

HMPS 法と IESO 法を用いた有限変形を考慮した コンプライアントメカニズムのトポロジー最適化 TOPOLOGY OPTIMIZATION OF COMPLIANT MECHANISM CONSIDERING FINITE DEFORMATION USING HMPS METHOD AND IESO METHOD

大坪悠登*
Yuto OTSUBO*

In this paper, a topology optimization method of compliant mechanisms considering geometric nonlinearity is proposed. In this method, HMPS (Hamiltonian Moving Particle Semi-implicit) method, which is one of particle methods, is used for the analysis considering geometric nonlinearity. IESO (Improved Evolutionary Structural Optimization) method is used for the topology optimization. In this paper, we show the objective function and the sensitivity coefficient that are adapted to the topology optimization of compliant mechanism using IESO method. It will be shown by several numerical examples that the proposed method is very robust and computationally efficient for the topology optimization of compliant mechanisms.

Keywords : *Compliant mechanism, Topology optimization, IESO method, HMPS method, Geometric nonlinearity*
コンプライアントメカニズム, トポロジー最適化, IESO 法, HMPS 法, 幾何学的非線形

1. はじめに

3次元の直方体固定設計領域から力学的合理性を有する多様な構造形態を創生できる連続体の位相最適化手法は、近年、幅広い分野に応用されつつある。藤井ら^{1,2)}は、このような位相最適化手法として、ESO（進化的構造最適化）法を改良した IESO（Improved Evolutionary Structural Optimization）法を提案し、建築構造の形態創生手法の一つとして一般への普及を目指している。この IESO の利点は、最適化のパラメータの細かい調整なしにほぼ確実に明確な解形態が得られることにある。そこで本研究では、本手法の汎用性をさらに高めるために、剛性最大化問題に比較して解形態を得ることが格段に難しくなるコンプライアントメカニズム（弾性変形機構）の位相最適化問題への適用を試みる。

コンプライアントメカニズムの位相最適化は、1997年に西脇ら³⁾が、HDM（Homogenization Design Method）を用いた方法を提案して以降大きな発展を遂げ、様々な分野に応用が進んでいる。手法的には、最近では、レベルセット法にもとづく方法が主流で、2008年の山田らの論文⁴⁾や2016年の西野らの論文⁵⁾に周辺研究がまとめられている。また、2014年にはLiとHuangら^{6,7)}によってBESO法を用いた手法が提案され、3次元問題への拡張もなされている。一方、建築分野への応用としては、2000年と2007年に、藤井ら^{8,9)}が、HDMを用いた位相最適化手法を示し、これを制震機構の形態創生に応用している。また、大崎ら^{10,11)}は、骨組構造における位相最適化手法を示し、これを免震機構の形態創生に応用している。

ところで、このようなコンプライアントメカニズムの形態創生で問題となるのは、メカニズムの変形は有限変形であるのに対し、連続体を対象とするほとんどのコンプライアントメカニズムの位相最適化手法は微小変形理論にもとづいている点である。したがって、得られた形態が有限変形に対して最適なかどうかは別の検証が必要となる。このため、コンプライアントメカニズムの形態創生に関しては、有限変形を考慮できる手法の開発が望まれている。

このような有限変形を考慮した位相最適化に関する先行研究としては、眞鍋、西脇ら¹²⁾が、粒子法（MPS法）とレベルセット法を組み合わせた有限変形を考慮できる位相最適化手法を提案し、小谷、西脇ら¹³⁾が、これをコンプライアントメカニズムの位相最適化手法に発展させている。しかし、これらは2次元問題を対象としていたため、藤井ら¹⁴⁾は、MPS法の発展手法であるHMPS法とIESO法を組み合わせた3次元の位相最適化手法を提案した。そこで本論文では、この前論文¹⁴⁾で提案した手法をコンプライアントメカニズムの位相最適化手法に発展させる。

また、これまでのコンプライアントメカニズムの位相最適化に関する論文³⁻⁷⁾では、変位インパーターやコンプライアントグリッパーなど、比較的解形態が得られやすい解析例のみが示されている場合が多い。そこで本論文では、このような基本的な例題の他に、藤井らが文献^{8,9)}で示しているような微小変形理論にもとづく方法では容易には解が得られない例題に対しても、有限変形を考慮することでより容易に解が得られることを検証する。

*近畿大学大学院 システム工学研究科大学院生

Graduate Student, Graduate School of Systems Engineering, Kindai University

以下、本論文2章では、HMPS法の概要を示し、3章では、IESO法の概要を示す。4章では、コンプライアントメカニズムの位相最適化問題の定式化とIESO法に用いる感度指標の計算法を示す。5章では、2次元および3次元の解析例を示し、本手法の有効性を検証する。6章では以上のまとめを述べ結論を導く。

2. HMPS法の概要

本論文で用いるHMPS法は、鈴木、越塚¹⁵⁾によって開発され、近藤ら¹⁶⁾および菊池ら¹⁷⁾によって改良を加えられた方法である。

本方法では、まず、Fig.1に示すような初期時刻の粒子配置における粒子*i*と粒子*j*の相対位置ベクトルを \mathbf{r}_{ij}^0 とし、粒子が運動後の現在時刻の粒子配置における粒子*i*と粒子*j*の相対位置ベクトルを \mathbf{r}_{ij} とする。このとき、 \mathbf{r}_{ij}^0 と \mathbf{r}_{ij} の関係は、変形勾配テンソル \mathbf{F}_i を用いて次式のように表される¹⁸⁾。

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{F}_i \mathbf{r}_{ij}^0 \quad (1)$$

この時、現在時刻の粒子*i*近傍の変形は、複数の粒子*j*との関係から定まる。そこで、MPS法¹⁹⁾では、粒子*i*を中心とする影響半径を与え、その影響半径内の粒子との相互関係から変形を定義する。すなわち、粒子*i*と複数の粒子*j*の関係を次式の重み関数 w_{ij}^0 を用いて重み付けする。

$$w_{ij}^0(|\mathbf{r}_{ij}^0|) = \begin{cases} 1 - (|\mathbf{r}_{ij}^0|/r_e) & (0 < |\mathbf{r}_{ij}^0| < r_e) \\ 0 & (r_e \leq |\mathbf{r}_{ij}^0|) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r_e は影響半径を表し、粒子間距離 l_0 の倍数で与える。なお、本論文では、 r_e を粒子間距離 l_0 の2.1倍に設定する¹⁴⁾。

また、HMPS法¹⁵⁻¹⁷⁾では、次式の誤差関数 e_i が最小となる \mathbf{F}_i を粒子*i*の変形勾配テンソルとして定義する。

$$e_i(\mathbf{F}_i) = \sum_j |\mathbf{F}_i \mathbf{r}_{ij}^0 - \mathbf{r}_{ij}|^2 w_{ij}^0 \quad (3)$$

すなわち、(3)式の最小条件から \mathbf{F}_i は次式から計算される¹⁴⁾。

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{r}_{ij}^0 w_{ij}^0 \left(\sum_j \mathbf{r}_{ij}^0 \otimes \mathbf{r}_{ij}^0 w_{ij}^0 \right)^{-1} = \left[\sum_j \mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{r}_{ij}^0 w_{ij}^0 \right] \mathbf{A}_i^{-1} \quad (4)$$

ここに、

$$\mathbf{A}_i = \sum_j \mathbf{r}_{ij}^0 \otimes \mathbf{r}_{ij}^0 w_{ij}^0 \quad (5)$$

次に、弾性体における粒子*i*の支配運動方程式は次式で表される。

$$\rho_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = - \frac{\partial W_i}{\partial \mathbf{r}_i} \quad (6)$$

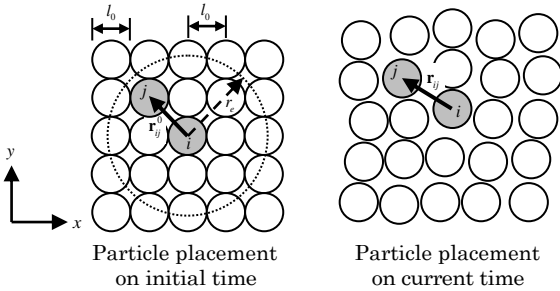


Fig.1 Particle placement on initial time and on current time

ここで、 ρ_i は粒子*i*の密度、 \mathbf{v}_i は粒子*i*の速度ベクトル、 \mathbf{r}_i は粒子*i*の現在時刻の位置ベクトルである。また、 W_i は粒子*i*の歪みエネルギー関数で、次式で表される。

$$W_i = \mathbf{\Pi}_i : \mathbf{F}_i \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{\Pi}_i$ は粒子*i*の第1 Piola-Kirchhoff 応力テンソルで、これを第2 Piola-Kirchhoff 応力テンソル \mathbf{S}_i で表すと次式となる。

$$\mathbf{\Pi}_i = \mathbf{F}_i \mathbf{S}_i \quad (8)$$

また、 \mathbf{S}_i は、等方均質弾性体の場合、Green-Lagrange 歪み \mathbf{E}_i を用いて次式で表される。

$$\mathbf{S}_i = 2\mu \mathbf{E}_i + \lambda \text{tr}(\mathbf{E}_i) \mathbf{I} \quad (9)$$

ただし、

$$\mathbf{E}_i = (1/2)(\mathbf{F}_i^T \mathbf{F}_i - \mathbf{I}) \quad (10)$$

ここに、 μ と λ はLaméの第一、第二定数である。

(7)、(8)式を(6)式に代入し、粒子*i*の歪みエネルギーを、粒子*i*を中心とする影響半径内の粒子との相互関係から計算するものとすれば、(6)式は次式のように表せる¹⁷⁾。

$$\rho_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = - \sum_j \mathbf{\Pi}_j : \frac{\partial \mathbf{F}_j}{\partial \mathbf{r}_i} = \sum_j (\mathbf{F}_i \mathbf{S}_i \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{r}_{ij}^0 + \mathbf{F}_j \mathbf{S}_j \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{r}_{ij}^0) w_{ij}^0 \quad (11)$$

また、上式に静的解に収束させるための減衰力を付加すると、

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i} \left[\sum_j (\mathbf{F}_i \mathbf{S}_i \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{r}_{ij}^0 + \mathbf{F}_j \mathbf{S}_j \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{r}_{ij}^0) w_{ij}^0 + \mathbf{f}_{i,\text{VISCO}} \right] \quad (12)$$

となる。ここに、

$$\mathbf{f}_{i,\text{VISCO}} = \rho_i \nu_{\text{MPS}} \frac{2d}{\lambda_{\text{MPS}} n^0} \sum_j (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) w_{ij}^0 \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{MPS}} = \sum_j |\mathbf{r}_{ij}^0|^2 w_{ij}^0 / \sum_j w_{ij}^0 \quad (14)$$

ただし、 ν_{MPS} は粘性係数、 d は空間次元数、 n^0 は初期粒子配置において十分内部にある粒子数密度を表す¹⁹⁾。なお、本論文では、(13)式の ν_{MPS} を0.02に設定する¹⁴⁾。

(12)式の右辺にステップ外力 $\mathbf{f}_{i,\text{STEP}}$ を粒子質量 $m_i (= \rho_i l_0^3)$ で割った加速度を加え、次式による更新を行えば、時々刻々の動的応答解析が可能となる。

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \mathbf{v}_i^k + \Delta t \left[\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} \right]^k \quad (15)$$

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^k + \Delta t \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (16)$$

また、本論文では、静的解への収束を早めるため、次式の総歪みエネルギー

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\mathbf{S}_i : \mathbf{E}_i) l_0^3 \quad (17)$$

を参照し、(15)、(16)式の更新で V が増加に転じた場合に、すべての粒子の速度をゼロにするアルゴリズムを導入する¹⁶⁾。

また、静的解への収束判定は、(15)、(16)式の更新100回ごとの次式のコンプライアンス C

$$C = \sum_{i=1}^N \mathbf{d}_i^T \mathbf{f}_{i,\text{STEP}}, \quad \mathbf{d}_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^0 \quad (18)$$

の変化量(更新1回ごとの増減値(絶対値)の100回の総和で定義)が、初期の100回の変化量の1%以下となった場合を静的な釣り合い状態と見なし、HMPS法の計算を終了する¹⁴⁾。

3. IESO法の概要

本論文に用いる位相最適化手法は、ボクセル有限要素法にもとづいており、物体領域を包含する直方体固定設計領域を考え、これを均等なボクセル（以下要素と呼ぶ）で分割する¹⁾。ただし、本論文では、HMPS法を適用するため、要素を立方体とし、要素の頂点（節点）に粒子を配置する。したがって、要素の各辺の長さは l_0 となる。そして、物体領域は要素の材料密度の有無（1/0）で与える。

IESO法^{1,2)}は、固定設計領域の要素の材料密度を、最適化の各ステップで次式のような閾値を用いて除去していく方法である。

$$\rho_i^e = 0 \quad \text{if} \quad \alpha_i < X_{cr} \quad ; i = 1, \dots, N_L \quad (19)$$

ここに、 ρ_i^e と α_i は要素 i の材料密度（0 or 1）と感度指標、 N_L は残存要素数、 X_{cr} は次式で定義される閾値である。

$$X_{cr} = \alpha_{av} - \eta \cdot \phi \quad (20)$$

ただし、 α_{av} と ϕ は残存要素の感度指標の平均値と標準偏差。また、 η は除去量を制御するパラメータで、IESO法では各ステップの目標除去要素数に近くなるようにプログラム内で自動計算される^{1,2)}。また、この各ステップの目標除去要素数は、入力データとして除去率を与え、これと各ステップの残存要素数を掛けたものとなる。

また、IESO法では、よりシンプルな形態を求めるためにBESO法²⁰⁾に用いられているフィルタリング法を用いる。このフィルタリング法は、まず要素の感度を節点の感度に変換し、要素中心から影響半径（ここでは $b_r \times l_0$ で定義する）内の節点感度の重み付き平均から要素感度を求めるものである。詳しくは文献1)を参照。

また、以上のIESO法は、非常に収束は速いが、得られた解形態の収束（進化）が十分でない場合は、CA法でノイマン近傍要素を増やし、そこから再度IESO法で削るという過程を繰り返す仕上げアルゴリズム²⁾を適用する。

4. 位相最適化問題の定式化と感度指標の計算法

本解析では、最適化の各ステップでFig.2(a)~(d)に示す4ケースの解析を行う。ここでは、入力点 i に与えられた力を F_{in} とし、出力点 j の応答を Δ_{out} とする。ここで、4ケースの解析はそれぞれFig.2(a)は入力点に入力荷重、出力点に出力応答があるときの原問題の解析、Fig.2(b)は仮想仕事の原理を用い、出力点に仮想荷重を与えることで出力点の変位 Δ_{out} を求めるための解析、また、Fig.2(c)は入力点の力を出力点に伝える剛性を確保するための解析、Fig.2(d)は出力点の反力を入力点に伝える剛性を確保するための解析である。

本研究では、コンプライアントメカニズムを創生する最適化問題の目的関数を(21)式のように定義する。ただし、ここでは有限要素法の表記を用いている。

$$f\{\rho\} = -w \mathbf{d}^{(2)T} \mathbf{K} \mathbf{d}^{(1)} + \frac{(\mathbf{d}^{(3)T} \mathbf{K} \mathbf{d}^{(3)} + \mathbf{d}^{(4)T} \mathbf{K} \mathbf{d}^{(4)})}{F_{in}} \quad (21)$$

ここで、 \mathbf{K} と $\mathbf{d}^{(1)}$ 、 $\mathbf{d}^{(2)}$ 、 $\mathbf{d}^{(3)}$ 、 $\mathbf{d}^{(4)}$ は、Case1~4の問題の全体剛性マトリクスと節点変位ベクトルを表す。また、(21)式の第1項は出力点の応答変位 Δ_{out} に重み係数 w を掛けたものを表し、第2項はCase3, Case4の剛性（コンプライアンス）の和を入力荷重で割ったものを表す。また、 ρ は(22)式で示される設計変数（要素密度）を示し、(23)式に示す要素密度の総和を要素数で割った総密度比が制約条件となる。

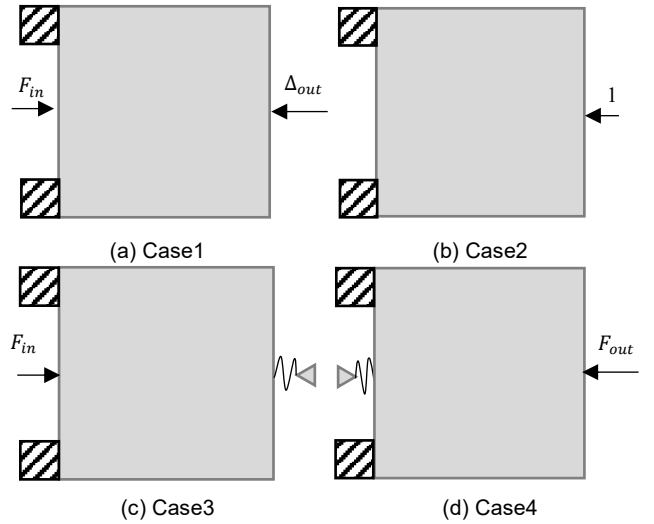


Fig.2 Analysis condition of compliant mechanism

$$\rho = \{\rho_1 \dots \rho_i \dots \rho_N\} \quad \rho_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\rho_i}{N} \leq \bar{m} \quad (23)$$

ここで、 i 番目要素の要素剛性マトリクスは、

$$[\mathbf{k}_i(\rho_i)] = \rho_i [\mathbf{k}_i^0] \quad (24)$$

と表すことができる。この場合、(21)式の目的関数の感度は(24)式を用いて次式のように導かれる。

$$\frac{\partial f(\rho_i)}{\partial \rho_i} = w \mathbf{d}_i^{(2)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(1)} - \frac{(\mathbf{d}_i^{(3)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(3)} + \mathbf{d}_i^{(4)T} \mathbf{k}_i^0 \mathbf{d}_i^{(4)})}{F_{in}} \quad (25)$$

ここで、(25)式の各項は、Case1~4の解析で得られる各要素の歪みエネルギーの2倍から計算されるものであることがわかる。したがって、本提案手法では、(25)式の感度をHMPS法によって求め、この感度をもとにIESO法による要素除去を行う。また、Fig.2のCase3,4に示される拘束点のバネは、拘束点の粒子速度を自由の場合の1/100にすることで模擬する。したがって、本解析の入力パラメータは、総密度制約 \bar{m} とIESO法の除去率、影響半径、それに出力応答の重み係数 w のみである。ただし、重み係数の調整は難しいため、本論文では以下のようにプログラム内で重み係数の値を自動で調整する。

まず、入力データとして出力重みの上限値と下限値をそれぞれ W_h 、 W_l とすると初期ステップの重み係数 w は $w = W_l$ となる。初期ステップの出力点変位を $d_j^{(0)}$ 、現ステップの出力点変位を d_j とすると各ステップの重み係数は

$$w = \begin{cases} w - \Delta w t & \text{if } \Delta d_j \geq 0 \\ w + \Delta w t & \text{if } \Delta d_j < 0 \end{cases} \quad (26)$$

となる。ここで、 $\Delta w t$ は重みの変動値であり、本論文では重み係数の上限値の1/10としている。また、 Δd_j は初期ステップと現ステップの出力点変位の差であり、 $\Delta d_j = d_j - d_j^{(0)}$ で表される。なお、重みの値ははじめに設定した上限値、下限値を超えて変動することがないように設定する。これにより、重みの上限値と下限値の範囲内で、出力点の変位が拡大されているかどうかで重みを自動で変動させていくことができる。これにより、重みの上限値と下限値さえ与えられ

ば、解析途中で細かい調整をする必要がなく、より簡単に解析を行うことができる。

5. 解析例

まず、以上の提案手法の有効性を検証するため、文献4),6)等を取り上げられている基本的な例題に対して解析を行う。ただし、本論文で開発したプログラムは3次元専用であるため、プリプロセッサの都合上、2次元の例題は板厚方向を2要素(ボクセル)に分割し、面外方向の自由度を拘束することで解析を行う。

解析モデルの諸元は、ヤング係数を205GPa、ポアソン比を0.3、単位体積質量を7850Kg/m³とする。また、本論文では、要素の各辺の長さを1mとし、HMPS法の計算時間を現実的なものとするため、プログラム内で要素長を1/10³、ヤング係数と外力を1/10⁵とするスケーリングを行っている。Fig.3に、変位インバーターの例題の設計領域および荷重条件・境界条件を示す。また、固定設計領域の分割数は52×50×2とし、各接点に粒子を配置する。ただし、この内、左端の2×50×2要素は粒子法で固定境界を表すための要素となる(粒子法で回転拘束を与えるための処置)。Fig.4は、総密度比を0.2とした場合の収束解と変形後の位相を示す。解析諸元は、除去率を0.01、影響半径倍率を1、重み上限を5、重み下限を2とする。Fig.5は2次元のコンプライアントグリッパーの例題の設計領域および荷重条件、境界条件を示す。また、固定設計領域の分割数は52×25×2とする。ただし、左端の2×2×2要素も上記の例題と同様に粒子法で固定境界を表すための要素となる。また、本例題は上下に対称な構造であるため上部のみの1/2解析としている。Fig.6に総密度比を0.12とした場合の収束解と変形後の位相を示す。

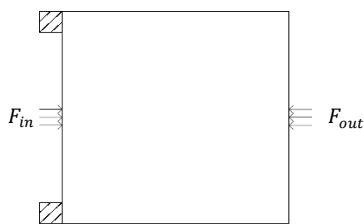


Fig.3 Analysis object

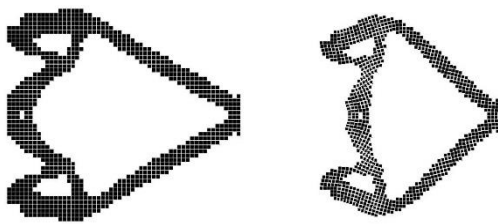


Fig.4 Analysis result and deformation

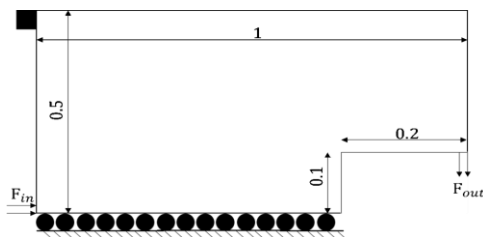


Fig.5 Analysis object

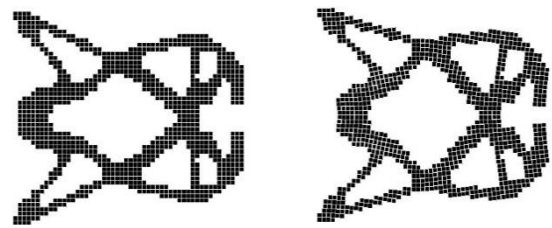


Fig.6 Analysis result and deformation

これらの2次元の例題の解析結果より、提案手法によるコンプライアントメカニズムの創生は可能であり、得られた解形態にはヒンジがなく、連続した形態であることがわかる。また、変形図からも初めの想定通りの変形挙動が見て取れる。本解析では、トポロジー最適化の解析パラメータとしては、総密度比、除去率、影響半径倍率などのパラメータを設定したが、コンプライアントメカニズムの創生に関するパラメータは出力重みのみであり、容易に解形態を求めることができた。また、これらの解形態は文献4),6)に示されている解形態とほぼ同様の解形態であり、提案手法による2次元のコンプライアントメカニズムの創生は有効であることが検証された。

次に提案手法の3次元問題における有効性を検証するため、Fig.5の解析例を3次元問題に拡張し、解析を行う。解析モデルの諸元は先ほどと同様にヤング係数を205GPa、ポアソン比を0.3、単位体積質量を7850Kg/m³とする。

Fig.7にFig.3に示すコンプライアントグリッパーの例題のZ方向分割数を20要素とし、3次元に拡張した例題の設計領域および荷重条件、境界条件を示す。固定設計領域の分割数は52×25×10とし、各接点に粒子を配置する。解析モデル図の便宜上、固定境界を示す要素は描画していないが、3次元例題においても2次元と同様に左端の2×2×10要素は粒子法で固定境界を表すための要素として配置している。Fig.8には総密度比を0.15とした場合の収束解と変形後の位相を示す。ここでの解析諸元は除去率を0.01、影響半径倍率を1、重みを2の固定値とする。

Fig.9には、同じく3次元のコンプライアントグリッパーの例題の要素分割数を変えた例題の設計領域、荷重条件、境界条件を示す。この解析モデルの分割数は102×50×40とし、各接点に粒子を配置する。Fig.10には総密度比を0.12とした時の収束解と変形図、Fig.11には3DCADモデルとして表わしたものを示す。解析諸元は除去率を0.01、影響半径倍率を1、重みを2の固定値とする。この例題についても左端の2×2×40要素は粒子法で固定境界を表すための要素としている。

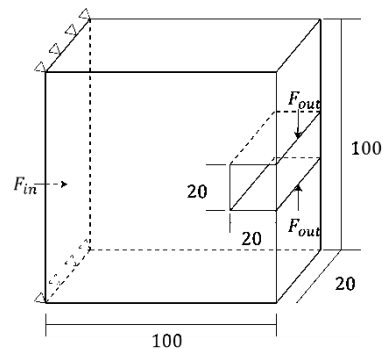


Fig.7 Analysis object

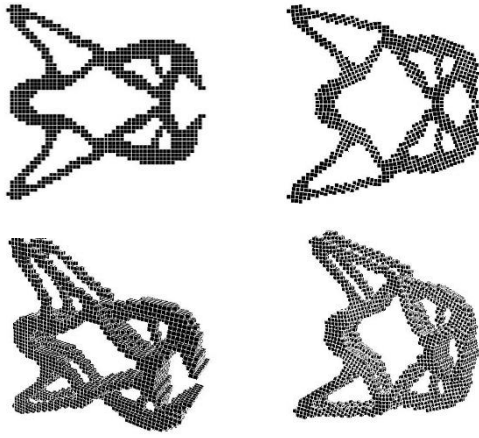


Fig.8 Analysis result and deformation

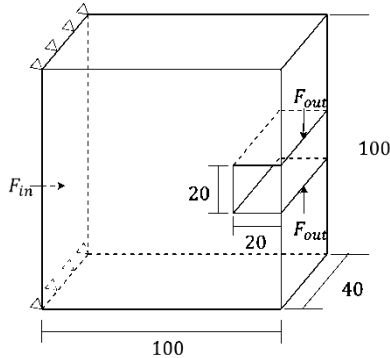


Fig.9 Analysis object

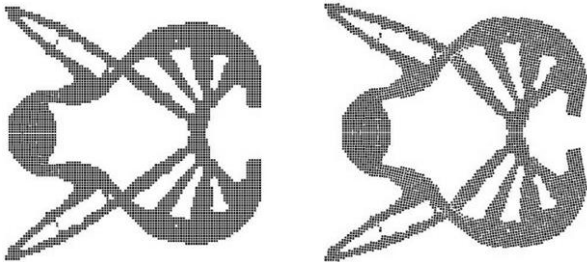


Fig.10 Analysis result and deformation

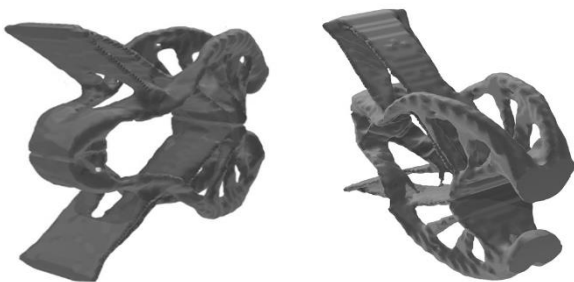


Fig.11 3DCAD model

以上の解析より、3次元例題に対しても問題なく解形態が得られ、変形も想定通りの変形となっていることが分かる。ただし、これらの例題を比較してみると、得られた解形態は多少異なる形態であることがわかる。X.Y.Z方向の設計領域の長さの比率が同じで、分割数が2倍になっている2つの例題であるが、解析時のパラメータも同じ値を与えた場合、通常の剛性最大化問題であれば、ほぼ同様の解形態が得られることが予想される。これは、剛性最大化問題と比べてコンプライアントメカニズムの解析では応力状態が複雑になって

いることや、初期値依存性が激しいといったことによる違いであると考えられる。

次に微小変形理論では容易に解を求めることができない例題について2次元問題として解析を行う。解析モデルの諸元は、ヤング係数を205GPa、ポアソン比を0.3、単位体積質量を7850Kg/m³とする。また、本論文では、要素の各辺の長さを1mとし、HMPS法の計算時間を現実的なものとするため、プログラム内で要素長を1/10³、ヤング係数と外力を1/10⁵とするスケーリングを行っている。

Fig.12に設計領域と荷重条件、境界条件を示す。固定設計領域の分割数は32×20×2とし、各接点に粒子を配置する。また、左端の2×20×2要素は粒子法で固定境界を表すための要素として配置している。

Fig.13に総密度比を0.45とした時の収束解と変形図を示す。解析諸元は除去率を0.01、影響半径倍率を1、出力重みの上限値を30、下限値を2とする。

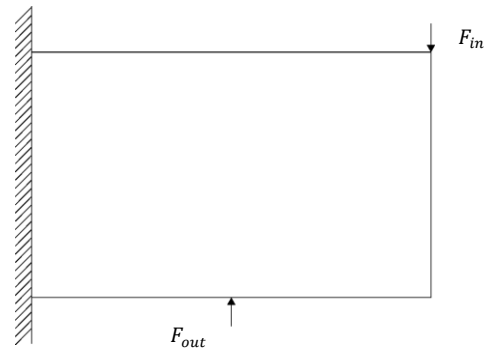


Fig.12 Analysis object

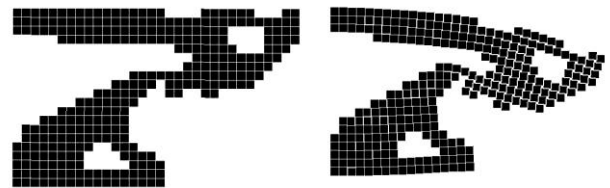


Fig.12 Analysis result and deformation

解析結果を見ると、入力点の荷重を与えると、弾性変形により中央部分がリンクの役割を果たし、出力点に生じていることがわかる。有限変形を考慮できる提案手法ではこのような例題においても明確な解が得られることがわかった。

6. まとめ

本論文では、文献14)で示されている有限変形を考慮した3次元の位相最適化手法をコンプライアントメカニズムに発展させた。そして、2次元および3次元の解析例により、提案手法の有効性を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 2次元問題の既往の解析例との比較により、提案手法はほぼ同様の形態が得られることがわかった。また、変形挙動についても想定していた変形が得られる形態となっていることがわかった。
- (2) 3次元問題の解析例より、2次元と同様に明確な解形態が得られることがわかった。また、出力重みのみの調整で解析を行うことができるため解析自体は容易に行うことができることがわかった。

謝辞

本解析のプリプロセッサには、(株) くいんとのVOXCELCONを利用している。(株) くいんとの石井恵三氏、月野誠氏、英山寛之氏の研究協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Niiuchi, Y., Matsumoto S., Fujii, D.: Topology optimization of 3D structures using Improved ESO method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.81, No.723, pp.851-858, 2016. 5 (in Japanese)
新内洋平, 松本慎也, 藤井大地: 改良型 ESO 法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.851-858, 2016.5
- 2) Niiuchi, Y., Matsumoto, S., Fujii, D.: Computational morphogenesis of building structures using IESO method - Natural shape of buildings which resist vertical and seismic load, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.82, No.731, pp.97-103, 2017. 1 (in Japanese)
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
- 3) Nishiwaki, S., Fecher, M. I., Min, S. and Kikuchi, N.: Structural Optimization Considering Flexibility (1st report, Formulation of Equation and Application to Compliant Mechanisms), Transactions of the Japan society of mechanical engineers. C., Vol.63, No.612, pp.81-88, 1997. 8 (in Japanese)
西脇眞二, Frecher, M. I., Min, S., 菊池昇: 柔軟性を考慮した構造の最適化 (第 1 報 定式化とコンプライアントメカニズムへの応用), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.63, No.612, pp.81-88, 1997.8
- 4) Yamada, T., Yamasaki, S., Nishiwaki, S., Izui, K. and Yoshimura M.: Structural Optimization of Compliant Mechanisms Based on the Level Set Method, Transactions of JSCES, Paper No.20080001, 2008.1 (in Japanese)
山田崇恭, 山崎慎太郎, 西脇眞二, 泉井浩, 吉村允孝: レベルセット法に基づくコンプライアントメカニズムの構造最適化, Transactions of JSCES, Paper No.20080001, 2008.1
- 5) Nishino, A., Kogiso, N., Otomori, M., Yamada, T. and Nishiwaki, S.: Robust topology optimization of compliant mechanism using multiobjective optimization method, Transactions of the JSME, Vol.82, No.840, 2016 (in Japanese)
西野 敦, 小木曾 望, 乙守 正樹, 山田 崇恭, 西脇 眞二: 多目的最適設計法を用いたコンプライアントメカニズムのロバストトポロジー最適設計, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.840, 2016
- 6) Li, Y., Huang, X., Xie, Y. M., Zhou, S. W.: Evolutionary topology optimization of hinge-free compliant mechanisms, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.86, pp.69-75, 2014
- 7) Huang, X., Li, Y., Zhou, S. W., Xie, Y. M.: Topology optimization of compliant mechanisms with desired structural stiffness, Engineering Structures, Vol.79, pp.13-21, 2014
- 8) Fujii, D., Ejima, S., Kikuchi, N.: Topology optimization of compliant mechanisms using the homogenization design method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.65, No.528, pp.99-105, 2000. 2 (in Japanese)
藤井大地, 江島晋, 菊池昇: 均質化設計法を用いた弾性変形機構の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.528, pp.99-105, 2000.2
- 9) Fujii, D., Tanizawa, T.: Creation of damping mechanisms using topology optimization method of continuum, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.72, No.619, pp.73-79, 2007. 9 (in Japanese)
藤井大地, 谷澤 毅: 連続体の位相最適化手法を用いた制震機構の創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.619, pp.73-79, 2007. 9
- 10) Ohsaki, M., Nishiwaki, S.: Shape Design of Bistable Compliant Mechanism by Utilizing Snapthrough Behavior, Transactions of the JSME. A 70 (700), pp.1689-1694, 2004. 12 (in Japanese)
大崎純, 西脇眞二: スナップスルーを利用したバイステーブルコンプライアントメカニズムの形状設計法, 日本機械学会論文集 (A 編), 70 巻, 700 号, 2004. 12
- 11) Kinoshita, T. Ohsaki, M.: Shape optimization of compliant mechanisms for seismic Isolator model, Journal of Structural and Construction Engineering, Transaction of AIJ, Vol.75, No.647, pp.113-119, 2010.1 (in Japanese)
木下拓也, 大崎純: 柔な構造による免震デバイスモデルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp.113-119, 2010.1
- 12) Manabe, M., Yamada, T., Izui, K. and Nishiwaki, S.: Topology Optimization Incorporating Level Set Boundary Expressions Using a Particle Method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol.77, No.784, pp.2054-2066, 2011. 12 (in Japanese)
真鍋匡利, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二: 粒子法を用いたレベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 (A 編), 77 巻, 784 号, pp.2054-2066, 2011. 12
- 13) Kotani, T., Manabe, M., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S.: Structural Optimization of Compliant Mechanisms Using a Level Set-Based Topology Optimization combined with a Particle Method, Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science 17, 4p, 2012. 5
小谷高代, 真鍋匡利, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇 眞二: レベルセット法に基づくトポロジー最適化と粒子法の組み合わせによるコンプライアントメカニズムの構造最適化, 計算工学講演会論文集, Vol.17, 2012. 5
- 14) Fujii, D., Yamashita, M., Manabe, M.: Topology optimization for elastic structures with finite deformation using HMPS method and IESO method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.84, No.764, 2019. 10 (in Japanese)
藤井大地, 山下真輝, 真鍋匡利: HMPS 法と IESO 法を用いた有限変形を伴う弾性構造体の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.764, 2019.10
- 15) Suzuki, Y., Koshizuka, S.: Development of a Particle Method for Nonlinear Elastodynamics, Transactions of JSCES, Paper No.2007001, Jan., 2007 (in Japanese)
鈴木幸人, 越塚誠一: 非線型弾性体に対する粒子法の開発, 日本計算工学会論文集, 2007.1
- 16) Kondo, M., Suzuki, Y. and Koshizuka, S.: Suppressing Local Oscillation for Elastic Analysis based on Least Square Approximation using Particles, Transactions of JSCES, Paper No.20070031, 2007.12 (in Japanese)
近藤雅裕, 鈴木幸人, 越塚誠一: 最小自乗近似による粒子法弾性解析手法の振動抑制, 日本計算工学会論文集, 2007.12
- 17) Kikuchi, T., Michiwaki, Y., Koshizuka, S., Kamiya, T., Osada, T., Jinno, N. and Toyama, Y.: Simulation of Uniaxial Compression Based on Hamiltonian MPS Method with Wall Boundary Condition Using Penalty Method, Transaction of JSCES, Paper No.20140010, 2014.9 (in Japanese)
菊池貴博, 道脇幸博, 越塚誠一, 神谷哲, 長田堯, 神野暢子, 外山義雄: 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, 2014.9
- 18) Hisada, T.: Foundation of tensor analysis for nonlinear finite element method, Maruzen, 1992 (in Japanese)
久田俊明: 非線型有限要素法のためのテンソル解析の基礎, 丸善, 1992
- 19) Koshizuka, S.: Particle method: Maruzen, 2005 (in Japanese)
越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005
- 20) Huang, X., Xie, Y. M.: Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method, Finite Elements in Analysis and Design 43 (2007) 1039-1049