

part. 2

建築構造最適化の概要と将来展望

京都大学 教授 大崎 純

大崎 純

Makoto Ohsaki

京都大学
大学院工学研究科
建築学専攻
教授

経歴

京都大学大学院工学研究科建築学専攻・教授（平成27年 4月）
広島大学大学院工学研究科建築学専攻・教授（平成22年 4月）
京都大学大学院工学研究科建築学専攻・助教授（平成8年 4月）、（平成19年4月から 准教授）
アメリカ合衆国アイオワ大学客員研究員（平成3年 8月 - 平成4年 8月）
京都大学工学部建築学科・助手（昭和60年4月）

受賞

日本計算力学賞(The 2019 JACM Award for Computational Mechanics) (令和元年12月)
ASSMO Award, Asian Society of Structural and Multidisciplinary Optimization (2018)
Best Paper Award, APCS2015 (平成27年5月)
日本計算力学連合フェロー賞(The 2014 JACM Fellows Award) (平成26年7月)
日本建築学会賞・論文部門(平成20年5月)
The State-of-the-Art in Civil Engineering Award, ASCE, (平成16年7月) など多数有。

著作権について

MIDAS BUILDING TECHNICAL WEB SEMINAR



当PPTは、**京都大学大学院 大崎 純 教授** のWEB技術講座の資料として公開され、大崎教授の許可を得ずに、無断で複製・転載・送信・配信することは、著作権侵害となり、法的に罰せられることがあります。

このため、著作権者からの許可なく、資料内容の一部およびすべてを複製、転載または配信など、第三者の利用に供することを禁止します。

当該資料に関する質問などは、受け付けることができかねます。
当該資料についての質問などを **大崎 教授** や **大崎 教授が所属する団体** に対して連絡することをお控えください。

ご理解をいただきますようお願い申し上げます。

AGENDA

建築構造最適化の 概要と将来展望

京都大学 教授 大崎 純



1

構造最適化とは

2

最適化の方法と最適化例

3

構造形態の最適化

4

機械学習の利用

5

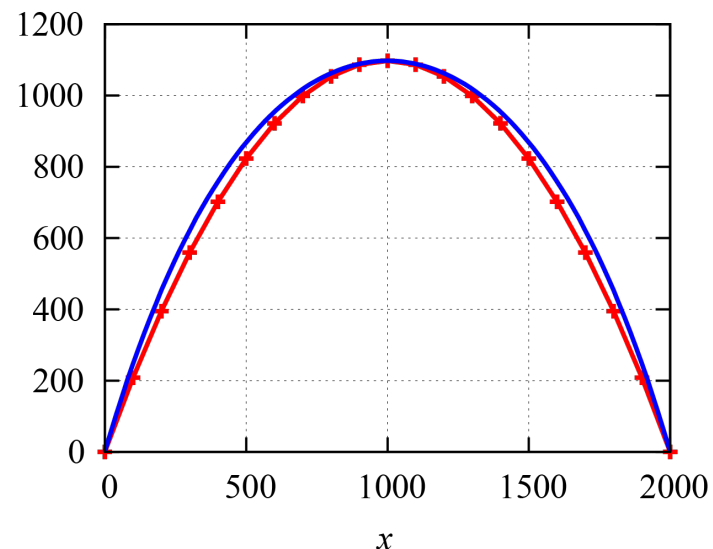
今後の展望

Session 3

構造形態の最適化

アーチの形状最適化

アーチ：軸力のみで自重に抵抗



カテナリー（懸垂線）

$$Y(x) = \frac{H}{\rho} \left(-\cosh \frac{\rho x}{H} + \cosh \frac{\rho L}{2H} \right)$$

青：カテナリーアーチ（自重に対して最適）

軸ひずみエネルギーは曲げひずみエネルギーの1000倍以上

赤：放物線（水平長さあたり一定の荷重に対して最適）

カテナリーは放物線で良好に近似できる

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

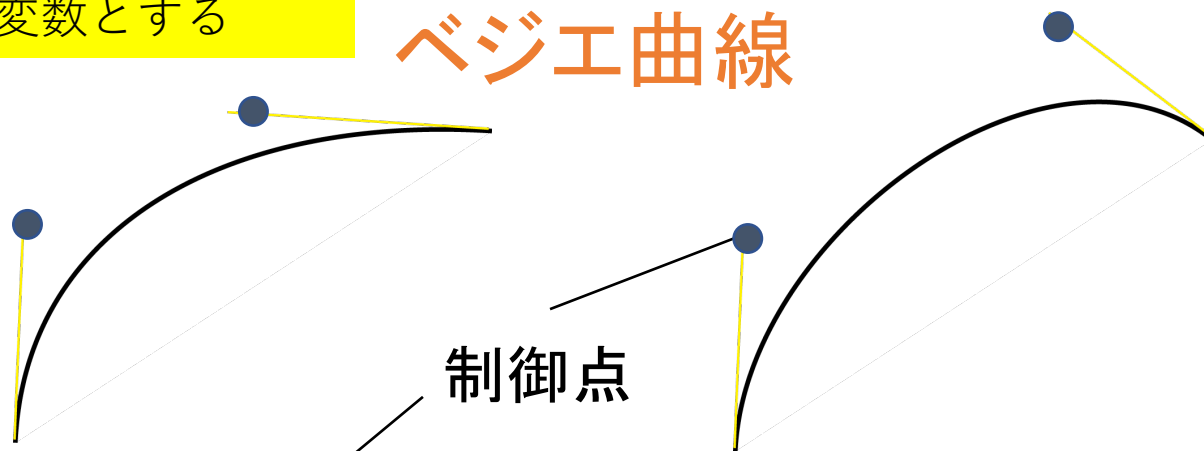
京都大学大学院
大崎 純 教授

パラメトリック曲線

7

複雑な曲線形状の最適化：
パラメトリック曲線でモデル化
制御点の座標を変数とする

ベジエ曲線



$$\mathbf{P}_b^n(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{R}_i B_i^n(t)$$

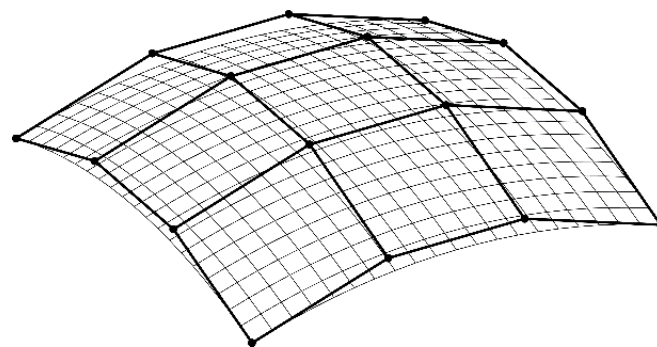
バーンスタイン基底関数

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\binom{n}{i} = \begin{cases} \frac{n!}{i!(n-i)!} & (\text{for } 0 \leq i \leq n) \\ 0 & (\text{for } i < 0 \text{ or } i > n) \end{cases}$$

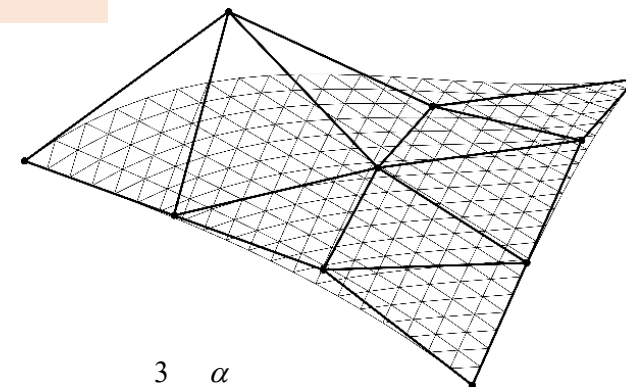
パラメトリック曲面

自由曲面シェルの形状：
ベジエ曲面，Bスプライン曲面，
NURBS（Non-Uniform Rational B-Spline，
非一様有理Bスプライン）



$$S_b^{n,m}(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \mathbf{R}_{i,j} B_i^n(u) B_j^m(v)$$

テンソル積（直積）ベジエ曲面



$$\mathbf{P}_t^3(u,v) = \sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^{\alpha} \mathbf{R}_{\alpha,\beta} B_{\alpha,\beta}^3$$

$$B_{\alpha,\beta}^3 = \frac{3!}{\alpha! \beta! (3-\alpha-\beta)!} u^{\alpha} v^{\beta} (1-u-v)^{3-\alpha-\beta}$$

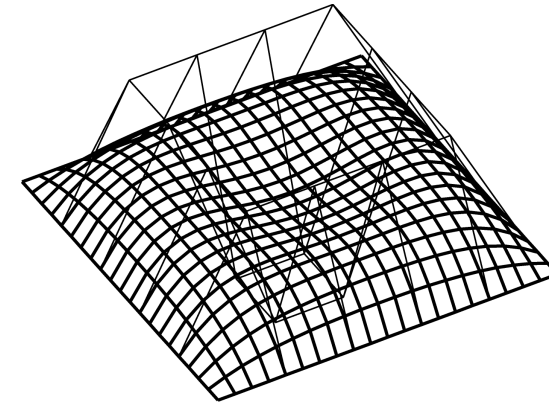
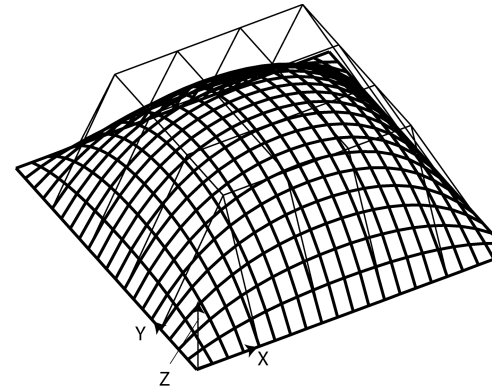
ベジエ三角形曲面

制御多角形の頂点の座標を変数
として最適化

曲面形状の最適化

5 x 5 次のベジエ曲面

正方形の平面上に
ドームを設計

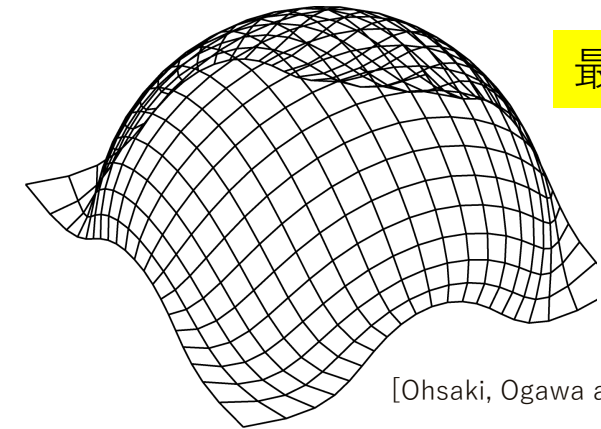


「中心と曲面上の点の距離」と「指定された半径」との誤差の2乗和の最小化

$$E = \int \left[\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_0\| - r \right]^2 dS \rightarrow \text{最小化}$$

$\mathbf{c}_0$: 指定された曲面の中心

r : 指定された曲面の半径



最適形状

[Ohsaki, Ogawa and Tateishi 2003]

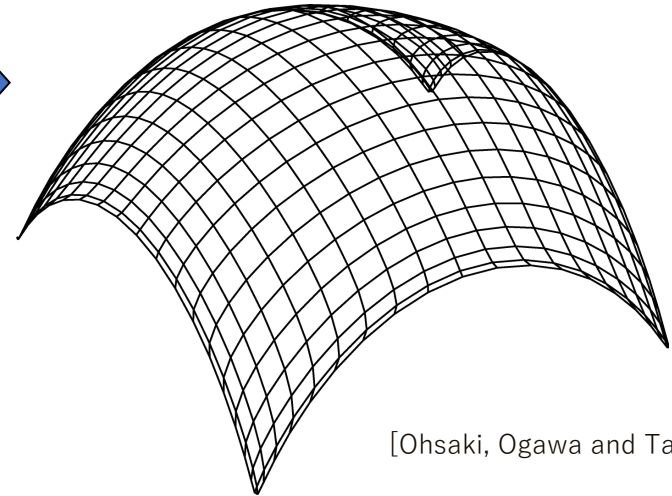
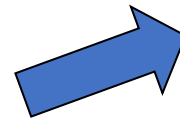
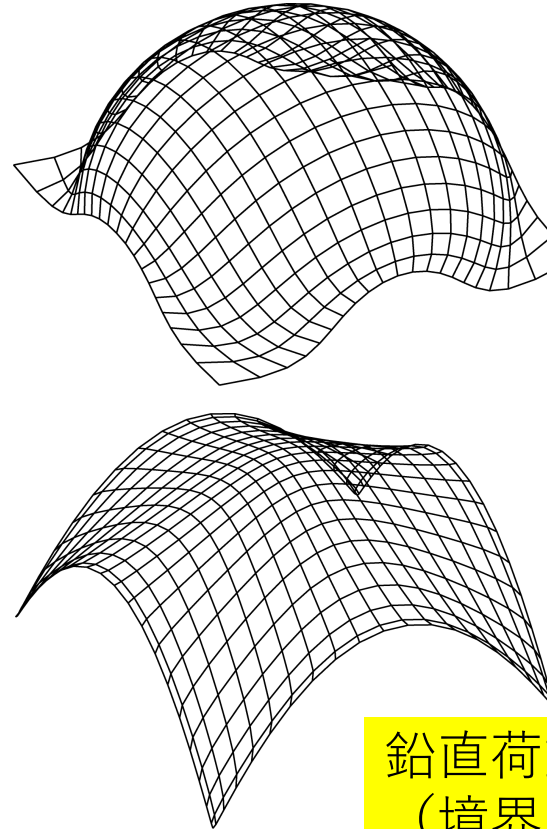
正方形平面の半球は存在しない
⇒ 4隅以外では球形のシェル

多目的最適化（丸さと剛性のトレードオフ）

10

丸い曲面
（力学的に優れている
とはいえない）

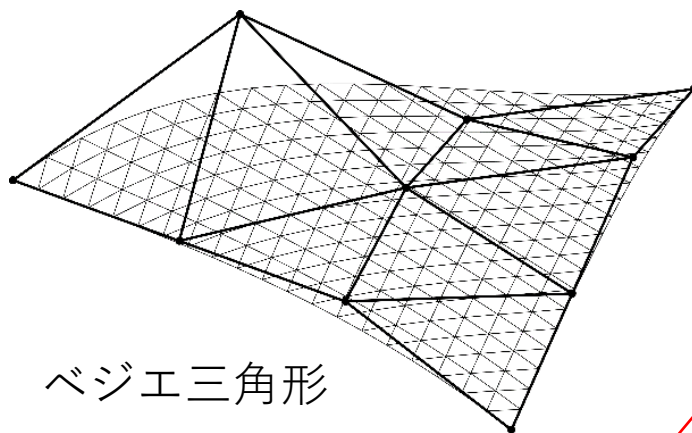
多目的最適化問題のパレート最適解
（十分に丸く，剛性も大きい）



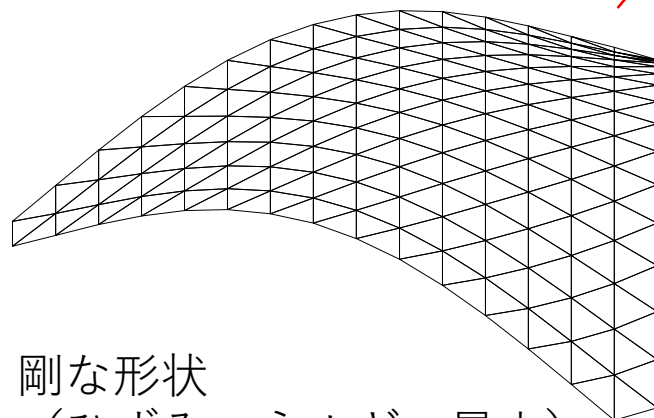
[Ohsaki, Ogawa and Tateishi 2003]

鉛直荷重に対するひずみエネルギー最小化
（境界がカテナリーに近い形状）

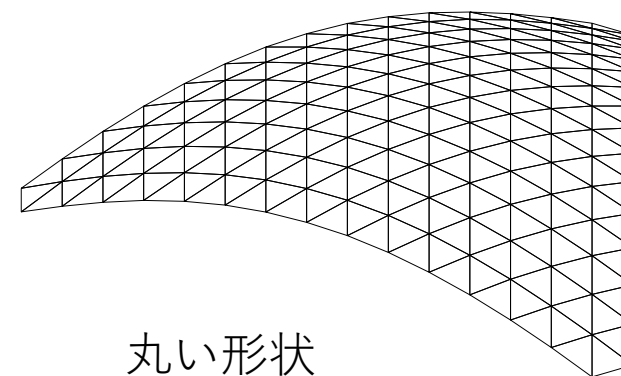
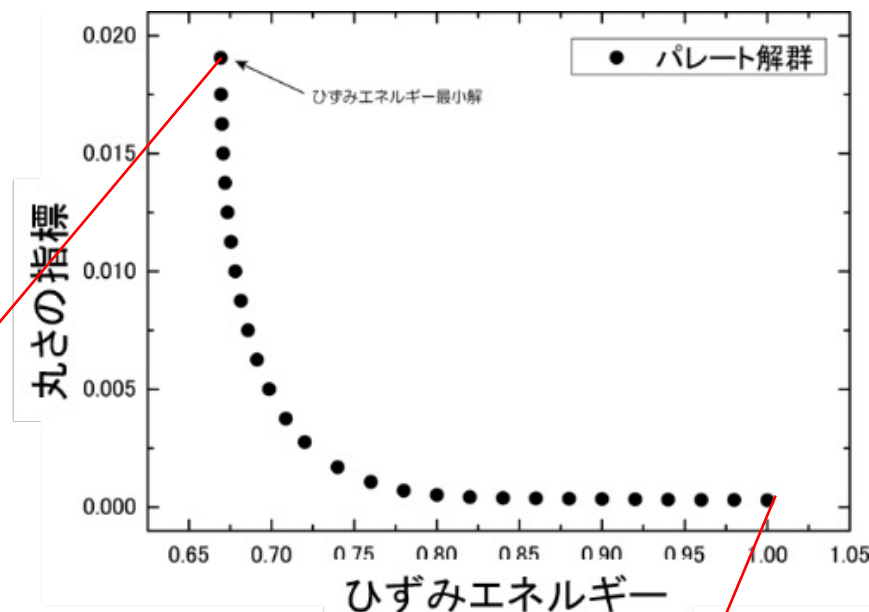
丸さと剛性のトレードオフ（三角形平面）



ベジエ三角形



剛な形状
(ひずみエネルギー最小)



丸い形状
(丸さの指標最小)

建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

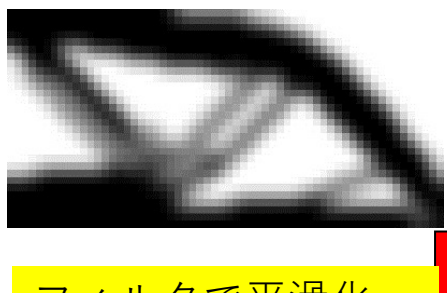
連続体のトポロジー最適化

12

- 集中荷重の作用する長方形板
- 材料の体積制約，ひずみエネルギー最小化
- 平面応力の長方形要素
- 要素の存在／非存在：0-1変数の密度



チェッカーボード
パターン



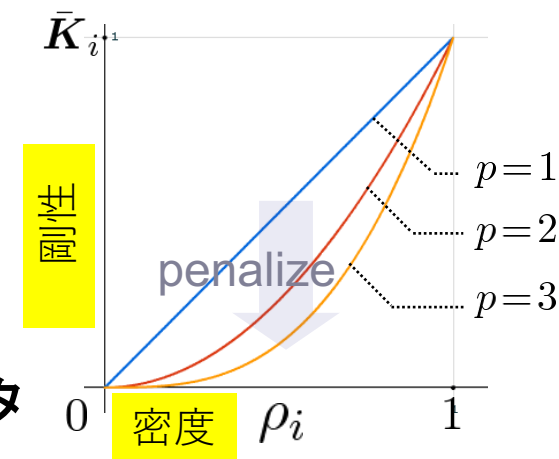
フィルタで平滑化
(グレースケール)

$$K_i^{(P)} = \rho_i^p \bar{K}_i$$

ρ_i ：要素 i の密度

p ：ペナルティパラメータ

- 中間的密度
⇒要素剛性を過小評価
- 中間値の解は不経済
⇒0,1の値に収束



建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

シェルのトポロジー最適化

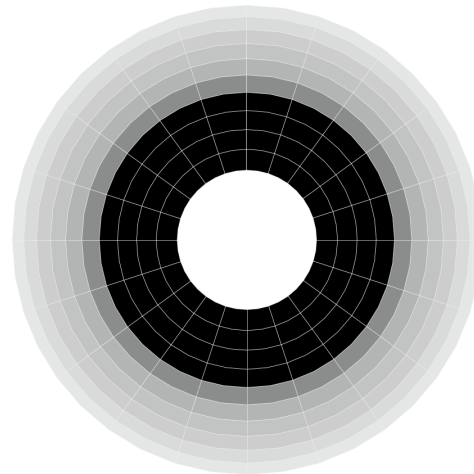
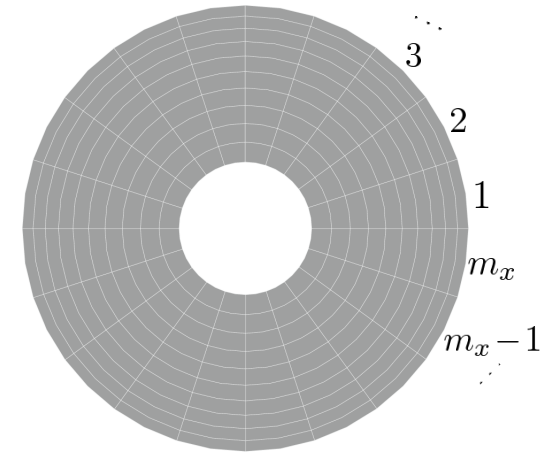
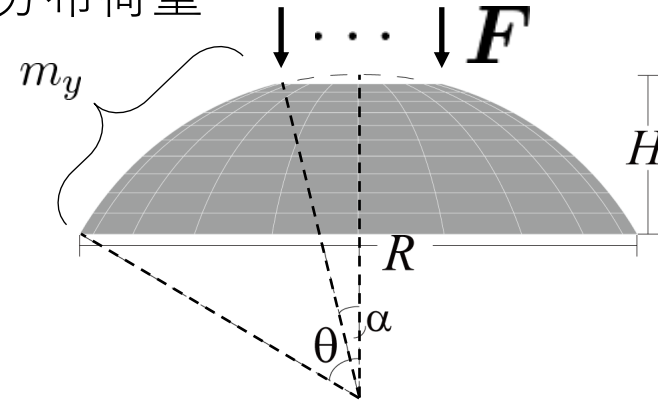
13

- 軸対称球形シェルモデル
- 中央リングに等分布荷重

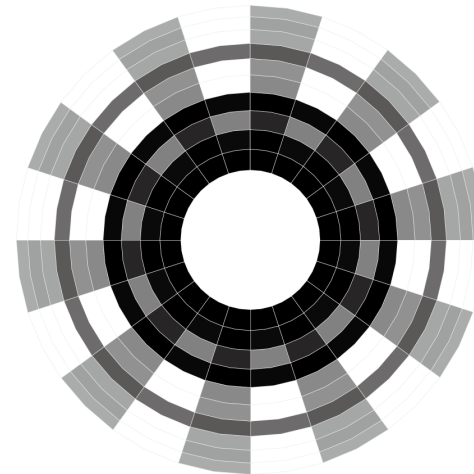
中間的な密度は
許容されない



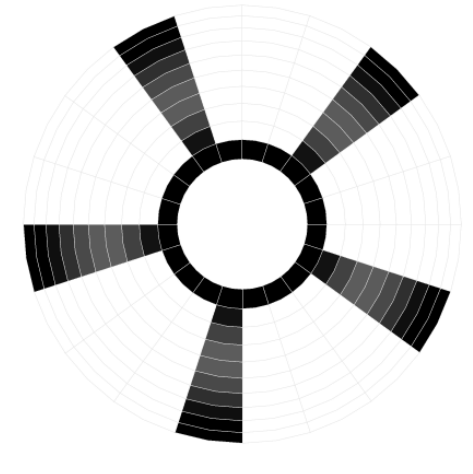
対称性が崩れる



初期解に近い解



中間的な解



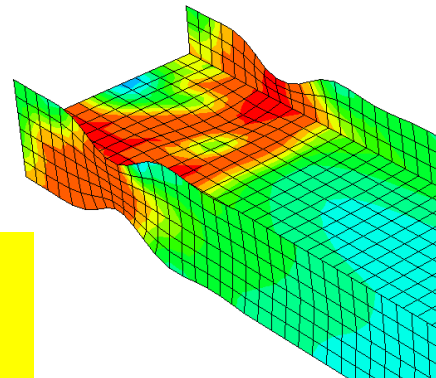
最適解

部材（部品）の最適化

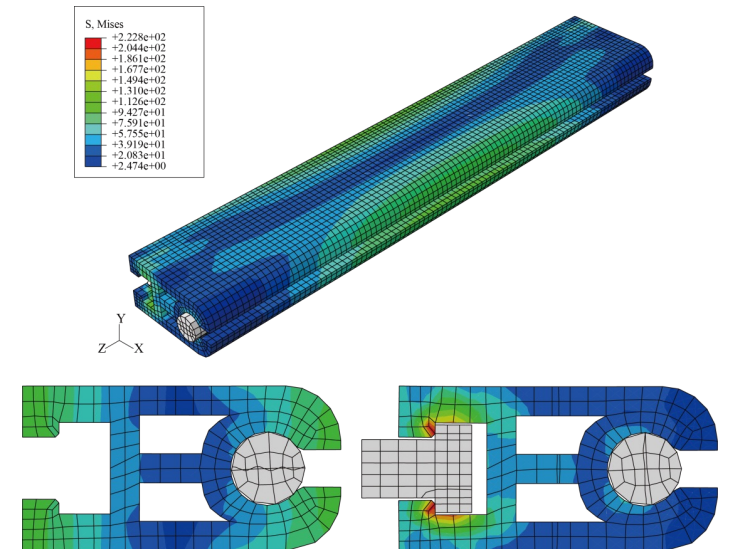
14

- 建築は単品生産：
 载荷条件が複雑で不確定性が高い
 ⇒ 大規模あるいは複雑な構造でなければ最適化の効果は小さい
- 部材，接合部，制振デバイスなど部品：
 载荷条件が単純
 大量生産
 ⇒ 最適化の効果は大きい
 計算コストが大きくても良い
 有限要素解析との連携が可能

梁端フランジ
形状の最適化



[Pan, Ohsaki, and Tagawa 2007]



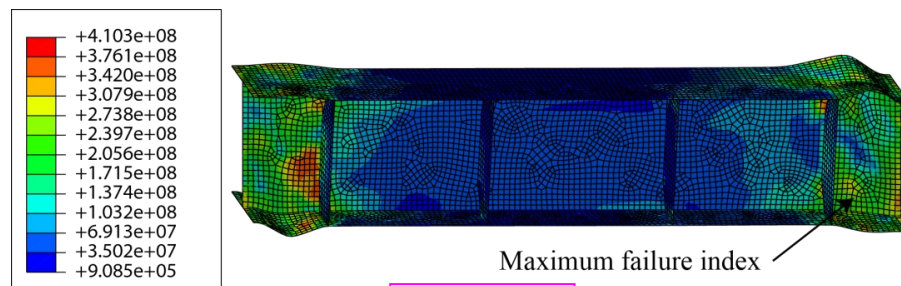
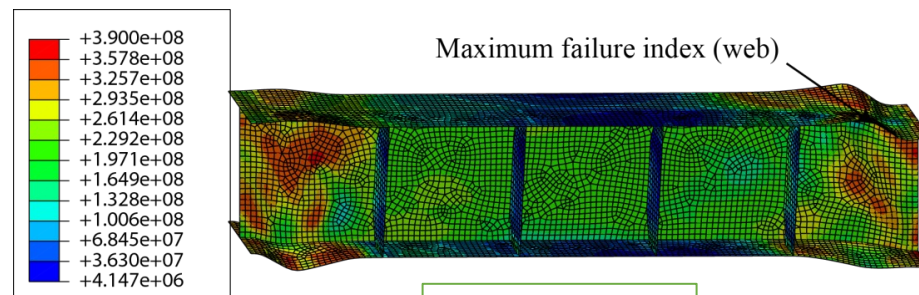
膜屋根取り付け部材の最適化

[Ohsaki, Nakajima, Fujiwara and Takeda 2011]

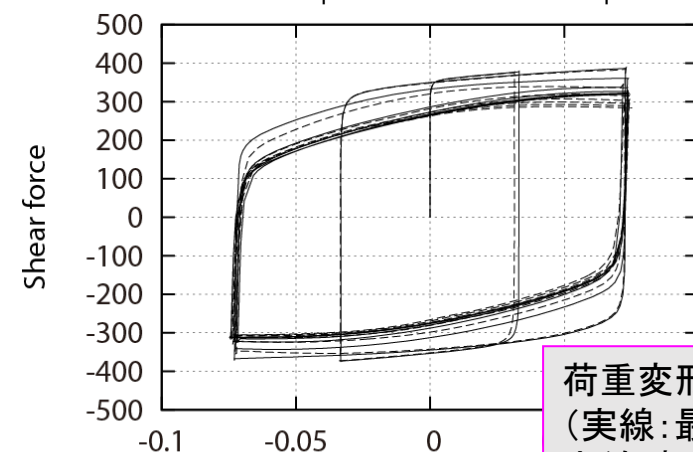
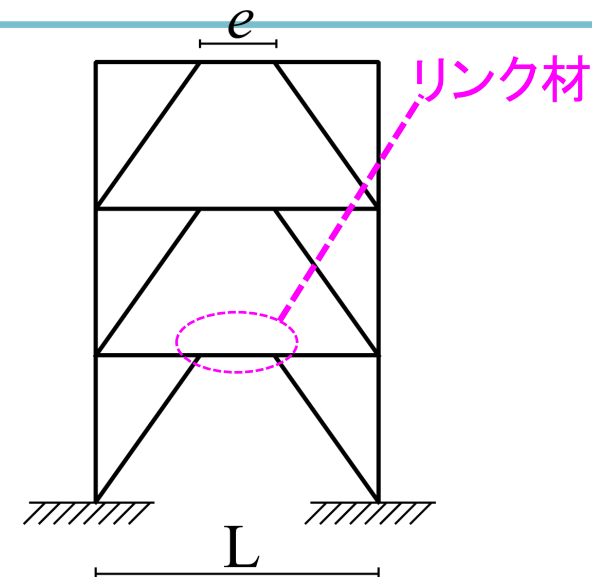
偏心ブレースのリンク部材の補強位置最適化

15

- スチフナーによる局部座屈の防止
- 破断までの消費エネルギーの最大化
- 設計変数=4枚のスチフナーの位置・厚さ



[Ohsaki and Nakajima 2012]



荷重変形角関係
(実線: 最適解,
点線: 初期解)

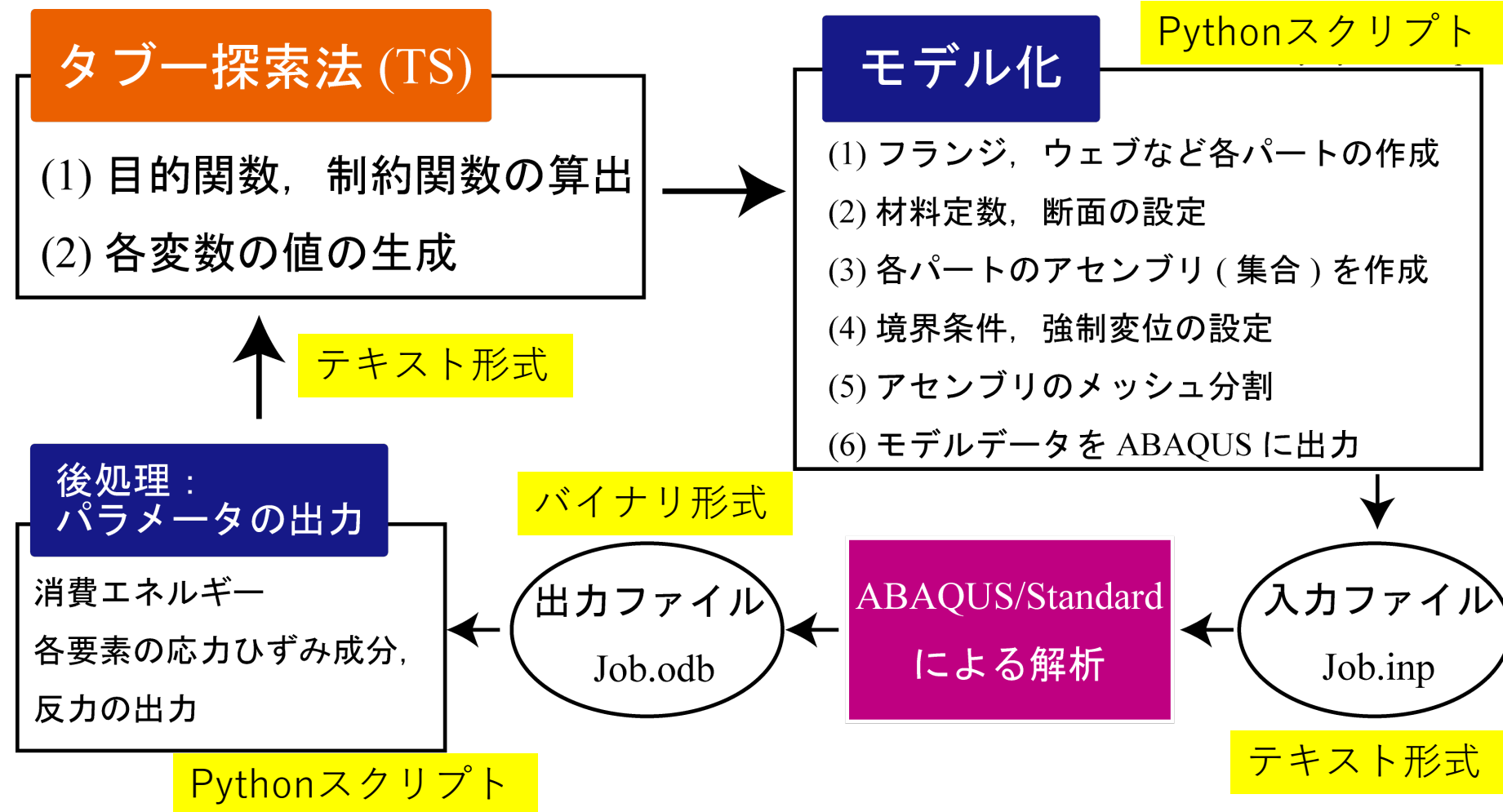
強度は減少するが、応力が減少し、
破断までの繰り返し回数が増加

建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

偏心ブレースのリンク部材の補強位置最適化

16



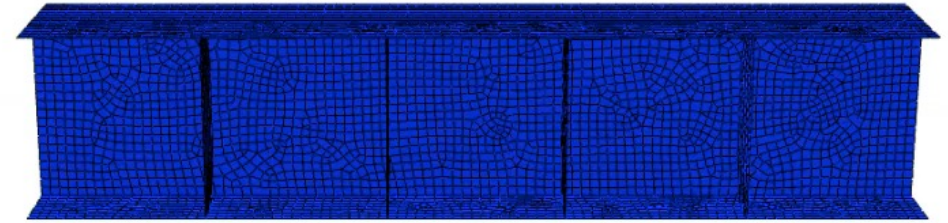
建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

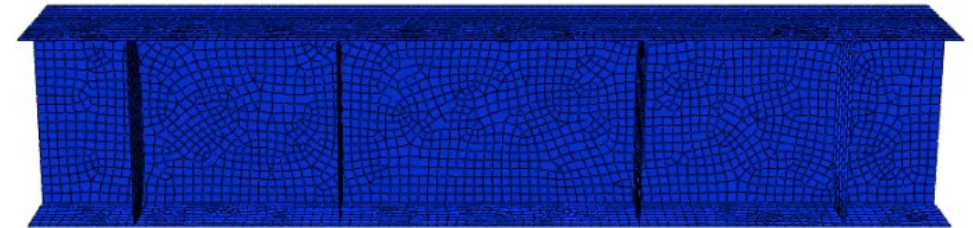
偏心ブレースのリンク部材の補強位置最適化

17

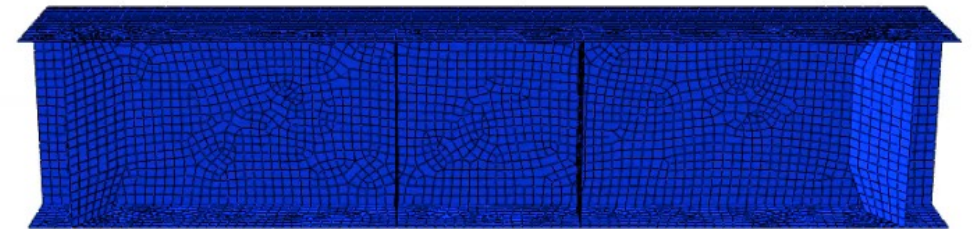
基準解



最適解 1



最適解 2



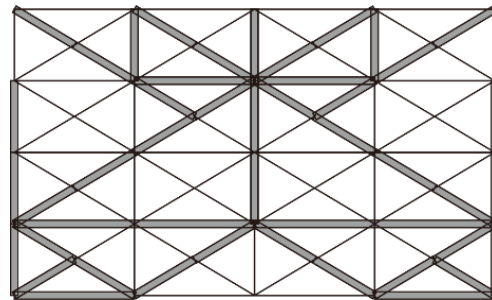
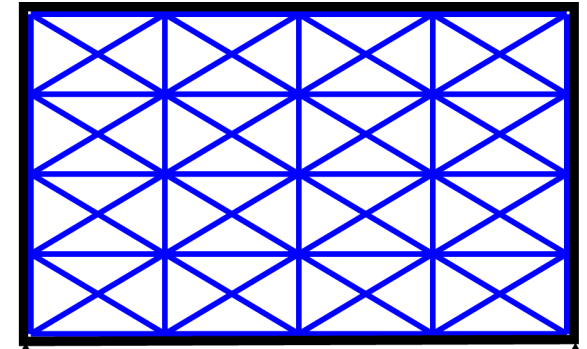
局部座屈が抑制され，応力集中が低減

[Ohsaki and Nakajima 2012]

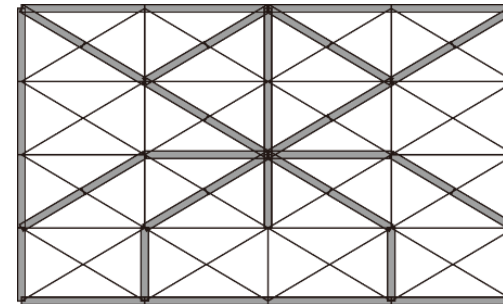
ラチス形式の耐震壁の最適化

18

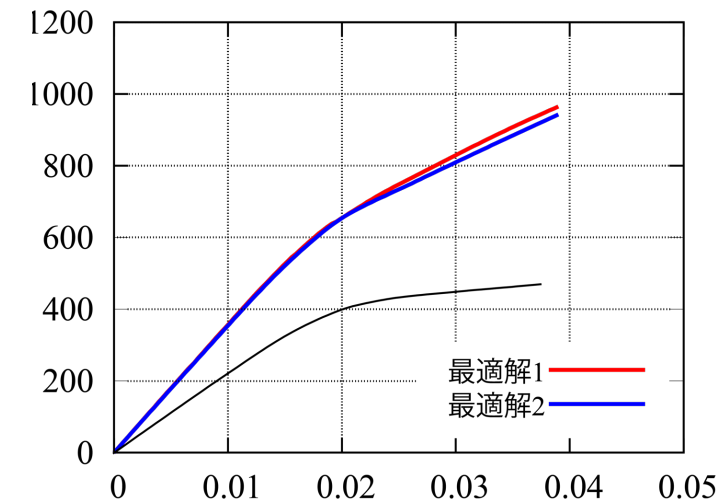
- ラチスと梁柱は接触のみ
⇒ 耐震補強のために溶接が不要
⇒ 簡単に設置できる
- 目的関数：変形角1/100の水平方向反力最大化
- 制約条件：ラチス部材の総体積
- 1つの構面を4x4のグリッドに分割
- 最適化手法：焼きなまし法



最適解1



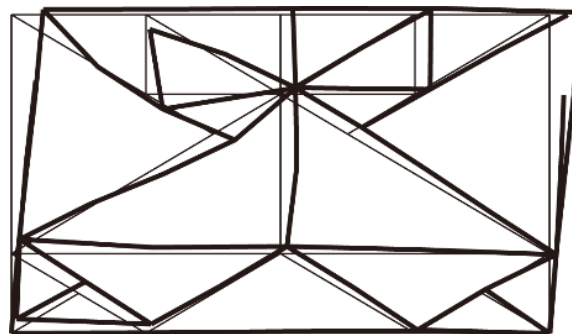
最適解2



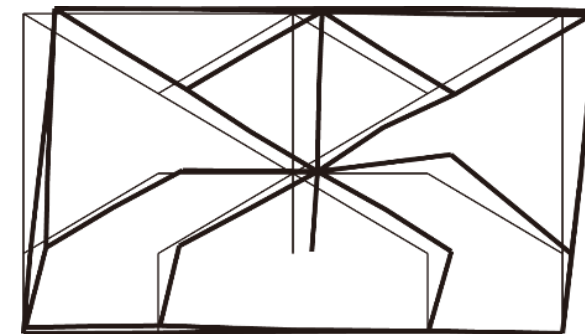
荷重変位関係

ラチス形式の耐震壁の最適化

変形

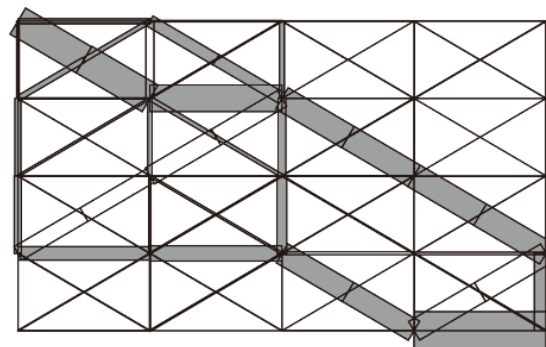


最適解1

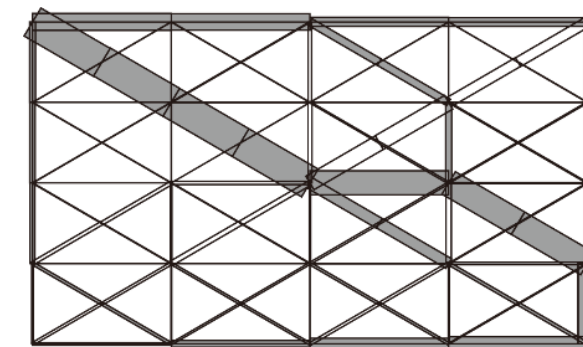


最適解2

軸力



最適解1



最適解2

接触のみで効果的に力を伝達

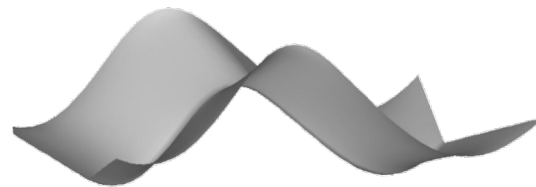
建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

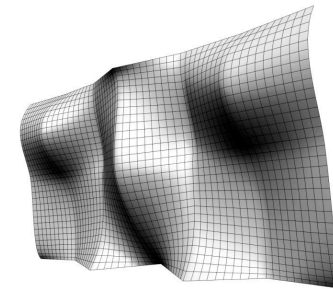
施工性を考慮した最適化

20

- 構造最適化の問題点：最適解は複雑で施工することが困難
- 自由曲面シェル・ラチス構造（屋根構造，ファサード）の設計
⇒ 意匠性，構造性能に加えて施工性（施工の容易性）が重要
- 設計者から要求される曲面形状の複雑化
⇒ 大規模スポーツ施設や博覧会での建設費の高騰
- 複雑な曲面の構造性能を保証し，低コストで部材，接合部および仕上げ材を製作して施工するための設計法の開発が急務
⇒ 最適化手法の利用



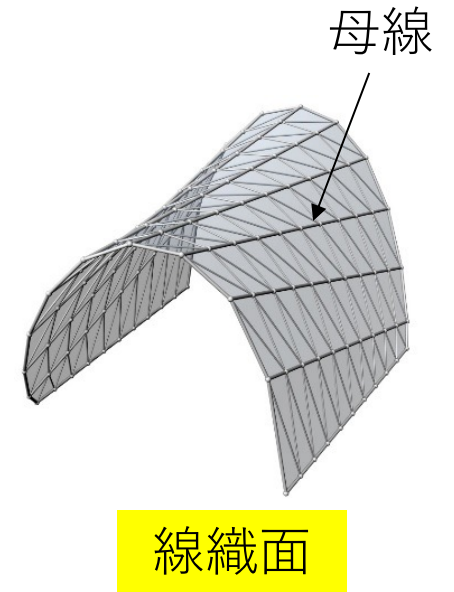
[崔，大崎 2019]



[崔，大崎 2019]

施工性を考慮した最適化

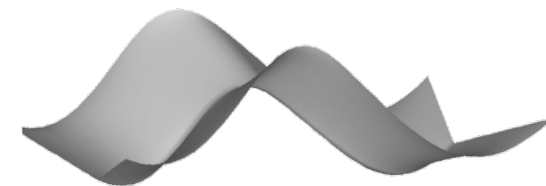
- シェル・空間構造の形態
円筒形や球形などの解析的曲面
(簡単な数式で表現できる)
 - ⇒ 形状モデル, 構造解析, 構造材料および
施工法の発展
 - ⇒ 複雑な形状を有する自由曲面シェル
 - ⇒ RC構造では型枠が必要
 - ⇒ 多くの費用が必要
- 線織面 (1方向に直線の母線を持つ曲面)
可展面 (平面を曲げて形状生成)
 - ⇒ 施工コストの低減
 - ⇒ 曲面形状が限定される



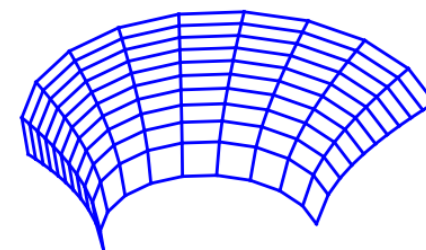
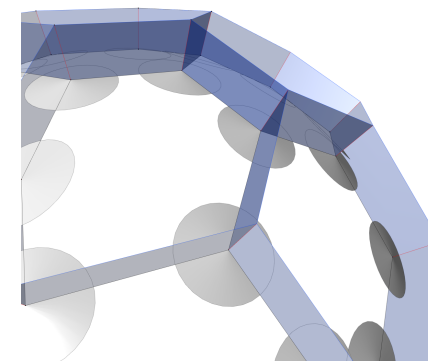
空間構造の施工（容易）性

22

- 連続体シェル
 - 区分的可展面：
可展面を接続して生成できる曲面
- ラチスシェル
 - 部材の形状や断面が均一
(部材と接合部の種類を低減)
 - 部材がねじれない
 - 部材が接合部で適合 (Conicalメッシュ：
部材が各節点を頂点とする円錐上にある)
 - 4辺形の面 (パネル) が平面 (PQメッシュ：
planar quadrilateral mesh)
 - グリッドシェル (2方向格子)：
部材が平面曲線 (折れ線) を形成
 - 平面グリッドを曲げて製作
(bending active gridshell)



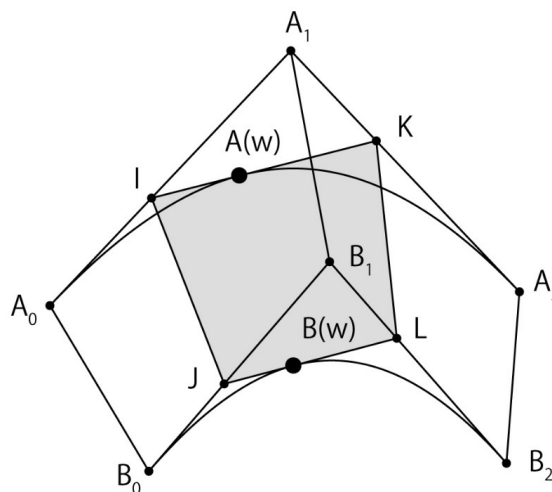
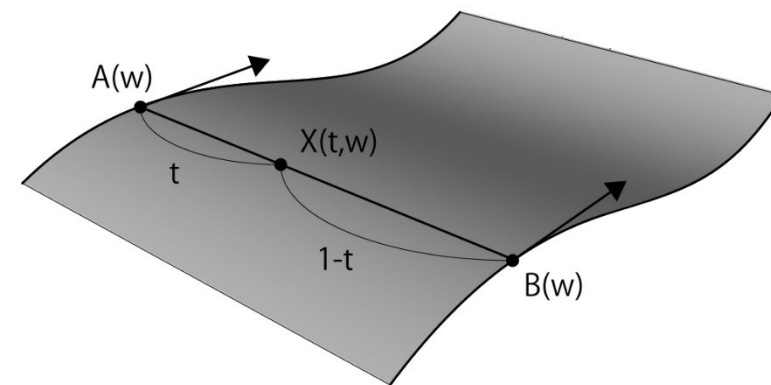
区分的可展面



区分的可展面によるシェルの設計

可展面：

- ・ ガウス曲率が0の曲面
- ・ ガウス曲率 = 2つの主曲率の積
- ・ ガウス曲率が0 $\Rightarrow$ 1つの主曲率が0
- ・ 母線（直線）方向に法線ベクトル（あるいは 接触面）が変化しない



1x2次のベジエ曲面による
可展面の表現

制御点座標による可展条件

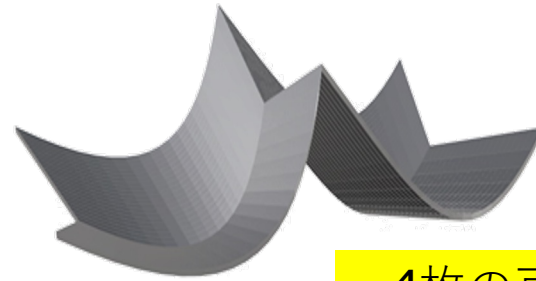
$$\begin{aligned} a_1 \cdot c_0 \times c_1 &= 0 \\ a_2 \cdot c_1 \times c_2 &= 0 \\ a_1 \cdot c_0 \times c_2 + a_2 \cdot c_0 \times c_1 &= 0 \\ a_1 \cdot c_1 \times c_2 + a_2 \cdot c_0 \times c_2 &= 0 \end{aligned}$$

制御点座標による
 $\Rightarrow$ 数値的に評価
 $\Rightarrow$ 最適化問題を解く

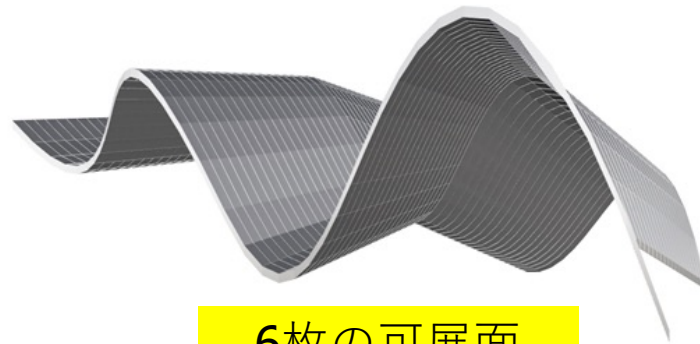
区分的可展面によるシェルの設計

最適化問題

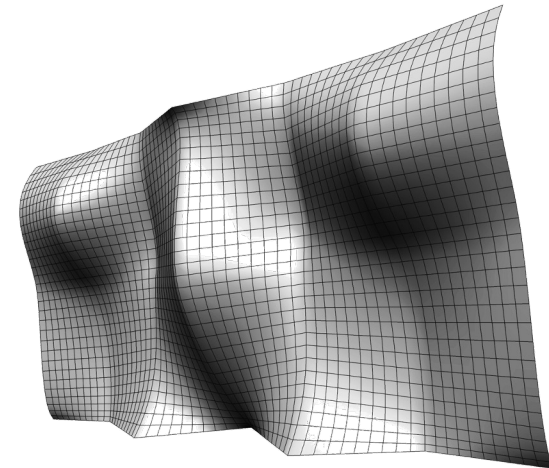
Minimize: ひずみエネルギー
subject to 可展条件, 境界条件



4枚の可展面



6枚の可展面



12枚の可展面

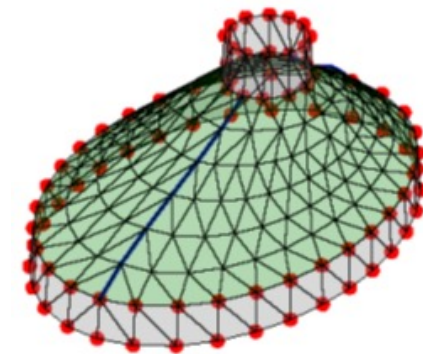
[崔, 大崎 2019]

区分的可展面：
形状の自由度を維持して，施工性の
高い曲面を生成できる

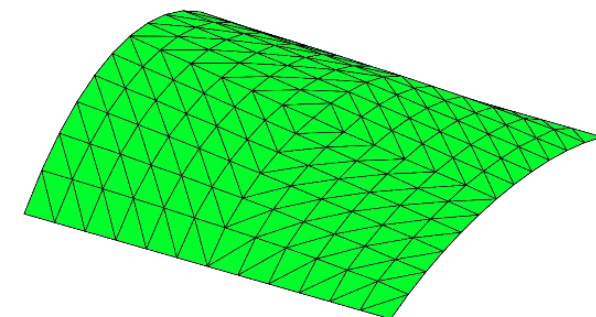
離散微分幾何学の利用

25

- 建築曲面の設計
 - パラメトリック表現（ベジエ曲面，NURBS曲面）
- 連続体シェルの構造解析：
有限要素解析 ⇒ 離散的メッシュが必要
- ラチス構造の施工・製作
パネル，部材，接合部などの離散的要素
⇒ 多面体分割が必要
- デザインから施工までの統一的な離散的モデル化
↓
 - 離散微分幾何学の定式化と手法の利用

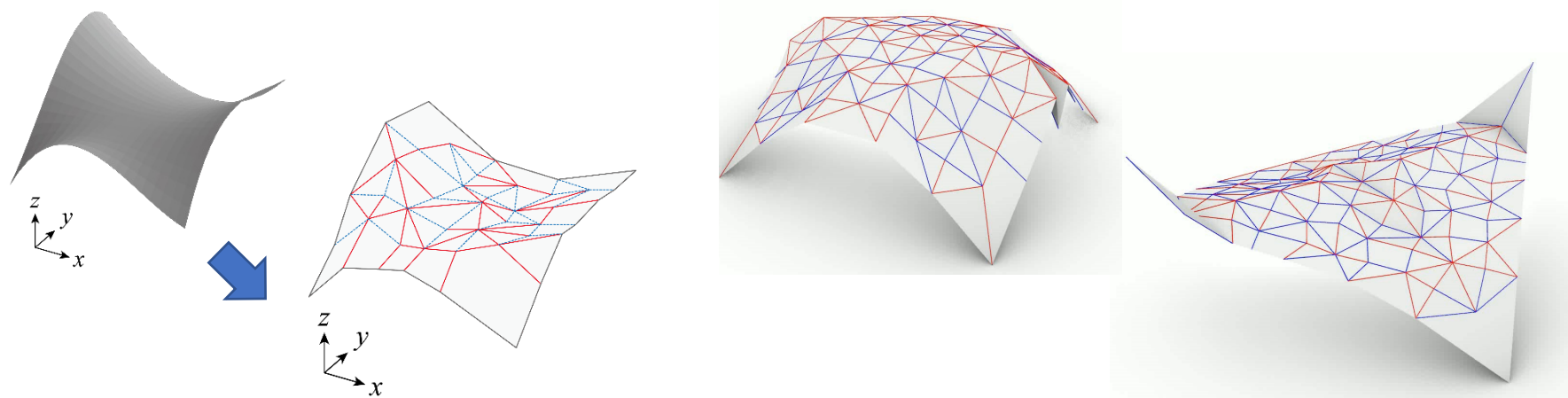


[Hayashi, Jikumaru, Ohsaki, Kagaya and Yokosuka 2021]



剛体折紙による曲面近似

- 離散微分幾何学の適用例
- 剛体折紙：面が変形せず，折線のみで変形する折紙
- 目標曲面を近似する剛体折り可能かつ平面展開可能な多面体形状を生成 ⇒ 施工の容易な離散曲面（多面体）
- 離散ガウス曲率を用いた多目的最適化問題



建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

切り目のある剛体折紙

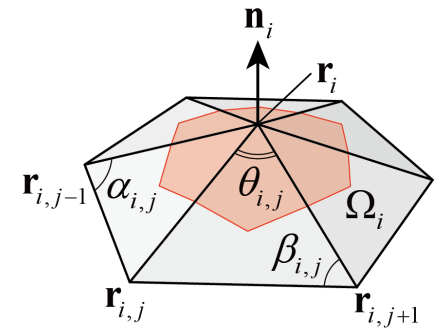
27

離散微分幾何学での
ガウス曲率

$$K = 2\pi - \sum_j \theta_{i,j}$$

可展条件

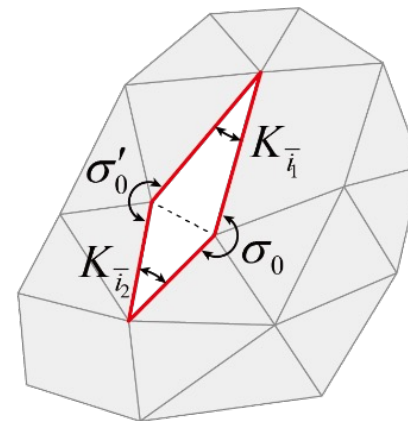
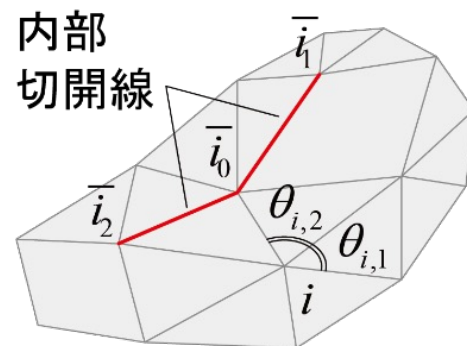
$$\sum_j \theta_{i,j} = 2\pi$$



切り目がないときの可展条件：

ガウス曲率が0

⇒ 頂点まわりの内角の和が 2π (360°)



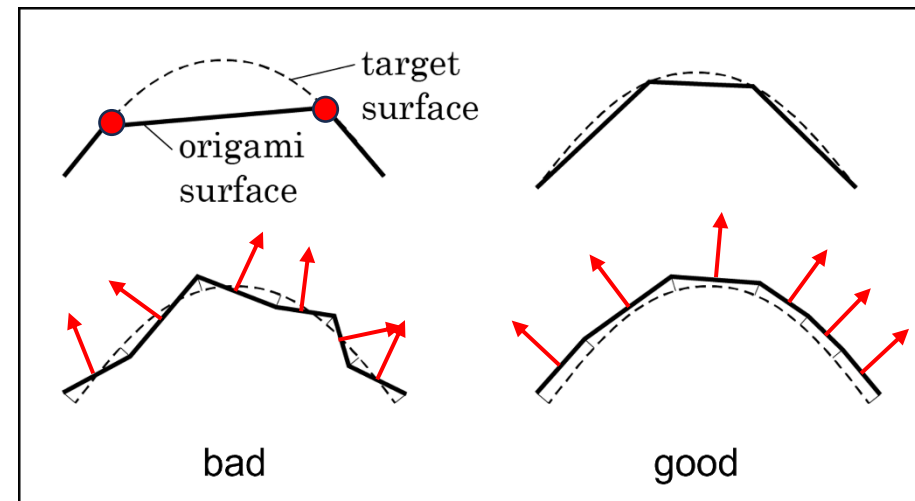
切り目があるときの可展条件

$$\begin{cases} \sum_{v \in V_c^{\text{cut}}} \kappa_v = 2(1-k)\pi \\ l_{c,1} + \sum_{i=1}^{2n_c^{\text{cut}}-1} (-1)^i l_{c,i+1} \cos\left(\sum_{j=1}^i \varphi_{c,j}\right) = 0 \\ \sum_{i=1}^{2n_c^{\text{cut}}-1} (-1)^i l_{c,i+1} \sin\left(\sum_{j=1}^i \varphi_{c,j}\right) = 0 \end{cases}$$

[早川, 丸山, 安達, 大崎 2019]

曲面の近似度（類似性）の指標

- 単純な距離だけでは見た目の類似性を保証できない
- 曲面の「見た目」を考慮した近似誤差関数の定式化



距離

$$G_D = \frac{1}{2} \sum_{v \in V} \zeta_v^2$$

表面積の誤差

$$G_A = |A - \bar{A}|$$

単位法線ベクトルの誤差

$$G_N = \sum_{f \in F} \|\mathbf{v}_f - \bar{\mathbf{v}}_f^{\text{ref}}\|^2$$

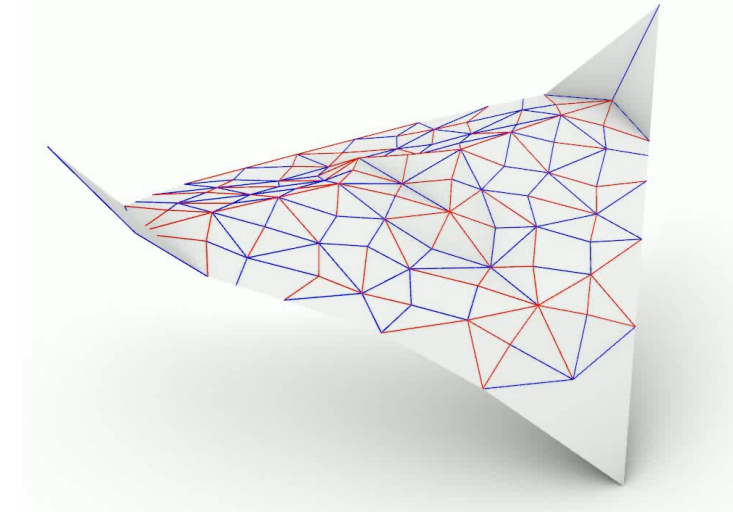
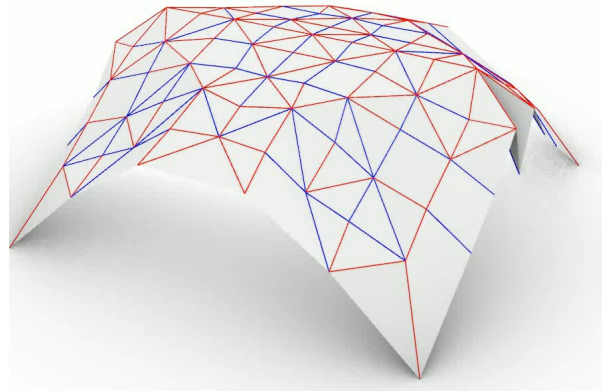
 ζ_v : 頂点と曲面の距離 A : 表面積 $\mathbf{v}_f$: 面の法線ベクトル

開口あるいは切り欠きのある剛体折紙

多目的最適化問題

Minimize: 曲面の近似度の指標: $G_D + w_A G_A + w_N G_N$
subject to 可展条件
幾何学的条件

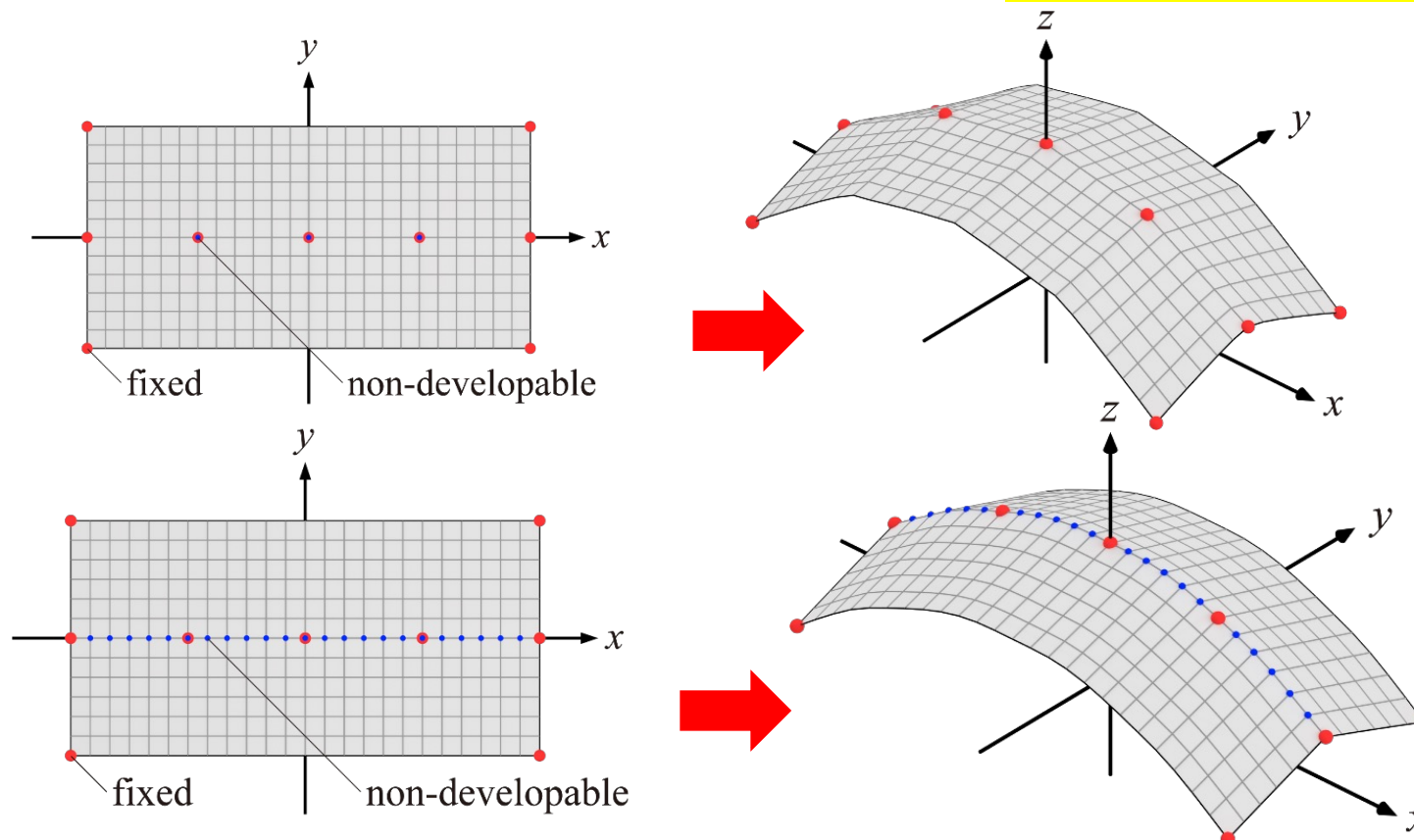
距離

表面積の
誤差単位法線
ベクトルの誤差

多面体近似による可展面の生成

- 離散微分幾何学によるガウス曲率の定義
- 可展条件の誤差の最小化

赤点の位置を指定
赤点と青点では可展条件を
考慮しない



Session 4

機械学習の利用

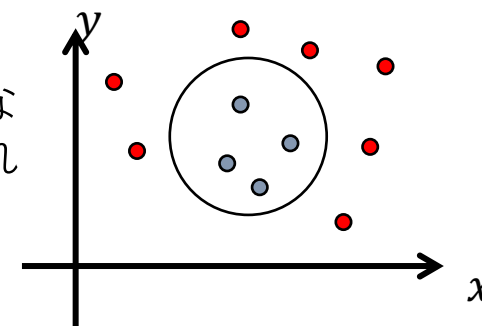
機械学習の概要

- 人工知能の基盤技術
 - データマイニング, 知的情報処理...
- 代表的な方法
 - サポートベクターマシン (SVM), 決定木 (二分木), ニューラルネットワーク, 相関ルール, 連想推論...
- 目的
 - クラス分類, 関数の近似 (予測), 推論, フィッティング (補間) ...
- 対象
 - 画像認識, 音声認識, 翻訳, ゲーム, 解析, シミュレーション, ...
⇒ 設計での利用?

機械学習の分類

教師なし学習

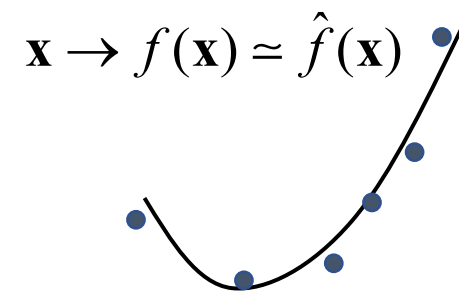
- ラベル付けされていない（クラスに分けられていない）データセットが与えられ、特徴量あるいはそれを変換した量を用いてデータをクラスに分類する。クラスタリングなど。



特徴量の分類

教師あり学習

- ラベル付けされた（クラスあるいは評価値が既知の）データセットが与えられ、それらを用いて学習することにより、ラベル付けされていないデータのクラスを予測する。決定木、サポートベクターマシン、回帰分析、ニューラルネットワークによる関数近似など。



関数の近似

強化学習

- 現在の状態のみに依存するマルコフ決定過程を対象とし、多数の方策と報酬のシナリオを用いて、現在の状態に対して報酬を最大化する方策を学習する。

建築構造最適化の 概要と将来展望

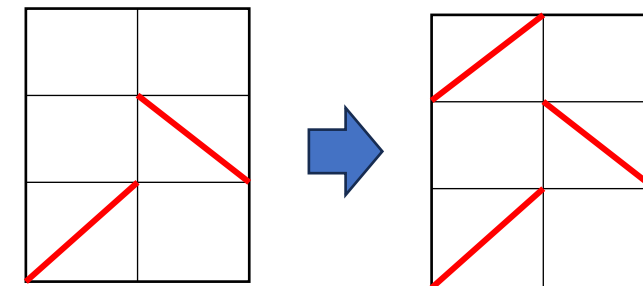
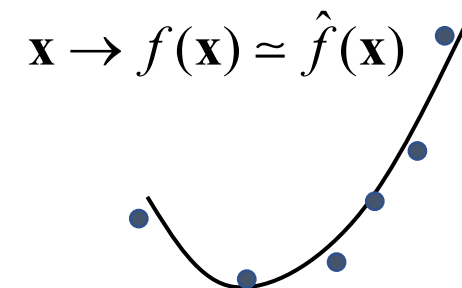
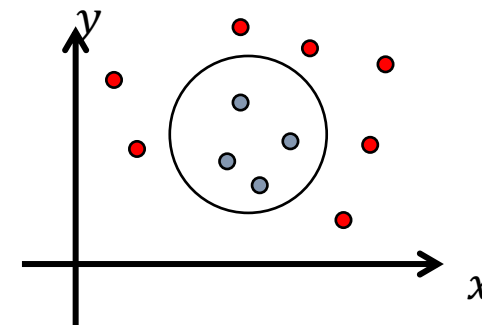
part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

構造最適化への機械学習の利用レベル

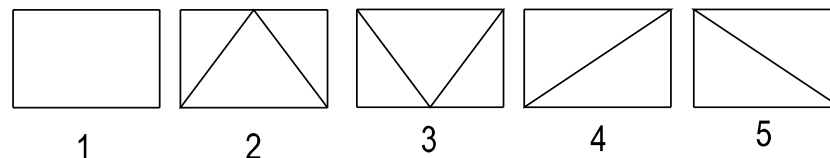
34

- レベル 1：応答量の予測
 - 非線形の動的解析や弾塑性解析などの複雑な解析で求められる応答量を予測
 - 1990年代から用いられている応答曲面法、代理モデル（サロゲートモデル）など
- レベル 2：クラス分類
 - 許容解／非許容解，優良解／非優良解などを分類
 - 解析しなくても良い解を判別して最適化を高速化
- レベル 3：最適化プロセスの学習
 - 豊富な経験を持つ構造設計者が部材断面などを変更する過程や，最適化アルゴリズムによる解の更新過程を学習

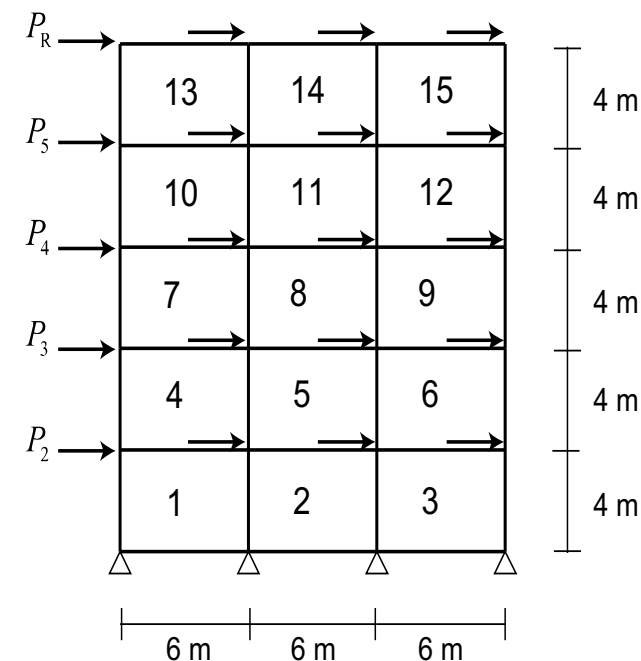


ブレース配置の最適化

- 対象：鉄骨造の平面骨組
- 5通りのブレースを骨組内に設置（ブレースなしも含む）

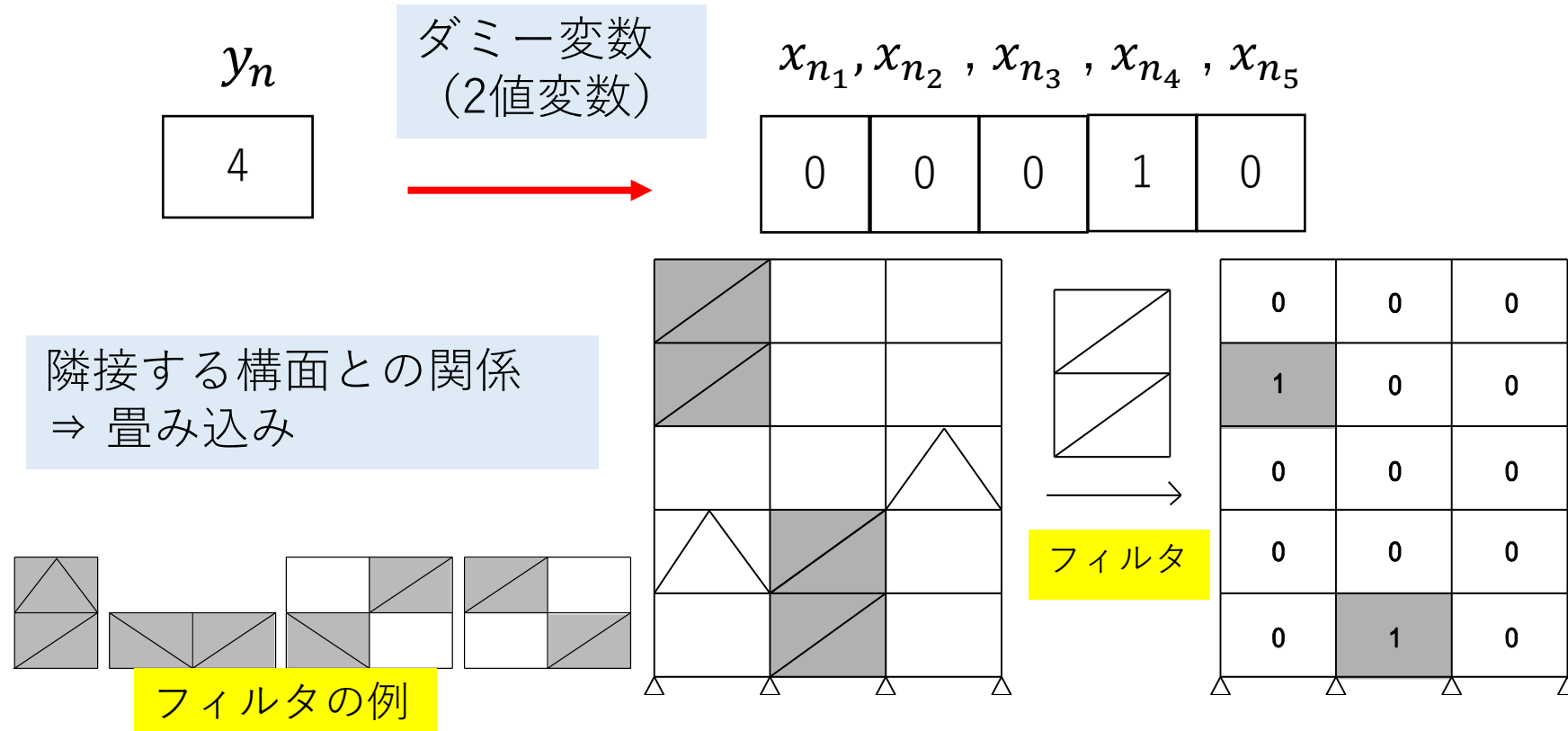


- 耐震補強を想定
⇒ 柱・梁の断面は固定
ブレースの種類・配置のみ設計変数
- 目的関数：
柱・梁の部材応力最小化
- 制約条件：
層間変形角 ≤ 0.005
各層のブレースは2個以下
- アルゴリズム：焼きなまし法（SA）



特徴量のモデル化

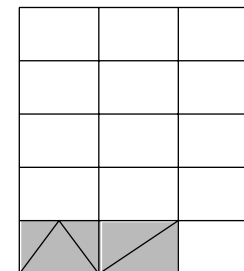
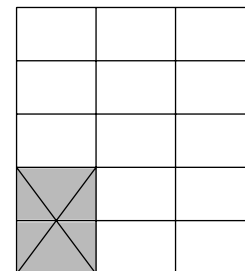
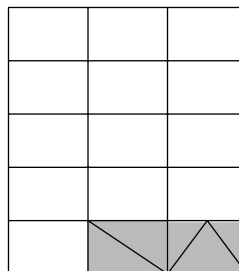
- 種類を表す変数 $y_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
 $\Rightarrow$ 5個のダミー変数 $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5} \in \{0, 1\}$



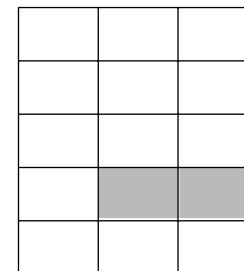
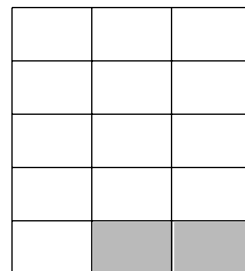
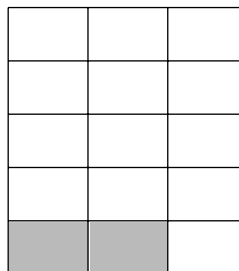
機械学習による2クラス分類

- 10000個の解をランダムに生成
⇒ 最大応力と最大層間変形角を評価
- 上位 10% (1000個) の解：
⇒ 優良解 (近似最適解)
- 下位 10% (1000個) の解：
⇒ 非優良解 (最適とはならない解)
- サポートベクターマシンによる学習

優良解の可能性
が高いフィルタ
変数



非優良解の可能性
が高いフィルタ
変数



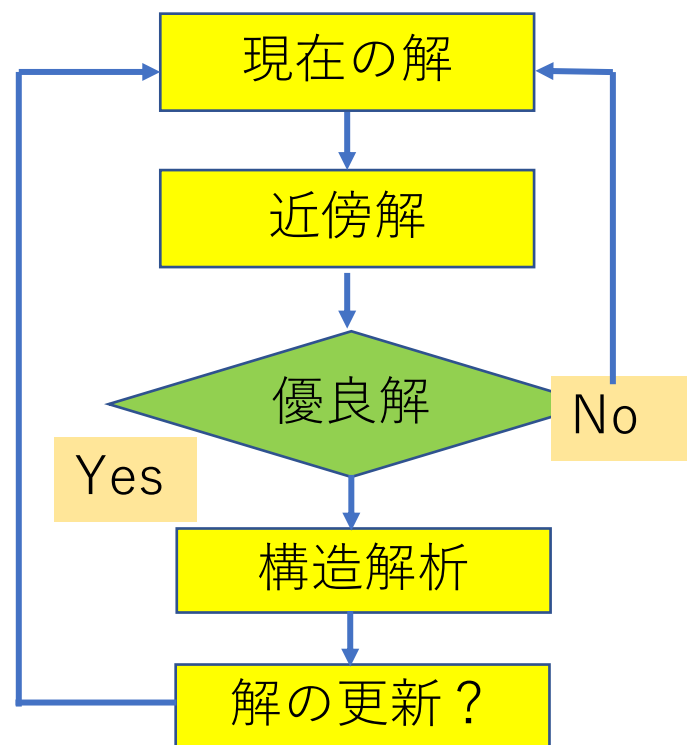
下層にブレース
が配置され、そ
れらが連結



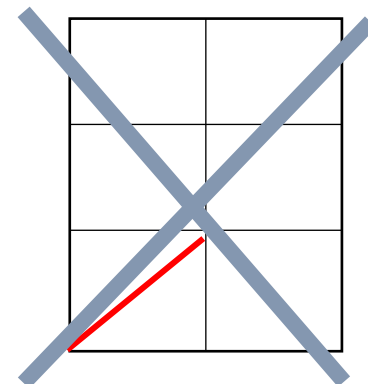
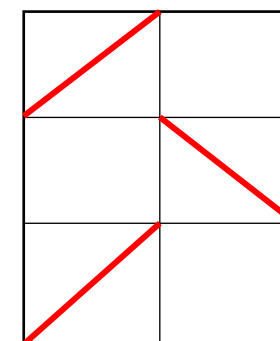
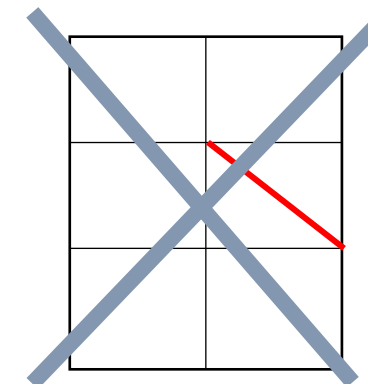
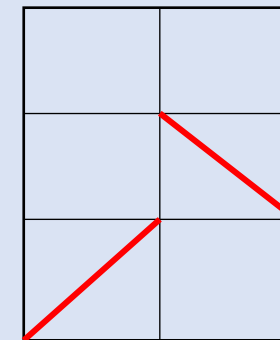
優良解

機械学習による探索過程の改良

焼きなまし法による探索

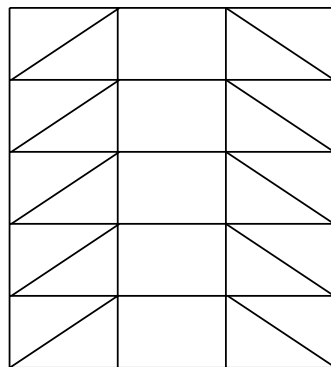


現在の解

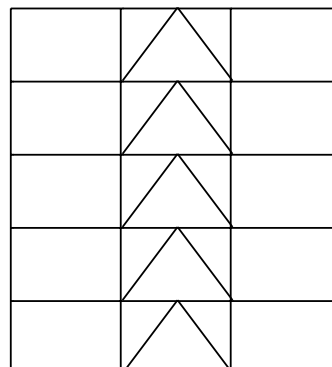


近傍解

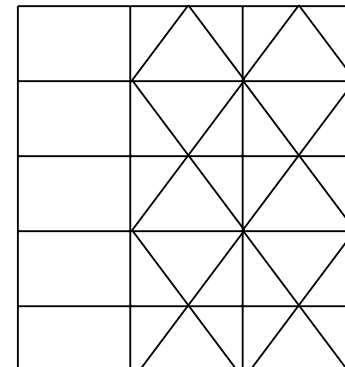
最適解と典型的なパターンとの比較



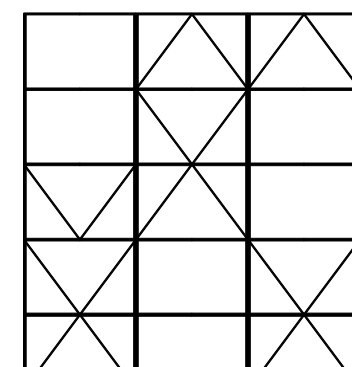
パターンA



パターンB



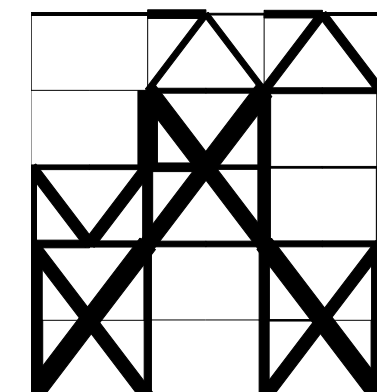
パターンC



最適解

	最大応力	最大層間 変形角	ブレースの 総体積
パターンA	169.32	0.0028	0.27
パターンB	221.82	0.0034	0.18
パターンC	118.57	0.0016	0.37
最適解	84.83	0.0019	0.35

最適解の最大応力が最小



軸力の絶対値

強化学習によるトラスと骨組の最適化

強化学習

マルコフ決定過程に基づく意思決定過程を学習

次のステップの状態は，現在の状態と行動（方策）のみで決まる

$$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \cdots \rightarrow S_t \rightarrow S_{t+1} \rightarrow \cdots \rightarrow S_F$$

$\uparrow a_1$
 $\uparrow a_t$

S_t : ステップ t の状態, a_t : ステップ t での行動

$S_{t+1}(S_t, a_t)$: ステップ $t+1$ での状態

- 将来の総報酬を最大化するように行動を決定する。
- 多数の（状態，行動，報酬）の関係
⇒ ニューラルネットワークで近似

状態 (設計)	行動 (設計変更)	報酬 (設計の評価)
S_1	a_1	R_{11}
S_1	a_2	R_{12}
S_1	a_3	R_{13}
S_1	a_4	R_{14}
...	...	...
S_n	a_1	R_{n1}
S_n	a_2	R_{n2}
S_n	a_3	R_{n3}
S_n	a_4	R_{n4}

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

グラフ埋め込みによる特徴量のモデル化

41

小規模のモデルで学習して大規模モデルを最適化
⇒ 構造のサイズに依存しないモデル

グラフ埋め込みによるモデル化
→ 部材の特徴量を周辺部材との
関係を考慮して決定

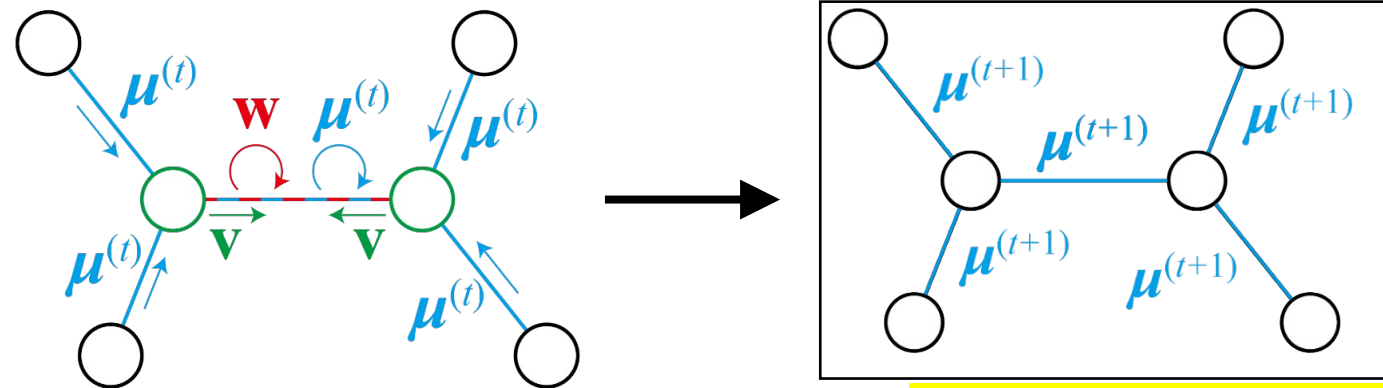
w_{i_m} : 入力部材

$v_{i_m,j}$: 入力節点

μ_{i_m} : 部材の特徴量ベクトル

グラフニューラル
ネットワークによる
学習

$$\mu_{i_m}^{(t+1)} \leftarrow \text{ReLU} \left(\theta_1 w_{i_m} + \theta_2 \sum_{j=1}^2 \text{ReLU}(\theta_3 v_{i_m,j}) + \theta_4 \mu_{i_m}^{(t)} + \theta_5 \sum_{i=1}^2 \text{ReLU} \left(\theta_6 \sum_{k \in \mathcal{N}(v_{i_m,j})} \mu_k^{(t)} \right) \right)$$



数回の繰返し

μ のサイズは構造のサイズに
依存しない

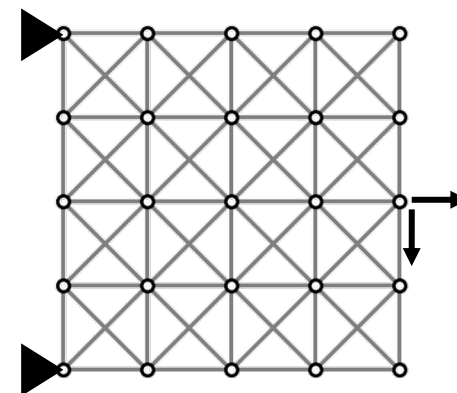
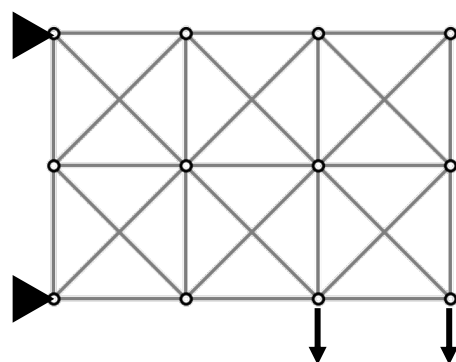
トラスのトポロジー最適化

minimize $V(\mathbf{A})$ subject to $\sigma_i / \bar{\sigma}_i \leq 1$ $d_j / \bar{d}_j \leq 1$

部材体積の最小化

応力制約

変位制約

学習の
過程行動：全ての部材が存在する初期解から
不要な部材を1つずつ削除

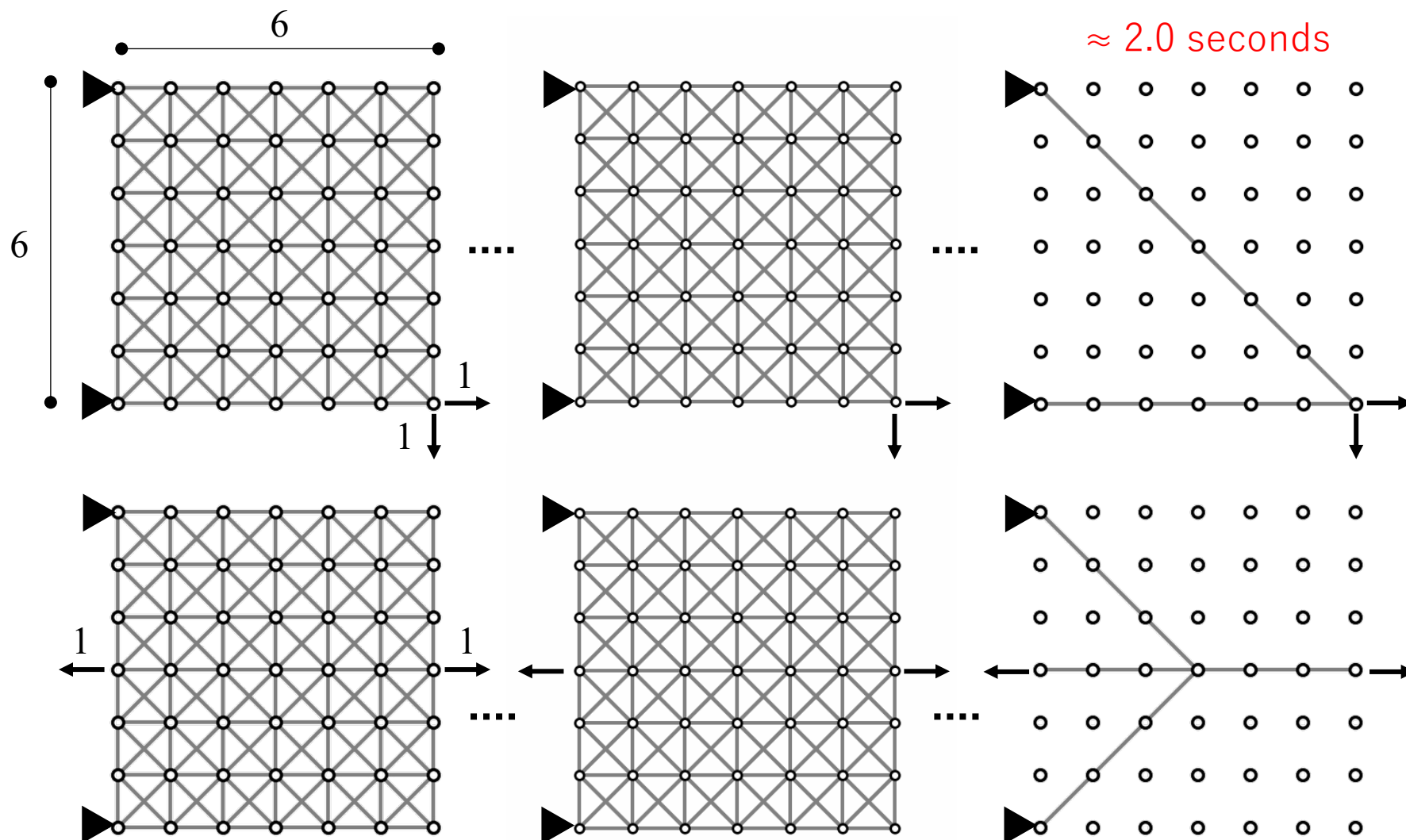
建築構造最適化の
概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

未学習の構造への適用

43



強化学習による骨組の最適化

minimize $V(\mathbf{A})$

subject to $\sigma_i(\mathbf{A}) \leq \bar{\sigma}_i$

$$u_i^c(\mathbf{A})/L_i \leq 1/200$$

$$v_i^b(\mathbf{A})/L_i \leq 1/300$$

$$\beta_j(\mathbf{A}) \geq 1.5$$

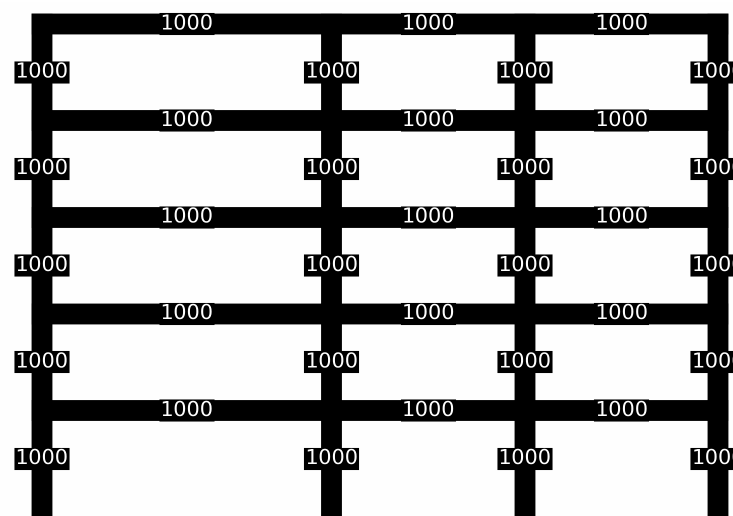
全部材体積

部材応力

柱の層間変位

梁のたわみ

柱梁強度比



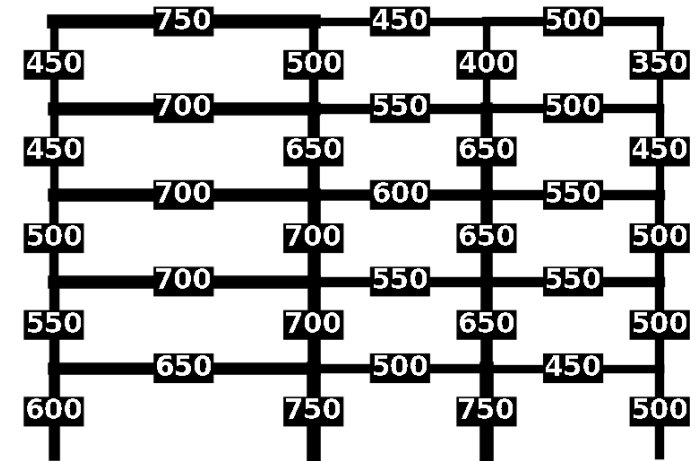
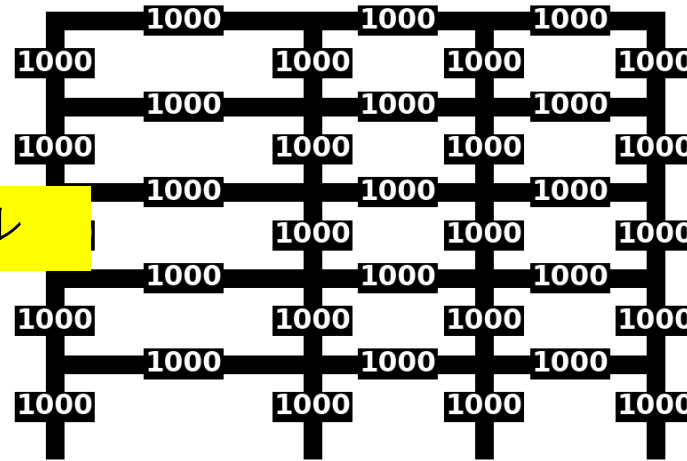
建築構造最適化の
概要と将来展望

part. 2

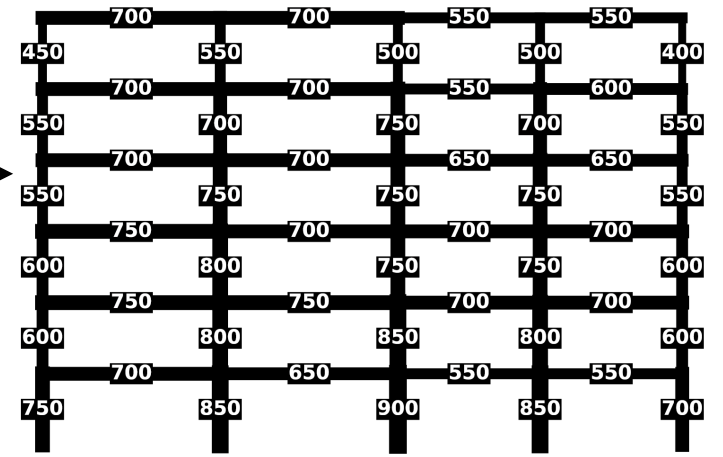
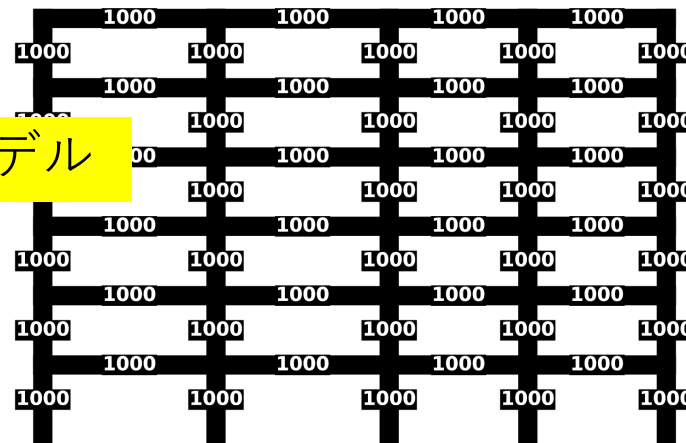
京都大学大学院
大崎 純 教授

未学習の構造への適用

学習モデル



未学習モデル



Session5

今後の展望

建築構造最適化の 概要と将来展望

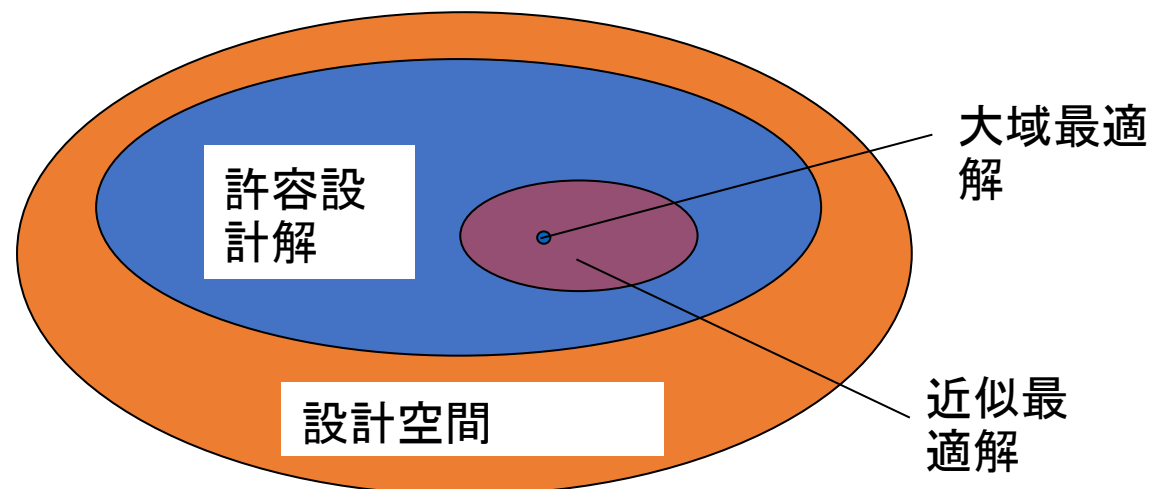
part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

構造最適化を利用することの意義

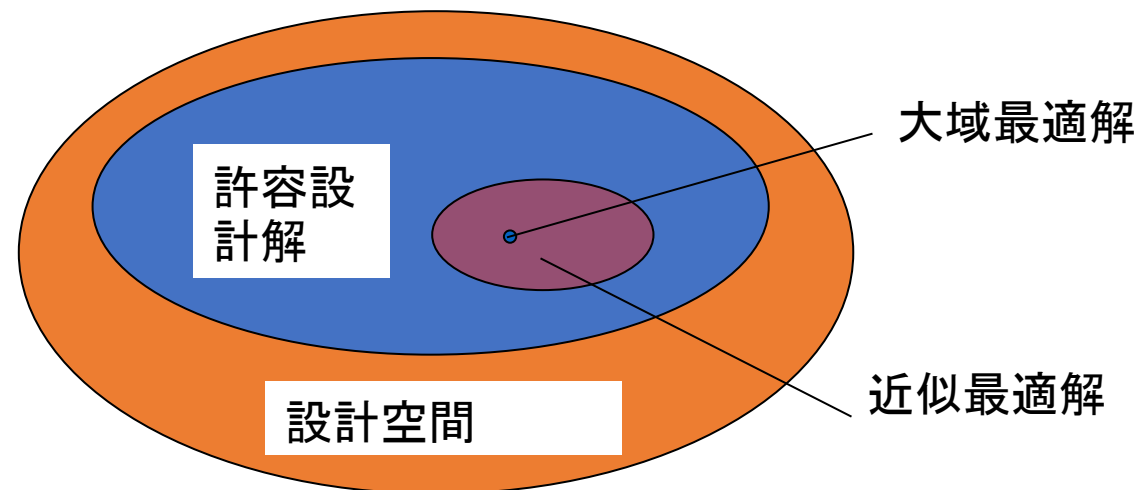
47

1. 設計条件を満たす設計（許容解，実行可能解）を見つける
⇒ 設計条件が厳しい場合に有効。目的関数は何でも良い。
2. 曲面構造の設計：形状の案（候補設計）を生成する
⇒ ひずみエネルギーなどの代表量を最小化。制約は緩くて良い。
3. 設計条件を満たす解のうちで，力学的に優れた解（優良解）を求める
⇒ 変形や応力に関する制約を考慮する
4. 構造材料のコスト（重量）の小さい解を求める
⇒ 構造に関わる設計条件を全て与える。1-3の解の近傍を探索する。
5. 施工や製作に関わる制約やコストを考慮する
⇒ 多くの初期解から発見的手法による
探索を繰り返す。
現状では困難。



構造最適化の位置づけ

- 専門家のための設計支援ツール
 - 非専門家のための自動設計ツールではない
 - 専門家が最適設計問題を定義
⇒ 最適解を求める
 - 得られた最適解が望ましくない場合,
問題のパラメータ（制約条件, 目的関数など）を変更して再度
最適解を得る ⇒ 専門的知識が必要
 - 一般に対話的



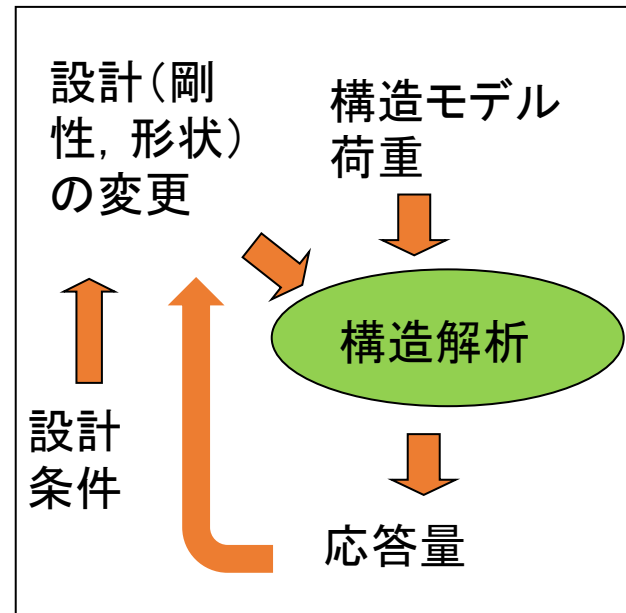
建築構造最適化の概要と将来展望

part. 2

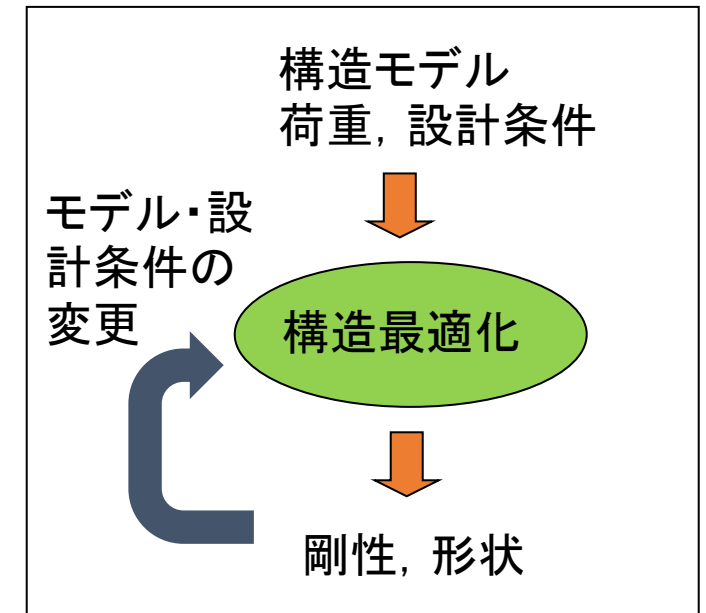
京都大学大学院
大崎 純 教授

解析・設計から最適化へ

従来の設計プロセス



最適化による設計プロセス



建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

建築構造最適化の将来

50

- 骨組構造の最適化
複雑な設計条件を考慮した最適化
施工コスト，ライフサイクルコストなどを考慮した問題
- 構造形態創生
施工性を考慮した幾何学的な設計と最適化
座屈制約，弾塑性応答，地震応答などの現実的な条件
張力構造，展開構造物などの設計・解析
- 部品の最適化と付加製造
大量生産されるため，構造最適化のメリットが大きい
3D プリンターの利用を前提とした設計と最適化
複雑かつ高精度な部品の使用
施工可能な建築構造形態の変化

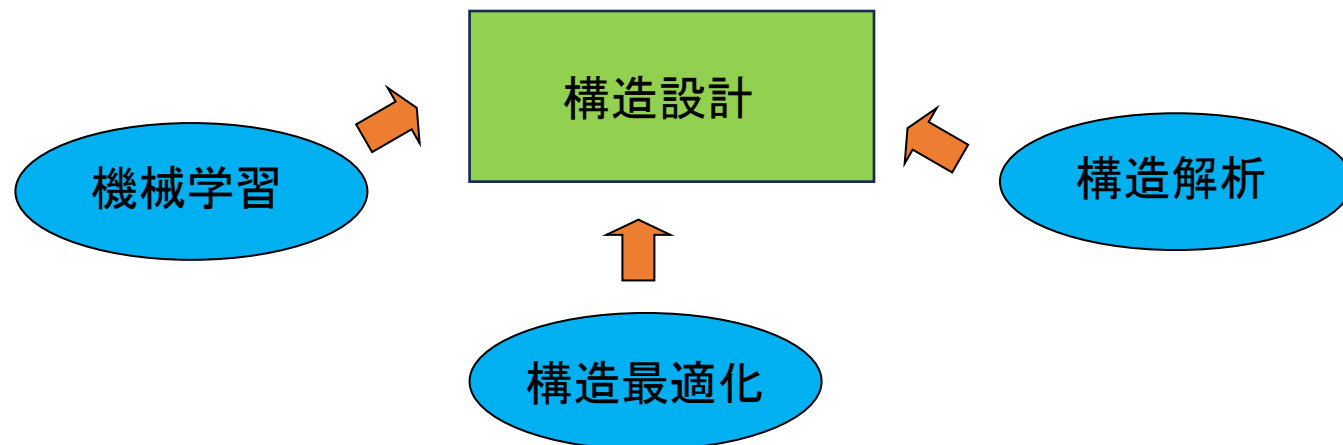
建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

建築構造の最適化の将来

51

- 構造設計者を支援するために重要
- 構造設計のあらゆるフェーズでツールとして利用
- 機械学習による支援
- 生成型AIの利用については未知
 - 汎用型生成AIの専門的な利用は困難
 - 汎用ではなく構造設計に特化した生成型AIであれば可能？



建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

論文（日本語のみ）

1. 大崎純, 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 464, pp. 119–127, 1994.
2. 田川浩, 大崎純, 一様部材断面積を有する平面トラスのトポロジー・節点位置同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 521, pp. 73–80, 1999.
3. 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, Vol. 70, No. 700, pp. 23–28, 2004.
4. 大崎純, 田川浩, 潘 鵬, 弾塑性応答を考慮したH形鋼梁のフランジ形状最適化一載荷実験と有限要素解析, 鋼構造論文集, Vol. 13, No. 52, pp. 65–72, 2006.
5. 萩下敬雄, 大崎純, 発見的手法と非線形計画法の統合による離散構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73(633), pp. 1959–1965, 2008.
6. 大崎純, 局所探索法による鋼構造骨組の多目的最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73(634), pp. 2135–2141, 2008.
7. 藤田慎之輔, 大崎純, ひずみエネルギーとパラメトリック曲面の代数不変量を考慮したシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 639, pp. 841–847, 2009.

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

8. 和多田遼, 大崎純, 典型的部材配置の組合せによるトラスのトポロジー最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 639, pp. 857–863, 2009.
9. 木下拓也, 大崎純, 柔な構造による免震デバイスモデルのトポロジー最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 647, pp. 113–119, 2010.
10. 津田勢太, 大崎純, 菊川翔平, 寒野善博, 部分剛節骨組の安定性評価とメカニズムの解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 686, pp. 791–798, 2013.
11. 野添順規, 大崎純, 渡邊秀和, 有限要素解析と発見的手法によるせん断型鋼板ダンパーの最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 689, pp. 1247–1252, 2013.
12. 宮津裕次, 大崎純, 野添順規, 鋼材パネルダンパーの開口部形状最適化, 構造工学論文集, Vol. 61B, pp. 489–494, 2015.
13. 見上知広, 大崎純, 福島功太郎, 建築骨組の耐震補強格子ブロックの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 715, pp. 1427–1434, 2015.
14. 藤田慎之輔, 大崎純, 關和也, 線織面で構成されるラチスシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 730, pp. 2091–2099, 2016.
15. 崔京蘭, 大崎純, 中村奎吾, 可展面を接続した自由曲面シェル構造の形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 737, pp. 1137–1143, 2017.

建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

16. 木村俊明, 大崎純, 岡崎綾, 鋼構造骨組のブレース配置と柱・梁断面の同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 83, No. 752, pp. 1445–1454, 2018.
17. 崔京蘭, 大崎純, 可展面を組合せた自由曲面の近似設計システムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol. 25, No. 59, pp. 123–128, 2019.
18. 高木次郎, 曹邑生, 矢吹優佳, 大崎純, 座屈拘束ブレースの耐力と配置を設計変数に含めた鋼構造建物の優良設計解, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 86, No. 782, pp. 642–650, 2021.
19. 早川健太郎, 大崎純, 離散的な曲面の幾何学的不変量を用いた膜構造の形状設計, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 86, No. 783, pp. 772–782, 2021.

参考文献

書籍（単著，共著）

1. 加藤直樹，大崎純，谷明勲，建築システム論，造形ライブラリー3，共立出版，2002.
2. 三井和男，大崎純，大森博司，田川浩，本間俊雄，発見的最適化手法による構造のフォームとシステム，コロナ社，2004.
3. M. Ohsaki and K. Ikeda, Stability and Optimization of Structures – Generalized Sensitivity Analysis –, Mechanical Engineering Series, Springer, 2007.
4. I. Elishakoff and M. Ohsaki, Optimization and Anti-Optimization of Structures under Uncertainty, Imperial College Press, 2010.
5. M. Ohsaki, Optimization of Finite Dimensional Structures, CRC Press, 2010.
6. 日本建築学会・応用力学運営委員会・構造最適化と設計小委員会編，構造最適化の最近の発展と設計への応用事例，1 章，構造最適化の歴史と概要，2020.
7. M. Yamakawa and M. Ohsaki, Stochastic Structural Optimization, CRC Press. 2023.

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

56

書籍（分担執筆）

1. 日本建築学会編, 知的システムによる建築・都市の創造, 4.2.2 トラスのトポロジー・節点位置最適化, 技報堂, 1998.
2. 日本建築学会・応用力学運営委員会・構造形態の解析と創生小委員会編, 構造形態の解析と創生, 20 数理計画法, 21 多目的計画法, 22 組合せ最適化, 23 感度解析法, 26 トラスの形状最適化, 丸善, 1998.
3. 日本建築学会・応用力学運営委員会・構造形態解析との応用小委員会編, 構造形態創生の理論と応用, I-6. 擬似焼きなまし法, II-1. パラメトリック曲線・曲面, III-1.5. 擬似焼きなまし法, III-2. パラメトリック曲線・曲面の形状最適化への応用, 丸善, 2001.
4. 山川宏編, 最適設計ハンドブックー基礎・戦略・応用ー, III. 応用編, 2.4 建築構造物の多目的最適設計, 朝倉書店, pp. 279–284, 2003.
5. 日本建築学会・情報システム技術委員会・知的システム小委員会編, やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 4.3 空間構造ー発見的手法による離散断面を有する構造物の最適化, pp. 77–82, 丸善, 2005.
6. 日本建築学会編, 建築最適化への招待, 9. 最適化手法の基礎, pp. 147–163, 丸善, 2005

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

解説

1. 大崎純, 中村恒善, 力学的性能制約条件下でのトラスの最適設計とトポロジー最適化, 空間骨組構造: 形態・性能・生産, 日本建築学会・シェル空間構造運営委員会・空間骨組構造小委員会, pp. 73–87, 1995.
2. 大崎純, トラスの多目的・多段階形状最適化, 新しいスペースフレーム- 形態・性能・設計, 第8回シェル・空間構造セミナー, 日本建築学会・シェル空間構造運営委員会, pp. 3–14, 1999.
3. 大崎純, 加藤直樹, 立体トラスの部材配置最適化, オペレーションズリサーチ, Vol. 46(7), pp. 17–22, 2001.
4. 大崎純, 建築形態の数理, 特集: 建築形態の数理, 建築雑誌, Vol. 118(1507), pp. 30–31, 2003.
5. 大崎純, 建築構造の最適化, 日本建築学会・応用力学運営委員会編, 建築構造力学における最近の発展と展望, pp. 6–15, 2008.
6. 大崎純, 最適化ツールを用いない構造最適化, 日本建築学会・応用力学運営委員会・形態創生と
7. 構造最適化小委員会編, 構造最適化セミナー: 構造最適化は役に立つのか, pp. 11–18, 2009.

建築構造最適化の 概要と将来展望

part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

8. 大崎純, 最適化と冗長性, 建築雑誌, Vol. 125, No. 1609, pp. 34–35, 2010.
9. 大崎純, 建築構造形態の最適化, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 第66回シンポジウム「モノづくりに活かされる知能化・最適化」梗概集, pp. 35–43, 2011.
10. 大崎純, 最適化手法の概念と応用, 第10回新シェル空間構造セミナー資料, 日本建築学会・シェル空間構造運営委員会, pp. 11–24, 2011.
11. 大崎純, 空間構造の最適化と制御, 第2回シェル・空間構造チュートリアルセミナー資料, 基礎編1章: 最適化の基礎, 基礎編2章: 構造最適化の基礎, 基礎編3章: パラメトリック曲面の基礎, 応用編1章: 空間構造の最適化手法の応用例, 日本建築学会・シェル空間構造運営委員会, 2014.
12. 大崎純, 最適化の歴史と発展, 日本建築学会大会(関東), 構造部門(応用力学)パネルディスカッション, 「最適設計」の過去・現在・未来, pp. 3–10, 2015.
13. 大崎純, 最適化ツールの種類と特徴, 建築技術, No. 797, pp. 104–106, 2016.
14. 大崎純, 局所探索に基づく発見的手法, 最適化と機械学習, 第1回知的情報処理技術習得セミナー, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 知的情報処理技術応用小委員会, pp. 1–10, 2016.

建築構造最適化の 概要と将来展望 part. 2

京都大学大学院
大崎 純 教授

参考文献

15. 大崎純, 構造最適化のための機械学習, 第3回デザイン科学数理知能シンポジウム: デザインの実装, 日本建築学会・情報システム技術委員会, デザイン科学数理知能小委員会, pp. 51-58, 2019.
16. 大崎 純, 早川健太郎, 施工性と構造性能を考慮した幾何学的最適化, 日本建築学会大会(近畿), 構造部門(応用力学)パネルディスカッション, 新しい離散的な曲面の幾何学と空間構造: 数学・諸分野と共に拓く, pp. 13-19, 2015.

**ご清聴、
ありがとうございました。**

建築構造最適化の概要と将来展望

京都大学 教授 大崎 純