

オープンソースCAEによる多目的最適化システムの開発

倉本 紘彰*1

Development of Multi-Objective Optimization System by Open Source CAE

Hiroaki Kuramoto

製品の構造設計は、形状や材料の制約を受けながら、コストと性能が要件を満たすように設計パラメータを決定することが求められる。本研究では、トレードオフ関係にある質量と剛性を目的関数として、設計変数の最適化を図る、オープンソースCAEをベースとした多目的最適化システムを開発した。本システムの有効性を検証するため、テストケースとして棚受け用ブラケットの寸法最適化を実行した。その結果、質量と剛性を同時に改善できるパレート解集合が得られ、ブラケットの質量を変えずに剛性を改善できる設計が導出可能であることを確認した。

1 はじめに

工業製品に対する軽量化は常に求められている一方で、構造部品の軽量化は剛性や減衰性能の低下を招くため、事前の慎重な検討が必要である。このような互いにトレードオフ関係にある2つ以上の目的を、設計上の制約条件を満たしながら同時に改善させる手段として、多目的最適化が有効である。多目的最適化ではトレードオフ関係を表すパレート解の集合が得られ、複数の設計パラメータをどのような値で組み合わせれば、目的を満たす解が得られるかが分かる。

多目的最適化では遺伝的アルゴリズムによる進化計算を行うため、有限要素法(FEM: Finite Element Method)による構造解析を用いた場合、 10^4 オーダの膨大な計算量が必要となり、時間やコストの面で課題がある。そこで、設計変数空間をパラメトリックにサンプリングした数十から数百程度のFEM解析結果をもとに、応答曲面法により近似モデルを作成し、最適化計算を行うことで計算コストを抑える手法が一般的に用いられる。応答曲面法には多項式近似モデル、RBFモデル、Krigingモデルなどがあるが、これらを用いて得られる解は推定値になるため、最終的にFEM解析結果との比較検証が必要となる。

現在、多目的最適化を設計現場で活用するためには、専用ソフトを自作する場合を除き、高価な商用ソフトを導入するか、サポートの無いオープンソースのソフトを組み合わせるしかなく、県内中小企業での活用は進んでいない。

以上を踏まえ、本研究では、設計現場での多目的最

適化の普及を目指し、質量と剛性を同時に改善できるオープンソースCAEによる多目的最適化システムを開発し、有効性の評価を行った。

2 研究, 実験方法

2-1 多目的最適化システム

今回開発した多目的最適化システムの概要を図1に、ソフトの構成を表1に示す。最適化エンジンとしてopenMDAOを用いた。openMDAOはNASAのGlenn Research Centerで開発されている、Pythonで記述されたオープンソースの最適化プラットフォームである¹⁾。計算の流れとしては、openMDAOで決定したパラメータセットを3DCADソフトであるFreeCAD²⁾に出力し、3Dモデルの変更を行う。その後、プリポストと構造解析ソルバーが一体となったSalome-Meca³⁾にモデルを引き継ぎ、静解析を行う。静解析の結果はCSVで出力され、質量と剛性が計算される。この計算結果をopenMDAOに返し、近似モデルの作成と最適化計算を行っていく。これら

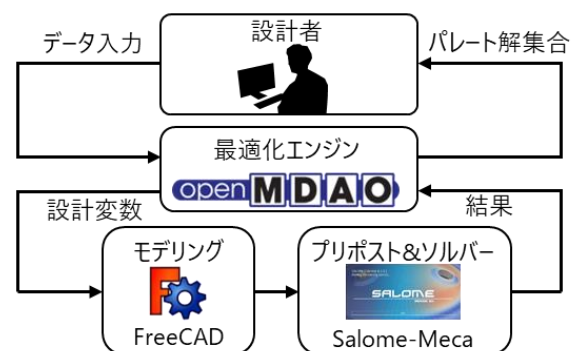


図1 多目的最適化システム

*1 機械電子研究所

表1 計算用PCとソフト構成

計算用PC	OS	Ubuntu 18.04LTS
	最適化	openMDAO 1.7.4
ソフト	3DCAD	FreeCAD 0.17
	FEM	Salome-Meca 2017

の環境をLinux上に構築し、手順は全てPythonスクリプトで自動化させている。

2-2 ブラケット形状の定義

今回、テストケースとして一般的な棚受け用ブラケット(図2)について、壁に固定された状態で、棚受け部分に分布荷重を受ける場合を考える。壁に固定される部分と分布荷重を受ける部分は寸法固定とし、方杖部分の寸法5個(A, B, C, D, E)を設計変数、質量と剛性を目的関数とした。設計変数のオリジナル値と定義範囲を表2に示す。

質量は3Dモデルの体積から比重を掛けて求めることができる。剛性については応力での評価は特異点の影響を受けるため、節点ごとに荷重の大きさと変位量の積を求め、その総和で表される平均コンプライアンスを用いている。平均コンプライアンスが小さいほど、剛性が高いことを表している。以上を定式化すると、

$$\text{Minimize } f_1(A, B, C, D, E) = M$$

$$\text{Minimize } f_2(A, B, C, D, E) = \sum u_i \cdot q_i = \theta$$

$$\text{Subject to } \sigma_{max} \leq \sigma_a$$

と表すことができる。ここで、 M は質量(kg), u_i , q_i は*i*番目の節点のy軸方向変位量(mm)と節点荷重(N), θ は平均コンプライアンス(J), σ_{max} , σ_a は最大応力(MPa), 降伏応力(MPa)である。

2-3 最適化手順

以下の手順に従って最適化計算を行う。

- Step 1. オリジナル構造のFEM解析を行い、質量と平均コンプライアンスの目標値を決定する。
- Step 2. 設計変数空間上で最適ラテン超方格法に基づいたサンプリングを行い、設計変数を決定する。
- Step 3. サンプリング点ごとにFEM解析を行う。
- Step 4. 質量と平均コンプライアンスの結果からそれぞれ近似モデルを作る。
- Step 5. 近似モデルからNSGA-II⁴⁾によってパレート解集合を求め、解を選択する。

今回、サンプリング数は100とし、近似モデルはKrigingモデルを用いた。

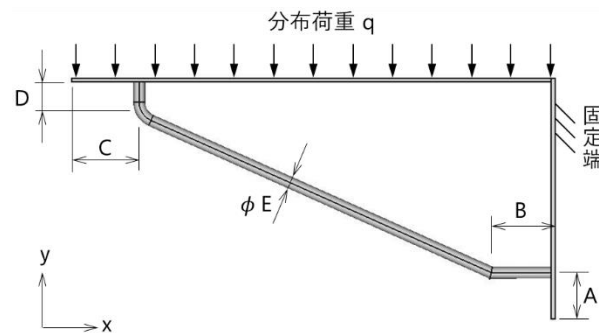


図2 ブラケットの設計変数定義

表2 設計変数の定義範囲 (mm)

設計変数	オリジナル	定義範囲
A	23	[20, 40]
B	30	[10, 50]
C	208	[120, 220]
D	10	[10, 50]
E	3	[2, 4]

3 結果と考察

3-1 オリジナル構造の解析

オリジナル構造のFEM解析を行い、質量と平均コンプライアンスを求めた結果を表3に示す。この値を比較対象の基準として、後ほど求めるパレート解集合の中から最適解を選択する。

表3 質量と平均コンプライアンス

M	0.135 kg
θ	0.442 J

3-2 多目的最適化結果

3-2-1 FEM解析結果

100回のFEM解析から、質量と平均コンプライアンスの結果をプロットしたものを図3に示す。図より、質量は0.1 kgから0.184 kgの範囲に、平均コンプライアンスは0.181 Jから1.784 Jの範囲に解が分布して存在することが分かった。また、図に示した矢印はグラフ左下方向に近づくほど、より軽く、より高剛性の理想的な形状であることを表しており、オリジナル構造よ

りも性能が改善された設計案の導出が可能であることが読み取れる。

3-2-2 パレート解集合

次に、Krigingモデルから求めたパレート解集合を図4に示す。NSGA-IIで用いたパラメータは、初期個体数を100、世代交代数を150とした。図より、パレート解集合は質量が0.116 kgから0.152 kg、平均コンプライアンスが0.156 Jから0.273 Jの範囲に存在していることが分かった。パレート解集合はオリジナル構造の質量を包含した範囲で存在しているため、今回検証用として、図中に破線の矢印で示したように、オリジナル構造と質量が同程度で、より高剛性な解を最適解として選択した。

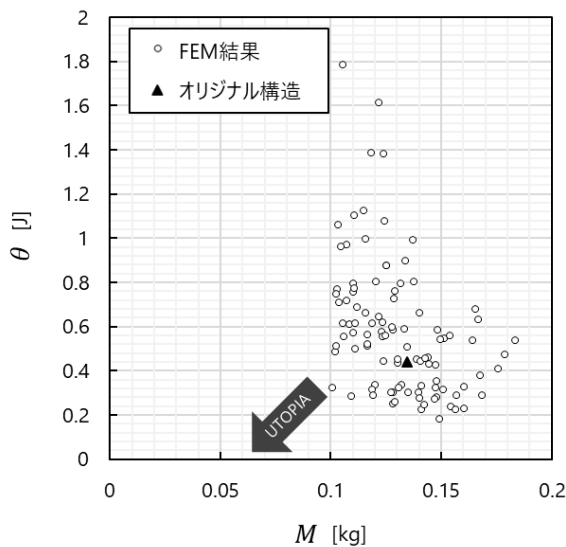


図3 FEM解析結果 (N=100)

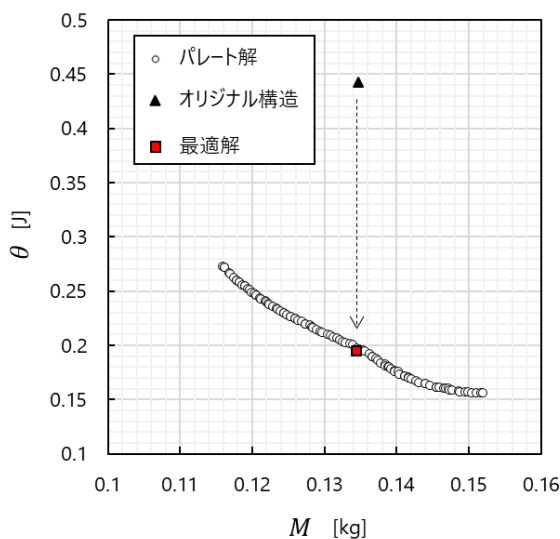


図4 パレート解集合

3-3 性能比較

選択した最適解の質量と平均コンプライアンス、およびそのときの設計変数を表4に示す。表3に示したオリジナル構造と比較すると、平均コンプライアンスが0.442 Jから0.197 Jに改善されていることが分かる。この目的関数は推定値のため、表の設計変数を用いて改めてFEM解析を行い、誤差を比較した結果を表5に示す。表より、最適解においては質量、平均コンプライアンスともに実用上十分な精度で推定できていることが分かった。

今回対象としていないパレート解についても、Krigingモデルによる推定値とFEM解析結果を比較した結果を図5、図6に示す。プロットが図中の直線上にあれば推定値と解析結果が一致していることを表しており、図より設計範囲全体で良く一致していることが分かった。一方で表5に示したように、質量に比べて平均コンプライアンスの誤差の方が大きいことから、変位量から計算される平均コンプライアンスは幾何学的非線形性に強く影響を受けていると考えられる。したがって、少ないサンプリング数では近似精度悪化の原因となるため、設計する製品ごとに、適切な近似モデル、およびサンプリング数を確認しながら最適化をすることが必要になる。

図7にオリジナル構造と最適構造のy軸方向変位量のFEM解析結果を示す。最適構造ではオリジナル構造と比べて最大変位が3.35 mmから1.56 mmに小さくなり、剛性が改善できていることが確認できた。

表4 選択した最適解の目的関数と設計変数

目的関数	M	0.135 g
	θ	0.197 J
設計変数	A	22.2 mm
	B	10.0 mm
	C	175.2 mm
	D	10.0 mm
	E	3.2 mm

表5 推定値とFEM結果の比較

	推定値	FEM結果	誤差
M	0.135 kg	0.134 kg	0.04 %
θ	0.197 J	0.195 J	1.33 %

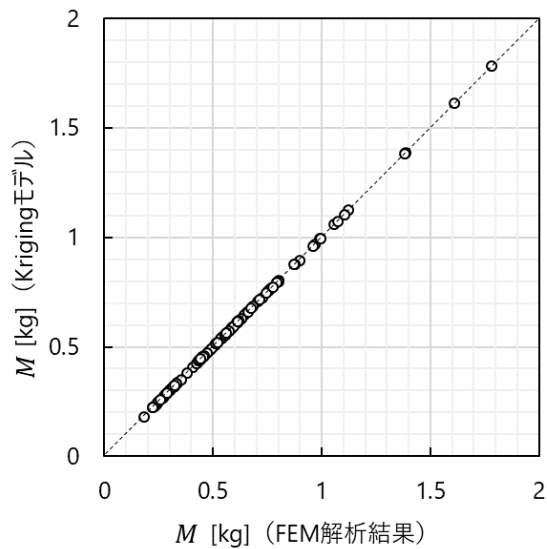


図5 質量の推定値とFEM結果の比較

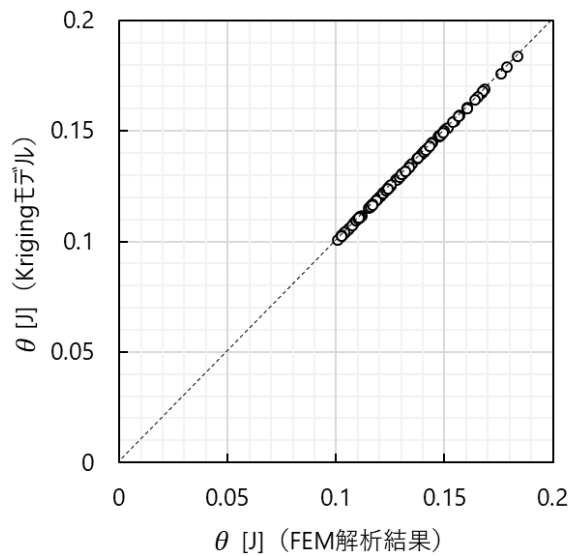


図6 平均コンプライアンスの推定値とFEM結果の比較

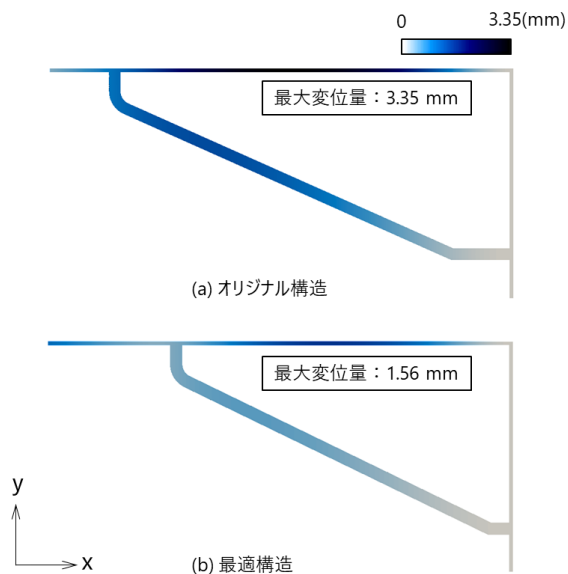


図7 オリジナル構造と最適構造のy軸方向変位量比較

4 まとめ

本研究では、オープンソースCAEをベースにした多目的最適化システムを開発し、その有効性を検証した。近似モデル化手法と組み合わせることで、設計範囲全域において、少ない計算量かつ実用上十分な精度で最適化が可能であることを確認できた。

5 参考文献

- 1) openMDAO: <http://openmdao.org/> (2019年4月)
- 2) FreeCAD: <https://www.freecadweb.org/?lang=ja> (2019年4月)
- 3) Salome-Meca: <https://code-aster.org/spip.php?article303> (2019年4月)
- 4) K. Deb: *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Wiley (2002)