



位相最適化手法を用いた構造 デザイン

近畿大学
藤井大地



位相最適化手法とは

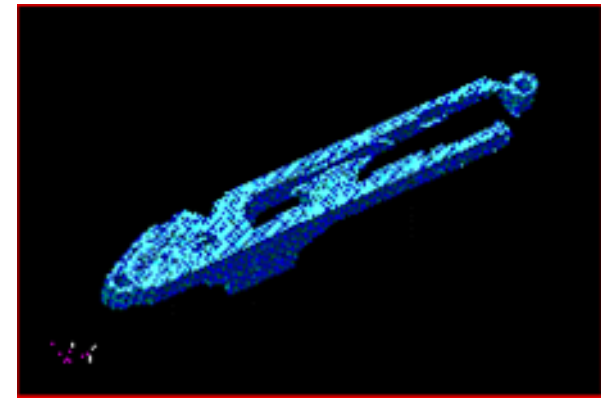
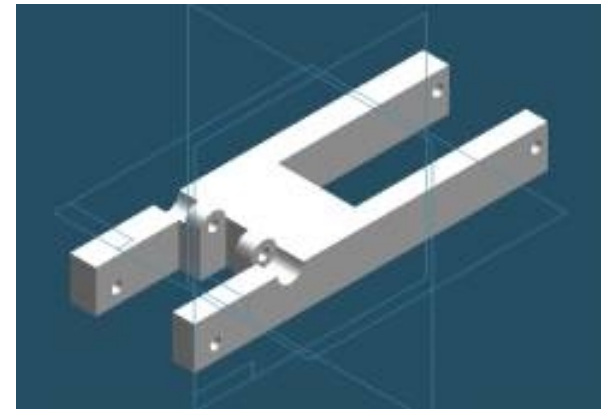
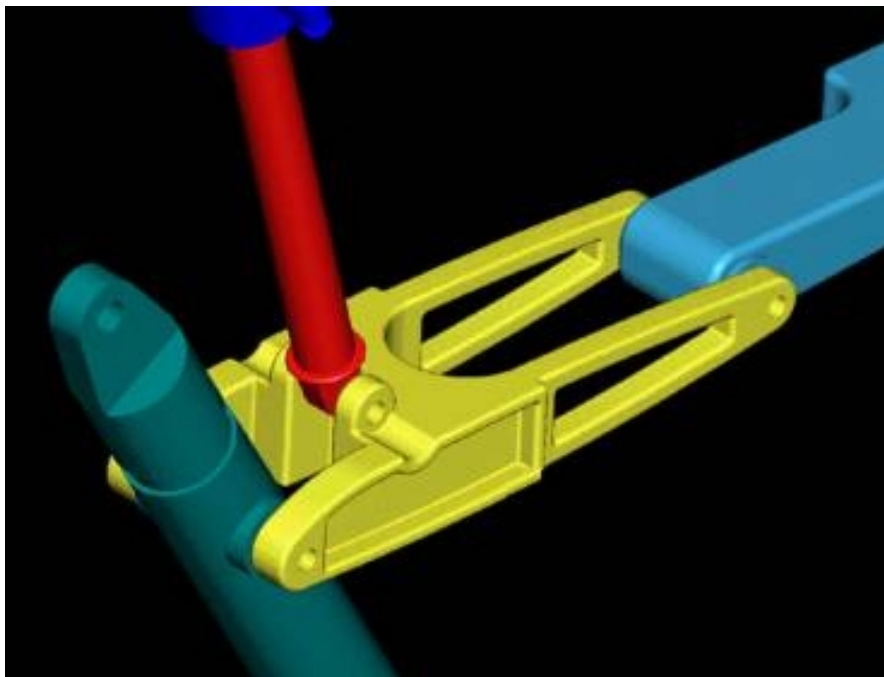
- 構造の外側の形状だけでなく、構造内部に最適な穴を配置してより合理的な構造形態を求めるために開発された手法



位相最適化の発展

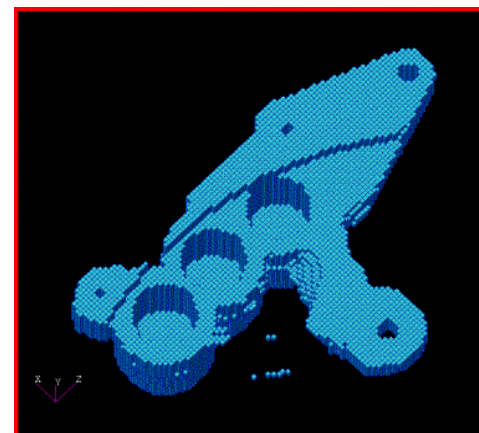
- 従来の使い方
 - 部品の軽量化
- これからの使い方(藤井らの研究)
 - 力学教育への利用
 - コンセプトデザインの支援ツールとしての利用
 - メカニズムの設計への利用
 - 複合材料(エコマテリアル)設計への利用

部品の軽量化への適用例(1)



MSC.Nastran OptiShapeの活用事例
より(株くいんと提供)

部品の軽量化への適用例(2)



MSC.Nastran OptiShapeの活用事例
より(株くいんと提供)



位相最適化の汎用ソフト

- MSC.Nastran OPTISHAPE
- Altea Engineering OPTISTRUCT

教育用に用いるには、非常に高価



位相最適化ツールの開発

- 骨組構造の位相最適化ソフト(Otto)
- 2次元連続体の位相最適化ソフト(Isler)
- 3次元連続体の位相最適化ソフト(Gaudi)

ソフト付き本として本年5月出版予定

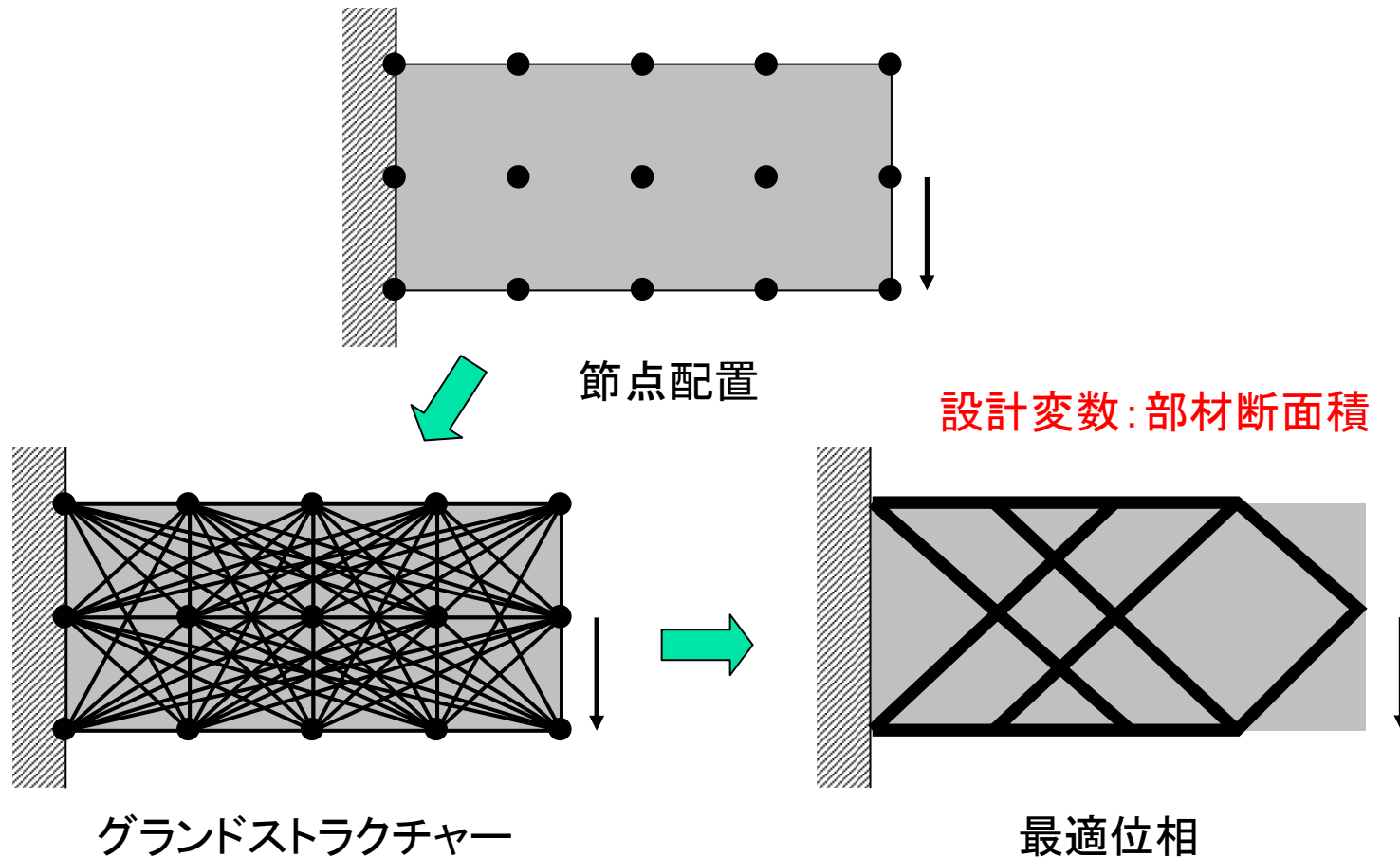
「パソコンで解く構造デザイン」, 丸善



理論背景となる論文

- 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, No.521, pp.65-72, 1999
- 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
- 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, No.528, pp.99-105, 2000
- 藤井大地, 菊池昇: 均質化設計法を用いた複合材料の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.535, pp.79-86, 2000.9
- 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: ボクセル有限要素法を用いた構造物の位相最適化, 日本計算工学会論文集, Vol.2, pp.87-94, 2000
- 藤井大地分担執筆: 「構造形態創生の理論と応用 (I -2, III-1.1)」, pp.9-18, pp.117-130, 日本建築学会, 2001.3
- 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, No.543, pp.105-112, 2001.5
- 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 建築デザイン教育のための形態解析ツールの開発, 日本建築学会技術報告集, 第13号, pp.69-74, 2001.7
- 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, No.548, pp.59-66, 2001.10
- 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 最適化手法CONLINを用いた3次元構造物の位相最適化, 土木学会応用力学論文集, Vol.4, pp.69-77, 2001.10
- 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣, 石川雅意: 弾性リンク機構の形態最適化(変位を制約条件とする骨組構造の位相最適化), 日本機械学会論文集C編, 第67巻, 664号, pp.3730-3737, 2001.12
- 藤井大地, 北山光也, 鈴木克幸, 大坪英臣, 風間悦夫, 川井忠彦: ノードレスハイブリッド要素を用いた連続体の位相最適化, 日本機械学会論文集A編, 68巻, 667号, 2002.3

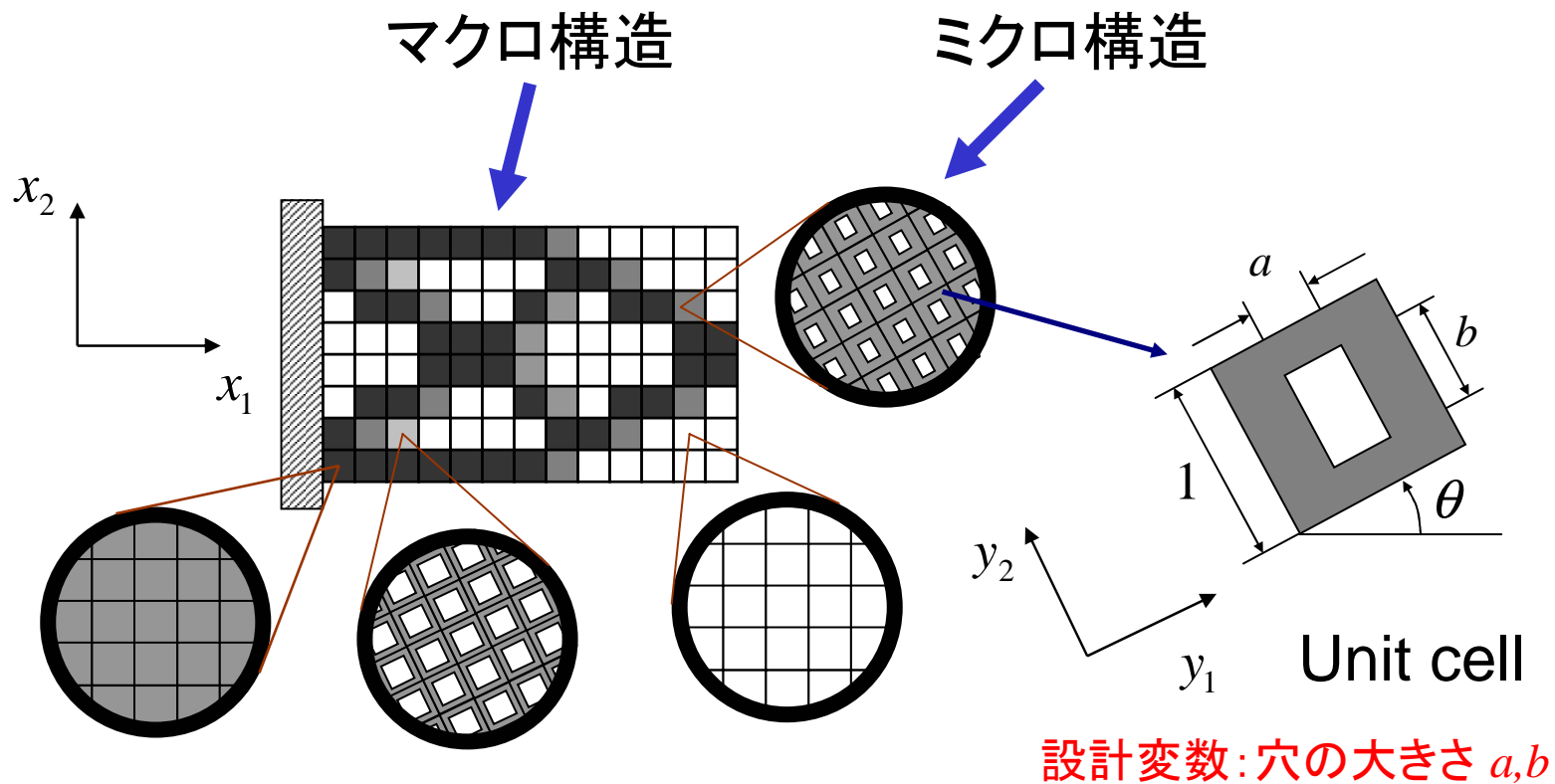
Ottoの位相最適化手法 — グランドストラクチャー法 —



体積制約下における外力仕事の最小化

Islerの位相最適化手法

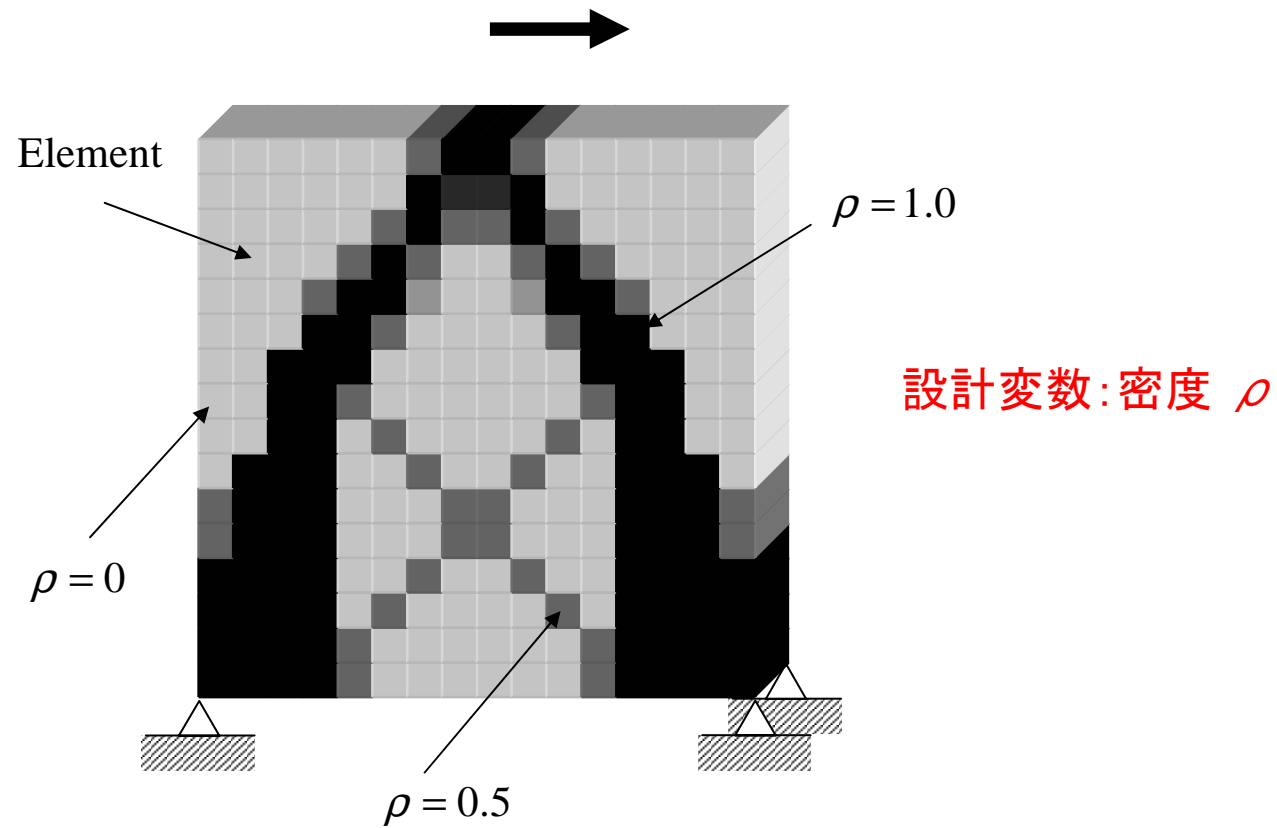
—均質化設計法—



体積制約下における外力仕事の最小化

Gaudiの位相最適化手法

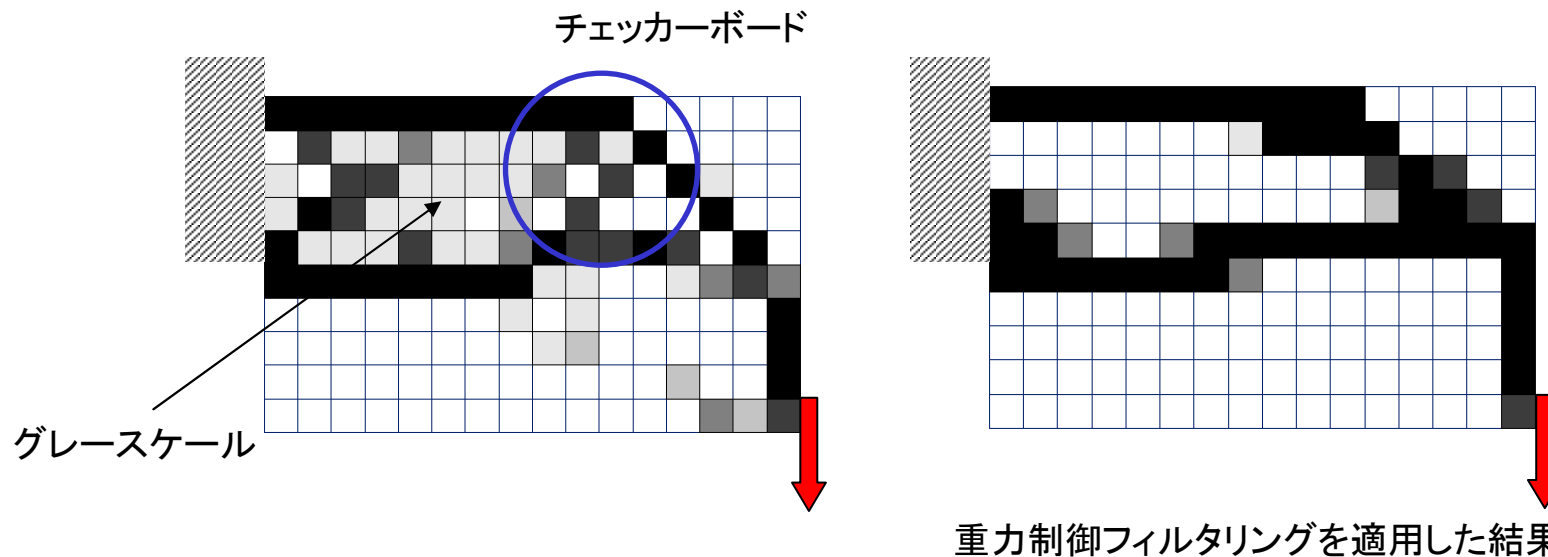
—密度法—



体積制約下における外力仕事の最小化

開発ソフトの特徴

- 骨組構造の位相最適化では、接合部剛性を任意に変化させることができる。
- 連続体の位相最適化では、独自のフィルタリング法を用いているため、明解な位相を求めることができる。



最適化問題 (均質化設計法)

$$\min_{\alpha} [C(\alpha) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}] \quad \alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_N, b_1, b_2, \dots, b_N\}$$

subject to :

$$W = \sum_{i=1}^N (1 - a_i b_i) \leq \bar{W}, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, 2N$$



フィルタリング法

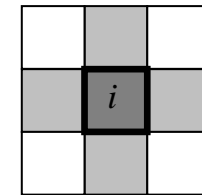
$$G \geq \bar{G}$$

ただし,
$$G(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} [\rho_i \rho_j + (1 - \rho_i)(1 - \rho_j)]}{\sum_{i=1}^N m_i}$$

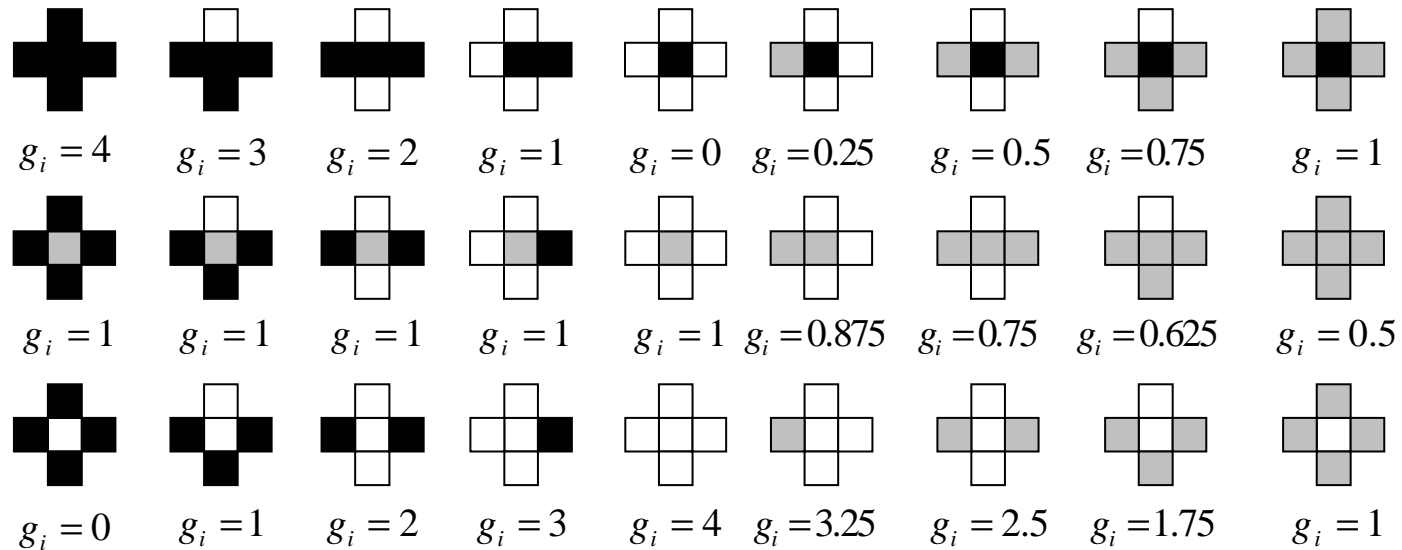
重力制御関数

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} (\rho_i \cdot \rho_j + \bar{\rho}_i \cdot \bar{\rho}_j)}{\sum_{i=1}^N m_i}$$

$$\rho_i = 1 - a_i b_i, \quad \bar{\rho}_i = 1 - \rho_i, \quad 0 < G \leq 1$$



$m_i = 4$



要素密度が0, 0.5, 1の場合のgravity control 関数 g_i 値



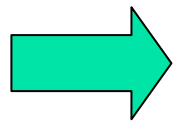
位相最適化問題の解法

- 最適性規準法 (OC法)
 - 収束が速い
 - 対称領域の解析で対称解が得られる
 - 複数制約条件のコントロールが難しい
 - サブルーチンとしての汎用化が難しい
- 逐次線形計画法 (SLP法)
 - 収束へのロバスト性が高い
 - 対称領域の解析でも非対称な解が得られる
 - 複数制約条件の取扱が容易
 - サブルーチンとして汎用化されている
- 凸線形化法 (CONLIN法) (1986年Fleury)
 - 複数制約条件が扱える
 - サブルーチンとしての汎用化が可能



力学教育への利用

- 背景：大学における力学教育の衰退
- コンピュータによる解析は万能ではない！
 - 結果が正しいかどうかの判断は人間が下す必要がある。
 - そのためには、力学的センスを身につけることが重要。



学生に自然に興味を抱かせるような魅力ある力学教育が必要



力学教育のツール

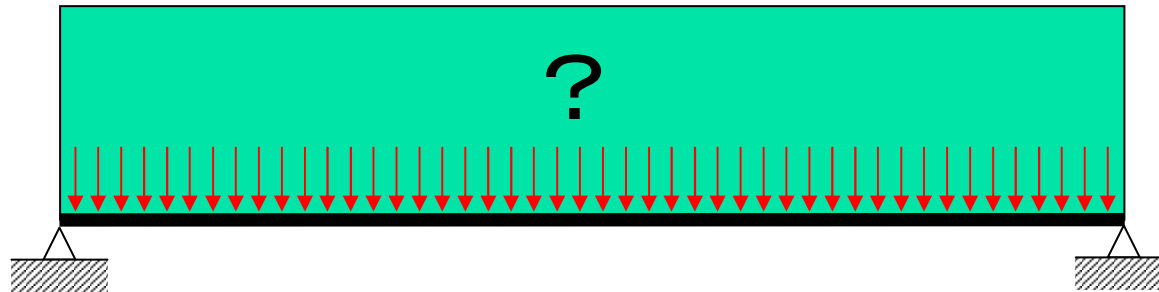
- 簡単な実験
 - 理解しやすい。
 - 実験機材にコストがかかる。
 - 教える側の準備がかなり大変。
- コンピュータソフト
 - 教える側の負担は少ない。
 - 学生も興味をもつ。
 - 力学を教えることのできる簡単なソフトは少ない。
 - 意外にコストがかかる。



魅力ある講義にするには？

- デザイン教育との融合
- プロジェクトベースの講義

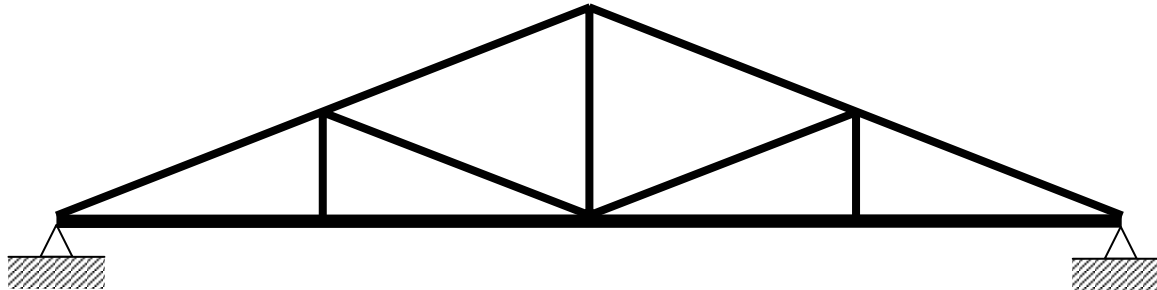
橋のデザインを考えよう



もっとも剛性が高く軽量な構造は？

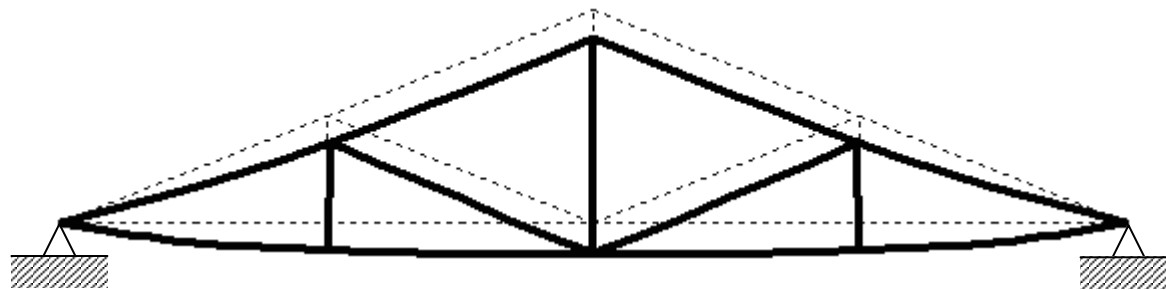
最初は思考錯誤

例えば, 同じ太さの部材からなる
骨組・トラス構造で考える



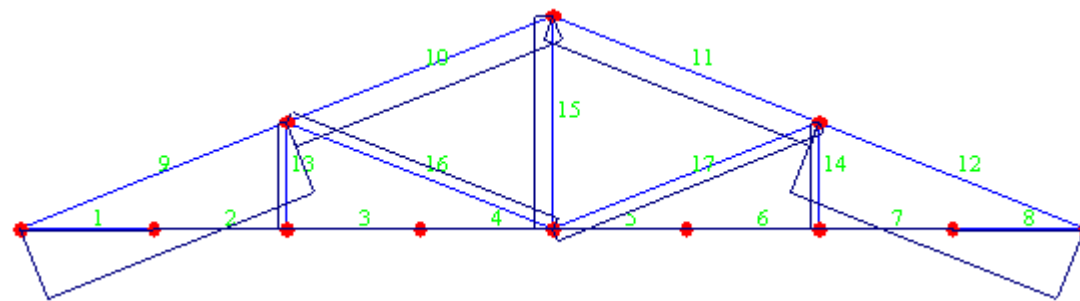
解析ソフトで設計の良否を検討

変位を比較して互いに競争させる



変位図 (Otto)

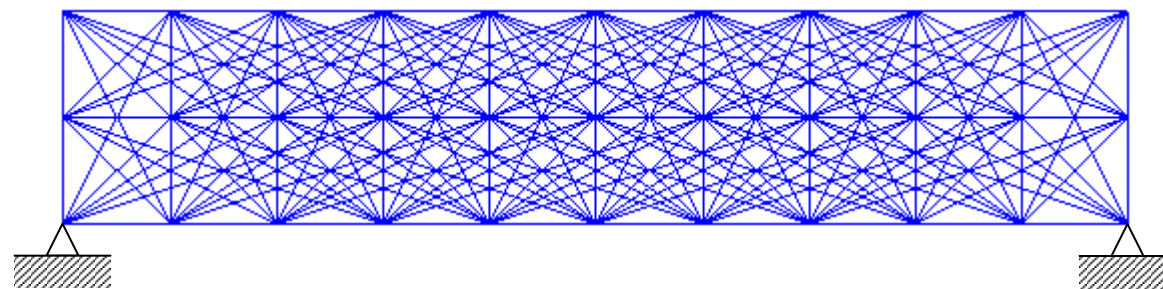
応力の概念も武器に使わせる



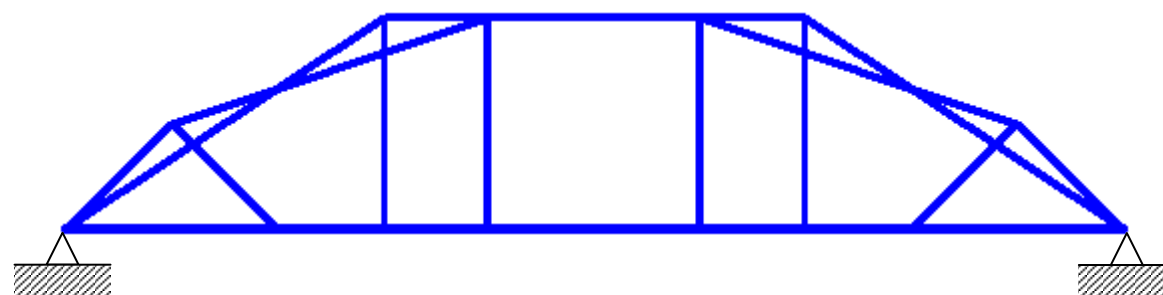
軸力図

Ottoによる結果表示

さらに最適化ツールを使う



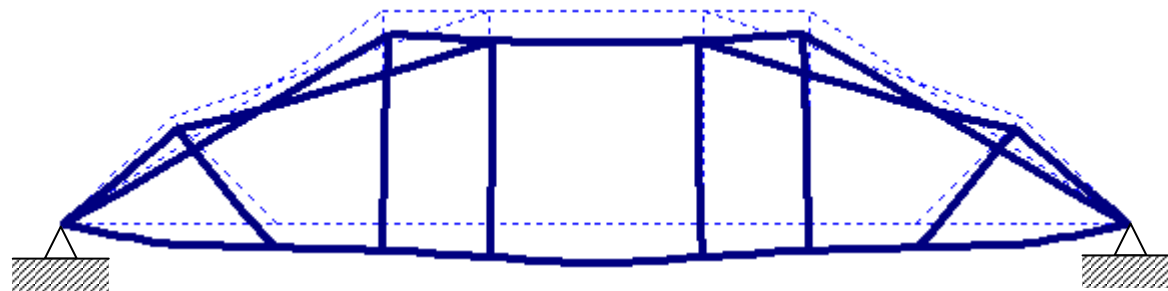
グラウンドストラクチャー



最適位相

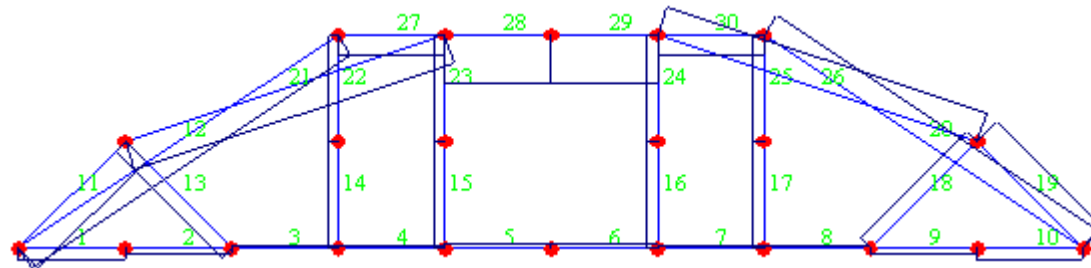
Ottoの解析結果

本当にそうなのか確かめる



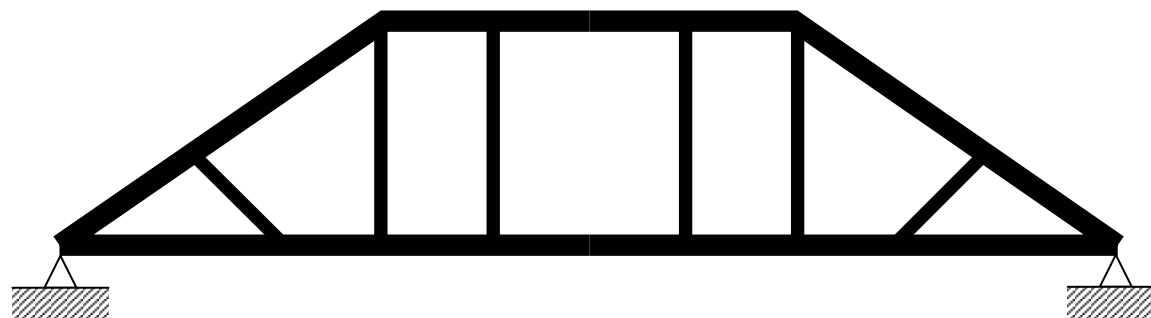
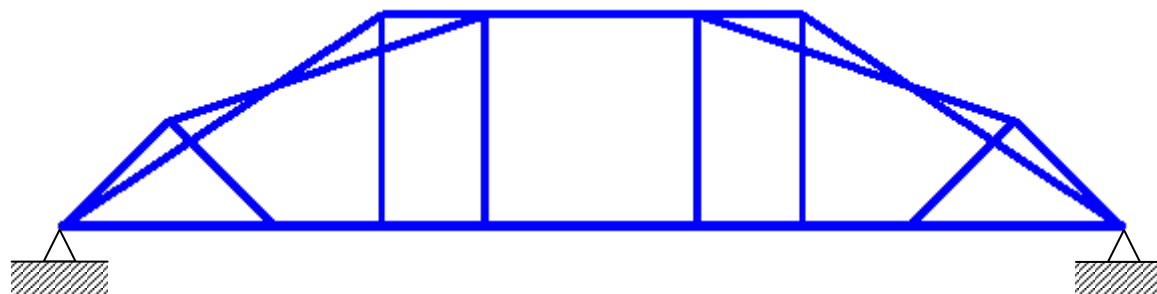
変位図

応力の観点からも考察する



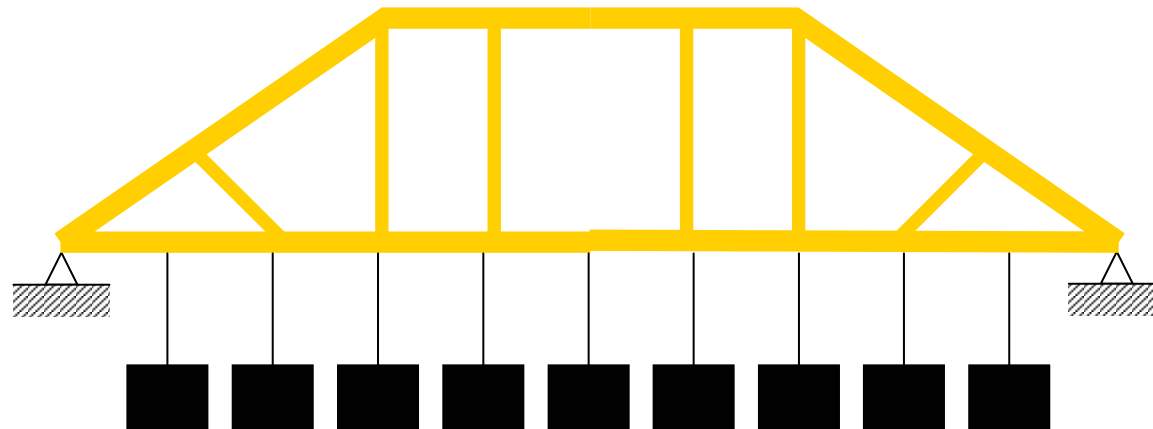
軸力図

最適位相を元に設計



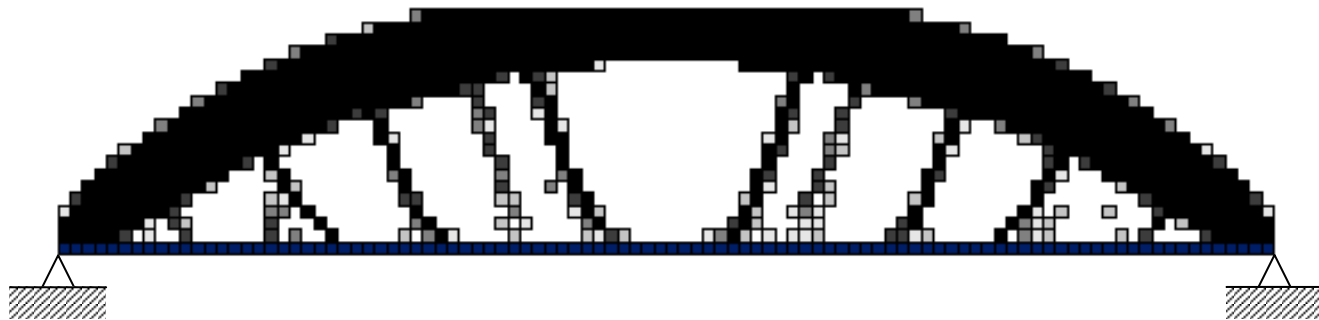
模型づくりと実験

加工の容易な木製の棒等を使って模型を作り、実験を行う



連続体への拡張でデザインへ

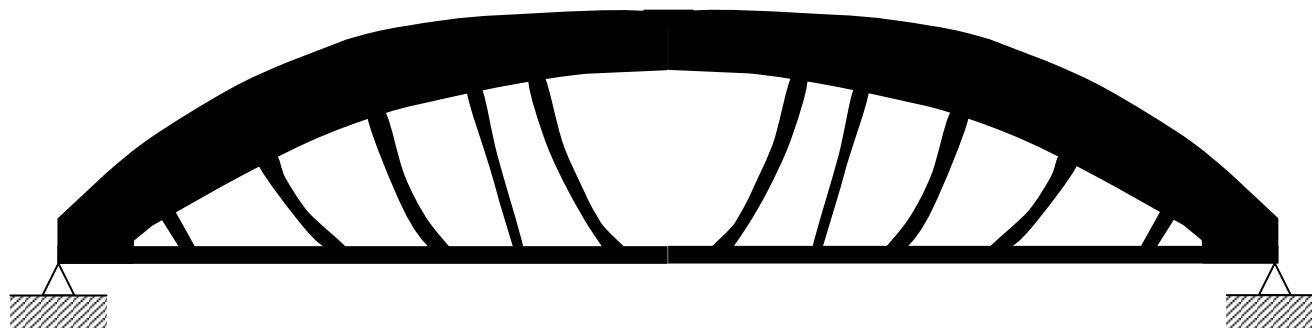
デザインのセンスも身に付く？



Islerの解析例

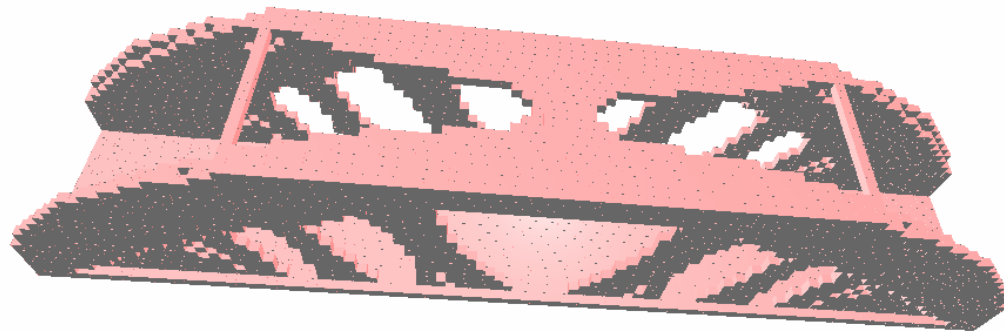
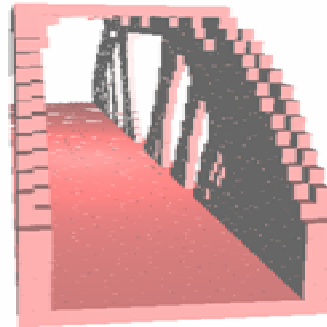
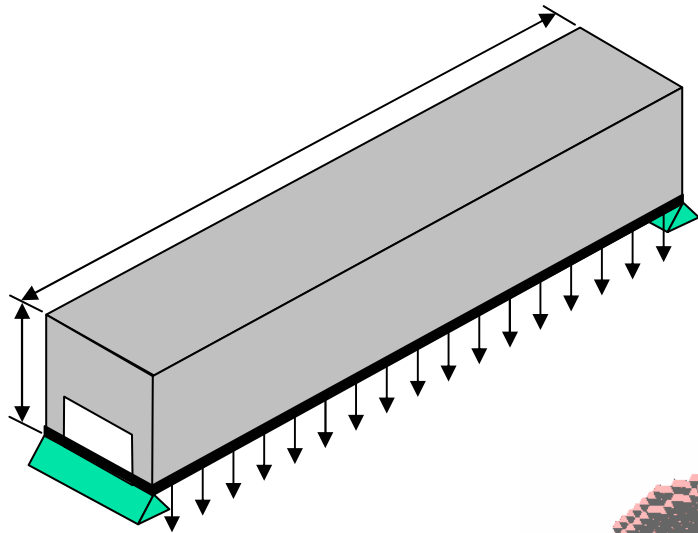


キヤドを使ってデザイン

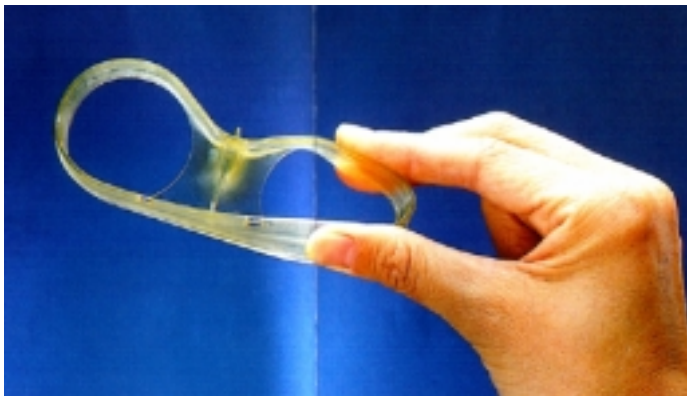


Power Pointでもこの程度はできる

3次元解析で全体像を知る



将来的には、光造形システムを使って造形・実験

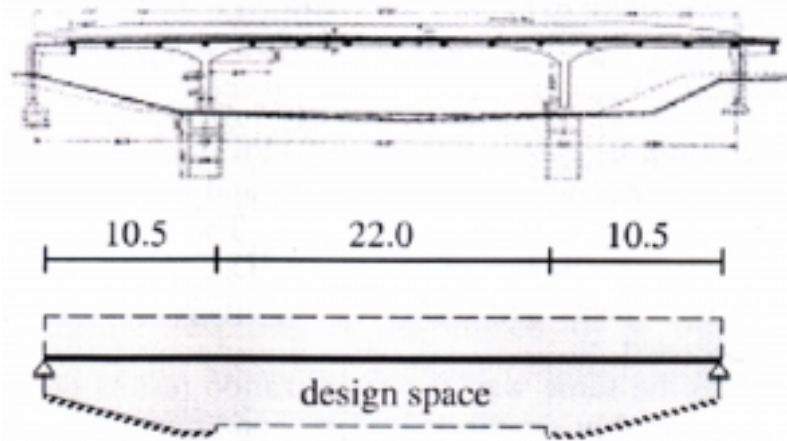




コンセプトデザインの支援ツール

- E. Rammらは、位相最適化手法を、設計の第一段階であるコンセプトデザインに利用することを考えている。

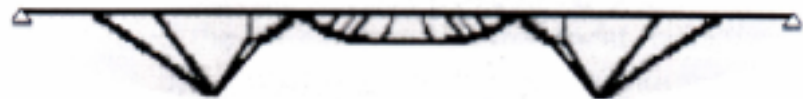
位相最適化手法を用いた 橋のデザイン (E.Ramm)



Embankment: fixed



Embankment: vertically supported

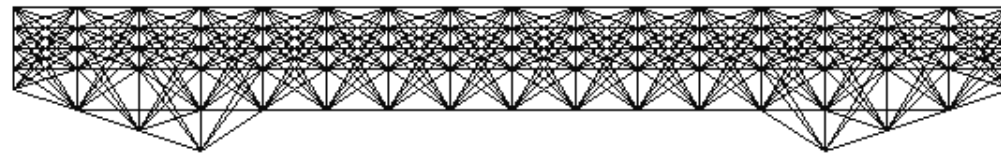
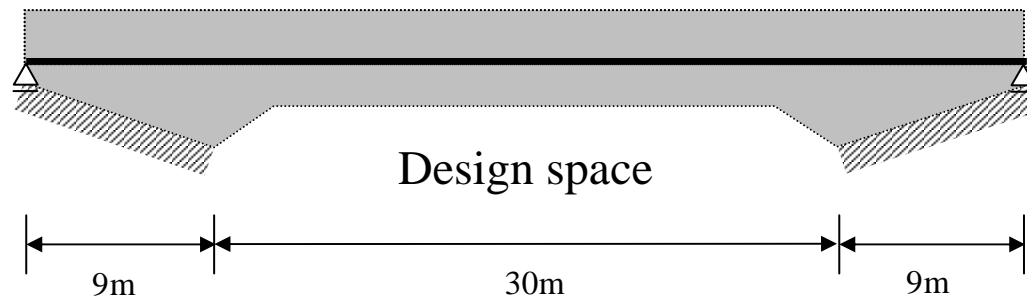


Embankment: Partially vertical supports



Embankment: fixed and additional supports

Ottoを用いた橋のデザイン

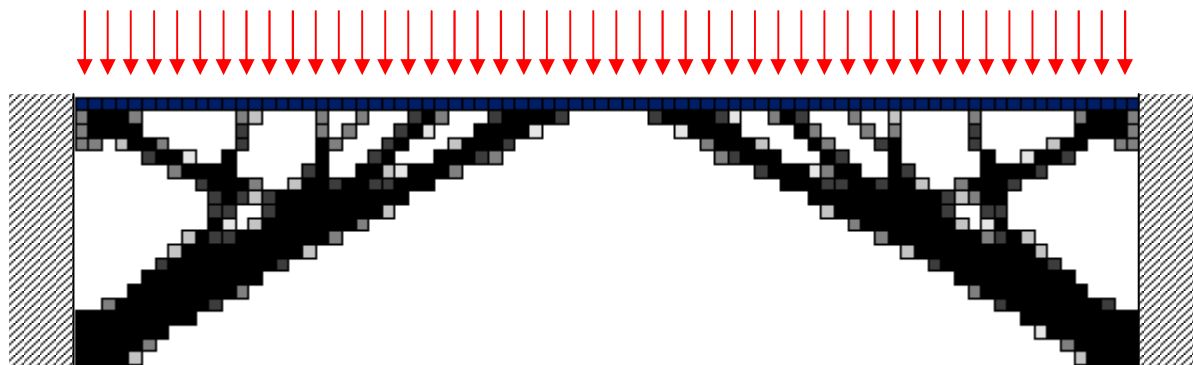


Ground structure

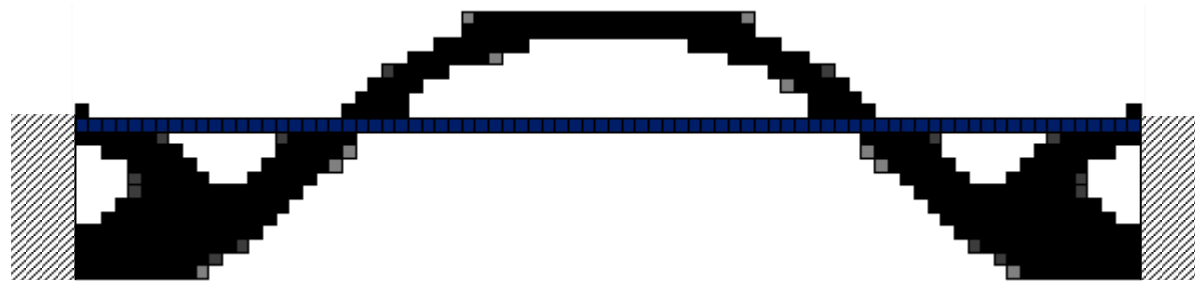


Optimum topology

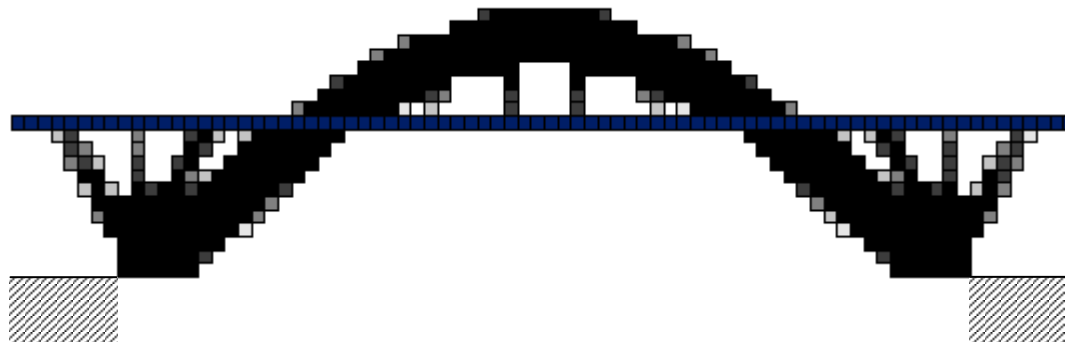
Islerを用いた橋のデザイン(1)



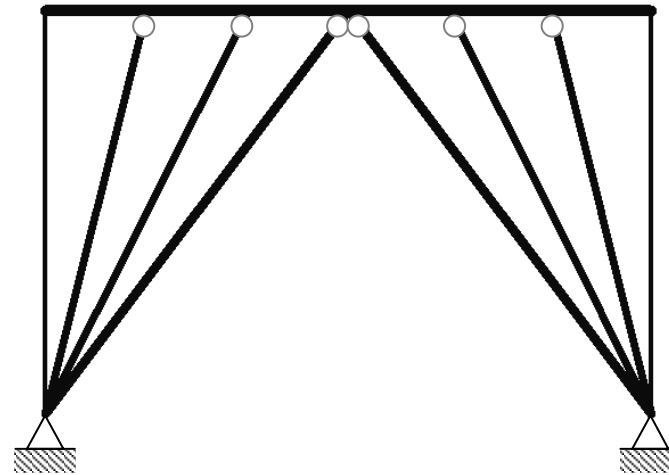
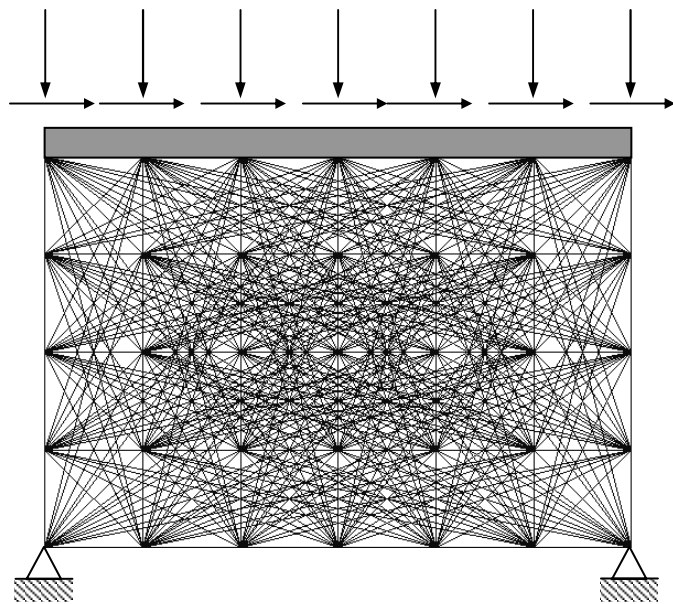
Islerを用いた橋のデザイン(2)



Islerを用いた橋のデザイン(3)

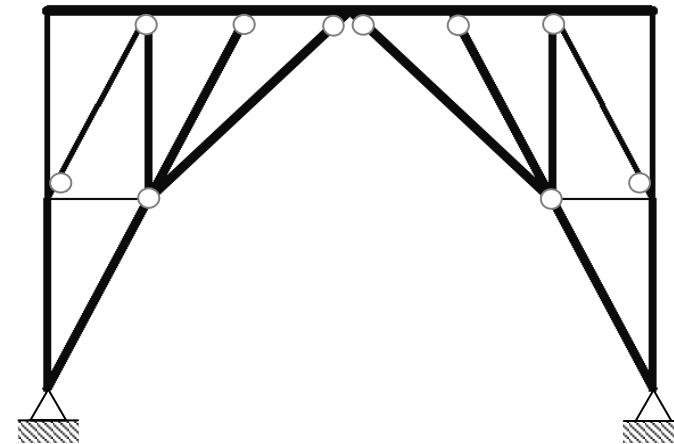
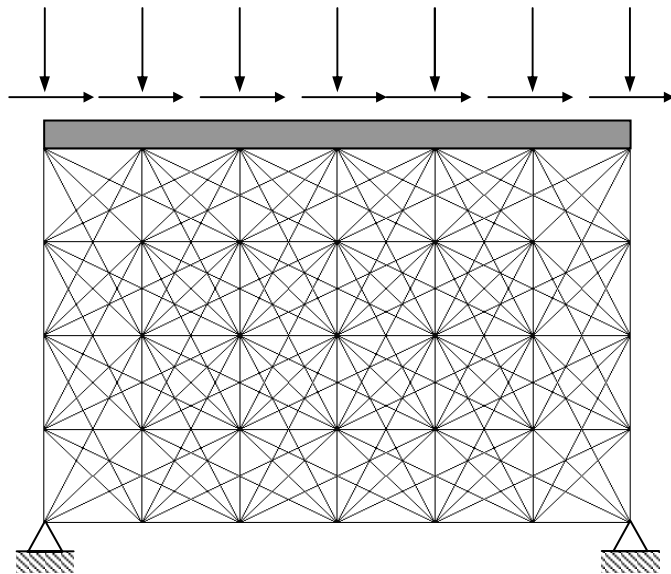


Ottoを用いたラーメン構造のデザイン(1)



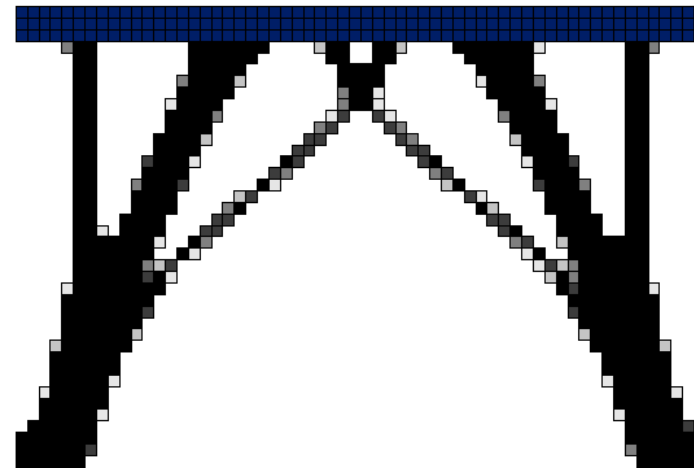
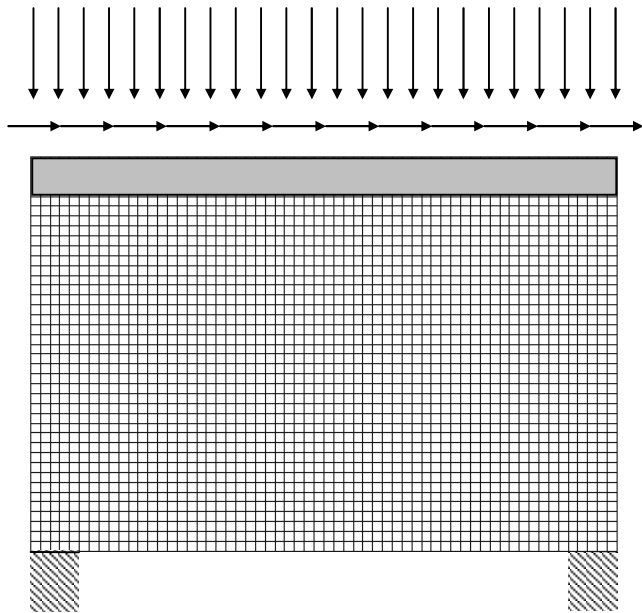


Ottoを用いたラーメン構造のデザイン(2)





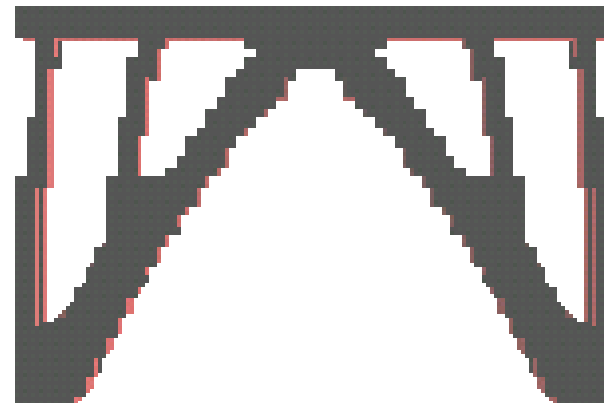
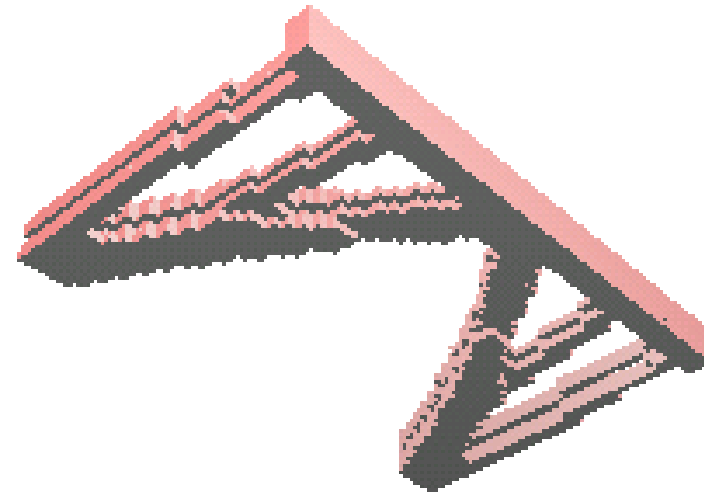
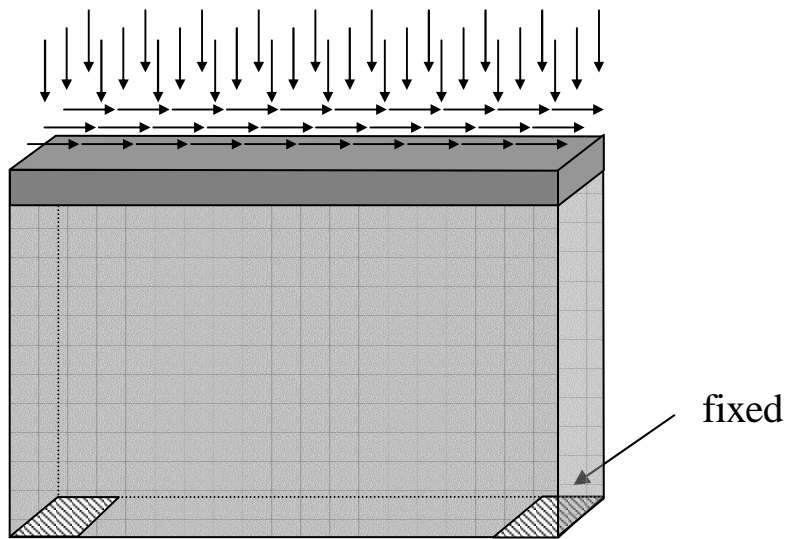
Islerを用いたラーメン構造のデザイン



Gaudiの設計した立体道路



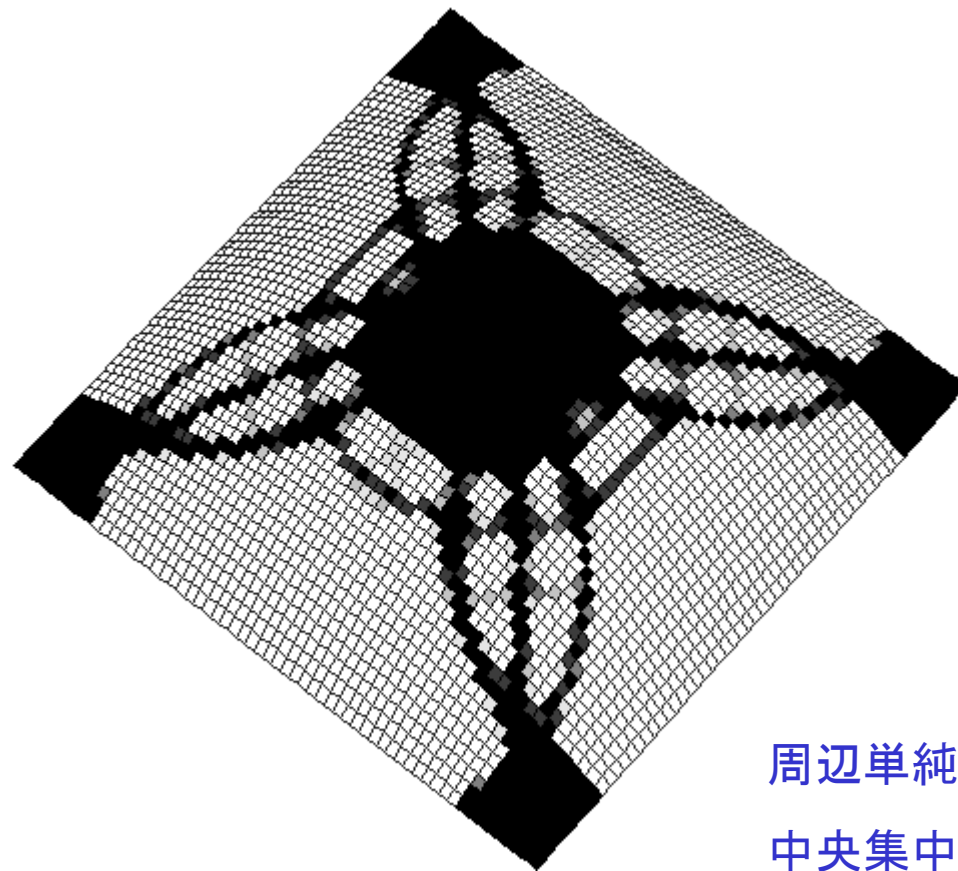
Gaudiを用いたラーメン構造のデザイン



コンクリートアーチ橋



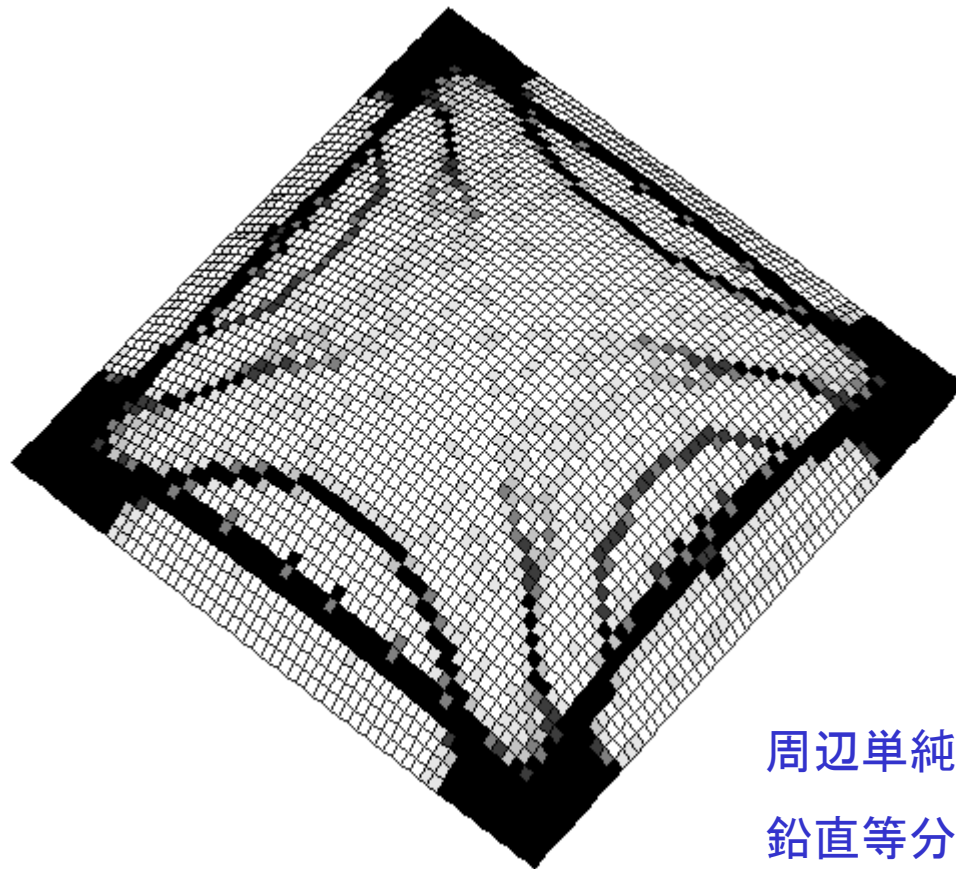
Islerを用いたシェルデザイン



周辺単純支持
中央集中荷重

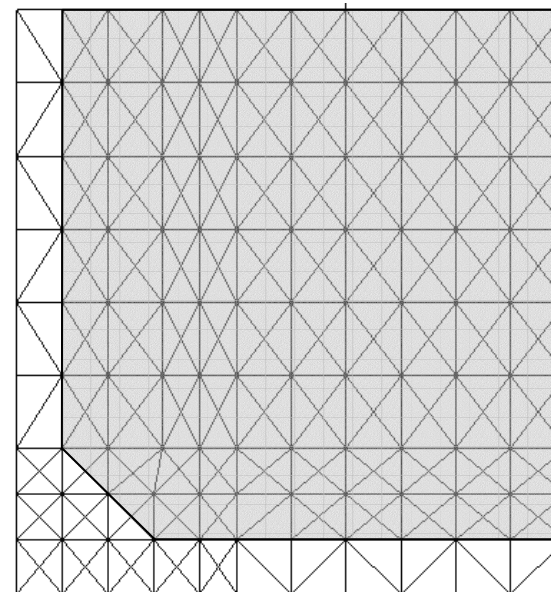
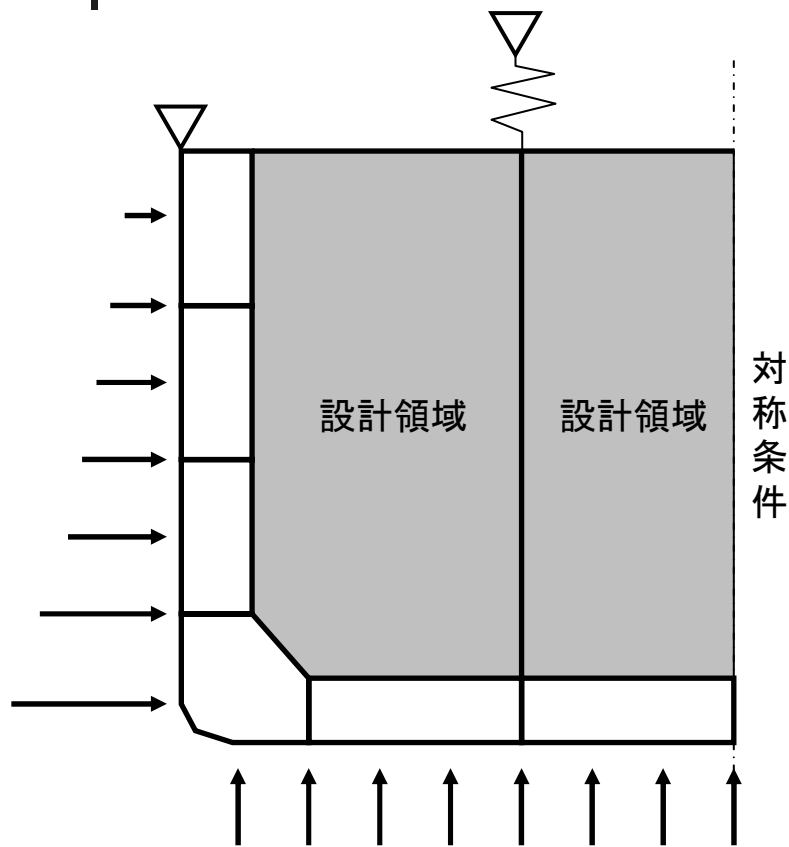


Islerを用いたシェルデザイン



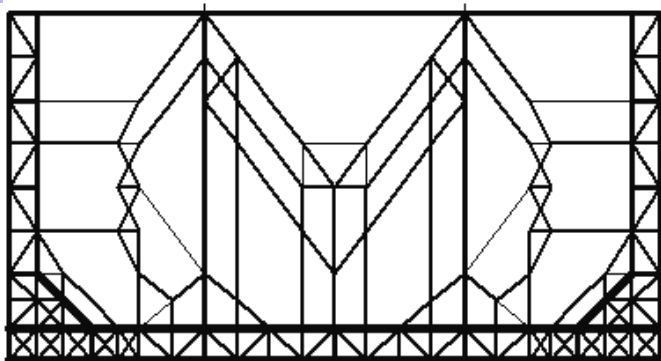
周辺単純支持
鉛直等分布荷重

Ottoを用いた船体構造の設計

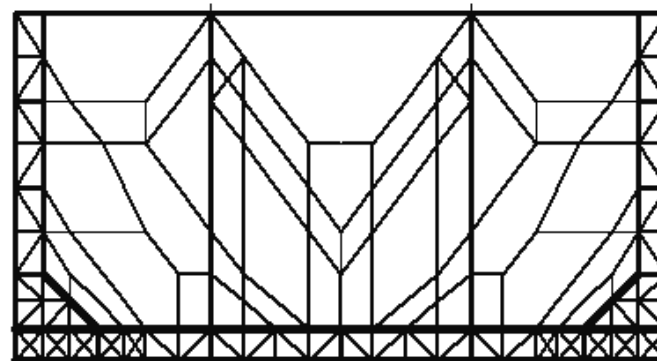


佐藤宏一氏(三菱重工)の研究

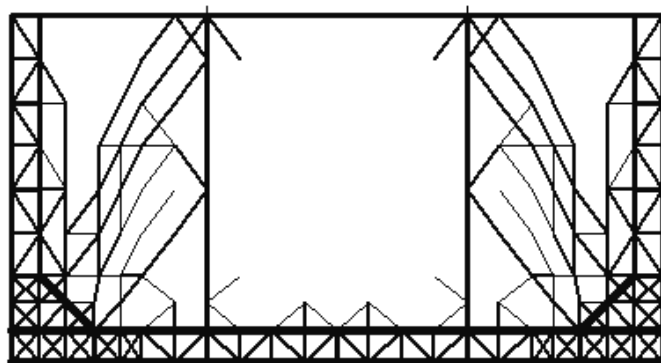
解析結果



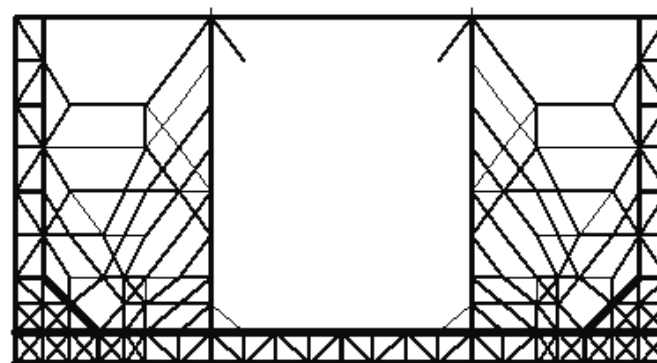
外水圧のみ



タンク内圧のみ



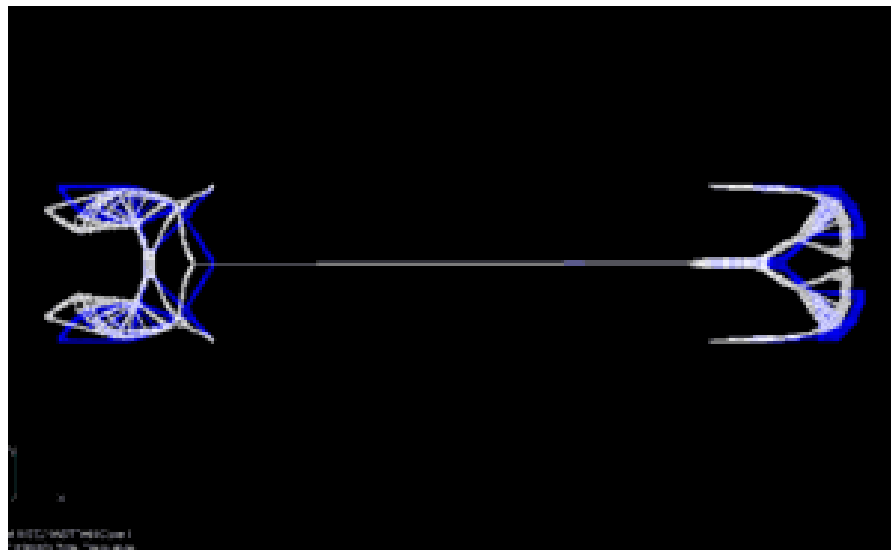
外水圧+タンク内圧



外水圧+中央タンク内圧

メカニズムの設計への利用

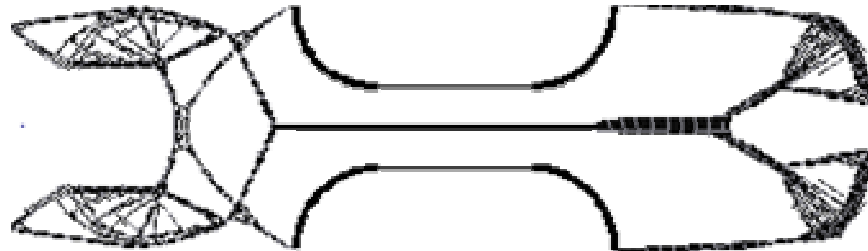
- 西脇、菊池ら(1996~): 連続体の弾性変形機構の研究
- Frecker, Kotaら(1995~): トラス構造の弾性変形機構の研究



(株)くいと OptiMechの解析例

弾性変形を利用したメカニズム とリンク機構

弾性変形を利用したメカニズム

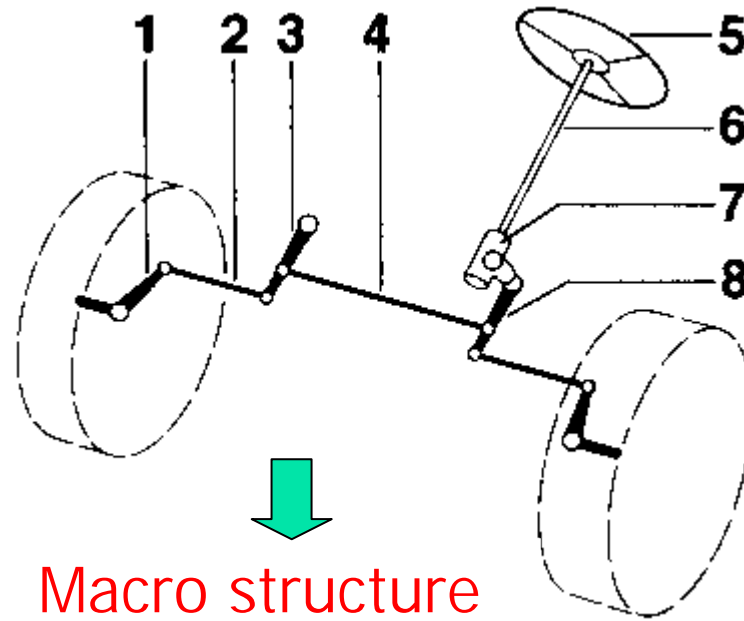


Example of Quint OptiMech



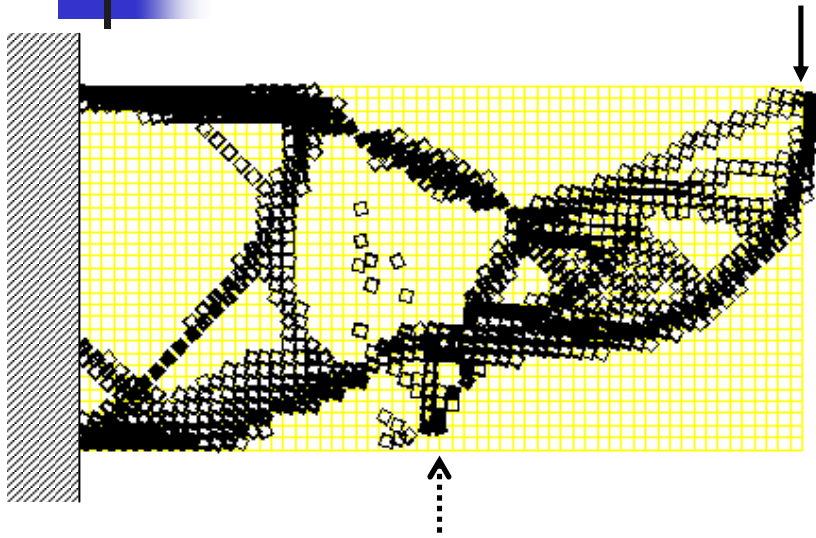
Micro structure

リンク機構

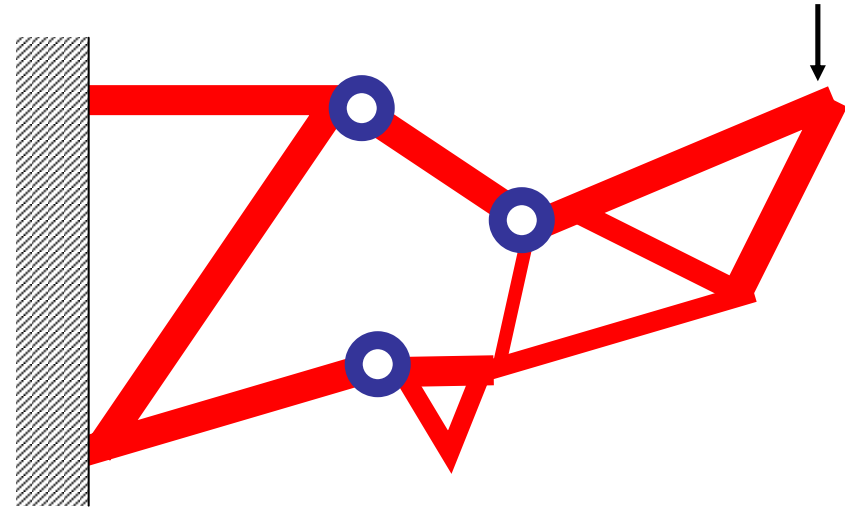


Macro structure

より明解な位相を求めるには？



マクロ的なリンク機構の設計には不向き？



1次元部材による位相とヒンジの位置が求められればより解りやすい。

最適化問題の定式化

$$\min [C^3(\alpha, \lambda_z, \lambda_y)]$$

where,

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N\}, \quad A_i = (1 - \alpha_i) \bar{A}_i,$$

$$\lambda_z = \{\lambda_{z1}^L, \lambda_{z1}^R, \lambda_{z2}^L, \lambda_{z2}^R, \dots, \lambda_{zi}^L, \lambda_{zi}^R, \dots, \lambda_{zN}^L, \lambda_{zN}^R\}$$

$$\lambda_y = \{\lambda_{y1}^L, \lambda_{y1}^R, \lambda_{y2}^L, \lambda_{y2}^R, \dots, \lambda_{yi}^L, \lambda_{yi}^R, \dots, \lambda_{yN}^L, \lambda_{yN}^R\}$$

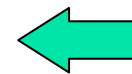
subject to:

$$m_s = \sum_{i=1}^N A_i l_i \leq \bar{m}_s,$$

$$\underline{u}_0 \leq C^{21}(\alpha, \lambda_z, \lambda_y) \leq \bar{u}_0,$$

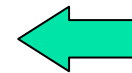
$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_{zi}^L \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_{zi}^R \leq 1,$$

$$0 \leq \lambda_{yi}^L \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_{yi}^R \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

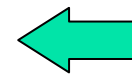


目的関数

(入出力点間の剛性最大化)



部材総体積制約

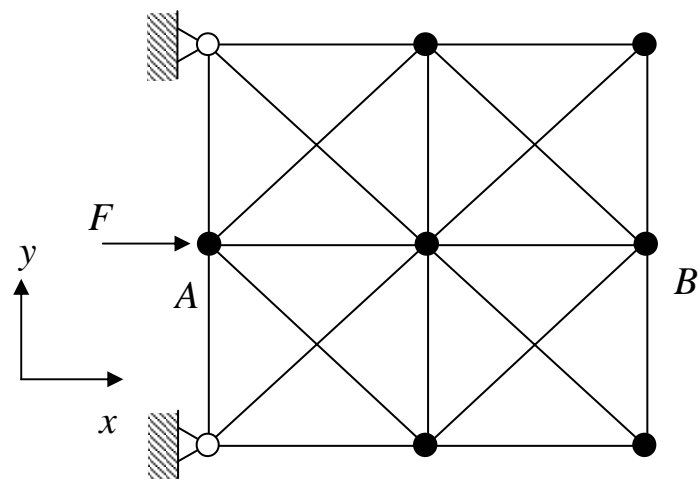
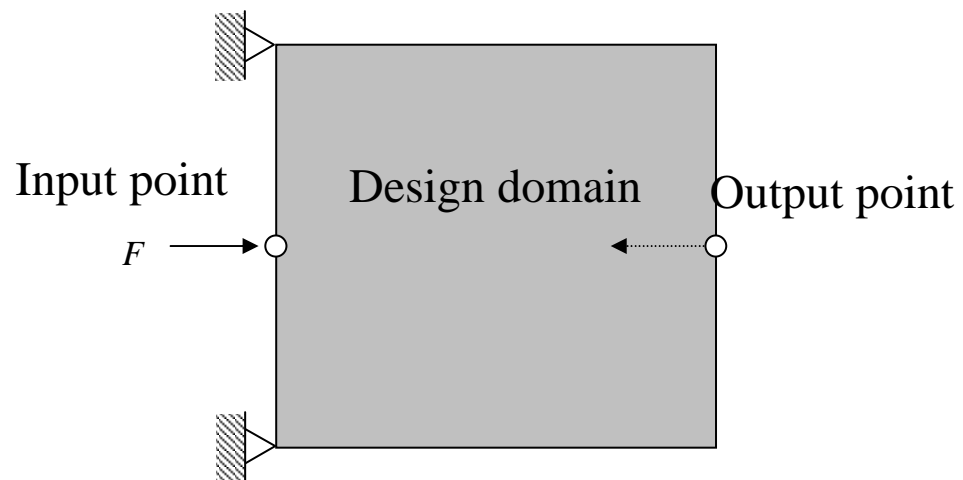


出力点の変位を制約

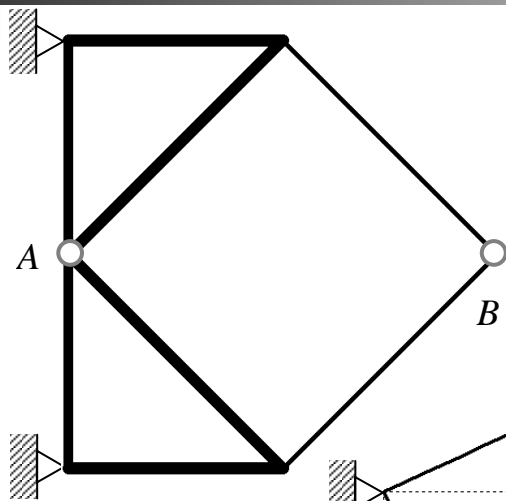


SLP法(逐次線形計画法)を用いて解く。

解析例1 基本例題



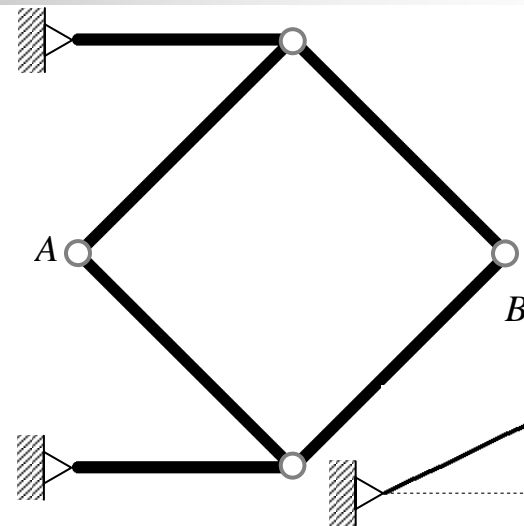
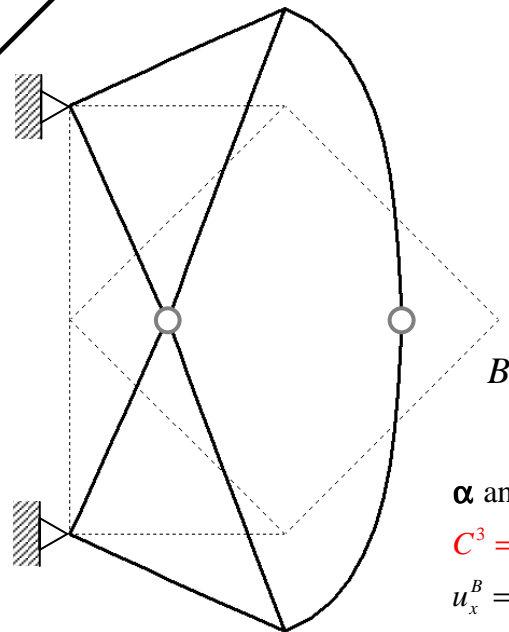
解析結果



Only α is design variables

$$C^3 = 2.32 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

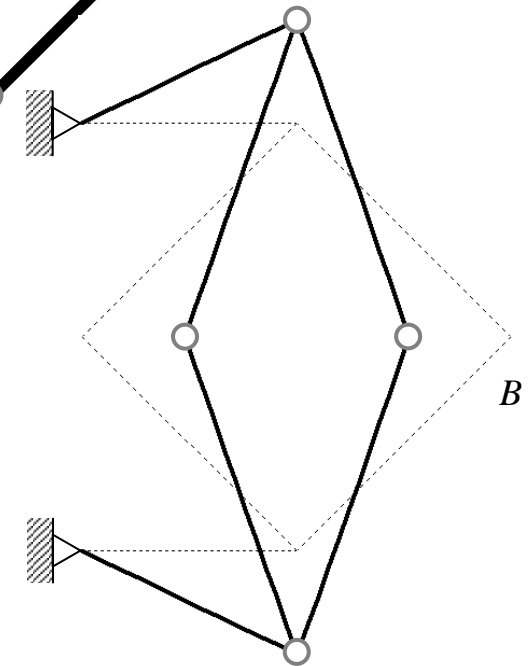
$$u_x^B = -5.0 \text{ cm}$$



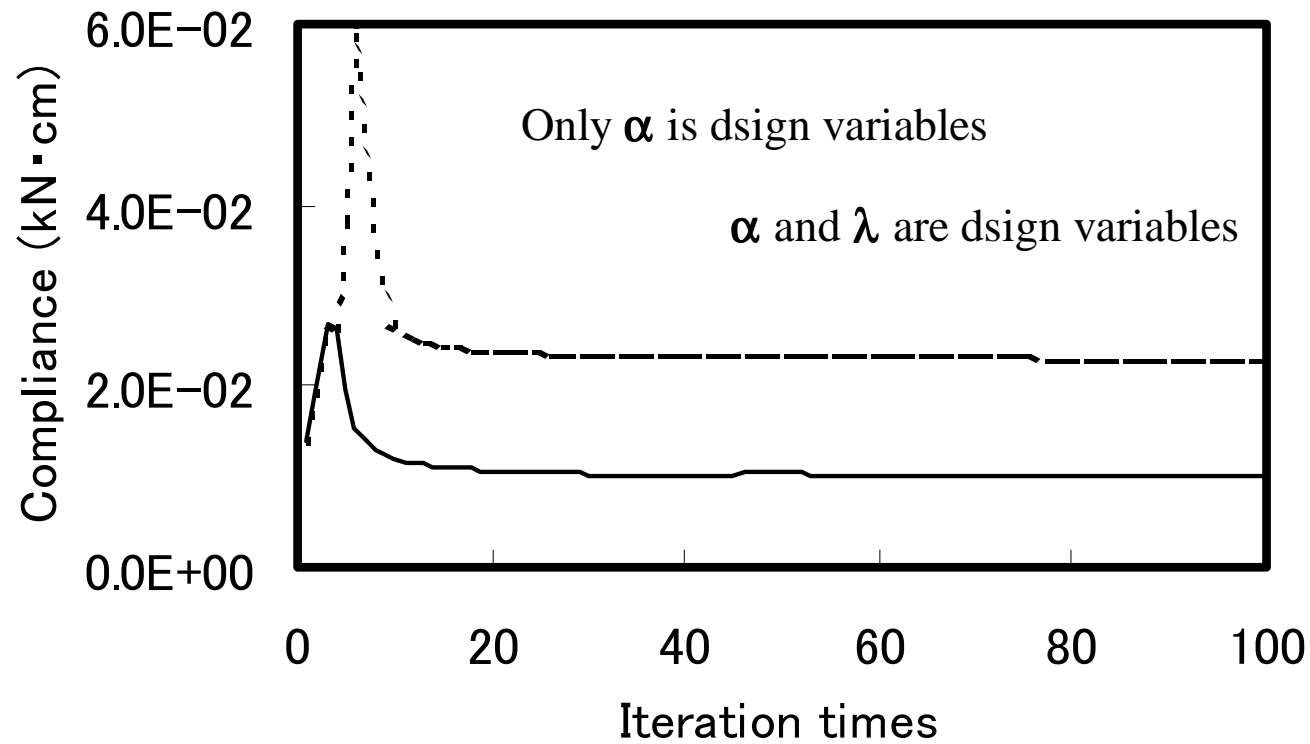
α and λ are design variables

$$C^3 = 9.91 \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

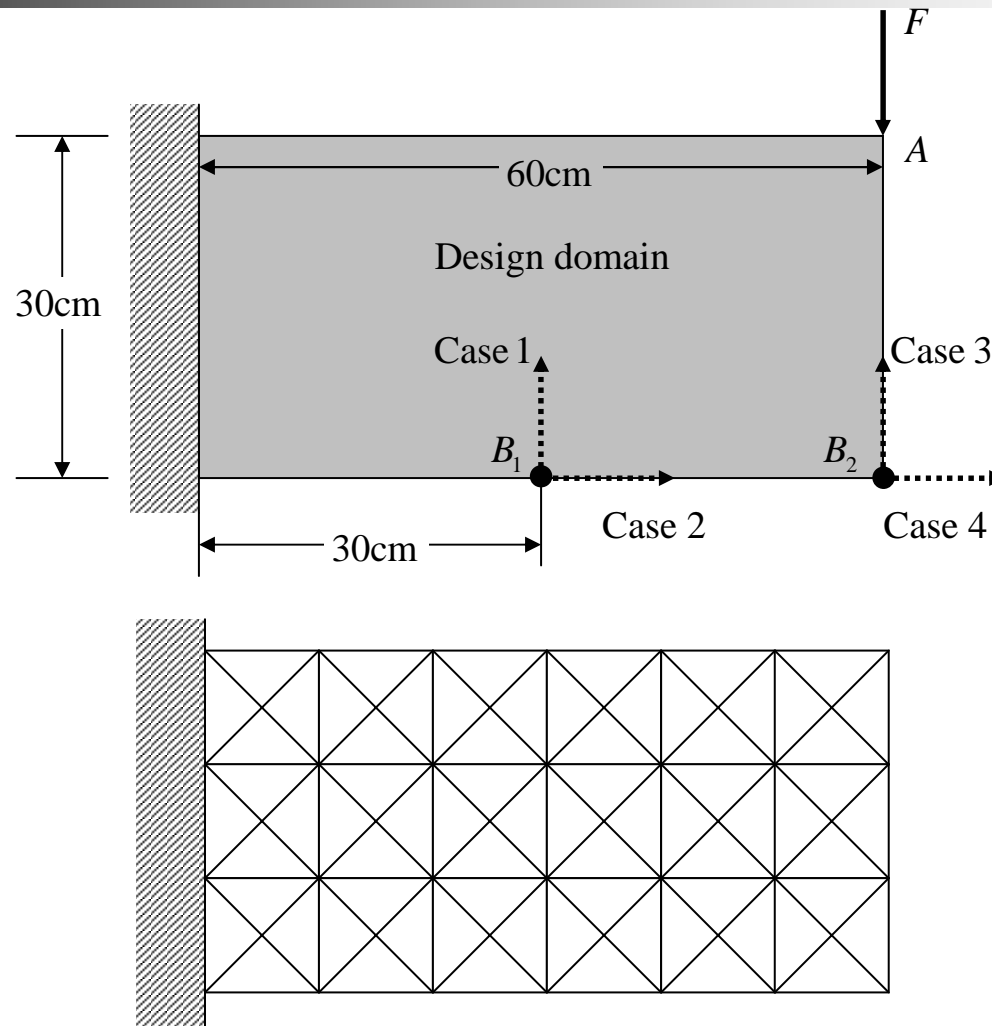
$$u_x^B = -5.0 \text{ cm}$$



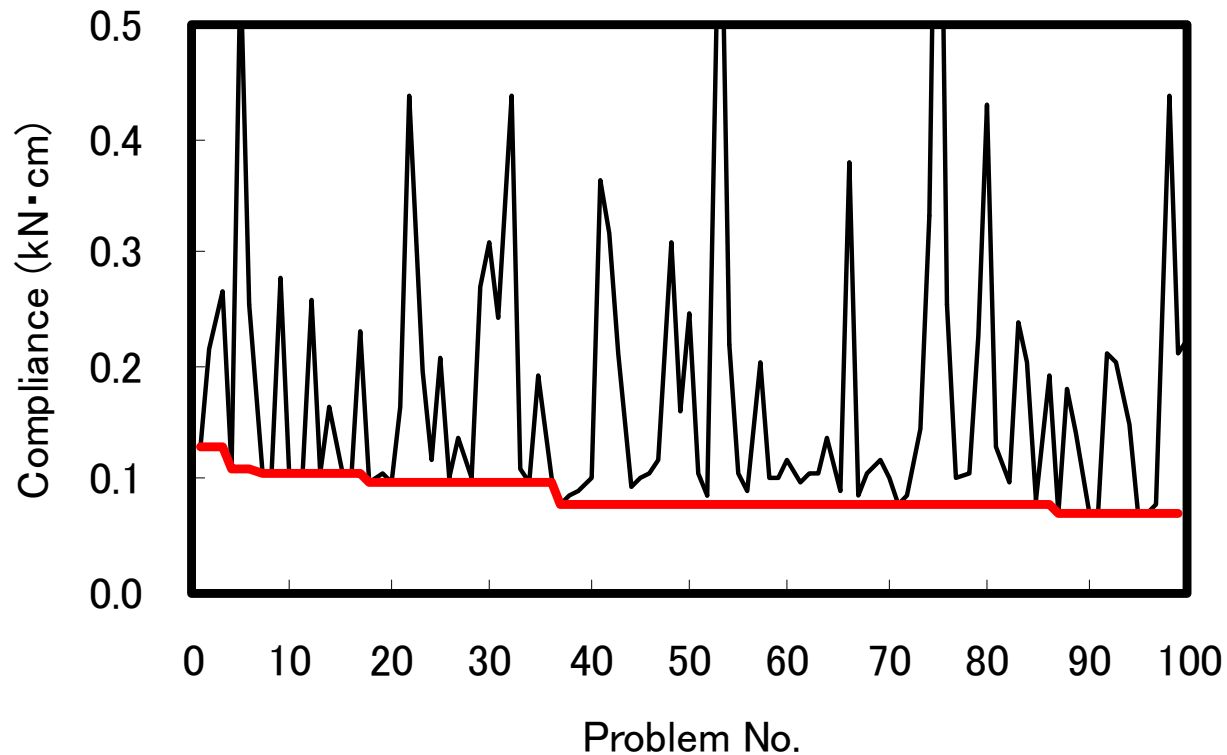
目的関数の収束状況



解析例2

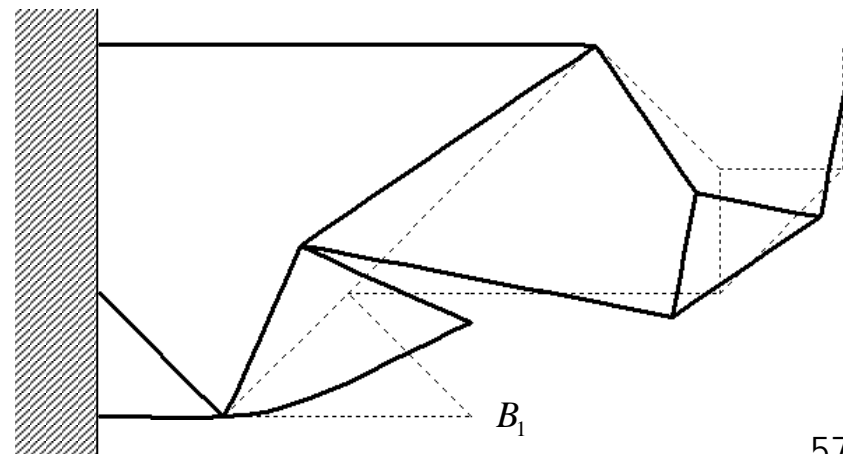
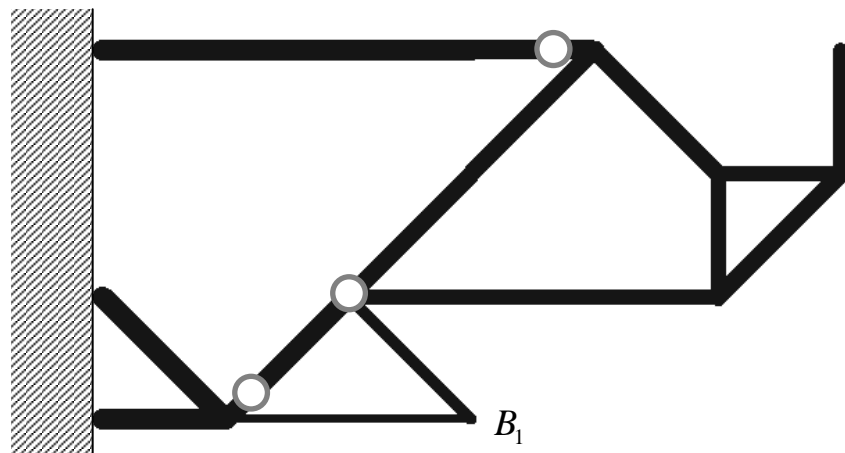
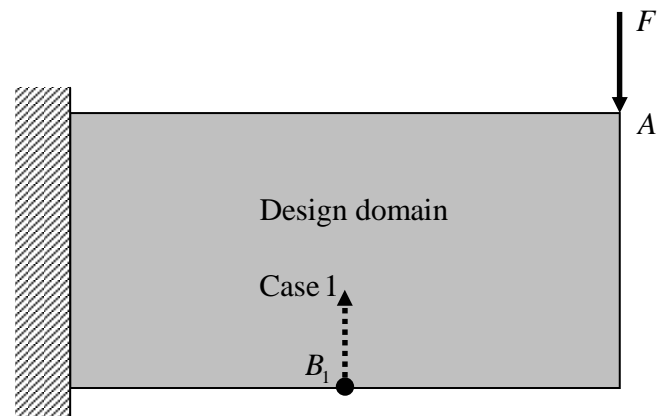


最適解の初期値依存性

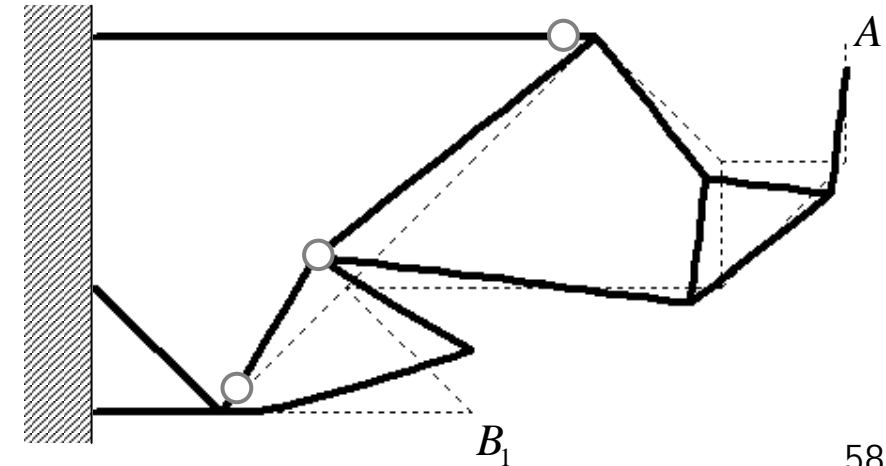
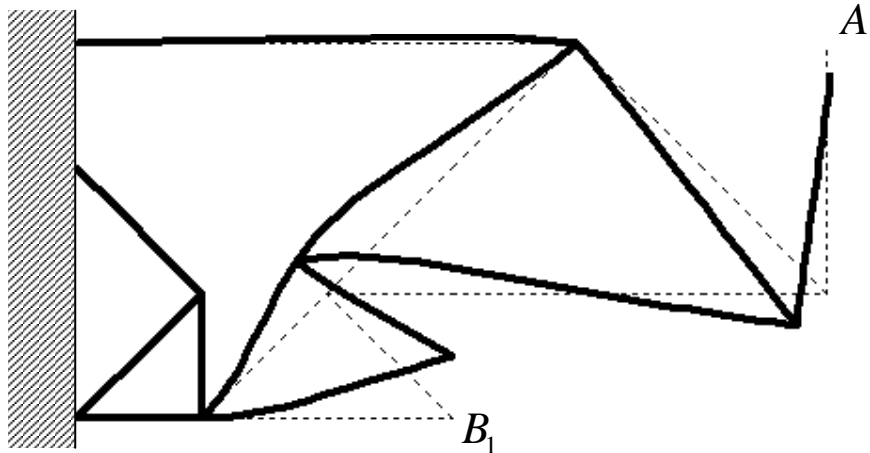
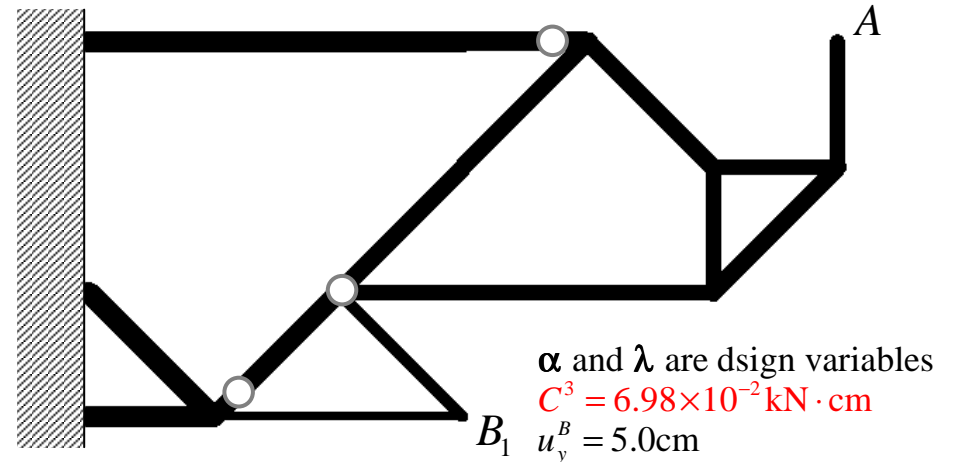
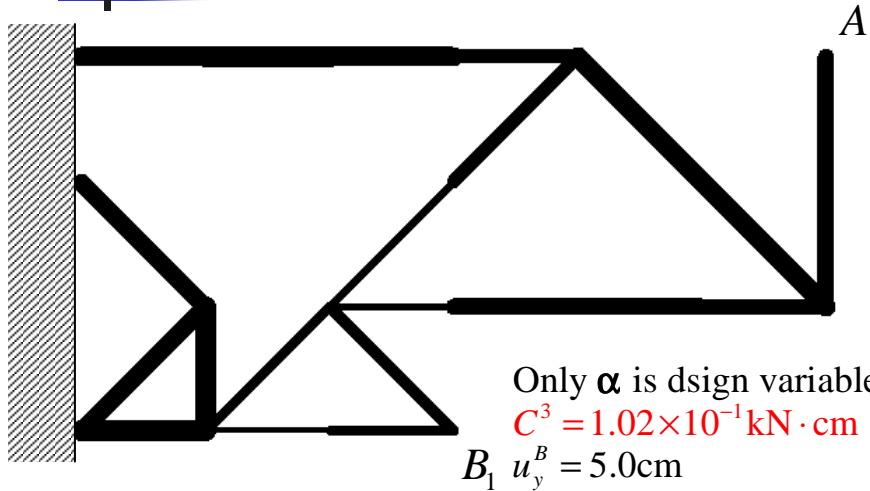


初期値を乱数で変化させた場合の最適解の変化

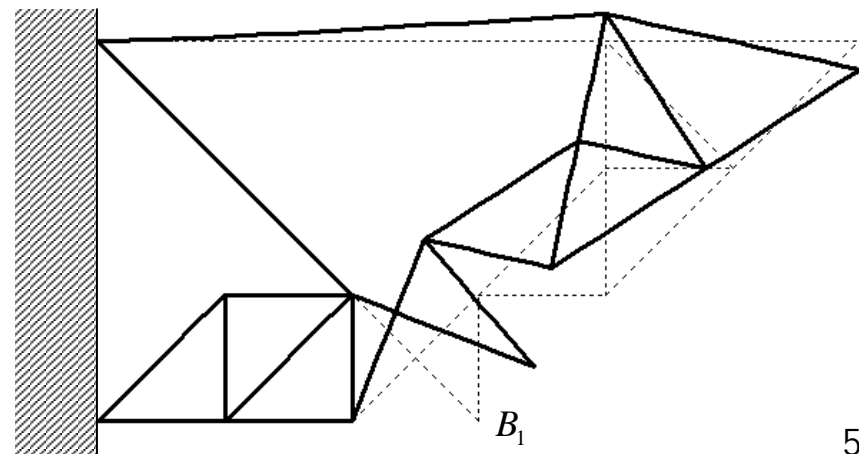
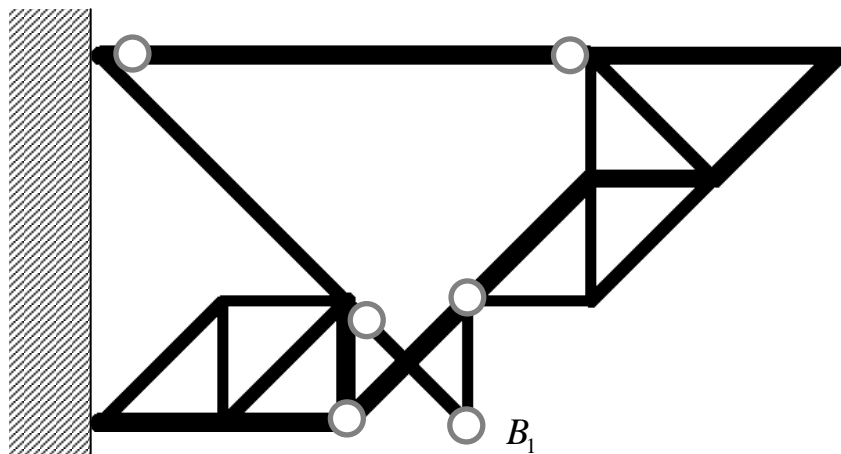
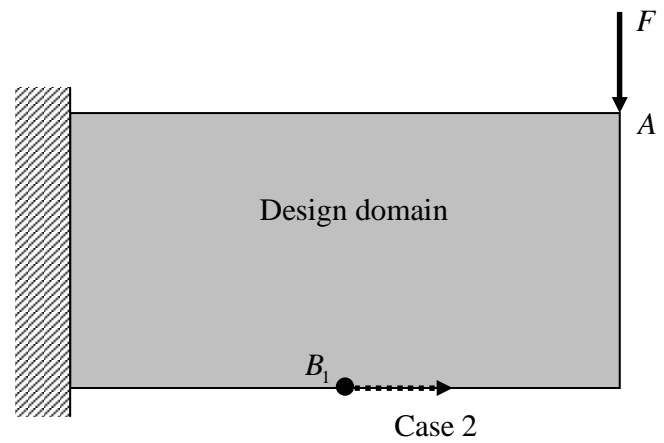
解析結果 (Case 1)



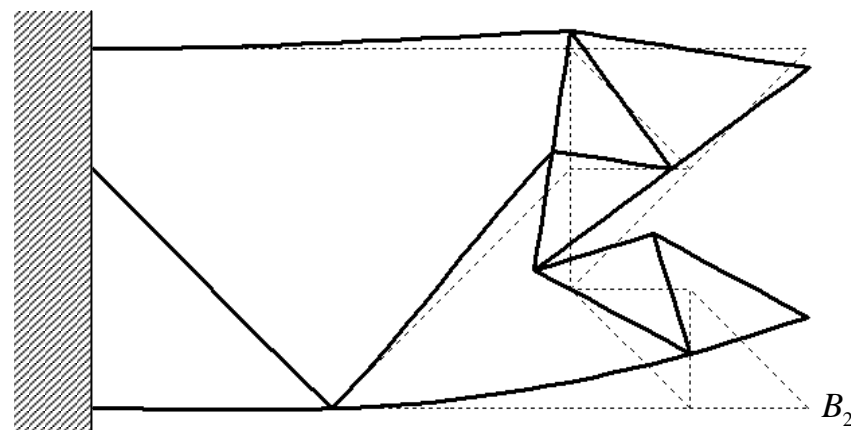
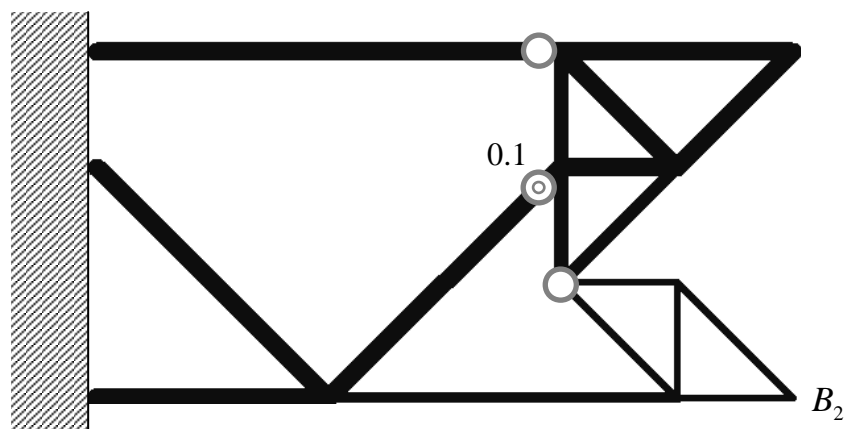
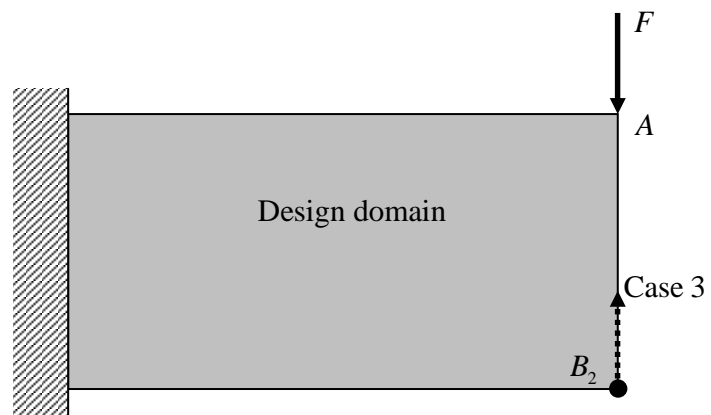
接合部剛性を設計変数にする 場合としない場合の比較



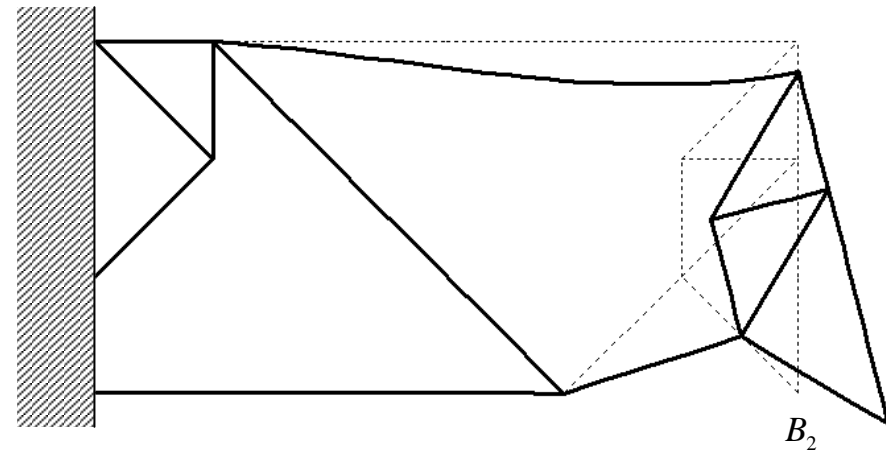
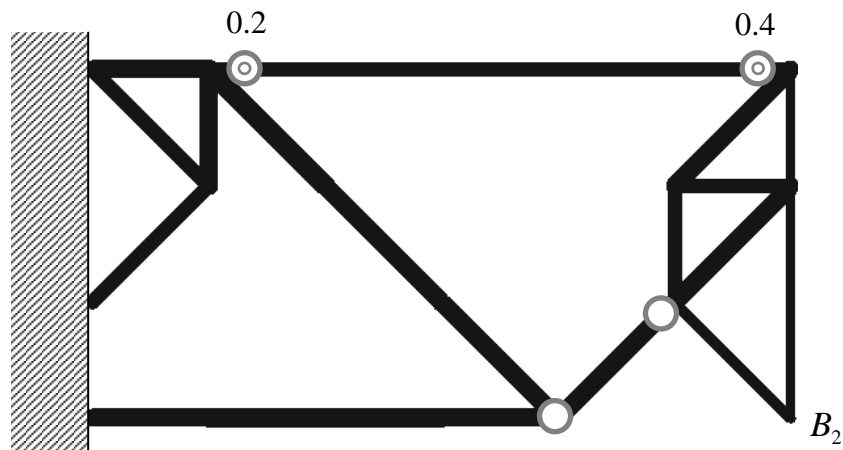
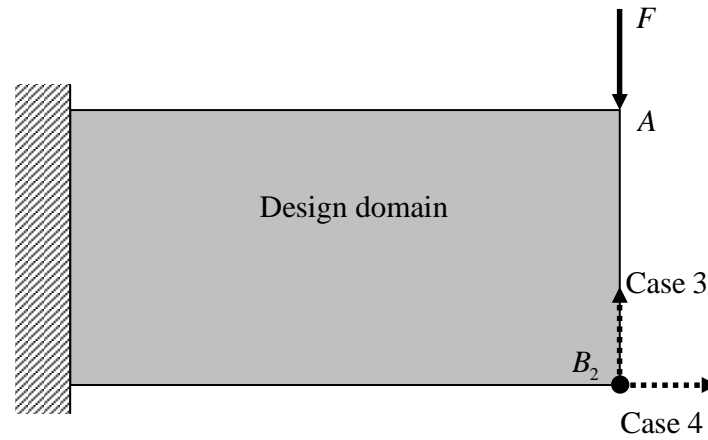
解析結果 (Case 2)



解析結果 (Case 3)

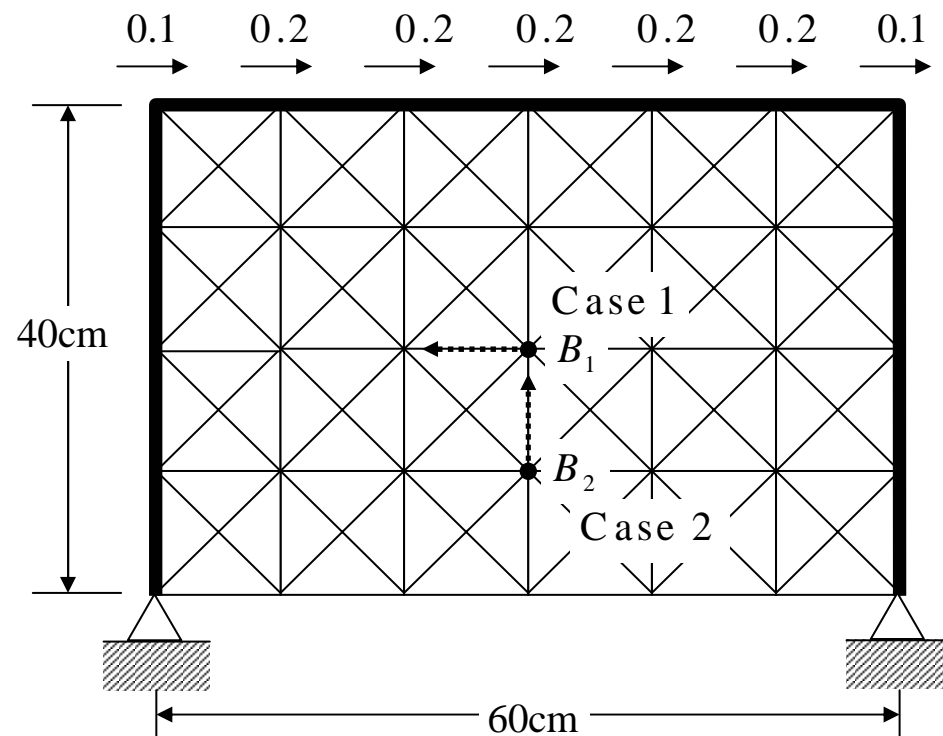


解析結果 (Case 4)

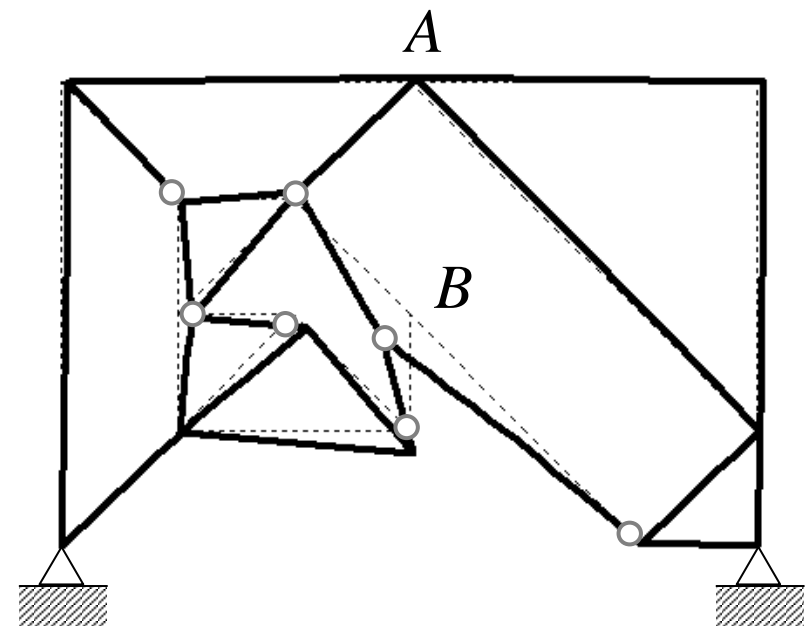
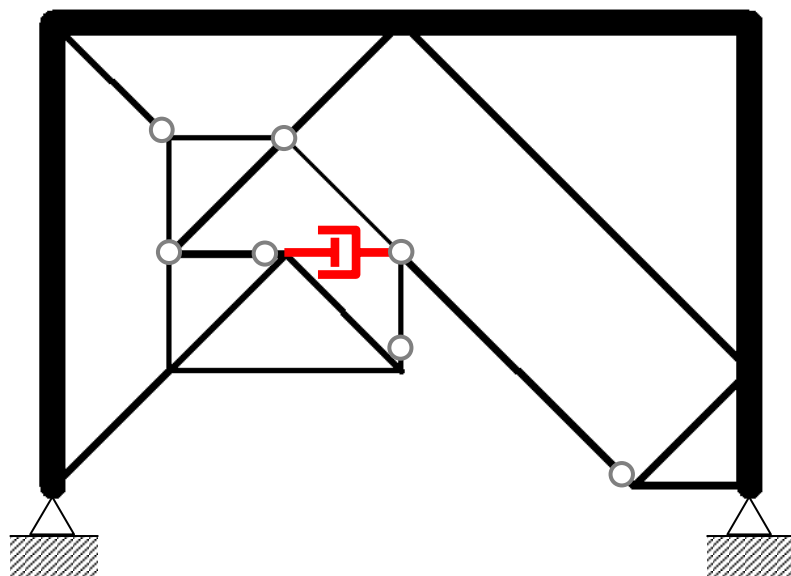


解析例3 ダンパー機構の設計

(平田裕一(三井建設)共同研究)

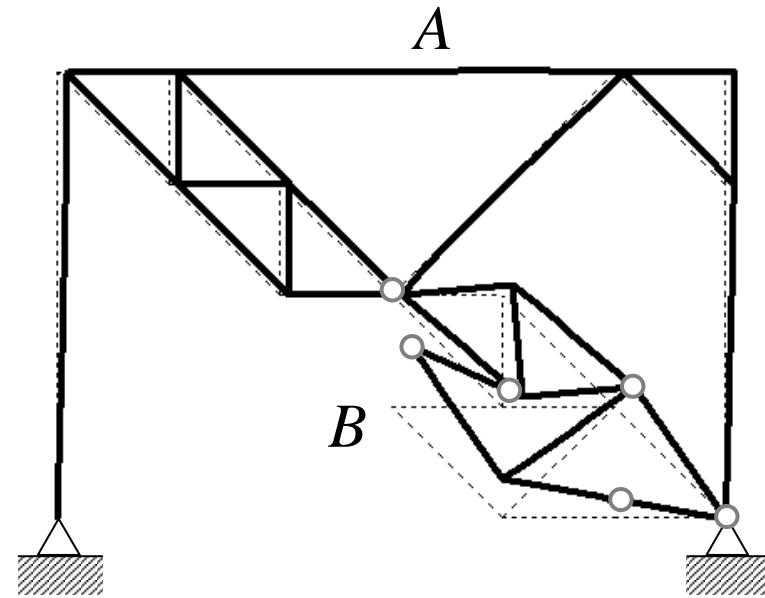
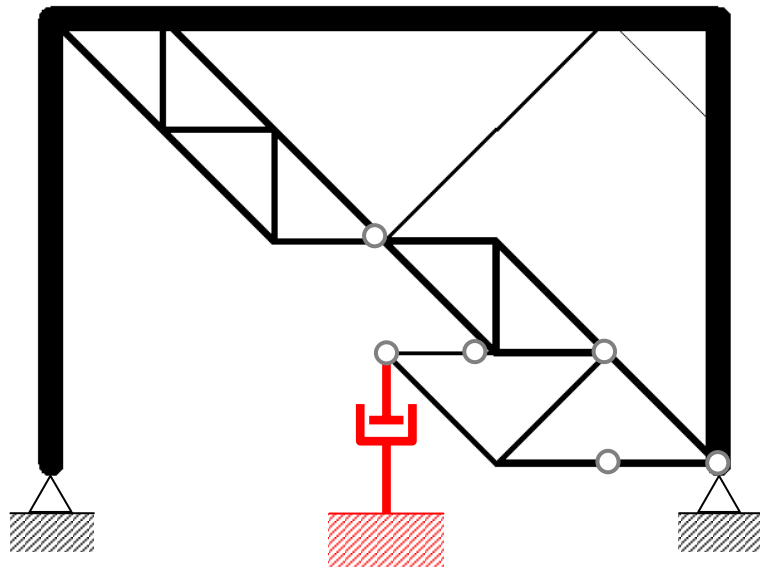


解析結果 (Case1)



A点とB点の相対水平変位
約4倍

解析結果 (Case2)



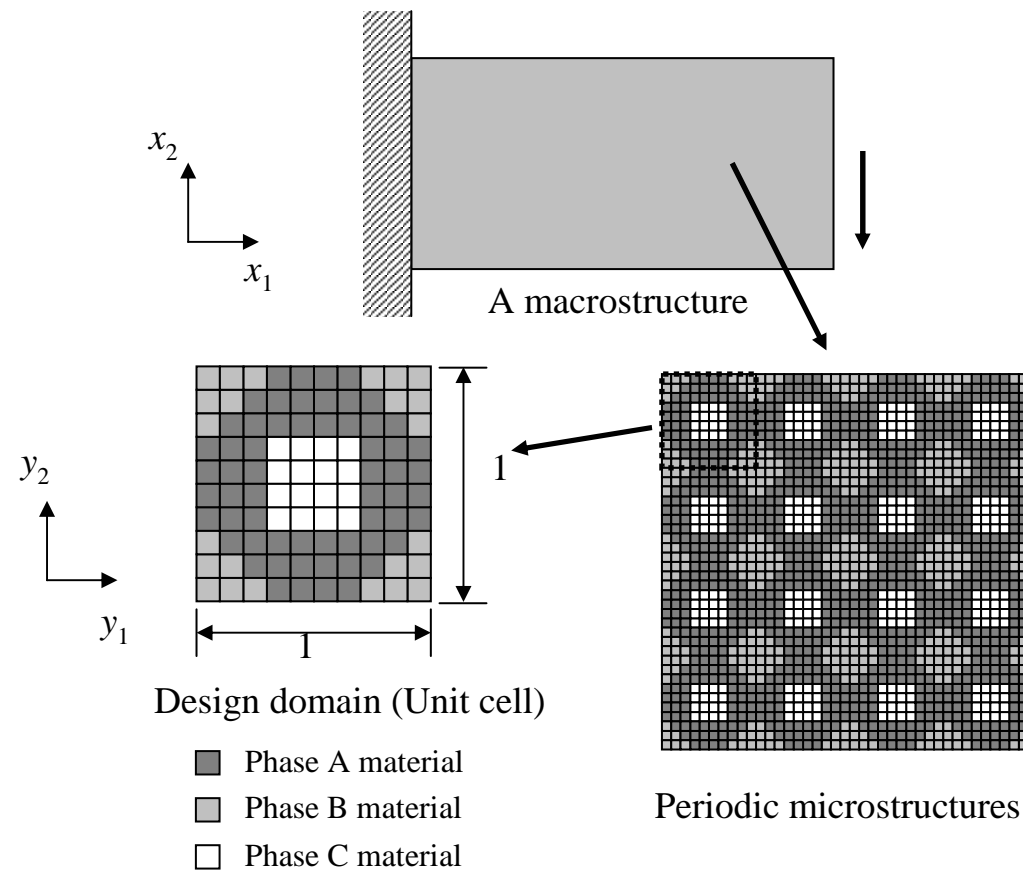
A点の水平変位とB点の鉛直変位の相対比約6倍



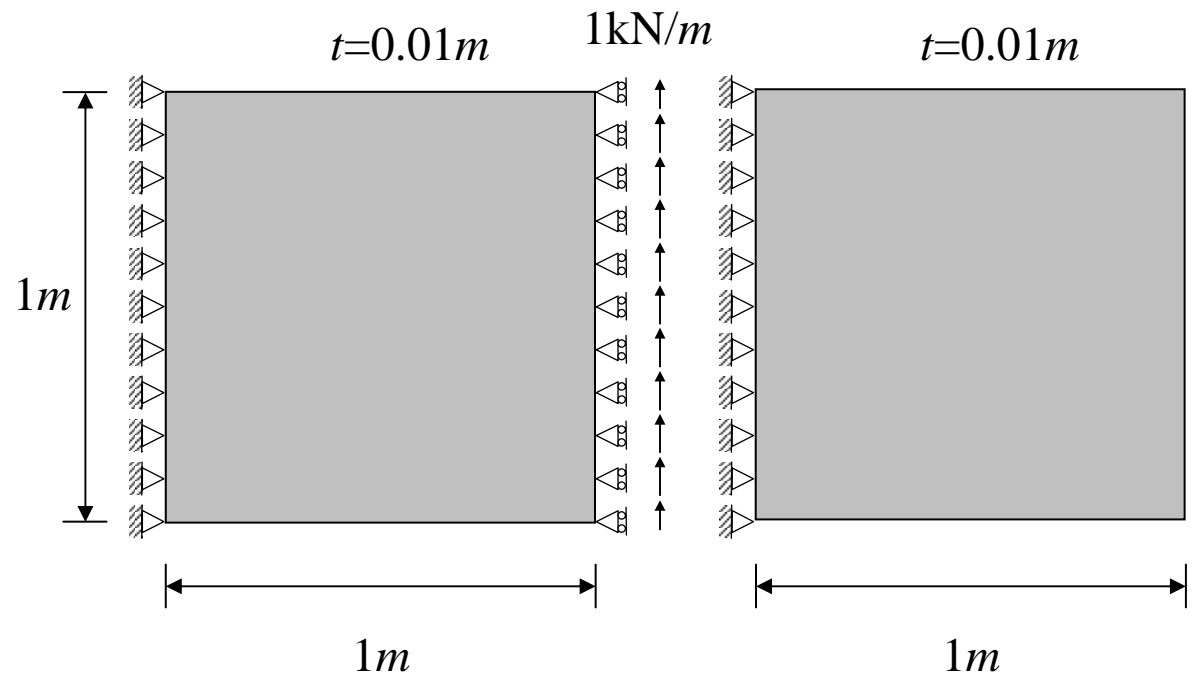
エコマテリアル設計への利用

- 光造形法等により製造技術の革命的進歩が起こっている。
- 将来このような製造技術を用いて様々な新しい複合材料を開発できる可能性がある。

複合材板のマイクロ構造の設計

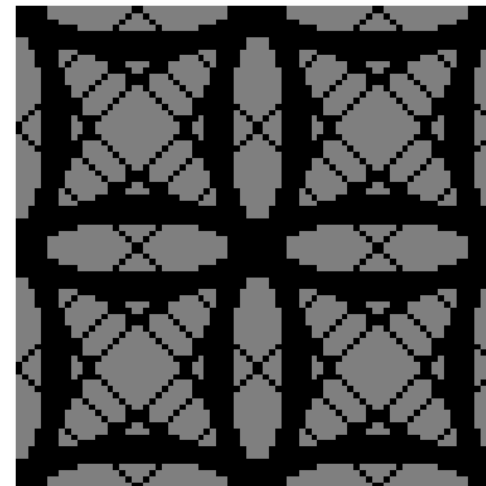
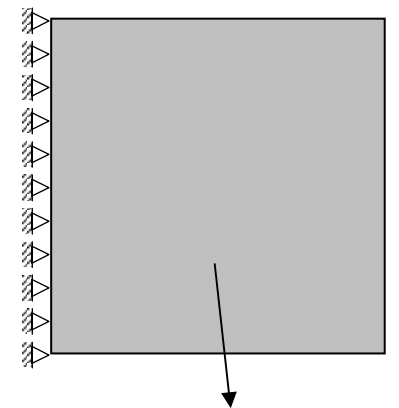
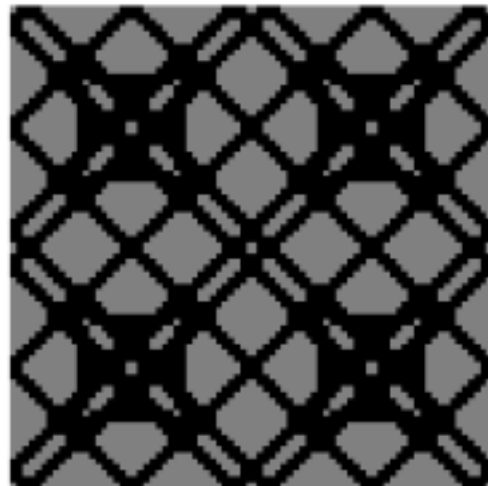
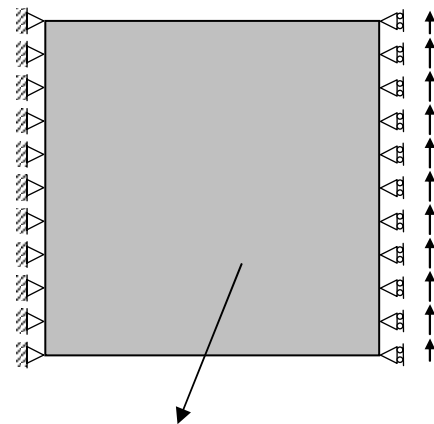


複合材板の材料最適設計

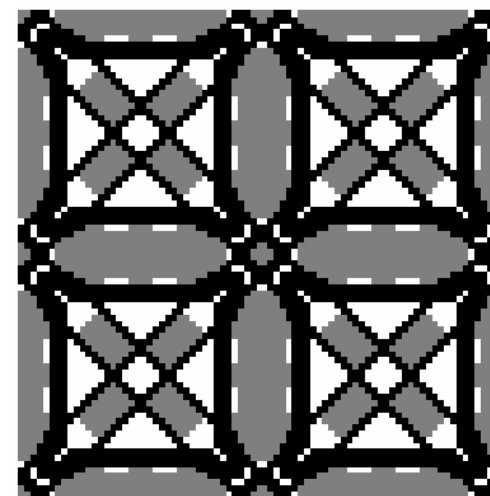
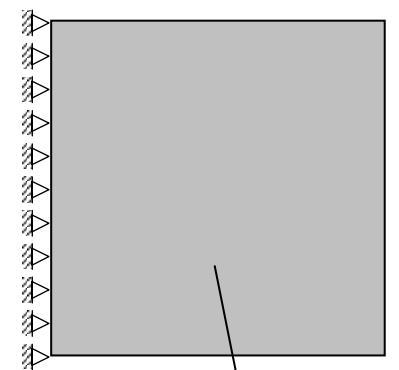
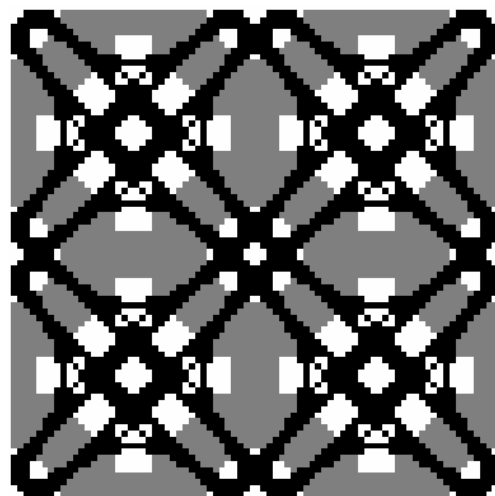
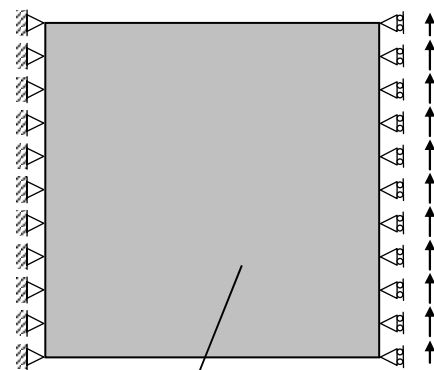


| | | E (GPa) | ν |
|----------------|------------------|-----------|-------|
| Gray Material | Cast Epoxy resin | 3.0 | 0.25 |
| Black Material | E-Glass Fiber | 72.4 | 0.15 |
| White Material | Void | 10^{-7} | 0.25 |

2種材料の最適位相



3種材料の最適位相





まとめ

- 位相最適化手法の新展開として、下記への利用に関する研究の紹介を行った。
 - 力学教育への利用
 - コンセプトデザインの支援ツールとしての利用
 - メカニズムの設計への利用
 - 複合材料(エコマテリアル)設計への利用

「パソコンで解く構造デザイン」, 丸善, 2002年5月出版予定