39.　CA-ESO 法による建築構造の形態創生に関する研究

0710920071　重實克哉
指導教員　藤井大地　教授

位相最適化　発見的手法　CA 法　ESO 法　密度法　有限要素法

1.　緒言

位相最適化は，構造最適化問題を固定設計領域内の材料分布問題への置き換えにより，構造形態を変更可能とした最も自由度の高い構造最適化手法であり，現在までに，線形問題を中心として，多くの問題に適用される．

まず，連続体をベースとする構造形態の創生法について説明する．連続体ベースとする形態創生は，一般的に，設計対象となる空間を包括する設計領域を定義し，空間内の不必要な部分（材料）を除いていくことで，構造形態を創生する．

問題は，何を基準にして必要な部分と不必要な部分を決めるかにある．現時点で最も多く用いられる基準は創生される構造形態の剛性である．すなわち，その部分を取り除いても剛性が小さくならなければ除けばよいし，除くと剛性が小さくなるならば残せばよい．そうして，目的の面積（質量）に達するまで絞り込んでいけば，剛性の高い構造形態が創生される．しかし，ある一部分を除くと全体の応力分布が変化するため，除いていく順番や除く部分の大きさによって，得られる最終形態は様々に変化してしまう．したがって，不必要な部分を除く作業は，思ったほど簡単なものではない．

まず，初期の形態創生法は，より数学的に厳密な解法が目指され，数理計画法などの最適化手法を用いる方法が一般的であった．現在，市販されている位相最適化の汎用ソフトも，そのほとんどはこのような最適化手法を用いたものである．

このような方法では，部分を除くというよりも，部分を徐々に削るという方法で，最適な構造形態を求める．削る場合の指針となるものは，目的関数（多くの場合剛性）に関する感度である．要するにその部分を削っても剛性にあまり変化のないものから削っていく．その削り方に利用されるのが数理計画法と呼ばれる最適化手法である．なお，このような方法では，もちろん削るだけでなく，増やすことも普通に行われる．

最も初期に提案された方法は，材料のミクロ構造に穴を空けていく方法で，均質化設計法(HDM :Homogenization Design Method)と呼ばれている．この方法では，単に穴を空けるだけでなく，穴の方向を変化させるという凝った方法で，穴の方向を変化させることで，少ない要素分割でも滑らかな構造形態が得られるという特徴がある．汎用ソフトの多くは，今でもこの手法を用いている．

その後，要素の密度を変化させる密度法が提案され，均質化設計法に比較して，理論的に簡単であったため，研究者の間では，最近，これらの手法が主流になっている．

さらに，遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithms)やセル・オートマトン(CA: Cell Automaton)などの発見的解法(heuristics)を利用する方法も多く提案されるが，GA による実用的な解法はあまり見られない．しかし，CA を用いる方法では，計算時間等の観点からも，実用的な方法がいくつか提案されている．

本論文では，真鍋，藤井らによって提案された，粒子法を用いた CA 法と進化的構造最適化(ESO: Evolutionary Structural Optimization)を組み合わせた CA-ESO 法を有限要素法に適用し，局所解が保証される密度法との比較により CA-ESO 法の可能性を検証し，橋梁の設計例題や構造モデルをとおして解析を行っていく．

2.　CA-ESO 法

2．1 フォン・ミーゼス応力

CA-ESO 法では，次式で定義されるフォン・ミーゼス応力 σ^{VM} を要素の消去・復活の基準として用いる．

$$\sigma^{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 6\tau_{xy}^2} \qquad (1)$$

2．2 CA 法の役割

有限要素法（FEM: Finite Element Method）を用いて応力解析が終了した時，目標セル（要素）のフォン・ミーゼス応力 σ_i^{VM} がフォン・ミーゼス応力の平均値 σ_{cr} を超えれば，図 1 に示すように，辺を共有する近傍（ノイマン近傍）の要素が発生する．

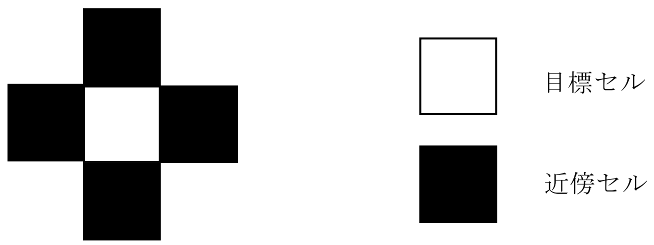

図 1　目標セルの近傍

Study on Topology Optimization of Structure using CA-ESO Method
SHIGEZANE Katsuya
構造解析研究室

2．3 ESO 法の役割

ESO 法では，各要素の敏感数が，与えられた閾値より小さくなるとその要素が消去される．大森らの拡張 ESO 法では，この敏感数（ここでは応力 σ^{VM} ）の閾値 X_{cr} は，

応力の平均値 σ_{cr} と平均値からの偏差平均 ϕ を用いて次式で定義される．

$$X_{cr} = \sigma_{cr} - \eta\phi^2, \quad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_i^{VM} - \sigma_{cr})^2}{N}} \tag{2}$$

ここに，η は適当に与えられる制御変数である．

2．4 CA-ESO 法の計算フロー

有限要素法による応力計算をした時に、設計領域が体積制約を満足させない場合は、CA 法のみを繰り返し、ESO 法による過剰な要素の消去を防ぐ.

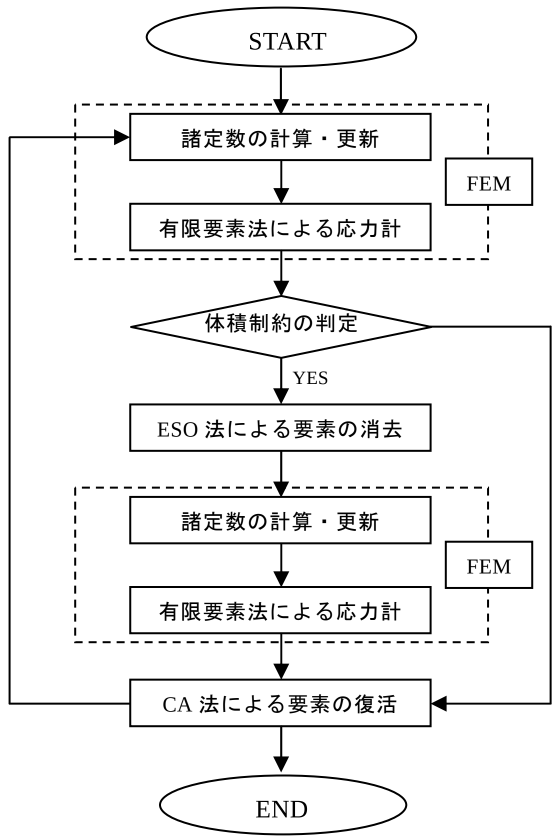

図 2　CA-ESO 法による位相最適化フロー

3．　解析例

3．1 橋梁の設計例題

問題設定として，橋梁のアーチスパンを 260m，アーチライズを 34．5m とする．また，荷重は道路部分に一様な鉛直荷重を加えるものとする．ただし，ヤング係数 $E = 206\mathrm{kN/m^2}$，ポアソン比 ν=0.3 ，要素分割は 130×23 とする． 図 3，4 は，上路橋構造を示したものである．

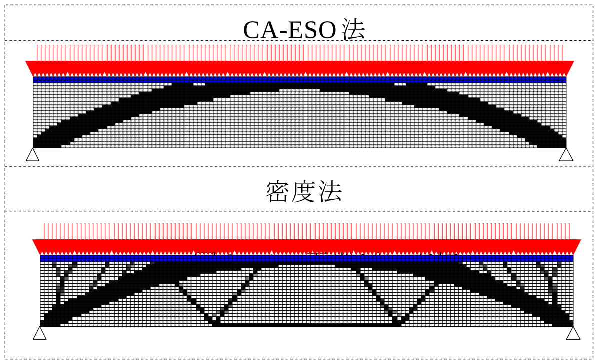

図 3　両端ピン支持

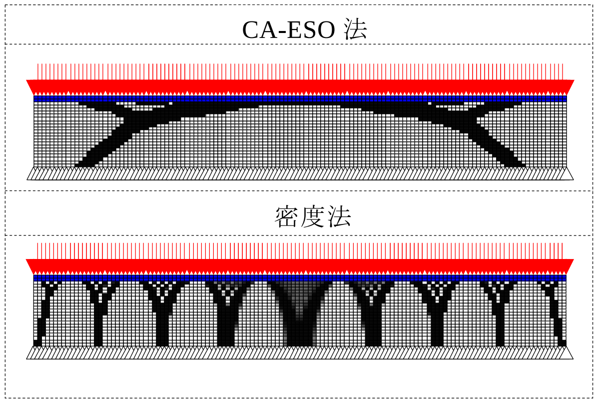

図 4　全点ピン支持

3．　2 考察

図 3，4 より CA-ESO 法は密度法と比べ，メインの部材だけで，荷重に対して持たせる，シンプルな位相を探してくる傾向が見られる．

その理由として，目的関数が密度法ではコンプライアンス最小なのに対して，CA-ESO 法では等応力である事が一つの要因として考えられる．

4．結語

本研究では,有限要素法を用いた CA-ESO 法を使用し，建築構造の形態創生を行った．

その結果，局所解が保証される密度法に比較して，よりシンプルな位相が得られることや，チェッカーボードやグレースケールの解決策の一つとして，CA-ESO 法の可能性を示すことができた．

参考文献

1)真鍋匡利:粒子法による幾何学的非線形解析を用いた発見的手法に基づく弾性体の位相最適化手法に関する研究

2)藤井大地，野中哲也，三井和男，曽我部博之，本間俊雄，髙崎一美:橋梁の設計・連続体，構造形態の創生と最適化セミナー資料

3)三井和男：セル・オートマトンによる構造システムの自律的と最適化，日本建築学会構造系論文集，No. 593，pp．73-79，2005．1

4)崔昌禹，大森博司，佐々木睦朗：拡張 ESO 法による構造形態の創生，日本建築学会構造系論文集，No. 576，pp．79-86，2004．2

構造解析研究室