# Development of Vehicle Body Structure Having Maximum Shock Energy Absorption Ability


| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-05<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: Yamazaki, Koetsu<br>メールアドレス:<br>所属: |
|---|---|
| URL | https://doi.org/10.24517/00034868 |

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

# 衝撃吸収自動車車体構造の開発

（研究課題番号　07555344）

平成７年度～平成９年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)（展開））
研究成果報告書

平成10年３月

研究代表者　山　崎　光　悦

（金沢大学工学部教授）

KAKEN
1997
2

# 衝撃吸収自動車車体構造の開発

（研究課題番号　07555344）

平成７年度～平成９年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)（展開））
研究成果報告書

平成10年３月

研究代表者　山　崎　光　悦

（金沢大学工学部教授）

8000-59969-4

金沢大学附属図書館

# 研　究　成　果　目　次

はしがき　……………………………………………………　1
研究成果　……………………………………………………　4

1．研究成果の概要　……………………………………………　4

2．薄肉断面構造の衝撃吸収最大化設計法の開発　……………　7

2．1　陰解法有限要素法による設計感度解析法と最適設計への応用　………　7
2．2　動的陽解法有限要素法と近似法による衝撃吸収最大化設計法
……………………………　33

3．薄肉断面構造部材の衝撃吸収エネルギ最大化の検討　…………　50

3．1　剛塑性理論による理論的検討　………………………　50
3．2　動的有限要素法と構造最適設計法による円筒，角筒の衝撃吸収最大化
……………………………　55

4．衝突圧潰試験による衝撃吸収能の実験的検証　…………………　74

5．衝撃吸収車体構造の検討と今後の課題　………………………　95

# はしがき

自動車の車体構造は，通常走行時には車の各種機能を維持するための強度部材として機能し，事故による衝突時にはその主要部材が圧潰変形することによって衝撃エネルギを吸収し，他の安全装置と合わせて搭乗者を危険から守るための重要な役割を果たしている．したがって衝撃エネルギ吸収能を向上させる設計がきわめて重要であるにもかかわらず，衝撃負荷時の荷重を分散させ，また各主要部材が圧潰によって効果的にエネルギ吸収するための有効な設計手法，いわゆる衝撃大変形弾塑性体の構造最適設計手法が欠如していたため，衝突シミュレーションや衝突実験による現象の予測・確認と試行錯誤的な設計変更を繰返し実施しており，しかも主要な設計が終了した設計全体の最終段階に近い状態でしかシミュレーションや実験を実施することができないため，それらの結果を十分に設計にフィードバックできないのが現状である．

衝突解析問題は大変形，材料非線形，時間応答解析，接触解析を含む複雑な構造解析問題ではあるが，すでに商用コードも普及しつつあり，一部の業種では設計業務にも取り入れられており，問題の関心事は貫通解析，エネルギ吸収解析，最適設計などに移りつつある．したがって，衝突解析法の解析精度に関する議論はあるものの，十分その最適設計問題の基礎解析技術として衝突解析法の応用が可能であると考えられる．しかし，構造最適化設計法に関する従来の研究は，その大半が静弾性設計問題，振動問題に関するもので，ようやく最近，非線形時間応答解析問題の設計感度解析法や衝撃荷重下の最適設計法が若干研究されるようになってきている程度である．そのような現状に対し，筆者らは最近材料非線形をも加味した薄板殻組立構造を対象に衝撃大変形弾塑性座屈問題の座屈荷重最大化に関する研究，およびエネルギ吸収に注目した設計感度解析法，最適設計法に関する研究を実施して基本的な設計モデルでの有効性も確認している．一方，薄肉断面部材のエネルギ吸収効果に関する研究は，一部の特定断面部材を対象に過去にも実施されてそれなりの知見も得られてはいるが，各種断面のエネルギ吸収効果を系統的に調べた研究もなく，また高速衝突時のエネルギを効果的に吸収するような車体構造を実現するための設計技術の確立にはほど遠いのが現状である．

そこで本研究では，薄肉断面部材で構成される骨組と板殻の組立構造からなる自動車車体構造を対象に，その衝撃エネルギ吸収能を最大化するための具体的な設計法の開発と，それを用いた衝突エネルギ吸収安全車体の開発，実験的検証を目的とした．そのため，局部的な衝撃負荷によるエネルギが組立構造全体へ分散される効果と，薄肉断面主要部材の圧潰により吸収される効果によって衝撃力の緩衝が達成されるとする観点から，薄肉断面部材の衝撃座屈圧潰時の衝撃エネルギ吸収最大化設計法を新たに開発し，それを用いて搭乗者の安全空間を確保しつつ車体構造全体の圧潰によって衝突エネルギを効果的に吸収する具体的な板殻組立車体主構造材の寸法とそれらの効果的な配置の検討を

目指した．さらにそれらの結果を元に自動車車体主構造を模擬したモデルを製作し，時速５０km/h程度の速度での剛体壁への前面衝突実験を実施して有効性を詳しく調べ，現在の車体構造に比較して衝突時の搭乗者が受ける衝撃力を大幅に軽減できる車体構造実現のための基本設計指針を確立することを目的とした．

平成１０年３月

研究代表者　　山崎　光悦

## 研究組織


| | | |
|---|---|---|
| 研究代表者 | 山崎　光悦 | (金沢大学工学部　教授) |
| 研究分担者 | 坂本　二郎 | (金沢大学工学部　助手) |
| 研究分担者 | 松本　政秀 | (大阪工業大学工学部　助教授) |


## 研究経費

| | |
|---|---|
| 平成７年度 | ５，１００　千円 |
| 平成８年度 | ３，６００　千円 |
| 平成９年度 | ２，０００　千円 |
| 計 | 10,700 千円 |

## 研究発表

### (１)　学会誌など


１）山崎光悦・大川直勝, 板殻構造の大変形動弾塑性設計感度解析法, 日本機械学会論文集(C編), 61巻, 587号, pp.2730-2735, 1995-7.

２）K. Yamazaki and K. Shibuya, Sensitivity Analysis of Nonlinear Material and Its Application to Shape Optimization, Proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, pp.1706-1713,1995-4.

３）K. Yamazaki, Optimization of Largely Deformed Shell Structures, The Fourth International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures, pp.241-250, 1995-9.

４）K. Yamazaki and N. Tsubosaka, Stress Analysis of Junction of Plate and Shell Built-up Structures via Special Finite Shell Element, JSME International Journal, Series A, Vol.39, No.2, pp.179-185, 1996-2.

５）K. Yamazaki, J. Han, H. Ishikawa & Y. Kuroiwa, Maximization of Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells-Simulation and Experiment-, International Symposium on Optimization and Innovative Design, (Tokyo), pp.139-141, 1997-7.

６）K. Yamazaki & J. Han, Maximization of Crushing Energy of Cylinderical Shells, Computer Aided Optimum Design of Structures V, Computational Mechanics Publications, pp.3-12, 1997-9.

７）山崎光悦・韓晶・石川秀樹, 円筒の衝撃圧潰吸収エネルギ最大化設計に関する研究, 日本機械学会論文集(A編), 64巻, 620号, 1998-4.

８）K. Yamazaki & J. Han, Maximization of Crushing Energy Absorption of Tubes, Structural Optimization, 1988（掲載予定）.

（2）口頭発表

1）山崎光悦・石川秀樹，シェル構造の大変形座屈強度の最適化，日本機械学会第８回計算力学部門講演会，長野，1995-11.

2）山崎光悦・石川秀樹・石川信之，薄肉円筒および角筒の圧潰エネルギ吸収最大化設計法，日本機械学会第74期全国大会講演会，京都，1996-9.

3）山崎光悦，非線形構造の設計感度解析と最適化，日本機械学会関西支部第72期定時総会講演会，大阪，1997-3.

4）K. Yamazaki and J. Han, Optimization of Non-linear Shell Structures, Palm Coast(USA), 1997-3.

5）山崎光悦・石川秀樹・韓　晶，シェル構造部材の圧潰吸収エネルギ最大化に関する検討，日本機械学会第74期通常総会講演会，東京，1997-3.

6）山崎光悦・韓　晶・石川秀樹，薄肉構造部材の動的圧潰吸収エネルギ最大化設計法の開発，日本機械学会第74期通常総会講演会，東京，1997-3.

7）山崎光悦・黒岩雄二・韓　晶，円筒シェルの衝撃座屈圧潰解析および圧潰試験との比較，日本機械学会第10回計算力学講演会，東京，1997-7.

8）山崎光悦・韓　晶，円筒の衝撃圧潰吸収エネルギ最大化設計，日本機械学会第10回計算力学講演会，東京，1997-7.

9）山崎光悦・黒岩雄二・韓　晶，円筒シェルの衝撃座屈圧潰試験，日本機械学会北陸信越支部100周年記念総会講演会，金沢，1997-9.

１０）山崎光悦・韓　晶，角筒の衝撃圧潰吸収エネルギ最大化設計，日本機械学会第７回設計工学．システム部門講演会，東京，1997-11.

１１）山崎光悦・韓　晶，円筒および角筒の衝撃圧潰吸収エネルギ最大化設計，土木学会第５回システム最適化に関するシンポジュウム，東京，1997-12.

１２）山崎光悦・黒岩雄二・韓　晶，肉厚を変化させた円筒シェルの衝撃座屈圧潰実験とその考察，日本機械学会第75期通常総会講演会，東京，1998-4.

１３）山崎光悦・韓　晶，リブ付き角筒の衝撃圧潰エネルギ吸収最大化設計，日本機械学会第75期通常総会講演会，東京，1998-4.

研究成果

## 1．研究成果の概要

衝撃吸収自動車車体構造の開発を目指し，以下の研究成果を得た．

### (1) 衝撃荷重下の非線形設計感度解析法と最適設計への応用

陰解法有限要素法の代表的な手法であるニューマーク法による衝撃応答解析の有限要素法を基礎に，衝撃応答の設計感度解析法を定式化し，数値例題を通して解析精度などを確認した．また変位や応力など時間的に変動する応答に対する制約条件の設定法，その感度解析法を検討し，ピーク応力，時間平均応力などについての有効な制約法を見いだした．さらにその結果を用いて衝撃応答制約下での連続体の形状最適化を実施し，有効な結果を得た．しかし同時に衝撃圧潰などより複雑な構造応答を対象とする構造最適設計には，計算時間，収束回数などの点で不向きであることも判明した．

### (2) 衝撃エネルギ吸収最大化構造設計システムの開発

まず薄板・殻組立構造の非線形衝撃応答陽解法有限要素法プログラムを基礎に，予め指定した設計空間上の設計点を実験計画法の直交表に割当て構造解析を実施し，その結果をもとに分散分析を行って各設計変数の構造応答への有意度を判断してして直交多項式に近似する．そうして得られた近似問題を数理計画法で解いて最適点を得る感度解析を必要としない非線形性のきわめて強い構造応答にも有効な近似解法を開発した．またその有効性を円筒など基本的な衝撃吸収部材のエネルギ吸収最大化設計に適用して確認した．

### (3) 円筒・角筒の衝撃吸収エネルギ最大化設計

(2) で開発した近似法を用いて，後端面に付加質量を持つ円筒及び角筒が剛体壁に軸方向衝突をして圧潰するときの衝撃吸収エネルギを最大とする寸法を，質量一定，平均軸圧潰力制約下で求めた．その結果，円筒も角筒も半径あるいは角の辺長を小さくして細長くするとやがて全体の柱座屈を引き起こすので，全体座屈を起こさない範囲，平均軸圧潰力制約を破らない範囲でできるだけ半径，辺長を小さくして肉厚を厚くし，多くのしわを形成すれば良いことが明かとなった．

また角筒の外側，各面の中央にリブを付けたモデルについても辺長，肉厚のほかリブ丈，リブ厚を設計変数にとって，衝撃吸収エネルギの最大化設計を実施した．その結果，リブ丈，リブ厚をある程度大きくして，角筒辺長を小さく，筒の肉厚を厚くすることで，さらに吸収エネルギを増大できること，またリブが全体座屈を防止してしわ形成に効果的であることを確認した．

（4）円筒，角筒のエネルギ吸収最大化に関する理論的検討

剛塑性理論による衝撃エネルギ吸収量，平均軸圧潰荷重に関する従来の研究成果を整理し，それらをもとに（3）と同様の衝撃吸収エネルギ最大化について検討し，（3）の結果から得たれた最適解の傾向を裏付ける結果を得た．

（5）衝撃吸収能の実験的確認

ゴムチューブの復元力を利用して質量10 kg程度の物体を時速約50 km/hで剛体壁に衝突，圧潰させる性能を有する衝突試験機を製作し，上記の円筒モデルについて種々の圧潰実験を実施した．衝突前後の速度から吸収エネルギを，また付加質量に付けた加速度ピックアップから加速度変化を計測し，シミュレーションとの比較検討を行った．さらに衝突時の変形過程を高速度ビデオで観察し，しわ長さ，圧潰パターンなどを観測して，数値シミュレーションの有効性を十分に確認した．

また円筒に一定幅，間隔で溝を入れたモデルについての圧潰実験と数値シミュレーションも実施して，溝の効果について確認した．その結果，比較的肉厚の厚い円筒に溝を付けることによって，エネルギ吸収量を減少させることなく平均軸圧潰力を大幅に減少させることができることが明かとなった．

（6）衝撃吸収車体構造の検討

以上の結果から，円筒や角筒など基本部材を組み合わせた薄肉断面組み立て構造の衝突時の圧潰変形をある程度制御できることを確認し，また具体的な衝突エネルギ吸収効果の高い車体構造について提案した．

# 2．薄肉断面構造の衝撃吸収最大化設計法の開発

## 2．1　陰解法有限要素法による設計感度解析法と最適設計への応用

弾塑性体の最適設計が実用性と限界設計の立場から強く望まれるようになってきている．本研究ではまず非線形材料の設計感度解析法，その最適設計への応用法を検討するため連続体を対象として，弾塑性有限要素解析法としてニュートン·ラプソン型の解法を基礎に，直接微分法による設計感度解析法の定式化を行ない，数値例を通して塑性域での変位感度，応力感度の解析精度，解析法の有効性を確認した．特に，応力ーひずみ関係が二直線近似で与えられる双一次型の構成式の弾性ー塑性遷移点で生ずる設計感度の不連続性の取り扱いについて有用な解法を考案し，内圧を受ける厚肉円筒，一様負荷を受ける矩形板中の空孔形状最適化問題に応用して有効性を検討した．

次に陰解法有限要素法の代表的な手法であるニューマーク法による衝撃応答解析の有限要素法を基礎に，衝撃応答の設計感度解析法を定式化し，数値例題を通して解析精度などを確認した．また変位や応力など時間的に変動する応答に対する制約条件の設定法，その感度解析法を検討し，ピーク応力，時間平均応力などについての有効な制約法を見いだした．さらにその結果を用いて衝撃応答制約下での連続体の形状最適化を実施し，有効な結果を得た．しかし同時に衝撃圧潰などより複雑な構造応答を対象とする構造最適設計には，計算時間，収束回数などの点で不向きであることも判明した．

## 2．2　動的陽解法有限要素法と近似法による衝撃吸収最大化設計法

次に薄板・殻組立構造の非線形衝撃応答陽解法有限要素法プログラムDYNA3Dを基礎に，予め指定した設計空間上の設計点を実験計画法の直交表に割当てて構造解析を実施し，その結果をもとに分散分析を行って各設計変数の構造応答への有意度を判断してして直交多項式に近似する．そうして得られた近似問題を数理計画法で解いて最適点を得る，設計感度解析を必要としない非線形性のきわめて強い構造応答にも有効な近似解法を開発した．またその有効性を円筒など基本的な衝撃吸収部材のエネルギ吸収最大化設計に適用して確認した．

開発した手法は，設計感度解析を必要としないため本研究で対象とする衝撃圧潰現象の解析など１回の構造解析に膨大な計算時間を必要とする構造応答の最適化や，設計感度解析が困難なMultidisciprinary Optimizationなど最近解決要求の強い分野での応用が期待できる．

# 3．薄肉断面構造部材の衝撃吸収エネルギ最大化の検討

## 3．1　剛塑性理論による理論的検討

円筒や角筒の静的座屈圧潰や衝撃座屈圧潰挙動を推定するため古くから多くの剛塑性理論に基づく静的あるいは衝撃エネルギ吸収量，平均軸圧潰荷重に関する公式が提案されている．円筒だけでもその座屈圧潰パターンごとに複数の式が提案されており，ここではそれら従来からの公式を整理し，それらをもとに質量制約，平均軸圧潰力制約のもとに衝撃吸収エネルギ最大化を数式的に検討した．最終的には圧潰荷重，吸収エネルギが複数の式で与えられることから数理計画法による最適解の探索を試み，寸法とエネルギ吸収能の関係など最適解の傾向を裏付ける結果を得た．

## 3．2　動的有限要素法と構造最適設計法による円筒，角筒の衝撃吸収最大化

第2章で開発した実験計画法と数理計画法を利用した非線形性の強い構造応答の最適化のための近似法を用いて円筒，角筒の衝撃吸収エネルギ最大化設計を試みた．後端面に付加質量を持つ円筒及び角筒が剛体壁に軸方向衝突をして圧潰するときの衝撃吸収エネルギを最大とする寸法を，質量一定，平均軸圧潰力制約下で求めた．その結果，円筒も角筒も半径あるいは角の辺長を小さくして細長くするとやがて全体の柱座屈を引き起こすので，全体座屈を起こさない範囲，平均軸圧潰力制約を破らない範囲でできるだけ半径，辺長を小さくして肉厚を厚くし，多くのしわを形成すれば良いことが明かとなった．

また角筒の外側，各面の中央にリブを付けたモデルについても辺長，肉厚のほかリブ丈，リブ厚を設計変数にとって，衝撃吸収エネルギの最大化設計を実施した．その結果，リブ丈，リブ厚をある程度大きくして，角筒辺長を小さく，筒の肉厚を厚くすることで，さらに吸収エネルギを増大できること，またリブが全体座屈を防止してしわ形成に効果的であることを確認した．

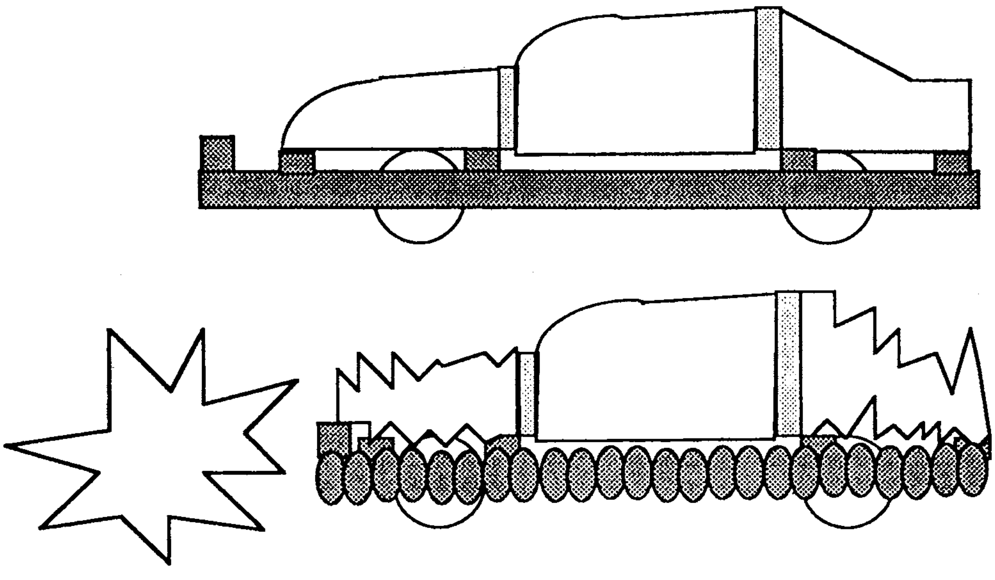
## 4．衝突圧潰試験による衝撃吸収能の実験的検証

ゴムチューブの復元力を利用して質量10 kg程度の物体を時速約50 km/hで剛体壁に衝突，圧潰させる性能を有する衝突試験機を製作し，アルミニウム円筒モデルについて種々の圧潰実験を実施した．衝突前後の速度から吸収エネルギを，また付加質量に付けた加速度ピックアップから加速度変化を計測し，数値シミュレーションとの比較検討を行った．さらに衝突時の変形過程を高速度ビデオで観察し，しわ長さ，圧潰パターンなどを観測して，数値シミュレーションの有効性を十分に確認した．

また円筒に一定幅，間隔で溝を入れたアルミニウム円筒モデルについての圧潰実験と数値シミュレーションも実施して，溝の効果について確認した．その結果，比較的肉厚の厚い円筒に溝を付けることによって，エネルギ吸収量を減少させることなく平均軸圧潰力を大幅に減少させることができることが明かとなった．

## 5．衝撃吸収車体構造の検討と今後の課題

前章までに円筒や角筒など基本部材単体で如何にして衝突時の衝撃圧潰エネルギ吸収を増大できるかについて詳しく検討した．特にリブ付き角筒の最適化結果や溝付き円筒の実験および数値シミュレーション結果は，圧潰パターンをある程度制御できることを示している．すなわち，単純な円筒であっても途中の肉厚を変化させたり，リブを付けたりあるいはスリットを入れたりして圧潰パターンをある程度制御できることになる．

そこで，車体全体の構造を，従来のようなモノコック構造ではなく，下図に示すようにシャーシをベースとして，それにエンジンを含む前部，車室，後部をそれぞれ接合した構造とすることを提案する．その肉断面組立て構造の組合わせを種々工夫することにより，衝突時に車体前部及びシャーシ，そしてシャーシに剛に接続された車体後部も圧潰して衝突による衝撃エネルギを吸収することが可能であると考える．また車室に直接衝撃力が伝わらないようにその接続を工夫すれば，衝突時の影響をなるべく抑え搭乗者の空間を事故時にも確保できると考えられる．

残念ながら時間的および経済的制限で，提案する車体構造のモデルの数値シミュレーションや実験的検討をすることができなかったが，今後の課題としたい．いずれにしても衝撃圧潰現象を対象とする有力な最適設計手法が確立できたので，提案モデルの有効性の検討もかなり困難性が取り除かれたと判断でき，近いうちに必ずや実証したいと考えている．