータの実験で計測した肩、胸、腰の3点への入力荷重を示す。Fig.15は、このデータを入力荷重として計算したシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。シミュレーション結果は実験結果に対し、波形パターンは良く似ており、ピーク値の差も10%以内で、いずれも良く一致している。

これらの結果から、力学モデルは実現象を良く再現できていることが確認できた。これはまた、考え方のベースとなっている胸部たわみ量の発生メカニズムについても妥当であることを示している。

4. 実車再現精度向上への活用

クラッシュシミュレータにおいて車両衝突テストの現象を精度良く再現することが難しいのは、その現象の要因が多くありそれぞれの寄与度を定量的に把握することが容易でないためである。今回SID-sの胸たわみ量のメカニズムについては、力学モデルを用いて妥当性の証明とパラメータの最適値が決定できたため、Fig.16に示すバネとダンパの分担荷重を明確にすることができた。これによりSID-sの実車再現テストとして設定すべき重要な条件は、ドアの進入量であり、傷害値が発生している時間内は進入量を正確に合わせる必要があることが分かった。これに従って試験条件を再設定することにより、Fig.17に示すような胸部たわみ量の再現を±10%以内の高い精度で達成することが可能となった。更に、安全な車両の要件としてドアの進入量の定量的な目標値を定めることができた。

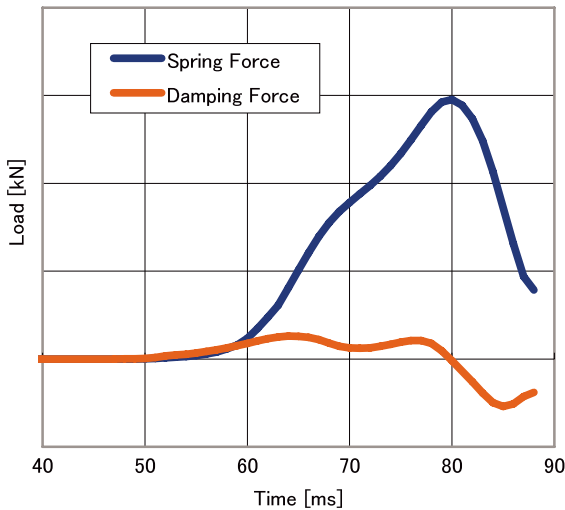


Fig.16 Comparison of Damping Force and Spring Force in Rib

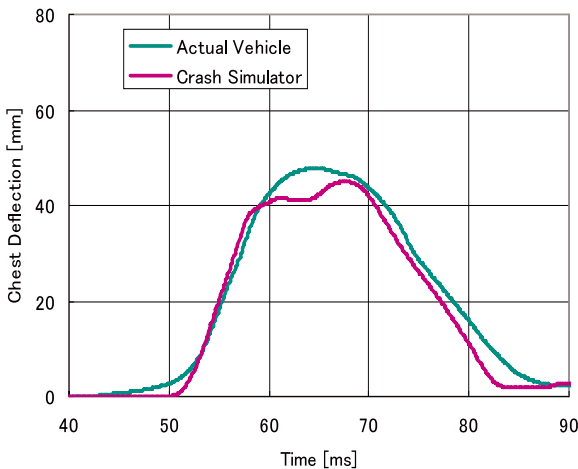


Fig.17 Chest Deflection Comparison of Actual Vehicle and Crash Simulator with Modified Test Conditions

5. おわりに

衝突現象を簡易的な力学モデルに置換え、そのメカニズムを分析する手法を用いて、クラッシュシミュレータの再現精度を向上させる技術開発プロセスの考え方が構築できた。また、この手法は他の衝突現象メカニズムを分析する手法としても応用が期待できる。今後は、他の側面衝突や前面衝突のメカニズム分析、数値解析シミュレーションの精度向上に活用し、より安全な車の開発を進めていく。

参考文献

- (1) First Technology Safety Systems : SID-II's User's Manual, Rev.3, p12 (2001)
- (2) Murthy Kowsika et al. : ES-2 Dummy : Lumped Spring-Mass Model and Parametric Evaluation of Response, ESV2003 Conference, Paper Number 398, (2003)

著者



元木正紀



福谷和也



伊東紀明



尾川 茂