

進化的多目的最適化による自動車乗員保護システム設計

堀井宏祐^{†1} 大谷朝彦^{†2} 野間宏平^{†3}

自動車衝突時の乗員挙動は非線形的かつ複合的である。また、乗員の運動エネルギーは主に頭部とエアバッグ、胸部とシートベルトの接触によって消費され、頭部と胸部の安全性はトレードオフの関係にある。そのため、大域探索能力に優れ、多点探索によって得られるパレート解からトレードオフ情報を把握できる、進化的多目的最適化手法が乗員保護システム設計に対して有効である。本研究ではパラメトリックな前面衝突時の乗員挙動解析モデルをマルチボディ解析手法を用いて構築し、頭部、胸部の傷害指標を目的関数とする進化的多目的最適化を行った。進化的多目的最適化によって効率的に設計空間を探索し、その結果、得られたパレート解からトレードオフ情報や設計変数との相関関係を分析することで、設計変数の安全性に対する定性的な傾向を把握し、自動車乗員保護システム設計に有用な設計情報を得ることができた。

Vehicle Occupant Protection System Design by Using Evolutionary Multi-objective Optimization

HIROSUKE HORII,^{†1} ASAHIKO OTANI^{†2} and KOHEI NOMA^{†3}

Evolutionary multi-objective optimization has been performed for vehicle occupant protection system design. A behavior of an occupant at a car crash is nonlinear and complex. In addition, there is a trade-off between the safety of occupant's head and chest, since the kinetic energy operating against occupant is mainly consumed due to head-airbag and chest-seat belt. Therefore, the evolutionary multi-objective optimization (EMO) is beneficial for the vehicle occupant protection system design because the EMO excels in global search ability and provides trade-off information obtained from Pareto solutions. In this paper, a parametric model of a behavior of an occupant at a vehicle frontal crash was constructed by using multi-body dynamics simulation. The evaluation cost for injury was reduced by performing efficient exploration with EMO. Consequently, the results revealed that qualitative trend was understood by analyzing the trade-off information and the correlation among the objective functions and the design variables.

1. はじめに

自動車の衝突安全性能は保安基準によって規制されているが、近年ではJNCAP(日本)、US-NCAP(米国)、EuroNCAP(欧州)等、各国機関において行われている自動車アセスメントプログラム(New Car Assessment Program, NCAP)¹⁰⁾による安全性能評価がインターネットを通じて一般公開されたり^{*1}、各自動車メーカーによって衝突安全技術のブランド化が進められる等、衝突安全性能が消費者の購買動機に及ぼす影響も大きくなってきている⁹⁾。そのため、自動車開発においては単に規制値をクリアするだけでは不十分となり、よりいっそうの衝突安全性能の向上や新しい乗員保護装置の開発が求められている。

実車評価には試作、試験に多くの時間や費用がかかるため、設計段階における数値解析による仮想試作が重要となり、数値解析技術の研究開発が進められている。衝突現象の数値解析手法には、有限要素解析とマルチボディ解析がある。有限要素解析の特徴は、計算負荷は高いが、実車試験では測定が困難な人体組織の状態も評価可能な点があげられ、たとえば木佐貫らは有限要素モデルによって人体全身モデルを構築し、衝突事故における人体損傷の詳細な分析を行っている⁸⁾。一方、マルチボディ解析は人体損傷の詳細な分析はできないが、計算負荷が低いという特徴があり、伊藤らによる前面衝突時の乗員挙動解析⁷⁾、速水による側面衝突時の頭頸部挙動解析¹³⁾等、マルチボディ解析による衝突解析技術も進展してきている。近年ではマルチボディ解析の精度向上にとともに、有限要素解析と比較すると計算負荷が低く、繰返し計算に向くため、乗員保護装置の設計、開発にマルチボディ解析を適用する事例が報告されており、田岡による胸部の安全性を向上させる腰部拘束装置の開発¹²⁾、Kiuchiによるエアバッグ展開時の気体流量の衝突安全性能に対する影響評価⁴⁾等が報告されている。

自動車アセスメントにおいては、頭部、胸部、下肢部等、測定部位ごとに評価指標を算出し、それらを総合して衝突安全性能が判定され、従来の乗員保護システムの最適化事例にお

†1 山梨大学工学部機械システム工学科

Department of Mechanical Systems Engineering, University of Yamanashi

†2 株式会社シーディー・アダプコ・ジャパン

CD-adapco JAPAN Co., LTD.

†3 TNO-Automotive ジャパン株式会社

TNO-Automotive Japan K.K.

*1 下記 URL において公開されている。

独立行政法人 自動車事故対策機構 <http://www.nasva.go.jp/mamoru/carassess.html>

米国運輸省道路交通安全局 <http://www.nhtsa.dot.gov/EuroNCAP> <http://www.euroncap.com/>

いては、自動車アセスメントで用いられる総合指標をもとにして単目的最適化が行われている^{2),3),5),11),15)}。一方、たとえば前面衝突時の乗員の運動エネルギーの大部分は頭部とエアバッグ、胸部とシートベルト、下肢部とニーボルスタの接触により消費され、頭部を過剰に保護しようとするとう胸部の安全性が低下してしまう等、人体各部の安全性にはトレードオフの関係がある。衝突安全性能の全体最適のためには、各部でバランス良く運動エネルギーを消費させる必要があるため、多目的最適化によってトレードオフ情報を把握することで、より良い設計が可能であると考えられる。また、衝突現象は非線形性が強く、衝突安全性能の指標とされる目的関数も多峰性関数となる。そのため、数理的最適化手法では最適化は困難であり、上述の従来の最適化事例においては、応答局面法を用いたものと進化的計算を用いたものが報告されている。応答局面法を用いた事例としては、Lee らによる設計変数の不確定性を考慮したロバスト設計⁵⁾、施らによるホログラフィックニューラルネットワークによる最適設計¹¹⁾、矢島らによる乗員保護システムの設計変数の衝突安全性能に対する影響評価¹⁵⁾が報告されている。一方、進化的計算を用いた事例としては、Fu らの遺伝的アルゴリズムを用いたニーボルスタの最適設計²⁾が報告されている。また、Fu らは応答局面法と遺伝的アルゴリズムを併用した乗員保護システムのロバスト設計³⁾を報告している。応答局面法は計算負荷の高い問題に対する効率的な解法であるが、近似精度の検証や代表点の選択方法、代表点数に考慮を要する。一方、進化的計算は Sharing¹⁾による集団の多様性維持等によって、多峰性問題に対応する有効な拡張がなされているが、多くの反復計算を要するため、適用は計算負荷の低い問題や、高性能な計算資源を持つ場合に限定される。

本研究では衝突解析モデルとして計算負荷の低いマルチボディモデルを用いて、進化的多目的最適化手法の1つである、Fitness Sharing によって多峰性問題に対する高い探索性能を持つ、領域適応型多目的 GA (Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms, ARMOGA)⁶⁾を適用する。得られたパレート解からトレードオフ情報や設計変数との相関関係を分析し、衝突安全性能に対する有用な設計情報を得ることで、より良い乗員保護システムの設計を行う。

2. 衝突解析モデル構築

自動車乗員保護システムの性能を評価するために、マルチボディ解析を用いて図1に示す前面衝突時の乗員挙動解析モデルを構築した。マルチボディ解析は構造物や機械を剛体や弾性体の複数の要素の結合によってモデル化し、各要素の運動と接触による相互作用を計算することで挙動や振動現象をシミュレートする。以下に、構築した前面衝突解析モデルの構

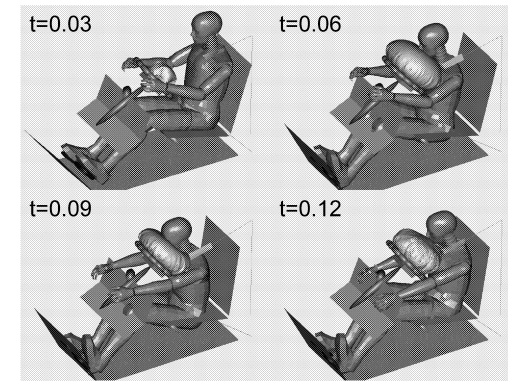


図1 前面衝突解析モデル

Fig. 1 Frontal crash simulation model.

成と、乗員保護性能の評価指標について述べる。

2.1 前面衝突解析モデルの構成

日本の保安基準で定められているフルラップ前面衝突試験を想定した解析モデルを構築した。フルラップ前面衝突試験では、自動車にダミー人形を乗せて時速 50 km でコンクリート製の障壁に正面衝突した際の頭部、胸部、下肢部に受けた衝撃が計測され、乗員保護システムの安全性能が評価される。解析モデルは前面衝突用ダミー人形の Hybrid-III ダミーのマルチボディモデルを中心に、シート、ステアリング等の乗員回りの機材と、エアバッグ、シートベルトの乗員保護装置によって構成され、フルラップ前面衝突時の加速度の時間波形を解析モデルに与えることで衝突後、0.12 秒間の乗員挙動をシミュレートする。

1章で述べたように、人体各部の安全性にはトレードオフの関係があり、衝突安全性能の全体最適のためには、各部でバランス良く運動エネルギーを消費させる必要がある。そこで本研究では頭部、胸部の安全性に強く影響を及ぼすエアバッグとシートベルトの動作を制御する5つの変数を設計変数とする。設計変数を表1に示す。

エアバッグでは、衝突検知の AB_TTF 秒後にインフレータのガス発生剤が着火され、発生したガスがエアバッグを展開する。通常、ガスの発生後、エアバッグが展開を完了するまでの時間は約 0.04–0.05 秒であり、発生ガスの質量流量 AB_MFR で展開速度を制御する。エアバッグ展開後、乗員頭部がエアバッグと接触し、エアバッグに設置されたベントホールからエアバッグ内のガスを放出することで、乗員の運動エネルギーが消費される。ベント

ホール径の設定係数 AB_VHF でガスの放出効率を制御する。

シートベルトではプリテンション機構とロードリミッタ機構をモデル化している。プリテンションは衝突時にシートベルトを引き込むことで乗員をシートに固定し、シートベルトの効果をも高める機構であり、衝突検知の SB_Preten_TTF 秒後に作動する。ロードリミッタはシートベルトに規定の荷重がかかった後、規定荷重を保ちながらシートベルトを繰り出すことで胸部への衝撃を緩和する機構であり、規定荷重を $SB_LL(N)$ で制御する。

2.2 乗員保護性能の評価指標

日本の保安基準では「前面衝突時の乗員保護の技術基準」において下記の判定基準が定められている。

- 頭部傷害基準値 ≤ 1000
- 胸部合成加速度 $\leq 588 \text{ m/s}^2$ (60 G)
- 大腿部圧縮荷重 $\leq 1,000 \text{ daN}$ (1021 kgf)
- ダミー人形が衝突後も座席ベルトで拘束されていること

頭部傷害基準値 (Head Injury Criterion, HIC) は頭部傷害の程度を示す指数であり、実車試験においては、ダミー人形の頭部重心位置に 3 軸方向に取り付けられた加速度計によって計測される衝突時の頭部加速度の時間波形 $a(t)$ を用いて次式で算出される。

$$HIC = \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right]_{\max} \quad (1)$$

ただし $t_2 - t_1 \leq 0.036 \text{ sec}$.

また、胸部合成加速度 ($ChestG$) は胸部重心位置に取り付けられた 3 軸加速度計、大腿部圧縮荷重は大腿部に取り付けられた 1 軸ロードセルによって得られた計測値により算出される。

本研究では HIC と $ChestG$ の 2 つを目的関数とした多目的最適化を行う。大腿部圧縮荷重については、実車試験における各車の平均値が基準値の 1/5 程度であることが報告され

表 1 設計変数
Table 1 List of design variable.

Variable	Range and Name	Base Design
Air Bag:		
Time to Fire (sec.)	$0.015 \leq AB_TTF \leq 0.035$	0.02
Mass Flow Rate	$0.5 \leq AB_MFR \leq 2.0$	1.0
Vent Hole Factor	$0.5 \leq AB_VHF \leq 2.0$	1.0
Seat Belt:		
Time to Fire (sec.)	$0.01 \leq SB_Preten_TTF \leq 0.03$	0.02
Load Limit (N)	$2000 \leq SB_LL \leq 6000$	4000

ており¹⁴⁾、また、解析モデルにおいても同様に基準値を大幅に下回っていることから、目的関数として扱わず制約条件としている。

3. 進化的多目的最適化による自動車乗員保護システム設計

本章では進化的多目的最適化手法を自動車乗員保護システム設計に適用し、得られたパレート解を分析することで有用な設計情報を得た結果を述べる。本研究では進化的多目的最適化手法として領域適応型多目的 GA (Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms, ARMOGA⁶⁾) を適用した。ARMOGA のフローチャートを図 2 に示す。ARMOGA は解探索領域を一定の世代数ごとに適応的に変化させる。通常の世代においては一般的な遺伝的オペレータを適用し、領域適応世代において、それまでに得られたアーカイブ集団における各設計変数の平均と分散を計算し、その分布に適応した領域内に探索集団を再初期化することで効率的な探索を実現している。また、Fitness Sharing によって多様性の維持を図り、多峰性問題に対して高い探索性能を持つ。

ARMOGA によって初期集団を変えて 10 試行の最適化を行った。ARMOGA のパラメータ設定を表 2 に示す。探索世代数はパレート面の進行が収束することを確認した 50 世代としている。ある 1 試行での探索点を図 3 に、10 試行で得られたパレート解を図 4 に示す。10 試行で計 20400 個体の評価を行い、計 1050 個体のパレート解を得た。図 4 より、どの試行においても同じパレートフロントに到達していることが確認できる。

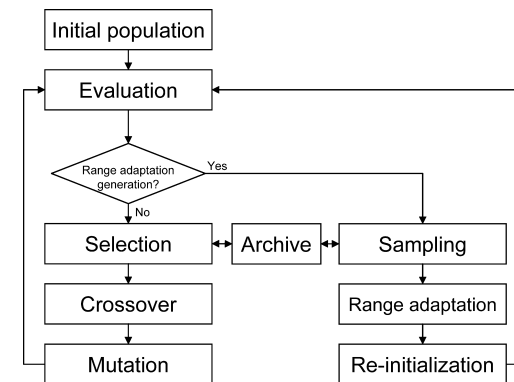


図 2 ARMOGA のフローチャート
Fig. 2 Flowchart of ARMOGA.

表 2 ARMOGA のパラメータ設定
Table 2 Parameter of ARMOGA.

Generic Parameters	
Population Size	40
Num. of Generation	50
Crossover	BLX-0.5
Crossover Rate	1.0
Mutation Rate	0.1
Range Adaptation Operation	
Starting Generation	20
AR Interval	5

10 試行全体の中でのパレート解は 199 個体であった．この 199 個体から目的関数のトレードオフ情報および設計変数との相関を分析する．パレート解の設計変数の頻度分布を図 5 に示す．

AB_TTF , AB_VHF , SB_LL は定義域の上限, または下限に収束しており, これらの設計変数については最適値が存在することが分かった． AB_TTF は下限の 0.015 秒に収束しており, エアバッグは素早く作動させる必要があることを示している． AB_VHF は上限の 2.0 に収束しており, ベントホール径を大きくとり, エアバッグ内のガスを速やかに放出することで衝突エネルギーを吸収し, 頭部に対する攻撃性を低減させる必要があることを示している． SB_LL は下限の 2000 N に収束しており, ロードリミッタの規定荷重を低くすることで, 胸部に対する攻撃性を低減させる必要があることを示している．最近の自動車のロードリミッタの規定荷重は低く設定される傾向があり, この結果は妥当であると考えられる．

また, AB_MFR は 0.65 ~ 1.1 の領域に分布していることと, SB_Preten_TTF は定義域全域に分布しているが, 0.029 秒以上に多数集中していることが確認できる．ここで SB_Preten_TTF が 0.029 秒以上のパレート解をグループ A, 0.029 秒未満のパレート解をグループ B として, 各グループでの設計変数と目的関数との相関関係を分析する．グループ A は 158 個体, グループ B は 41 個体となった．図 6 にグループ分けしたパレート解を, 図 7 に設計変数と目的関数との関係を図示する．

グループ A では, SB_Preten_TTF は上限に収束している． AB_MFR については, 定義域が 0.5 ~ 2.0 であるのに対して, パレート解は 0.65 ~ 1.0 の領域に分布しており, AB_MFR と HIC との相関係数が -0.98 , $ChestG$ との相関係数が 1.00 と高い相関を示していることが確認できた．この結果からガスの質量流量を 0.65 ~ 1.0 の範囲で制御することで, グ

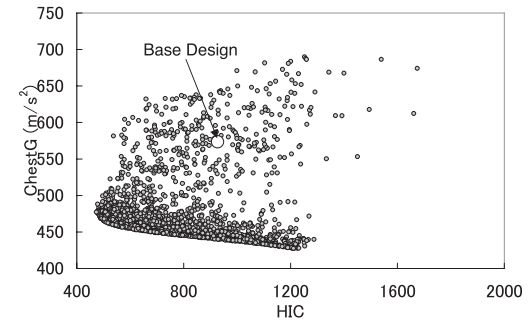


図 3 ARMOGA のある 1 試行における探索点
Fig. 3 Search points of one trial by ARMOGA.

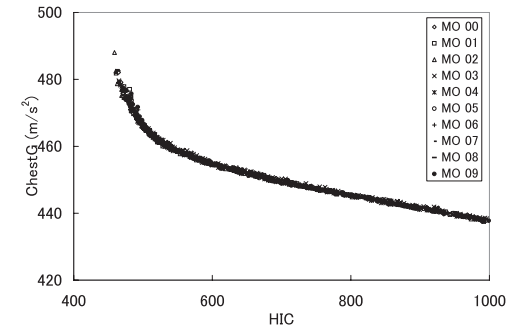


図 4 ARMOGA の 10 試行で得られたパレート解
Fig. 4 Pareto solutions of 10 trials by ARMOGA.

ープ A のパレート解が存在する範囲において, 頭部と胸部の傷害危険性のトレードオフを制御できることが分かる．また, パレート解の AB_MFR が定義域の一部に分布していることから, ARMOGA の領域適応機構が有効に機能していると考えられる．

グループ B では, AB_MFR は 1.0 ~ 1.1 の範囲に集中している． SB_Preten_TTF については, 0.01 ~ 0.029 秒の広い範囲に分布しており, AB_MFR と HIC との相関係数が 0.87 , $ChestG$ との相関係数が -0.96 と高い相関を示していることが確認できた．プリテンションの作動タイミングを 0.01 ~ 0.029 秒の範囲で制御することで, グループ B のパレート解が存在する範囲において, 頭部と胸部の傷害危険性のトレードオフを制御できることが分かる．

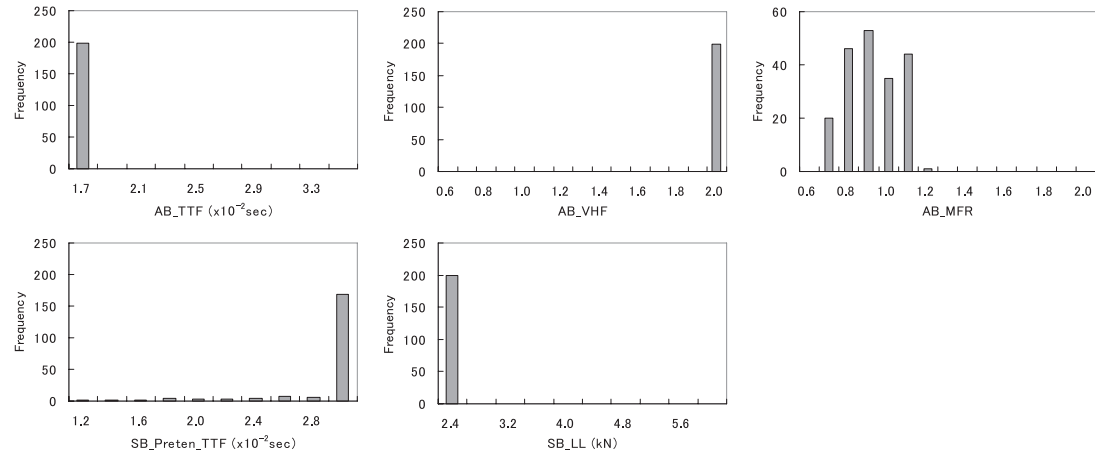


図 5 パレート解を構成する設計変数の頻度分布
Fig. 5 Histogram of design variables of Pareto solutions.

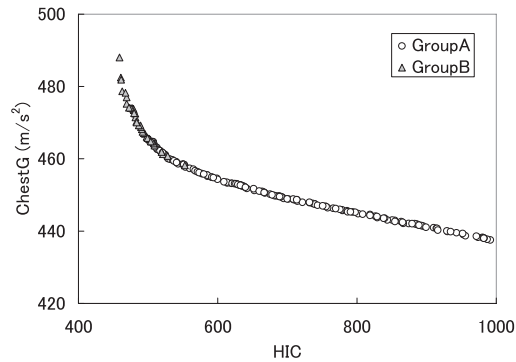


図 6 10 試行全体の中でのパレート解
Fig. 6 Pareto solutions in 10 trials.

この2つのパレート解グループにおいて見いだされた設計変数と目的関数との相関が、パレート解以外でも把握できるかを確認するために、4水準全因子計画でサンプリングした1024個体での相関係数と比較する。グループAのパレート解および4水準全因子計画におけるAB_MFRと安全指標の相関係数を表3に、グループBのパレート解および4水準

全因子計画におけるSB_Preten_TTFと安全指標の相関係数を表4に示す。パレート解とは異なり、4水準全因子計画のサンプル個体からは、設計変数と目的関数との相関を見出すことはできなかった。

以上のことから、進化的多目的最適化によって得られたパレート解を分析することによって、設計変数を、トレードオフを制御するものと最適値を持つものに分類することができ、自動車乗員保護システム設計に対する有用な設計情報を得ることができた。

4. おわりに

本研究では、マルチボディ解析手法によって自動車の前面衝突時の乗員挙動解析モデルを構築し、乗員保護システム設計を行った。最適化手法として進化的多目的最適化の1つであるARMOGAを適用し、有効な結果が得られた。得られた結果を以下に示す。

- 進化的多目的最適化によって得られたパレート解から、頭部と胸部の安全性のトレードオフ情報を把握することができた。
- パレート解を分析した結果、設計変数を、トレードオフを制御するものと最適値を持つものに分類することができた。

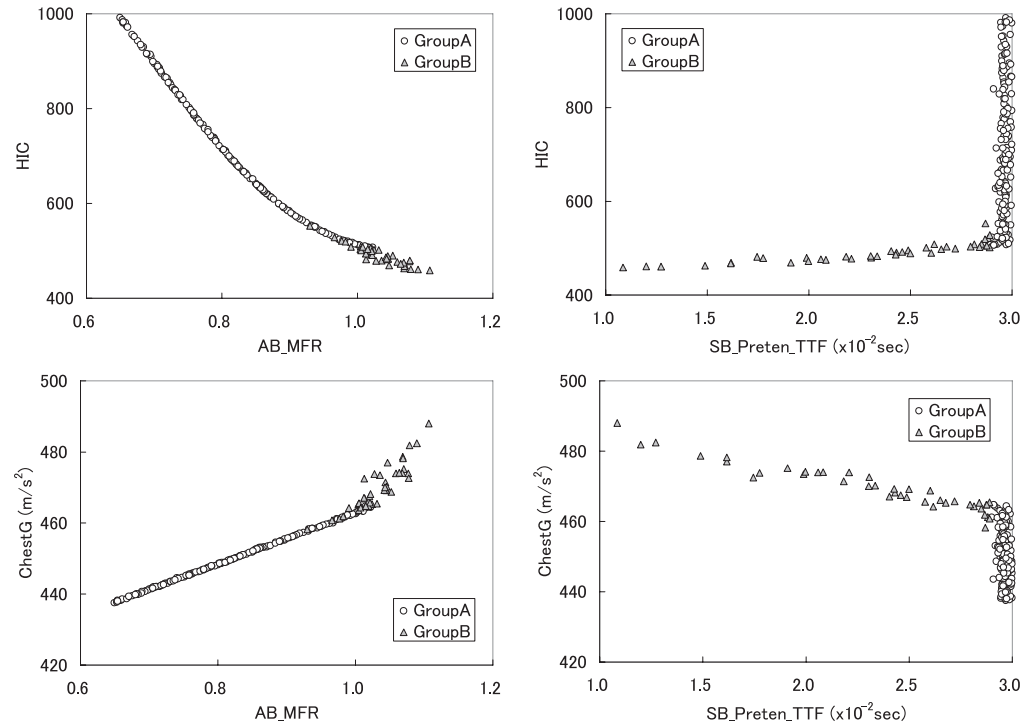


図7 AB_MFR, SB_Preten_TTF と HIC, ChestG との関係

Fig. 7 Relationship between AB_MFR, SB_Preten_TTF and HIC, ChestG.

表3 グループ A のパレート解および 4 水準全因子計画における AB_MFR と安全指標の相関係数

Table 3 Correlation coefficient between AB_MFR and Safety criteria of Pareto solutions of group A and 4-level full factorial designs.

	Group A	Full Factorial
HIC	-0.98	0.30
ChestG	1.00	0.64

表4 グループ B のパレート解および 4 水準全因子計画における SB_Preten_TTF と安全指標の相関係数

Table 4 Correlation coefficient between SB_Preten_TTF and safety criteria of Pareto solutions of group B and 4-level full factorial designs.

	Group B	Full Factorial
HIC	0.87	0.04
ChestG	-0.96	-0.07

参考文献

1) Deb, K. and Goldberg, D.E.: An Investigation of Niche and Species Formation

in Genetic Function Optimization, Proc. 3rd International Conference on Genetic Algorithms, pp.42-50 (1989).

2) Fu, Y., Yang, R.J. and Yeh, I.: A Genetic Algorithm for Optimal Design of an In-

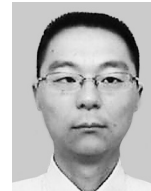
- flatable Knee Bolster, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.26, No.3-4, pp.264-271 (2004).
- 3) Fu, Y. and Abaramoski, E.: Robust Design for Occupant Restraint System, *Reliability and Robust Design in Automotive Engineering 2005*, SAE Technical Papers 2005-01-0814 (2005).
 - 4) Kiuchi, T.: A Simulatoion Study of Inflation Induced Injury and NCAP with Depowered Air Bag, *Proc. 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, No.98-S11-O-15, pp.2518-2525 (1998).
 - 5) Lee, S.B., Lee, J.K., Ha, W.P. and Yeo, T.J.: A Study on Robust Optimal Design for Occupant Safety in Crash Accident, *Proc. JSAE Annual Congress*, NO.73-06, pp.13-16 (2006).
 - 6) Sasaki, D. and Obayashi, S.: Efficient Search for Trade-Offs by Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms, *AIAA Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, pp.44-64 (2005).
 - 7) 伊藤英樹, 橋本大一, 清水信行: MADYMO による衝突時の乗員挙動解析, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.57, No.539, pp.2205-2210 (1991).
 - 8) 木佐貫義勝ほか: 人体全身モデル THUMS による交通事故傷害の再現, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.37, No.2, pp.34-41 (2002).
 - 9) 岡本 智: 技術のブランド化とそのマネジメント, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.48, No.10, pp.729-734 (2003).
 - 10) 大野祐司: 自動車アセスメント—自動車の車種別安全性能比較試験, 自動車技術, Vol.59, No.12, pp.21-26 (2005).
 - 11) 施 勤忠, 萩原一郎, 高島 太, 戸倉 直: 多峰性最適化解析技術を用いた車体と乗員拘束装置の適合に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.31, No.3, pp.107-113 (2000).
 - 12) 田岡義文: 車両前面衝突時の乗員胸部傷害値を低減する腰部拘束装置の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.715, pp.823-828 (2006).
 - 13) 速水則行: 側突時の頭頸部挙動の解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.36, No.2, pp.25-30 (2001).
 - 14) 森内孝信ほか: 前面衝突時の乗員保護試験について, 交通安全環境研究所平成 13 年度研究発表会 (2001). <http://www.nts-el.go.jp/ronbun/happyoukai/13files/zentotsu.pdf>
 - 15) 矢島秀起ほか: 自動車の安全装備に対する統計的設計支援システムの適用, 日本機械

学会論文集 (A 編), Vol.65, No.637, pp.1874-1880 (1999).

(平成 19 年 11 月 22 日受付)

(平成 20 年 1 月 22 日再受付)

(平成 20 年 1 月 30 日採録)



堀井 宏祐 (正会員)

2002 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同志社大学大学院工学研究科博士研究員, 株式会社シーディー・アダプコ・ジャパンを経て, 現在, 山梨大学工学部機械システム工学科助教。計算機シミュレーションを用いた設計最適化システムに関する研究に従事。博士 (情報科学)。日本機械学会会員。



大谷 朝彦

株式会社シーディー・アダプコ・ジャパン複合解析技術部部長。最適設計コンサルティング業務に従事。



野間 宏平

TNO-Automotive ジャパン株式会社エンジニアリングマネージャ。衝突解析コンサルティング業務に従事。