

構造最適化を活用した創造的設計技術に関する研究（第1報）

坂東直行*、久富茂樹*、曾賀野健一*

Research on creative design techniques utilizing structural optimization (I)

BANDO Naoyuki*, KUDOMI Shigeki* and SOGANO Kenichi*

本報告では、トポロジー最適化によりコンプライアントメカニズムを導出することを通じて、構造物の形態設計を自動で行う方法を示した。その中で、トポロジー最適化技術を活用することで、構造物の具体的な形を数値解析によって導くことができること、最適化計算における目的関数は複数設定できるので構造を剛にする目的関数と、柔にする目的関数の間で互いにバランスをとるように重み係数を設定することで、コンプライアントメカニズムを導出できること、導出されたコンプライアントメカニズムの形状および特性は、トポロジー最適化における目的関数によって変化することを示した。

1 はじめに

近年、装置や製品の開発においては、高機能化、軽量化、低コスト化など複数の条件を高度なレベルで満たすことが求められている。

多くの場合、設計は設計者の経験と勘に基づいて行われるが、条件の数が増えるにつれて各条件が複雑に絡み合い、それらを満たすように設計するには多くの時間と手間を要する。

このような課題の解決を支援する技術に構造最適化技術がある。構造最適化とは、あらかじめ決められた設計・境界条件から所望の性能を最大限得られる構造・形状を求める方法論である¹⁾。構造最適化は、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の3つに大別できるが、このうちトポロジー最適化は構造物の形態を変更することができ、他の構造最適化技術と比較して高い自由度を持つため、性能の大幅な改善が期待できる方法である。一方で、トポロジー最適化で得られる構造・形状は自由度が高く、機械加工や塑性加工では造形が困難な場合が多い。

そこで当センターではトポロジー最適化を3Dプリンターや鋳造のように、形状の自由度が高い造形方法の価値を高める設計手法として着目し、トポロジー最適化で得られた形状の造形方法について、製造の面から検討してきた²⁾。

本報では設計の面からトポロジー最適化技術の活用方法について検討した結果について報告する。

2 トポロジー最適化を活用した設計

トポロジー最適化技術を含む構造最適化技術は、有限要素解析技術に数理最適化技術を組み合わせて構築された技術である。そのため、数理最適化技術における制約

条件と目的関数をトポロジー最適化においても設定する。実際の設計において、与えられた複数の条件を同時に満たす設計解を得る場合、それらを定式化したのち、重み係数を乗じてひとつの目的関数とする。これにより、それらの条件を同時に満たす設計解をトポロジー最適化によって得ることができる。

複数の条件を同時に満たす必要のある設計対象に機構（メカニズム）がある。メカニズムの設計では、意図したとおりに動作する構造であることと、構造体として十分な剛性を持つことを同時に満たすよう進める必要がある。

一般に、メカニズムは部品を組み立てて実現するが、近年は新しいメカニズムとしてコンプライアントメカニズムが提案されている。コンプライアントメカニズムは、ジョイントとなる部分の部材に柔軟性を持たせることで、メカニズムとしての機能性を実現するもので³⁾、一体物として実現できるため、低コストで製造できる利点がある。

そこで本研究では、コンプライアントメカニズムの設計を対象に、トポロジー最適化の活用について検討を行った。

3 コンプライアントメカニズムの設計

3.1 解析課題

本研究で設定した解析課題を図1に示す。

解析空間は2次元で、解析対象は100mm×100mmの矩形において右側中央に切り欠きがある形状である。この形状において、左上隅、左下隅を固定し、左中央部に水平に外力を加えたとき、右側開口部が開く構造をトポロジー最適化によって導いた。

* 生産システム部

3.2 解析モデル

有限要素モデルを図2に示す。

本研究では、有限要素モデル作成に Femap v10.2.0 (SIEMENS 製) を用いた。

設計対象は、中心線を境に対称構造となるため、1/2モデルで有限要素モデルを作成した。有限要素は1mm四方の四角形で作成し、材料プロパティは等方性の弾性体とした。トポロジー最適化における非設計領域は、有限要素モデルの左上隅、左下隅、右側の切り欠き部の隅に設定し、その他の領域は設計領域とした。

3.3 解析ケース

この有限要素モデルにおいて、解析ケースは2つ設定した。

設定した解析ケースを図3に示す。

一つは、左上隅、左下隅を完全固定し、右側の切り欠き部の隅から開口部を広げる方向に外力を加えるもの（以降、解析ケース1）である。これは構造全体の剛性を評価することを目的に設定した。

もう一つは、右上隅を完全固定し、左下隅から水平に強制変位を加えるもの（以降、解析ケース2）である。これは、これから導出しようとするメカニズムが外部から操作を受けたときに設計意図どおりに動作する量と、動作のしやすさを評価することを目的に設定した。

3.4 制約関数・目的関数

トポロジー最適化における制約関数と目的関数は次のように設定した。

トポロジー最適化では解析領域から不要な部分を抜き取ることで形状を得る。そこで制約関数は解析領域全体の体積を対象にし、ここでは初期状態と比較し15%以下になるよう設定した。

目的関数は4つ設定した。

一つ目として、構造全体のコンプライアンスの最小化（以降、目的関数1）を設定した。コンプライアンスとは外力に対する変形のしやすさを表す指標であり、剛性が外力による変形のしにくさを表す指標であることから、コンプライアンスは剛性の逆数となる。よってコンプライアンスを最小化することは、剛性を最大化することであり、これを目的関数に設定することで、外力による変形が生じにくい構造を導くことができる。

二つ目として、変位の最大化（以降、目的関数2）を設定した。今回の解析課題は、対象形状の左中央から加えられた力によって、右側開口部が開く構造を導くことを目的としている。そのため、開口部に基準位置を設け、その位置の変位を評価し、それを最大化することを目的関数に設定することで、より大きく口を開く構造を導くことができる。

三つ目として、水平反力の最小化（以降、目的関数3）を設定した。課題領域の左中央部を既定の量だけ水平に動かしたときの水平方向の反力を評価し、それを最小化することを目的関数に設定することで、小さな操作

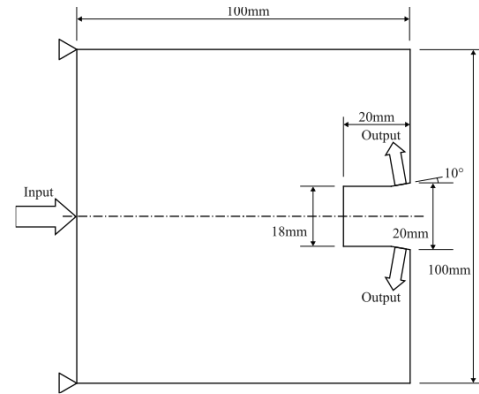


図1 解析課題

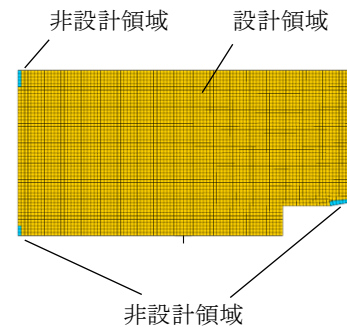


図2 有限要素モデル

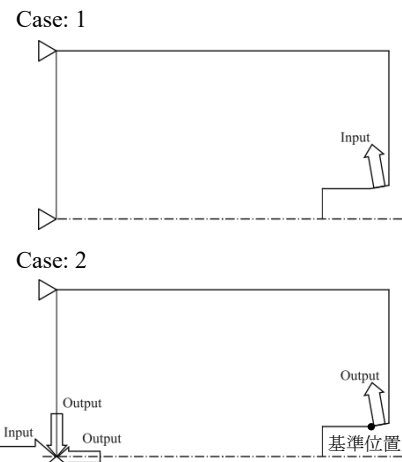


図3 解析ケース

力で動作させることができる構造を導くことができる。

四つ目として、垂直反力の最小化（以降、目的関数4）を設定した。目的関数3が水平方向の反力を評価するのにに対し、これは垂直方向の反力を評価する。

なお、目的関数1は、解析ケース1に対して設定した。他の目的関数は、解析ケース2に対して設定した。

また、目的関数1が構造全体を剛にするように働くのに対し、目的関数2、3、4は構造を柔にするように働く。両者は互いに背反するように作用するので、このバランスをとることで、目的とするコンプライアントメカニズムを導出した。

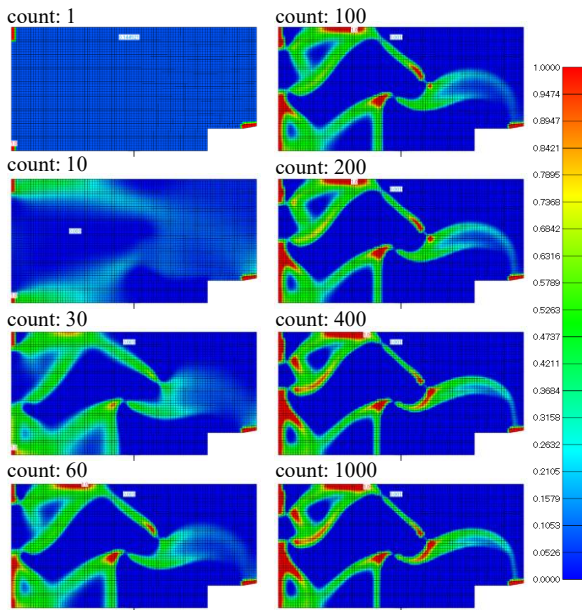


図4 計算の繰り返し回数による解析結果の推移

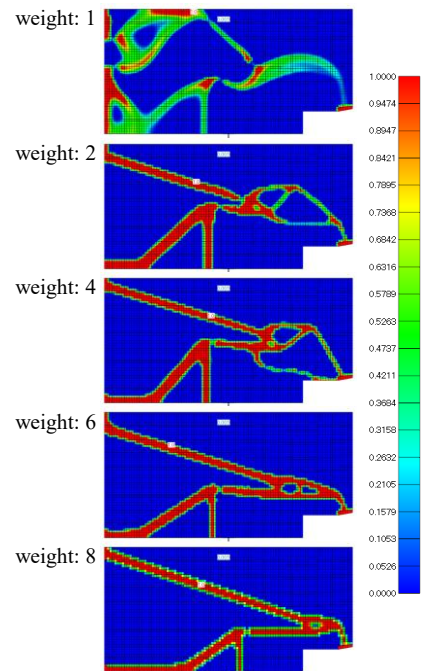


図5 重み係数を変化させた場合の解析結果

3.5 解析結果

本研究では、トポロジー最適化に OPTISHAPE-TS 2022.2 ((株)くいんと製) を用いた。

解析結果を図4に示す。図4には、数値計算の繰り返し回数が、1、10、30、60、100、200、400、1000回時点の結果を示している。ここから、計算が繰り返されるに従い、次第に構造が浮かび上がってくる様子が分かる。なお、今回の課題において、計算結果は400回でほぼ収束し、それ以降は計算を繰り返しても構造に変化は見られなかった。

図4において、赤色領域が材料密度の濃い部分、青色領域が材料密度の薄い部分を表している。赤色領域を残し、青色領域を除くことで、構造が得られる。

この解析モデルでは、前述したとおり、4つの目的関数を設定した。これらの重要度は、各目的関数に設定する重み係数によって決定される。この重み係数は試行錯誤によって決定した。図5には、最上図の構造を得た重み係数に対し、構造を剛にするように働く目的関数1の係数値を2、4、6、8倍に設定した場合を示している。ここから、重み係数を変化させると、導かれる構造が変化することが分かる。

また、各構造には節となる部分が見られる。この部分は他の部分より密度が低いいため構造的に弱く、変形しやすい。各構造に対し NX Nastran V7.1 (SIEMENS 製) を用いて静弾性解析を行った結果を図6に示す。ここでは解析ケース2において、右側に2mm変位させた場合と、左側に2mm変位させた場合を示している。変形図は等倍で、変形前の形状を灰色で、変形後の形状を塗りつぶしコンターで示しており、コンターはミーゼスの相当応力

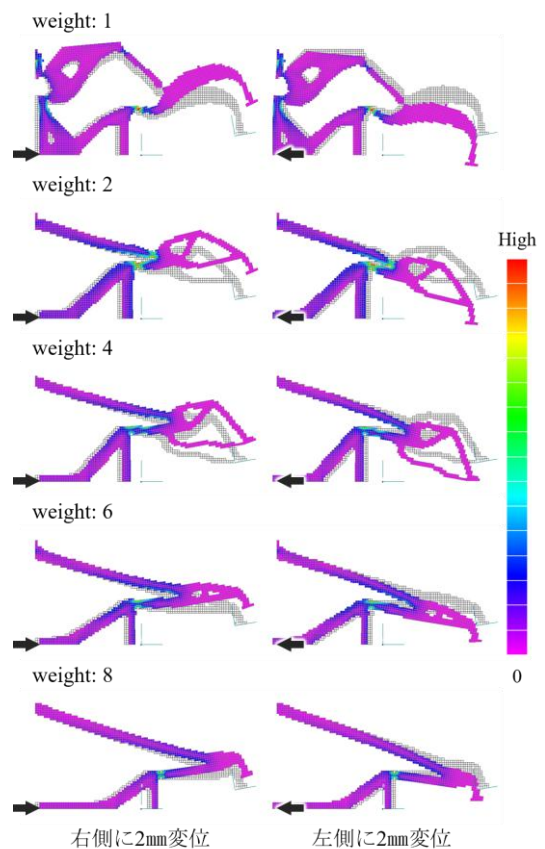


図6 各構造の静弾性解析結果

表1 各指標と目的関数1の重みの関係

重み1	変位1	変位2	水平反力	垂直反力
1	100%	100%	100%	100%
2	31%	76%	77%	68%
4	12%	49%	56%	20%
6	8%	42%	63%	23%
8	4%	29%	38%	14%

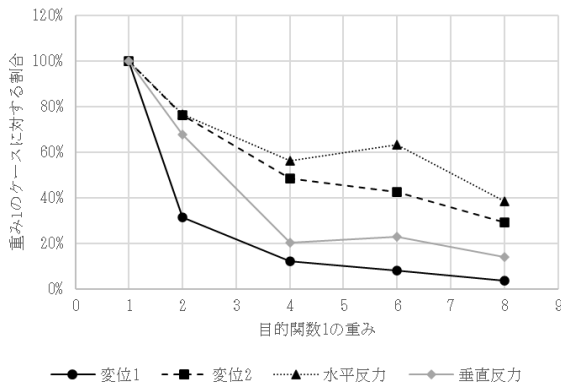


図7 目的関数1の重みの変化による各指標の推移

を示している。ここから、各構造で節を中心に変形が起こり、構造全体としてメカニズムが動作する様子が分かる。

解析ケース1において構造全体で最も変位した箇所の変位量（以降、変位1）、解析ケース2における開口部の変位量（以降、変位2）および左下隅の強制変位に伴う水平方向の反力（以降、水平反力）および垂直方向の反力（以降、垂直反力）と目的関数1の重みの関係を表1および図7に示す。ここで各数値は、目的関数1の重みが1の場合と比較したときの割合で示している。

目的関数1の重みを増やすと、変位1と変位2は小さくなる傾向が見られた。これは重み係数が大きくなるにつれ、他の目的関数に対する目的関数1の相対的な影響が大きくなり、構造の剛性が高まる方向に優位に解析が進展し、変形しにくい構造が導かれたためと考えられる。

また、目的関数1の重みが増えるに従い、水平反力・垂直反力も小さくなっている。これは、目的関数2が目的関数1の重みが増えるに従い影響が抑制されたため、構造を柔にする目的関数のなかで相対的に目的関数3、目的関数4の影響が大きくなったためと考えられる。

3.6 試作

トポロジー最適化によって導いたコンプライアントメカニズムが実際に動作するものであるかを確認するため、完全固定部を支えるためのフレームと外力を入力するためのハンドルを追加設計し、3Dプリンター

(Markforged 製 Mark two) によって試作した。造形材料は、Smooth TPU（熱可塑性ポリウレタン）95A

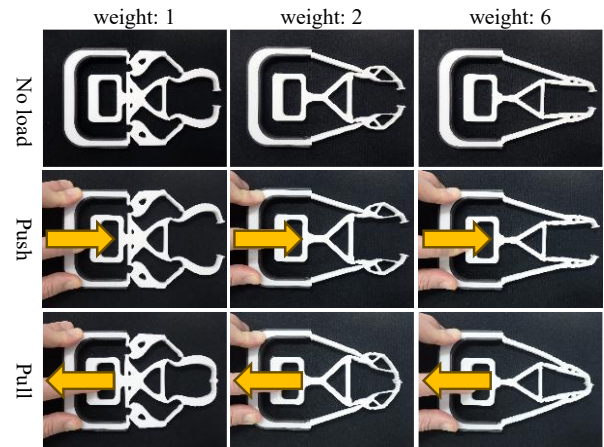


図8 試作結果

(Markforged 製) を使用した。

図8に試作した造形品と、実際に力を加えた場合を示す。この試作から、導いたコンプライアントメカニズムが正しく動作していることがわかる。

4 まとめ

本報告では、トポロジー最適化によりコンプライアントメカニズムを導出することを通じて、構造物の形態設計を自動で行う方法を示した。以下に結果を示す。

1. トポロジー最適化技術を活用することで、構造物の具体的な形を数値解析によって導くことができる。
2. 最適化計算における目的関数は複数設定できる。このとき構造を剛にする目的関数と、柔にする目的関数の間で互いにバランスをとるよう重み係数を設定することで、コンプライアントメカニズムを導出できる。
3. 導出されたコンプライアントメカニズムの形状および特性は、トポロジー最適化における目的関数によって変化する。

実際の製品・構造物の設計においては、いかに設計意図を目的関数や重み係数に適切に反映させるかが重要になる。適切な目的関数・重み係数が与えられたならば、形態は解析によって自動的に求まるので、設計工程の効率化に寄与するものと思われる。

【参考文献】

- 1) 西脇ら, トポロジー最適化, 丸善出版, 2013
- 2) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp7-10, 2023
- 3) 小林ら, 「トポロジー最適化と形状最適化に基づいたコンプライアントメカニズムの多段階設計法」, 精密工学会誌 Vol.70, No.11, pp1455-1460, 2004