5.　HMPS 法と CA-IESO 法を用いた座屈を考慮した構造形態創生に関する研究

1410920121　大坪悠登
指導教員　藤井大地　教授

Hamiltonian MPS 法,　CA 法, IESO 法, 形態創生, 座屈, 大変形解析

1. はじめに

ボクセル有限要素法を用いたトポロジー最適化手法は，３次元直方体の固定設計領域から自由な建築構造形態を創生できる手法として注目されている[1]．しかし，これまで開発された方法は，微小変形における剛性最大化を目的としたもので，有限変形を伴う柔構造には適用が困難であった．そこで，本研究では，ボクセル有限要素法の代わりに鈴木，越塚ら[2]によって開発された粒子法（Hamiltonian MPS法，以下HMPS法と記述）を用いることにより，有限変形を伴う柔構造にも対応した新たな建築構造形態創生法を開発することを目的としている．

本論文では，これまでボクセル有限要素法を用いた手法として開発したトポロジー最適化手法（IESO法）にHMPS法を適用し，微小変形に対する有効性を検討すると共に, 有限変形における形態創生により適したCA法とIESO法を組み合わせた新たなトポロジー最適化手法を提案する．なお，本研究で開発した手法は，３次元構造を対象としたものであるが，本論文の目的は，まずは，開発した手法の妥当性を検討することにあるため，厚さ方向で材料密度が変化しない２次元構造を対象とする．

2. HMPS法の概要

HMPS法[2]は, 変形を数学的に記述する変形勾配テンソルを影響半径内の粒子に対する重み付き最小二乗近似によって求めるところに特徴があり，これにより回転行列等の定義が必要無くなるため，定式化もプログラミングも非常に容易に行える．本研究では，動的緩和法を用いたHMPS法による静的弾性解析プログラムを開発し，建築構造解析に必要となる軸方向変形，せん断変形，曲げ変形に対する解析精度を検証している[3]．

そこで本論文では，本手法を，直方体固定設計領域をボクセル分割したトポロジー最適化手法に適用する．ただし，本研究では，ボクセルを立方体要素とし，ボクセルの各節点に粒子を配置するものとする．これにより，ボクセル有限要素法で用いていたデータをそのまま活用することが可能となり，有限要素法で得られた微小変形解からHMPS法による有限変形解を求めることも可能となる．

3. 形態創生法の概要

3.1 IESO法

ESO法は，ボクセル分割された直方体領域において，各ボクセルの目的関数に関する感度を指標として，感度の低いボクセルを徐々に消して行くことで形態を創生する方法である．IESO法（改良型ESO法）[1]は，この初期のESO法の感度を求める方法と各ステップのボクセルの除去ルールを改善したものである．

本解析に必要なデータとしては，固定設計領域の大きさ，直方体各辺のボクセル分割数，ヤング係数，ポアソン比，境界条件，荷重条件がある．また，最適化計算に必要なデータとしては，感度を平滑化するための影響半径（ボクセルの1辺の長さの倍数 b_r で与える），目標体積比 $\bar{V}_r$（目標残存ボクセル数/直方体の全ボクセル数），各ステップの除去率 λ がある．

3.2 CA法

CA法は，除去されたボクセルを再度付加する手法で，本研究では，残存ボクセルの感度平均よりも大きい感度を持つボクセルに対して、そのボクセルと面を共有するボクセルを付加する．

3.3 CA-IESO法

CA-IESO法は，CA法とIESO法を交互に用いる方法で，ボクセルの付加と除去を繰り返して，形態創生を行う方法である．

本研究では，まずIESO法により微小変形解を求め，求められた微小変形解に対して荷重倍率を上げて有限変形解を求める．これは，HMPS法では，変形が大きくなるにしたがって解の収束が遅くなるため，ボクセル数が非常に多い段階で有限変形解析を行うと計算効率がよくないためである．また，この場合，微小変形解として，ボクセル有限要素法の解を用いることも可能となる．

4. 解析例

図1は，以上の解析手法の有効性を検討するための解析モデルを示す．ただし，固定設計領域の分割数は90×30×2の5400ボクセルで, 粒子数は8100となる. ただし, 粒子法では, 回転に関する拘束が1粒子ではできないため, 領域両端に2層のボクセルを付加している．

Study on structural form creation considering buckling using HMPS method and CA-IESO method

OTSUBO Yuto
構造解析研究室

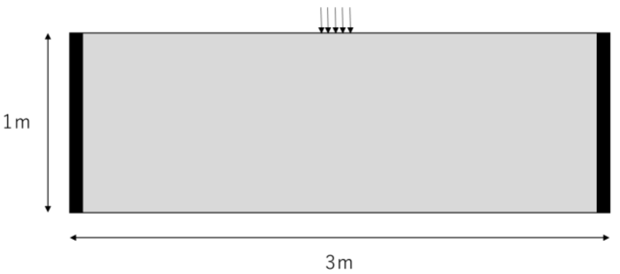

図1　解析モデル

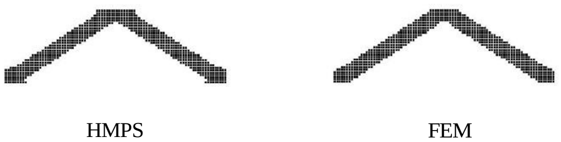

図2　IESO法による微小変形解の比較

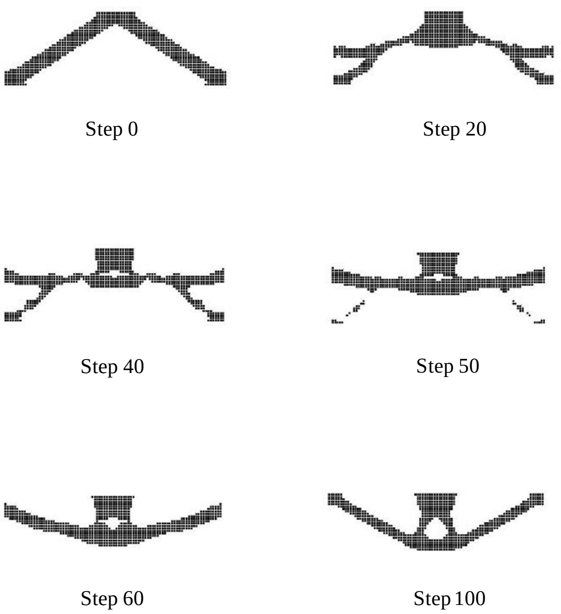

図3　CA-IESO法による最適化過程

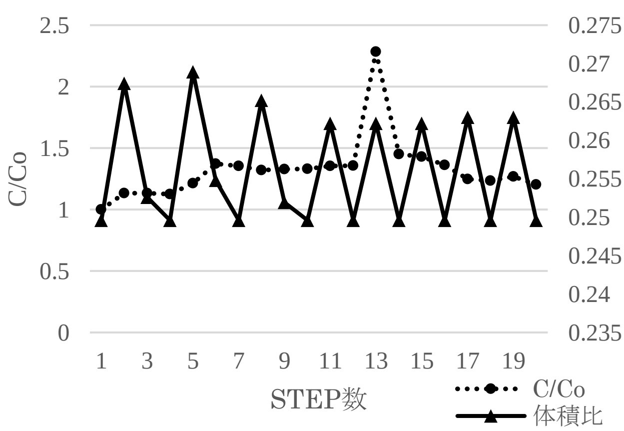

図4　CA-IESO法の体積比とコンプライアンスの変化

図2は，微小変形におけるHMPS法によるIESO法の収束解をボクセル有限要素法を用いた場合の解と比較したものである．ただし，HMPS法による解析では，ヤング率 210×10^{9}[N/m^{2}]，粒子密度7850[Pa]，ポアソン比0.3とし，荷重は1[N]としている．また，IESO法の目標体積 $\bar{V}_r$ は0.25，影響半径倍率 b_r は3.0，除去率 λ は0.05としている．図2より，HMPS法の解とボクセル有限要素法の解はほぼ一致していることがわかる．

図3は，図2のHMPS法の解を初期解として，HMPS法とCA-IESO法を用いた有限変形時の最適形態を求めたものである．ただし，荷重倍率は50000倍としている．図より，ステップが進むにしたがって圧縮抵抗型形態から座屈の生じにくい引張抵抗型形態に変化して行くことがわかる．また，HMPS法では，Step 50に見られるような孤立ボクセルが現れるような問題に対しても解が発散しないため，有限要素法に比較して安定性に優れた手法と言える．

図4は，20ステップまでの各ステップの残存要素の体積比とコンプライアンスの変化を示したものである．図より，CA法による付加は1回で行われるのに対して，IESO法による除去は段階的に行われることがわかる．なお，CA-IESO法では，解の収束は保証されないので，体積制約を満たす優良解を保存しておく必要がある．

5. まとめ

本論文では，大変形に耐えうる柔構造の構造形態創生を行うため，これまで開発したトポロジー最適化手法にHMPS法を適用する方法を提案し，その有効性を検討した．その結果，HMPS法の微小変形解は，ボクセル有限要素法の解とほぼ一致すること，大変形解は圧縮抵抗型から座屈に強い引張抵抗型に変化することがわかった．また，HMPS法は非線形解析の方法としては計算効率が良く，解の発散が起きにくいロバスト性のある計算法であることがわかった．

参考文献

1) 新内洋平，松本慎也，藤井大地：IESO 法を用いた建築構造の形態創生　鉛直荷重と地震荷重に抵抗する建物の自然形態，日本建築学会構造系論文集，Vol.82，No.731，pp.97-103，2017.1
2) 菊池貴博他6名：壁境界条件としてペナルティ法を導入したHamiltonian MPS法による超弾性体モデルの単軸圧縮シミュレーション，日本計算工学会論文集，Paper No.201400
3) 山下真輝，眞鍋匡利，藤井大地：Hamiltonian MPS法とIESO法を用いた３次元構造物の位相最適化，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），構造Ｉ，p.20131，2017.8

構造解析研究室