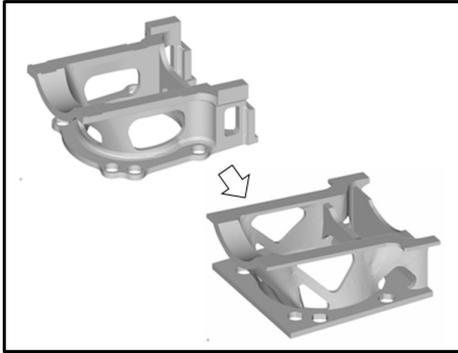


構造最適化技術を用いた設計開発プロセスの革新

Innovation of a Design and Development Process using Structure Optimization Technology



中馬 康晴*¹
Yasuharu Chuman

勝浦 啓*²
Hiroshi Katsuura

岡藤 孝史*³
Takashi Okafuji

近年のコンピュータの能力向上により、FEM 解析を多数回自動で繰り返し実行し、構造形状を最適化する技術が実用段階に来ている。これまで当社の様々な製品、荷重条件、製造条件に対応すべく、それぞれに適した構造最適化のノウハウを構築し、また、独自のツール開発も進めている。構造最適化技術を適用することで、設計初期段階で最適構造を決定することができ、後戻りがない設計開発プロセスを構築することができる。また、全く新しい構造コンセプトが立案されることも多く、また、大幅な重量低減も期待できる技術である。

1. はじめに

従来の製品の開発・設計作業は、図1左に示すように実績および経験則に基づく基本構造の立案に始まり、詳細設計、製作性・経済性の検討を繰り返し行うというプロセスである。また、FEM 解析による応力解析が実施されているが、FEM 解析は与えられた形状の解析を行うツールであり、新形状を直接導出するツールとはなり得ていなかった。

近年のコンピュータの能力向上により、FEM 解析を繰り返し計算できる時代になってきており、FEM を核とした構造最適化技術が実用段階に来ている。また、単に寸法や形状を変更して繰り返し計算するだけでなく、製造上の制限など複雑な制約条件も考慮した最適化も可能となっている。

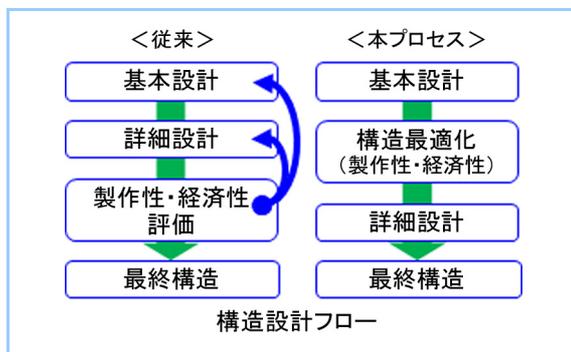


図1 構造最適化手法を用いた構造設計フロー

構造最適化技術を適用することで、図1右に示すように設計初期段階で最適構造を決定することができ、後戻りがない設計開発プロセスを構築することができる。また、全く新しい構造コンセプトが立案されることも多く、大幅な重量低減や性能向上に繋がることが期待される。

*1 技術統括本部総合研究所強度構造研究部 室長

*2 技術統括本部総合研究所強度構造研究部 主席研究員

*3 技術統括本部総合研究所強度構造研究部 技術士(機械部門)

これまで、当社の多種多様な製品群や荷重・環境条件、製造方法に対応するため解析ノウハウや新しい解析手法の構築に取り組んでいる。製品の各部品は構造的にはソリッド構造、シェル構造、ビーム構造の3つに大別され、それぞれに対応した構造最適化技術としてトポロジー最適化、トポグラフィ最適化、寸法最適化があり、それぞれの適用方法を検討し、実製品の設計に展開を図っている。

しかしながら、構造最適化のための市販ツールだけでは対応が難しいケースも多い。例えば、プラント鉄骨のような非常に多くの部材を対象とする場合や、複数位置かつ複合荷重条件での疲労強度を目的関数とする場合など課題は多い。本報では、基本的な構造最適化技術の適用事例を示すとともに、構造最適化技術の適用範囲を広げるために独自開発した手法の概要および適用事例を紹介する。

2. 構造最適化とは

構造最適化はFEM解析を利用し、FEMメッシュモデルを自動で変化させ、目標を達成するための構造に近づけるための技術である。全ての構造について一つの手法で解決できるわけではなく、構造の特徴に応じて最適化手法が開発されている。構造を大別すると、鋳物、機械加工品などの厚肉構造(ソリッド構造)、板金プレス加工品などの薄板構造(シェル構造)、鉄骨などの梁構造(ビーム構造)に分けられる。構造最適化はそれぞれの構造に対して次の手法が開発されており、市販ツールでも解析が可能となっている。

(1) トポロジー最適化

トポロジー最適化は、初期設計領域内のFEM要素の要・不要を判定し、最適構造を導く手法である。位相最適化とも呼ばれている。他の最適化手法に比べて、自由度が大きく、従来製品とは全く異なる新しい形状を導出することも可能なため、大幅な改善が期待できる手法である。

方法は各要素の剛性への寄与度を算出し、寄与度が低い要素を構造上不要な要素(肉抜き箇所)として選別する。計算上は、要素のヤング率・密度(重量)を下げることで仮想的に存在しない要素として取り扱う。

なお、単純にトポロジー最適化を実施していくと、中空構造になったり現実的に製作不可能な形状が算出されることがあるが、最近では、肉貫きの方向性や最小肉厚などを細かく制約条件として設定できるようになり、鋳造性や加工性を考慮した最適化計算が可能となっている。これらの制約条件の設定等にはノウハウが必要であり、これまで各種製品に適用しその構築を行ってきた。

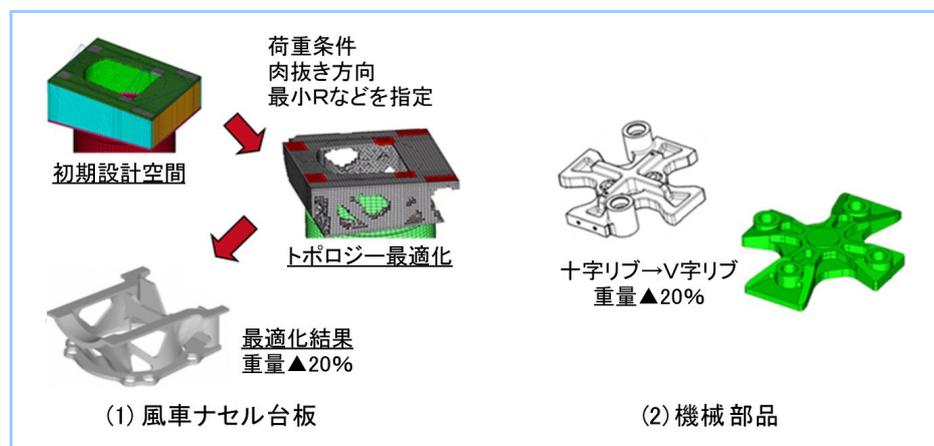


図2 トポロジー最適化の例

図2にトポロジー最適化の例を示す。(1)図は風車ナセル台板に適用した例であり、図に示すような初期設計空間を設定し、そこから各種荷重条件と鋳造性を考慮した肉抜き方向や最小R、最小肉厚を制約条件として設定し、重量最小化を目的関数として最適化を行ったものであ

る。また、各種風荷重に対してその発生頻度を考慮して、最適構造を合成して最終構造を決定した。最適構造は従来構造に比べて最大応力は小さく、かつ、20%の重量減を達成している。(2)図はある機械部品の最適化例であり、従来は十字リブ構造であったものが、最適構造としてV字リブ構造が導かれ、20%重量減を達成している。

(2) トポグラフィ最適化

薄板材の剛性を高めるために、ビード、エンボスなどの凹凸形状をプレス加工などで与える構造がある。この板材の凹凸形状を最適化する手法がトポグラフィ最適化である。

トポグラフィ最適化は、剛性、変位、固有振動数などが目的関数となり、また、プレス加工における限界凹凸深さやR形状を制約条件としたり、また、機能上の凹凸形状のパターンとして、直線性、対称性、周期性などを指定することも可能である。

図3にトポグラフィ最適化の例を示す。外装板金部品に適用した例であり、従来よりも剛性、振動特性が優れる上に、板厚を20%以上薄くできる結果が得られている。

(3) ビーム構造最適化

ビーム(梁)構造としては、プラントの支持鉄骨構造、橋梁などがある。重量がコストに直結する構造であり、重量低減が求められる構造であるが、一方で耐震規格などの厳密な制限が課せられる構造である。

梁構造という部材レベルでは最も自由度が少ないが、プラント全体の鉄骨部材数は数千点に及び、多数のパラメータを扱う設計問題であり、また、規格材から選定しなければならないという制約条件もある。このような問題に対し、当社は鉄骨断面最小化手法 M-FRAME (Mitsubishi-Frame weight Reduction Algorithm for Multiple Elements)を開発している⁽¹⁾。耐震設計規格を満足し、規格材や非規格材、接続部の製作性を考慮して、全体重量の最小化を達成できる各部材の寸法を算出することが可能である。

図4にプラント鉄骨構造の最適化適用モデルを示す。

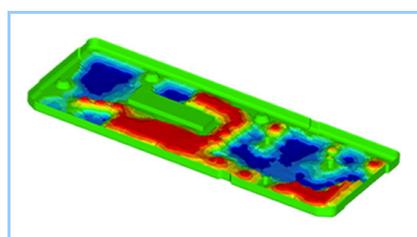


図3 トポグラフィ最適化の例
外装板金部品。
赤色が凸、青色が凹形状を示す。

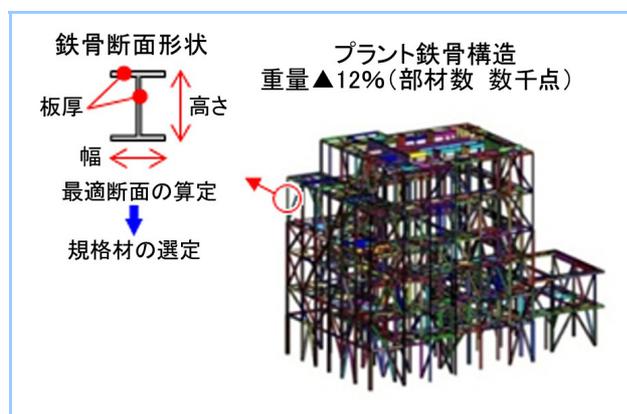


図4 鉄骨構造最適化の例

3. 多数箇所の疲労損傷最小化

複数領域・複合荷重の応力集中部について、疲労寿命を最大化(≒応力集中を最小化)するR形状を検討する場合、現状は人間系の検討(人の手による設計と強度評価の繰返し)であり、重量増、検討期間大の原因となっている。そこで、複数領域(20箇所以上)、複合荷重条件(10条件以上)の応力集中部の設計効率化のため、メッシュモーフィングを利用した最適化手法を開発した。

(1) メッシュモーフィングを使った最適化

FEMモデルの表面節点を移動させ、形状を変化させるメッシュモーフィング手法は、トポロジー最適化手法と比べ、応力集中部のピーク応力を比較的正確に計算できるため、局所形状の最適化に利用するのに適していると考えられる。単一形状、単一荷重に対するメッシュモーフィングを使った最適化問題は市販の最適化ソフトにて比較的容易に解くことができるが、実際の

設計で必要となる複数領域、複合荷重条件での疲労強度最適化問題を解くための機能を外部ルーチンとして開発した。

局所形状の表現方法として、単一の曲率半径を持つR形状ではなく、**図5**に示すような自由曲線となるR形状を検討した。メッシュモーフィングしても常に滑らかなR形状となるような形状関数を複数組み合わせることで表現した。また、開口は、窓枠及びフレームに干渉しないよう、内外に変形制約を有する。

複合領域の共通形状での最適化例を**図6**に示す。最も応力が大きい1コーナーのみ着目して最適化した場合**(②)**、他のコーナーで応力が増加するため、全コーナーを共通形状で同時に最適化する計算**(③)**が有効である。

また、疲労荷重の発生頻度を考慮した疲労強度最適化の機能も組み込んでいる。

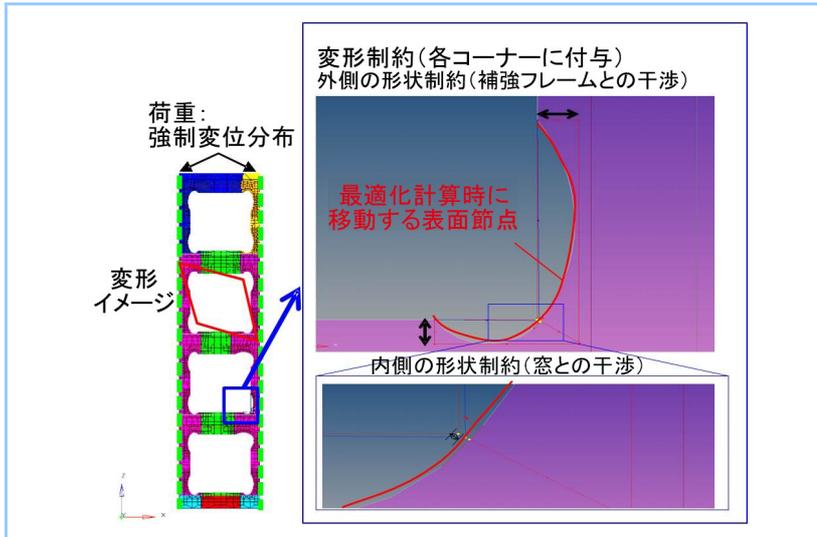


図5 メッシュモーフィングによる複数コーナーR部の最適化検討モデル

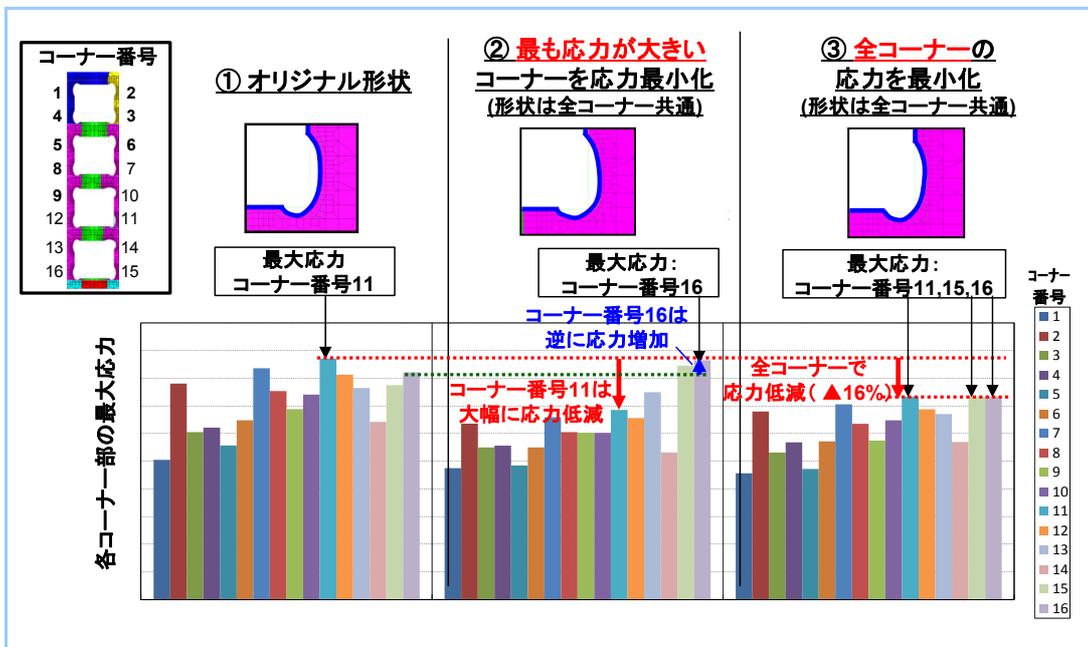


図6 メッシュモーフィングによる複数コーナーR部の最適化検討結果

(2) 客船開口部への適用例

客船を対象に、複数開口部のR形状の最適化計算を行った。**図7**に解析モデルを示す。コーナーは56箇所であり、各コーナーの形状制約は**図5**と同一である。

解析結果を**図8**に示す。最大応力は10%低減した。これは、疲労寿命の観点からも30%以上の向上となる。

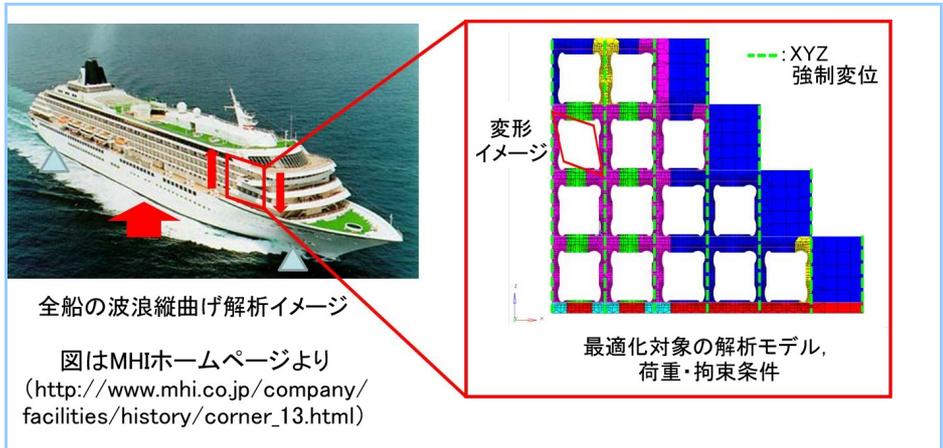


図7 客船の窓枠形状の最適化

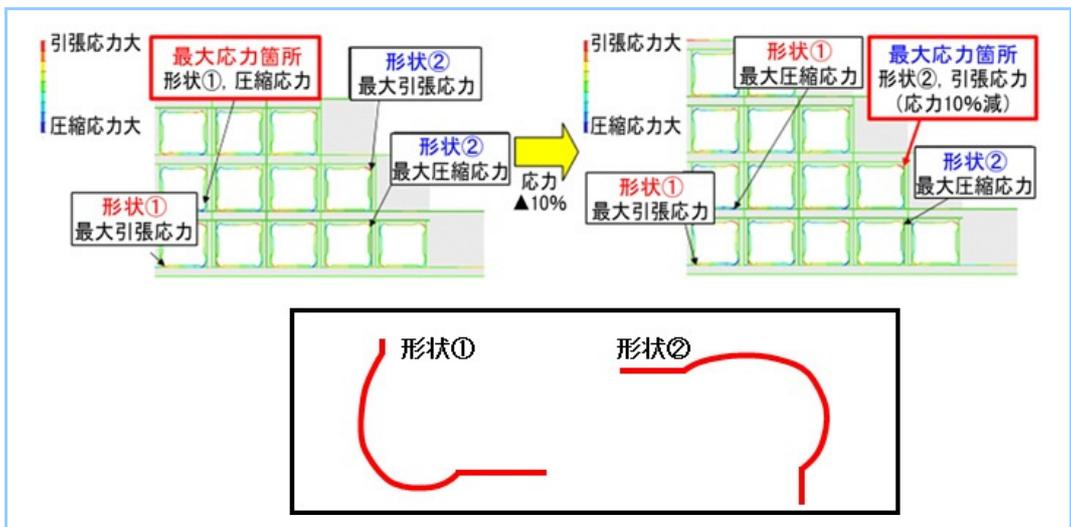


図8 メッシュモーフィングによる複数コーナーR部の最適化検討モデル

4. まとめ

製品の信頼性向上や経済性向上は、その製品が新製品として開発されてから、製品の熟成と経験を積むことで長い年月をかけて、徐々に改善されるのが当たり前であった。構造最適化技術はこのような製品の熟成プロセスを一変させる可能性を持っており、開発初期段階から最適な構造を選択し、信頼性および経済性により優れた製品を提供できることが期待できる。本報で示した事例からも最適化技術を適用することで、従来構造に比べて20%程度の重量低減が得られている。

しかしながら、構造最適化は誰でも容易に計算できるものではなく、目的関数や制約条件の設定の仕方によって、最適と算出される結果は大きく変わってしまい、多くのノウハウが必要とされる。多くの製品群を抱える当社は、様々な構造および設計基準、極限環境・荷重条件、製造・加工条件に対応する必要があるが、最適化技術およびノウハウを共有化し、各製品毎に最適化手法をカスタマイズした設計システムを構築していく必要がある。

より早く、安く、信頼性の高い製品をお客様に提供するために、更なる構造最適化技術の開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- (1) 加藤ほか, 耐震性と経済性を両立するプラント支持鉄骨の合理化, 三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015) P9~14
- (2) 飯塚ほか, 汎用動的解析プログラムを用いた薄肉構造衝突部材のトポロジー最適設計, 自動車技術会学術講演会前刷集, 103-11, P11-14