

2020年 日本建築学会賞（論文）受賞講演

位相最適化手法を用いた
構造形態創生に関する一連の研究
(最新の研究紹介も兼ねて)



近畿大学工学部

藤井大地

応募に至るまでの経緯

- 2009年 吉田長行先生から「そろそろ学会賞への応募は？」
→ 右上顎洞癌の手術をしたばかりなので。（内心は私大での応募は無理）
- ⋮
- 2018年9月頃 大森博司先生から電話で「吉田先生が学会賞への応募を勧めているので、応募してみないか？」
- 2019年1月 応募業績を6編の論文に絞ってその論文梗概を大森先生に見てもらう。→ 全然✖。そこから鬼の助言が始まる（笑）。
- 2019年6月 本間先生の応募書類を参考に全17編の応募業績に書き直し、何回かの校正を経て、やっと大森先生からOKをもらう。→ すぐに大森先生が推薦状を作成してくださる。

大森先生の校正を経た応募業績と本日の講演資料

<https://archi.hiro.kindai.ac.jp/ebookfree/index.html>

まずは、一番話したいことから・・・

本研究に至るまでの経緯（感謝の意）

研究の出発点

「美」について

「有機的」という言葉について

本研究の一番の成果

本研究に至るまでの経緯 人生とは出逢いである

- 1981年 癌で余命半年の宣告を受ける ➡ 研究の出発点
- 1982年 吉田長行先生（現法政大学教授）との出逢い
 - 地盤と建物の動的相互作用に関する研究 ➡ 博士（工学）（1992）
- 1989年 藤谷義信先生（元広島大学教授）との出逢い
 - 薄肉はり理論に関する研究 ➡ 日本建築学会奨励賞（1997）
- 1997年 菊池 昇先生（ミシガン大学教授）との出逢い
 - 構造物の位相最適化に関する研究 ➡ 日本建築学会賞（論文）

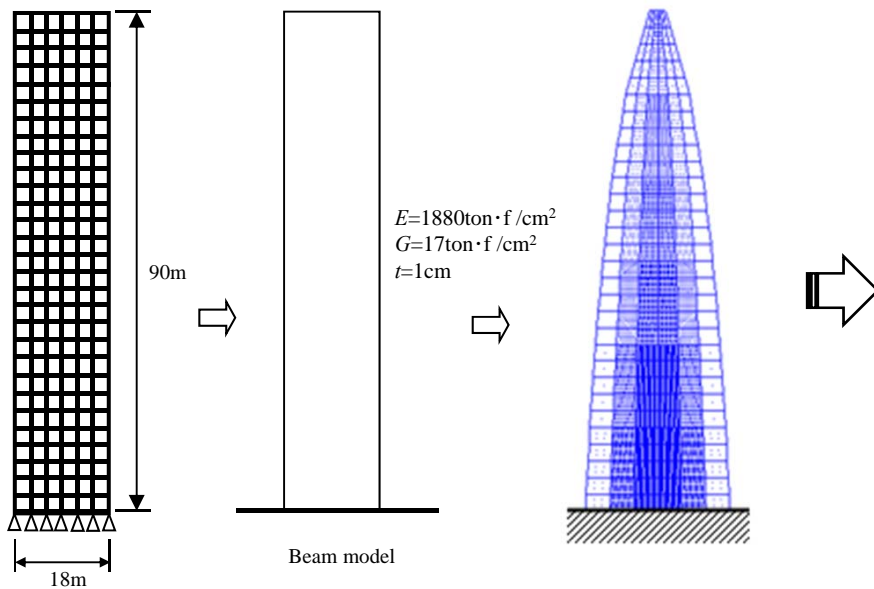


Professor Noboru Kikuchi

Mechanical Engineering and Applied Mechanics
[Computational Mechanics Laboratory](#)

本研究は、1998年3月から1年間のミシガン大学における在外研究から始まった。

研究の出発点 (1997年) 在外研究出発前



サグラダファミリア
(アントニ・ガウディ)

薄肉はり置換法による高層ビルの形状および剛性分布の最適化に関する研究

最適化技術でガウディの建築作品のような形態は創生できないだろうか？



グエル公園の立体道路 (アントニ・ガウディ)



カサ・ミラ (アントニ・ガウディ)

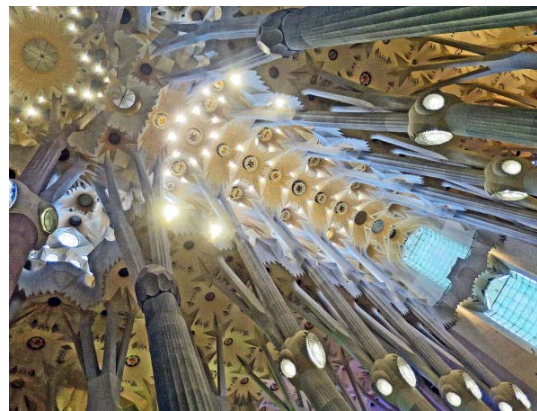
アントニ・ガウディ 1852~1926



サグラダファミリア

美しい形は構造的に安定している。構造は自然から学ばなければならない。

創造的であろうとして、意味の無いものを付け加えてはいけない。自然の原理をよく観察し、それをよりよくしようと努力するだけでいい。



木漏れ日の差す森のような天井



巻貝のような階段



バイオミミクリーのはしり？

「美」とは何か？ 森田慶一著『建築論』

哲学者プラトンは、万有（あらゆる存在）の本源としてイデアを想定し、われわれの知覚する事物はすべてイデアを分有し、イデアを模写することによって現実の存在者となると考えた。

例えば、樹木は、神の制作術によって樹木のイデアが現実態をとったものである。人間もまた制作能力を持つ。そしてそれは二つの方向にはたらいいて像・形相・表象をつくる。すなわち、イデアを直接模写して物そのものを造る方向と、神がイデアを模写して造った形象を心象の助けを借りて、さらに模写する方向と。

音楽・建築・器具の制作は第一模写に属し、第二模写は、絵画・彫刻の制作がこれにあたる。

「イデア」とは、われわれの肉眼に見える形ではなく、言ってみれば「心の目」「魂の目」によって洞察される純粋な形、つまり「ものごとの真の姿」や「ものごとの原型」の意味。（出典: フリー百科事典『ウィキペディア』）

建築意匠

ー 建築デザインの日本語訳？



小川
晋一
教授

意匠の「意」は心を意味しており、「匠」は優れた技術でものを形作ることを意味しています。一般的には、意匠は、工業製品などにおいて視覚的に美しいと感じさせる形や色、柄などを指す場合が多いのですが、建築における意匠（建築意匠：以下、単に意匠）は、文字通り「心」を「形」にする行為、またはその結果として作り出された建築物のことです。

坪井善勝先生「美は力学的合理性の近傍にある」



建築家（芸術家）の感性（魂）が真の美を生み出す

和田 智

ー日本のカーデザイナー

- 目先の新しさに振り回されない。
(奇抜なものはすぐに飽きられる)
- 過去の美しいものに敬意を払い学ぶ。
- 世界で一番美しい「普通」を創造せよ。



美の多目的最適化は人間の感性のみが成しえる技では？

マツダデザインー「魂動フォーム」「魂動削り」「魂動磨き」



人間の感性（魂）が加わってこそ真の美は生まれる



最適化手法は美の近傍を探し出す道具に過ぎない



有機的建築

ーフランク・ロイド・ライト

植物が土から芽吹いて育ち、しかし、それでいて伸びやかであるように。建築は自然のただなかに生えた樹木のように威厳ある姿を呈しながらも、人間の精神が生みだした子供であるべきなのです。
ーフランク・ロイド・ライト



渡部桃子 作

第8回家具デザインコンテスト2017

－斬新で革命的なインテリアデザイン

<グランプリ賞・オーディエンス賞>



作品名：キノマルイス

作者名：奥野 和希 渡部 桃子

力学的なアプローチによる、最も効率の良いスツールの脚として最適化された形態に新しさを感じる提案です。

「今まで見たことがあるようで無いような家具のデザイン」というコンセプトからもうかがい知れるように、新しい技術、考え方である一方で、現代のライフスタイルに溶け込む家具として提案されています。

トポロジー最適化による家具の前例は複数ありますが、技術だけが先行しない、使用されるシーンを考慮した形態に落とし込んでいる点が評価されました。

本研究で開発したプログラムが市販ソフトウェアVOXELCONに組み込まれる！ (建築分野用ソフトウェアとして来年度販売開始予定)

どんな形状も簡単モデリング イメージベースでCT画像3D編集・解析・計測・材料特性算出

イメージベース構造解析ソフトウェア **VOXELCON**

VOXELCON (ボクセルコン) は、現物から得られるCT画像やCADからのSTLデータをダイレクトにモデル化し解析・計測に利用する、強力なイメージベース構造解析ソフトウェアです。

現物のCTイメージデータから直接モデリングを行うことで、より現実に近い解析が可能になります。また現物データの各種計測処理や、現物データと設計データとの形状比較など、様々なリバースエンジニアリング機能を備えています。

マルチスケール解析機能を利用した複合材料や多孔質材料の研究・開発分野、一般にCADデータの取り扱いが困難なバイオエンジニアリング分野など、幅広い分野で活用されています。

現物データがそのまま使えます

VOXELCONの最大の特長は、現物データがそのまま使えるという点にあります。
現物データ... [続きを読む](#)

超高速・ロバストなボクセル分割

VOXELCONのボクセル分割は超高速で、1億ボクセルのメッシュも数十秒以内で作成できます... [続きを読む](#)

バイオエンジニアリング分野への応用

バイオエンジニアリング分野においては、設計データが存在しないため、実物を計測し... [続きを読む](#)

さまざまなリバースエンジニアリング機能

構造解析や計測機能として、多彩なリバースエンジニアリング機能が搭載されており、... [続きを読む](#)

大規模ソルバー搭載

特に複雑な形状を有するモデルに対し、形状になるべく忠実にボクセル分割しようとする... [続きを読む](#)

先進的なマルチスケール解析

均質化法や重畳メッシュ法といった、先進的なマルチスケール解析機能をいち早く取り入... [続きを読む](#)

イメージベース構造解析 **VOXELCON**

- ▶ 特長
- ▶ 機能
- ▶ 事例
- ▶ 仕様
- ▶ 体験版お申し込み
- ▶ カタログダウンロード
- ▶ ユーザーページ
* IDとパスワードが必要です。

製品情報

- ▶ 構造最適設計
OPTISHAPE-TS
- 教育用位相最適化
OPTISHAPE-ES
- ▶ SOLIDWORKSアドイン
構造最適設計
HiramekiWorks
- ▶ CADモデル生成
S-Generator
- ▶ イメージベース構造解析
VOXELCON
- ▶ パラメータ最適化支援
AMDESS

建築家・構造家に美の近傍を探るツールとして活用してほしい！

ここからが受賞研究業績と最新の研究紹介です。

第1章 ボクセル有限要素法を用いた建築構造の形態創生（8編の論文）

- 最新の研究（その1）シェル構造の有機的建築への応用
- 最新の研究（その2）CA-IESO法

第2章 グランドストラクチャ法を用いた建築構造の形態創生（5編の論文）

- 最新の研究（その3）部分的複層スペースフレーム

第3章 位相最適化手法を用いた制振機構の形態創生（4編の論文）

- 最新の研究（その4）大変形弾性部材の位相最適化
- 最新の研究（その5）有限変形を考慮したコンプライアントメカニズムの創生

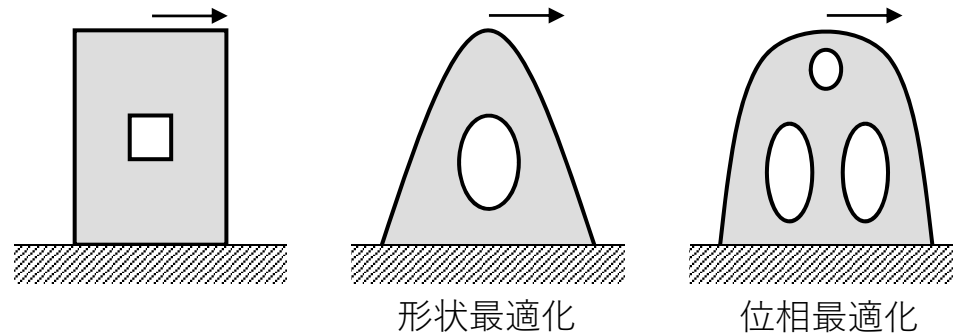
とても時間が足りませんので、話せるところまで・・・。

第1章 ボクセル有限要素法を用いた 建築構造の形態創生

研究業績論文

-
- 1-1 藤井大地, 菊池昇: SLP法を用いたトポロジー最適化における数値的不安定の改善, 日本建築学会構造系論文集, Vol.64, No.521, pp.65-72, 1999.7
-
- 1-2 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 最適性規準法を用いた位相最適化におけるフィルタリング法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.66, No.543, pp.105-112, 2001.5
-
- 1-3 藤井大地, 真鍋匡利: CA-ESO法による構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.691, pp.1569-1574, 2013.9
-
- 1-4 藤井大地, 岡部 諒, 真鍋匡利: CA-ESO法とボクセル有限要素法を用いた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.79, No.703, pp.1279-1286, 2014.9
-
- 1-5 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
-
- 1-6 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
-
- 1-7 丸山瑞樹, 松本慎也, 藤井大地: IESO法を用いた建築構造の形態創生 ファサードデザインへの応用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.739, pp.1383-1389, 2017.9
-
- 1-8 上村紘一, 真鍋匡利, 松本慎也, 藤井大地: IESO法を用いた連続体シェル構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.745, pp.459-465, 2018.3
-

位相（トポロジー）最適化とは？



位相最適化手法 **HDM** (Homogenization Design Method)

目的関数: $C(\{x\}) = \{d\}^T [K] \{d\} \rightarrow$ 最小化

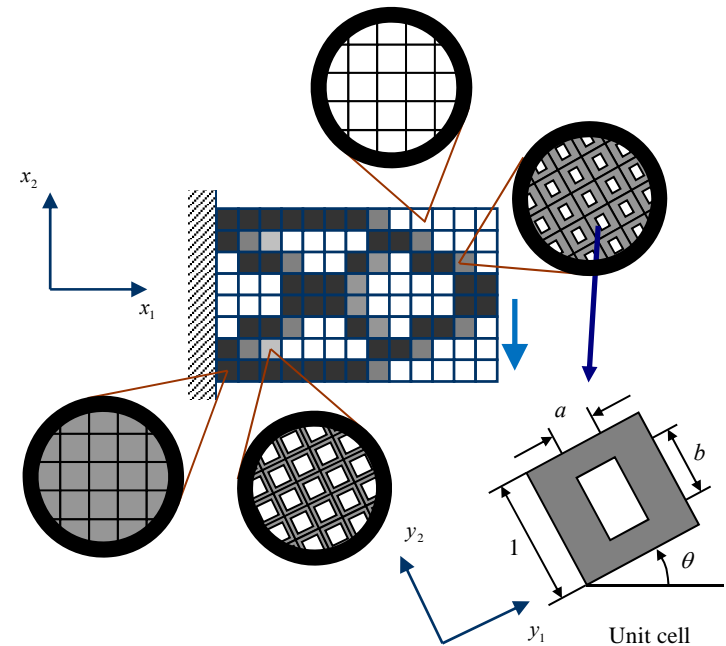
設計変数: $\{x\} = [a_1, b_1, \theta_1, \dots, a_i, b_i, \theta_i, \dots, a_N, b_N, \theta_N]$

制約条件: $\left[\sum_{i=1}^N \rho_i / N = \sum_{i=1}^N (1 - a_i b_i) / N \right] \leq \bar{m}$

要素剛性マトリクス: $[k_i(x_i)] = [k_i(a_i, b_i, \theta_i)]$

$$\text{感度: } \frac{\partial C(\{x\})}{\partial x_i} = -\{d_i\}^T \frac{\partial [k_i(x_i)]}{\partial x_i} \{d_i\}$$

感度計算を要素ごとに行える



位相最適化手法 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)

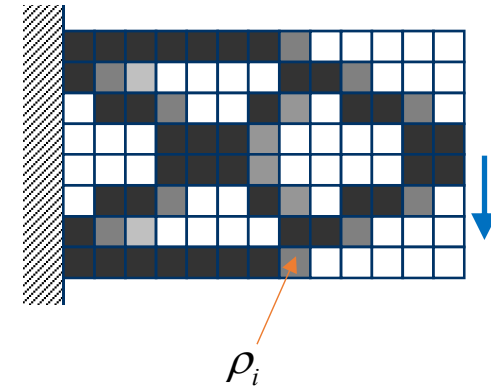
目的関数: $C(\{x\}) = \{d\}^T [K] \{d\} \rightarrow$ 最小化

設計変数: $\{x\} = [\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_N], (0 < \rho_i \leq 1)$

制約条件: $\left[\sum_{i=1}^N \rho_i / N \right] \leq \bar{m}$

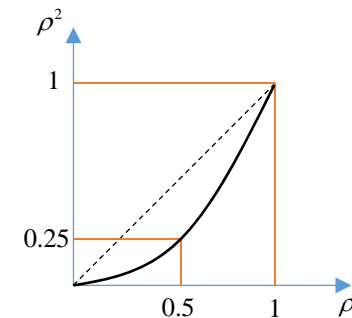
要素剛性マトリクス: $[k_i(x_i)] = [k_i(\rho_i)] = \rho_i^p [k_i^0]$

感度: $\frac{\partial C(\{x\})}{\partial x_i} = -\{d_i\}^T \frac{\partial [k_i(x_i)]}{\partial x_i} \{d_i\} = -\{d_i\}^T p \rho_i^{p-1} [k_i^0] \{d_i\}$



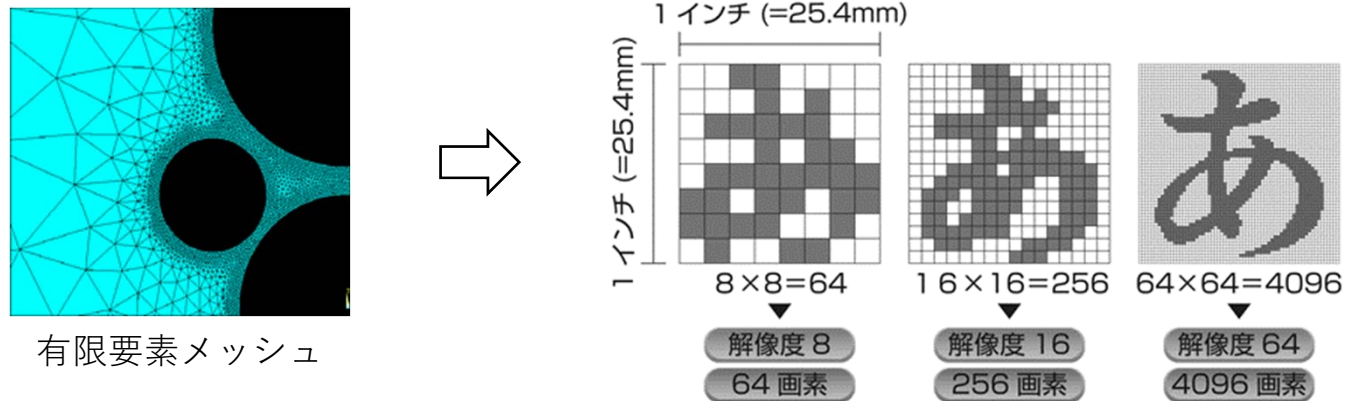
中間密度にペナルティ

要素密度を直接設計変数

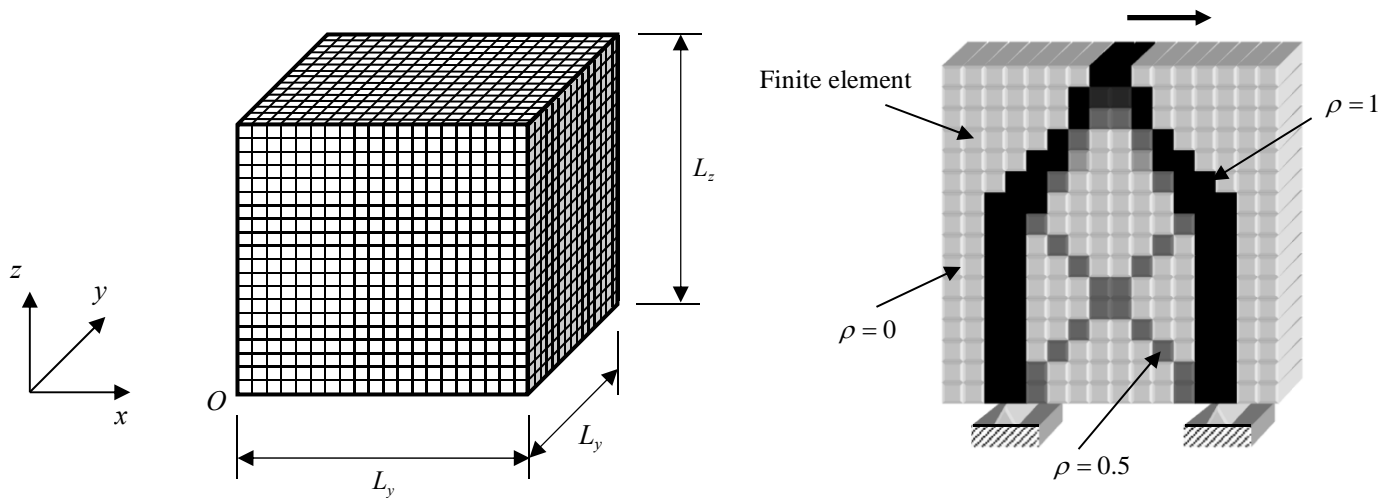


HDMはミクロ構造の穴の大きさと方向を最適化する異方性材料を扱う問題であるのに対し、SIMP法はミクロ構造の穴の大きさのみを最適化する等方性材料を扱う問題

イメージベースド有限要素法 (→メッシュフリー法)

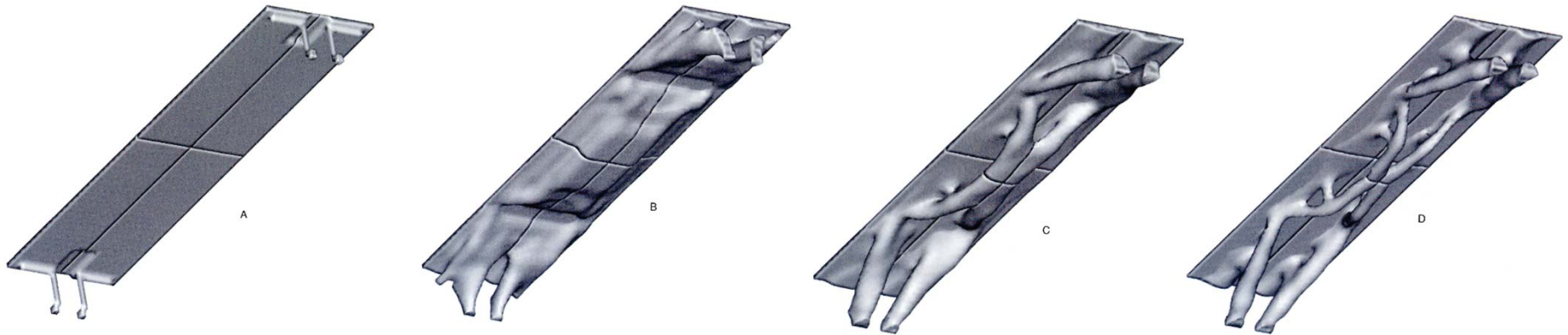


ボクセル有限要素法 (2D: ピクセル → 3D: ボクセル)



E-by-E CG法を用いる場合、全体剛性マトリクスを作成する必要がなく、ベクトルの重ね合わせで計算が可能 (→大幅なメモリの節約)

先行研究（その1）：拡張ESO法による構造形態創生（佐々木睦朗ら）

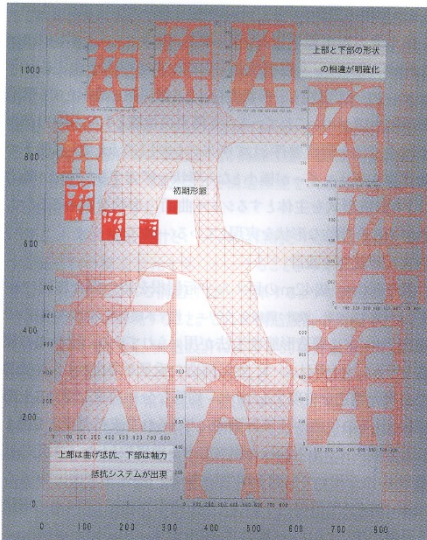


フィレンツェ新駅コンペ案（2002年）

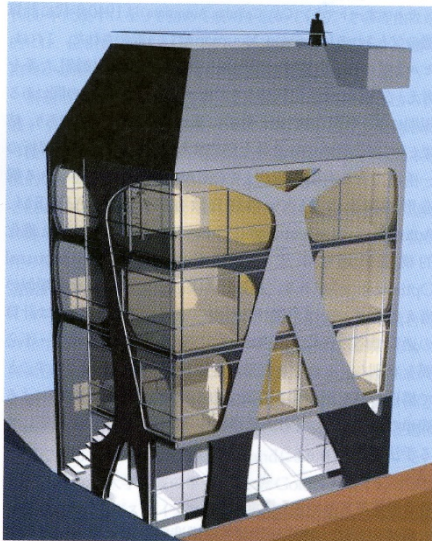
磯崎 新, 佐々木睦朗

先行研究（その2）：拡張ESO法による構造形態創生（大森博司ら）

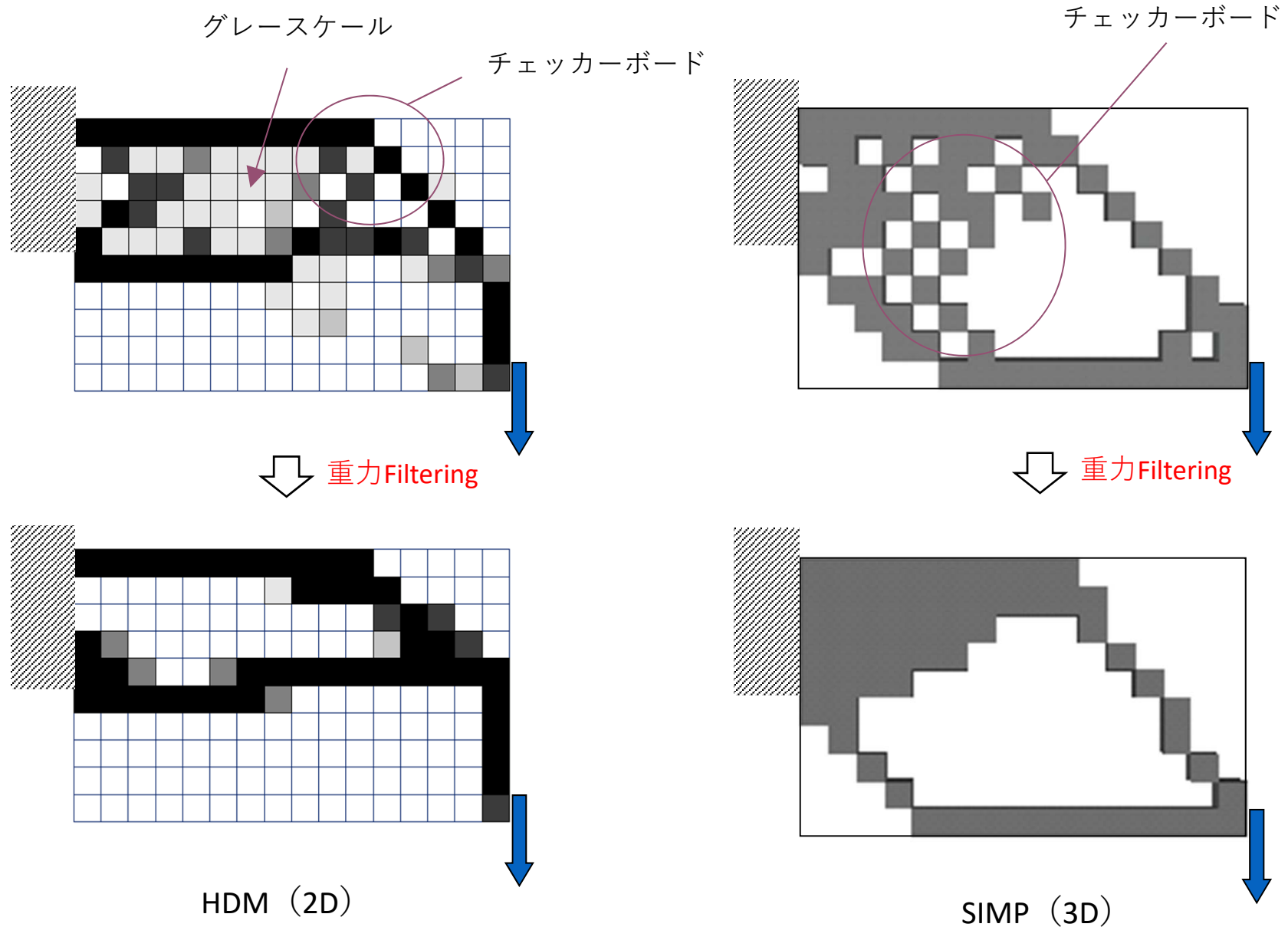
◆図4-1 芥川プロジェクト・構造形態創生
各階床レベルに短期地震力、長期鉛直荷重を作用させ形態創生

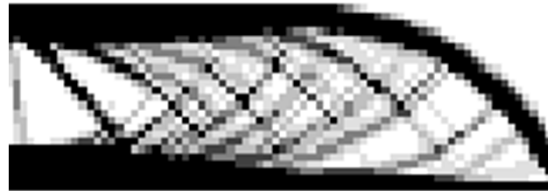
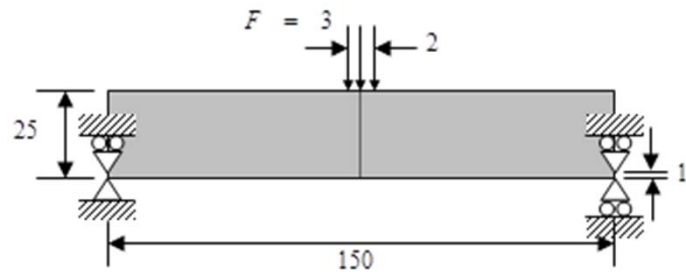


◆図4-2 芥川プロジェクト・パース
(設計:フータイアーキテクト+飯島建築事務所、協力:名城大学・武蔵研究室)



芥川プロジェクト：大森博司（2005年）
フータイアーキテクト+飯島建築事務所・飯島建築事務所





↓ 重力Filtering



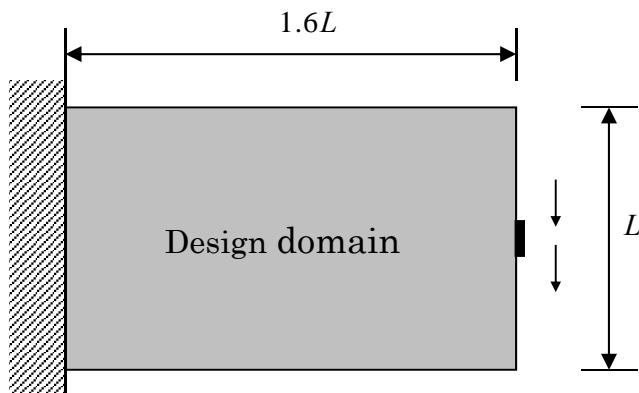
HDM + 逐次線形計画 (SLP) 法



↓ 重力Filtering



HDM + 最適性基準 (OC) 法



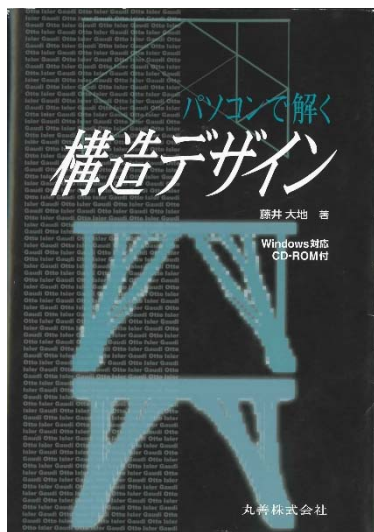
HDM + 凸線形化 (CONLIN) 法



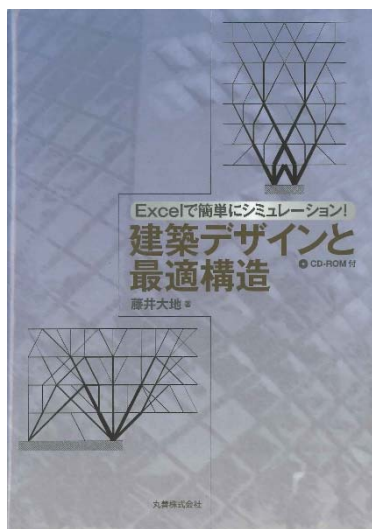
SIMP + 凸線形化 (CONLIN) 法

凸線形化 (CONLIN) 法：設計変数と設計変数の逆数でテーラ一展開した問題を双対法を用いて解く方法であり，収束が速く，汎用性がある。

研究成果（その3） 建築分野への応用



2002年

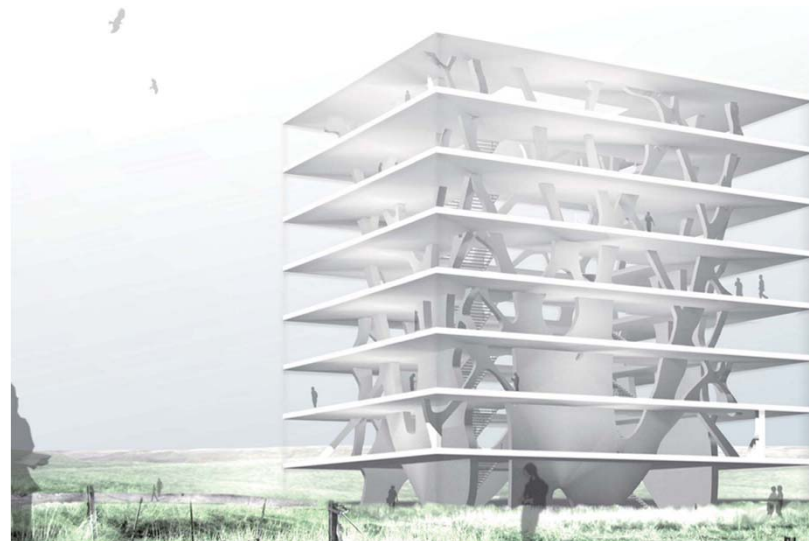
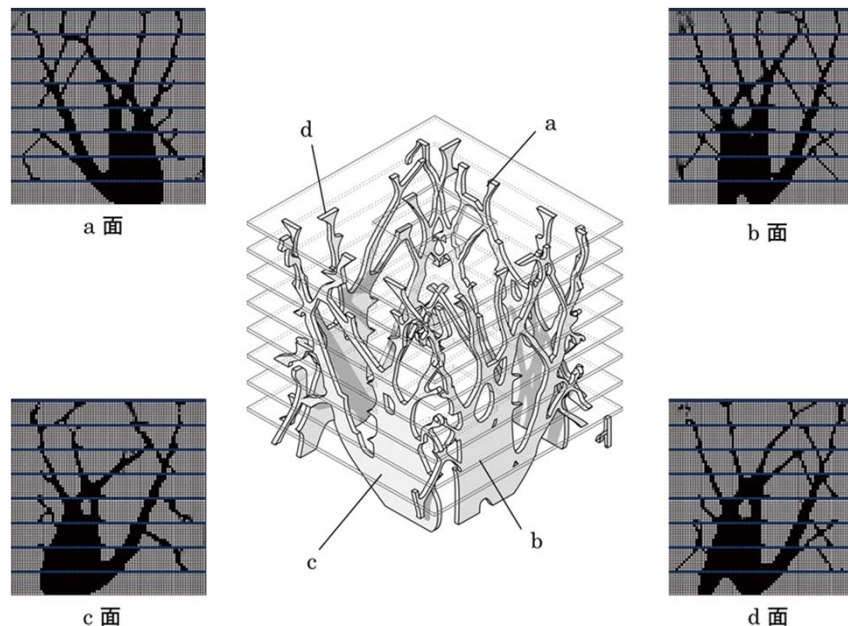


2008年

2次元ではHDM,
3次元ではSIMP法
を用いている。最
適化問題の解法は
CONLIN法を用い、
プリポストはVBで
独自ソフトを作成
している。

2002年の著書の改
訂版。難易度を下
げるため、2次元
問題のみとし、
SIMP法を用いて
いる。プリポスト
にはExcel (VBA) を
用いている。

いずれもFortranのソースプログラム (CD) が
付属している。



2008年 形態創生コンテスト入選作品 (植田大貴)

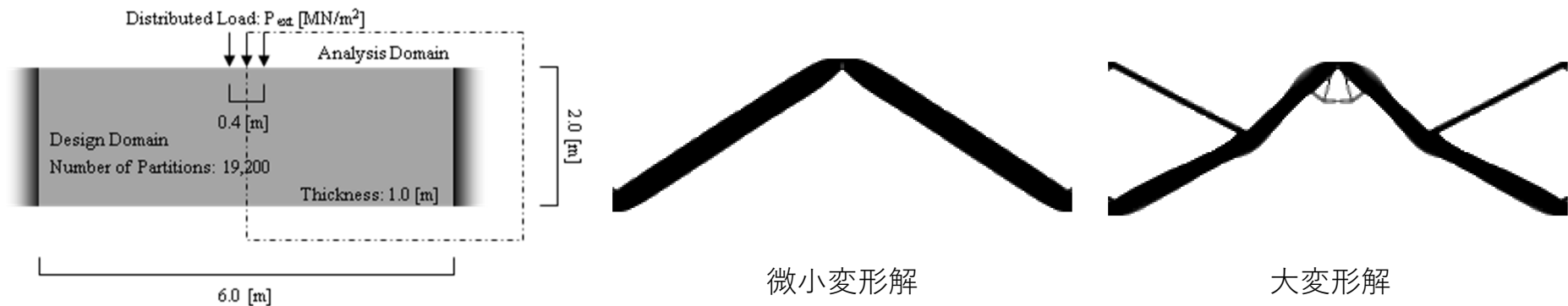
研究成果（その4） 発見的手法への展開

数理計画法に基づく手法の問題点

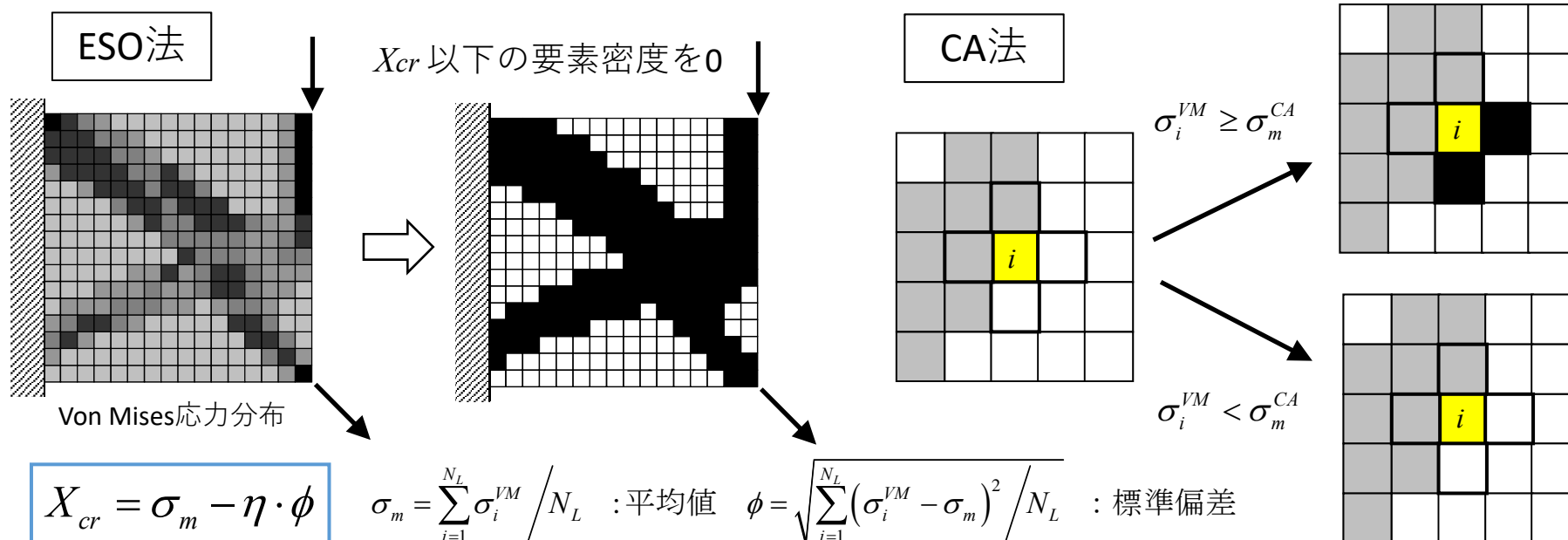
- グレースケールが残る。
- HDM法の理論は難しく、3次元問題では設計変数が増大する。
- SIMP法の解形態は、HDM法に比較して美しくない（主観）。
- 非線形問題への拡張が容易ではない。
(感度が正確に求まらないため、最適化計算が不安定になる)



2008年 粒子法 (MPS法) を用いた大変形解析に CA法とESO法を組み合わせた手法を適用



発見的 (位相最適化) 手法としては、ESO法 (進化的構造最適化法)、BESO法 (双方向ESO法)、拡張ESO法、CA法 (セルオートマトン法) などがある。



$$X_{cr} = \sigma_m - \eta \cdot \phi \quad \sigma_m = \sum_{i=1}^{N_L} \sigma_i^{VM} / N_L \quad \phi = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_L} (\sigma_i^{VM} - \sigma_m)^2 / N_L}$$

: 平均値 : 標準偏差

拡張ESO法のアイデア

目的関数: $[C(\{x\}) = \{d\}^T [K] \{d\} \rightarrow \text{最小化}] \dots ?$

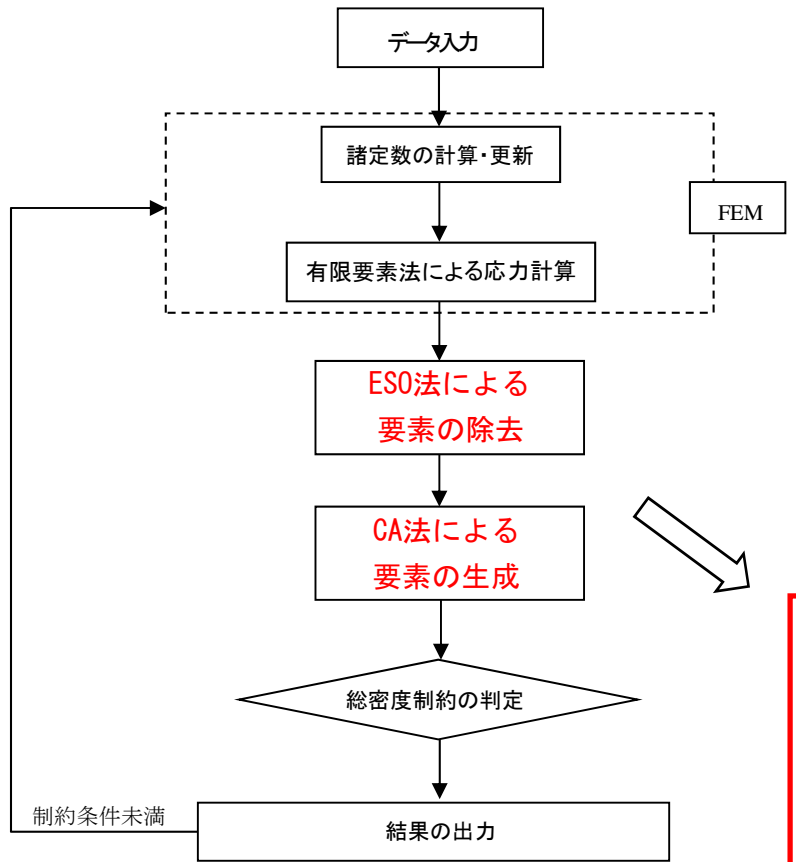
設計変数: $\{x\} = [\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_N], (\rho_i = 0 \text{ or } 1)$

制約条件: $[\sum_{i=1}^N \rho_i / N] \leq \bar{m}$

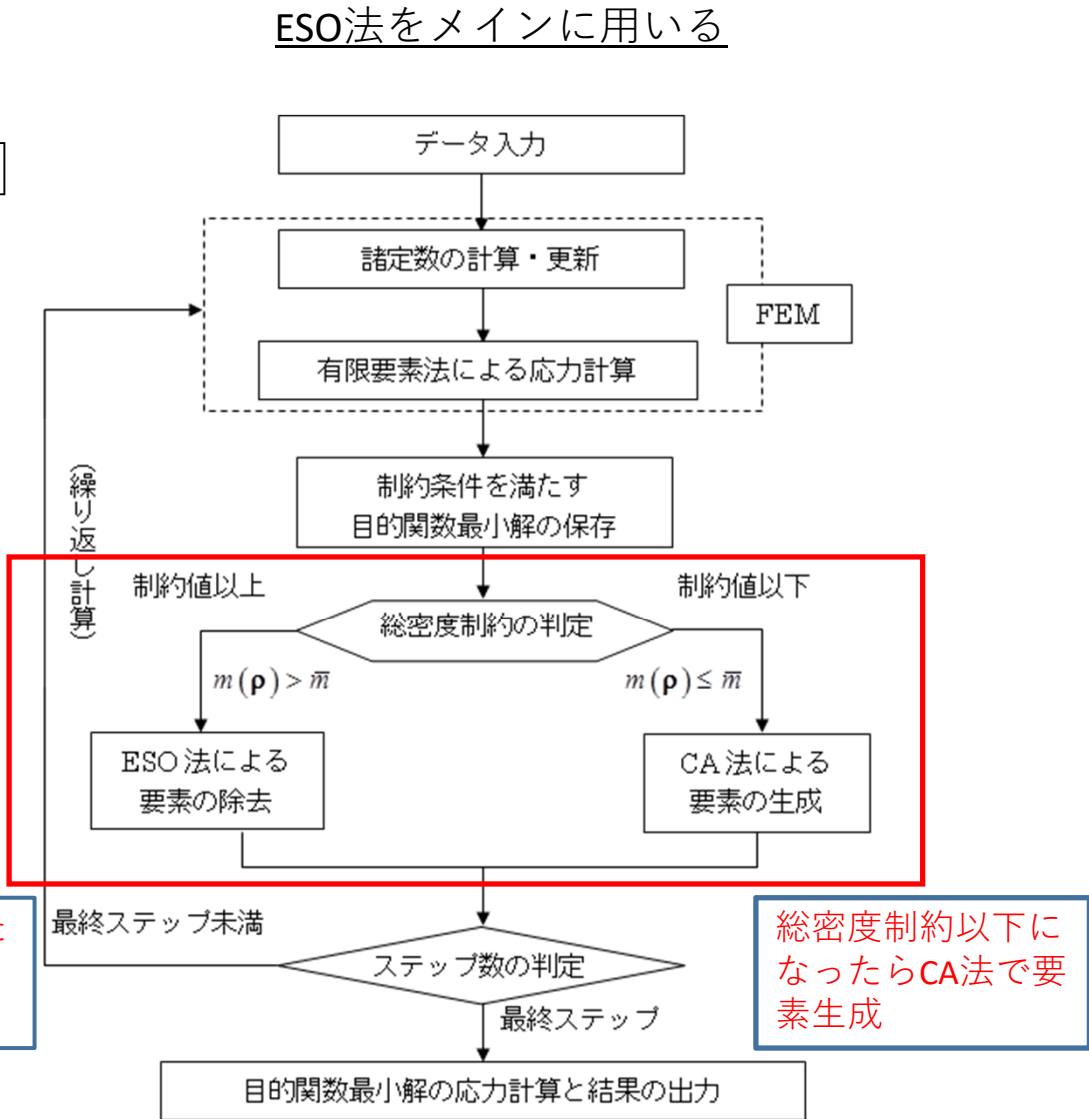
要素剛性マトリクス: $[k_i(x_i)] = [k_i(\rho_i)] = \rho_i [k_i^0]$

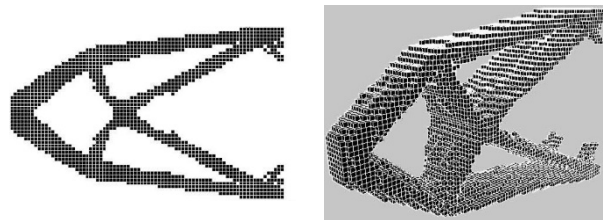
感度: $\frac{\partial C(\{x\})}{\partial x_i} \approx \sigma_i^{VM}$ (感度指標としてフォン・ミーゼス応力を用いる)

粒子法で用いていたアルゴリズム

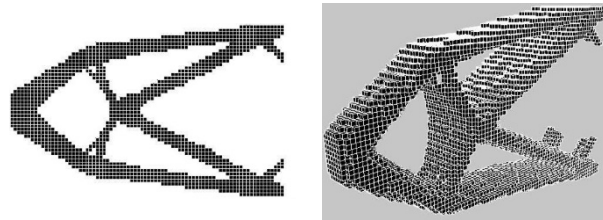


有限要素法で用いたアルゴリズム

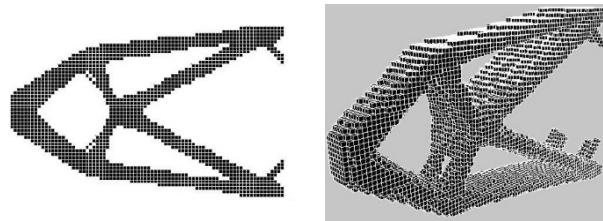




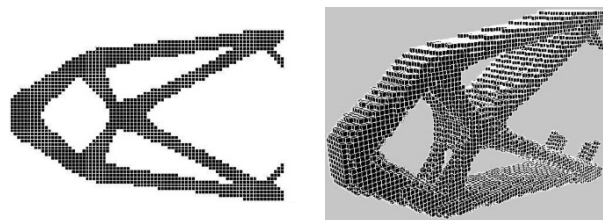
15step $m/m^0 = 0.195$ $f_{obj} = 4.99$ $C/C^0 = 3.70$



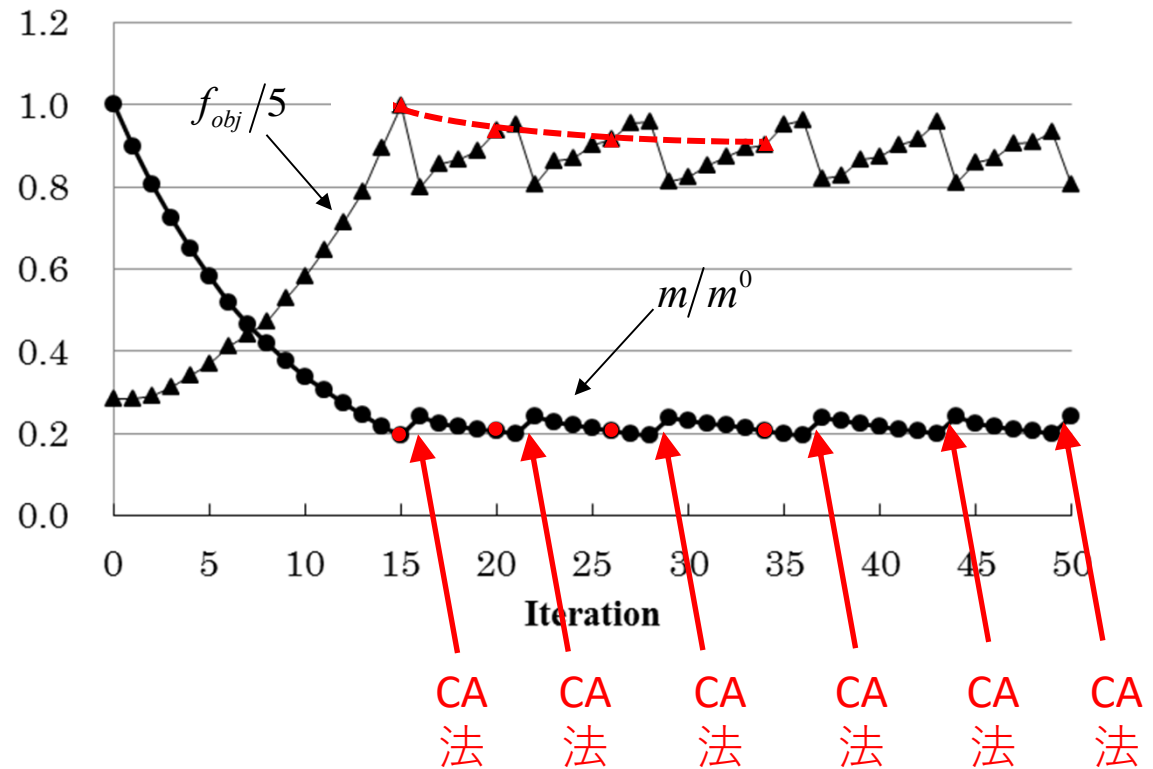
20step $m/m^0 = 0.205$ $f_{obj} = 4.69$ $C/C^0 = 3.28$



26step $m/m^0 = 0.207$ $f_{obj} = 4.58$ $C/C^0 = 3.14$

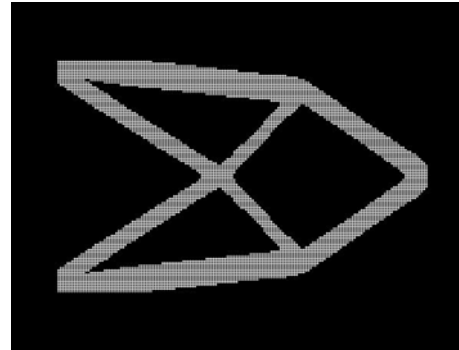
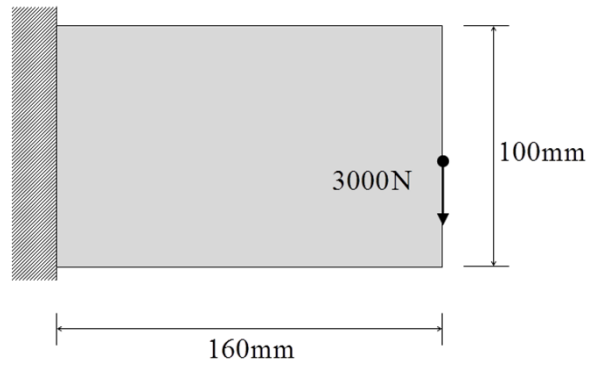


34step $m/m^0 = 0.206$ $f_{obj} = 4.51$ $C/C^0 = 3.02$

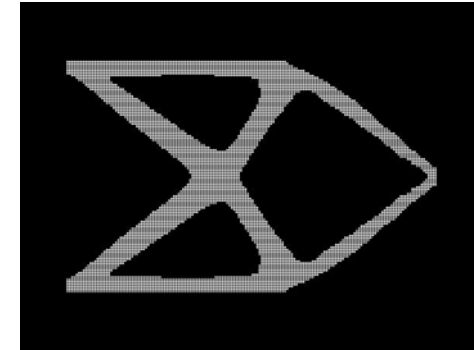


本手法では最適解はESO法で求まる！

CA-ESO法とSIMP法の比較（2次元問題）

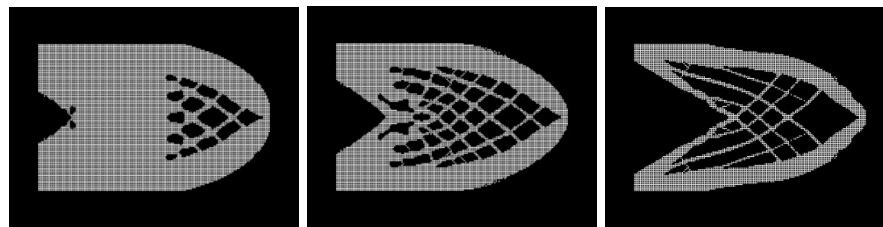


CA-ESO ($\eta=0.9$)
 $m/\bar{m} = 0.298, C/C^0 = 0.229$



SIMP ($w=1.0$)
 $m/\bar{m} = 0.300, C/C^0 = 0.267$

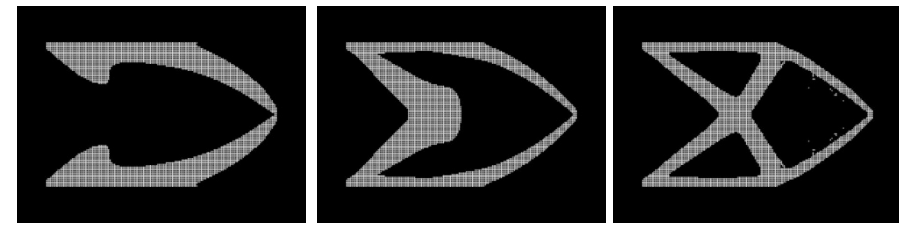
$m/\bar{m} = 0.3$



Step5

Step10

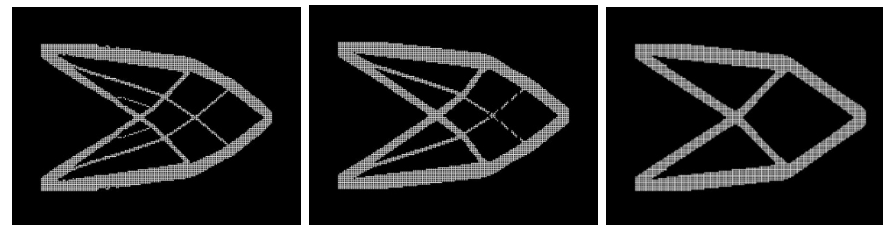
Step15



Step5

Step10

Step15

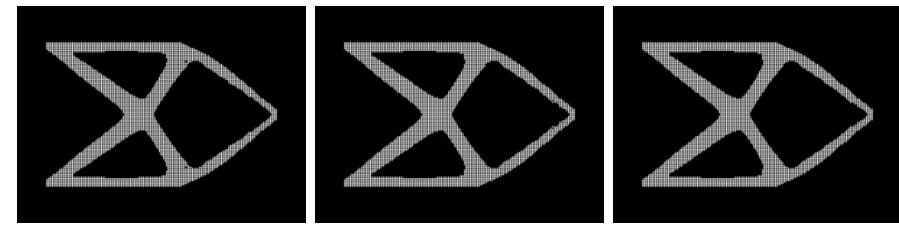


Step20

Step25

Step30

[CA-ESO法]



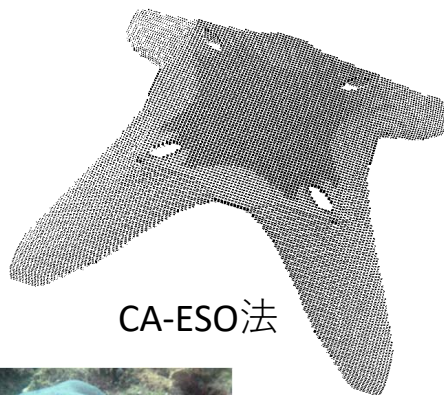
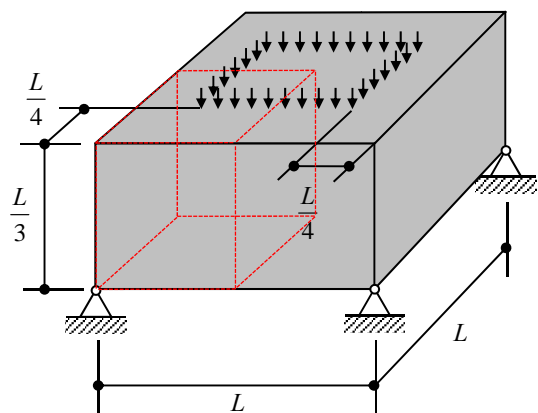
Step20

Step25

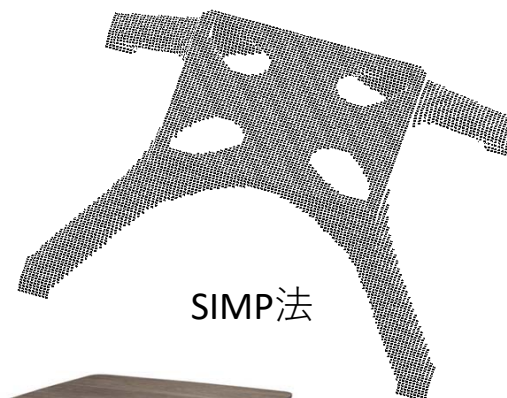
Step30

[SIMP法]

CA-ESO法とSIMP法の比較（3次元問題）



CA-ESO法



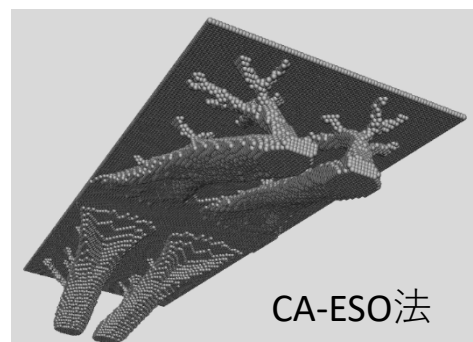
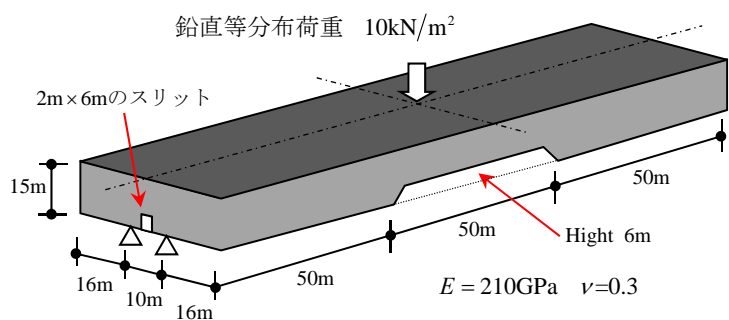
SIMP法



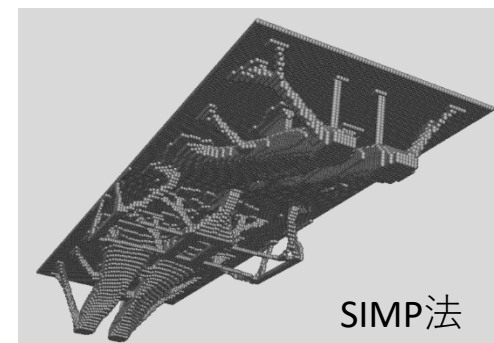
有機的？



人工的？



CA-ESO法



SIMP法



有機的？



人工的？

CA-ESO法の問題点

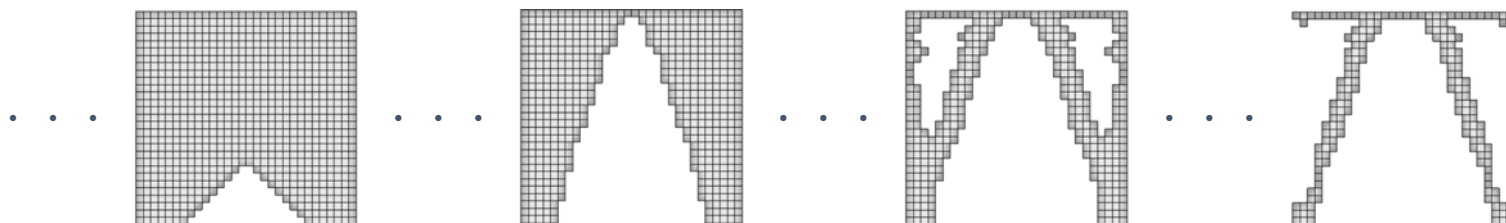
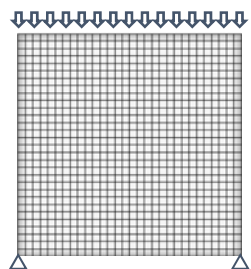
- 感度指標に、正式な感度（コンプライアンスの要素密度に関する微分値）ではなく、Von Mises応力を用いている。
 - ➡ 数学的手法（数理計画法）によって開拓されている振動問題等の様々な位相最適化問題への適用が容易ではない
- 解析対象ごとに閾値パラメータ η の値を調整する必要がある。
 - ➡ η の値を調整するためかなりの事前解析が必要となる
- フィルタリング法を用いていないため、シンプルな形態を求めるためにも η の値の調整が必要となる。

改良型ESO法（IESO法）

- 各ステップの除去要素数を与える。
（除去要素数 = 残存要素数 × 除去率） 除去率は入力データ
- 各ステップで、除去要素数に近くなる閾値パラメータ η をプログラム内で自動探査させる。（最終的に0.001刻みで探査）
 - ➡
 - 正式な感度（ひずみエネルギー）で解析が可能
 - 事前解析の必要がない
- BESO法で用いられているフィルタリング法を採用する。
 - ➡ 感度の平滑化に用いる影響半径を与えることで、シンプルな形態を得ることが可能

ηの自動計算

$$X_{cr} = \alpha_{av} - \eta \times \Phi$$

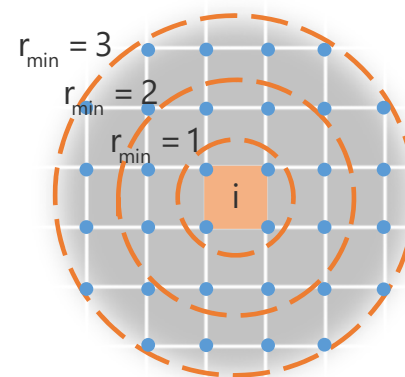
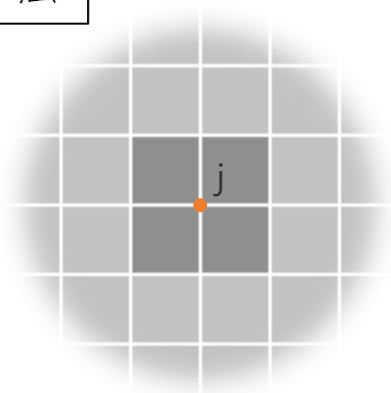


ステップ	1	ステップ	5	ステップ	10	ステップ	16
η	0.3730	η	0.4660	η	0.6460	η	0.4974

除去要素数に近くなる閾値パラメータ η をプログラム内で3桁まで自動探索

最終ステップのみ4桁探索

フィルタリング法

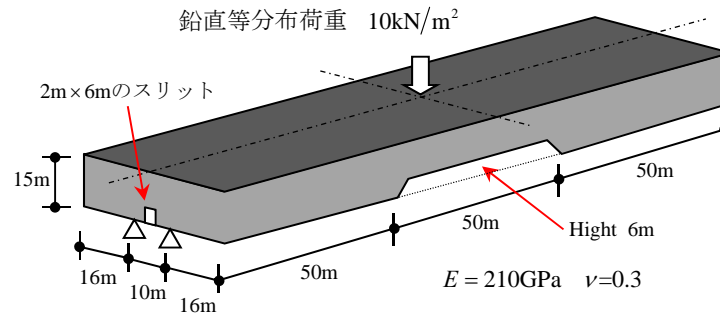


$$\alpha_j^n = \left(\sum_{i=1}^{M^e} \alpha_i^e \right) / M^e$$

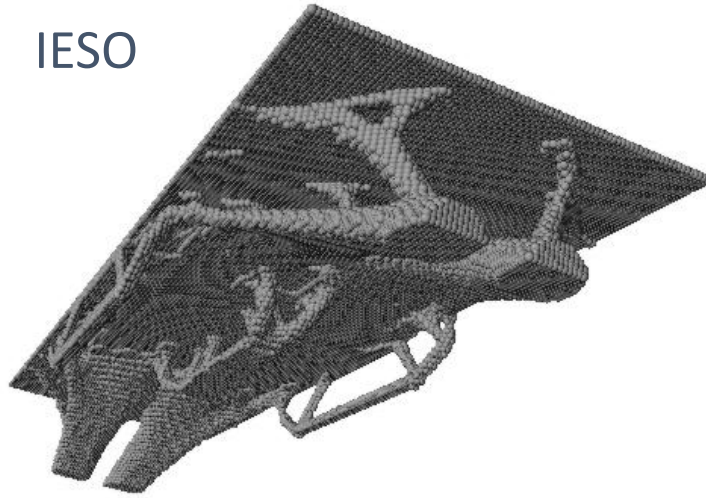
要素感度から節点感度を計算

$$\alpha_i = \left(\sum_{j=1}^{M^n} w(r_{ij}) \alpha_j^n \right) / \sum_{i=1}^{M^n} w(r_{ij}) \quad w(r_{ij}) = r_{min} - r_{ij}$$

影響半径内の節点感度から要素感度を計算

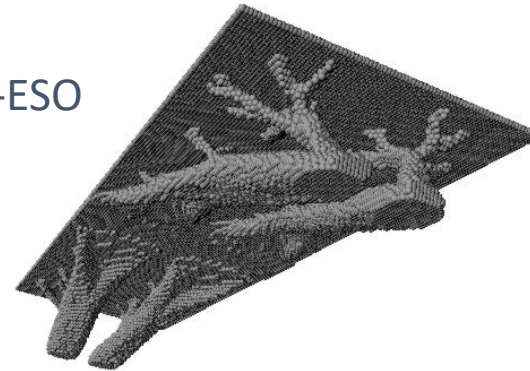


IESO



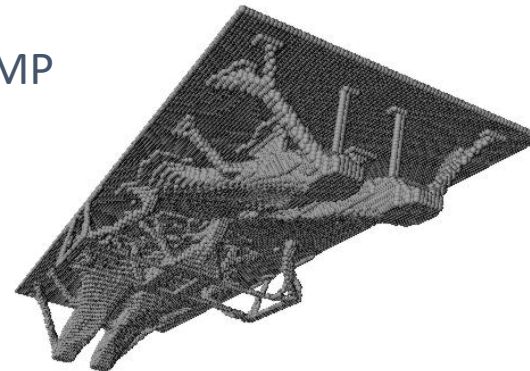
ステップ	20
解析時間	1時間26分
C/C^0	2.82

CA-ESO



ステップ	100
解析時間	5時間36分
C/C^0	2.55

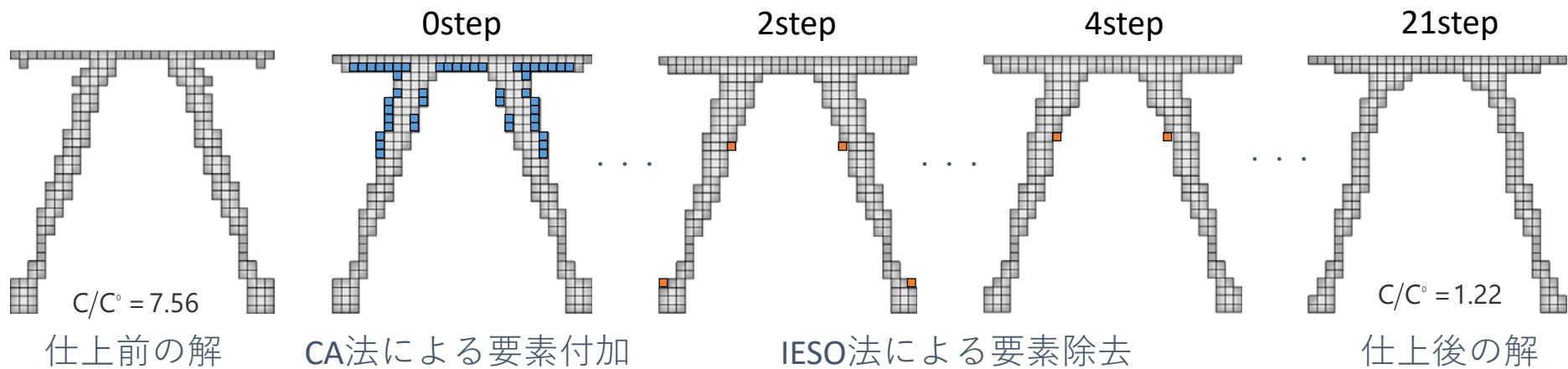
SIMP



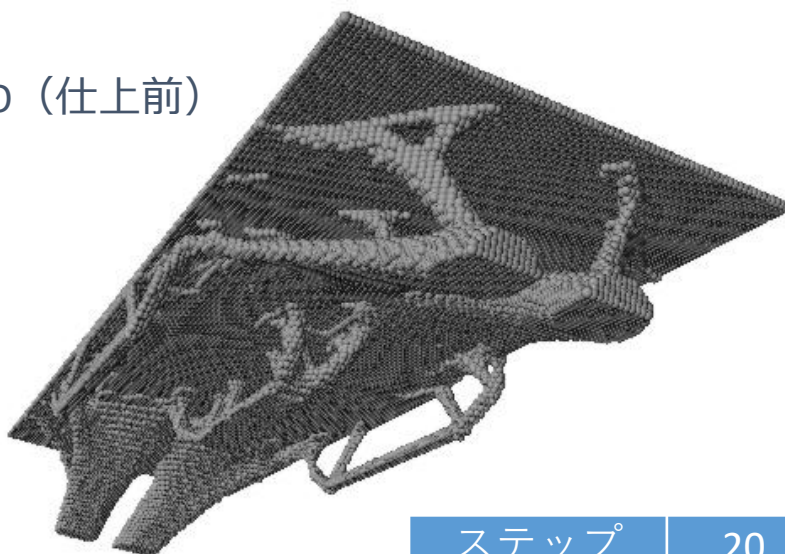
ステップ	50
解析時間	4時間25分
C/C^0	2.67

計算効率が良いが、コンプライアンス比は高い

仕上アルゴリズム

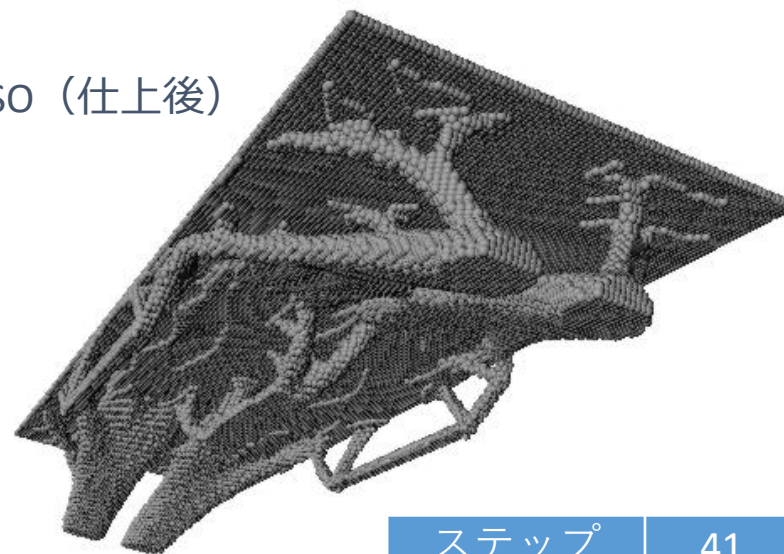


IESO（仕上前）

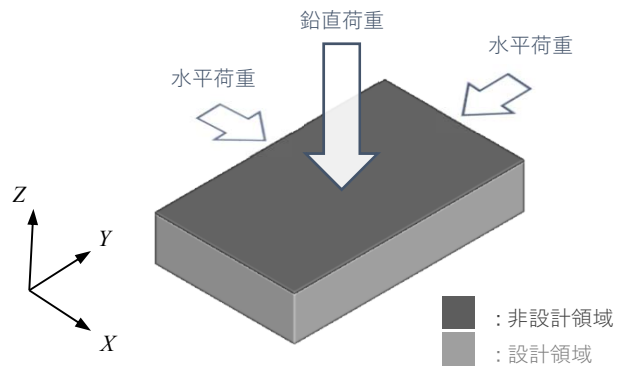


ステップ	20
C/C^0	2.82

IESO（仕上後）



ステップ	41
C/C^0	2.46



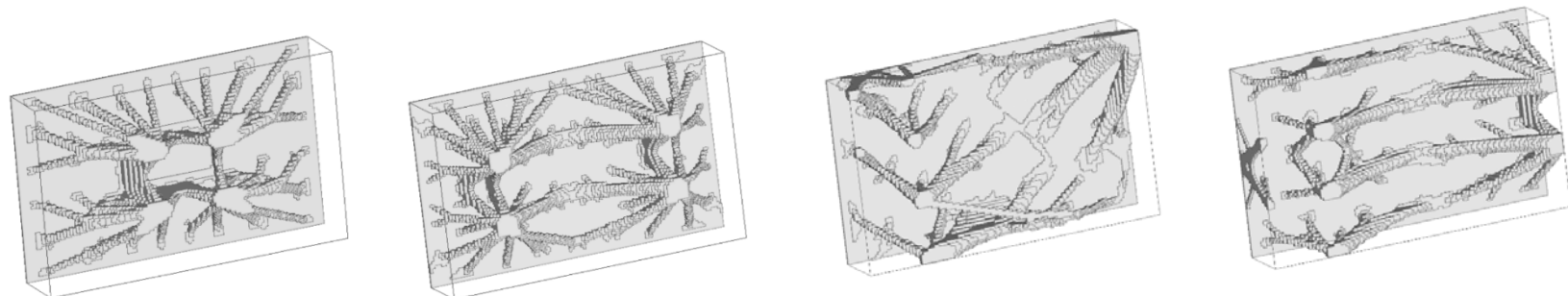
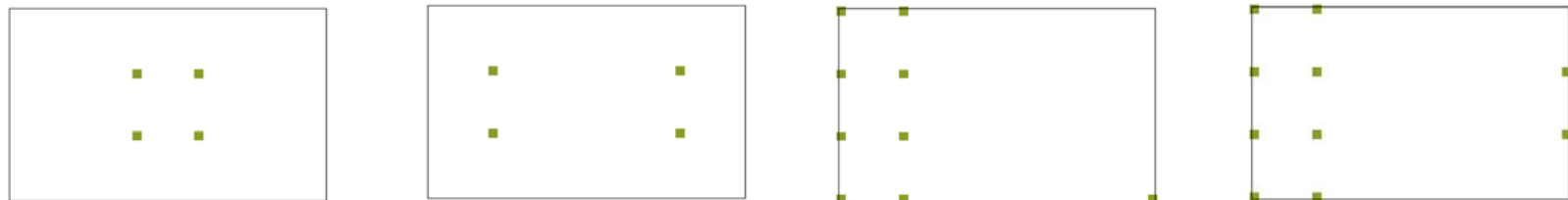
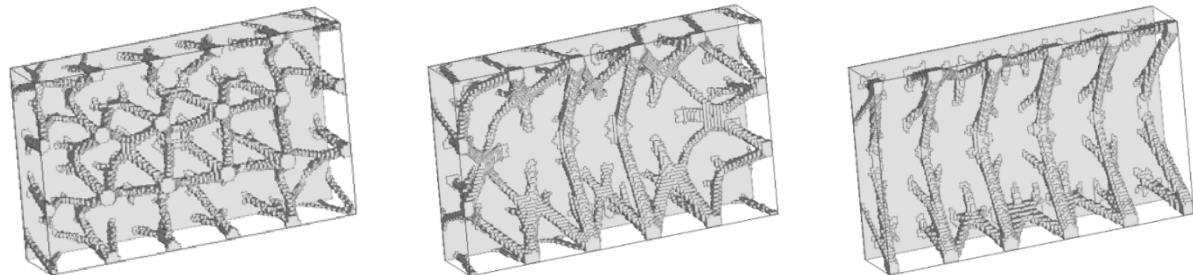
分割数: $77 \times 125 \times 25$

目標体積: $\bar{V}_r = 0.1$

除去率: $\lambda = 0.05$

影響半径倍率: $b_r = 3$

支持点配置



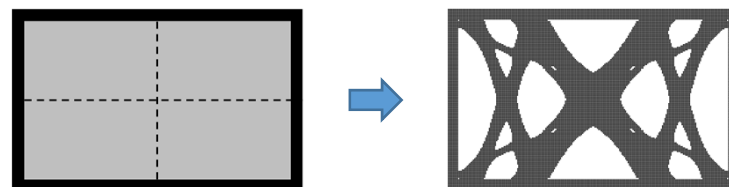
有機的建築（フランク・ロイド・ライト+アントニ・ガウディ）

植物が土から芽吹いて育ち、しかし、それでいて伸びやかであるように。建築は自然のただなかに生えた樹木のように威厳ある姿を呈しながらも、人間の精神が生み出した子供であるべきなのです。
ーフランク・ロイド・ライト

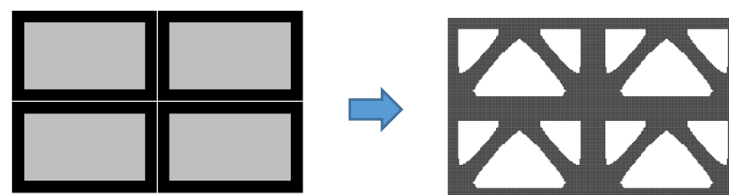


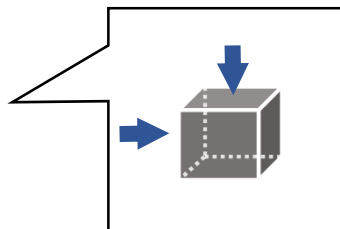
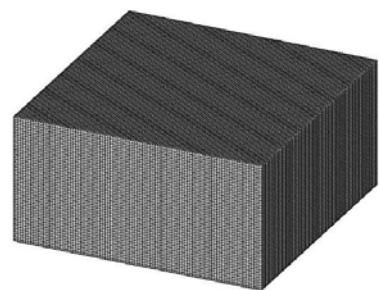
渡部桃子 作

2軸対称条件

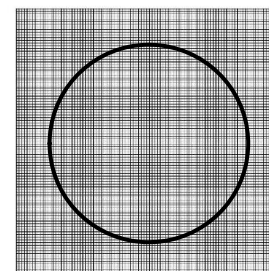


連続パターン条件



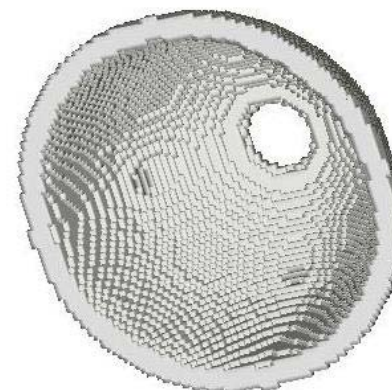
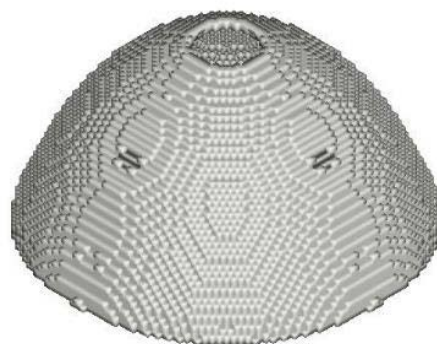


自重 + 地震慣性力

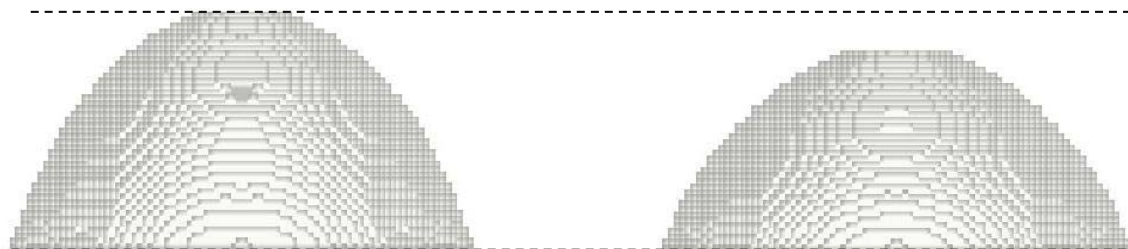


設計領域の底面と支持条件

自重のみの解析結果



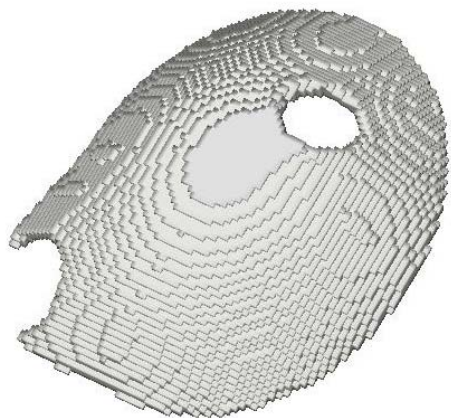
地震慣性力を与えた場合との比較



自重のみ

自重（鉛直力） + 自重の0.2倍の地震慣性力

設計コンペへの応用



1 名古屋在住の人はもちろん、名古屋駅の利用者や、観光客、オフィス利用者など様々な人が行きかう名駅通り。ボリュームが四角であると、人は区画された道を通り、この敷地は利用者以外、認識されない空間となっている。



上村紘一 作



上村紘一作

研究成果（その13）IESO法の市販のソフトウェアへの組み込み

IESO法プログラムが市販のVOXELCONに組み込まれる予定

夢のあるCAEを日本から **Quint** CAEソフトウェアの開発・販売・技術サポート

ホーム 製品情報 適用事例 受託解析/開発 サポート セミナー&イベント 会社情報 お問い合わせ **English ▶**

ホーム > 製品情報 > VOXELCON

どんな形状も簡単モデリング
イメージベースでCT画像3D編集・解析・計測・材料特性算出

イメージベース構造解析ソフトウェア
VOXELCON

VOXELCON（ボクセルコン）は、現物から得られるCT画像やCADからのSTLデータをダイレクトにモデル化し解析・計測に利用する、強力なイメージベース構造解析ソフトウェアです。

現物のCTイメージデータから直接モデリングを行うことで、より現実に即した解析が可能になります。また現物データの各種計測処理や、現物データと設計データとの形状比較など、様々なリバースエンジニアリング機能を備えています。

マルチスケール解析機能を利用した複合材料や多孔質材料の研究・開発分野、一般にCADデータの取り扱いが困難なバイオエンジニアリング分野など、幅広い分野で活用されています。

現物データがそのまま使えます
VOXELCONの最大の特長は、現物データがそのまま使えるという点にあります。現物データ… [続きを読む](#)

超高速・ロバストなボクセル分割
VOXELCONのボクセル分割は超高速で、1億ボクセルのメッシュも数十秒以内で作成できます… [続きを読む](#)

バイオエンジニアリング分野への応用
バイオエンジニアリング分野においては、設計データが存在しないため、実物を計測し… [続きを読む](#)

さまざまなリバースエンジニアリング機能
構造解析や計測機能として、多彩なリバースエンジニアリング機能が搭載されており、… [続きを読む](#)

大規模ソルバー搭載
特に複雑な形状を有するモデルに対し、形状になるべく忠実にボクセル分割しようとする… [続きを読む](#)

先端的なマルチスケール解析
均質化法や重合メッシュ法といった、先端的なマルチスケール解析機能をいち早く取り入… [続きを読む](#)

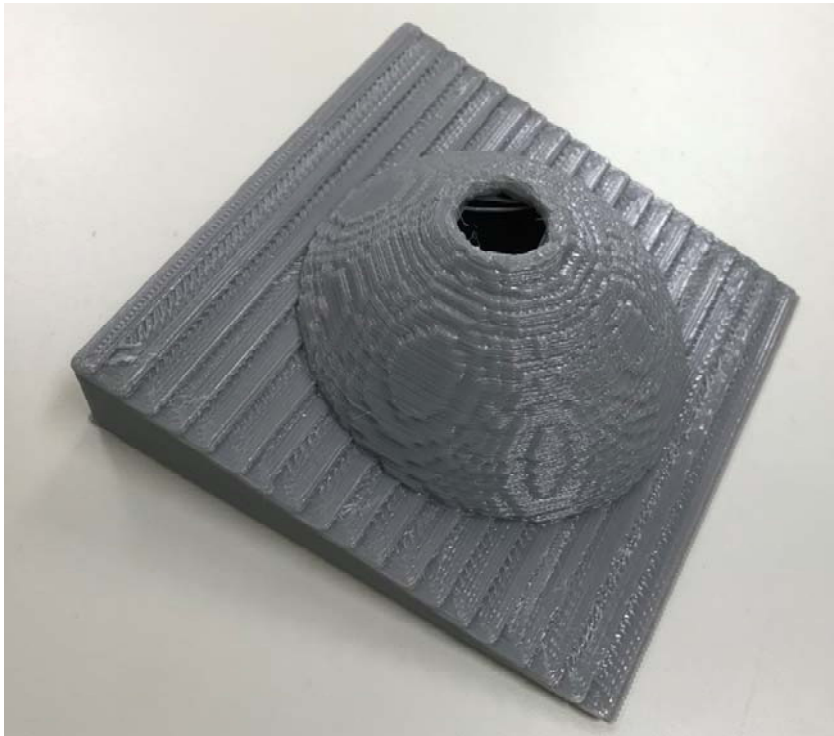
イメージベース構造解析
VOXELCON

- ▶ 特長
- ▶ 機能
- ▶ 事例
- ▶ 仕様
- ▶ 体験版お申し込み
- ▶ カタログダウンロード
- ▶ ユーザーページ
 - * IDとパスワードが必要です。

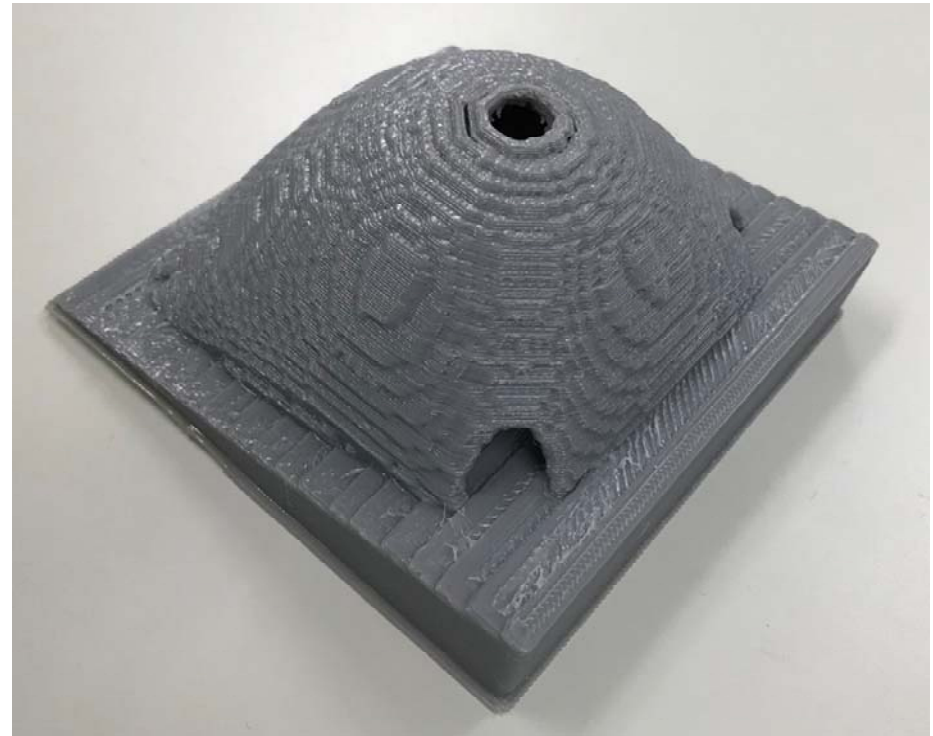
製品情報

- ▶ 構造最適設計
OPTISHAPE-TS
 - 教育用位相最適化
OPTISHAPE-ES
- ▶ SOLIDWORKSアドイン
構造最適設計
HiramekiWorks
- ▶ CADモデル生成
S-Generator
- ▶ イメージベース構造解析
VOXELCON
- ▶ パラメータ最適化支援
AMDESS

有機的建築（フランク・ロイド・ライト+アントニ・ガウディ）



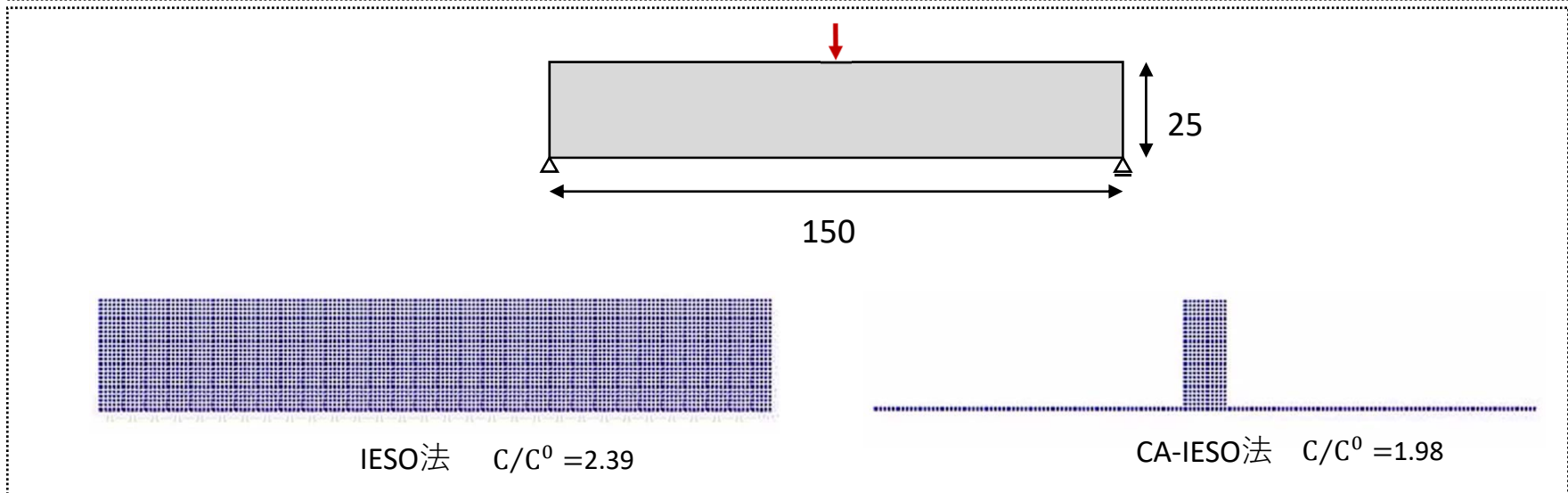
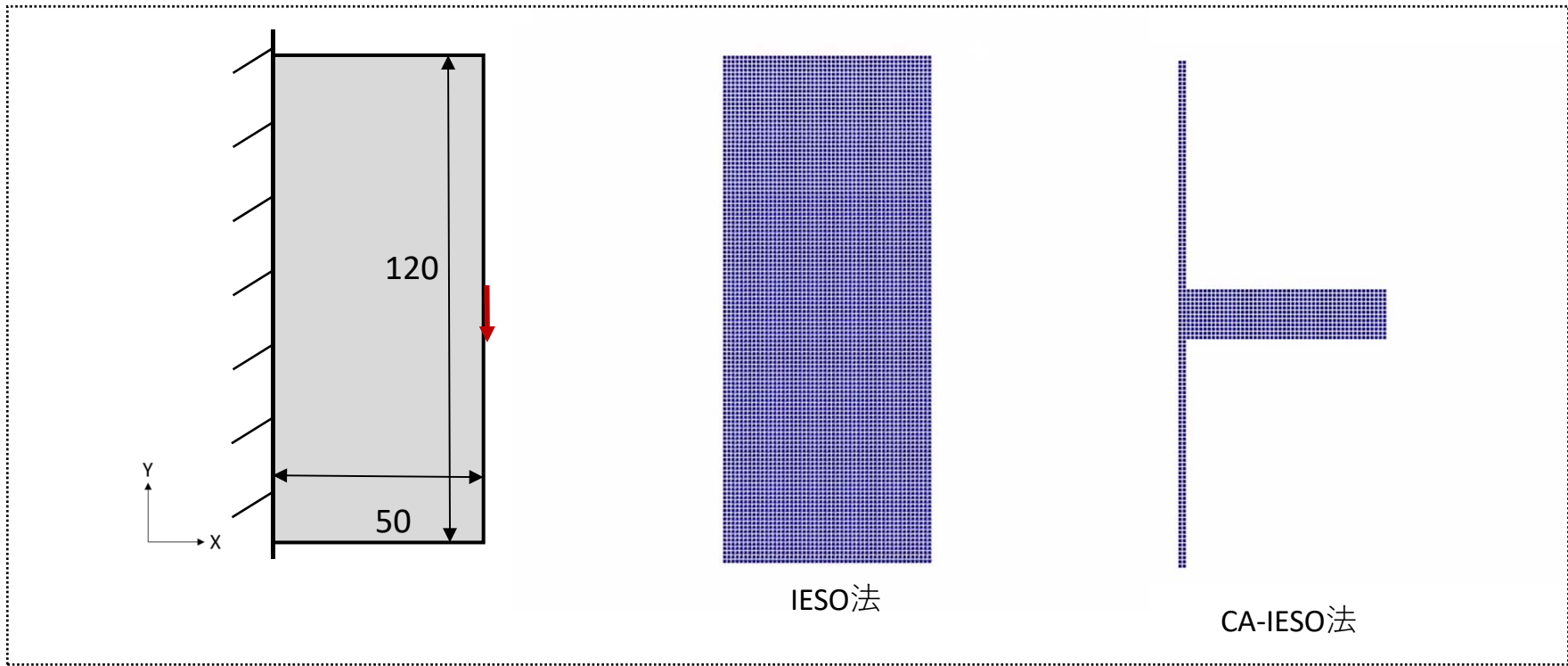
円形境界のシェル



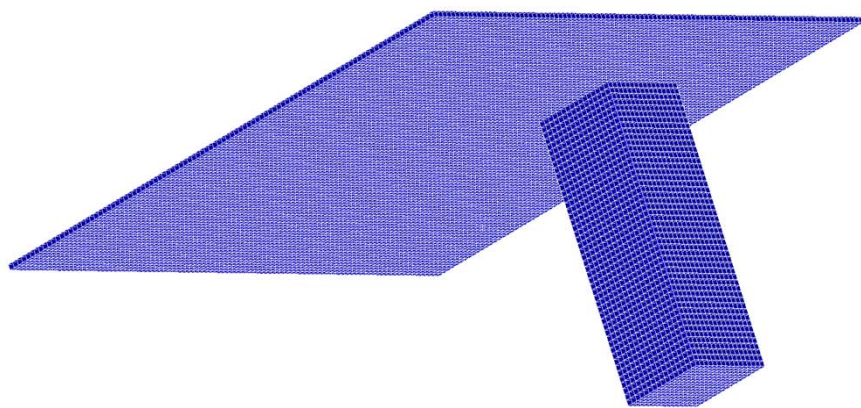
四角形境界のシェル

地から生えてくるような形態が創生ないか？

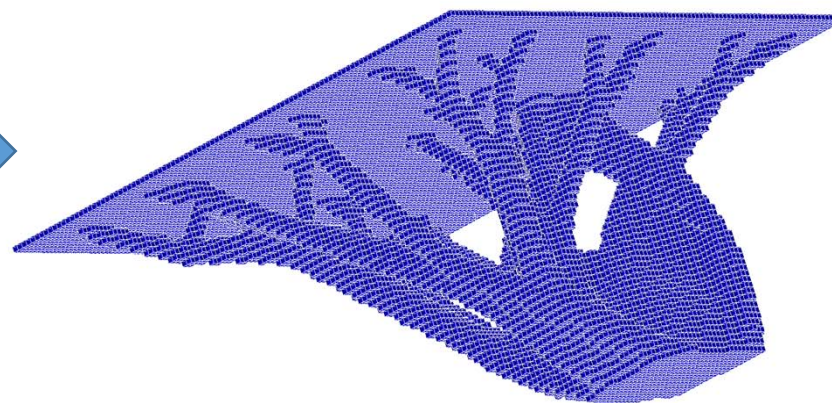
最新の研究（その2） CA-IESO法



CA-IESO法 (3D)



初期形態



進化形態

第2章 グランドストラクチャ法を用いた 建築構造の形態創生

研究業績論文

-
- 2-1 藤井大地, 松本慎也, 藤谷義信, 菊池昇: グランドストラクチャー法による骨組構造物の位相最適化, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.46B, pp.1-8, 2000.3
-
- 2-2 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 最適化手法CONLINを用いた骨組構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.66, No.548, pp.59-66, 2001.10
-
- 2-3 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文: グランドストラクチャ法による建築構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.633, pp.1967-1973, 2008.11
-
- 2-4 高坂憲治, 松本慎也, 藤井大地: ESO法とグランドストラクチャ法を用いた骨組構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.721, pp.547-553, 2016.3
-
- 2-5 野村将貴, 松本慎也, 崎野良比呂, 藤井大地: ESO法を用いた高層ビルの制振ダンパー構面配置の最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.742, pp.1885-1892, 2017.12
-

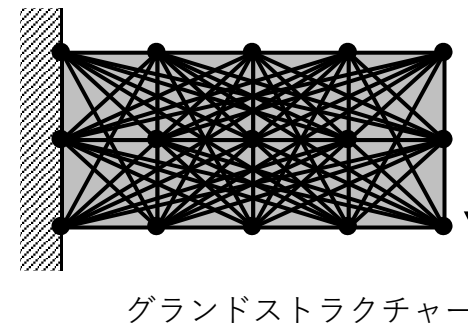
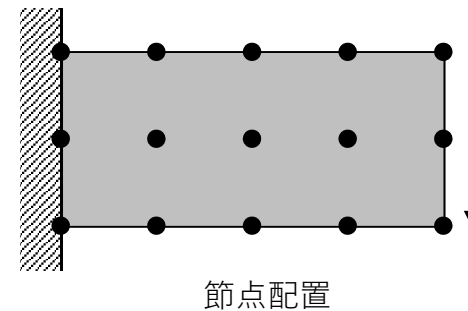
グラウンドストラクチャ法 (Ground structure Method)

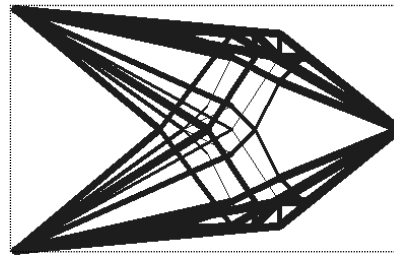
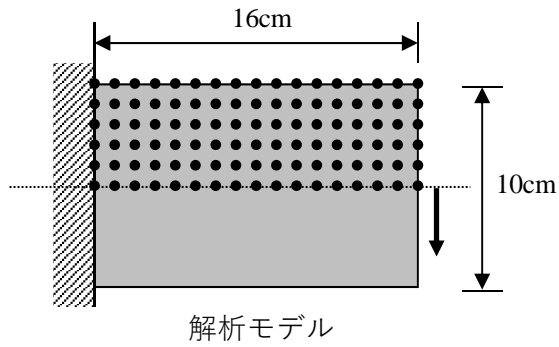
- 1970年代に開発された手法
節点数が増えると要素数が膨大となり
単純な問題に限定
- 1991年 Zhou and Rozvany
→ 目的関数：コンプライアンス
最適化手法：最適性規準法



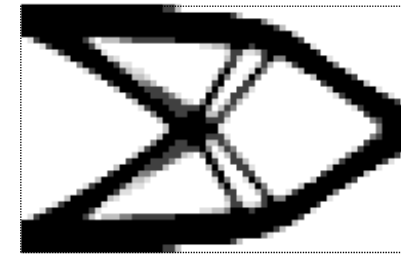
大規模問題の解析が可能に

コンプライアンスを目的関数にすることで
感度解析の計算効率が飛躍的に向上する

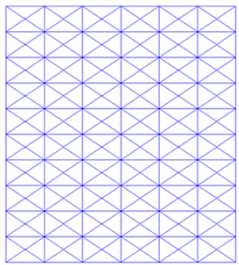




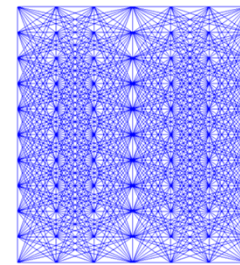
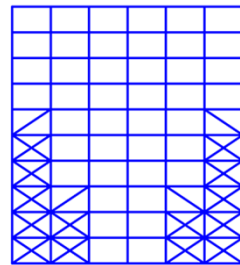
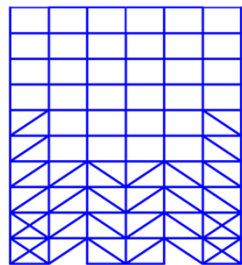
グランドストラクチャー法による解



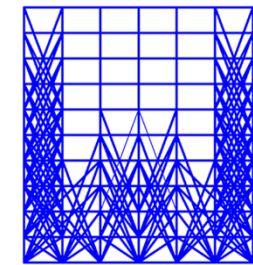
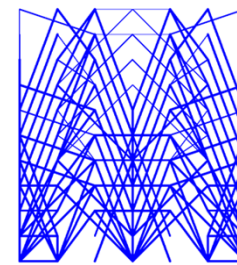
HDMによる解



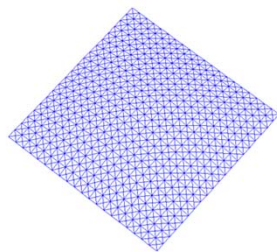
グランドストラクチャー



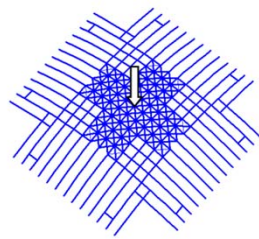
グランドストラクチャー



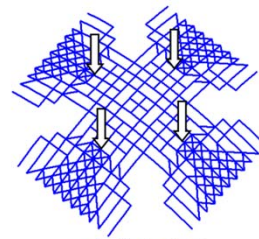
ビルのファサードデザインへの応用



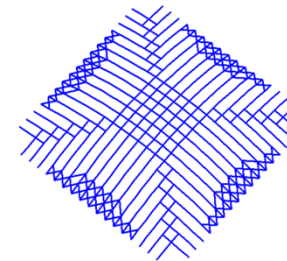
グランドストラクチャー



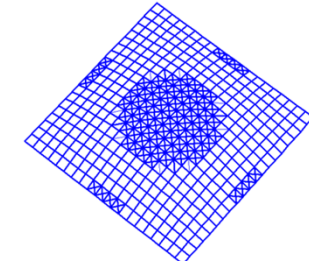
1点集中荷重



4点集中荷重



等分布荷重



等分布荷重(設計対象:斜材)

シェル構造の形態創生への応用

逐次線形計画法（SLP法）

- 局所解を見つけやすい。対称解析でも対称な解が得られない。
- 制約条件の扱いが簡単で、収束に関するロバスト性が高い。
- 汎用サブルーチンを利用できる。

最適性規準法（OC法）

- 設計変数の数に依らず収束が速い。
- 目的関数によっては収束解が得られない場合がある。
- 制約条件の扱いが煩雑。

凸線形化法（CONLIN法）

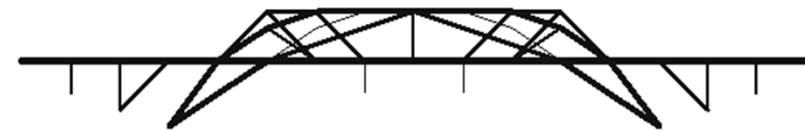
- 設計変数と設計変数の逆数でテーラー展開した問題を双対法を用いて解く方法であり、収束が速く、汎用性がある。



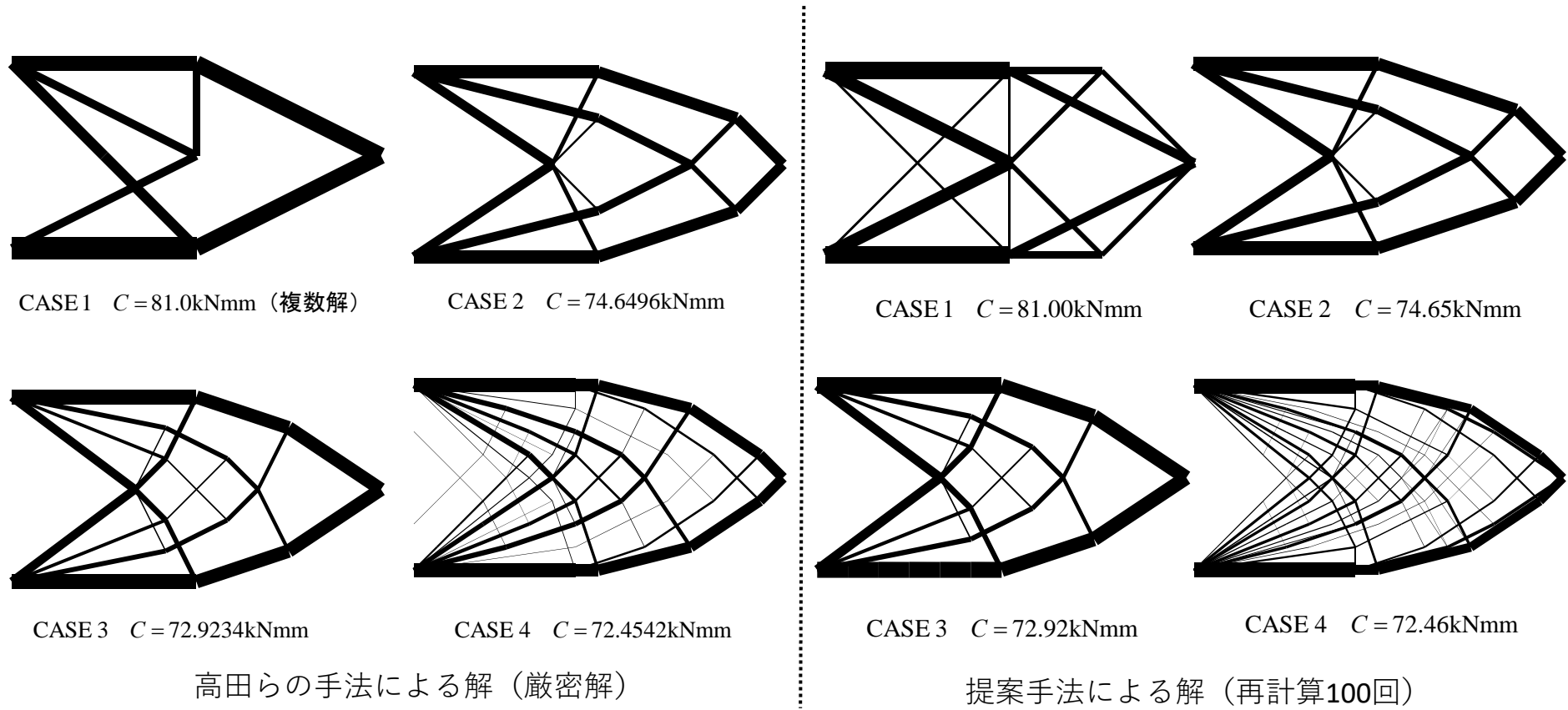
Topology obtained by
CONLIN



Topology obtained by
SLP



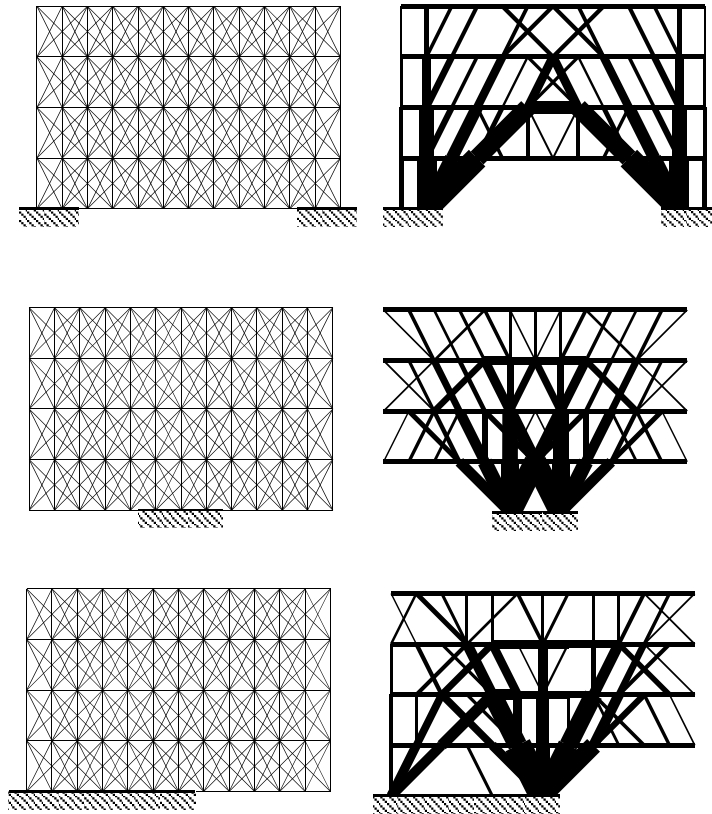
Topology obtained by
OC

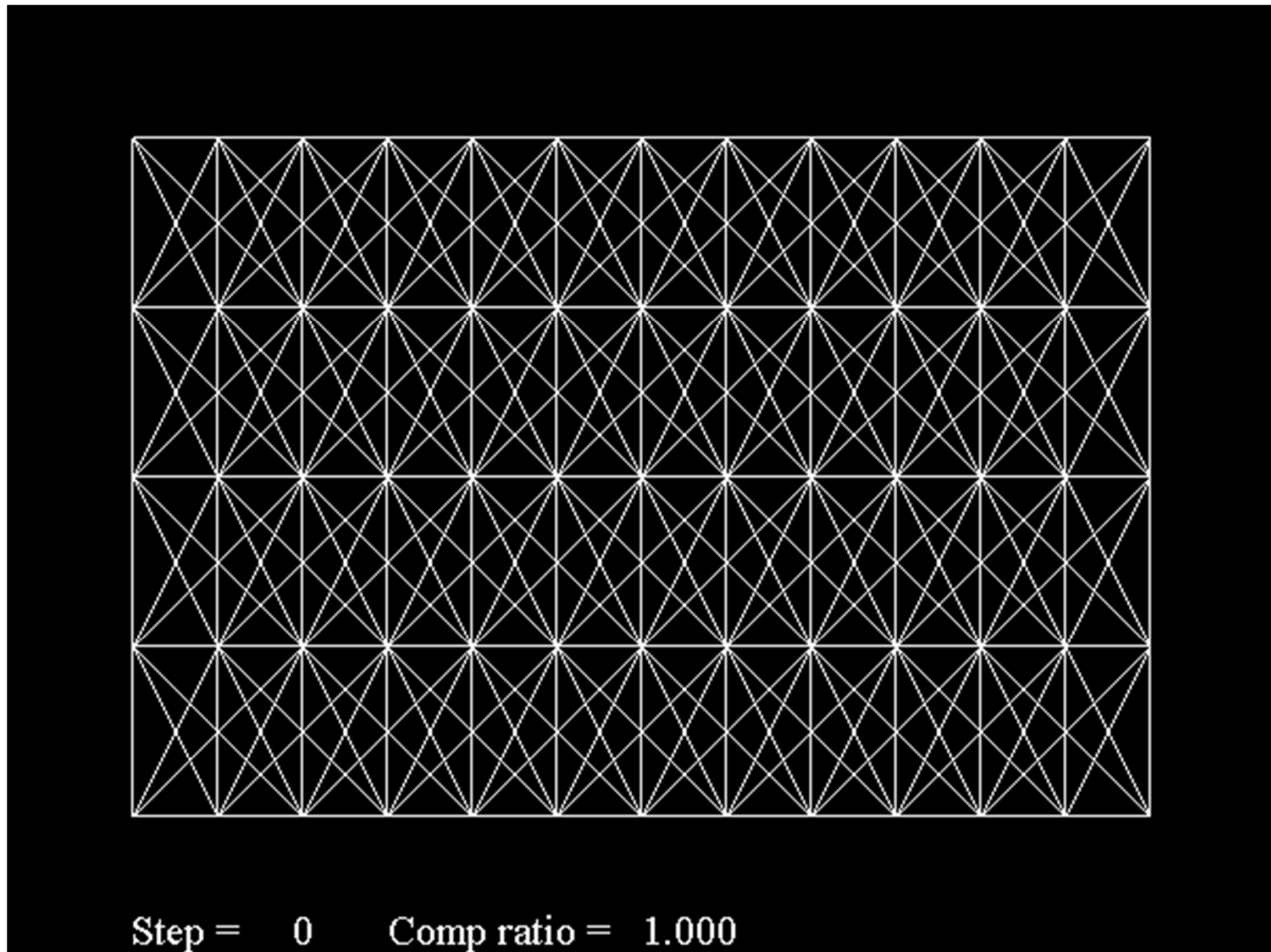


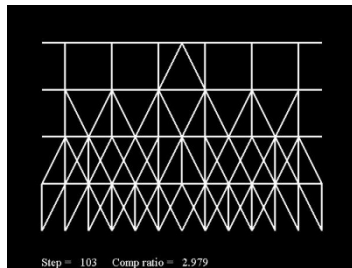
以上はトラス構造の解析結果比較であるが、提案手法では、厳密解が得られない剛接骨組や部材太さをより均等にする問題にも適用可能なため、汎用性がある。



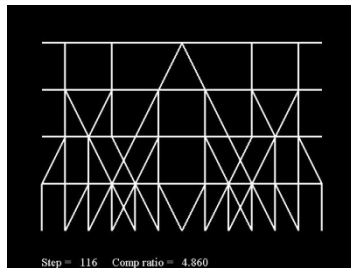
2008年



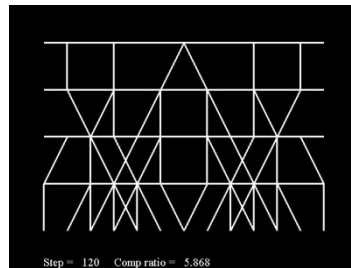




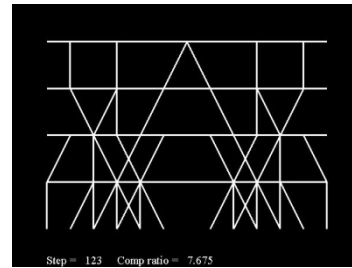
Step 103 $C/C^0 = 2.979$



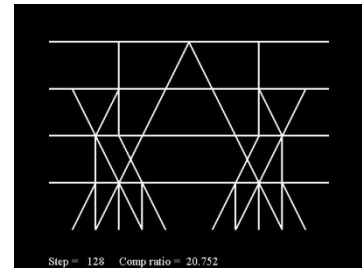
Step 116 $C/C^0 = 4.860$



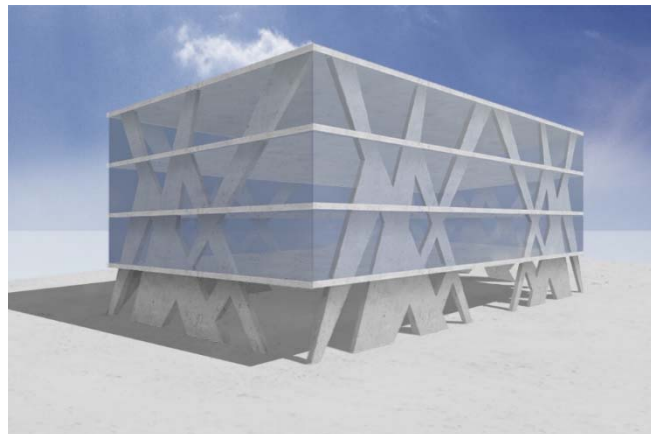
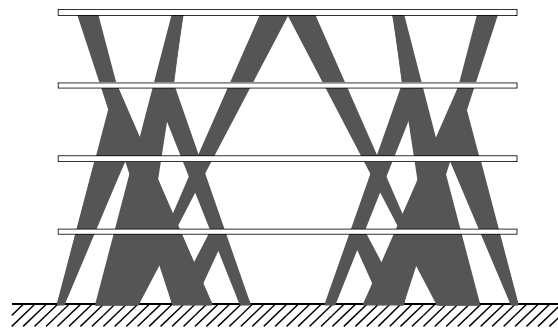
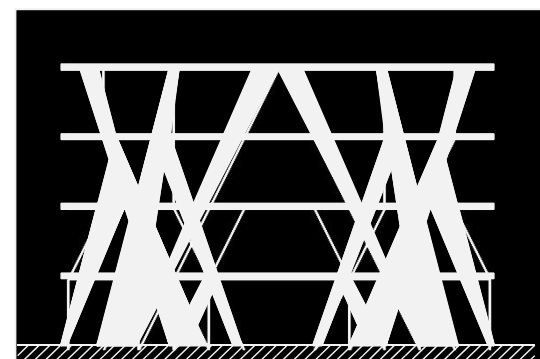
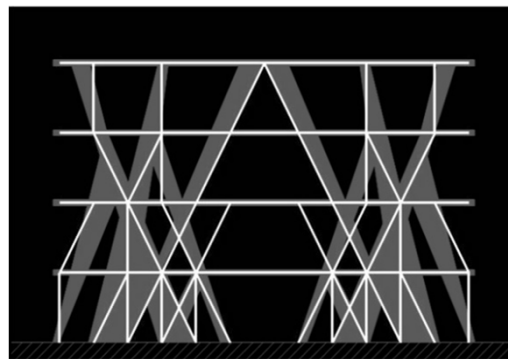
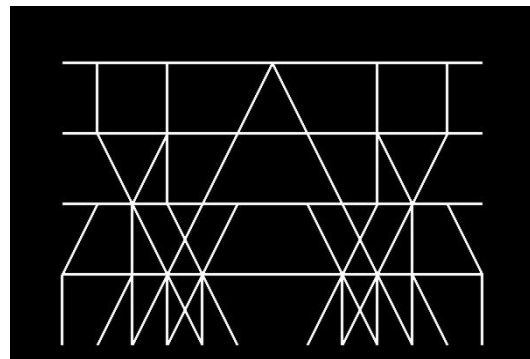
Step 120 $C/C^0 = 5.868$

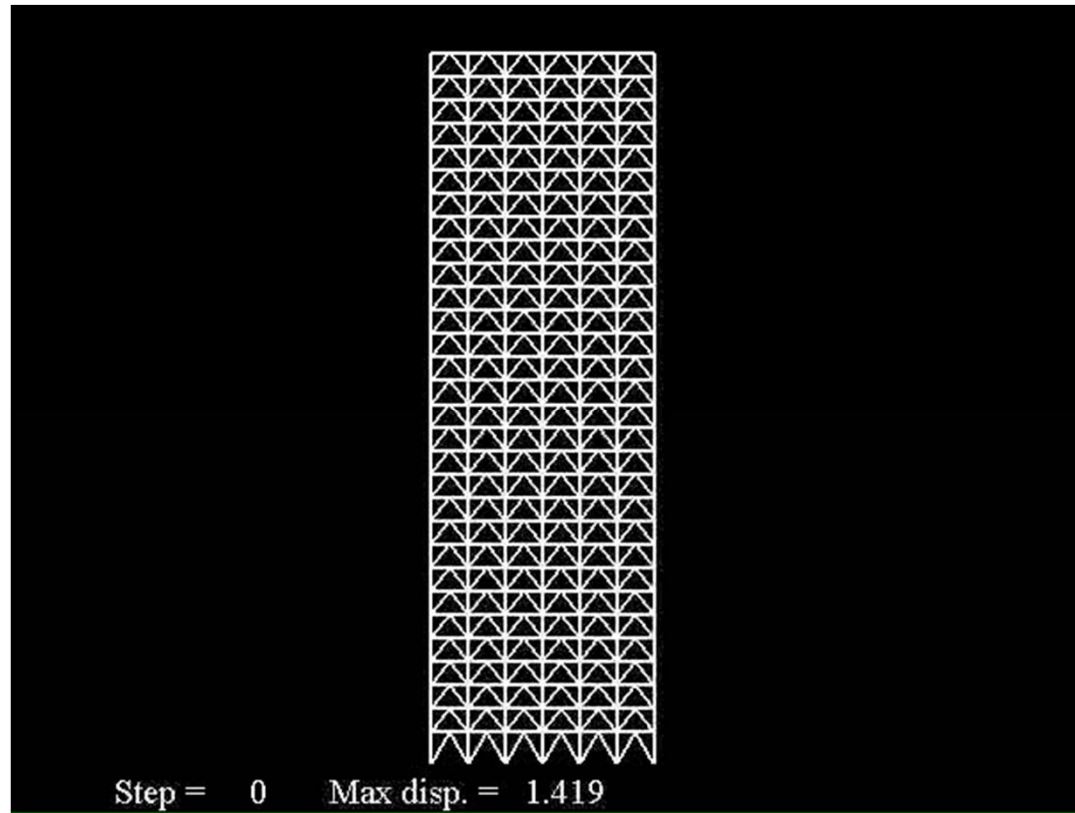


Step 123 $C/C^0 = 7.675$



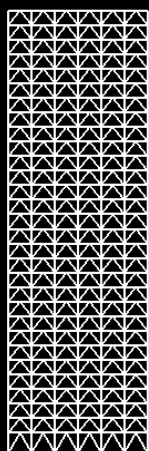
Step 128 $C/C^0 = 20.752$



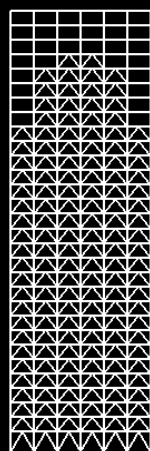


苦小牧波

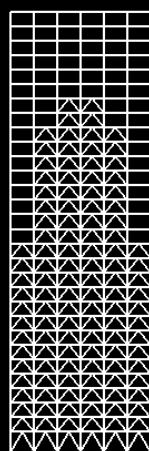
苦小牧
弾性解



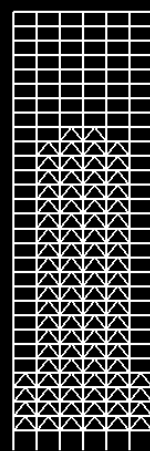
Step 0



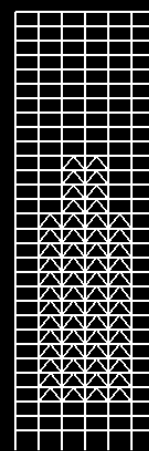
Step 15



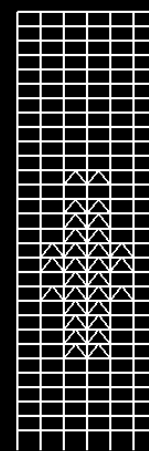
Step 30



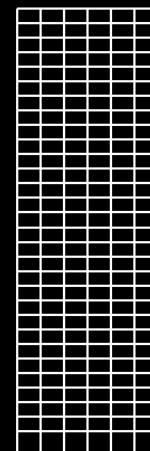
Step 45



Step 60

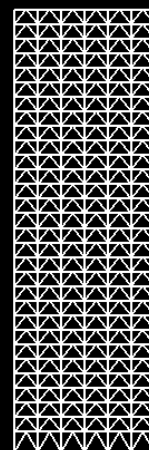


Step 75

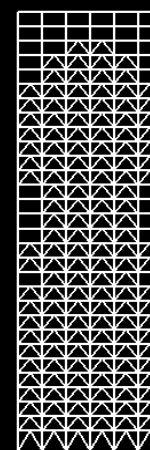


Step 90

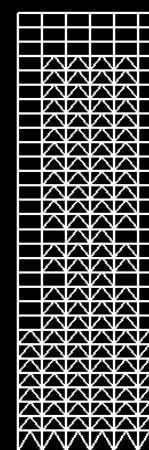
El Centro
弾性解



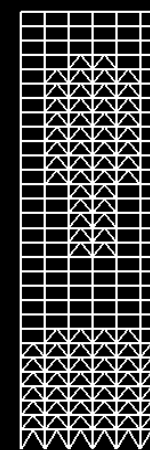
Step 0



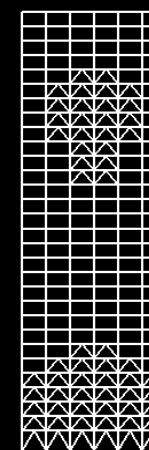
Step 15



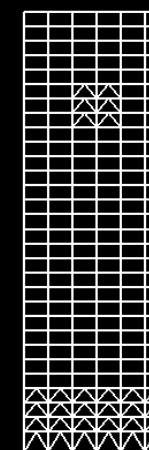
Step 30



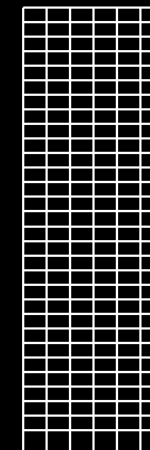
Step 45



Step 60



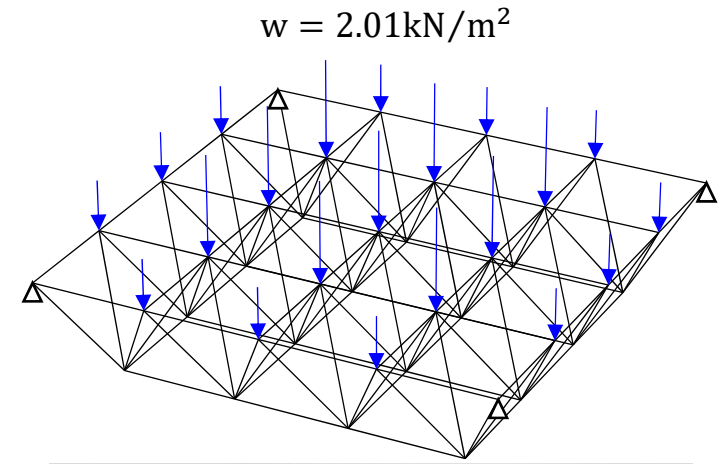
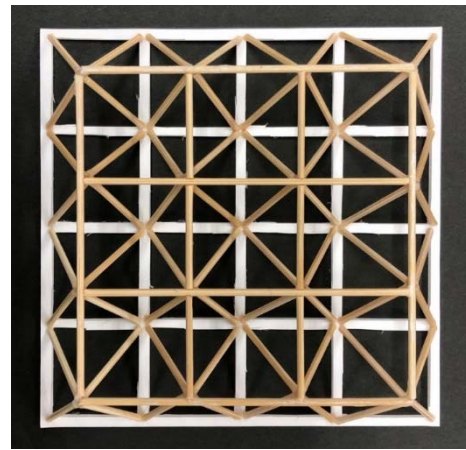
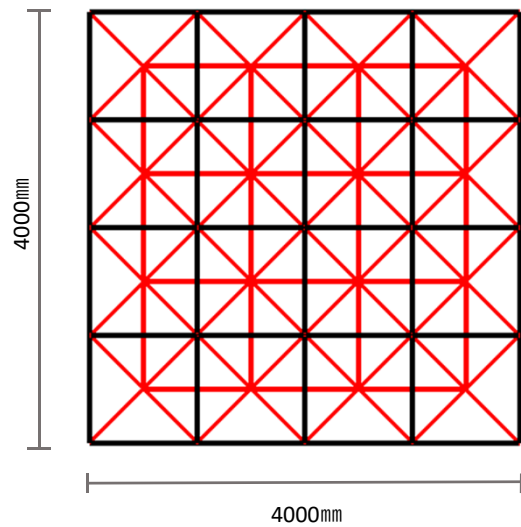
Step 75



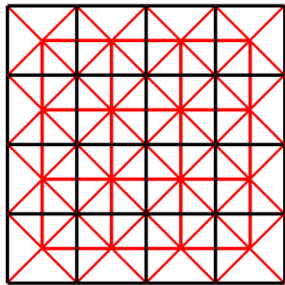
Step 90

最新の研究（その3）部分的複層スペースフレーム

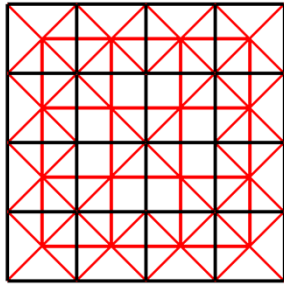
工学部：松本慎也先生、産業理工学部：小野聡子先生との共同研究



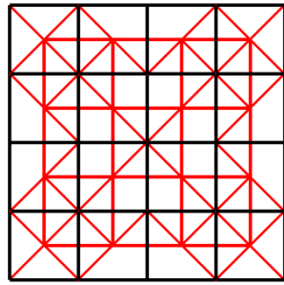
部材	サイズ [mm]	断面積 A [cm ²]	断面2次モーメント I [cm ⁴]
単層(鋼材)	H-150×150×7×10	39.65	1620
複層(集成材)	150×150	225	—



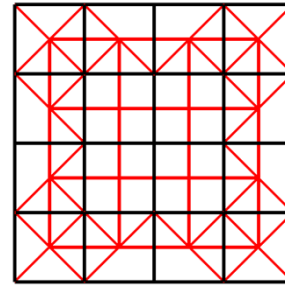
Step0



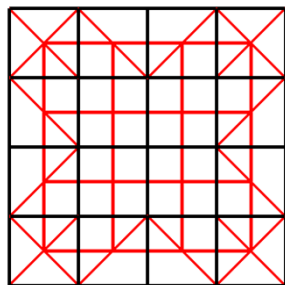
Step1



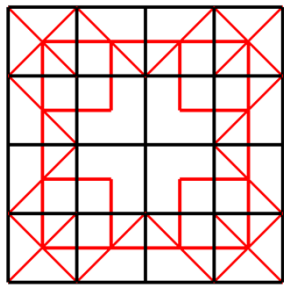
Step2



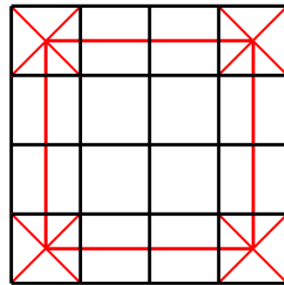
Step3



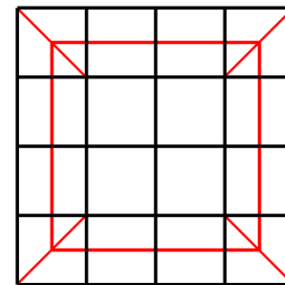
Step4



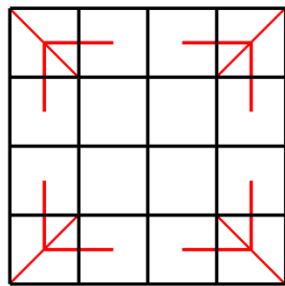
Step5



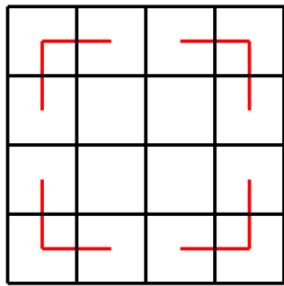
Step6



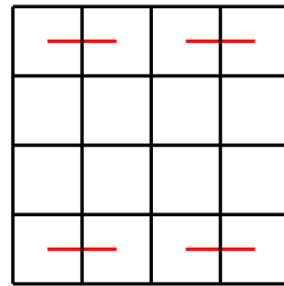
Step7



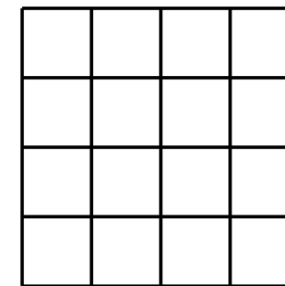
Step8



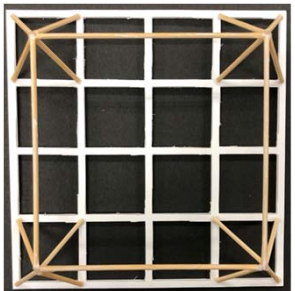
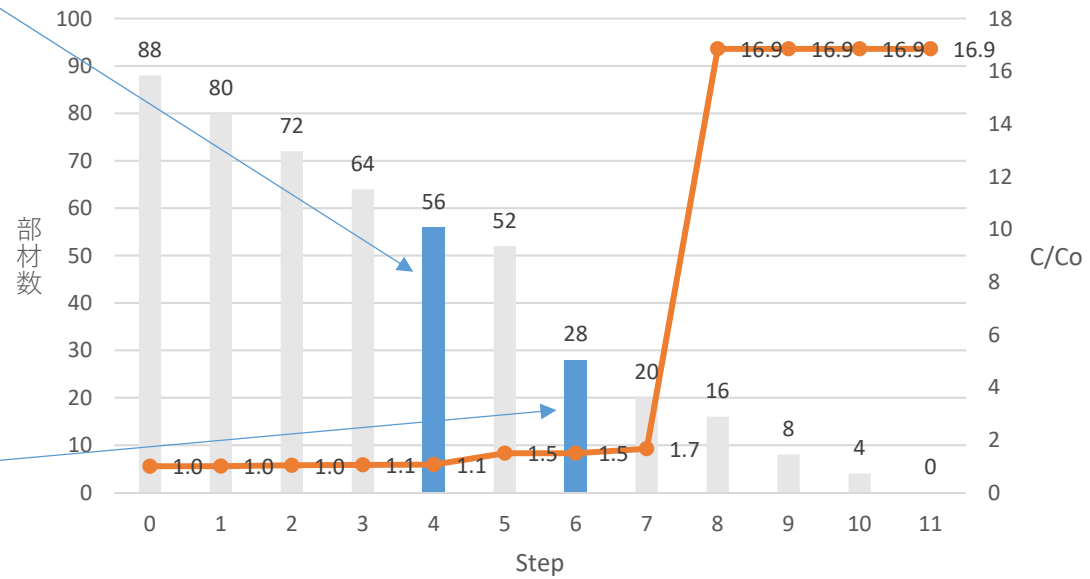
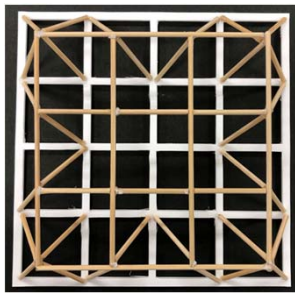
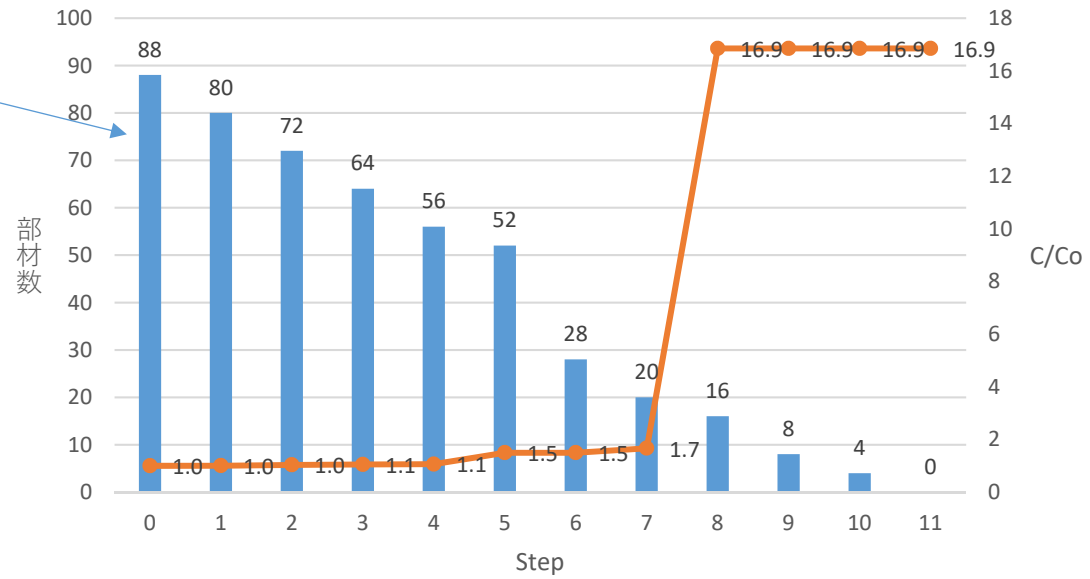
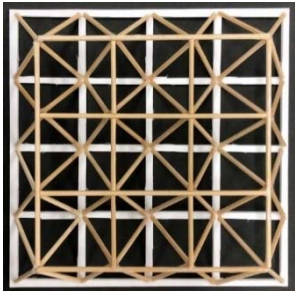
Step9



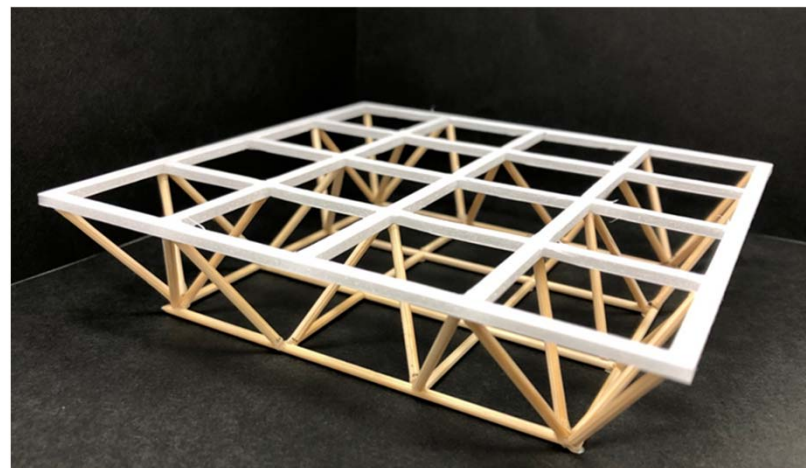
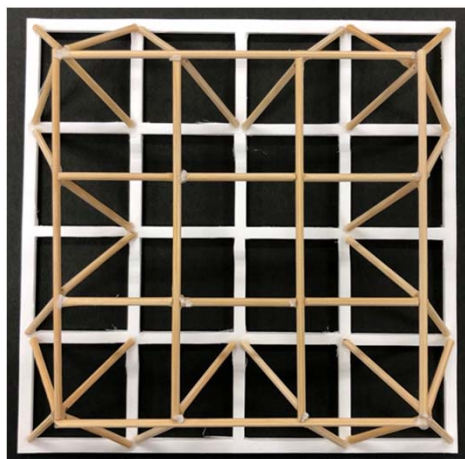
Step10



Step11

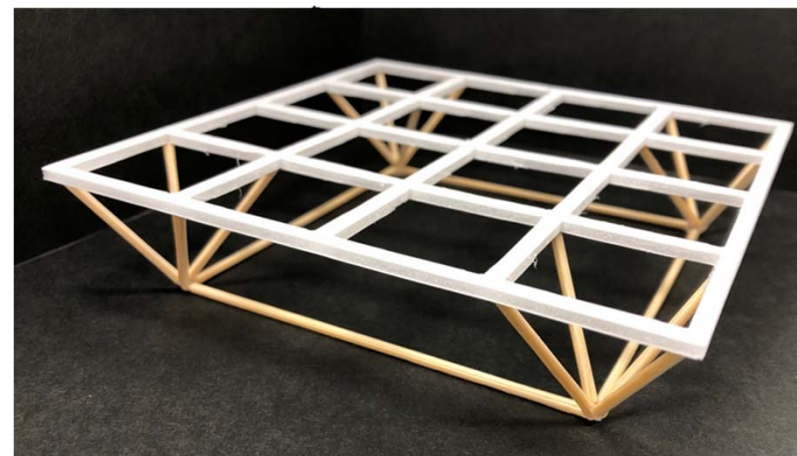
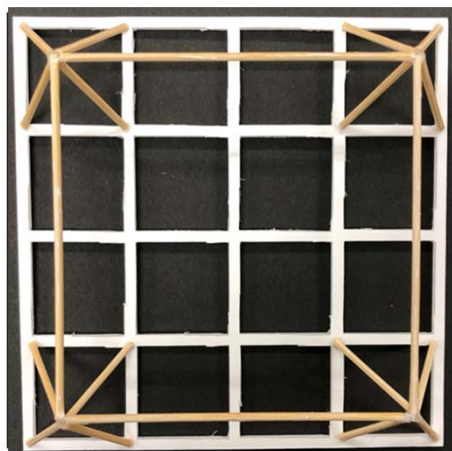


部材数 C/Co



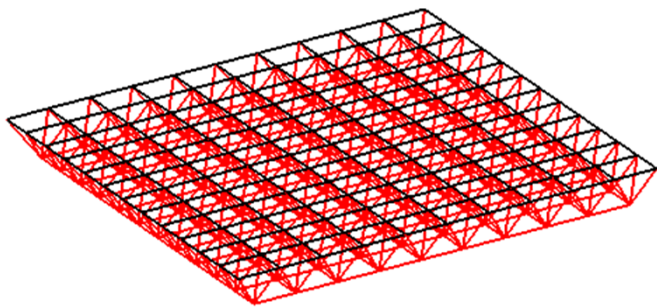
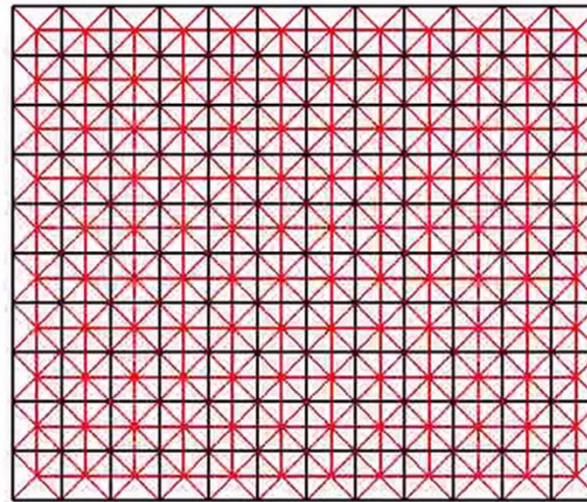
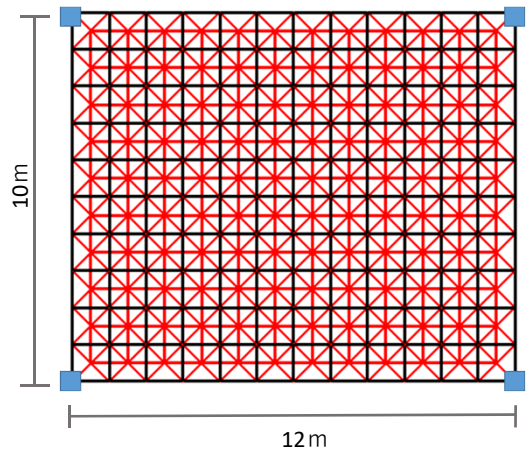
複層部材56

Step4

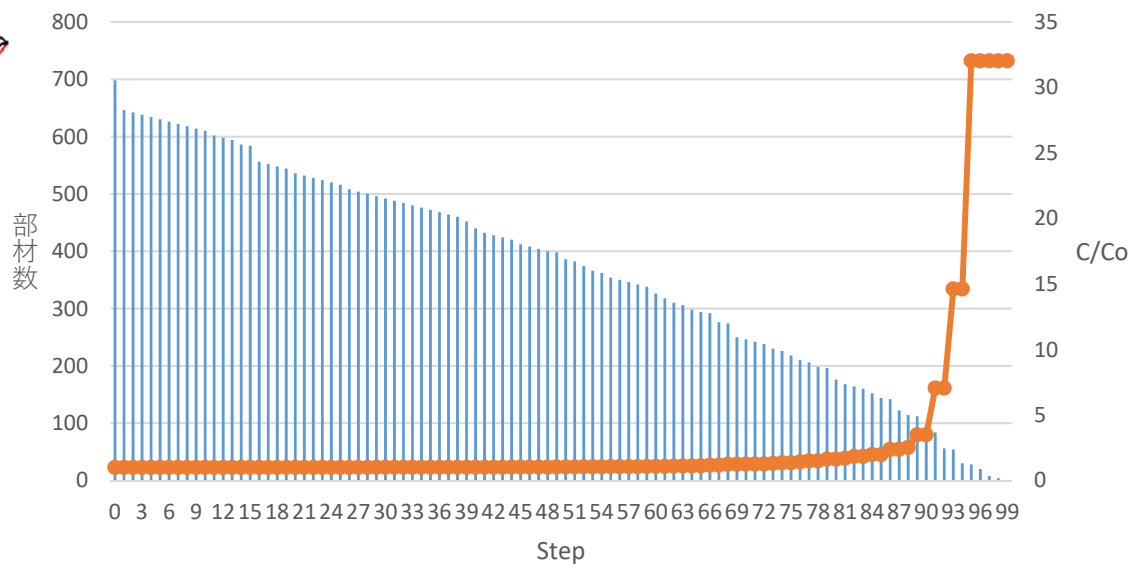


複層部材28

Step6



複層部材数698



部材数 C/Co

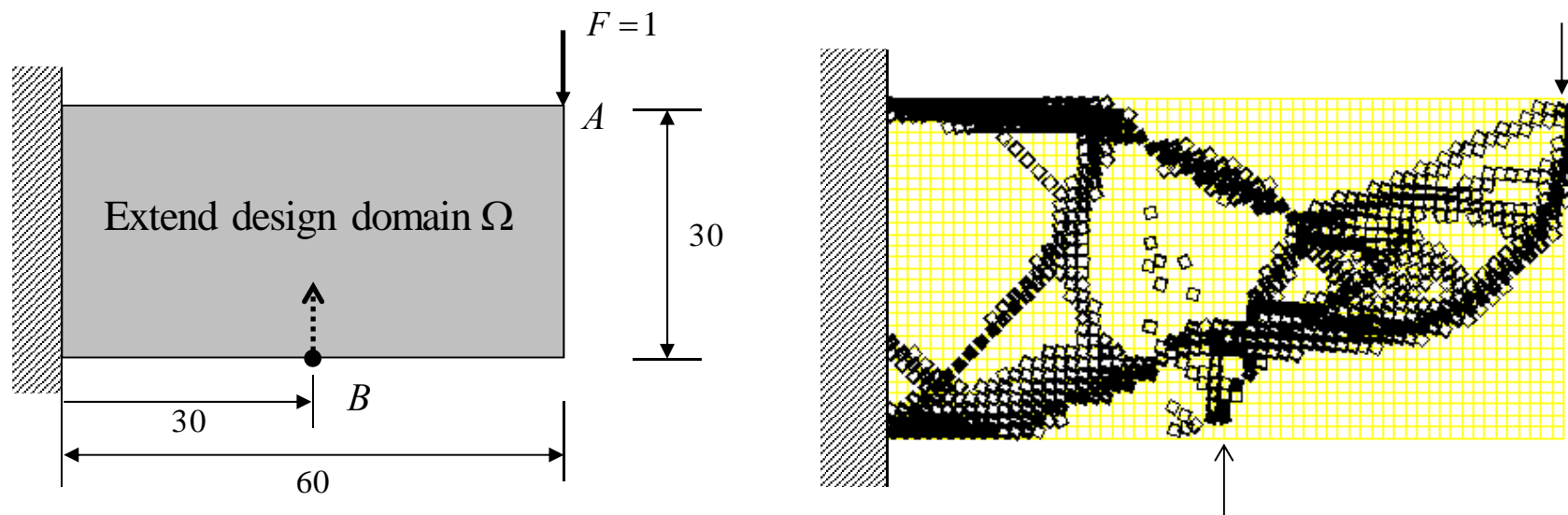
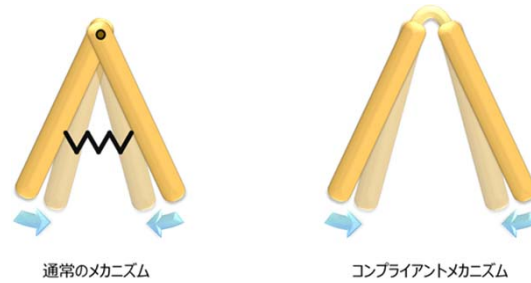
第3章 位相最適化手法を用いた 制振機構の形態創生

研究業績論文

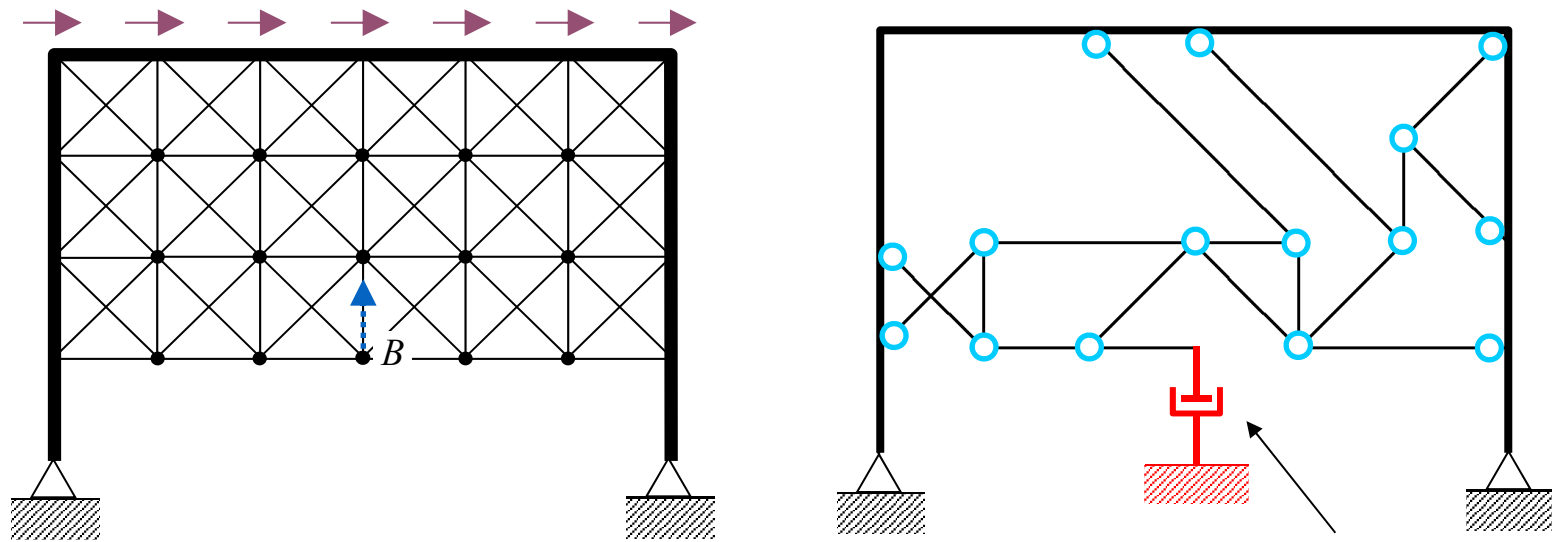
-
- 3-1 藤井大地, 江島晋, 菊池昇: 均質化設計法を用いた弾性変形機構の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.528, pp.99-105, 2000.2
-
- 3-2 藤井大地, 原田卓哉, 平田裕一: 骨組の位相最適化手法を用いたリンク機構の創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.70, No.597, pp.63-68, 2005.11
-
- 3-3 藤井大地, 谷澤 毅: 連続体の位相最適化手法を用いた制震機構の創生, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.619, pp.73-79, 2007.9
-
- 3-4 藤井大地, 山下真輝, 眞鍋匡利: 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
-

コンプライアントメカニズム (Compliant Mechanism) とは

自身の柔軟性によってヒンジやバネなどの機能を実現する機構



HDMによるコンプライアントメカニズムの位相最適化手法の提案



グラウンドストラクチャ

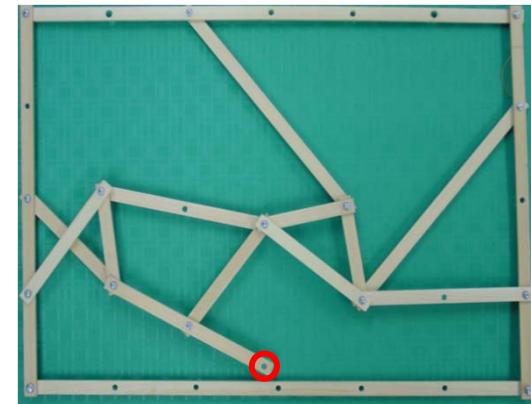
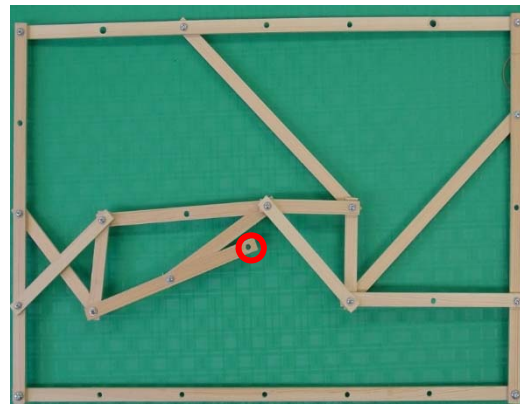
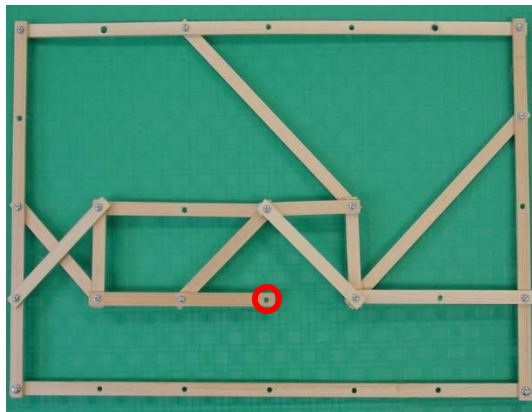
減衰装置



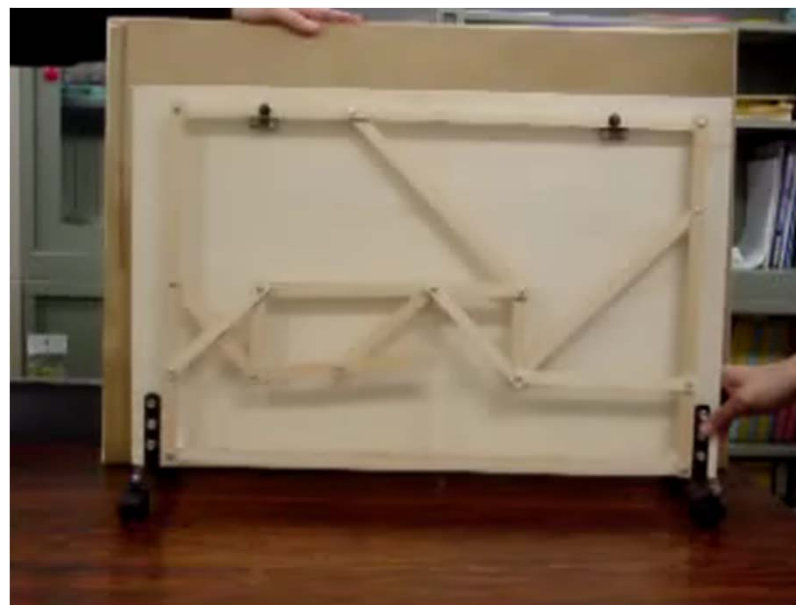
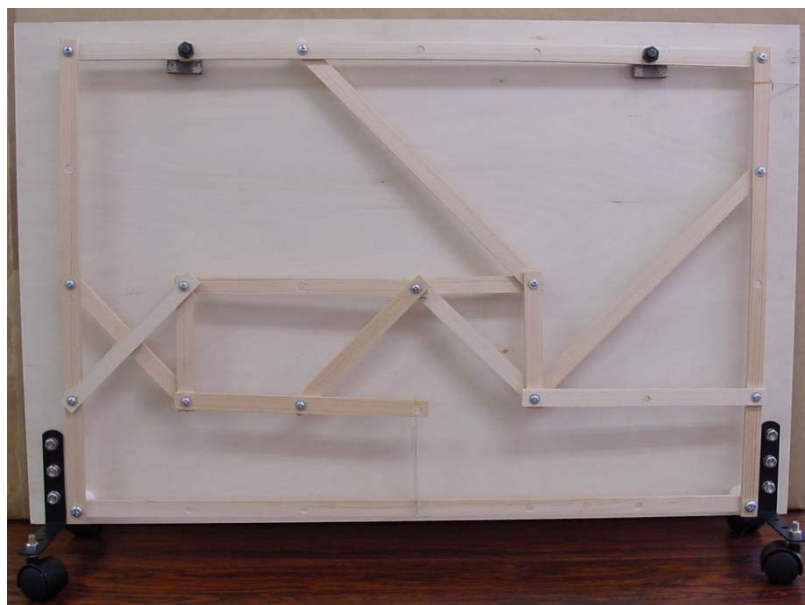
右方向変形

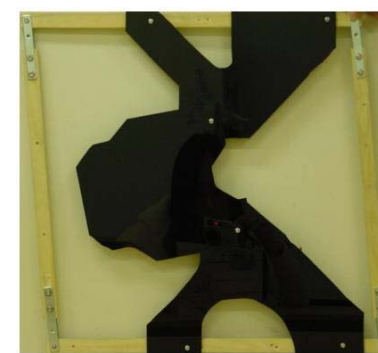
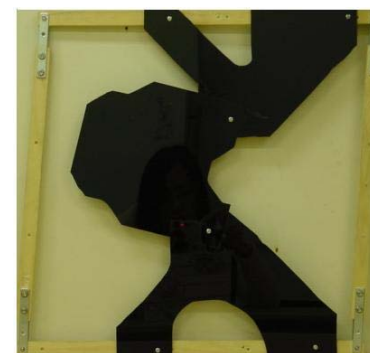
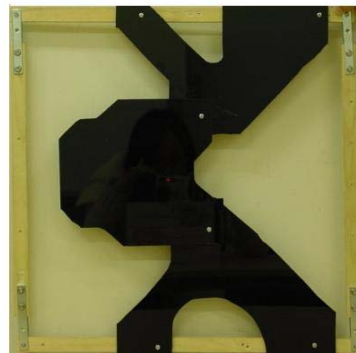
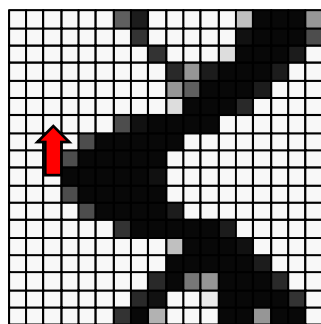
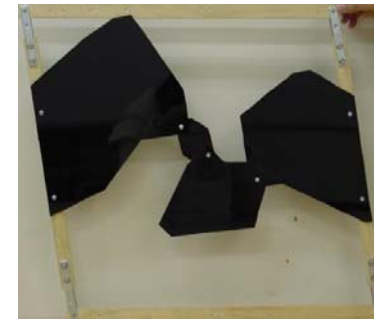
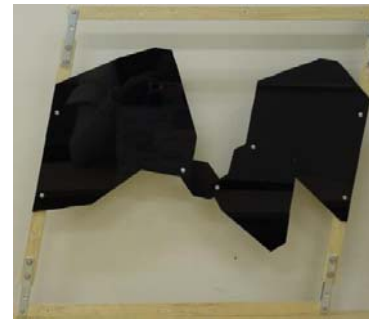
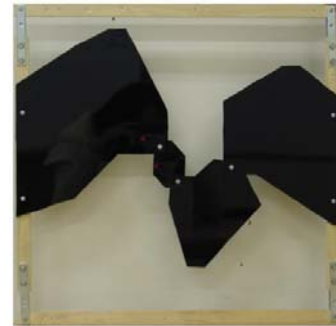
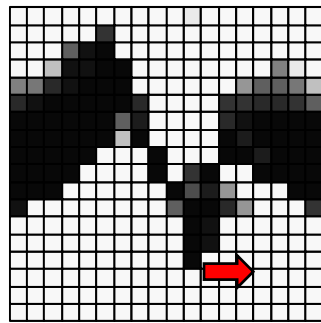
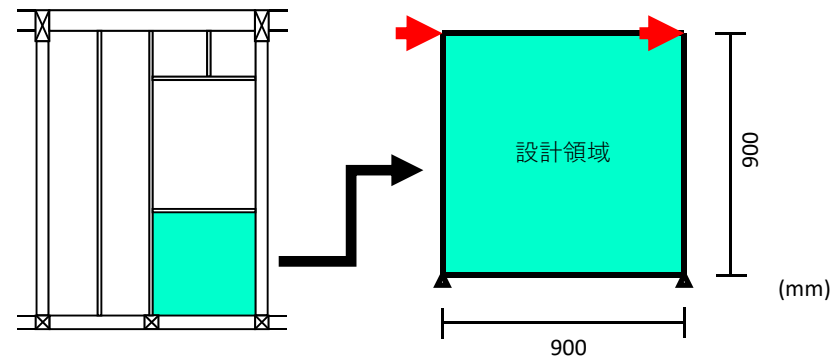


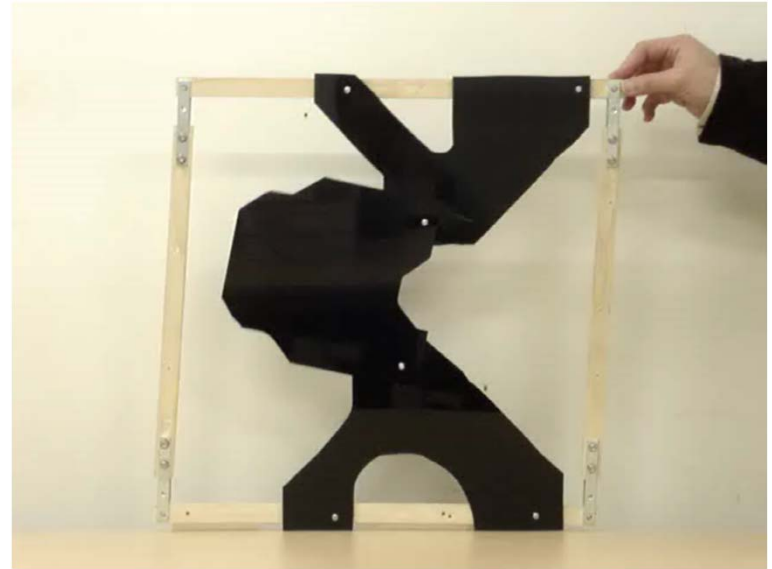
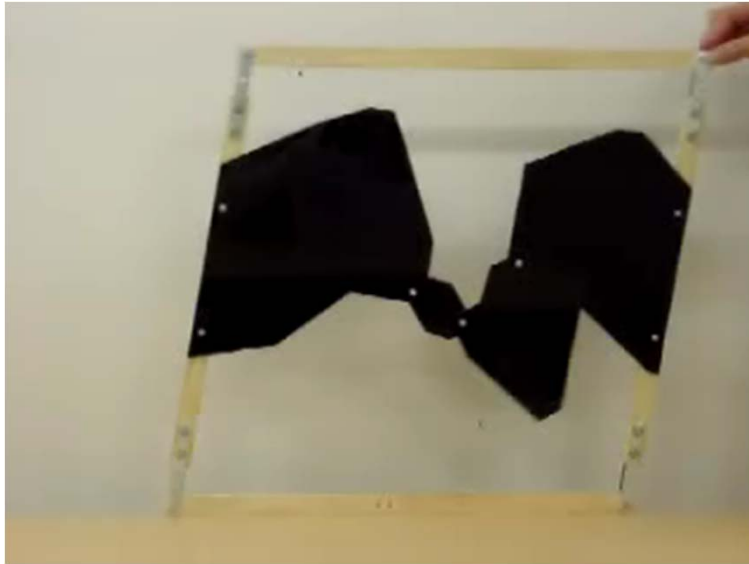
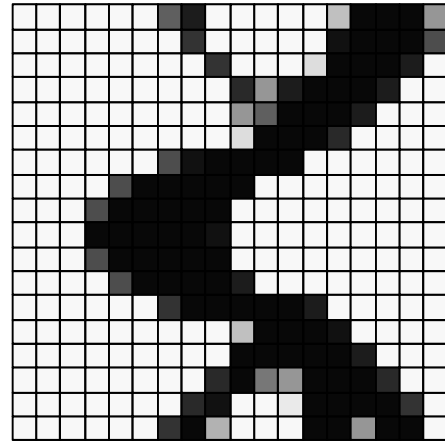
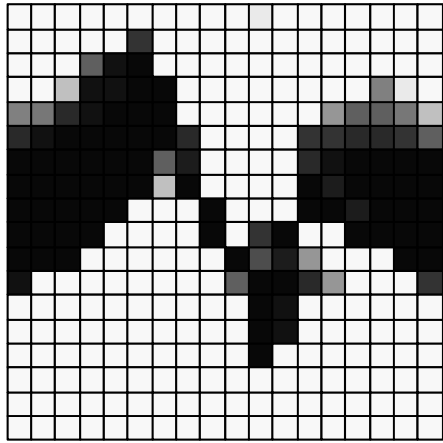
左方向変形

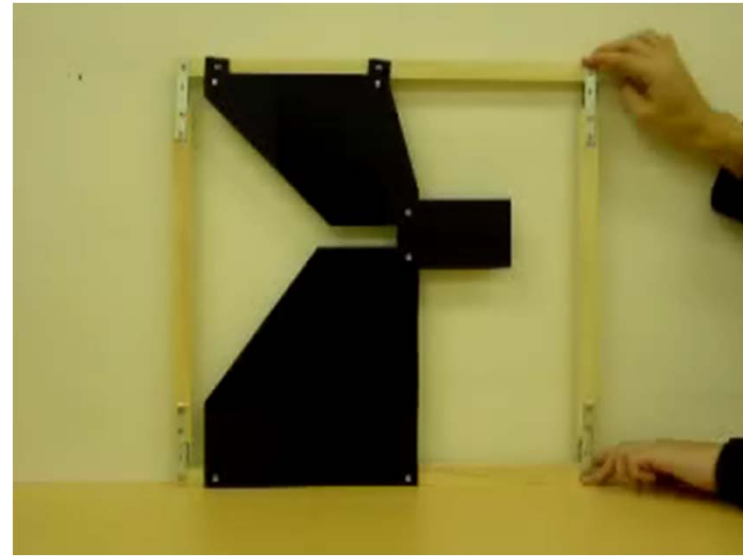
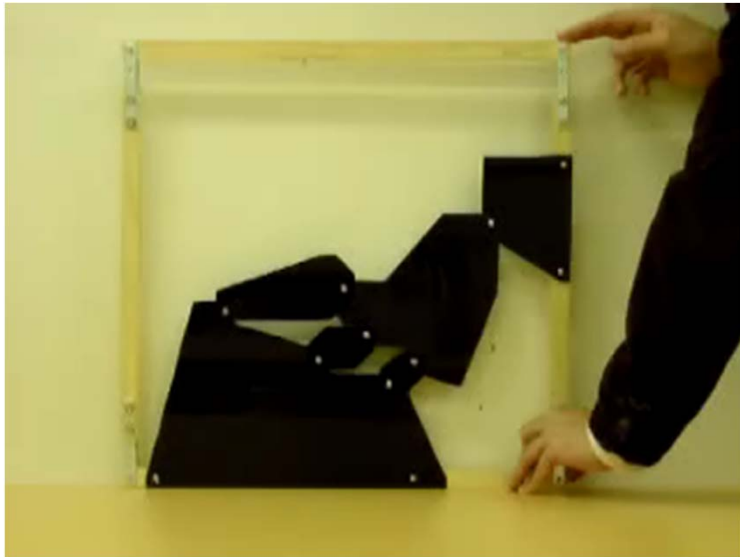
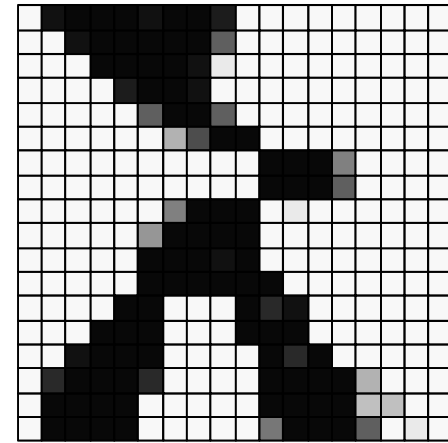
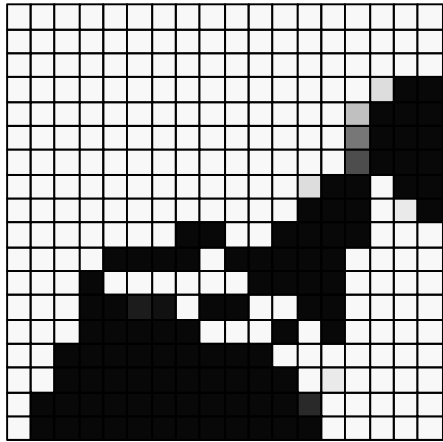


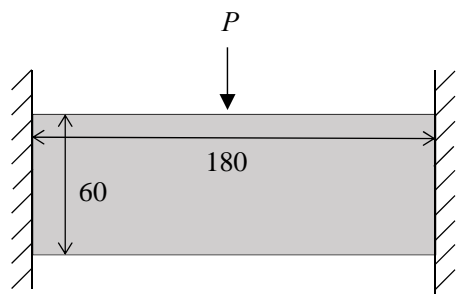
模型による検証



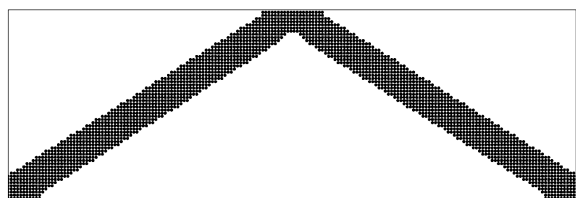




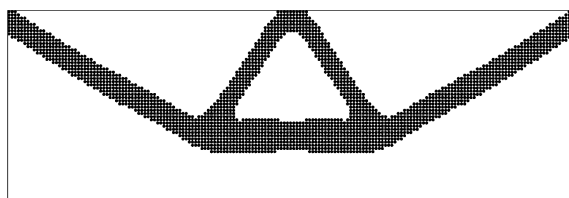




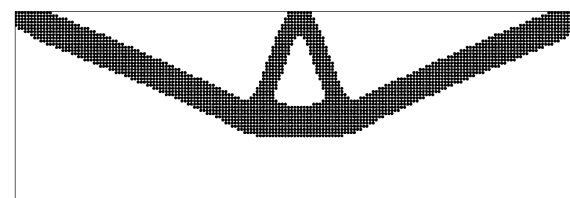
有限要素法の代わりに粒子法（HMPS法）を用いる
位相最適化手法は、IESO法+仕上アルゴリズム



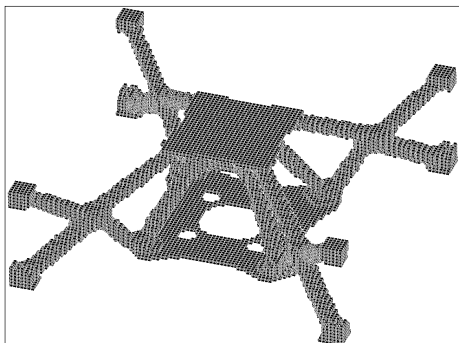
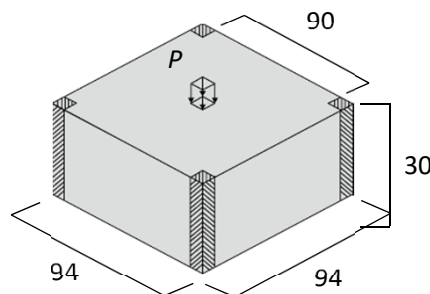
$P = 15\text{N}$



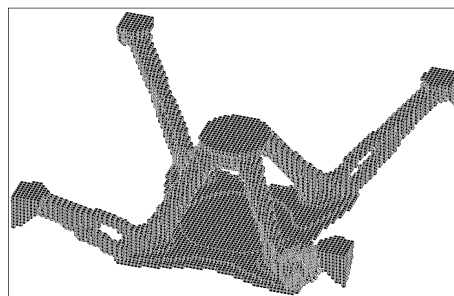
$P = 15 \times 20000\text{N}$



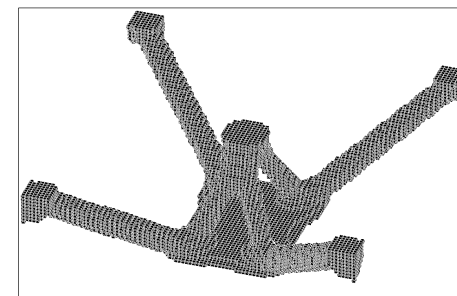
$P = 15 \times 30000\text{N}$



$P = 25\text{N}$

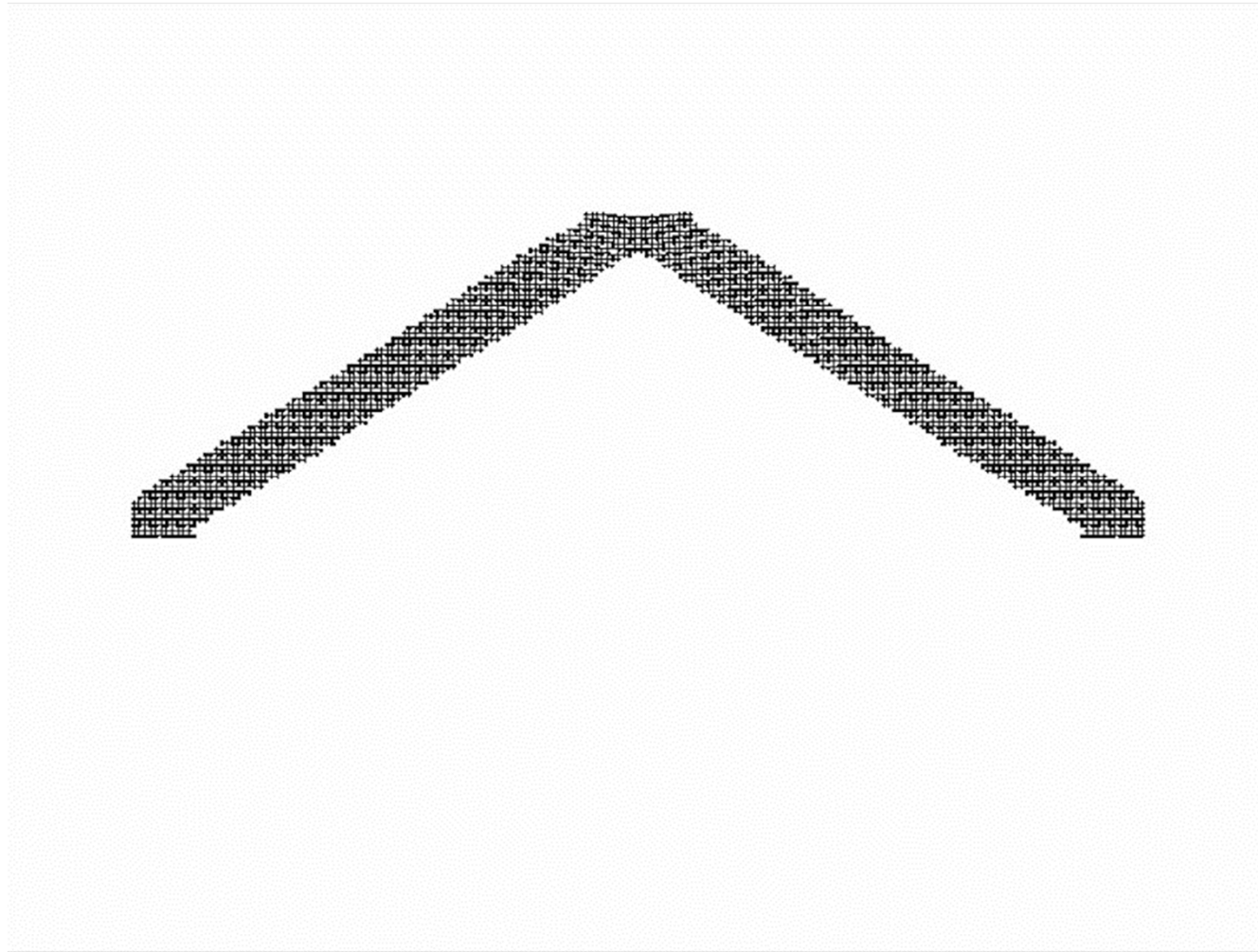


$P = 25 \times 20000\text{N}$

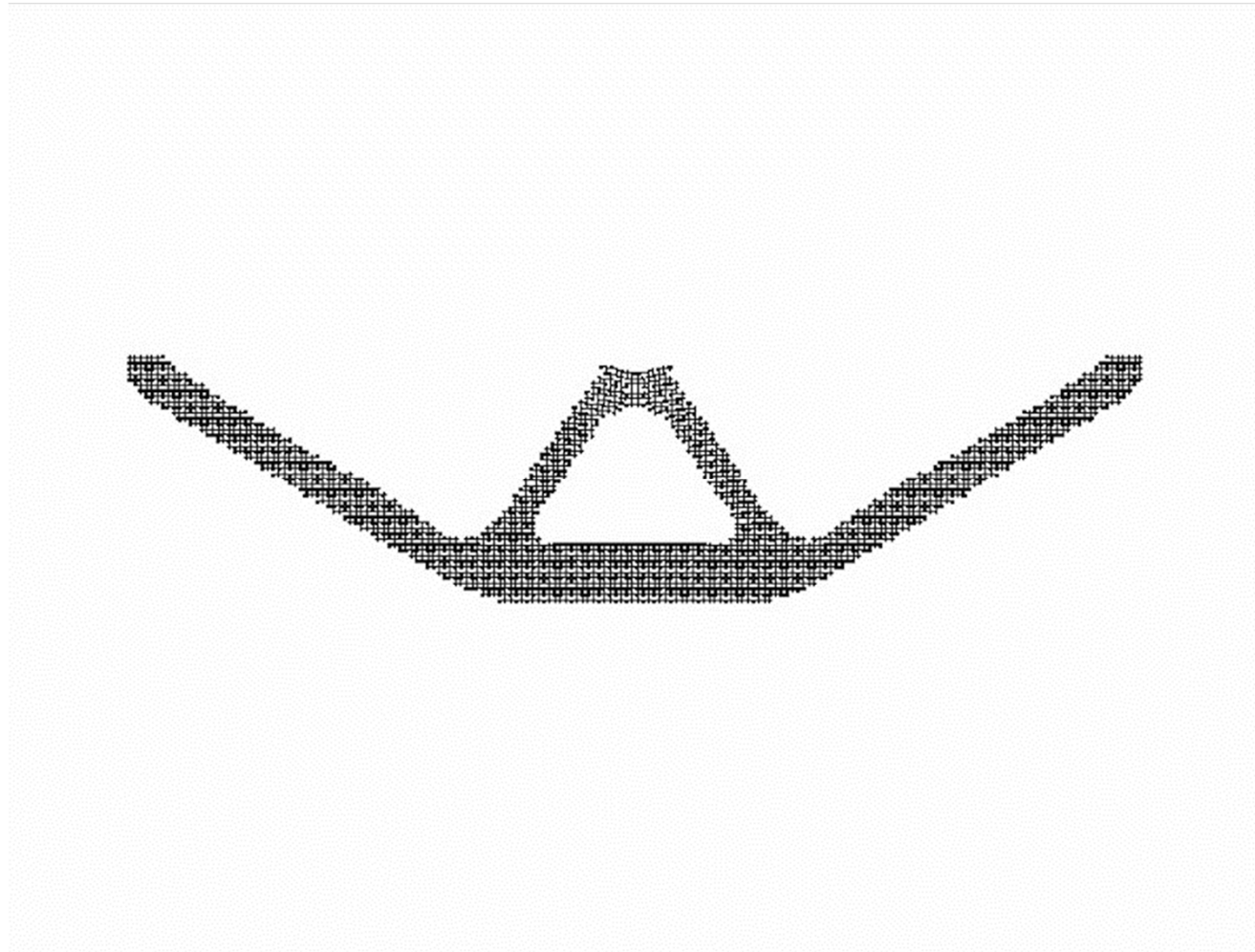


$P = 25 \times 30000\text{N}$

HMPS法による変位解析過程



HMPS法による変位解析過程



最新の研究（その4）大変形弾性部材の位相最適化

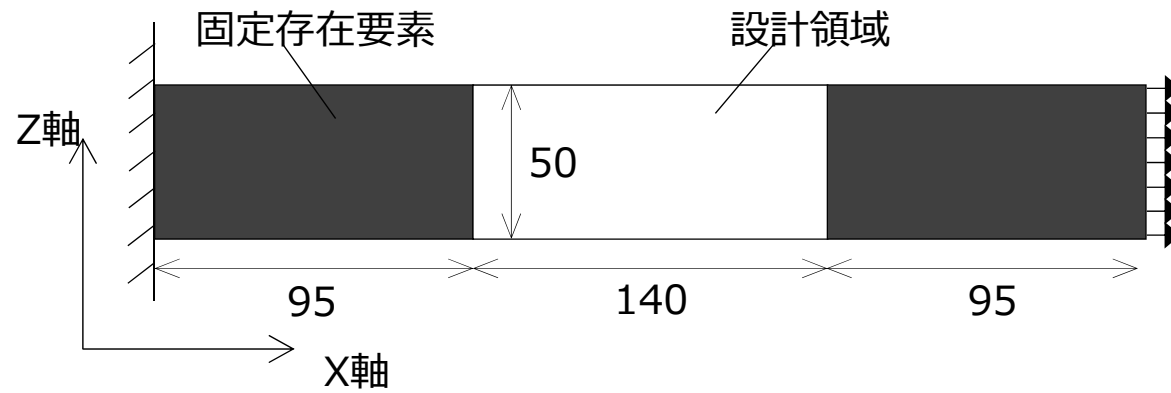


Fig.21 Obtained topology (No.12)











Fig.22 Obtained topology (No.13)

位相最適化例（澤田：構造系論文集2020・5）

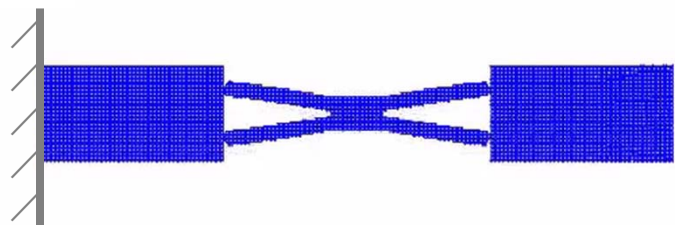
引張荷重

圧縮荷重

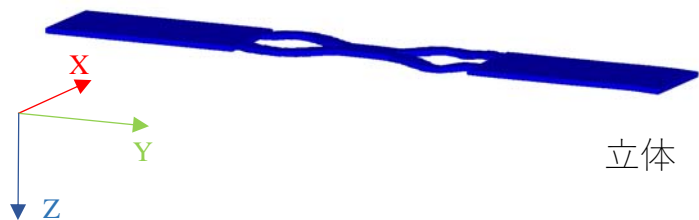
	153N	
	$153\text{N} \times 1000$	
	$153\text{N} \times 2000$	
	$153\text{N} \times 5000$	

圧縮荷重 | 面外拘束なし

153N × 2000

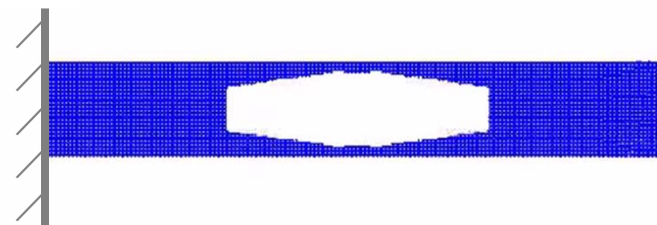


変形状態

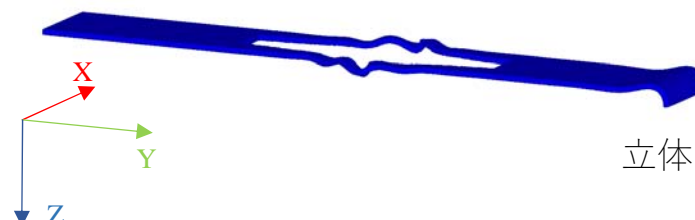


立体

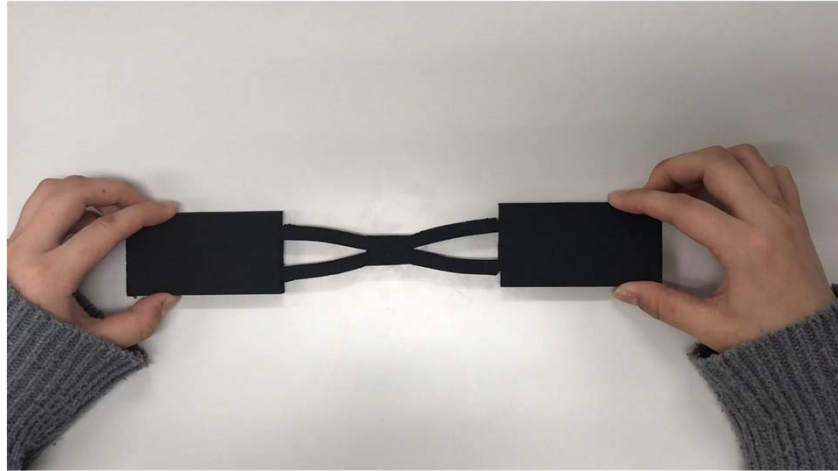
153N × 5000



変形状態




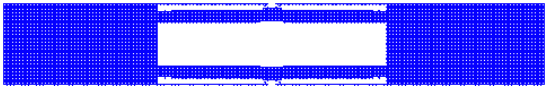






立体



引張+圧縮荷重

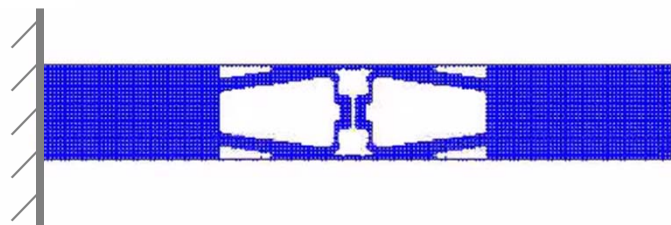
面外拘束なし

面外拘束あり

	153N	
	$153\text{N} \times 1000$	
	$153\text{N} \times 2000$	
	$153\text{N} \times 5000$	

面外拘束なし | 引張+圧縮荷重

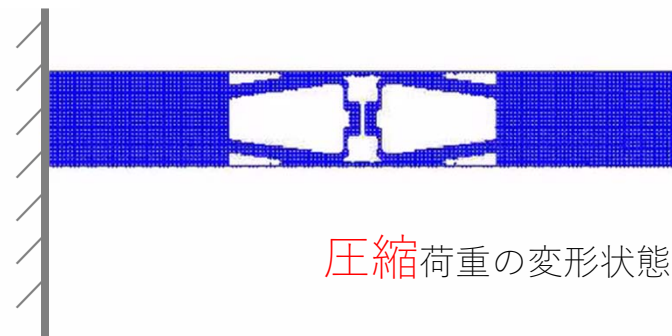
153N × 1000



引張荷重の変形状態



立体



圧縮荷重の変形状態

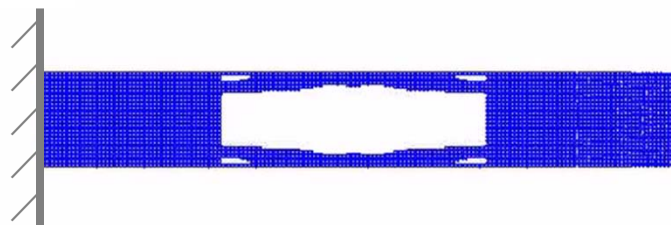


立体

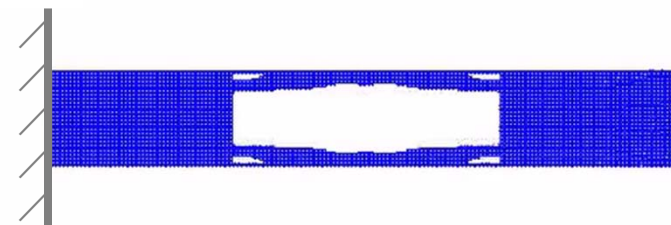
05 解析例

面外拘束なし | 引張+圧縮荷重

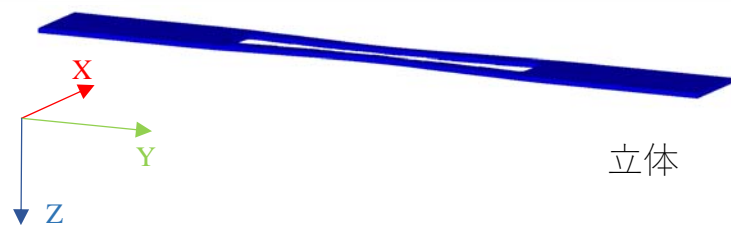
153N × 2000



引張荷重の変形状態



圧縮荷重の変形状態

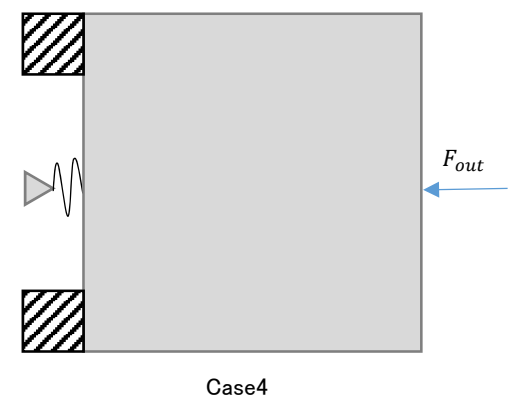
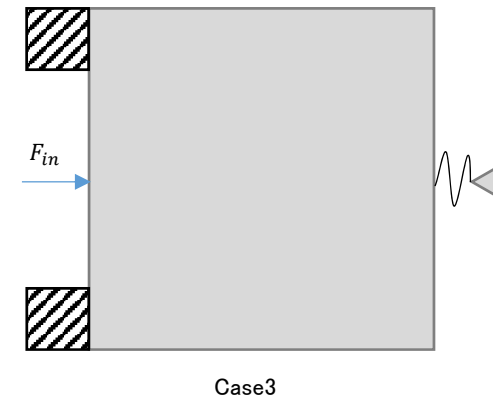
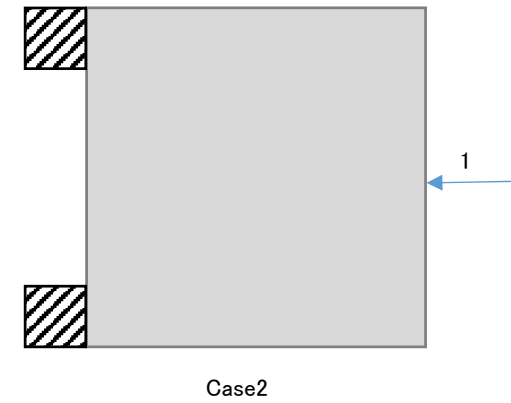
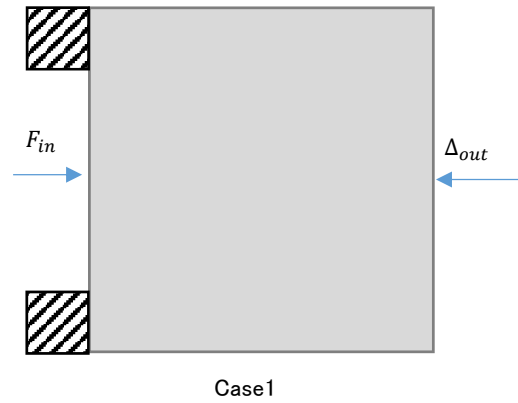
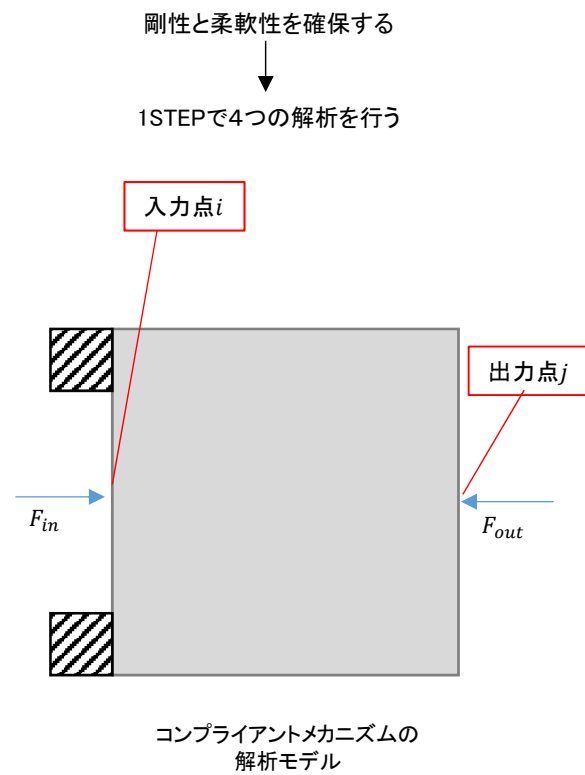


立体

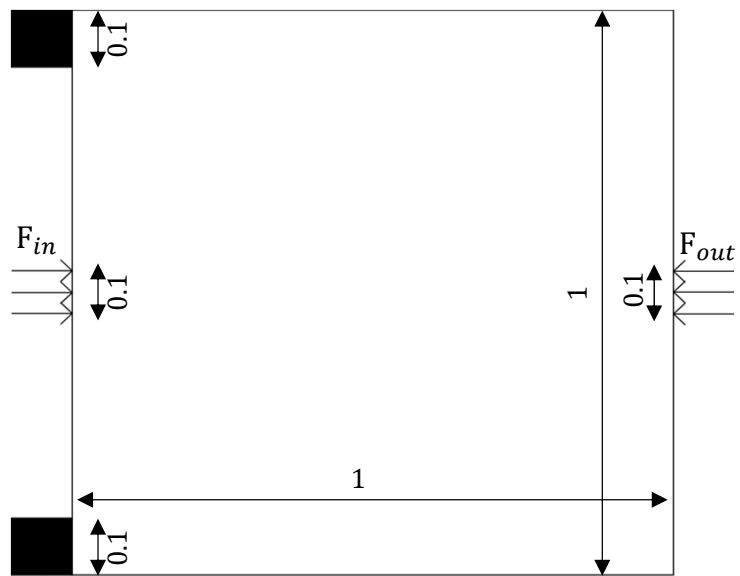


立体

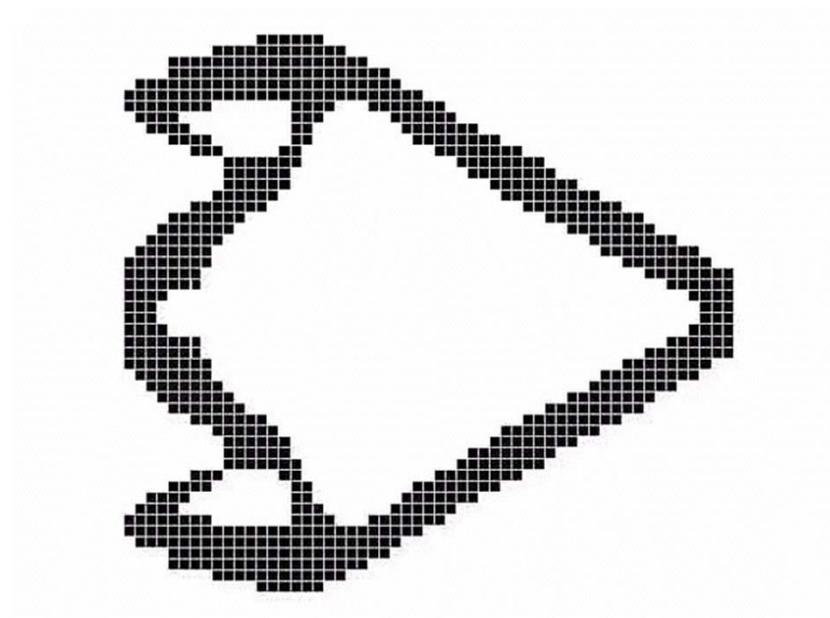
最新の研究（その5）有限変形を考慮したコンプライアントメカニズムの創生



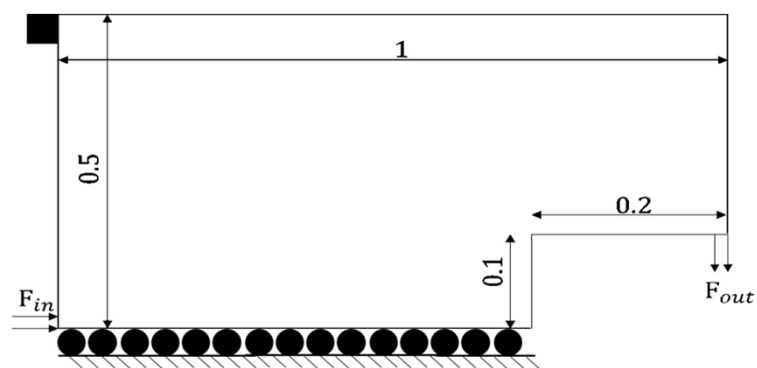
変位インバーター (2D)



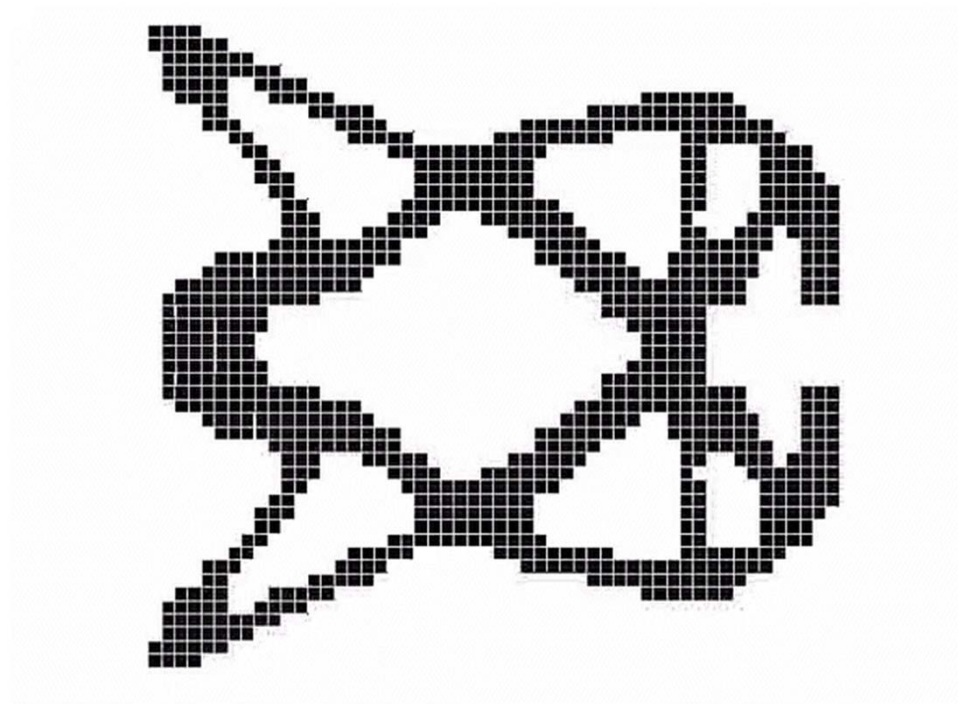
解析モデル



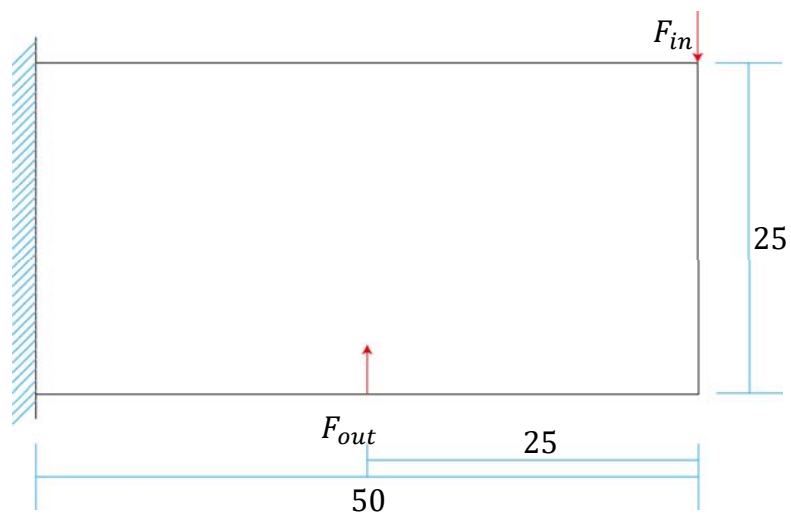
コンプライアントグリッパー (2D)



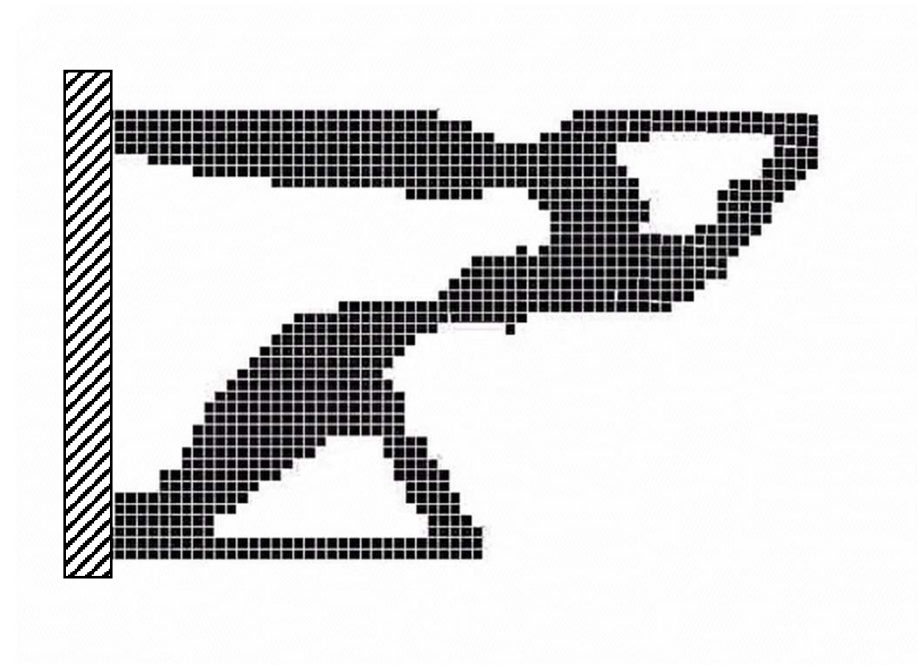
解析モデル



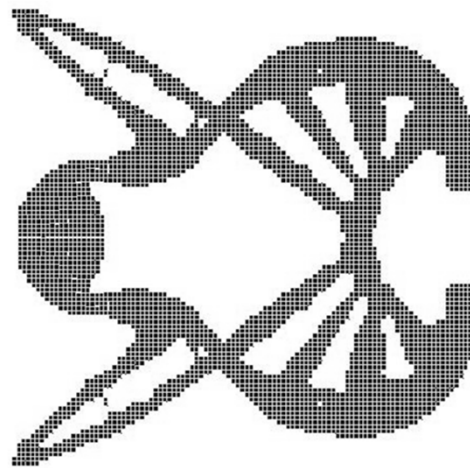
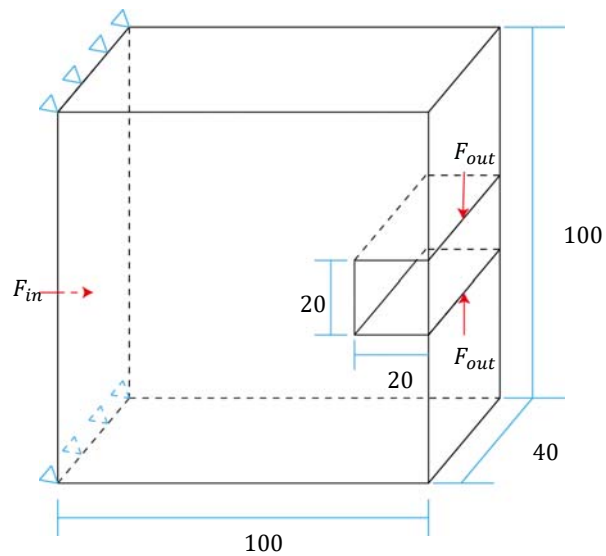
解が得られにくい例題



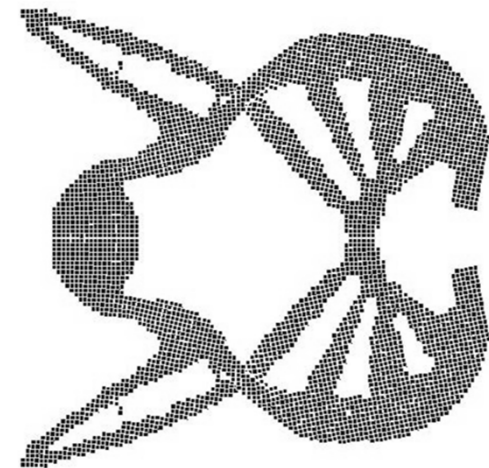
解析モデル



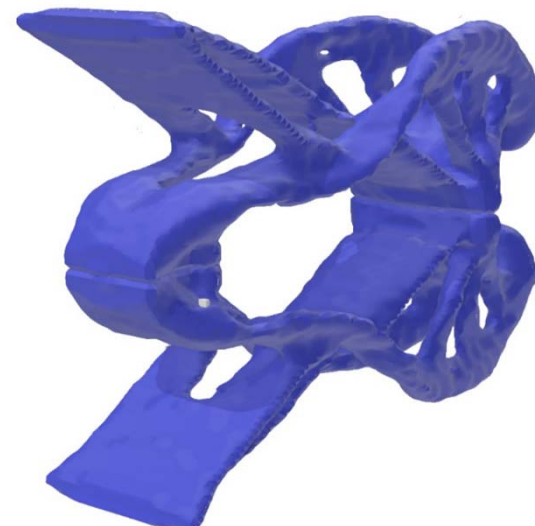
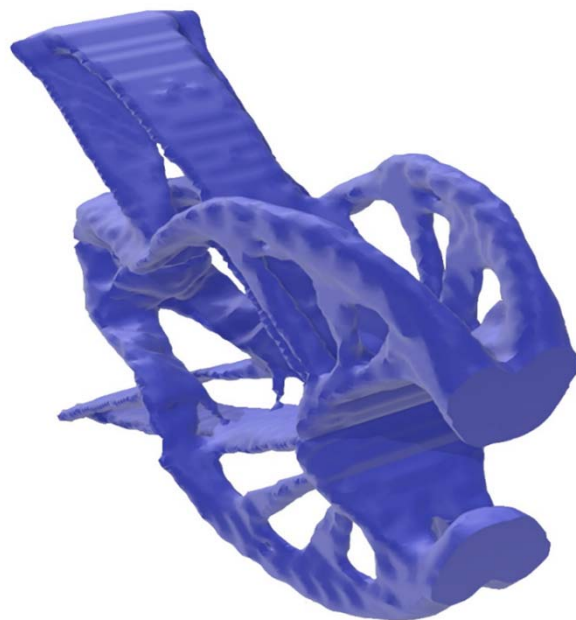
最新の研究 有限変形を考慮したコンプライアントメカニズムの位相最適化



変形前



変形後



まとめ

- 第1章で行った研究は、提案手法によるプログラムが市販のソフトウェア（VOXELCON）に組み込まれるところまで発展させることができた。
- 第2章で行った研究は、まだ実務の設計に活用されるまでには到っていないが、ESO法を用いた手法は、既存の汎用ソフト等にも容易に組み込めるため、今後の発展が期待できる。
- 第3章で行った研究は、未だ発展途上であるが、新たな制振装置の開発等につなげて行ければと考えている。

謝辞

著者が、位相最適化手法に興味を持ったきっかけは、このような手法によってアントニ・ガウディのような有機的な建築物を創生できないかというものであった。20年以上の研究と、コンピュータの発達、それに3Dプリンタの普及により、それも少し現実に近づいてきた。これは偏に1998年にこのような研究テーマを与えていただいた菊池昇教授の先見の明である。また、その後の研究では、大森博司教授の研究に大いに刺激を受け、貴重な助言も頂いた。また、本研究は、著者の研究室で修士論文を作成した学生達の努力の結晶でもある。ここに記して深く感謝致します。