

論文・解説

20

# MADYMOを活用したサイドエアバッグシステムの最適化

## Optimization of Side Airbag System Using MADYMO Simulations

金子直樹<sup>\*1</sup> 元木正紀<sup>\*2</sup> 田口征吾<sup>\*3</sup>

Naoki Kaneko

Masaki Motoki

Seigo Taguchi

尾川 茂<sup>\*4</sup>

Shigeru Ogawa

### 要約

本稿では、胸部保護型サイドエアバッグシステムの最適化について述べる。まず、乗員挙動シミュレーションソフトMADYMOとクラッシュシミュレータを用いて、傷害値のコリレーションを取った。またドア進入速度やベントホールの感度スタディを行うことで、モデルの応答性も評価した。次に、遺伝的アルゴリズムと品質工学の2つのアプローチを用いてES-2ダミーの胸変形の最適化を行った。最後に、これら2つの最適化アプローチについて、汎用性、効率性、ロバスト性に関する優位性を議論した。

### Summary

This paper describes the optimization of the side airbag system to improve injury and optimization approach using a MADYMO model for side impact. This study simulated a side impact with an ES-2 was simulated as follows :

First, MADYMO model has been established and correlated with a crash simulator. After the correlation, door intrusion and airbag vent hole size were used as main parameters to evaluate the sensitivity. As a result, it was demonstrated that this model has a reasonable response and good correlation. Second, the side airbag was optimized using genetic algorithm and quality engineering for the Euro NCAP mode. Then, results from those two approaches are discussed.

### 1. はじめに

衝突安全性能は、ここ数年目覚しく改善しており、衝突死傷者数は1980年代と比較して半分になっている。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。近年では米国で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いる。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。更に、2009年からは、FMVSS214の法規が改定され、Table 1に示すように1モードから3モードに変更される。

これは従来のテスト方法から、新たに斜めポール側突が追加され、ダミーもUSDOT-SIDからEuroSID-2re (ES-2re) とSID-IIIsに変更される。一方、欧州でもAE-MDBという新型ハニカムが検討されており、搭載されるダミーについても研究されている。こうした法規の改定や市場評価の要求にこたえるべく、マツダではより安全な車両を短期間で市場に導入できる技術開発に取り組んでいる。このような開発を効率的に行うためには、衝突台上試験(クラッシュシミュレータ)や予測技術(シミュレーション)の導入が不可欠である。今回の報告では、EuroNCAP等で使用されているEuroSID-2 (ES-2) ダミーを用いて、EuroNCAP条件での側面衝突MADYMOモデルを用いたサイドエアバッグの最適化検討について述べる。

\*1~4 衝突性能開発部  
Crash Safety Development Dept.

Table 1 Side Impact Test Mode

Test Mode	Form	Current Tests			214 Proposal			
		FMVSS214	LINCAP	IIHS	New214 POLE	New214 MDB	New214 POLE	New214 MDB
	Velocity	55kph	61.9kph	50kph	32kph	55kph	32kph	55kph
	Barrier Weight	1367kg	1360kg	1500kg	-	1367kg	-	1367kg
Dummy	Name	DOT-SID	DOT-SID	SIDII	EuroSID-2re	EuroSID-2re	SIDII	SIDII
	View							

Table 2 EuroNCAP Evaluation Items

PARTS	ITEMS
HEAD	HIC
	Head_3ms
CHEST	Deflection
	Viscous Criterion
ABDOMEN	Abdominal Force
PELVIS	Pubic Force
BACKPLATE	Load
T12	Load
	Moment

## 2. テスト方法

### 2.1 実車テスト再現方法

今回のMADYMOモデルを作成するにあたり、まずクラッシュシミュレータを実施した。テスト方法は、Fig.1に示す油圧制御式のクラッシュシミュレータを使用した。乗員の傷害は、バリアによるドアの急激な変形で発生する<sup>(1)</sup>。従って、このクラッシュシミュレータでは、ドアの進入速度を再現している<sup>(2)</sup>。このクラッシュシミュレータによる実車衝突の再現精度の例をFig.2に示す。

### 2.2 評価項目

Table 2に示すように、EuroNCAPでは評価される傷害値が数多く存在する。従って、これら評価項目に対し、傷害値発生メカニズムも多数存在する。本稿では、胸変形にフォーカスしているため、胸部傷害発生メカニズムについて述べる。ES-2ダミーの胸部断面図をFig.3に示す。胸変形量は、胸移動量から背骨移動量を引いたものであり、Fig.4には胸変形量に関する因子を示す。胸移動量として影響される因子としては、エアバッグ反力やトリム剛性、ドア進入量等があり、背骨の移動量に影響される因子としては、腰や胸などから伝達される荷重が挙げられる。



Fig.1 Side Impact Crash Simulator

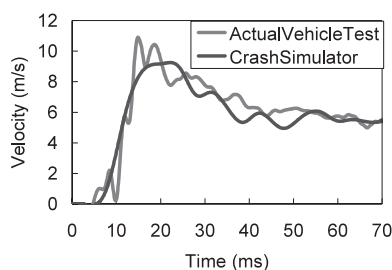


Fig.2 Comparison of Door Velocity between Actual Vehicle Test and Crash Simulator

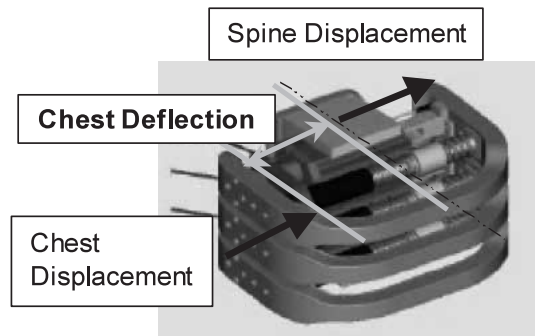


Fig.3 Cross-Section of ES-2 Thorax

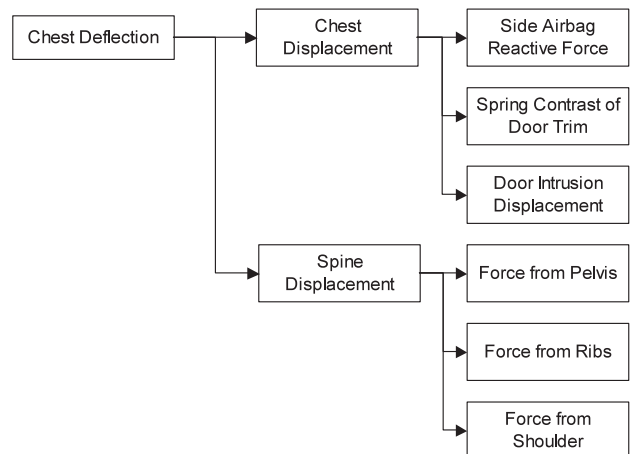


Fig.4 Factors for Chest Deflection

## 3. MADYMOモデル

### 3.1 モデル概要

今回使用したMADYMOモデルをFig.5に示す。本検討の目的は、サイドエアバッグの最適化であるが、モデルに求められるものとしては、再現精度に加え、計算時間の短縮化が挙げられる。Table 3にモデルの仕様を示す。サイドエアバッグを除くすべてのモデルをマルチボデーで作成し、サイドエアバッグのみFEM化した。ドアモデルについては、胸、腹、腰の3つのパートに分割し、それぞれに特性を代入した。そして、簡易的な感度解析を行い、モデルの妥当性を検証した。Fig.6及び7に示すように、傾向が再現できるモデルであることを確認した。

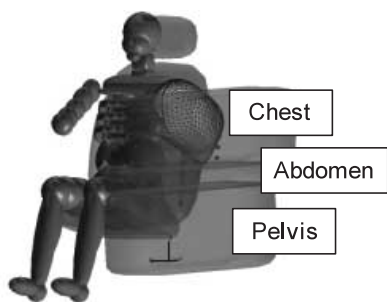


Fig.5 ES-2 MADYMO Model

Table 3 MADYMO Specifications

ITEMS	SPECIFICATIONS
Version	6.2.1
Computational Environment	Windows XP
Dummy	Multi Body
Seat	Multi Body
Door	Multi Body
Side Air Bag	FEM
Computational Time	280s

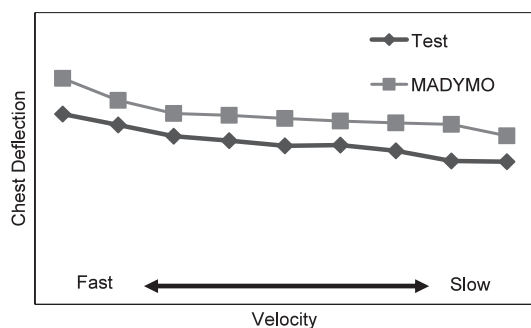


Fig.6 Sensitivity Response of Intrusion Velocity

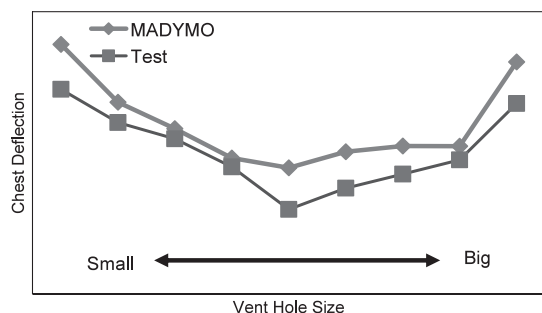


Fig.7 Sensitivity Response of Vent Hole Size

### 3.2 テストとのコリレーション

MADYMOモデルとクラッシュシミュレータとのコリレーション結果をFig.8から11に示す。これらの応答を評価した結果、テストとのコリレーションが取れており最適化検討に使用できるモデルであると判断した。

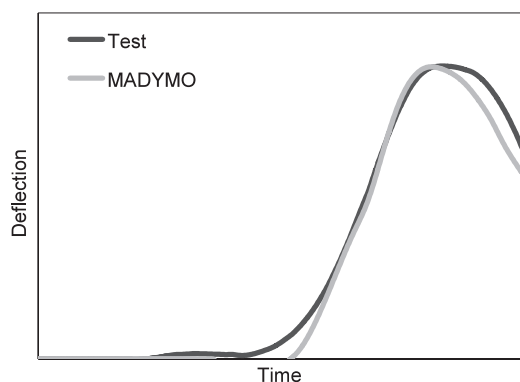


Fig.8 Upper Rib Deflection Criterion Pulse

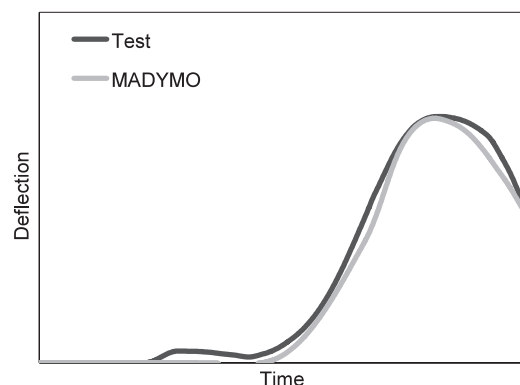


Fig.9 Middle Rib Deflection Criterion Pulse

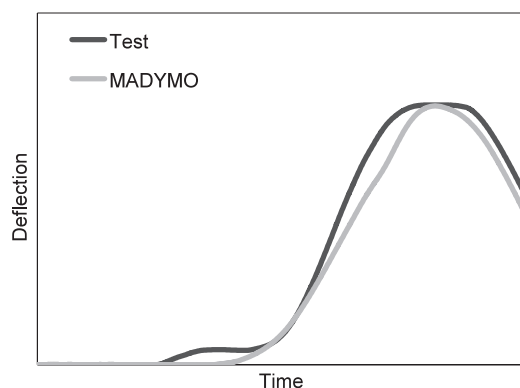


Fig.10 Lower Rib Deflection Criterion Pulse

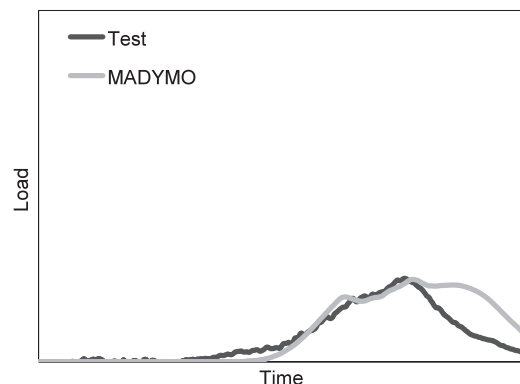


Fig.11 Abdominal Load Pulse

### 4. サイドエアバッグシステムの最適化

#### 4.1 前提条件

前提条件としては、車体系の因子は固定とし、Table 4 に示すような内装系に絞った設計変数とした。また、サイドエアバッグ形状の応答までは今回は評価していないため、本検討ではエアバッグ形状は胸部保護タイプに固定した。また、目的変数は、比較的予測精度の高い胸変形とし、これらの前提条件で最適化を実施した。まず計算手順として、遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) を用いたアプローチによる最適化を行い、次に品質工学的アプローチ (QE : Quality Engineering) での最適化を行った。

#### 4.2 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化

遺伝的アルゴリズムは自然淘汰と遺伝学に基づく探索アルゴリズムである<sup>(3)</sup>。遺伝的アルゴリズムのメリットは、実用時間内に比較的優れた解が得られ、幅広い範囲に適用できることである。このアルゴリズムを使って、Table 5 に示す設計変数を用いて、最適化を行った。エアバッグについては、コーティングの有無、ベントホール、インフレーター特性は±15%、TTF (Time to Fire) は6msから10ms、エアバッグの上下位置は±15mmそしてドア特性は、それぞれ±10%でスタディを行った。遺伝的アルゴリズムを使った最適化結果をTable 6に示す。ベントホールを小さくし、TTFを早めて初期拘束性能を上げた仕様となった。この仕様で計算を流すことにより、Fig.12に示すように傷害値を40%低減させることができた。この結果を踏まえて、品質工学を用いた最適化を行った。

Table 4 Baseline of Parametric Studies

INTERIOR	PARTS	BASELINE
Side Airbag	Shape	Thorax
	Inflator	Conventional
	Coating	Without
	Vent Hole Diameter	35mm
Seat Characteristics		Conventional
Door Characteristics		Conventional

Table 5 Parameter Matrix for GA

PARTS	PARAMETERS	VARIABLE RANGE
Airbag	Coating	With / Without
	Vent Hole Diameter	20mm to 50mm
	Inflator	-15% to +15%
	Time to Fire	6ms to 10ms
	Vertical Position from Basic Set	-15mm to +15mm
Door	Chest Portion	-10% to +10%
	Abdomen Portion	-10% to +10%
	Pelvis Portion	-10% to +10%

Table 6 Optimization Results with GA

PARTS	PARAMETERS	VARIABLE RANGE	Current	Optimum with GA
Airbag	Coating	With / Without	Without	With
	Vent Hole Diameter	20mm to 50mm	35mm	20mm
	Inflator	-15% to +15%	Normal	Normal
	Time to Fire	6ms to 10ms	10ms	8ms
	Vertical Position from Basic Set	-15mm to +15mm	0mm	0mm
Door	Chest Portion	-10% to +10%	Normal	-10%
	Abdomen Portion	-10% to +10%	Normal	Normal
	Pelvis Portion	-10% to +10%	Normal	+10%

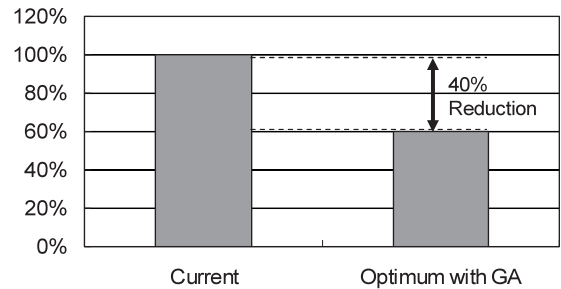


Fig.12 Improvement Ratio of ES-2 Average Chest Deflection for MADYMO

#### 4.3 品質工学を用いた最適化

品質工学<sup>(4)</sup>は田口博士が提唱する手法である。

品質工学的アプローチを取る上で定義される機能は、エネルギー変換として定義されている。すなわち、もし損失がなければ入力と出力の関係はFig.13に示すように、正比例となる。この正比例関係をできる限り満足させる方法のひとつに、“パラメータ設計”手法がある。この手法は、最初にばらつきを抑え、次に目標値に近づけるといものである。本報告では、この手法を用いて、最適化を行った。本検討ではTable 7に示すように、L18の直行表を用いた。設計変数は遺伝的アルゴリズムでの最適化と同様な条件になるようにセットした。その際、水準2を因子が持つ固有の特性Mとし、水準1は低いか弱い特性L、水準3を硬い特性Hとした。最初に、ロバスト性能を向上させるために、4度の繰り返し計算を行いSN比を安定させた。そのSN比要因効果図をFig.14に示す。Fig.15に4度繰り返し計算を行った際の感度要因効果図を示す。太線で示すような感度の高かった因子を用いて、最適化を実施した。その結果、Fig.16に示すように傷害値を現状比35%削減することができた。

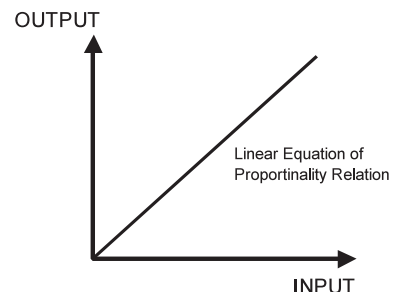


Fig.13 Ideal Relationship between OUTPUT and INPUT

Table 7 Parameter Matrix for QE

PARAMETERS	LEVEL		
	1	2	3
A Airbag Coating	w/o	w	-
B Vent Hole	L	M	H
C Inflator	L	M	H
D Time to Fire	S	M	F
E Airbag Vertical Position	L	M	H
F Chest Part of Door Characteristic	L	M	H
G Abdomen Part of Door Characteristic	L	M	H
H Pelvis Part of Door Characteristic	L	M	H

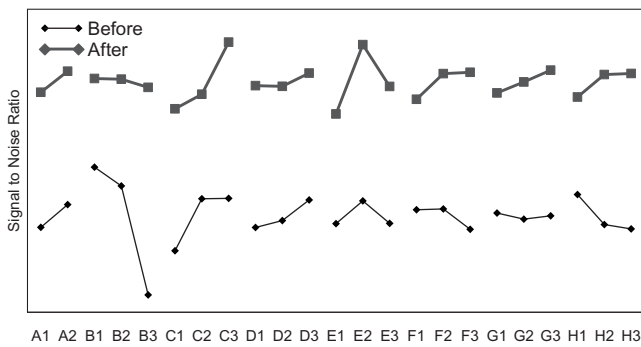


Fig.14 Signal to Noise Ratio of Parameters

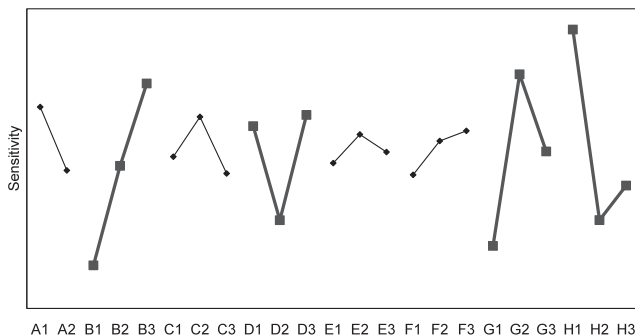


Fig.15 Sensitivities of Parameters

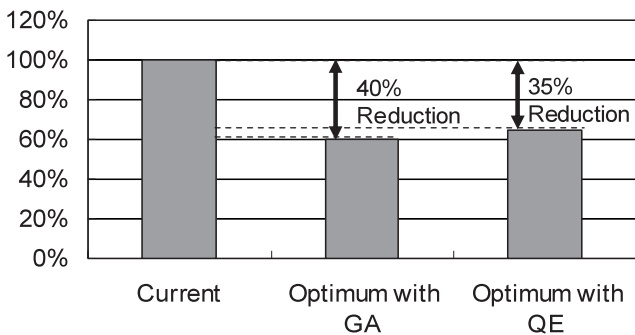


Fig.16 Improvement Ratio of ES-2 Average Chest Deflection for MADYMO

## 5. 考 察

### 5.1 最適化手法について

これら2つの手法から得られた最適解の設計変数をTable 8に示す。TTF及び腹部、腰部の特性に若干の違いが見える。これは、さまざまな誤差因子等が入っているかどうかで結果が変わったと考えられる。Table 9には、これら2つの手法における3つの視点、汎用性及び計算効率性、ロバスト性についてまとめたものを示す。

汎用性については、遺伝的アルゴリズムを用いた場合設計変数の数は制限されない。一方、品質工学の場合、L18の直交表を用いると基本的には、8個しか設計変数を指定できない。従って、この場合、8個のパラメータの選び方が重要になってくると考えられる。

次に計算効率性について述べる。計算時間自体は2つの手法でほぼ同一であった。しかしながら、品質工学の場合は、要因効果図から繰り返し計算をする工数が必要に応じて生じる。

最後にロバスト性については、Table 9に示しているように、遺伝的アルゴリズムでは、ロバスト性を定量的に示すことができない。それに対し、品質工学では、きちんと定量的に表現できることが可能になる。品質工学から得られた仕様では、2.64dB改善された。これらの視点から得られた知見としては、これら2つの手法はそれぞれ優れた部分があり、必要に応じて使い分けするか、双方を組み合わせる方が得策だと考えられる。

### 5.2 最適解について

2.2で述べた評価項目にあるように、胸変形量は胸部移動量から背骨移動量を引いたものである。最適化手法双方とも従来に比べ、ベントホールを小さくし、TTFを早めて初期拘束性能を上げた仕様となっており、腰部特性を若干強めた結果となった。本検討では、前提条件に述べたような設計変数及び振幅で解析しているため、Fig.17に示すような背骨の移動量を増やした最適解が選択されている。今後の検討では、設計変数の設定方法や振幅、更に目的変数も多目的に設定し、最適解の分析を行っていく。

Table 8 Optimization Results of GA and QE

Part	Parameter	Current	Optimum with GA	Optimum with QE
Airbag	Coating	Without	With	With
	Vent Hole Diameter	35mm	20mm	20mm
	Inflator	Normal	Normal	Normal
	Time to Fire	10ms	8ms	6ms
	Vertical Position from Basic Set	0mm	0mm	0mm
Door	Chest Portion	Normal	-10%	-10%
	Abdomen Portion	Normal	Normal	-5%
	Pelvis Portion	Normal	+10%	+5%

Table 9 Summary of Three Viewpoints

	Application Range	Calculation Efficiency	Robustness
GA	Unlimited	77.8H	Not Quantitative
QE	8 Parameters* *using L18	78H	2.64 dB Improvement



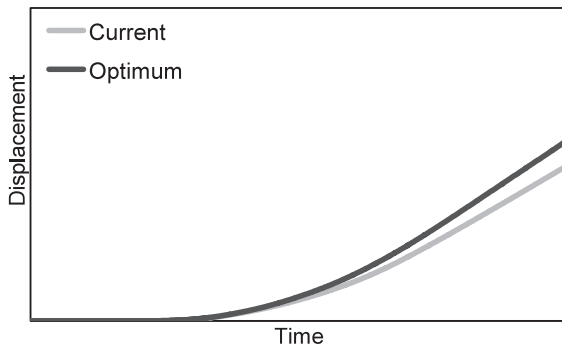


Fig.17 Spine Displacement of ES-2

## 6. 結論

本研究の目的は、新たに開発した側突用MADYMOモデルを用いて、内装の最適化をEuroNCAPモード等で用いられるES-2で行ったものである。以下に結論を示す。

- ① 遺伝的アルゴリズム的アプローチを用いた最適化で、ES-2ダミーの胸変形の平均値を現状比40%削減できた。
- ② 品質工学的アプローチを活用した結果、ベントホール及びTTF、腹部及び腰部のドア特性が胸変形の傷害値に対し、非常に感度が高い結果となった。
- ③ 品質工学的アプローチで、現状比胸変形の平均値を35%低減できた。
- ④ 遺伝的アルゴリズム及び品質工学的アプローチの双方ともそれぞれ優位点があり、必要に応じて使い分けか、双方を組み合わせるべきだと考えられる。
- ⑤ 本検討の前提条件では、胸変形を改善する最適解は、背骨の移動量を増加させたものとなった。

## 7. おわりに

今回の研究は、これまでMADYMOの適用例が少ない側突のシミュレーションで胸変形のみ注力した基礎的なものである。今後は、リアルワールドも視野に入れた様々な評価項目や人体の構造を踏まえ、すべての傷害が低減できるような挙動コントロールも検討し、引き続き傷害全般の低減を目指して更なる研究を行い、お客様に安心して乗って頂ける車作りに貢献していきたい。

## 参考文献

- (1) Ogawa et al. : A Test Methodology of Side Impact Simulation with Hydraulically Powered Crash Simulator, FISITA paper, F2004F187 (2004)
- (2) 元木ほか：側突クラッシュシミュレータによる衝突安全性能開発，マツダ技報，No.22，p.108-113 (2004)
- (3) Yan Fu : An Integrated Robust Design Method for Occupant Restraint System, IMCE paper, 2004-6179 (2004)
- (4) 田口玄一：ロバスト設計のための機能性評価，日本規格協会 (2000)

## 著者



金子直樹



元木正紀



田口征吾



尾川 茂