

論文の要旨

題目 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ための
断面形状と設計プロセスに関する研究

(A Study on Cross-Sectional Shape and Design Process for Improving Mass Efficiency of High-Strength,
Thin Plate Hollow Frame Bending Strength)

氏名 本田 正徳

本研究では、主要な温室効果ガスである CO₂ 排出量低減のための自動車の燃費向上に有効な、自動車車体の軽量化を実現する新しいフレーム構造の合理化の技術について検討した。具体的には、本研究の目的は、車体構造の特徴である超薄板の高張力鋼板で形成された中空フレーム構造を対象として、軽量化における最大の阻害要因である衝突安全性において重要なフレーム曲げ強度の質量効率を高めることである。この目的を達成するため、薄板座屈に関する工学的な基礎検討を行って基本方針を明らかにした上で（第2章）、機械学習による構造最適化技術も活用し、曲げ強度の質量効率を徹底的に高める。更に、単一の最適形状を得るだけでなく、汎用的に活用できる設計指針を導くため、構造最適化解析で得られる断面形状の設計因子とフレーム機能に関するビッグデータを、統計分析でデータマイニングする（第3章）。更に、設計画像（断面形状）とフレーム機能（曲げ強度質量効率）の関係を直接モデリングして、断面形状における重要部位を特定する新たな解析手法についても提案する。最後に、これらの机上検討で得られた知見から創発するフレーム構造を試作し、その効果を実証する（第4章）。このように、力学と統計学の両面でアプローチすることが本研究の特徴である。以下、各章の具体的な内容について述べる。

第2章の「工学的な観点に基づく断面形状の検討」では、ボディフレームを構成する断面縦板の面内曲げ座屈を対象とし、板そのものの形状に加え、それと隣接する断面上板や R 部（以下、周辺構造）の形状が座屈特性に与える影響を明らかにする。そして、薄板座屈を制御して鋼板の高性能な強度特性を効率良く活用するための設計の指針と最適形状を導出する。具体的には、まず、木村らの先行研究における薄板の座屈後耐力の理論式を用いた検討から基本的な制御指針を得た上で、有限要素法（FEM）によるパラメータスタディから周辺構造の影響を解析的に明らかにした。次に、薄板の周辺構造に依存せずに薄板の支持力を向上させる新たな手法について検討し、最終的には最適形状を導き出した。これらの結果、曲げ強度質量効率の低下要因である断面縦板の面内曲げ座屈強度を向上させるには、薄板の支持条件を制御し、理論式における座屈係数を増大させることが有効との知見を得た。また、その支持条件を制御するためには、上板の幅を適値にした上で、コーナー R はできるだけ小さく、また、縦板と上板の角度を鋭角にすることで、支持条件が改善され、縦板の面内曲げ座屈強度が向上することを明らかにした。更に、縦板そのものの形状にも着目し、その平面部に線状の拘束機能を付与することで、縦板の面内曲げ座屈強度を大きく向上できることと、その機能を板の角度変化（稜線）で具現化できること示した。また、板の角度変化の位置は、縦板の高さの 75% の位置が最適であり、30° 以上の角度変化を付与することが座屈強度向上の要件であることを明らかにした。これらの知見に基づいて最適な板形状を導出し、周辺を理想的に支持した薄板の座屈強度の理論値と同等の性能を発揮することを確認した。

第3章の「数学を活用した最適断面形状の検討」では、数値最適化アルゴリズムによる断面形状最適化を用い、曲げ強度の質量効率を高めることに取り組んだ。更に、単一の最適形状を得るだけでなく、汎用的に活用できる設計指針を導くため、形状最適化解析で得られる設計因子とフレーム機能に関するビッグデータを統計分析でデータマイニングした。具体的には、(i) 第2章におけるフレーム強度に関する基礎的な研究の知見を考慮した、フレーム断面形状の

最適化を実施した。次に、(ii) 最適化の過程で得られた設計形状と目的関数である曲げ強度質量効率のデータ群を、平滑化スプライン分散分析 (SS-ANOVA)、主成分分析 (PCR)、自己組織化マップ (SOM) の手法で分析し、目的関数を高めるための重要な設計変数を特定した。また、断面形状と目的関数との関係を明らかにするために、階層的なクラスタリングを採用した。(iii) (i)で得られた最適形状と、(ii)で分析した重要因子や相関関係を工学的に解釈し、汎用的な設計指針を抽出することに取り組んだ。その結果、第2書の知見に基づいて設計した、既に高い質量効率を発揮できる初期形状から更に3割程度質量効率が高い最適形状群が得られた。また、最適化の過程で、質量効率が低いものから高いものまで広く分布した640のCAEビッグデータを獲得し、先述の統計分析を施すことで、(i) 断面フレームの高さを高くして塑性断面係数を向上させること、(ii) 断面の垂直壁を傾斜させることが、質量効率を高める指針であることを明らかにした。第一の指針は、従来の構造力学に基づく設計指針と一致しているが、2番目の指針はそれに反するものであった。そこで、最適な断面形状における詳細な変形挙動をFEMから分析することで、傾斜した壁は、その変形過程で垂直になることが明らかになった。これにより、従来の形状よりも反力を大きくする効果があると分かった。

第4章「設計画像データを用いて特徴量を抽出する手法の検討」では、CAEビッグデータを更に活用し、設計者が予め想定できない未知の設計因子を抽出することを狙い、フレームの設計画像データ(断面形状)、フレーム機能量(曲げ強度の質量効率)の関係を、機械学習の一種であり、多量にある説明変数の中から、本質的に重要な変数だけを取捨選択するモデル推定法である「スパースモデリング」で定式化することで、機能向上に重要な画像上の特徴量を抽出できる手法を提案した。具体的には、スパースモデリング手法を用いて、説明変数 x をフレームの断面形状の画像における全ての画素値を一行に並べたもの、目的変数 y をFEMから求めたフレーム曲げ強度の質量効率とする。回帰した後のスパースモデルにおいて係数の値が大きい画素は目的変数に対する正の寄与が高い、係数が負で小さいものは負の寄与が高い、係数がゼロのものは寄与がないと解釈できる。この計算結果を設計者が理解しやすく可視化する方法として、係数がゼロの画素はブラック、正の画素はマゼンタ、負の画素はシアンに色付けた上で、二次元の画像として復元する。これによって、フレーム曲げ強度質量効率に対して、断面形状における重要な部位(特徴量)を直観的に理解できるように可視化でき、正の寄与(マゼンタ)の領域に材料を多く配置し、負の寄与(シアン)の領域には配置しないという設計の方向性を獲得できる。また、学習データとして使用した各断面形状と、上述の二次元画像が重なる部位だけを可視化すると、各断面形状のどの部位に配置した材料が性能に寄与したのかを考察でき、メカニズム解明を支援できる、という手法である。この提案手法を、第3章で得られた640のデータセットに適用して可視化したフレーム断面の形状における重要部位と、そこから解釈した断面形状に関する設計の指針は、第2章の薄板座屈の基礎検討や形状最適化などで得られた知見とも合致し、更に新たな知見も得ることができた。本手法は、設計初期の形状だけでなく、CAEで取得できる、過渡的に変化する断面形状(断面変形)のデータも用いたモデリング手法や、板厚や材料特性等の形状以外の設計情報も考慮できるモデリング手法へと発展できる可能性がある。

第5章の「実験による効果検証」では、上述の力学的・統計学的両面での検討から得られた、車体フレーム曲げ強度の質量効率を高めるための断面設計の指針に基づき、実際に新しいBピラー断面形状を設計した上で、CAE・実験の両面から、3点曲げ/軸曲げという2種類の境界条件のもとで効果を実証した。具体的には、側面衝突時に曲げ荷重が入力する代表的な部材であるBピラーフレームの断面形状を題材にした。従来のBピラーの断面形状は、断面上面や側面が平面である台形形状をしている。また、断面は鋼板をプレス成型した2部品で構成されており、これらをフランジと呼ばれる平面部にてスポット溶接することで、中空構造を形成している。一方で、前章までの検討から得られた設計指針に基づいて設計した新形状は、断面上面をM型の形状として稜線を設けることで、上面の板幅を縮小して面内圧縮座屈に伴う縦面上端部の拘束力低下を抑制する。また、縦面高さの約3/4の位置に稜線を配置し、3点曲げ荷重

による弾性域での断面変形を考慮して、最大曲げ荷重が発生するタイミングに、稜線から上の縦面が荷重に垂直に配置され、なおかつ、稜線の角度が 30° 以上になるように形状設計した。この際、新旧断面形状の断面積を揃えることで、全ての試験体質量を同一とした。フレームを構成する鋼板の仕様は、圧縮荷重による座屈変形が発生するアウトパネル側は 980MPa および、 1180MPa 級高張力鋼板の 2 水準、引張荷重側であるインナーパネルは 590MPa とした。板厚はいずれも固定で、アウトパネルが 1.6 mm 、インナーパネルが 1.0 mm に設定した。評価するサンプル数は、各仕様で 5 体とした。これらの試作フレームを用いた実験検証の結果、3 点曲げ／軸曲げのいずれの境界条件においても、本研究の成果から設計した新しい断面形状は、従来の断面形状と同等の質量で約 1.5 倍の曲げ強度を確認することができた。

以上の検討に基づき、高張力鋼板で形成される薄肉中空フレームの曲げ強度質量効率を高めるための断面形状の設計指針と、大幅に質量効率を高めた新しい断面形状および、それを効率的に実現できる統計解析や機械学習を用いた断面形状最適化とビッグデータ解析プロセスを構築できた。以上。