

ものづくり計算センター CAE 基礎 ＜構造最適化を活用した設計＞

キーワード：CAE、最適設計、構造最適化、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化

設計プロセスと構造最適化の役割

本報では、製品設計において効率よく設計指針を導くための構造最適化について紹介します。

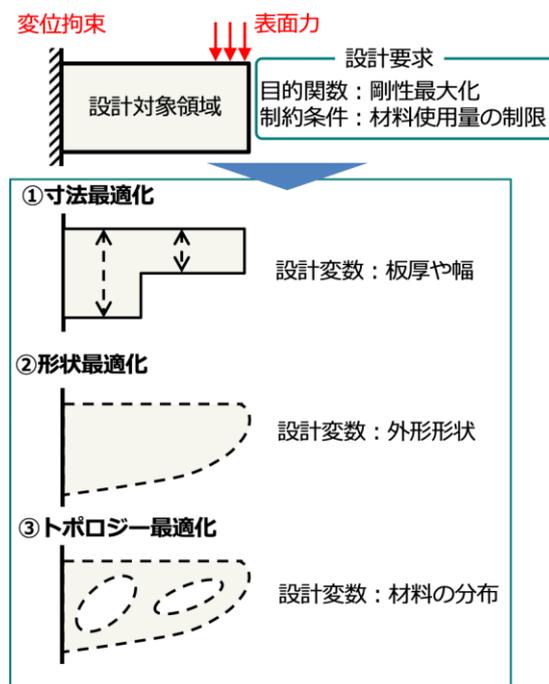
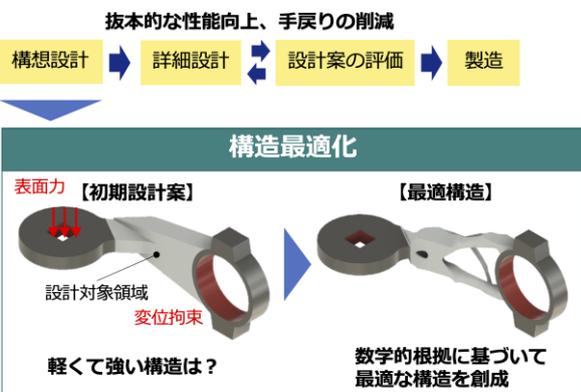
製品設計において、製品の形状や寸法を決定する工程は、性能やコスト、信頼性を左右する重要な段階です。一般的な機械部品や構造部材の設計プロセス(図 1)では、まず構想設計で過去の設計実績や設計者の経験に基づいて初期形状を定め、次に詳細設計で CAD などを用いて作図・モデリングを行います。その後、設計案の評価で解析(CAE)によって応力や変形を確認し、必要に応じて形状を修正します。例えば「応力が高い部分を肉厚にする」「変形が大きい部分にリブを追加する」といった修正を繰り返しながら、設計案を徐々に改善していくことになります。こうした形状修正は、設計者の知見を反映できる一方で、設計の自由度が高い場合や要求性能が多岐にわたる場合には、手戻りが増え、設計期間の長期化につながります。また、構想設計段階では安全側を見込んで過剰な肉付けが行われやすく、最終的に重量や材料使用量が必要以上に増加することも少なくありません。

構造最適化は、このような従来の試行錯誤的な設計プロセスを補完・高度化するための技術です。図 1 に示すように、構造最適化では、荷重条件や拘束条件といった設計条件を与えた上で、「剛性を最大化する」「質量を最小化する」といった目的を数式で定義し、その目的を最もよく満たす構造を数値解析により求めます。設計者が一つ一つ形状を

考案・修正するのではなく、計算機上で数値解析と、形状を表現する設計変数の更新を繰り返すことで、効率的に最適な構造を得ることができる点が特徴です。その結果、構想設計の段階から合理的な設計案を検討でき、後工程での大幅な設計変更を減らすことが期待できます。このように、構造最適化は従来の解析による評価・検証を置き換えるものではなく、構想設計段階で設計指針を効率よく導くための技術として位置づけることができます。

構造最適化の考え方と分類

構造最適化では、与えられた制約条件の下で、目的関数が最大(もしくは最小)となる構造を求めます。目的関数は、質量の最小化、剛性の最大化、変位の最小化、固有振動数の最大化などがあります。制約条件としては、応力や変形が許容値を超えないこと、使用可能な材料量を制限することなどが設定されます。これらを数式で定義することで、設計要求を最適化結果に反映させることが可能となります。また構造最適化は設計変数の取り扱い



方の違いにより、主に「寸法最適化」「形状最適化」「トポロジー最適化」の三つに分類されます。図2に示す片持ちはりの剛性最大化を例として、それぞれの違いについて説明します。

①寸法最適化: 部材の板厚や断面寸法など、あらかじめ定めた形状パラメータを設計変数として最適化を行う手法です。既存の形状を前提とした設計に適しており、比較的計算負荷が小さいことから、設計の初期検討から詳細設計まで幅広く利用されています。

②形状最適化: 構造物の外形や境界形状を表す関数を設計変数として最適化を行う手法です。応力集中の緩和や翼形状の最適化などに用いられ、寸法最適化に比べて高い設計自由度を持ちます。

③トポロジー最適化: 設計対象領域内における材料の有無そのものを設計変数として扱い、材料分布を最適化する手法です。外形形状の変化に加えて構造物内部に境界が生成されるような、形態の変化も許容するため、設計自由度が最も高い手法といえます。

図3に、片持ちはりを例に最適化を行った結果を示します。長さ250 mm、幅50 mmの矩形形状から50%の軽量化を制約条件として、剛性が最大となる構造を形状最適化およびトポロジー最適化により求めました。また最適化によって得られた構造を解析により評価しました。解析結果を比較すると、トポロジー最適化によって得られた構造は、同じ軽量化率であるにもかかわらず、はりの幅を50%にした構造、および形状最適化によって得られた構造よりも変形量(最大変位)が小さく、高い剛性を示すことが確認できます。この結果から、トポロジー最適化は、構想設計段階において高性能な構造の指針を得る手法として有効であることが分かります。一方で、得られた形状はそのままでは製造が困難な場合もあるため、実際の設計では、トポロジー最適化

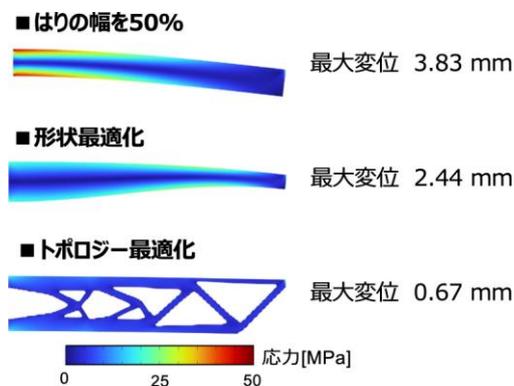


図3 構造解析による評価結果

の結果を基に形状最適化や寸法最適化を組み合わせることで検討することが重要です。

さまざまな設計問題への適用

構造最適化は対象とする物理問題の境界条件と、目的関数および制約条件が明確に定義できれば、構造分野以外にも適用することができます。近年では、熱、流体、電磁気などのさまざまな物理問題、さらには熱・構造や熱・流体などのマルチフィジックス問題への適用が進んでいます。例えば、熱伝導問題においては、熱の拡散や放熱性能を目的関数として定義し、最適化することで効率的に熱を伝える構造を導き出すことが可能です。図4は、ヒートシンクの最適構造をトポロジー最適化によって求め、その結果を基に金属積層造形による試作を行ったものです。このような最適化結果は、数学的根拠に基づいて合理的に導かれた解であり、従来の設計手法では着想しにくい形状を示すことに特徴があります。構造分野同様、熱や流体などの物理問題においても、構造最適化は設計指針を得る手段として有効です。

近年、構造最適化は主要なCAEソフトウェアに搭載されつつあり、機械産業を中心に活用が進んでいます。さらに、積層造形技術の発展により、最適化によって得られた複雑な形状を実際に製作することも可能となってきました。また切削や成型など、加工法の製造性を考慮可能なトポロジー最適化法も開発されています。



図4 金属積層造形によって作製されたヒートシンクの最適構造

おわりに

ものづくり計算センターでは、構造、熱、流体解析をはじめ、最適設計に至るまで幅広いCAE技術を活用し、お客様の技術課題の解決を支援いたします。ご興味ある方はぜひご相談ください。

※ テクニカルシートの内容の一部または全部を転載する場合には、前もって大阪技術研に連絡の上、了解を得てください。

発行日 2026年3月1日

作成者 ものづくり計算センター (加工成形研究部 特殊加工研究室 三木 隆生、精密・成形加工研究室 四宮 徳章
電子・機械システム研究部 知能機械研究室 宮島 健)