

論文・解説

37

## 機械学習による衝突荷重伝達経路の解明

### Clarification of Impact Load Transfer Path Using Machine Learning

奥山 智仁<sup>\*1</sup> 本田 正徳<sup>\*2</sup> 目良 貢<sup>\*3</sup>  
Tomohito Okuyama Masanori Honda Mitsugu Mera  
雪田 恭兵<sup>\*4</sup> 木崎 勇<sup>\*5</sup>  
Kyohei Yukita Isamu Kizaki

#### 要 約

二酸化炭素の排出量削減を目的とした軽量化と高い安全性の両立を実現するため、従来は側面衝突時に荷重が集中する車体フレームの高強度化を図っていたが、新たに荷重を分散するドアパネル構造を考案した。ドアパネルから車体フレームへの荷重伝達は、ドアパネルの変形により車体フレームと接触することで生じる。そのため、荷重伝達経路の解明には、非線形な時系列データの分析が必要であり、機械学習を用いたグラフ構造化分析手法<sup>(1)</sup>により明らかにした。荷重伝達経路のポイントは、リアボディー部におけるドアパネルと車体フレームの接触である。更に、接触に寄与するドアパネル部位は、リアドアだけでなく、フロントドアのサイドシル部であることを明らかにした。

#### Abstract

A door panel structure that disperses the load in a side surface collision is newly developed to achieve both weight reduction and high safety for reducing carbon dioxide emissions. The load transmission from the door panel to the vehicle body frame occurs when the door panel is deformed and comes into contact with the vehicle body frame. Therefore, it is necessary to analyze non-linear time series data to elucidate the load transmission path, and we clarified it using a graph structured analysis method. The key for the formation of the load transmission path is the contact between the door panel and the vehicle body frame in the rear body. It is also clarified that the door panel part that contributes to the contact is not only the rear door side sill but also the front door side sill.

**Key words** : Vehicle development, Safety, Computer aided engineering, Crash safety, Structural member analysis, Impact attenuation

#### 1. はじめに

近年、二酸化炭素の排出量低減に向けて、さらなる車両の軽量化が必須となる一方、乗員の安全性を確保するため、高い衝突安全性能が求められている。

従来、側面の衝突安全性の確保は、車体フレームのBピラーに局所的な荷重が入力されることを起点に、ルーフやフロアへの荷重伝達や、変形モードを制御する骨格構造により実現している。そのため、Bピラーをはじめとした車体フレームの骨格部材は、高強度鋼板や樹脂に

よるフレーム補強構造<sup>(2)</sup>、薄板座屈理論に基づいた断面技術<sup>(3)</sup>を用いて、軽量化と高強度化を両立してきた。一方、荷重が伝達する経路形成は、車格による差異は多少あるが、大きく変わっていない。そこで、側面衝突時に最初に衝突体と接触するドアのパネルを活用し、車体フレームへの荷重を分散させるコンセプトを考案した。

ドアパネルは、衝突時に大きく変形し、車体フレームと接触しながら荷重を伝達するため、変形挙動の制御が荷重分散のキーとなる。また、車体フレームへ伝達する荷重の大きさやモードは、接触するタイミングや部位に

\*1~3 技術研究所  
Technical Research Center

\*4 ボデー開発部  
Body Development Dept.

\*5 衝突性能開発部  
Crash Safety Development Dept.

より異なるため、荷重伝達経路に影響すると考える。そこで、ドアパネルの強度分布と、ドアパネルから車体フレームへの荷重伝達経路との関係導出を課題とした。

衝突現象の解明は、車両各部位の発生荷重や変形量の複数因子、更に各因子の時間変動も含めたデータを仕様差異（今回の検討ではドアパネルの強度分布）から分析する方法がある。しかし、剛性観点では位相最適化と荷重伝達指標 Ustar を用いた報告<sup>(4)</sup>はあるが、衝突現象において扱う非線形な時系列データを分析する手法の報告は少ない。そこで、統計探索手法のひとつであり、データの離散化と標準化によりベイズ理論に基づいた分析が可能であるグラフ構造化分析手法<sup>(1)</sup>に着目した。本稿では、グラフ構造化分析により、車体フレームの任意部位に荷重を伝達するためのドアパネルの主要部位の選出、及び荷重の伝達経路を明らかにしたので報告する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析フロー

分析手法の検討順序は、①衝突解析による教師データの取得、②応答曲面を用いたデータ補間、③グラフ構造化分析を用いたデータ解析の3段階で進めた。

入力因子は、21分割したドアパネルの板厚とした (Fig. 1)。説明変数は、ドアパネルと車体フレームの各断面における荷重やモーメント、及びドアと車体フレームとの接触荷重のそれぞれ 10ms ごとの各値とした。出力因子は、衝突後の残存距離 (Fig. 2)。シート着座中心から車体フレームが車室内に最大変形した位置との距離やドア移動量とした。因子数は、入力因子が 21 個、説明変数が 485 個、出力因子が 163 個の計 669 個とした。

衝突条件は、Insurance for Highway Safety (IIHS) の側面衝突プロトコルに基づき、ハニカムバリアの質量を 1900kg、衝突速度を 60km/h とした。衝突解析は、汎用非線形解析ソフトウェアである LS-DYNA を使用した。

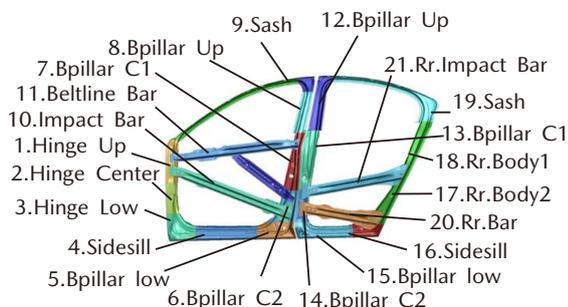


Fig. 1 Door Panel Parts of Input Factors

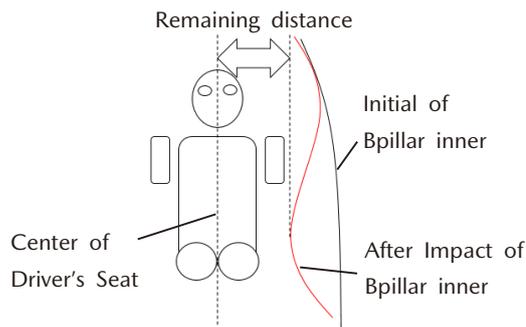


Fig. 2 Remaining Distance

### 2.2 グラフ構造化分析

グラフ構造化分析は、時系列データをはじめ連続量をもつような複数の因子のセットに対し、多水準系にカテゴリ化（離散化）した上でベイジアンネットワークの構造を BDeu (Bayesian Dirichlet equivalence uniform) スコア最大化に基づき学習するとともに、着目したい変数（子ノード）に辿り着く因子（親ノード）の階層構造を自動的に抽出可能な分析手法である<sup>(1)</sup>。階層構造のイメージは、過去の因子を X11~1n と Y11、現在の因子を X21~2n と Y22、未来の因子を X31~3n と Y33 とするデータを例にとると、着目したい因子（親）Y33 に対して、関係をもつ因子（子）が X22 や X11 が選出され、因子間を線で結ぶことで視覚的に把握できる状態を示す (Fig. 3)。

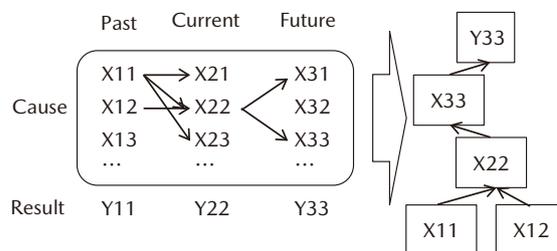


Fig. 3 Image of Hierarchical Structure

本解析においては、ドアパネル部位、ドアパネルや車体フレーム各部位の断面荷重やモーメント、ドアパネルと車体フレームの接触荷重、衝突後の残存距離やドア移動量の因子セットに対し、グラフ構造化分析を適用することで、着目したい出力因子である衝突後の残存距離やフロア断面荷重に対して時刻歴とともに因子のつながりを解析した。

## 3. 解析結果

### 3.1 衝突解析による教師データ取得

衝突解析による教師データは、ドアパネル各部位の板厚分布を 0.3mm から 3.0mm まで離散化幅を 0.1mm とし、ランダムに変動させた 220 パターンを LS-DYNA で解析した。

得られた解析結果は、ドアパネルの質量と衝突後の残

存距離との関係から適度な範囲でデータ取得できており、教師データとして使用できると判断した (Fig. 4)。また、車体フレームへの荷重伝達の 1 指標としたフロアの断面荷重は、ドアパネルの質量増加により大きくなる傾向を示すが、64~88kN と幅が大きくなる。これは、フロアの断面荷重に対して、ドアパネルの寄与度が高い部位を高強度化している、もしくはドアパネル全体の強度分布の適正化が重要と考えた (Fig. 5)。

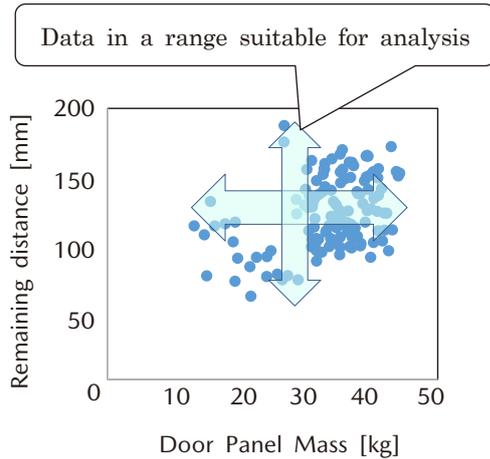


Fig. 4 Relationship Doors and Body Deformation

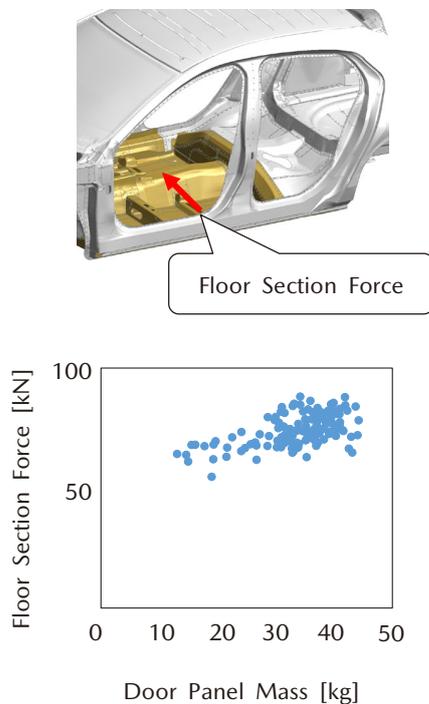


Fig. 5 Relationship Doors and Floor Section Force

### 3.2 応答曲面を用いたデータ補間

今回検討する題材のグラフ構造化分析の実行は、前述の衝突解析 220 仕様よりデータ数が多く必要である。そのため、汎用の設計者支援ツールである modeFRONTIER を用いて、応答曲面法を利用した最適化解析によりデータを補

間した。

応答曲面は、衝突解析を教師データとし、全因子に対して作成した。応答曲面を用いたデータは、目的関数を衝突後の残存距離が最大、ドアパネルの質量が最小、ドア侵入量が最小とする最適化解析を実行し、検討過程で得られた 20000 仕様の解析結果を示す。なお、機械学習に用いる教師データとして、応答曲面法を用いた最適化解析結果の補間方法は、定量性は劣るが、定性的な分析であることと計算コストを考慮して採用した。

応答曲面を用いたデータは、衝突解析のデータと比較し、決定係数  $R^2$  が 0.91 と高いことから、教師データとして使用できると判断した (Fig. 6)。

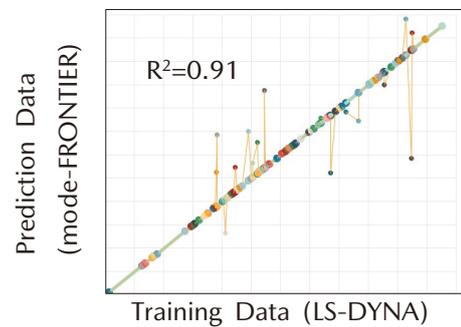


Fig. 6 Comparison of Training Data and Predicted Data for Body Deformation Amount

### 3.3 グラフ構造化分析を用いたデータ解析

グラフ構造化分析は、因子間の親子関係を 30ms, 40ms, 50ms の各因子を定義し、時刻歴の順番にシンプルなマルコフ性を考慮した制約条件を課した。すなわち、30ms の因子は 40ms の因子の親ノードにしかならず、40ms の因子は 50ms の親ノードにしかならない、といった制約条件を課しながら適用した。

分析結果は、全ての因子間のつながりを表記すると解釈が困難であるため (Fig. 7(a)), ネットワークを分かりやすく可視化し、着目する因子、かつ相関関係が強い因子のみを表記した (Fig. 7(b))。表記は、青色を入力因子、緑色をドアの断面荷重、黄色をドアパネルと車体フレームの接触荷重、桃色を車体フレームの断面荷重、赤色を出力因子とした。

フロア断面荷重を出力とした分析結果は、後席のドアパネルと車体フレームのリアボディー部の接触荷重が親子関係を持ち、ドアパネルの前側はサイドシル部と後側ほぼ全面が親子関係をもっていることが分かった (Fig. 8)。しかし、リアボディー部の接触荷重に対し、ドアパネル前側のサイドシル部が親子関係をもつ要因が分からないため、次節にて考察する。

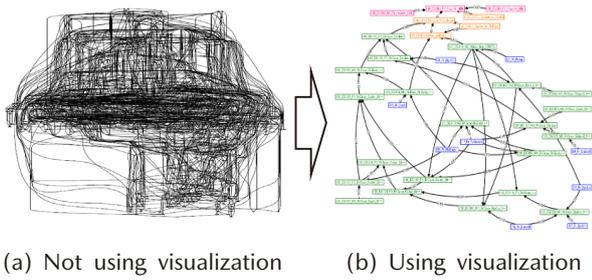


Fig. 7 Effect of Visualization Method of Graph Structured Analysis

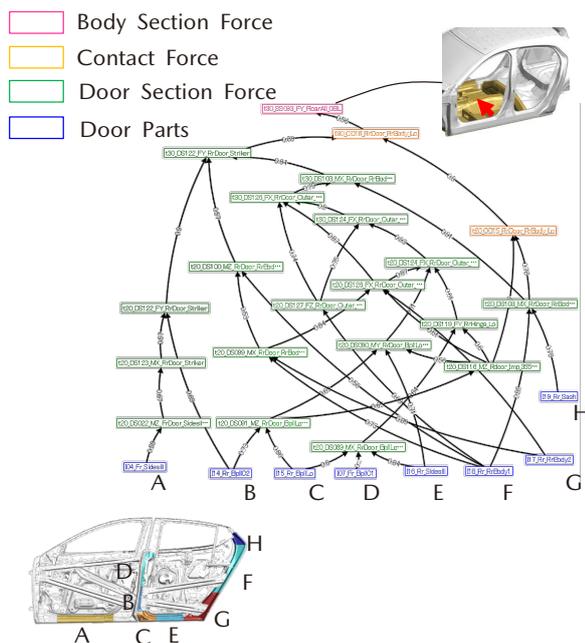


Fig. 8 Graph Structured Analysis for Floor Section Force

3.4 グラフ構造化分析結果の考察

ドアパネル前側のサイドシル部とフロア荷重との関係性は、衝突解析のデータ比較により明らかにした。比較した仕様は、フロア断面荷重に差異があり、かつ前側ドアパネルのサイドシル部の板厚に差異がある2仕様とした (Fig. 9)。

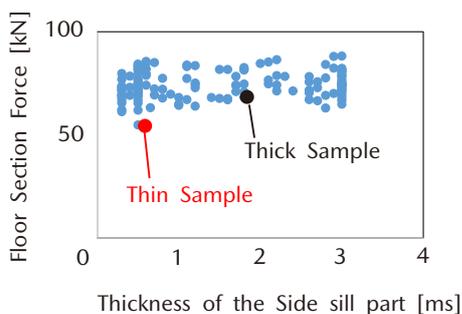


Fig. 9 Relationship between Floor Section Force at 30ms and Thickness of Side Sill of Front Door

前側ドアパネルの厚板仕様は、薄板仕様と比較し、20msにおけるサイドシル前端部及び後端部の接触荷重が大きい (Fig. 10)。また、30msにおいては、車体フレームのサイドシル部の曲げモーメントが厚板仕様の方が大きかった (Fig. 11)。よって、ドアパネルのサイドシル部の高強度化は、従来はBピラー部に集中していた接触荷重をサイドシル前後端に分散させ、車体フレームのねじり変形を抑制したことで、リアボディー部の接触荷重を大きくできたものと考察した (Fig. 12)。

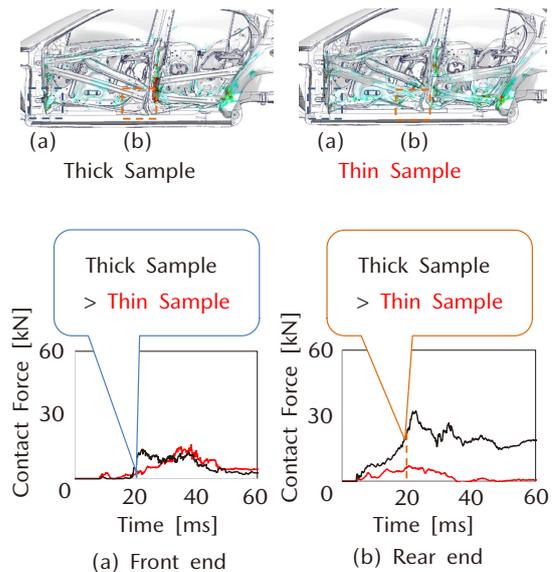


Fig. 10 Comparison of Contact Force between Front End and Rear End of Side Sill at 20ms Due to Different Specifications

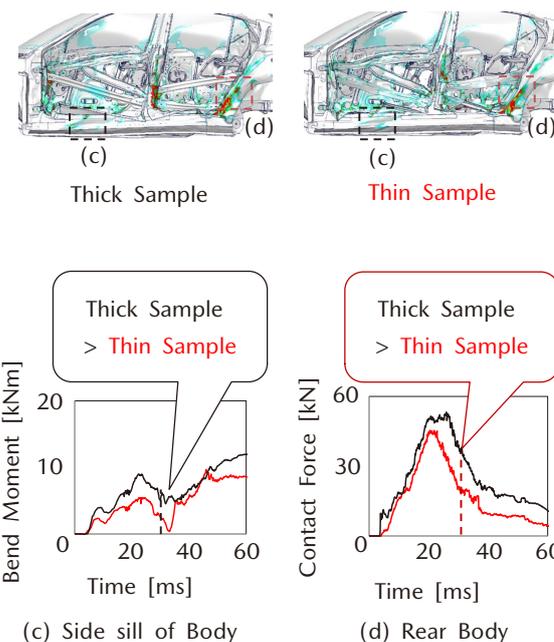


Fig. 11 Comparison of Contact Force between Front End and Rear End of Side Sill at 20ms Due to Different Specifications

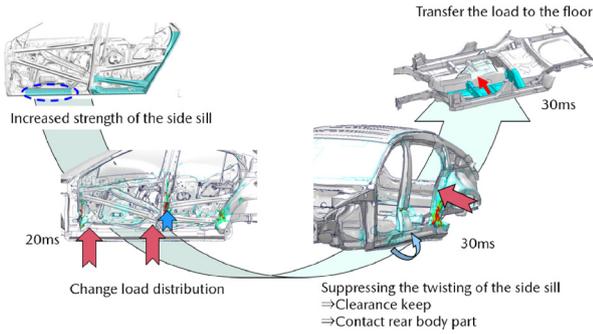


Fig. 12 Factors Influencing Floor Force due to Higher Strength of the Side Sill

#### 4. まとめ

側面衝突時にドアパネルで荷重分散するコンセプトは、ドアパネルに強度分布を与えることで実現できる可能性を得た。ドアパネルの強度分布と分散する荷重の伝達経路との関係を、フロアへの荷重伝達を1例に、グラフ構造化分析により主要部位と因子間の結びつきを示し、明らかにした。

フロアへの荷重伝達は、リアボディー部の接触荷重との関係性が強く、前側ドアパネルのサイドシル部と後側ドアパネル全面の強度分布との関係性が強いことが分かった。グラフ構造化分析は、可視化手法を用いたポスト処理との組合せにより、非線形なデータをもつ因子間の親子関係を示すことができ、従来の時系列データの分析からは得られない着目すべき因子を明らかにできる手法であることを確認した。

#### 参考文献

- (1) 目良貢ほか：時系列データを解析するためのベイジアンネットワークの活用法に関する研究，日本応用数理学会論文誌，Vol.31，No.2，pp.76-104（2021）
- (2) 奥山智仁ほか：高強度発泡充填材フレーム，自動車技術会学術講演会前刷集，No.94，pp.1-4（2015）
- (3) 本田正徳ほか：高強度・薄板中空フレーム曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，日本機械学会論文集，Vol.87，No.900（2021）
- (4) 幟振鐸ほか：構造階層化概念による荷重伝達指標Ustar (U\*)を用いた自動車ドア構造の位相最適化，自動車技術会論文集，Vol.52，No.2（2021）

#### ■ 著 者 ■



奥山 智仁



本田 正徳



目良 貢



雪田 恭兵



木崎 勇