

構造最適化技術

前田 朝樹 *

Maeda Tomoki

装置や機械の構造の複雑化・高機能化、性能要求の多様化、資源エネルギーの節減、厳しいコスト低減の要求等にもない、条件を満たす設計解を見つけるためには熟練設計者でも多くの手間と時間を要するようになっている。このような問題の解決法のひとつが、最適化問題を構造設計に取り込んだ構造最適化手法である。ここではこの構造最適化手法を紹介し、簡単な例によるシミュレーション結果を示す。

キーワード：構造最適化、有限要素法、寸法最適化、形状最適化、位相最適化、デジタルエンジニアリング、シミュレーション

1. はじめに

最近のパソコン性能の大幅な向上と低価格化により、有限要素法は数値解析の専門技術者だけでなく、一般の設計でも広く用いられるようになってきている。また3D-CADも広く使われるようになっており、有限要素法が組込まれたものもあり、3D-CADによる形状の構築－有限要素法による強度検討がCADアプリケーションから行うことが可能となっている。

このように、コンピュータを用いたエンジニアリング環境や手法は、デジタルエンジニアリングと称される。このデジタルエンジニアリング環境下で行われる構造応答や製品シミュレーションは、実験と比べてコストは大幅に低い。従来はコストがかかるため数種類の実験しかできなかったが、デジタルエンジニアリング環境下においては、設計者は品質や性能を向上させるために寸法や材

質などの属性、さらには製造方法までも含めて多岐にわたるパラメータを何度も調整し（パラメータスタディと呼ばれる）、高性能かつ低コストの製品を作り出すことを目指すことが可能となる¹⁾。

しかしながら、デジタルエンジニアリング環境下においても、パラメータ調整に関しては設計者の経験や勘に依存する部分が多く、何度も繰り返す必要があるため時間がかかるのが現状である。また、製品に要求される性能や構造形式、使用される材料が多様化しているため、手作業による調整では満足する性能を見いだすことが困難な場合もある。

このような問題の解決法として、コンピュータによる構造最適化技術がある。この手法を用いれば、設計者は条件を入力さえすれば、コンピュータが性能の向上や製品重量の軽量化を達成するためのパラメータ調整を行うので、設計者の労力と

* 研究開発事業部 解析技術部 課長

設計時間の短縮にも貢献することができる。

本稿では、まず構造最適化手法について概説し、簡単な例題を用いたシミュレーション結果により、コンピュータを用いた構造最適化技術について紹介する。

2. 構造最適化

2.1 最適化手法の定式化²⁾

一般に、構造最適化問題は次のように記述される。

$$\min f(x) \quad (1)$$

Subject to

$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$h_i(x) = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

ここで、式 (1) は目的関数と呼ばれる。構造最適化問題では目的関数は製品の重量とすることが多い。また、式 (2)、(3) は制約条件と呼ばれ、発生応力を許容応力以下にするとか、変位量を制限値以下にするなどの条件が相当する。各式での変数 x は設計変数と呼ばれ、板厚や寸法などの変化させたいパラメータとなる。梁や柱の場合であれば断面積や断面二次モーメントにする場合もある。

る。

2.2 最適化手法の種類

構造最適化には大きく分けて、(1) 寸法最適化、(2) 形状最適化、(3) 位相最適化の3つに分かれる。図1に各手法の概念をしめす³⁾。

寸法最適化とは、断面形状や板厚などの寸法パラメータを最適化するものである。図1(a)の梁の例では、梁の断面形状を特定するウェブ高さやその板厚を変化させることにより、最適な構造を得るための手法である。

形状最適化は、構造物の表面形状を設計パラメータとするものである。図1(b)のように、この手法を用いることで、最大モーメントがかかる固定端が最も太く、先端にいくほど細い形状を得ることが可能となる。

位相最適化はトポロジー最適化とも呼ばれ、構造物の位相(トポロジー)を最適化する手法である。ここで位相とは数学の幾何学で使われている言葉であり、この幾何学では穴の数により形状が分類される。図1(c)の梁では穴を開けたり形状を変化させることにより最適な構造を得ることが可能となる。

3. 構造最適化の例

ここでは、各構造最適化手法を用いた例を示す。

3.1 寸法最適化の例

ここでは、図2に示すような補剛材付き鋼板の寸法最適化を行う。構造の諸元と荷重条件を表1と表2に示す。

この条件の下で、補剛材付き鋼板の重量の最小化を行った。変更する寸法は鋼板の板厚、また補剛材の断面である。製品で使用される鋼板の板厚は連続変数ではなく、6mm、9mm、…のような離散値をとる。補剛材についても同様で、入手しや

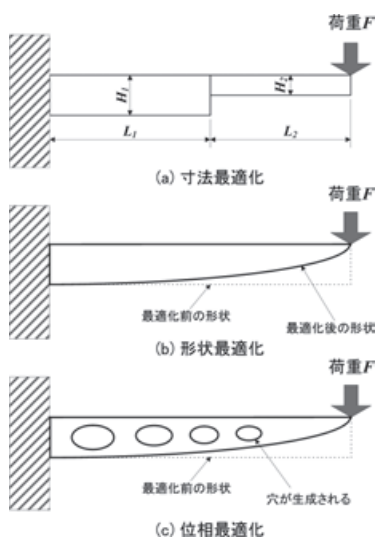


図1 構造最適化の分類

表 1 解析モデルの諸元

諸元	長さ(mm)	幅(mm)	板厚(mm)	補剛材断面
	15,000mm	4,000mm	10mm	H-400x200x8/13
物性値	ヤング率	ポアソン比	密度(kg/mm ³)	
	205800	0.3	7.85	
制約条件	許容応力(MPa)	許容たわみ(mm)		
	160	10		

表 2 モデルに载荷した圧力 (単位は MPa)

荷重	区間①	区間②	区間③	区間④	区間⑤
	0.05	0.0625	0.075	0.0875	0.10

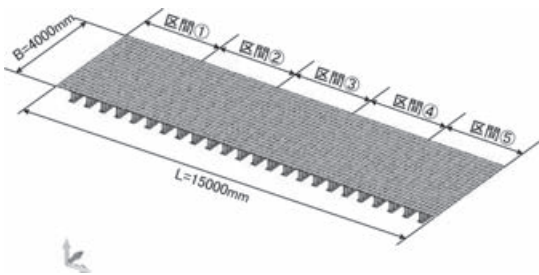


図 2 補剛材付き鋼板に対する寸法最適化で用いたモデル

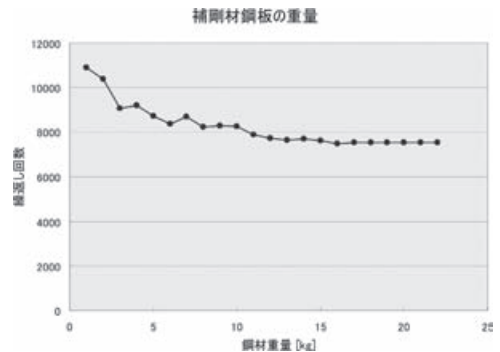


図 3 補剛材付き鋼板の重量の変遷

すさから H400x200x8/13 のように JIS で決められたものから選択することが多い。そこで、使用したプログラムはこれらのことを考慮して、使用する部材のテーブルを準備しておき、最適化の過程で変化させる板厚や断面形状はこのテーブルから選ぶものとしている。最適化の過程における重量のグラフを図 3 に示す。最適化により、当初 10,880kg あったものが 7,498kg へと 31% 減少した。

また、最適化前の変位は 2.95mm、発生応力は鋼板が 67MPa、補剛材が 85MPa と余裕が大きかったが、最適化後は最大変位が 6.9mm、鋼板の発生応力が 134MPa、補剛材が 101MPa となっており、許容応力ギリギリにはならないが許容応力の 84% 程度となっており、満足できる結果と思われる。

3.2 形状最適化の例

ここでは、図 4 に示すようなブラケットの形状最適化を行う。ブラケットの諸元と解析条件を表 3 に示す。解析ではトウ先端に 1,000N の大きさの外力を载荷させた。また許容応力を $\sigma_{allow} = 200MPa$ とした。

このブラケットは図 5 (a) に示すように最適化前には、円弧部に 350MPa と許容応力を大きく超える応力が発生している。この形状最適化では重量をできるだけ増やさずに、発生応力を許容値以下にするための形状を得ることを目的としている。

形状最適化を行った後の応力分布を図 5 (b) に示す。この図からわかるように最適化後の最大

表 3

諸元	高さ(mm)	幅(mm)	板厚(mm)
	1,000mm	1,000mm	10mm
	ヤング率	ポアソン比	密度(kg / mm ³)
	205800	0.3	7.85

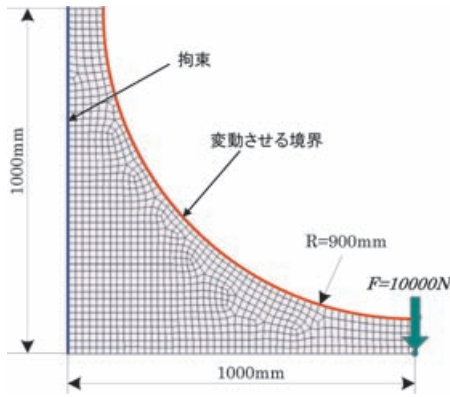


図 4 形状最適化に用いた解析モデル図

応力は許容応力である 200MPa 以下になっていることがわかる。また、最適化前の重量は 28.6kg であったのに対し、最適化後は 30.0kg とわずかに増えたのみである。

この最適化によって得られた形状を図 6 に示す。この図では元の形状からどの程度移動したかを色で区別している。トゥーに近い部分（赤い部分）が 50mm ほど円の中心に向かって移動し、上部の円の終端部では逆に細くなっている様子がわかる。この形状にすることで応力を許容応力以内とすることができる。従来はこのような最適な形状を得るために、円弧形状を少し変えてはその都度メッシュを作り直して応力解析を行うことを何度も繰り返す必要があったが、この技術を使えばわずかな時間でこのような形状を得ることができる。

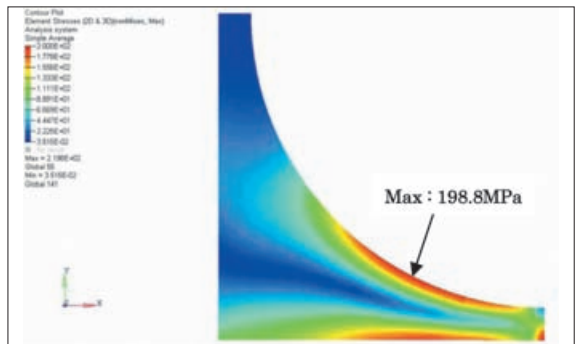
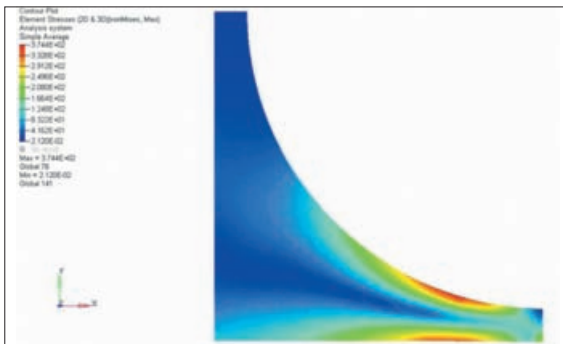


図 5 発生応力コンター図 (左:最適化前、右:最適化後)

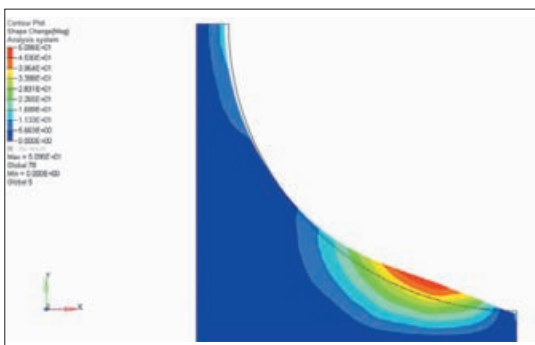


図 6 最適化によって得られた形状変更 (色は境界の移動量)

3.3 位相最適化の例

ここでは、形状最適化で用いたブラケットに対して位相最適化を行う。使用した解析モデルを図 7 に示す。この図でピンク色の部分は必ず必要な箇所、薄緑色の領域は穴を開けることが可能な領域（設計領域）とした。このように設計領域を元の形状よりも大きくとることで、今までの構造形態の発想から大きく離れた新しい形状を得ることができる。

今回のシミュレーションでは、重量を解析モデ

ルに対して 20% 以下にするという制約条件の下、もっとも剛性の高い形状とはどのようなものかを得るために行う。

最適化によって得られた形状を図 8 の左に示す。この図から、この外力に対してはブラケットの弧の向きは逆になり、従来の形状とは大きく異なっていることがわかる。また得られた形状での発生応力を図 8 の右に示すが、この図から得られた形状は発生応力が許容応力である 200MPa 以下となっていることがわかる（荷重載荷点は除く）。

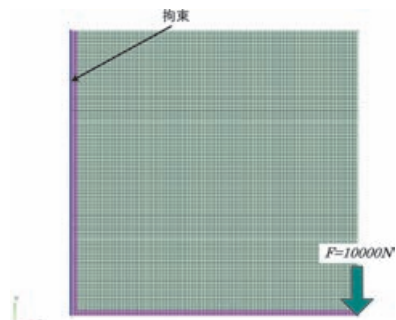


図 7 位相最適化で用いた解析モデル

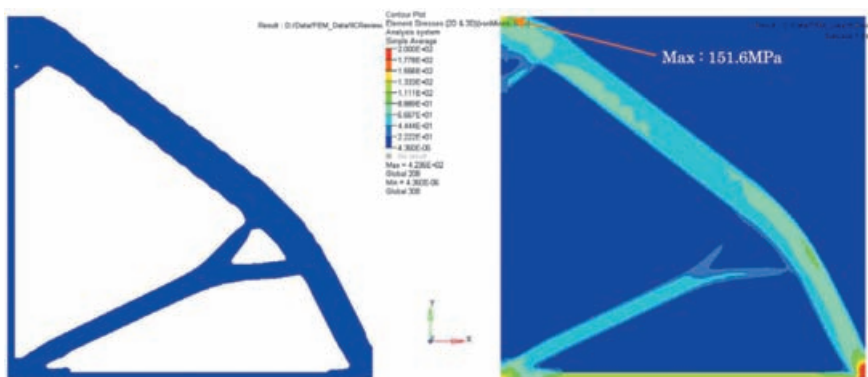


図 8 位相最適化の結果（左が形状、右は発生応力）

おわりに

構造最適化技術を使うことにより、製品の重量を減らすだけでなく、設計者の労力を大いに減らすことが可能となる。本稿で示したような規模(要素数 10,000 程度)の問題であれば、一回の最適化にかかる時間は 10 分程度であり、モデル作成から最適解を得るまでにかかる時間は数時間程度である。

構造最適化技術はまだ進歩中のものである。現在は静的強度と固有値解析に対してのみ適用できる。しかしながら数年内には熱解析や座屈解析もその対象に入ることが予想される。

IHI 検査計測では、構造・流体解析に加えて、構造最適化技術による設計支援サービスを提供し、製品の構造に関するサポート全般を行っている。

参考文献

- 1) 有限要素法のモデル化技術と応用解析、川面 恵司・横山 正明ら、養賢堂、2007
- 2) 建築・土木のための構造最適化入門、大崎 純、Civil-eye.com Web-Seminar、2007
- 3) 革新的ものづくりのための最適設計入門（日本機械学会講習会資料）、(社) 日本機械学会、2009



研究開発事業部
解析技術部 課長
前田 朝樹
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2119