

# BIM/CIM 効果を向上させる建設 3D プリント構造物の構造最適設計法の提案

Study on Design Method for 3D-printing Structures targeting BIM/CIM systems

名古屋大学大学院工学研究科 教授 加藤 準治

## （研究計画ないし研究手法の概略）

### 1. 研究の背景

近年、労働者不足問題の改善やこれからの脱炭素社会を見据えて、DX（デジタルトランスフォーメーション）が様々な分野で進められている。建設分野においても同様の取り組みが行われており、その試みの1つが3次元データを基盤とするCIM/BIMの本格的な導入であろう。特に最近では、建設3Dプリンタ（以下、3DPに略）による技術開発が世界規模で進められ、DX化が急速に進められている（図1）。また、積層造形技術の目覚ましい進歩に伴い、さまざまな3Dプリンタ方式が登場し、機械、航空宇宙、医工学分野を中心として研究開発が盛んに行われている。3Dプリンタの最大の特徴は、複雑形状でも比較的容易に造形が可能にある点にある。そして、その形状自由度をうまく活用するために、目的に見合った造形物の最適形状を事前に設計で求めておけば、これまでにない優れた性能を引き出すことが可能となる。しかし、経験則や実績に基づくこれまでの構造設計法の枠組みでは、最適形状を求めることは不可能であり、数理的な設計アプローチが必要不可欠となる。それを可能にする設計法の代表格が、有限要素法を用いた「トポロジー最適化」である。トポロジー最適化は、ある工学的な目的に対し、それを達成する構造の最適形状を力学計算に基づくコンピュータシミュレーションによって見出すためのパワフルな設計理論である。

ところで、積層造形機の緻密化と精密化により、構造物の形状（構造幾何）だけでなく材料メゾ構造（材料幾何）を制御し、所望の特性を持つ材料の生産が可能になっている。このような背景から、構造と材料という2つの異なるスケールの力学特性や幾何構造を同時に考慮しつつ、それらの最適な幾何形状を求めるための力学計算が注目されている。この計算手法は学術的に「マルチスケールトポロジー最適化」と呼ばれている。マルチスケールトポロジー最適化は、通常は材料のメゾ・マイクロ構造の設計に有限要素法（FEM）に基づく均質化法によって計算される。しかし、FEMに基づく均質化法を実構造物の設計に適用するとき、計算コストが膨大となることから実用性に乏しい。そのため、有限要素メッシュを極度に粗くするなどして計算負荷を軽減させるような方法が取られてきた。これは、緻密化と精密化が進む3Dプリンタの技術的進歩と相反することに他ならず、今後の3Dプリンタによるものづくりの障害となっている。



図1 (上) オランダで架設された3Dプリント鋼歩道橋, (下) RC柱の3Dプリント埋設型枠（清水建設）

## 2. 研究目的

本研究は、建設 3DP を念頭においた構造物の設計法として、マルチスケールトポロジー最適設計法の開発を目指すものである。提案手法は、高速フーリエ変換 (Fast Fourier transform: FFT) に基づく均質化法という、新しい材料設計法を活用したもので、本研究ではこれを「FFT 均質化によるトポロジー最適設計法」と称する。FFT 均質化法を活用したトポロジー最適設計法の開発は、学術的に未だ構築されておらず、はじめての試みとなる。本報告文では、開発手法を用いた最適化計算例を示し、その性能検証について報告する。

また、現在では金属材料や樹脂のみならず、セラミクス、セメント材料、シリコン・ゴム系材料、複合材料、砂を造形材料とする 3D プリンタが開発されている。本研究では、セメント等に埋め込まれる繊維補強材 (メゾ構造) を 3D プリンタで造形するものとし、その補強材の最適トポロジーを決定するための手法開発を行った。なお、本研究は基礎研究であることから、対象する問題を単純化している。ここでは、補強材の材料体積量に制約を課し、マクロ構造の剛性を最大にする最適化問題を設定した。提案手法の妥当性を検証するために、まずは FEM に基づく均質化法で得られた最適化結果と比較し、その後、計算時間とメモリ使用量に着目した比較検証を行った。

## 3. 提案手法の性能検証

### 3.1 実行環境および解析条件

解析に用いた CPU は Intel Xeon Gold 6136 (12 コア 24 スレッド, 3.0 GHz) であり, OpenMP によるスレッド並列計算を行った。また, 搭載しているメインメモリは 192 GB である。プログラムは C 言語で構築し, コンパイラは Intel C++ Compiler 18.3 を使用した。このとき, コンパイルオプション "-fast" を使用している。また, コーディングスキルがプログラムの実行性能に与える影響を可能な限り減らすため, コンパイラ付属の数値計算ライブラリを使用した。具体的には, 連立 1 次方程式ソルバーとして Intel PARDISO を, 高速フーリエ変換には Intel DFTI を使用した。数値材料試験における複数回の構造解析は, 同一の剛性マトリクス  $\mathbf{K}$  からなる連立方程式  $\mathbf{Ku} = \mathbf{f}$  に帰着することから, 直接法ソルバーである Intel PARDISO を用いることで 1 回分と同等の計算量で解くことができ, これにより比較対象である従来手法による解析を高速化した。2 次元のユニットセルに対し, 従来手法では 4 節点四辺形要素 (QUAD4), または 8 節点四辺形要素 (QUAD8) を用い, 3 次元のユニットセルには 8 節点六面体要素 (HEXA8), または 20 節点六面体要素 (HEXA20) を用いて離散化した。一方で, 提案手法では, ユニットセルをフーリエ変換における標本点に基づいて離散化しており, これをピクセル (ボクセル) 要素として扱っている。なお, マクロ構造解析は従来手法および提案手法のどちらの場合においても 2 次要素を用いた。解析対象とした

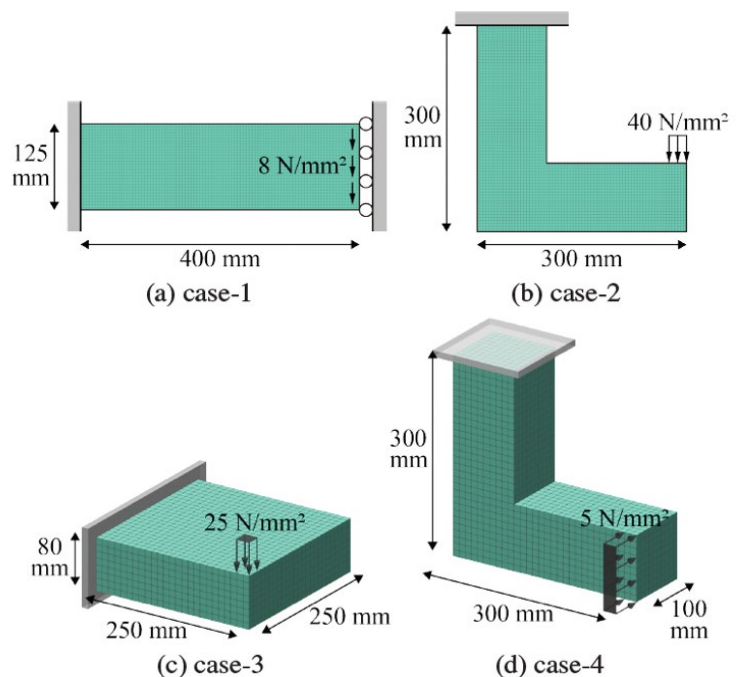


図 2 解析対象としたマクロ構造と境界条件

図 2 解析対象としたマクロ構造と境界条件

マクロ構造と境界条件を図 2 に示す．前述したようにこれらのマクロ構造は 2 次要素で構成されており，その要素数は 2 次元問題でそれぞれ 2880 要素，3 次元問題で 5000 要素である．

また，各辺の要素分割数を  $m^{[d]}$  と表し，すべての

の辺で等しいものとした．また，その値をメッシュの細かさ，すなわち解像度  $n_{res} (= m^{[1]} = m^{[2]} = m^{[3]})$  として定義する．この値は FFT の効率性から 2 のべき乗数を基本とし，2 次元問題では解像度  $n_{res} = 1024$  (要素数  $n_{ele} = 1048576$ ) を，3 次元問題では解像度  $n_{res} = 128$  (要素数  $n_{ele} = 2097152$ ) を最大とした．ただし，3 次元問題における従来手法による解析では，メモリ要求量がメモリ搭載量(192 GB)を超過してしまうことから実行可能な範囲の解像度でのみ解析を行った．材料パラメータと材料体積量については表 1 のとおりである．

表 1 材料パラメータと材料体積分率

|                | 材料-A | 材料-B  |
|----------------|------|-------|
| ヤング率 $E$ (GPa) | 1.0  | 100.0 |
| ポアソン比 $\nu$    | 0.3  | 0.3   |
| 材料体積分率 (%)     | 70   | 30    |

### 3.2 解析結果

従来手法および提案手法により最適化したトポロジーの例を図 3 に示す．得られたトポロジーを比較すると，幾何学的解釈の上で相違は見受けられず，2 次元，3 次元ともにほぼ同じ結果が得られることがわかった．また，図 4 は case-1 および case-3 を代表として，両手法における目的関数値の最適化ステップに対する推移を示している．2 次元問題の case-1 では両手法の推移がほぼ完全に一致しており，最終的な目的関数値の差は 0.3%，3 次元問題の case-3 では 4.1%の差が生じたがほぼ一致しているといえる．

次に，図 5, 6 は提案手法によって得られたトポロジーを解像度ごとに並べたものである．ここでは，誌面のスペースの関係上，3 次元問題の結果だけを示している．

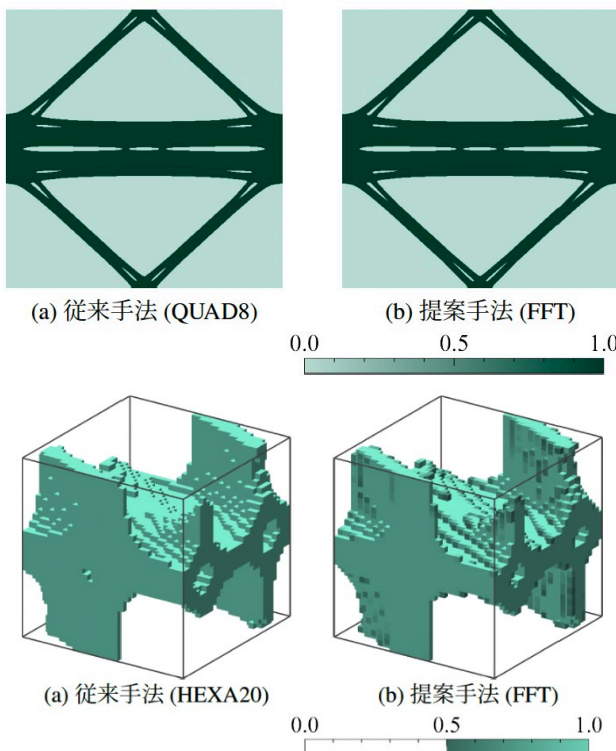
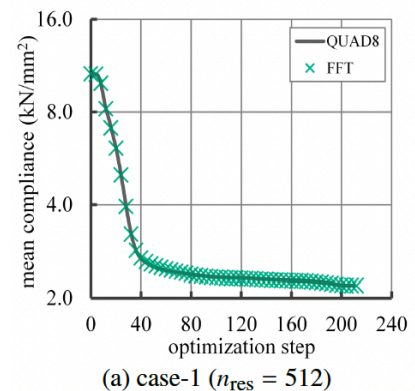
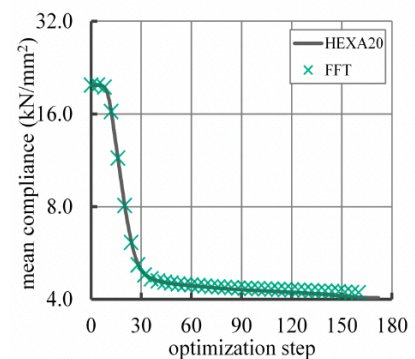


図 3 従来手法と提案手法による最適化結果の比較，  
(上) 2 次元 ( $n_{res} = 512$ )，(下) 3 次元 ( $n_{res} = 32$ )



(a) case-1 ( $n_{res} = 512$ )



(b) case-3 ( $n_{res} = 32$ )

図 4 目的関数の推移

トポロジーに着目すると、解像度が増加するにつれて曲面がなめらかに表現され、内部により多くの空洞が現れて位相が変化するという傾向が見られる。また、ここでは目的関数値の推移を示すグラフは割愛するが、解像度が増加するに従って目的関数値は単調減少することを確認した。これは、解像度の増加に伴って材料配置の表現性能が向上し、目的関数値をより小さくできる、すなわちマクロ構造の剛性をより大きくできるようになったためである。

以上から、提案手法を用いた場合は従来手法と概ね同一の信頼できる最適化結果が得られること、さらにユニットセルの解像度が増加するほど、より優れた構造が得られることが確認できた。

また、図7は、ユニットセルの解像度と最適化ステップあたりの平均計算時間の関係を示している。2次元問題に着目すると、提案手法は1次要素を用いた従来手法より1.1~1.6倍程度、2次要素を用いた従来手法より2.0~3.8倍程度速く解析を行える。

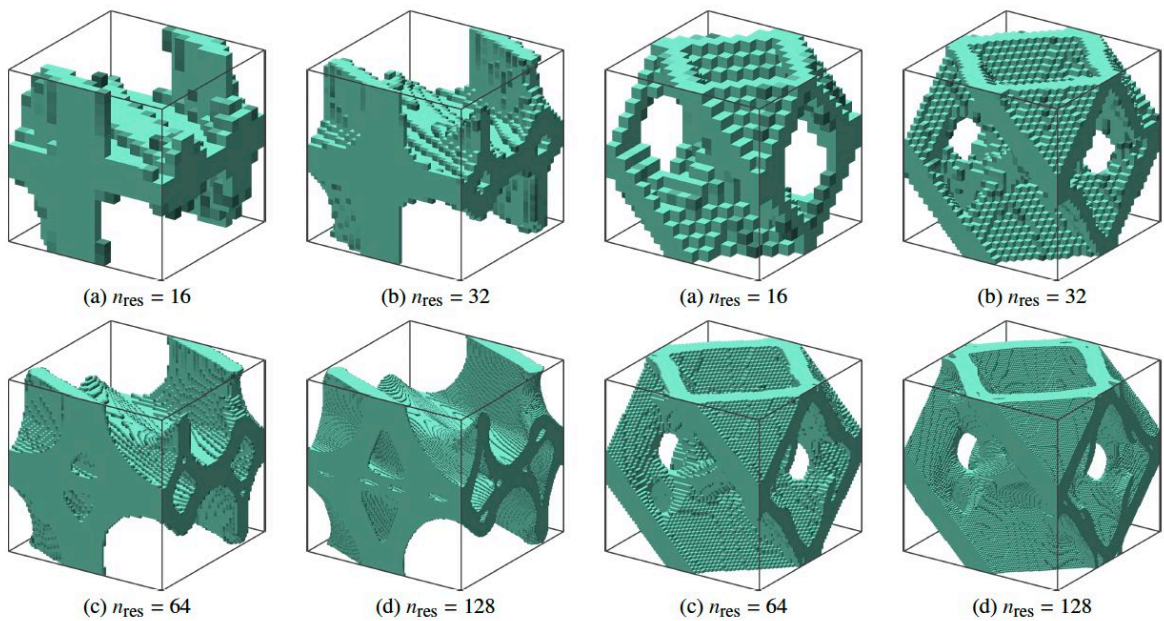


図5 提案手法により最適化したトポロジー(case-3) 図6 提案手法により最適化したトポロジー(case-4)

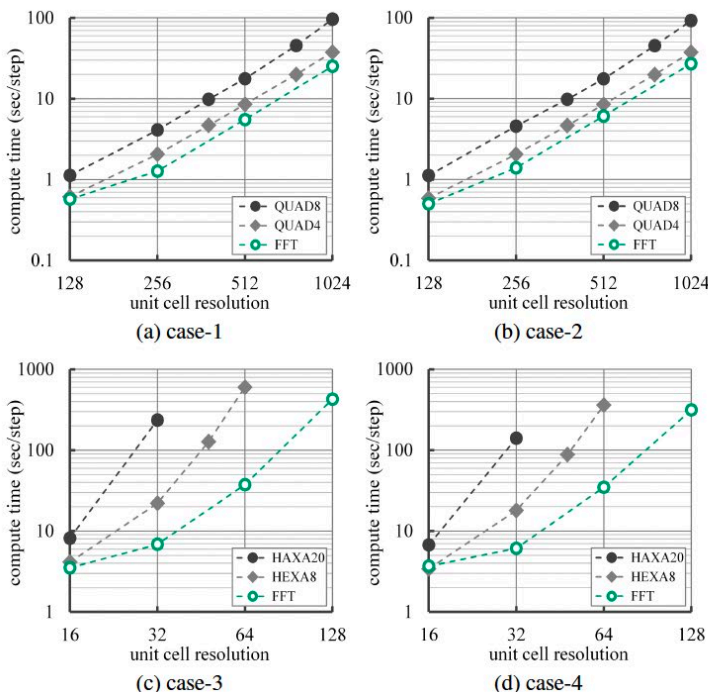


図7 最適化ステップあたりの計算時間と解像度の関係

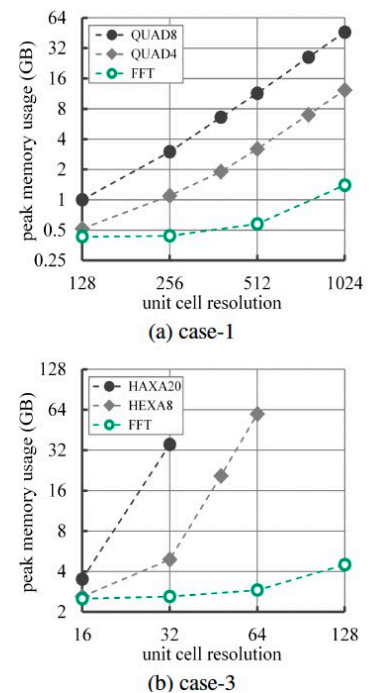


図8 メモリ使用量と解像度の関係

3次元問題では、提案手法は従来手法より著しく高速であること、また、解像度が増加するにつれて両手法の計算時間の差が拡大することが読み取れる。例えば、解像度  $n_{res}=32$  の場合では2次要素を用いた従来手法より23~34倍程度、解像度  $n_{res}=64$  の場合では1次要素を用いた従来手法より10~16倍程度速く解析が行える。一方で、提案手法においては、caseごとの計算時間に際立った差がないことから、得られるトポロジーがFFT均質化アルゴリズムの性能に与える影響は限定的であると言える。また、ユニットセルの解像度  $n_{res}$  と最大メモリ使用量の関係を図8に示す。これらのグラフから、提案手法は従来手法よりも大幅にメモリ使用量が少なく、解像度の増加に対するメモリ使用量の増加の割合が緩やかであることが読み取れる。2次元問題に着目すると、解像度  $n_{res}=1024$  の場合、1次要素を用いた従来手法の1/9程度、2次要素を用いた従来手法の1/33程度のメモリしか使用しない。3次元問題では、解像度  $n_{res}=32$  の場合、2次要素を用いた従来手法の1/14程度、解像度  $n_{res}=64$  の場合、1次要素を用いた従来手法の1/20程度のメモリしか使用しない。従来手法ではメモリ使用量の大部分(9割以上)を剛性マトリクスが占めており、連立1次方程式を解く操作においてメモリ使用量が最大となる。これに対し、提案手法では方程式を解く必要がなく、代わりに行う反復計算であるFFT均質化アルゴリズムが要するメモリもごく僅かである。具体的には、要素ごとの変数を保存するために要するメモリは、倍精度実数型を用いる場合、3次元問題の解像度  $n_{res}=64$  で200MB程度、解像度  $n_{res}=128$  で1.5GB程度である。提案手法は解像度が増加しても従来手法のように著しくメモリ使用量が増加することはない。最後に、図9にcase-4の  $n_{res}=128$  で最適化した結果を実際に3Dプリントした例を示す。ユニットセルは周期境界条件で計算されているため、隣接するユニットセルどおしは連続につながっていることも確認できよう。

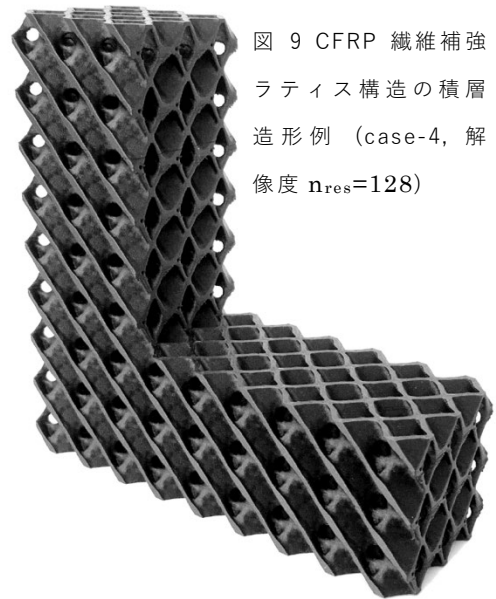


図9 CFRP 繊維補強ラティス構造の積層造形例 (case-4, 解像度  $n_{res}=128$ )

### (実験調査によって得られた新しい知見)

提案手法を用いることで従来手法より速く解析を行えること、特に3次元問題においてその傾向が顕著となり、提案手法が高解像度の最適解析に効果的であることを定量的に示した。また、提案手法は従来手法より大幅に省メモリ化でき、使用機器のメモリ搭載量による解析可能な解像度の制限を緩和することができる。これにより、3Dプリント建設という未来のDX化に大きく貢献できるものであることがわかった。

### (発表論文)

松井聖圭, 干場大也, 小倉大季, 加藤準治, FFT均質化アルゴリズムに基づく高解像度マルチスケルトポロジー最適化, 土木学会応用力学論文集 79巻(15), 2023

【令和4年度 土木学会応用力学委員会 論文奨励賞受賞】