

製品の開発期間短縮と性能向上のための最適化解析技術

■ 赤松 新

Arata Akamatsu

最適化解析技術は、製品に要求される強度や剛性、絶縁性能など、複数の設計条件を満たす最適な構造を自動的に導き出す技術である。これを設計検討の段階で取り入れることで、最適な設計案を得るまでの試行錯誤を大幅に削減できるようになり、設計期間の短縮が可能となる。

東光高岳では製品の開発期間の短縮を目指し、最適化解析を設計業務に適用する取り組みを行っている。本稿では最適化解析の概要を説明するとともに、実際の既存製品に対して最適化解析を適用した事例について紹介する。

1 はじめに

近年の電力機器は性能向上やコストダウンに加えて、省エネルギー化・環境負荷低減など多種多様なニーズに応える必要がある。そのため製品開発時の検討事項が増え、長期の開発期間を要することもある。新製品の市場投入が遅くなることで機会損失を招く可能性もあることから、製品開発期間の短縮は重要な取組み要素である。

製品開発では、性能の維持・向上と同時に、小型化・軽量化も求められる。これらはトレードオフの関係にあることが多く、バランスが取れた最適な設計を行うためには、設計変更と検証の繰り返しによる試行錯誤が必要となる。

近年では、試作前の段階で CAE を用いて設計案の検証を行うことで、手戻りの削減、製品開発期間の短縮が図れている。しかしながら、一般的には、機械的、熱的、電氣的などの各要素を個別に検証するため、複合的な設計条件を満たす最適な設計には多くの時間を要する。

東光高岳ではさらなる短縮を図ることを目指し、設計段階での試行錯誤の時間に着目した。その解決手段の一つとして、最適化解析という解析技術がある。これは強度や絶縁性能など、複数の設計条件を満たす最適な構造を、アルゴリズムに基づいて自動的に導き出すというものである。これを設計時の検討に取り入れることで、最適な設計案を得るまでの時間を大幅に削減でき、製品開発期間の短縮に繋がることが期待できる。

本稿ではまず最適化解析技術の概要を説明し、最適化解析による短縮効果の確認のため、開発済みの既存製品に対して適用してみた事例について紹介する。

2 最適化解析の概要

2.1 最適化解析とは

最適化解析とは、強度や剛性、絶縁性能などを満たす最適な構造を求める解析技術である。数理計画法や遺伝的アルゴリズムといった最適化アルゴリズムに基づい

て、構造変更と解析の繰り返しを自動化することで、最適な構造を求めている。

2.2 最適化解析の各手法について

最適化解析はトポロジー最適化、形状最適化、寸法最適化の三つに大別される。手法ごとに設計変更の自由度が異なり、トポロジー最適化、形状最適化、寸法最適化の順に自由度が高い。

それぞれの最適化手法と、設計において適用される段階を対応させた概念図を図 1 に示す。片持ち梁に対し各手法を適用した場合の設計変更のイメージを示している。設計変更の自由度が高い手法ほど設計の初期段階での活用に向いている。対象の製品や設計の段階に応じた最適化解析を選択することで、より適切な最適構造が得られる。

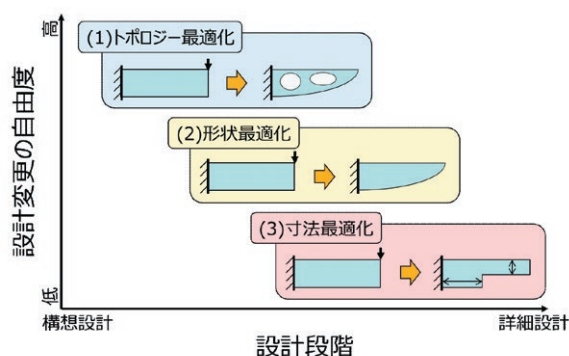


図 1 最適化解析の種類

(1) トポロジー最適化

トポロジー最適化は、指定した設計領域内を構造として残す領域と削減する領域に分けることで最適な構造を求める手法である。均質化法やレベルセット法といった方法があるが、代表的なものに密度法がある。これは FEM^{注1)} 解析における要素（または節点）ごとに、材料の充填度合いを示す密度を設定する手法である。密度が変化することで要素が持つ物性値と質量が変化するため、構造上意味のある要素ほど密度が大きくなる。図 2

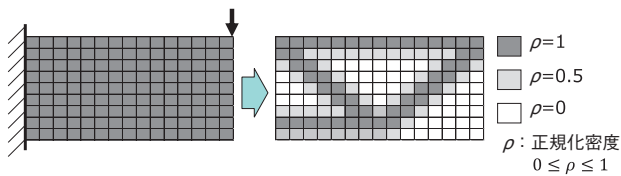


図2 密度法によるトポロジー最適化のイメージ

に密度法によるトポロジー最適化のイメージを示す。ここでの密度は正規化し、0 から 1 の範囲となるようにしている。密度が小さい要素は図中荷重に対する剛性への影響が小さいことを表している。当該要素を削減することで、剛性の維持と軽量化を両立する最適な構造が得られる。

トポロジー最適化は構造物に孔が開くような変化が可能となるなど、ほかの手法に比べて設計変更の自由度が最も大きい。そのため、構造の強度や剛性を大幅に向上できる。そのため設計全体の方針を決める構想設計での活用が効果的である。

(2) 形状最適化の概要

形状最適化は、構造の表面形状を設計変数とする手法である。具体的にはFEM解析における節点座標を設計変数とする場合や、表面形状を表現する関数内の係数を設計変数とする場合などがある。トポロジー最適化で得られる最適構造は凹凸が多くなりやすいが、形状最適化では連続した表面形状を扱うため凹凸が少なく、より実現しやすい構造が得られる。

(3) 寸法最適化

寸法最適化は、構造の寸法を設計変数とする手法である。最適解は具体的な寸法として得られるため、得られた結果を設計に反映させやすく、詳細設計の段階での活用が最も効果的な手法である。

3 社内製品への適用例

3.1 GIS 压力容器への最適化解析適用例

(1) 適用例の概要

一つ目の事例として、ガス絶縁開閉装置（GIS）の压力容器の構造検討に最適化解析を適用した事例を紹介する。

対象となる压力容器の既存構造を図3に示す。既存構造の強度をさらに向上させるような補強配置を求めたいが、設計者による試行錯誤のみでは多くの工数を要する。最適化解析を活用することで工数を大幅に削減でき、なおかつ最も効果的な補強配置が得られると考えられる。

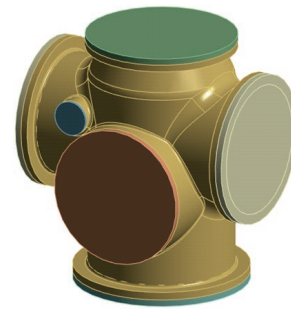


図3 GIS 压力容器の既存構造

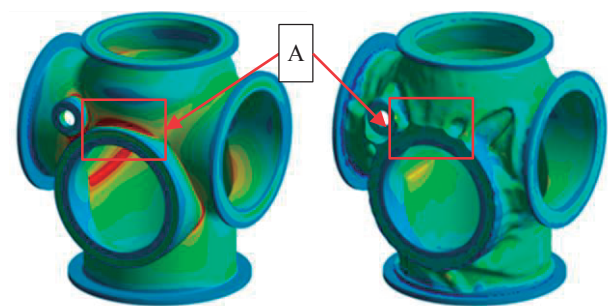
(2) トポロジー最適化の適用

本事例は設計工程の初期段階に相当し、大まかな設計方針を求めたいというケースである。また鋳造品のため形状にある程度自由が利くことから、トポロジー最適化解析を適用した。

(3) 最適化解析の実施

本事例では質量の増加を許容値以内に抑えつつ、強度が最も高くなるような条件でトポロジー最適化を行った。

既存構造と最適化解析によって得られた構造（以下、最適化構造とよぶ）の強度を比較するため、それぞれの構造解析結果を図4に示す。発生する応力の大きさを色で示しており、赤色に近いほど大きな応力が発生している。この結果より、既存構造と比べて最適化構造は発生応力が全体的に小さくなっていることがわかる。また質量は指定した値以下に抑えられており、必要最小限の補強で強度が向上していると言える。



(a) 既存構造

(b) 最適化構造

図4 構造解析結果

既存構造と最適化構造を比較することで、強度向上に必要な補強箇所と寸法を大まかに判断できる。例えば最適化構造ではタンク前面（図4のA）を覆うような構造が生じており、補強が必要な箇所であると判断できる。また寸法を測定することで必要な補強のサイズがおおよそ判断できる。このように結果を活用することで、設計変更のアイデアを得ることができる。

本事例において最適化結果を設計アイデアとして利用

する場合の工数削減効果を概算で見積もったところ、試行錯誤に要していた工数の約 70% が削減できる見込みとなった。これにより、最適化解析が設計期間短縮に十分効果的であるとわかる。

3.2 絶縁スペーサへの最適化解析適用例

(1) 適用例の概要

次の事例として、開閉装置に使用されている樹脂製の絶縁スペーサへ最適化解析を適用した事例について紹介する。

対象の絶縁スペーサの既存構造を図 5 に示す。絶縁性能を向上させたいが、材料使用量をできる限り抑制し、なおかつ型の抜き勾配を製造可能な値とする必要がある。これらを同時に満たす最適な構造を求めるためには多くの工数が必要となる。最適化解析を適用することで、より少ない工数でこれらの条件を満たす最適な構造が求まると考えられる。

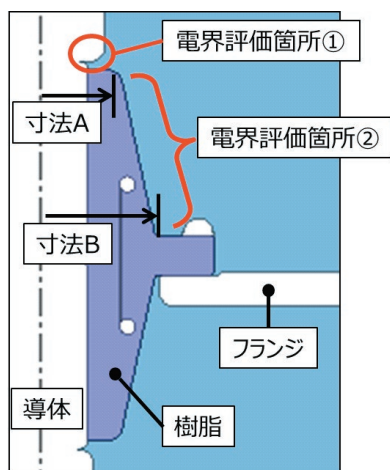


図 5 絶縁スペーサの既存構造

(2) 寸法最適化の適用

本事例は設計工程の詳細設計段階に相当し、具体的な寸法を求めたいというケースのため、寸法最適化を適用した。なかでも今回は応答曲面法を用いた寸法最適化を適用した。これは入力と出力の応答関係を近似的に求めてから最適解を探索するものである。直感的にわかりづらい応答関係を視覚的に捉えることが可能となるため、最適な構造を求めること以外に設計者への教育などの目的での活用も期待できる手法である。

(3) 最適化解析の実施

本事例では複数の寸法を変化させた。そのうち特長的な寸法 A と B を図 5 に示している。今回は指定箇所での発生電界（図 5 内の①、②参照）を指定値以下に抑制し、なおかつスペーサの体積増加を最小限とする条件で最適化を実施した。またその他の条件として、型の抜

き勾配が製造可能な値となるように指定した。

上記条件で寸法最適化を行う。実施手順は、実験計画法^{注2)}により寸法値を振り分けて解析を実施し、その結果から応答曲面を作成し、最適化を実施するという流れとなる。

まず実験計画法にしたがって解析を実行し、応答曲面を作成した。得られた応答曲面のうち、寸法 A、B と①、②部の電界値の応答関係を示したものを図 6 に示す。色が赤に近いほど電界が大きいことを示している。(a) では寸法 A の増加とともに①部の電界が大きくなる傾向であるのに対し、(b) では②部の電界が小さくなる傾向であり、電界値同士がトレードオフの関係となっていることが確認できる。

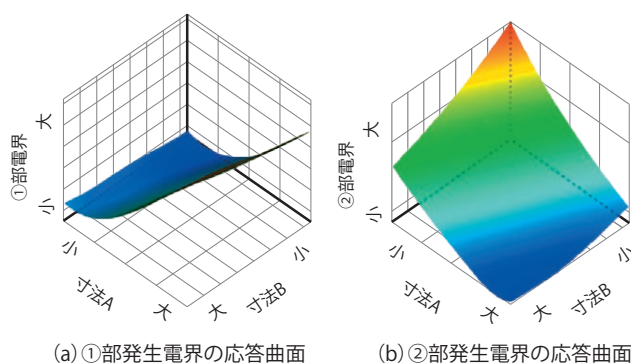


図 6 応答曲面図

続いて、作成した応答曲面から、最適化アルゴリズムに基づいて最適解を探索した。結果、条件を満たす最適な寸法が得られた。

既存構造と最適化構造の絶縁性能を比較するため、それぞれの電界解析結果を図 7 に示す。色が赤に近いほど強い電界が発生している。最適化解析を用いること

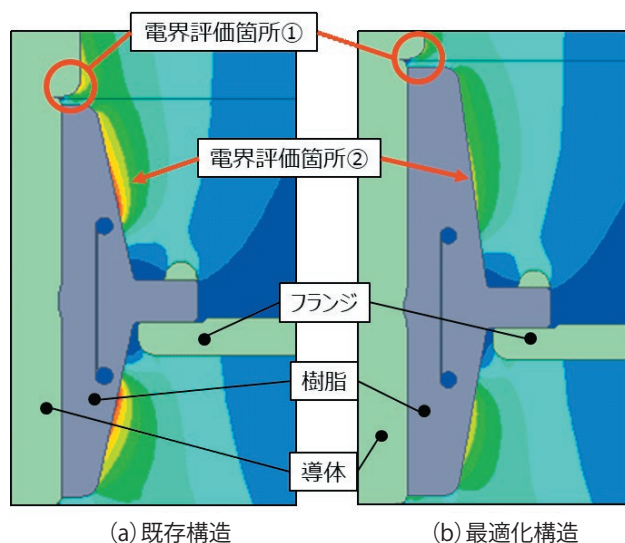


図 7 電界解析結果

で、指定した箇所における発生電界が抑制されており、絶縁性能が向上していることがわかる。また体積増加が最小限となるよう設定しており、絶縁性能の向上に最も効果的な構造と言える。

本事例において最適化解析を利用する場合の工数削減効果を概算で見積もったところ、試行錯誤に要していた工数の約50%が削減できる見込みとなった。これにより、設計期間短縮に十分効果的であるとわかる。

4 おわりに

今回は最適化解析技術を既存製品に適用した事例について紹介した。事例で示したとおり、最適化解析の導入によって設計期間を短縮できる。また従来の試行錯誤では求めることが困難であった最適な設計案が得られるため、よりいっそうの性能向上と小型化・軽量化が期待できる。

今後も、製品や設計工程に合わせた最適化解析の活用方法を提案、また適用可能な解析分野の拡充を検討する

ことで、本解析の活用機会を増やし、設計業務の効率化、製品開発期間の短縮につなげていきたい。

■参考文献

- (1) 西脇眞二，泉井一浩，菊池昇：「計算力学レクチャーコース トポロジー最適化」，丸善出版（2013）
- (2) 畔上秀幸：「形状最適化問題」，森北出版（2016）

■語句説明

- 注1) FEM：Finite Element Method（有限要素法）の略。構造物を有限個の要素に分割し、それらの要素に支配方程式をあてはめることで、全体の挙動を近似的に解析する手法。
- 注2) 実験計画法：最低限の実験回数で効果的に応答関係を把握できるよう、パラメータの組み合わせや実験の順序を決定する方法。

赤松 新

戦略技術研究所

技術開発センター 解析・試験技術グループ 所属