

遺伝的アルゴリズム系解法による鉄骨造構造物の
構造形態創生と最適設計

Structural Morphogenesis for Steel Frame Structures
by Using Genetic Algorithms and Its Applications to Structural Design

2019 年 3 月

鹿児島大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻
博士(工学)

和田 大典
(WADA Daisuke)

第1章 序論

1. 1 研究背景	1-1
1. 2 既往の研究	1-3
1. 2. 1 構造形態創生に用いる計算技術	1-3
1. 2. 2 実設計を考慮した構造形態創生の研究	1-6
1. 3 本研究の目的と対象範囲	1-7
1. 4 本論の構成	1-8

第2章 設計評価指標

2. 1 耐震設計の考え方と分類	2-1
2. 2 構造形態創生法を活用した最適設計法	2-3
2. 3 設計用外力	2-6
2. 3. 1 長期荷重	2-6
2. 3. 2 地震荷重	2-7
2. 3. 3 風荷重	2-7
2. 3. 4 積雪荷重	2-7
2. 4 部材耐力	2-8
2. 4. 1 鉄骨造の許容応力度設計	2-8
2. 5 線形座屈荷重	2-11
2. 6 ロバスト判別手法	2-13
2. 6. 1 計算手順	2-13
2. 6. 2 微小変化量 Δ_{ij} の算出方法	2-14
2. 6. 3 rank 法	2-14
2. 7 製作性・施工性に関する部材接続部の評価	2-16
2. 7. 1 部材間の回転角の定義	2-17
2. 7. 2 部材間の回転角を考慮した評価式の定量的評価	2-19

第3章 構造最適化手法と最適化問題の定式化

3. 1 最適化問題の定式化	3-1
3. 2 単一目的最適化問題	3-2
3. 3 単一目的最適化における解の定義	3-3
3. 4 多目的最適化問題	3-4
3. 5 多目的最適化における解の定義	3-4
3. 6 構造形態創生における解探索手法の分類	3-6
3. 7 本研究で用いる GA 系解法	3-7
3. 7. 1 SGA	3-8
3. 7. 2 SPEA2	3-10
3. 7. 3 ISGA	3-12

3. 7. 3. 1 クラスタリングの導入.....	3-15
3. 7. 3. 2 設計変数空間上での端切り法.....	3-16

第4章 有限要素法の離散化とパラメトリック曲面による形状表現

4. 1 梁要素の離散化定式化	4-1
4. 2 ベジエスプライン	4-6
4. 3 ベジエ曲線	4-6
4. 4 ベジエ曲面	4-8
4. 4. 1 テンソル積ベジエ曲面	4-8
4. 4. 2 テンソル積ベジエ曲面による部材断面の表現.....	4-9

第5章 遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計 —離散系構造への適用例—

5. 1 構造形態創生概要	5-1
5. 2 SGA を用いた構造形態創生：円筒形状を有する曲面構造の最適設計—TOTO ミュージアムの曲面形態デザイナー—	5-2
5. 2. 1 構造計画概要	5-4
5. 2. 2 最適化の目的と各設計条件の設定	5-6
5. 2. 2. 1 最適化問題の定式化	5-6
5. 2. 2. 2 曲面形状の表現	5-7
5. 2. 2. 3 設計条件を考慮した制約条件の設定	5-8
5. 2. 2. 4 構造形態創生アルゴリズム	5-9
5. 2. 3 構造形態創生	5-10
5. 2. 3. 1 解析モデル	5-10
5. 2. 3. 2 解析結果	5-11
5. 2. 4 詳細設計	5-12
5. 2. 4. 1 形態決定と構造安定性	5-12
5. 2. 4. 2 リングアーチの製作・施工性	5-13
5. 3 SPEA2 を用いた構造形態創生：平面トラスフレームの構造形態創生	5-15
5. 3. 1 最適化の目的と各設計条件の設定	5-16
5. 3. 1. 1 目的関数と設計変数の設定	5-16
5. 3. 1. 2 設計外力の設定	5-16
5. 3. 1. 3 部材耐力の評価	5-16
5. 3. 2 構造形態創生	5-17
5. 3. 2. 1 解析モデル	5-17
5. 3. 2. 2 解析パラメータ	5-18
5. 3. 2. 3 数値結果 1(Model-A)	5-20
5. 3. 2. 4 数値結果 2(Model-B)	5-22
5. 3. 3 解の評価と形態決定	5-24

5. 4 ISGA を用いた構造形態創生：低層集合住宅を想定した構造物のアルゴリズムックデザイン	5-25
5. 4. 1 形状生成ルール	5-25
5. 4. 2 構造形態創生アルゴリズム	5-28
5. 4. 3 構造形態創生 1	5-30
5. 4. 3. 1 設計条件	5-30
5. 4. 3. 2 最適化問題の定式化	5-31
5. 4. 3. 3 数値結果	5-32
5. 4. 3. 4 試設計	5-33
5. 4. 4 構造形態創生 2	5-36
5. 4. 4. 1 機能面を評価する目的関数の設定	5-36
5. 4. 4. 2 設計条件	5-37
5. 4. 4. 3 最適化問題の定式化	5-38
5. 4. 4. 4 数値結果	5-40
5. 4. 4. 5 試設計	5-41
5. 5 結語	5-44

第 6 章 遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計

—空間構造への適用例—

6. 1 構造形態創生概要	6-1
6. 2 基本問題への適用	6-2
6. 2. 1 基礎問題 1：総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨格子シェルの単一目的最適化	6-2
6. 2. 1. 1 解析モデル(Model-A, B)	6-2
6. 2. 1. 2 解析パラメータ	6-4
6. 2. 1. 3 数値結果 1 Model-A 総ひずみエネルギー最小化	6-5
6. 2. 1. 4 数値結果 2 Model-B 総ひずみエネルギー最小化	6-7
6. 2. 2 基礎問題 2：部材間の回転角最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェル構造の単一目的最適化	6-9
6. 2. 2. 1 部材間の回転角の評価グループ	6-9
6. 2. 2. 2 解析パラメータ	6-10
6. 2. 2. 3 数値結果 1 Model-A 部材間の回転角最小化	6-11
6. 2. 2. 4 数値結果 2 Model-B 部材間の回転角最小化	6-20
6. 2. 2. 5 考察	6-29
6. 2. 3 基礎問題 3：部材間の回転角制約条件とする総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェルの単一目的最適化	6-31
6. 2. 3. 1 部材間の回転角に対する制約条件の設定	6-31
6. 2. 3. 2 解析パラメータ	6-31
6. 2. 3. 3 数値結果 1 Model-A の総ひずみエネルギー最小化	6-32

6. 2. 3. 4 数値結果2 Model-B の総ひずみエネルギー最小化	6-39
6. 2. 3. 5 考察	6-46
6. 2. 4 基礎問題4：部材間の回転角と総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェルの多目的最適化	6-47
6. 2. 4. 1 解析モデル(Model-C)	6-47
6. 2. 4. 2 解析パラメータ	6-48
6. 2. 4. 3 数値結果 Model-C 部材間の回転角+総ひずみエネルギー同時最小化....	6-49
6. 2. 4. 4 考察	6-56
6. 2. 5 ロバスト性判定を活用した製作・施工性指標のロバスト性評価	6-57
6. 2. 5. 1 ロバスト性判定手順	6-57
6. 2. 5. 2 数値例題1	6-58
6. 2. 5. 3 数値例題2	6-60
6. 2. 6 模型による曲面形状の定性的確認	6-62
6. 3 任意形状モデルへの適用と最適設計	6-64
6. 3. 1 最適化の目的と各設計条件の設定	6-65
6. 3. 1. 1 目的関数と設計変数の設定	6-65
6. 3. 1. 2 設計外力の設定	6-65
6. 3. 1. 3 解の二次評価	6-66
6. 3. 2 構造形態創生アルゴリズム	6-67
6. 3. 3 最適設計	6-68
6. 3. 3. 1 解析モデル(Model-D)	6-68
6. 3. 3. 2 解析パラメータ	6-69
6. 3. 3. 3 数値結果1 総ひずみエネルギー最小化	6-70
6. 3. 3. 4 解の二次評価(1回目)	6-73
6. 3. 3. 5 最適化問題の再設定	6-77
6. 3. 3. 6 数値結果2 部材間の回転角+総ひずみエネルギー最小化	6-79
6. 3. 3. 7 解の二次評価(2回目)	6-84
6. 3. 3. 8 最終形状の決定	6-88
6. 4 結語	6-90

第7章 結論

参考文献

学位論文に関連する論文・雑誌掲載・賞歴一覧

付録

- A. GA の基本的な計算アルゴリズムと数値特性
- B. 測地線形状との比較

記号一覧

本論文で使用する記号は以下に従う。これと異なる記号または添え字を用いる場合は本文中にて適宜説明を加えることとする。

A	: 部材断面積[mm^2]
A_f	: フランジ断面積[mm^2]
A_i	: i 階の層せん断力分布係数
A_{st}	: 構造形態長手方向を直径とする円 O_s と O_t の重なる部分の面積[m^2]
A_w	: せん断検討用の断面積[mm^2]
\mathbf{A}	: 断面情報ベクトル
\mathbf{A}^L	: 断面情報ベクトルの側面制約の下限值
\mathbf{A}^U	: 断面情報ベクトルの側面制約の上限値
$B_j^u(u)$: バーンスタイン基底関数
C	: 曲げモーメントによる補正係数
C_f	: 風力係数
C_i	: i 階の層せん断力係数
C_0	: ベースシアー係数
D	: 節点変位ベクトル立体方向に関する評価
d	: 個体間距離
\mathbf{d}	: 節点変位ベクトル
E	: ヤング係数[kN/m^2]
Er	: 平均風速の高さ方向の分布を表す係数
e_{y1}, e_{y2}	: y 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値
e_{z1}, e_{z2}	: z 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値
F	: 基準強度[N/mm^2]
$f(\mathbf{x}), f(\mathbf{A}, \mathbf{R})$: 目的関数
$\Delta \mathbf{f}$: 目的関数値の変化量
f_b	: 許容曲げ応力度[N/mm^2]
f_c	: 許容圧縮応力度[N/mm^2]
f_e	: 総ひずみエネルギー[kN/m]
\mathbf{f}_e	: 軸力ベクトル
f_s	: 許容せん断応力度[N/mm^2]
f_t	: 許容引張応力度[N/mm^2]
G	: せん断弾性定数[kN/m^2]
Gf	: ガスト影響係数
h	: 梁せい[mm]

\bar{h}	: 高さ制約値[m]
I	: 重要度係数
I_z, I_y	: 断面二次モーメント[mm ⁴]
i_y	: 弱軸回りの断面二次半径[mm]
K	: 水平剛性[kN/m]
\mathbf{K}	: 全体剛性マトリクス
\mathbf{K}_G	: 幾何剛性マトリクス
\mathbf{K}_L	: 線形剛性マトリクス
\mathbf{K}_T	: 接線剛性マトリクス
\mathbf{K}_u	: 初期変位剛性マトリクス
\mathbf{k}_{eb}	: 曲げ変形に対する要素剛性マトリクス
\mathbf{k}_{et}	: ねじれ変形に対する剛性マトリクス
\mathbf{k}_{eu}	: 軸変形に対する要素剛性マトリクス
L_s	: 構造形態間の距離
l	: 部材長[mm]
l_b	: 圧縮フランジの支店間距離[mm]
${}_L M_{max}$: 長期最大曲げモーメント[kNm]
\mathbf{P}_0	: 基準荷重ベクトル
\mathbf{P}_t	: 第 t 世代での母集団
$G_s \mathbf{P}_t$: グループ G_s に属する母集団と記憶細胞内の個体群
$\tilde{\mathbf{P}}_t$: アーカイブ個体群候補
$\bar{\mathbf{P}}_t$: アーカイブ個体群
$\hat{\mathbf{P}}_t$: 記憶細胞候補
$\hat{\mathbf{P}}_t$: 記憶細胞
${}_a \mathbf{P}_x, {}_a \mathbf{P}_y, {}_a \mathbf{P}_z$: 制御点の x, y, z 軸座標ベクトル
P	: 風圧力[N/m ²]
Q_i	: i 階の設計用層せん断力[kN]
q	: 速度圧[N/m ²]
\mathbf{R}, \mathbf{R}_i	: 節点情報ベクトル
$\Delta \mathbf{R}$: 節点情報ベクトルの移動量
$\mathbf{R}^L, \Delta \mathbf{R}^L$: 節点情報ベクトルの側面制約の下限值
$\mathbf{R}^U, \Delta \mathbf{R}^U$: 節点情報ベクトルの側面制約の上限値
R_t	: 振動特性係数
$\mathbf{r}_k(u)$: 曲線上の節点座標ベクトル
$S_i(\mathbf{R})$: i 要素の要素表面積[m ²]
s	: 算出した目的関数に基づく個体強度
\mathbf{T}_{ij}	: ij 要素の要素座標系への座標変換行列

t_x, t_y, t_z	: 各軸回りの回転角の評価式
u	: 梁の軸方向変位
V	: 部材総体積[m ³]
V_0	: 基準風速[m/s]
W_i	: i 階以上の各解重量の和[kN]
w_a, w_b, w_c	: 重み係数
w_e	: 曲げ変形に関する節点変位ベクトル
$\mathbf{x}(t)$: ベジエ曲線で表現される曲線の任意節点ベクトル
$\Delta \mathbf{x}$: 判別変数の変化量
$\mathbf{x}_{ij}, \mathbf{x}_{jk}$: ij 要素・ jk 要素の x 軸要素座標ベクトル
$\mathbf{y}_{ij}, \mathbf{y}_{jk}$: ij 要素・ jk 要素の y 軸要素座標ベクトル
Z	: 地域係数
Z_y, Z_z	: 断面係数[mm ³]
$\mathbf{z}_{ij}, \mathbf{z}_{jk}$: ij 要素・ jk 要素の z 軸要素座標ベクトル
β	: 形態配置数
$\Delta_{i,j}$: 微小変化量
$\delta(\mathbf{R})$: 節点変位[mm]
δ_{x1}, δ_{x2}	: x 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値
Φ	: 座屈モード
$\Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R})$: 目的関数群
$\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}$: 管理許容値における各軸回りの部材角
$\theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2}$: 限界許容値における各軸回りの部材角
θ_y, θ_z	: 梁の曲げ変形に対する回転角
σ_A	: 許容応力度[N/mm ²]
σ_b	: 設計用曲げ応力度[N/mm ²]
σ_c, σ_t	: 設計用軸応力度[N/mm ²]
σ_e	: 要素軸応力[N/mm ²]
σ_i	: 構造物に荷重が作用したときの i 部材の応力[N/mm ²]
σ^L	: 許容応力の下限值(圧縮応力)[N/mm ²]
σ^U	: 許容応力の上限值(引張応力)[N/mm ²]
Λ	: 限界細長比
λ	: 部材の細長比
λ_0	: 釣り合い曲線における載荷経路パラメータ
μ	: ロバスト判定値
τ_s	: 設計用せん断応力度[N/mm ²]



— 第 1 章 序論 —

研究背景・目的について述べる。既往の研究と本研究の目的を示し、本研究で扱う構造物と最適化問題の対象範囲を示す。

—第1章—

序論

1. 1 研究背景

我々のモノをつくる行為は、求められる機能や環境, 状態に対して試行錯誤によりカタチを決定する一種の最適化である。例えば、機械電子系機械部品は経済性と機能性を基に、一定の強度を保持し重量を極限まで軽量化したカタチを目指す。ネジやボルトはピッチが規格化され、機械作業により大量に生産される。我々の日常にも最適化されたカタチは多く存在する。工作に使われるはさみは誰の手でも握れるよう持ち手の大きさを決め、歯先は力が伝わりやすい鋭利な形状となっている。このように、一般的に我々の周りに存在する生産物は大量生産と万人に使用されることを目的に、機能的なデザイン性が重視され最適化されたカタチである。

これとは対照的に、建築形態は機能的なデザインに加えて意匠的なデザインが相互に関係しあった生産物である。建築物の設計とは、そこに存在する「空間」とそれを内包する「形態」を設計する行為である。そこでは空間の環境や機能性、力学的に実現可能な形態を求めなければならないと同時に、設計者の思想や美的感性, 土地の風土, 時代が反映される。ここに、ネジやボルトなどの機能性のみを追求した機械電子系機械部品のような同じものを多量に造り出すのではない、一品製品である建築形態の違いが認識される。すなわち、建築形態は力学的条件や経済性, 機能的な条件が必ずしも支配的になるのではなく、人の生活等に関わる幅広い条件と建築物の個性や設計者の美的感性が取り込まれ、これらを諸条件として建築形態が決定されるのである。

近年のコンピュータ技術や施工技術, 高強度材料発達は、これまで実現不可能であった建築形態の実現を可能とし、時代の変化と共に建築形態に求められる条件は多様化しつつある。3DモデリングソフトやBIM(building information modeling)ツールに代表されるデジタルデザイン技術の利用はデジタル空間上での設計行為を可能とし、建築設計の新たな可能性を見出している。ここに、構造形態創生による建築形態の決定が設計手法の一つとして注目されている。構造形態創生とはデジタルデザイン技術のひとつであり、力学的規則に基づきコンピュータプログラミングにより種々の条件を満足した建築形態を創生する最適化プロセスである。つまり、目的に応じた種々の目標を考慮する構造形態創生作業は多様な要求に答える力学的に優れた建築形態を生み出す可能性がある。

一方、構造形態創生で得られた解をどのように評価し、設計へ用いる建築形態として決定すればよいかについては、実設計によるところが大きい。また、設計プロセスのどの段階で構造形態創生法を活用するかにより、目的とする解や構造形態創生法に求められる役割も変化することが考えられ、適用する建物に応じた新たな目的関数の提案や活用方法を体系化することが重要である。さらに、構造形態創生はこれまでにない自由な建築形態が得られる反面、製作・施工難易度の高い構造形態となることが多く、実現可能な解形態を得ることが実設計においての作業効率化を図る設計支援ツールとしての構造形態創生法の重要な役割となる。そこで、本研究は実設計の設計プロセスを想定し、構造形態創生法を活用した最適設計法を提案する。さらに、構造形態の製作・施工性を評価する新たな目的関数の提案を含めた最適設計を実践し、実設計の設計支援ツールとしての提案手法の有効性を示す。

本論はまず、建築設計における耐震性能の分類と本研究で対象とする構造形式に求められる耐震性能目標とそれらの評価指標を整理する。次に、構造形態創生法を用いた形態決定までのプロセスをまとめた最適設計法を提案する。さらに、最適設計の中で用いる構造形態の製作・施工性を考慮した評価指標を提案する。数値解析例では鉄骨造を対象に単純な平面トラス架構からアーチ架構等の離散系構造から空間構造へと展開し、最適設計例を通して構造形態創生法を活用した最適設計の可能性を示す。

1. 2 既往の研究

1. 2. 1 構造形態創生に用いる計算技術

建築物へ構造形態創生法を適用させる場合、何らかの解を探索する計算手法(最適化アルゴリズム)が必要となる。構造形態創生に対する最適化アルゴリズムにはすべての問題に対応した万能な計算技術はなく、問題に応じたあるいは得られる解の評価の捉え方により、従来ある計算法を選択するもしくは新たにアルゴリズムの開発が必要である。ここでは、目的関数が設計変数に関する一次式で表すことができない問題を扱うので、目的関数の勾配情報を利用する方法と利用しない方法で考えることにする。勾配情報を直接利用する方法は数理計画法の勾配法やニュートン法等がある。勾配を利用しない方法に発見的手法がある。その中間に位置する勾配を間接的に利用した解法に単純繰返し計算法がある。

ここでは構造形態創生においてよく用いられる単一目的最適化に対する各解法を図 1.1 のようにまとめる。近年、ランダム探索を行う発見的手法による解法が最適解を得るための強力な解法として研究されている。中でも、遺伝的アルゴリズム(genetic algorithm : GA)による解法が、多様な条件設定が必要である建築物の最適化解法として注目されている。この GA を基幹とする代表的な GA 系解法として免疫アルゴリズム(immune algorithm : IA)^[1,2,1.6]がある。IA は目的関数が一つである単一目的最適化問題(single objective optimization problem : SOP)に対する強力な手段である。ただし、IA は GA と比べると複雑なアルゴリズムを有し、さらに、種々のパラメータ設定が必要である。また、単一目的最適化問題に対する解法として開発されているため、目的関数を複数設定した多目的最適化問題(multi objective optimization problem : MOP)に適用するには IA に新たなアルゴリズムを導入する必要がある。

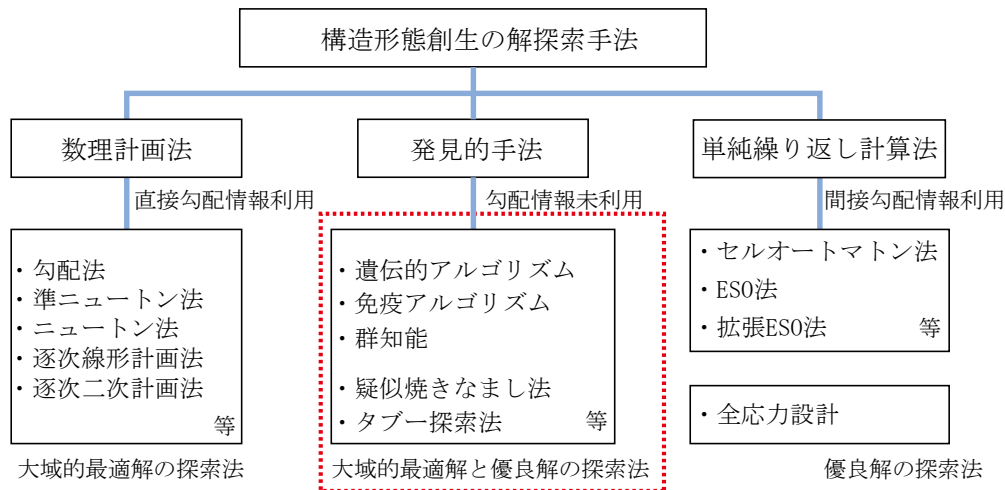


図1.1 構造形態創生における単一目的最適化の解探索手法

複雑な問題に対しては近似的ではあるが、焼きなまし法(simulated annealing : SA)や GA あるいは群知能(swarm intelligence : SI)に分類される粒子群最適化(particle swarm optimization : PSO)^[1.3], 蟻コロニー最適化(ant colony optimization : ACO)^[1.4], 人口蜂コロニー(artificial bee colony : ABC)^[1.5]等がよく利用されている。ただし、これらの解法により得られる数値解は大域的最適解であるという保証がないので注意を要する。他にも種々の提案がある。単純繰返し計算法は、結果的に大域的最適解の追跡を目指したものではなく、現状から一段良い状態を順次追跡する手順であり優良解の探索法に属する。優良解の内、大域的最適解や局所最適解を同時に探索する解法に、IA があり、構造形態創生の適用例もある^[1.2]。最近、ホタルアルゴリズム(firefly algorithm : FA)という直接の目的関数値と個体間の距離を導入した新たな目的関数の利用により、大域的最適解と局所最適解の同時探索可能な SI 系の解法が開発された^[1.7]。また、オリジナルな FA に計算パラメータの無次元化とクラスタリング操作導入および局所探索を併用することで、確実に大域的最適解と局所最適解が追跡可能となった^[1.8]。これに対してセル・オートマトン法(cellular automaton : CA)や ESO(evolutionary structural optimization)法は、間接的に勾配を利用する単純繰返し計算法に分類でき、問題に応じた計算手順を採る解法もある。

多目的最適化問題は、各目的関数を最小化(最大化)することで解の最適化を図る。一般に多目的最適化問題で扱う各目的関数は相反関係(トレードオフ)にあり、複数の最適解(パレート最適解)が存在する。従来の多目的最適化問題に対し用いられてきた解法は、各目的関数に重みづけを施し、重みを変化させて解を探索する重み係数法や、一つの目的関数以外を制約条件として設定して単一目的最適化を解く制約法、目的関数に優先順位を設定して解探索を行う辞書式配列法などがある。ただし、これらの解法はいずれも一度に試行で一つのパレート最適解しか得ることができない。

GAを用いた解法は多点探索であることから一度の試行で複数の解を捉える事が可能である。ここで、多目的最適化問題に対するGA系解法は非パレート的アプローチとパレート的アプローチの二つに分類される。非パレート的アプローチは目的関数空間における解の優越関係を用いずに選択計算を行うGA系解法であり、代表的な解法としてベクトル評価を用いた解法^[1.9]や、重みベクトルによる解法^[1.10]が上げられる。ただし、非パレート的アプローチは得られる解が局所的であり、目的関数空間全体で解が捉えられない可能性を有する。これに対し、パレート的アプローチは目的関数空間上の解の優越関係に基づいて選択計算を行うGA系解法である。その操作内容は解の優劣に基づいたランク付けを行い、評価の高い解群のソートを繰り返していく方法である。また、解の多様性に関係するニッチング操作を導入し、目的関数空間の広い範囲で解探索が行える。パレート的アプローチGAの考え方をを用いた多目的最適化では、種々提案されている中でSPEA2(strength pareto evolutionary algorithm 2)^[1.11]とNSGA-II(ellitist non-dominated sorting GA)^[1.12]がよく利用されている。特に、SPEA2は多目的最適化のエリート戦略的アプローチである非劣解集合(アーカイブ個体群)の保存と端切り法と呼ばれるニッチ操作により、目的関数空間上で解の多様性を保持した解を探索する優れた解法である。なお、これらの既往解法のほとんどは目的関数空間上の解の多様性に重点を置いた解法である。

近年では目的関数空間と設計変数空間上での解の多様性を同時に維持する解法が注目されている。GA系解法ISGA(GA with immune system)^[1.13]は目的関数空間と設計変数空間上の多様性を同時に満足した解を探索する解法の一つである。ISGAは存在可能な許容解(feasible)の中でも、大域的最適解(パレート最適解)やその近傍に存在する比較的評価の高い解である優良解(decent solution)が探索可能である。なお、設計変数空間と目的関数空間上での多様性を同時に維持させる解法にはISGAの他に文献[1.14]-[1.19]があり、共に多点探索法に分類される。文献[1.14]は多目的最適化のGA系解法に対し、dual-Archive scheme(DAスキーム)の提案により両空間上で解の多様性を維持したパレート最適解を得ている。文献[1.15]はGA系解法とニューラルネットワーク技術を応用することで、パレート最適解の両空間での多様性を同時に考慮している。ただし、これらの解法はパレート最適解の解の多様性しか想定されていない。文献[1.16]-[1.19]はSIによる解法である。文献[1.16, 17]はPSOの解法である。文献[1.16]は単一目的最適化問題に対し、最適解だけでなくロバスト性の高い局所的に優れた解の探索を想定している。ただし、同じ目的関数値に対する複数の設計変数空間上での解の探索はアルゴリズム上考えられてない。文献[1.17]は多目的最適化問題において、設計変数空間上で劣解と非劣解の距離を調整することにより両空間上で解の多様性維持を図っている。しかもパレート最適解のみでなく、比較的評価の高い解の探索を行っている。ただし、目的関数空間の端点における解探索には不十分な点がある。文献[1.18]は人口蜂コロニーアルゴリズム(artificial bee colony : ABC)解法を提案し、単一目的最適化問題の設計変数空間上で、最適解の多様性が捉えられることを示している。

1. 2. 2 実設計を考慮した構造形態創生の研究

構造形態創生は最適化手法の発達と計算技術の進歩により大規模な建築形態の解析が可能となり、目的関数や制約条件を満足させる様々な形態が獲得可能となった。その反面、得られた解形態は必ずしも実現可能な形態でない場合も多く、あるいは膨大なコストや最新の施工技術を駆使することで実現できる製作・施工難易度の高い建築形態となる場合が多い。構造形態創生法を実設計へ適用させた代表的な事例としては佐々木らの手掛けた一連の鉄筋コンクリートシェル建築群が有名である^{[1.20]-[1.23]}。これらの建築群はひずみエネルギーの勾配情報を利用した感度解析を適用した構造形態創生であり、剛性最大化を目的に総ひずみエネルギーの感度解析を活用し、設計者のイメージする初期形状に対して曲面形状および開口形状の微小な修正を加えながら構造的にも合理的な自由曲面形態を創生している。得られた形態は3次元曲面構造であり、その施工においては3次元モデルを駆使して型枠の製作形状を一枚一枚管理し、配筋加工まで一元管理することでその形態を実現させている。ほうとう不動^[1.24]は山梨県に計画された郷土料理ほうとうの飲食店施設である。その形態は富士山から吹き下りる雲をコンセプトに雲形の自由曲面デザインを有している。曲面形状の決定においては感度解析手法を駆使し、屋根の凹凸面に水が滞留しないことを制約条件に加えることで屋根架構とし手の機能性を最適化問題に取り込んでいる。

大森が手掛けた芥川プロジェクトは壁面構造体の構造最適化を活用した連続体構造の構造形態創生例である^[1.25]。この建物はオフィスビルのファサードデザインにおいて連続体構造の位相最適化を活用し、応力の作用しない部分を取り除いていくことで開口部が現れた有機的なファサードデザインを生み出している。最適化手法には拡張ESO法^[1.26,27]を採用し、意匠上必要となる開口部の形状を制約条件としてデザイナーと開口範囲をコントロールしながら最終形状を決定するプロセスを踏んでいる。構造解析においては各面のファサードを二次元の連続体要素として扱うことで計算コストの削減と反復計算におけるハンドリング性の改善を図っている。ここでもファサード開口は自由曲線で切り取られた形状を有しており、施工難易度の高い建物であることは言うまでもない。また、構造形態創生法の活用も複雑形態を有する固有の建物に限定的な手法となっている。

文京区体育館は鉄骨格子シェルの形態決定に構造形態創生法を適用した数少ない事例である^[1.28,29]。その他、鉄骨造の構造形態創生法を活用した例は文献[1.30]等があげられるが鉄筋コンクリート造への適用事例と比較すると少ない。また、最近のBIMツールの発達により、形状生成アルゴリズムに一定のルールを定義することで、形態生成ルールを単純化させ、建物の製作性・施工性を改善させた事例もある。文献[1.31,32]は建物全体の形態生成ルールとして小部材の集合体で構造体全体を構成するMRG(multi reciprocal grid)構造に最適化を組み合わせた事例である。

この他、実設計への構造形態創生法の適用を考慮したいくつかの研究がなされている。文献[1.33]は曲面構造の生成ルールに織色面の考え方を導入した構造形態創生を示し、直線補間にて曲面構造物を構造最適化により得られることを示している。文献[1.34]は曲面構造物において代数不変量

を考慮した形状最適化問題を定式化し、施工性改善を目的に単曲率や可展面で曲面全体が構成された構造体を、構造最適化を利用して求めている。接合部の等角度化や、部材長一様化を制約条件とする研究もいくつかなされている^[1,35,36]。中でも、文献[1.35]はロボット工学に代表されるマニピュレータを組み合わせたフレームで格子シェルを構成することを提案し接合部と部材長の同時一様化させた解形態の探索を示している。

以上より、実設計への導入を考慮した構造形態創生技術はいくつか提案されており、実際に鉄筋コンクリートシェル構造においては実例もある。ただし、これらの研究・設計例は構造形態創生の使用を固有の建物に限定した方法であり、一般構造物に適用可能な設計者の発想支援ツールとしての在り方について言及されていないのが現状である。

1. 3 本研究の目的と対象範囲

構造形態創生法を発想支援ツールとして実設計に広く応用していくためには、構造形態創生における幅広い知識と、得られた解が有する構造体としての情報を的確に把握することが重要である。また、構造形態創生法にどのような役割を与えて運用していくかも重要である。そのためには、実設計における構造形態創生法の活用方法を整理し、体系化させることが重要である。本研究の目的は実設計への構造形態創生法の活用において、問題毎に即した目的関数の設定や新たな評価指標を提案し、実設計における最適設計法を確立させることである。

本研究で扱う対象構造は鉄骨造(ラーメン架構, 格子シェル架構, トラス架構)とする。最適化手法は発見的手法の一つである遺伝的アルゴリズム系解法を用い、単一・多目的最適化問題を扱う。構造最適化問題では部材断面と形状を設計変数とする最適化問題を対象とする。その際に、最適化問題の定式化から解の二次評価, 形態決定に至るまでの最適設計法を提案し試設計例や実物件へ適用した内容を示す。また、建築形態の機能性を定量化した評価指標や鉄骨構造特有の製作・施工性に関する評価指標を合わせて提案し、評価指標の有効性と本評価指標が種々の構造形態創生法を活用した実設計への応用へつながる可能性を示す。

1. 4 本論の構成

本論は1.1節の目的の基、以下に示す全7章で構成する。

第1章

研究背景・目的について述べる。既往の研究と本研究の目的を示し、本研究で扱う構造物と最適化問題の対象範囲を示す。

第2章

本研究で提案する最適設計法について説明する。最適設計法は構造形態創生部と解の詳細検討を行う解の二次評価の二段階による設計フローを有する。ここでは、最適設計法内で扱う外力条件、部材耐力や構造物の評価指標について示す。さらに、解の二次評価にて扱う線形座屈解析の定式化やロバスト評価手法の内容を示す。また、本研究内で提案した製作・施工性を考慮した評価指標についても耐震設計の中で扱う指標の一つとしてその定式化を示す。

第3章

構造最適化問題の定式化を述べる。単一・多目的最適化問題の定式化を示し、各最適化問題における解の説明を示す。また、本研究で用いるGA系解法の位置づけ及びその計算アルゴリズムを説明する。その中で、発想支援ツールとしての優良解の活用の重要性について述べる。

第4章

数値計算を行うに当たり、骨組構造の離散化について示す。構造解析は有限要素法とし梁要素を用いる。また、本論では曲面と部材断面の表現及び製作・施工性に関する評価指標にパラメトリック曲面を採用する。これに際し、節点情報と要素情報に対応したパラメトリック曲面の定式化を示す。

第5章

構造形態創生と最適設計例をとって離散系構造の例を示す。扱う構造モデルはアーチフレーム、平面トラスフレーム、ラーメンフレームであり、問題に応じた最適化手法の選択から最終的な形態決定に至るまでの設計手順を示す。設計例を通して離散系構造における設計支援ツールとしての構造形態創生法の有効性を確認する。5章2節は単純遺伝的アルゴリズムの実建物への適用事例として円筒形状を有する曲面骨組構造の構造形態創生を示す。ここでは、意匠設計者のデザイン条件に着目した制約条件の設定を行い、デザインと構造合理性の同時最適化を単一目的最適化問題を駆使して行った例を示す。さらに、形態決定から建物の実現に至るまでの製作・施工内容についても説明する。5章3節は多目的最適化の基本問題として単純な平面トラスフレームを用いた構造形態創生例を示す。基本的な問題として部材断面の最小化問題を設定し、経済設計に対する構

造形態創生法の有効性を確認する。5章4節は低層建物を想定した骨組構造の設計に構造形態創生法を活用した例を示す。具体的な建物の設計に対して、機能を想定した目的関数を提案し、機能性と構造合理性を考慮した構造形態創生により設計支援につながる種々の形態が獲得できることを示す。

第6章

空間構造の構造形態創生と最適設計を実践する。対象構造は鉄骨格子シェルとする。空間構造の実設計へ構造形態創生法を活用していく上で、製作・施工性に関する評価指標の重要性を述べ、改善指標の一つとして部材間の回転角に着目した評価指標を提案する。数値解析では複雑形態の製作・施工性を改善させる設計手段として構造形態創生法が活用できることを示す。本章ではまず、基礎問題を設定して数値解析結果より本評価指標が目的関数および制約条件として活用できること、及び得られた解形態の製作・施工性に関する形態的特徴について考察する。次に、ロバスト判定解析を利用した製作・施工性に関する評価指標のロバスト性判定方法についてパラメータスタディを行い、力学指標に加え製作・施工性に関するロバスト判定が同時に行えることを示す。さらに、解析モデルを任意平面形状に拡張し、基本問題にて得られた知見を基に最適設計を適用させる。最適設計法の適用により意匠性・力学合理性・製作・施工性・構造安定性と種々の設計条件を総合的に満足した構造形態が獲得できることを示し、空間構造における設計支援ツールとしての構造形態創生法の有効性を確認する。

第7章

第5,6章で行った最適設計例から、結論をまとめる。



— 第 2 章 設計評価指標 —

本研究で提案する最適設計法について説明する。最適設計法は構造形態創生部と解の詳細検討を行う解の二次評価の二段階による設計フローを有する。ここでは、最適設計法内で扱う外力条件, 部材耐力や構造物の評価指標について示す。さらに、解の二次評価にて扱う線形座屈解析の定式化やロバスト評価手法の内容を示す。

—第2章—

設計評価指標

2. 1 耐震設計の考え方と分類

建築設計における耐震性能目標は建物の規模や構造形式により大きく二つに分類される。一つは建物損傷を許容せず、剛性の高いフレームを構成することで耐震性能を保持しようとする考え方である。このような設計は強度型の設計と呼び、鉄筋コンクリート壁式構造や耐震壁付ラーメン構造、ブレース付き鉄骨ラーメン構造がこれらに分類される。一方、強度型の設計は剛な耐震要素により建物の耐震性能を確保しているが、ひとたび建物が損傷してしまうと、脆性的な挙動を示す。これに対して建物の損傷をある程度許容し、フレームのエネルギー吸収能力を高めることで靱性に富んだ建物とし、耐震性能を確保する考え方がある。このような設計は靱性型の設計とよぶ。

各構造形式と耐震性能の模式図を図2.1に示す。

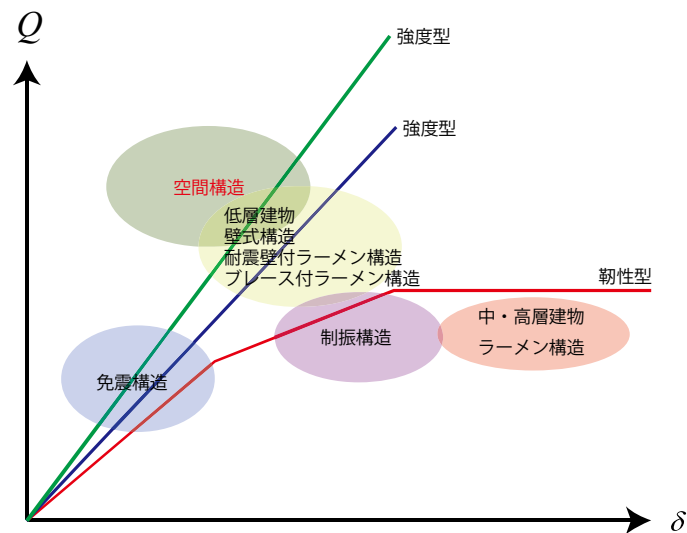


図2. 1 各種構造と目標性能の分類

本論で扱う構造は鉄骨造とし架構形式はラーメン構架構及び鉄骨格子シェル架構・トラス架構・アーチ架構である。これらの構造は以下の耐震設計の方針の基、構造形態創生法を適用していくものとする。

ラーメン架構

靱性型の設計とすることで、大地震時における耐震性能を確保する。構造形態創生法の適用にあつては、弾性範囲内の設計となる一次設計時に着目し、静的解析により建物の安全性を検証したうえで、形状決定を行う。

格子シェル架構・トラス架構・アーチ架構

力学特性の複雑さから、強度型の設計とすることで、大地震時における耐震性能を確保する。構造形態創生法の適用にあつては、フレームが弾性範囲内であることを前提に静的解析，製作性・施工性，座屈に対する安全性やロバスト性等を検証し、建物の安全性を確保した上で構造形態創生により形状決定を行う。

2. 2 構造形態創生法を活用した最適設計法

構造形態創生法を実設計に用いる際、すべての設計条件を盛り込んで一律に構造形態創生法を適用させることは膨大な情報の定量化とプログラムの複雑化、解析時間の増加が考えられることから、現実的な運用方法ではなく、各設計においてどのような問題点・解決点・要求があるか整理し、部分的に構造形態創生法を用いることが望ましいと考える。本研究はこのような観点から、通常の耐震設計のフローの中に構造形態創生のフェーズを組み込むことで、構造形態創生法を種々の構造形式の設計へ利用していくことを提案する。以下に構造形態創生法を考慮した最適設計法の手順を説明する。図 2.2 に最適設計フロー図を示す。

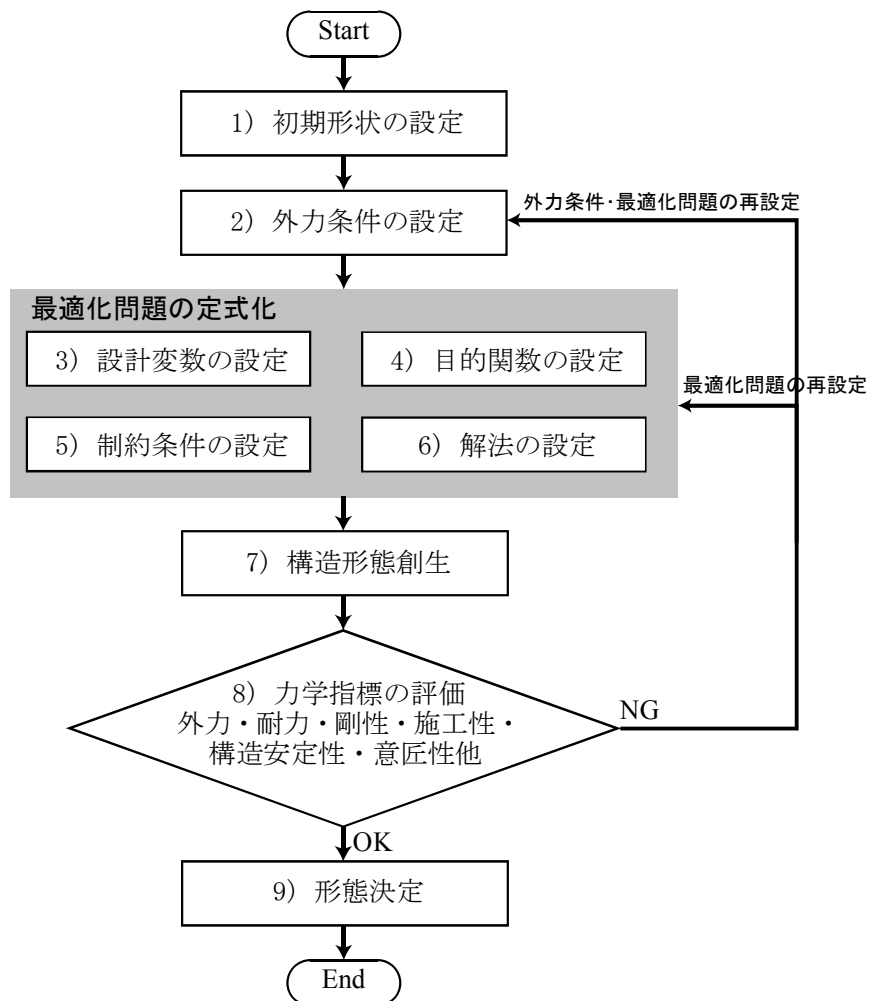


図 2. 2 最適設計フロー

1) 初期形状の設定

意匠設計者のファーストイメージもしくは基本設計にて構造計画が決定した固有形状を初期形状とする。なお、初期形状が決まっていない設計初期段階より構造形態創生法を活用する場合は、基本形状を設定し、それを初期形状とする。図 2.3 に初期形状の設定例を示す。

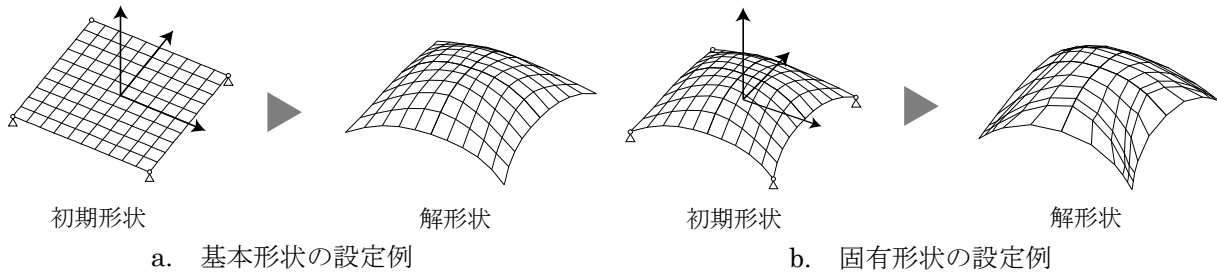


図 2. 3 初期形状の設定例

2) 外力条件の設定

応力解析を行う外力条件を設定する。一般に初期段階にて構造形態創生法を活用する場合は長期荷重時を対象とする。支配的となる荷重条件が明らかな場合はその荷重条件を採用する。

3) 設計変数の設定

第 3 章にて説明する構造最適化問題の定式化に従い設計変数を設定する。本論では有限要素法にて構造解析を行うため有限要素法に必要な構造情報を設計変数として設定する。設計変数の設定は形状最適化とする場合は節点座標 R 、部材断面や板厚形状・開口形状等の位相情報に対する最適化とする場合は部材断面積 A や板厚 t を扱う。

4) 目的関数の設定

最小化もしくは最大化させたい関数 $f_i (i=1,2,3,...)$ を目的関数として設定する。目的関数の設定は通常力学指標を扱うが、最適化する目的に応じて独自に目的関数を設定する場合もある。

5) 制約条件の設定

設計変数を変動させる範囲として設計変数の側面制約条件を設定する。また、建築計画に関する要求条件を意匠的条件(高さ制約,容積制約等)として設定し、耐震性能上要求される条件は力学条件(許容応力度設計等)として制約条件として設定する。

6) 解法の設定

探索する解空間の範囲に応じて解探索手法を設定する。なお、本研究では解の探索範囲を大域的最適解や局所最適解を含む比較的評価の高い解である優良解にまで広げている。設計作業は一連の最適化作業であるが目標性能を満足していれば必ずしも、目的関数を最大化あるいは最小化させる必要はない。つまり、優良解の活用は目標性能を満足する比較的評価の高い多種多様な構

造形状が提示でき、設計者の発想支援や、設計者のイメージする自由な建築形態の獲得につながる可能性がある。優良解についての数値解析上の特徴は第3章に詳細を示す。

7) 構造形態創生

上記の設定内容を基に第3章式(3.1.1)－(3.1.4)に示す最適化問題を解き、解を得る。

8) 選択した解形状の詳細な力学指標の評価（解の二次評価）

選択した解の詳細な力学評価,意匠の評価,製作施工性を検討し、得られた解が設計条件を満足しているか確認する。

9) 形態決定

設計条件を全て満足している場合選択した解を最終形態とする。

以上が最適設計法の手順である。なお、8)にて設計者の意図する解の二次評価が得られなかった場合、解の二次評価にて評価の低い項目を目的関数,もしくは制約条件として最適化問題を再設定した上で、2)もしくは3)に戻り8)までの試行を繰り返し、最終形態を決定する。

ここで提案した最適設計法の特徴は解の二次評価にてより詳細な検討を行うことで構造形態創生に要する時間の省力化と単純化を図っている点である。なお、解の二次評価には得られた形態の耐震性, 構造安定性, 製作・施工性を評価することを目的として表2.1に示す項目を扱う。最適化問題の再設定を行う場合、表2.1に示す項目を目的関数や制約条件として最適化問題を解くことも可能である。その他、模型の作成や3Dモデルを通して、建築計画上の評価も行っていく。

表2.1 解の二次評価の項目

外力	:	長期荷重・積雪荷重・地震荷重等
耐力	:	許容応力度設計
剛性	:	線形座屈荷重の評価
構造安定性	:	ロバスト性評価
製作・施工性	:	部材長さ・接合角等

2. 3 設計用外力

本研究で扱う設計用外力^[2.1]を以下に示す。数値解析例では全ての荷重ケースを扱うわけではなく、支配的となる荷重条件を見極め、特定の荷重ケースにおける構造形態創生を実施することで、実設計と構造形態創生による試行錯誤階数の効率化を図る。

2. 3. 1 長期荷重

長期荷重は建物の自重や仕上げ、設備機器などの固定荷重(DL)、居室の用途により決定する積載荷重(LL)の和として設定される。積載荷重は小梁・床用, 架構用, 地震用に応じて建築基準法施行令第85条第1項のほか各種指針により決定する。

表 2. 2 代表的な積載荷重

室の分類	床・小梁用	架構用	地震力用
居住室	1800	1300	600
事務室	2900	1800	800
教室	2300	2100	1100
百貨店、百貨店の売り場	2900	2400	1300
集会室(固定席)	2900	2600	1600
集会室(固定席)	3500	3200	2100
車庫、自動車通路	5400	3900	2000
一般書庫、倉庫	7800	6900	4900
機械室	4800	2400	1300
屋上	1000	600	400
屋上 (スポーツ施設大屋根等)	1000	0	0

2. 3. 2 地震荷重

設計用地震力は建築基準法施行令第 88 条、昭和 55 年建設省告示第 1793 号第 1 に従って設定される。

$$Q_i = C_i \cdot W_i \quad (2.3.1)$$

$$C_i = Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_0 \cdot (I) \quad (2.3.2)$$

ここで、 Q_i : i 階の設計用層せん断力[kN]、 W_i : i 階以上の各解重量の和[kN]、 C_i : i 階の層せん断力係数、 Z : 地域係数、 R_i : 振動特性係数、 A_i : i 階の層せん断力分布係数、 C_0 : ベースシアー係数、 I : 重要度係数を示す。上記の算出式はラーメン架構のような積層構造を対象とした設計式となっており、空間構造のような振動性状が複雑な建物の場合固有値解析結果等から大屋根のゾーンごとに水平・鉛直震度を決定する。

2. 3. 3 風荷重

暴風時の風圧力は建築基準法施行令第 87 条、平成 12 年建設省告示第 1454 号に従って設定する。

$$P = C_f \cdot q \quad (2.3.3)$$

$$q = 0.6 \cdot E \cdot V_0^2 \quad (2.3.4)$$

$$E = E_r \cdot G_f \quad (2.3.5)$$

ここで、 P : 風圧力[N/m²]、 C_f : 風力係数、 q : 速度圧[N/m²]、 V_0 : 基準風速[m/s]、 E_r : 平均風速の高さ方向の分布を表す係数、 G_f : ガスト影響係数を示す。風力係数は建物の外観形状により決まる係数であり、基準法に示された数値による他、複雑形状の建物や超高層建物は風直交方向の風や渦励振等の影響を考慮するため風洞実験を実施し設定する。

2. 3. 4 積雪荷重

積雪荷重は建築基準法施行令第 86 条、平成 12 年建設省告示第 1455 号に従って設定する。

$$SL = [\text{単位積雪荷重}] \times [\text{垂直積雪量}] \times [\text{割増係数}] \quad (2.3.6)$$

積雪荷重は多雪地域の有無により、長期および短期荷重として考慮する。なお、空間構造のようなスパン 15[m]を超える構造については降雨による単位積雪荷重の割り増しを行う必要がある。

2. 4 部材耐力

本論は構造形態創生法を活用した数値解析例として鉄骨構造を扱う。その際に応力制約として許容応力度設計を行う。以下に梁材, 柱材の許容応力度設計式を示す。

2. 4. 1 鉄骨造の許容応力度設計^[2.2]

梁材

梁材の許容応力度設計は曲げ、せん断に対して以下の式により許容応力度以下であることを確認する。

検定比

曲げ

$$\frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0 \quad (2.4.1)$$

せん断

$$\frac{\tau_s}{f_s} \leq 1.0 \quad (2.4.2)$$

ここで、 σ_b : 設計用曲げ応力度, f_b : 許容曲げ応力度, τ_s : 設計用せん断応力度, f_s : 許容せん断応力度を示す。

柱材

梁材の許容応力度設計は軸力, 曲げ, せん断に対して以下の式により許容応力度以下であることを確認する。

軸力+曲げ

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_{by}}{f_{by}} + \frac{\sigma_{bz}}{f_{bz}} \leq 1.0 \quad or \quad \frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_{by}}{f_{by}} + \frac{\sigma_{bz}}{f_{bz}} \leq 1.0 \quad (2.4.3)$$

せん断

$$\frac{\tau_s}{f_s} \leq 1.0 \quad (2.4.4)$$

ここで、 σ_c, σ_t : 設計用軸応力度, f_c : 許容圧縮応力度, f_t : 許容引張応力度, σ_{by}, σ_{bz} : y, z 軸回りの曲げモーメントに対する設計用曲げ応力度, f_{by}, f_{bz} : y, z 軸回りの曲げモーメントに対する許容曲げ応力度を示す。

各設計用応力度および許容応力度は以下の手順により算出する。

設計用応力度の算出

設計用応力を N , M , Q とした場合、設計用応力度は以下により算出する。なお、軸力は圧縮力と仮定して記号は軸応力度は σ_c と表現する。

軸応力度

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \quad (2.4.5)$$

曲げ応力度

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (2.4.6)$$

せん断応力度

$$\tau_s = \frac{Q}{A_w} \quad (2.4.7)$$

ここで、 A ：部材断面積， Z ：対象とする軸回りの断面係数， A_w ：せん断検討用の断面積を示す。

許容応力度の算出

以下に示す許容応力度は長期許容応力度の算出式である。なお、短期許容応力度は長期の 1.5 倍とする。

許容圧縮応力度 f_c

許容圧縮応力度は部材の細長比と限界細長比の大小関係より以下の式により算出する。

$$f_c = \frac{1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2}{1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} F \quad \lambda \leq \Lambda$$

$$f_c = \frac{18}{65 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} F \quad \lambda > \Lambda \quad (2.4.8)$$

ここで、 F ：基準強度， λ ：部材の細長比， Λ ：材料強度により求まる限界細長比を示す。

許容引張応力度 f_t

許容引張応力度は部材の基準強度 F の 2/3 である。

$$f_t = \frac{2}{3} F \quad (2.4.9)$$

許容曲げ応力度 f_b

本論は数値解析例において H 形鋼を用いる。H 形鋼の許容曲げ応力度の算出は以下の式となる。

強軸回りの曲げを受ける場合

$$f_b = \max(f_{b1}, f_{b2}) \text{かつ} f_b \leq \frac{2}{3}F$$

$$f_{b1} = \left\{ \frac{2}{3} - \frac{4}{15} \frac{\left(\frac{l_b}{i_y} \right)^2}{C\Lambda^2} \right\} F \quad (2.4.10)$$

$$f_{b2} = \frac{89000}{l_b \cdot h / A_f}$$

弱軸回りの曲げを受ける場合

$$f_b = \frac{2}{3}F \quad (2.4.11)$$

ここで、 l_b ：圧縮フランジの支店間距離、 i_y ：弱軸回りの断面二次半径、 C ：曲げモーメントによる補正係数(本論では $C=1.0$ とする)、 h ：梁せい、 A_f ：フランジ断面積を示す。

許容せん断応力度 f_s

許容せん断応力度は材料強度 F の $\frac{2}{3\sqrt{3}}$ である。

$$f_s = \frac{2}{3\sqrt{3}}F \quad (2.4.12)$$

2. 5 線形座屈荷重

曲面構造は主に面内力に対する抵抗機構により自由や外力を伝達させる。そのため、曲面構造は座屈や不安定現象が呈することがあり、安全性を確保するためには、これらの現象に対して十分検討する必要がある。ここでは座屈荷重の簡易的な評価方法として線形座屈解析の定式化を行う^[2,3]。

まず、基準荷重ベクトル \mathbf{P}_0 、荷重係数を λ として比例載荷荷重 $\lambda\mathbf{P}_0$ が作用する構造物を考える。この時、構造物の瞬間的な堅さを示す接線剛性は、一般に荷重の増加に伴い減少する。つまり、接線剛性が0となる位置が存在し、その点で構造物は不安定となる。この点の荷重が座屈荷重である。

多自由度系では接線剛性マトリクス \mathbf{K}_T の固有値によって構造物の安定性が決定する。いま、荷重係数 λ を静的釣り合い曲線における載荷経路パラメータ λ_0 を基準となる設計荷重係数とする。 $\lambda = \lambda_0$ に対応する荷重 $\mathbf{P} = \lambda_0\mathbf{P}_0$ が作用したときの変形状態が得られているものとし、この状態を参照状態とする。まず、接線剛性マトリクスを以下のように分解する。

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_u + \mathbf{K}_G \quad (2.5.1)$$

ここで、 \mathbf{K}_L :線形剛性マトリクス, \mathbf{K}_u :初期変位剛性マトリクス, \mathbf{K}_G :幾何剛性マトリクスである。 \mathbf{K}_L , \mathbf{K}_u , \mathbf{K}_G は λ の関数である。したがって、 λ を λ_0 から $\lambda_0 + \Delta\lambda$ まで増加させた時、それらの変位量を Δ を用いて表現すると次式を得る。

$$\mathbf{K}_T(\lambda_0 + \Delta\lambda) = \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_u(\lambda_0) + \Delta\mathbf{K}_u + \mathbf{K}_G(\lambda_0) + \Delta\mathbf{K}_G \quad (2.5.2)$$

線形座屈解析では座屈前の変形は小さく節点変位が座屈荷重係数に及ぼす影響は小さいと仮定できる。これより、式(2.5.2)の接線剛性 \mathbf{K}_T は次式のように表現される。

$$\mathbf{K}_T(\lambda_0 + \Delta\lambda) = \mathbf{K}_L + \frac{\lambda_0 + \Delta\lambda}{\lambda_0} \mathbf{K}_G(\lambda_0) \quad (2.5.3)$$

以上より、座屈荷重係数 λ_{cr} は $\lambda_0 = 0$ の無変形状態を参照すると、次の固有値問題における正の最小固有値として定義される。

$$[\mathbf{K}_L + \lambda_{cr} \mathbf{K}_G] \Phi = 0 \quad (2.5.4)$$

ここで、 Φ :座屈モードを表す。なお、式(2.5.4)は荷重変位曲線において線形剛性マトリクスを傾きとする直線の延長線上に座屈点が存在することを意味している。

以上に説明したように、線形座屈解析は無変形状態における釣り合い式から座屈荷重を決定する。つまり、座屈前変形が比較的小さい場合は、線形座屈解析による安定性の確認だけで十分であるが、大変形を伴う空間構造物では線形座屈荷重係数は厳密解(極大点荷重係数)の数分の一程度となることが多い。そのため、座屈前変形の影響が無視できない場合や、座屈荷重係数の不整合度(形状の誤差などの不正に関する座屈荷重係数の変化率)を評価する必要がある場合は、幾何学的非線形性を考慮した非線形座屈解析が重要となる。

2. 6 ロバスト判別手法

複雑な建物形状や構造形式を有する場合、施工精度や材料のばらつき等が建物の性能に多く影響する場合がある。ロバスト性はそのような初期不正による構造物の性能変動の度合いを評価する指標である。具体的には初期不正に対する目的関数値の変動 Δf より評価する。ロバスト性の概念図を図 2.4 に示す。なお、本研究では初期不正による変動 Δf の小さい解をロバスト解(robust solution)と表現する。つまり、図 2.4 に示すような多峰性関数における優良解においてロバスト性の高い解は勾配の緩やかな峰に位置している解となる。

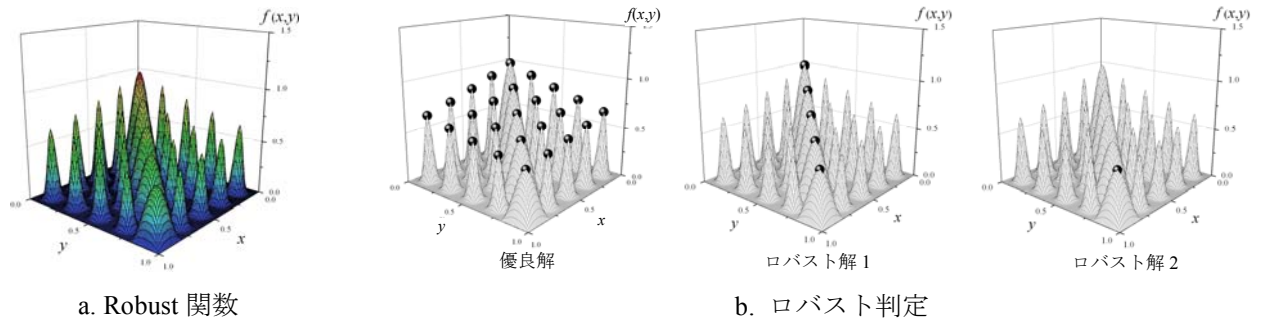


図 2. 4 ロバスト性の高い解^[2.6]

本研究は文献[2.4]で提案されている閾値を設定しないロバスト判別手法を用いる。採用手法は初期不正の代わりに変数空間上に乱数による微小変化を与えてロバスト判別を行う。以下にその計算手順を示す。

2. 6. 1 計算手順

- 1) 乱数個体の発生：解 (M 個) の集合に対し、側面制約条件の $s\%$ (乱数発生範囲) で標準偏差 σ の正規乱数を用いて乱数個体を N 個発生させる。
- 2) 微小変化量の平均値の算出：解集合と乱数個体から後述する方法により微小変化量 $\Delta_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$) を算出する。
- 3) 微小変化量の平均値の算出：微小変化量 $\Delta_{i,j}$ の平均値 μ_i を算出する。 μ_i の値が低いほどロバスト性は高い。

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta_{i,j}}{N} \quad (2.6.1)$$

4) ロバスト判別：解集合をロバスト性が高い順に並べ、あらかじめ決めた個数(分類数 L)により、 M/L 個ずつのグループに分類し、ロバスト性が高い順に rank- k ($k=1, 2, \dots, L$) と置く方法(P-rank 法)と、rank- k ($k=1, 2, \dots, L$) の μ の範囲を $(\mu_{\max} - \mu_{\min}) / L \times k \geq \mu \geq (\mu_{\max} - \mu_{\min}) / L \times (k-1)$ と決め、その範囲に含まれる個体を rank- k に分類する方法(μ -rank 法)を用いる。

以上よりここで用いる手法は解集合を分類数 L により分類する方法であり、rank-1 をロバスト解と判断する。したがって、閾値を問題毎に決める必要がない。ただし、 L の設定には注意を要する。

2. 6. 2 微小変化量 $\Delta_{i,j}$ の算出方法

微小変化量 $\Delta_{i,j}$ の算出法は目的関数値の変化量 Δf に対する判別変数の変化量 Δx を採用し、次式で求める。

$$\Delta_{i,j} = \frac{\|\Delta f\|}{\|\Delta x\|} \quad (2.6.2)$$

ここで、 $\|\Delta f\|$ 及び $\|\Delta x\|$ は次式の通りである。

$$\Delta f = f(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_j), \quad \Delta x = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \quad (2.6.3a,b)$$

$\|\Delta x\|$ はユークリッドノルムを用いる。

$$\|\Delta x\| = (|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_n|^2)^{1/2} \quad (2.6.4)$$

ここで \mathbf{x}_i : 解 i の判別変数値, \mathbf{x}_j : 乱数個体 j の判別変数値, $f(\mathbf{x}_i)$: 解 i の目的関数値, $f(\mathbf{x}_j)$: 乱数個体 j の目的関数値である。

2. 6. 3 rank 法

本手順では解集合を分類数 L により分類する方法を説明する。

rank 法とは解集合 (M 個) のロバスト性が高い順(微小変化量の平均値 μ の小さい値)に並べ、あらかじめ決めた個体数(分類数 L)により、 M / L 個のグループに分類し、ロバスト性が高い順に rank- k ($k=1, 2, \dots, L$) と置く方法(P-rank 法)と、rank- k ($k=1, 2, \dots, L$) の範囲を式(2.6.5)で決め、その範囲に位含まれる個体を rank- k に分類する方法(μ -rank 法)の総称である。

$$((\mu_{\max} - \mu_{\min}) / L) \times (k-1) \leq \mu \leq ((\mu_{\max} - \mu_{\min}) / L) \times k \quad (2.6.5)$$

この時、rank 法では rank-1 をロバスト解と判断する。したがって、閾値を問題毎に決める必要がない。ただし、 L の決定には注意を要する。図 2.5 に P-rank 法と μ -rank 法の数値例を示す。図 2.5 より採用する rank 法の種類により rank-1 となるロバスト解の範囲が変わることが分かる。

なお、本研究は解の二次評価にロバスト解析を用い、比較する同士の相対的評価によりロバスト解を判断する^[2.5]。そのため、上記の rank 法は今回は使用しない。

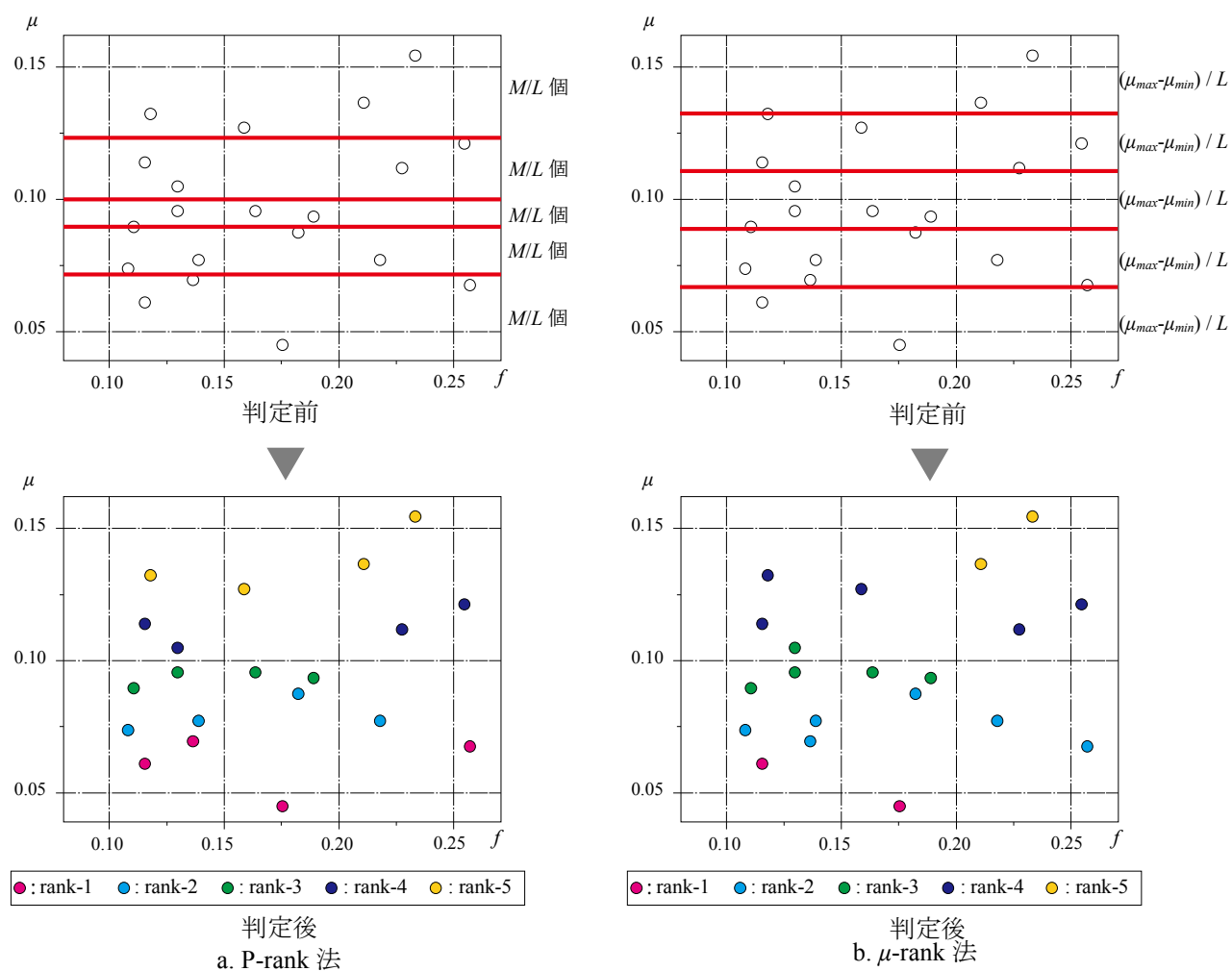


図2. 5 rank 法 ($L=5$ の場合)

2. 7 製作性・施工性に関する部材接続部の評価

鉄骨格子シェルにおける構造形態創生は接続部の形状や使用する断面部材より生じる製作・施工条件を満足させることが重要であり、既に部材長一様化や接合角一律化あるいは線織面を利用した曲面形状の表現方法等の製作性・施工性改善に重点をおいた研究がいくつか提案されている。鉄骨格子シェルは曲面を構成する各フレームが交差するため、曲面形状が複雑になるほどフレーム同士の接続部は各部材が複雑に取り合うこととなり、接続部の納まりをどのように解決させるか、あるいは格子を構成する連続した部材の形状を幾何学的に制御することが設計における課題の一つとなる。本研究は製作・施工性を改善させる項目の一つとして鉄骨格子シェルの接続部における部材間の回転角に着目する。ここで、本研究で扱う部材間の回転角とは図2.6に示す曲面を構成する格子フレームの連続する ij 要素と jk 要素の接続点 j における製作上生じる2要素間のねじれと部材角を意味する。つまり、接合部において各方向回りの回転角を把握しこれを定量的に制御できれば、接合部におけるねじれの解消や接合ディテールの統一化、さらには円形鋼管のみならずH形鋼等の円形鋼管に比べて安価な開形断面を用いて鉄骨格子シェルが実現できる可能性がある。

以下では、部材間の回転角を評価する手法として各要素の要素座標ベクトルの関係に着目した評価関数を提示する^[2,7,8]。

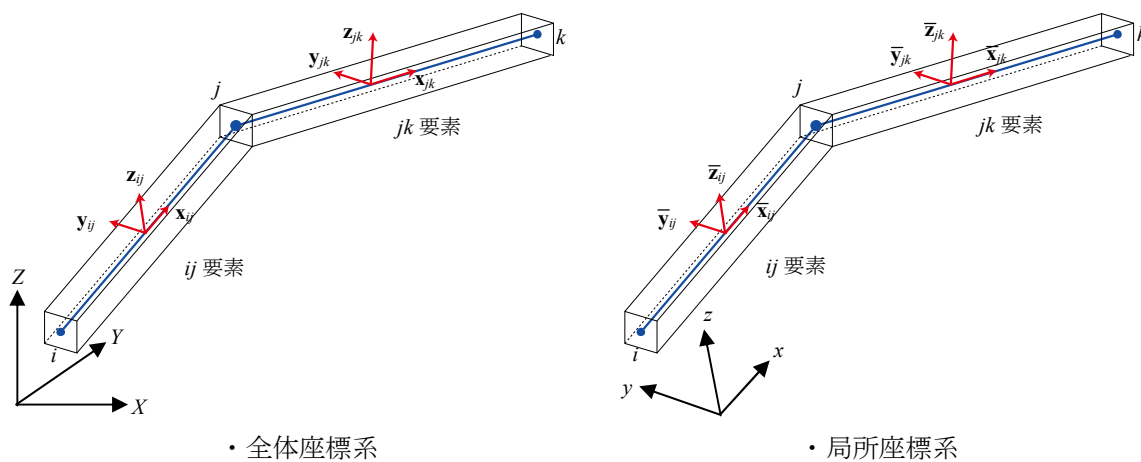


図2. 6 連続する要素と要素座標の関係

2. 7. 1 部材間の回転角の定義

部材間の回転角はテンソル積ベジエ曲面の接線ベクトルと法線ベクトルを用いて定義する(図 2. 7)。テンソル積ベジエ曲面の定式化については第 4 章を参照のこと。テンソル積ベジエ曲面の任意点 $\mathbf{r}(u_k, v_l)$ の接線ベクトルと法線ベクトルを ${}_u\mathbf{r}_{kl}$, ${}_v\mathbf{r}_{kl}$, ${}_n\mathbf{r}_{kl}$ とする。この時、接線ベクトル ${}_u\mathbf{r}_{kl}$, ${}_v\mathbf{r}_{kl}$ は u, v に関する一階偏微分の式で与えられる。

$${}_u\mathbf{r}_{kl} = \frac{\partial \mathbf{r}_{kl}}{\partial u} = \sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} \frac{\partial}{\partial u} \{ B_i^{m'}(u_k) \} B_j^{n'}(v_l) \mathbf{P}_{ij} \quad (k=0,1,2,\dots,m \quad l=0,1,2,\dots,n) \quad (2.7.1)$$

$${}_v\mathbf{r}_{kl} = \frac{\partial \mathbf{r}_{kl}}{\partial v} = \sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} B_i^{m'}(u_k) \frac{\partial}{\partial v} \{ B_j^{n'}(v_l) \} \mathbf{P}_{ij} \quad (k=0,1,2,\dots,m \quad l=0,1,2,\dots,n) \quad (2.7.2)$$

$$B_i^m(u) = \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i} \quad (2.7.3)$$

ここで、接線ベクトルは u, v パラメータを設定した方向に対するベクトルである。テンソル積ベジエ曲面の一階偏微分は基底関数の偏微分関数として与えられる。式(2.7.3)の u に関する偏微分の式は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial u} B_i^m(u) = \frac{i \cdot m!}{i!(m-i)!} u^{i-1} (1-u)^{m-i} - \frac{(m-i)m!}{i!(m-i)!} u^{i-1} (1-u)^{m-i-1} \quad (2.7.4)$$

式(2.7.4)を式(2.7.1), (2.7.2)に代入し次式を得る。

$$\frac{\partial \mathbf{r}_{kl}}{\partial u} = m' \sum_{j=0}^{n'} B_j^{n'}(v_l) \sum_{i=0}^{m'} B_i^{m'-1}(u_k) (\mathbf{P}_{i+1,j} - \mathbf{P}_{i,j}) \quad (k=0,1,2,\dots,m \quad l=0,1,2,\dots,n) \quad (2.7.5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}_{kl}}{\partial v} = n' \sum_{i=0}^{m'} B_i^{m'}(u_k) \sum_{j=0}^{n'-1} B_j^{n'-1}(v_l) (\mathbf{P}_{i,j+1} - \mathbf{P}_{i,j}) \quad (k=0,1,2,\dots,m \quad l=0,1,2,\dots,n) \quad (2.7.6)$$

以上より、離散化されたテンソル積ベジエ曲面上の任意の接線ベクトル ${}_u\mathbf{r}_{kl}$, ${}_v\mathbf{r}_{kl}$ が得られる。なお、接線ベクトルはベクトル長さで除すことで単位接線ベクトルを得る。

また、得られた単位接線ベクトルより曲面上の任意点の単位法線ベクトル ${}_n\mathbf{r}_{kl}$ は次式で表現される。

$${}_n\mathbf{r}_{kl} = \frac{({}_u\mathbf{r}_{kl} \times {}_v\mathbf{r}_{kl})}{|{}_u\mathbf{r}_{kl} \times {}_v\mathbf{r}_{kl}|} \quad (2.7.7)$$

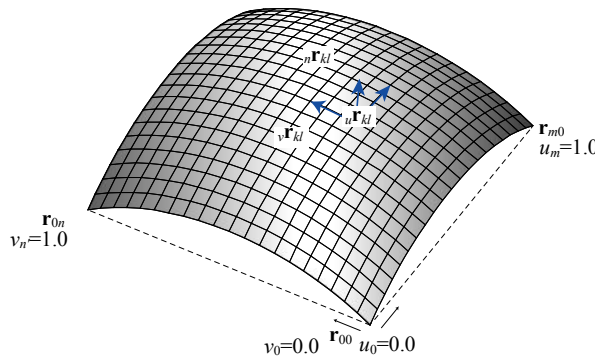


図 2. 7 曲面上の接線ベクトルと法線ベクトル

部材間の回転角を算出するにあたり、格子シェルの各部材の要素座標軸を曲面上の単位法線ベクトルを用いて与える。今、曲面上の任意点*i, j, k*を端点とする要素*ij*を考える。*i*点における単位法線ベクトルは式 (2.7.7) で求まる。いま、曲面上の任意点*i, j, k*を端点とする*ij* 要素と*jk* 要素を考える(図2.6)。この時、*ij* 要素・*jk*要素の*i, j*節点における法線ベクトルを ${}_n\mathbf{r}_{k,i}, {}_n\mathbf{r}_{k,j}$ とした場合要素座標ベクトルを次式で与える。

$$\mathbf{x}_{ij} = \frac{\overline{ij}}{|\overline{ij}|} \quad \mathbf{y}_{ij} = \frac{-\mathbf{x}_{ij} \times {}_n\mathbf{r}_{k,i}}{|-\mathbf{x}_{ij} \times {}_n\mathbf{r}_{k,i}|} \quad \mathbf{z}_{ij} = \mathbf{x}_{ij} \times \mathbf{y}_{ij} \quad (2.7.8)$$

$$\mathbf{x}_{jk} = \frac{\overline{jk}}{|\overline{jk}|} \quad \mathbf{y}_{jk} = \frac{-\mathbf{x}_{jk} \times {}_n\mathbf{r}_{k,j}}{|-\mathbf{x}_{jk} \times {}_n\mathbf{r}_{k,j}|} \quad \mathbf{z}_{jk} = \mathbf{x}_{jk} \times \mathbf{y}_{jk} \quad (2.7.9)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{ij}, \mathbf{x}_{jk}$: *ij* 要素・*jk* 要素の*x* 軸要素座標ベクトル、 $\mathbf{y}_{ij}, \mathbf{y}_{jk}$: *ij* 要素・*jk* 要素の*y* 軸要素座標ベクトル、 $\mathbf{z}_{ij}, \mathbf{z}_{jk}$: *ij* 要素・*jk* 要素の*z* 軸要素座標ベクトルを示す。なお、各要素の*y* 軸要素座標ベクトルは曲面の面内方向ベクトル、*z* 軸要素座標ベクトルは曲面の面外方向ベクトルに対応する。*ij* 要素と*jk* 要素において、*j* 点における要素間の回転角の評価は対象とする平面に投影した要素座標ベクトルの内積を用いて式(2.7.12)－(2.7.14) で与えられる。

$$\mathbf{T}_{ij}\mathbf{x}_{ij} = ({}_x\bar{x}_{ij} \quad {}_y\bar{x}_{ij} \quad {}_z\bar{x}_{ij}) \quad \mathbf{T}_{ij}\mathbf{y}_{ij} = ({}_x\bar{y}_{ij} \quad {}_y\bar{y}_{ij} \quad {}_z\bar{y}_{ij}) \quad \mathbf{T}_{ij}\mathbf{z}_{ij} = ({}_x\bar{z}_{ij} \quad {}_y\bar{z}_{ij} \quad {}_z\bar{z}_{ij}) \quad (2.7.10)$$

$$\mathbf{T}_{ij}\mathbf{x}_{jk} = ({}_x\bar{x}_{jk} \quad {}_y\bar{x}_{jk} \quad {}_z\bar{x}_{jk}) \quad \mathbf{T}_{ij}\mathbf{y}_{jk} = ({}_x\bar{y}_{jk} \quad {}_y\bar{y}_{jk} \quad {}_z\bar{y}_{jk}) \quad \mathbf{T}_{ij}\mathbf{z}_{jk} = ({}_x\bar{z}_{jk} \quad {}_y\bar{z}_{jk} \quad {}_z\bar{z}_{jk}) \quad (2.7.11)$$

*x*軸周りの回転角評価式

$$t_x = 2.0 - ({}_y\bar{y}_{ij} \quad {}_z\bar{y}_{ij}) \cdot ({}_y\bar{y}_{jk} \quad {}_z\bar{y}_{jk}) - ({}_x\bar{z}_{ij} \quad {}_z\bar{z}_{ij}) \cdot ({}_x\bar{z}_{jk} \quad {}_z\bar{z}_{jk}) \quad (2.7.12)$$

*y*軸周りの回転角評価式

$$t_y = 2.0 - ({}_x\bar{x}_{ij} \quad {}_z\bar{x}_{ij}) \cdot ({}_x\bar{x}_{jk} \quad {}_z\bar{x}_{jk}) - ({}_x\bar{z}_{ij} \quad {}_z\bar{z}_{ij}) \cdot ({}_x\bar{z}_{jk} \quad {}_z\bar{z}_{jk}) \quad (2.7.13)$$

*z*軸周りの回転角評価式

$$t_z = 2.0 - ({}_x\bar{x}_{ij} \quad {}_y\bar{x}_{ij}) \cdot ({}_x\bar{x}_{jk} \quad {}_y\bar{x}_{jk}) - ({}_x\bar{y}_{ij} \quad {}_y\bar{y}_{ij}) \cdot ({}_x\bar{y}_{jk} \quad {}_y\bar{y}_{jk}) \quad (2.7.14)$$

ここで、 t_x, t_y, t_z : 各軸周りの回転角の評価式、 \mathbf{T}_{ij} : *ij* 要素の要素座標系への座標変換行列を示す。なお、式(2.7.12)－(2.7.14)において*ij* 要素の投影面における要素座標ベクトルは基底ベクトルとなる。式(2.7.12)－(2.7.14)がゼロ、つまり、投影面における対象とする要素座標ベクトルの内積が各々1.0となる時、各要素座標軸周りの回転角は0となる。着目すべきは、本評価指標は節点位置における部材の接続状態を評価する指標であるため、必ずしも接合部にのみ着目した評価指標ではないことである。接合部間の部材を多要素でモデル化すれば接合部間の部材形状も評価可能である。

2. 7. 2 部材間の回転角を考慮した評価式の定量的評価

式(2.7.12)－(2.7.14)は対象とする要素間の要素座標軸回りの回転角を意味し、たとえば式(2.7.12)の値が0となる時、対象とする部材間のねじれ角(x 軸回りの回転角)は0、式(2.7.13)、(2.7.14)の値が0となる時、対象とする部材間の面内(z 軸回り回転角)、面外方向(y 軸回り回転角)の曲率は生じない。 z 軸座標ベクトルに強軸方向に向けたH形鋼を例とした場合、各回転角は図2.8の通りとなる。また、計算上式(2.7.12)－(2.7.14)の値が0とならなくても、製作上吸収できる回転角の閾値が設定できれば、評価関数を制約条件として扱うことが可能となる。ここで、製作誤差の管理精度値をねじれ・曲率の有無を定量的に評価する式(2.7.12)－(2.7.14)の制約値として利用する。表2.3に文献[2.9]にて規定されている鉄骨部材の製作管理値を示す。表2.3は柱のねじれと、曲がり角度に対する管理許容値・限界許容値を示したものである。この表より各管理値は回転角により生じる変位量の絶対値で定義されている。表2.3の各許容値を式(2.7.12)－(2.7.14)に代入すると次式を得る。

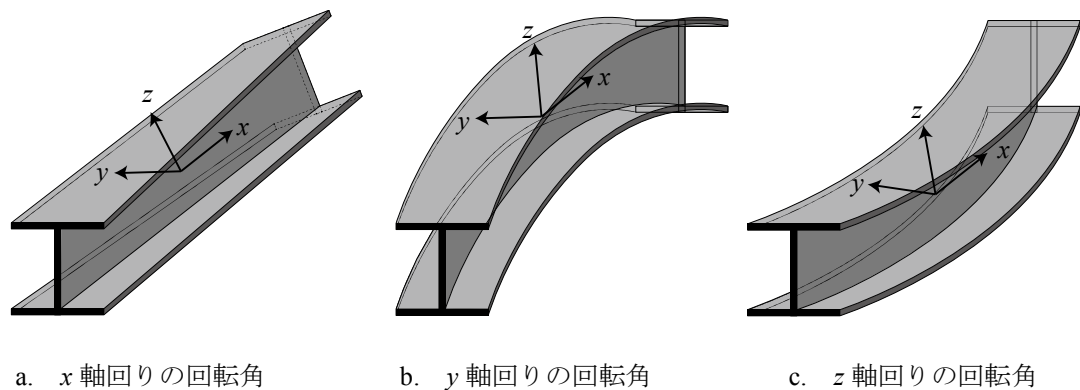
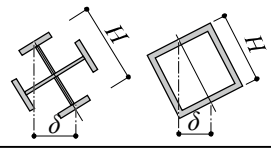
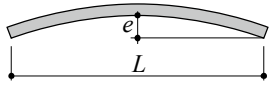


図2. 8 H形鋼における回転角の定義

表2. 3 鉄骨製作における許容値^[2.9]

図	管理許容値	限界許容値
柱のねじり 	$\delta_1 \leq 6H/1000$ かつ 5.0 mm	$\delta_1 \leq 9H/1000$ かつ 8.0 mm
柱の曲がり 	$e_1 \leq L/1000$ かつ 10.0 mm	$e_1 \leq 1.5L/1000$ かつ 15.0 mm

x 軸回りの回転角の制約値の定義

$$\begin{aligned}\theta_{x1} &= \tan^{-1}\left(\frac{\delta_{x1}}{L}\right) & \theta_{x2} &= \tan^{-1}\left(\frac{\delta_{x2}}{L}\right) \\ \bar{t}_{x1} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{x1} & \bar{t}_{x2} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{x2}\end{aligned}\quad (2.7.15a,b)$$

y 軸回りの回転角の制約値の定義

$$\begin{aligned}\theta_{y1} &= \tan^{-1}\left(\frac{e_{y1}}{L}\right) & \theta_{y2} &= \tan^{-1}\left(\frac{e_{y2}}{L}\right) \\ \bar{t}_{y1} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{y1} & \bar{t}_{y2} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{y2}\end{aligned}\quad (2.7.16a,b)$$

z 軸回りの回転角の制約値の定義

$$\begin{aligned}\theta_{z1} &= \tan^{-1}\left(\frac{e_{z1}}{L}\right) & \theta_{z2} &= \tan^{-1}\left(\frac{e_{z2}}{L}\right) \\ \bar{t}_{z1} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{z1} & \bar{t}_{z2} &= 2.0 - 2.0 \cos \theta_{z2}\end{aligned}\quad (2.7.17a,b)$$

ここで、 δ_{x1} , δ_{x2} :表2.3に対応する x 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値, e_{y1} , e_{y2} : 表2.3に対応する y 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値, e_{z1} , e_{z2} : 表2.3に対応する z 軸回り回転角により生じる変位の管理許容値及び限界許容値, θ_{x1} , θ_{y1} , θ_{z1} :管理許容値における各軸回りの部材角, θ_{x2} , θ_{y2} , θ_{z2} : 限界許容値における各軸回りの部材角, \bar{t}_{x1} , \bar{t}_{x2} : 管理許容値及び限界許容値における式(2.7.12)の値, \bar{t}_{y1} , \bar{t}_{y2} : 管理許容値及び限界許容値における式(2.7.13)の値, \bar{t}_{z1} , \bar{t}_{z2} : 管理許容値及び限界許容値における式(2.7.14)の値を示す。これらの式より式(2.7.12)－(2.7.14)に用いる制約式は以下のように与える。

$$\begin{aligned}\frac{1}{n''} \sum_{i=1}^{n''} t_x &\leq \bar{t}_{x1} & t_{x\max} &\leq \bar{t}_{x2} \\ \frac{1}{n''} \sum_{i=1}^{n''} t_y &\leq \bar{t}_{y1} & t_{y\max} &\leq \bar{t}_{y2} \\ \frac{1}{n''} \sum_{i=1}^{n''} t_z &\leq \bar{t}_{z1} & t_{z\max} &\leq \bar{t}_{z2}\end{aligned}\quad (2.7.18a,b,c)$$

ここで、 n'' :回転角の検討を行う接続点数, t_x , t_y , t_z : i 点における式(2.7.12)－(2.7.14)の値, $t_{x\max}$, $t_{y\max}$, $t_{z\max}$: 全接続点における式(2.7.12)－(2.7.14)の最大値を示す。なお、管理許容値は全ての接続点の評価関数の平均値、限界許容値は全ての接続点の評価関数の最大値である。制約式(2.7.18a, b, c)を満足するとき、対象とする方向の回転角は0とみなす。



－第3章 構造最適化手法と最適化問題の定式化－

構造最適化問題の定式化を述べる。単一・多目的最適化問題の定式化を示し、各最適化問題における解の説明を示す。また、本研究で用いるGA系解法の位置づけ及びその計算アルゴリズムを説明する。

－第3章－

構造最適化手法と最適化問題の定式化

3. 1 最適化問題の定式化

構造設計における最適化問題は最適設計問題 (optimum design problem) あるいは構造最適化問題 (structural optimization problem) と呼ばれる。構造最適化問題はその評価尺度を目的関数 (objective function), 設計条件を制約条件 (constraints) とし、最適化問題を解いて決定されるべき変数である設計変数 (design variable) を最適化する。ここに構造最適化問題は次式で定式化される^[3.1]。

$$\text{設計変数: } \mathbf{A} = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ \dots \ A_p]^T \quad \mathbf{R} = [R_1 \ R_2 \ R_3 \ \dots \ R_s]^T \quad (3.1.1)$$

$$\text{目的関数: } \Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \rightarrow \max \text{ or } \min \quad (3.1.2)$$

$$\text{制約条件: } g_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3.1.3)$$

$$h_k(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, l) \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (3.1.5)$$

ここで、 \mathbf{A} :断面情報ベクトル, \mathbf{R} :節点情報ベクトル, $\Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R})$:目的関数群, $g_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq 0$:不等式制約条件, $h_k(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 0$:等式制約条件, \mathbf{R}^L :節点情報ベクトルの側面制約の下限值, \mathbf{R}^U :節点情報ベクトルの側面制約の上限値, \mathbf{A}^L :断面情報ベクトルの側面制約の下限值, \mathbf{A}^U :断面情報ベクトルの側面制約の上限値を表す。

構造最適化問題では制約条件として力学的な制約条件と意匠的な制約条件、製作性・施工性を考慮した制約条件を設ける。一般に、力学的な制約条件は許容応力度設計に基づく応力制約であり不等式制約条件に分類される。構造物に荷重が作用したときの*i*部材の応力を σ_i とすると、応力制約は次式で与えられる。

$$\sigma^L \leq \sigma_i \leq \sigma^U \quad (\text{応力制約}) \quad (3.1.6)$$

ここで、 σ^L :許容応力の下限值(圧縮応力), σ^U :許容応力の上限値(引張応力)を表す。意匠的な制約条件は空間を形成するために構造物が内包すべき容積や高さの制約, 部材配置の制約であり、不等式制約条件と等式制約条件の両方に分類される。製作・施工性に関する制約条件は不等式制約条件として与える。詳細は第2章を参照されたい。

これらの全ての制約条件を満たす解を許容解(feasible solution)、制約条件を一つでも満たさない解を非許容解(non-feasible solution)と呼び、目的関数を最も最大化あるいは最小化する解を最適解(optimal solution)と呼ぶ。また、トラスやラーメン架構, 鉄骨格子シェル架構の構造最適化問題において、節点座標や部材配置を設計変数として最適な形態を求めることを形状最適化(shape optimization)、最適な部材配置を求めることを位相最適化あるいはトポロジー最適化(topology optimization)と呼ぶ。図3.1に離散系構造の形状最適化と位相最適化の概念図を示す。これらの構造物の最適化は通常以下の最適化問題の形式をとることが多い。

(a) **重量最小化**：応力やひずみエネルギー等の剛性を表す力学的な特性量に関する制約の下で、部材総体積や重量を最小化する。

(b) **剛性最大化**：部材総体積や重量に関する制約の下で、ひずみエネルギーやコンプライアンス, 最大節点変位等の全剛性を定める力学的な量を最大化あるいは最小化する。

本研究は、第2章で説明した最適設計法を基に、第5章以降の各数値解析例では設計上の要求条件から上記に示す目的関数に加え、問題に応じた目的関数の設定や設計変数の設定方法、最適化問題の定式化を示す。

3. 2 単一目的最適化問題

式(3.1.1)－(3.1.5)に示した最適化問題において、目的関数が次式に表す一つである場合、これを単一目的最適化問題(single objective optimization problem：SOP)と呼ぶ。

$$\text{目的関数：}\Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R})=f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \rightarrow \max \text{ or } \min \quad (3.2.1)$$

したがって、単一的最適化問題は式(3.1.2)－(3.1.5)に示す不等式制約, 等式制約, 側面制約条件下で、1個の目的関数を最大化あるいは最小化する部材断面ベクトル, 節点情報ベクトルを求める問題である。

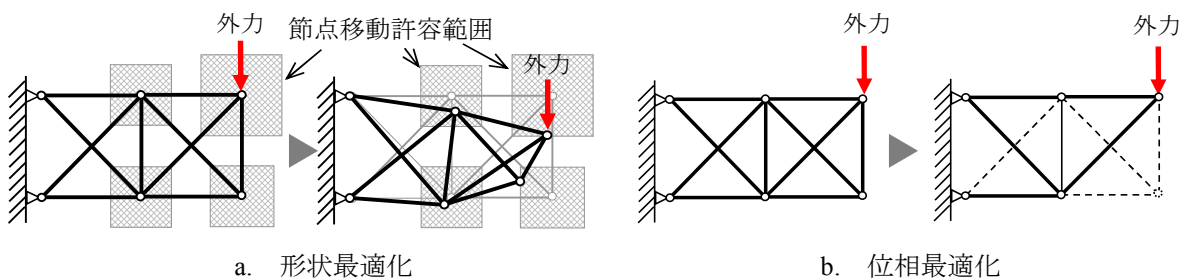


図3. 1 離散系構造における形状最適化と位相最適化

3. 3 単一目的最適化における解の定義

単一目的最適化問題の場合、目的関数を最大化あるいは最小化する解は唯一の許容解であり、これを大域的最適解(global optimal solution)という。また、解空間が多峰性を有する場合には局所的に優れた解が存在し、これを局所最適解(local optimal solution)という。また、本研究はこの二つの解と、大域的最適解と局所最適解の近傍に存在する比較的評価の高い解を含めて単一目的最適化における優良解と定義する。

優良解の定義： 大域的最適解を含む局所最適解やその近傍に存在する比較的評価の高い解を優良解と定義する。

図 3.2 に 2 次元空間上での各解の概念図を示す。なお、設計変数が複数存在する場合は、解空間を視覚的に把握することが困難である。そのため、既往解法で得られた大域的最適解や局所最適解との比較や、得られた解を初期形状としその近傍の解を探索することで、どの解に位置づけられるかを判断する必要がある。

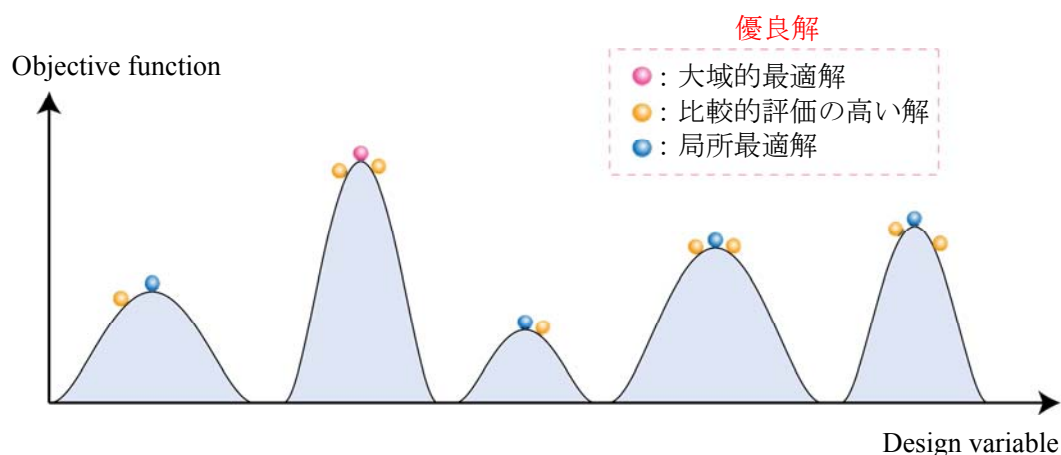


図 3. 2 設計変数空間上の解の関係（単一目的最適化）

3. 4 多目的最適化問題

式(3.1.1)－(3.1.5)に示した最適化問題において、目的関数が次式に表す複数設定された場合、これを多目的最適化問題(multi-objective optimization problem：MOP)と呼ぶ。

$$\text{目的関数：}\Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \{f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \ f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \ f_3(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \ \dots \ f_n(\mathbf{A}, \mathbf{R})\} \rightarrow \max \text{ or } \min \quad (3.4.1)$$

したがって、多目的最適化問題は式(3.1.2)－(3.1.5)に示す不等式制約, 等式制約, 側面制約条件下で、 n 個の目的関数を同時に最大化あるいは最小化する部材断面ベクトル, 節点情報ベクトルを求める問題である。

3. 5 多目的最適化における解の定義

多目的最適化問題は、一般に複数の目的関数を同時に最大化(最小化)する完全最適解は存在せず、目的関数には相反関係(トレードオフ)があることが多い。そのため、許容解と非許容解の境界線上に存在している解に高い評価を与える。この解をパレート最適解(pareto optimal solution)又は非劣解と呼ぶ。パレート最適解は目的関数空間における解の優越関係を用いて定義される。優越関係は以下で定義される。

優越関係の定義： $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 (\mathbf{x}_i = [\mathbf{A}_i, \mathbf{R}_i]^T)$ において、

- a) $f_k(\mathbf{x}_1) \leq f_k(\mathbf{x}_2)$ の時、 \mathbf{x}_1 は \mathbf{x}_2 に優越するという。
- b) $f_k(\mathbf{x}_1) < f_k(\mathbf{x}_2)$ の時、 \mathbf{x}_1 は \mathbf{x}_2 に強い意味で優越するという。

これよりパレート最適解は次のように定義される。

パレート最適解の定義： \mathbf{x}_0 において、

\mathbf{x}_0 に優越する \mathbf{x}_i が存在しない場合、 \mathbf{x}_0 をパレート最適解という。

さらに、b)を満たす \mathbf{x}_i が存在しない場合、 \mathbf{x}_0 を弱パレート最適解(weak pareto optimal solution)という。多目的最適化問題では、パレート最適解が無数に存在し、これらの解によって超曲面を構成する。これをパレート最適フロント(pareto optimal front), 真のパレートフロント(true pareto front)又は非劣解集合と呼ぶ。図3.3に目的関数を2つ設定した場合の最小化を目標とした多目的最適化問題における目的関数空間上の解の概念を示す。図3.3においてグレーにハッチングされた部分が許容解が存在する範囲であり、パレート最適フロントは図3.3青線の位置である。多目的最適化問題において局所最適解の存在は否定できないが、 n 次元の解空間が把握できないと局所的に優れた解

かどうかの判断ができない。ただし、パレート最適フロント以外の解集合による超曲面が構成されることは多く、これを局所パレートフロント(local pareto front)と定義し、局所パレートフロントを構成している解を局所パレート最適解(local pareto optimal solution)と定義する^[3,2]。

さらに多目的最適化問題における優良解を定義すると以下ようになる。

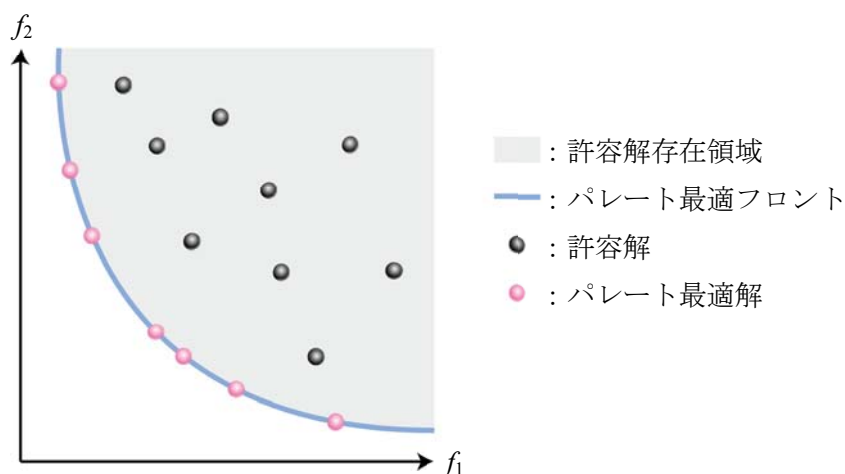


図3. 3 許容解とパレート最適解 (多目的最適化 $n=2$)

優良解の定義 : パレート最適解を含む局所パレート最適解やその近傍に存在する比較的評価の高い解, 局所的に評価の高い解を優良解と定義する。

図3.4に2次元目的関数空間上での優良解の概念図を示す。なお、図3.4は目的関数の最小化を目標としている。

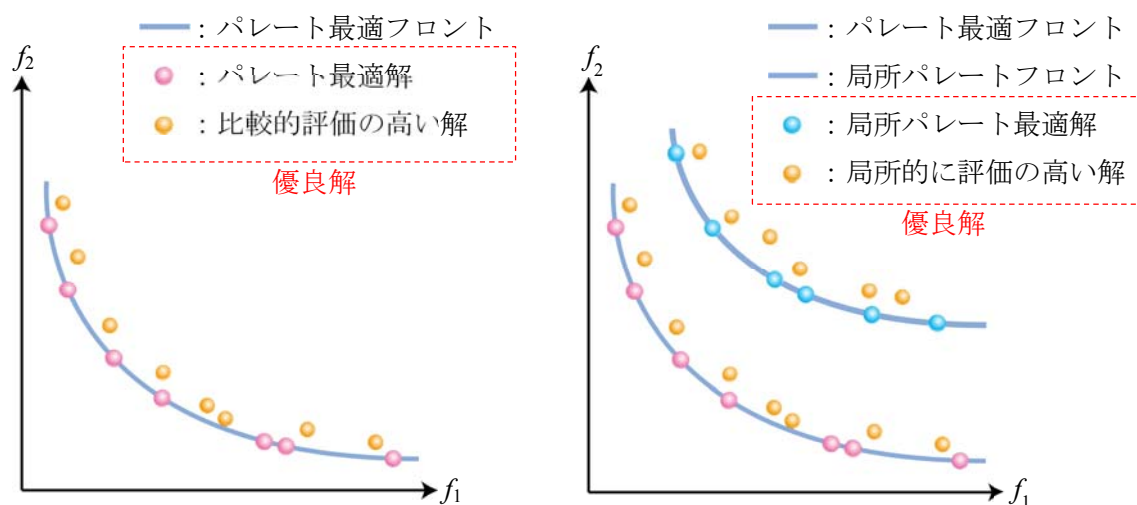


図3. 4 多目的最適化における優良解 ($n=2$)

3. 6 構造形態創生における解探索手法の分類

構造形態創生における最適化は目標値や力学的な条件を目的関数とし、与えられた設計条件を満たす構造形態の部材配置及び断面を決定する作業である。また、構造形態創生問題では、問題内容により評価尺度を必ずしも最大値あるいは最小値(大域最適解)にとる必要もなく、許容解であれば局所最適解も含む、比較的評価の高い解(優良解)を設計解(解形態)と決めてもよい。つまり、問題の要求内容により大域的最適解だけが必要なのではなく、大域最適解や局所最適解およびそれらの近傍を含む許容解で比較的評価の高い多様な形態を獲得し、積極的にそれらを活用することが重要である。建築物へ構造形態創生法を適用させる場合、定式化式(3.1.1)-(3.1.5)を通常最適化問題として扱うので、何らかの解を探索する計算手法(最適化アルゴリズム)が必要となる。構造形態創生に対する最適化アルゴリズムにはすべての問題に対応した万能な計算技術がなく、問題に応じたあるいは得られる解の評価の捉え方により、従来ある計算法を選択するもしくは新たにアルゴリズムの開発が必要である。本研究は、建築物の構造形態創生における解探索法を次の3つに分類する^{[3.3], [3.4]}。

- a) 数理計画法 (mathematical programming)
- b) 発見的手法 (heuristic procedure)
- c) 単純繰り返し計算法 (optimality criteria method)

この中でも、数理計画法と発見的手法は原則、大域的最適解を探索する手法である。

数理計画法の中でも非線形計画法は、一般に初期値を基準に感度係数に基づき、双方向の増分を繰り返すことで大域的最適解に到達させる手順であり、逐次線形計画法や逐次2次計画法が一般的に用いられている。

発見的手法は、初期値を生成し、大域的最適解の方向を探らない手順(欲張り法 (greedy method)、局所探索法 (local search) を拡張した方法など)により解を修正し、繰り返し計算を通して順次評価の高い解を暫定解とする。計算終了時の暫定解が近似的な大域的最適解である。代表的な手法には、多点探索で生物の進化の過程を工学的に模倣したGAや群れの行動をモデル化した群知能^{[1.18], [3.5], [3.6]}、単点探索の疑似焼きなまし法 (simulated annealing : SA) などがある。なお、本研究で用いる遺伝的アルゴリズム系解法は発見的手法に分類される。発見的手法はヒューリスティック (heuristics) と呼ばれ、発見的手法を組み合わせて構成される手法をメタヒューリスティック (meta-heuristics)、あるいはメタ戦略 (meta-strategy) と呼ぶ。この他にもランダム探索、多点局所探索、タブー探索などがある。

単純繰り返し計算法 (optimality criteria method) は全応力設計 (fully stressed design : FSD) に代表され、単純な操作の繰り返しによる計算手順である。ただし、これは必ずしも大域的最適解を探索する計算手順ではなく、得られる解は一種の優良解である。また、最適性基準法は数理計画法に

含めて考えることもできるが、ここでは構造形態の創生特有の解法に関わる手順分類に利用するため分けている。なお、汎関数の極値問題では、有限要素法 (finite element method:FEM) に代表される通常の離散化数値計算技術により優良解を得る。この解法に分類されるセルオートマトン法 (cellular automata:CA), ESO (evolutionary structural optimization) 法, 拡張ESO法は同一構造モデルの解析において種々の優良解が得られている^[3.1]。

3. 7 本研究で用いる GA 系解法

本研究は構造形態創生に関する研究を以下の二つの内容に大別する。

- (1). ある力学制約下で、目標形状を探索する方法。
- (2). 設計者の意匠的側面を制約条件として、構造形態を探索する方法。

(1)は張力構造に代表されるように、力学的な諸条件の中で目標形状を得るための裁断図解析や、釣り合い形状を求める初期形状解析に相当する。これらの構造は張力材の特性である張力導入により構造剛性が得られるため、設計原型曲面の決定が重要な意味を持ち、汎関数の極値問題とする形状解析 (shape finding analysis) 等が研究されている^{[3.7], [3.8]}。(2)は一般構造の形態創生に関係し、意匠設計者や建築主の求める建築像を制約条件として力学的観点及びその他の観点から構造形態を創生しようとする方法である。本研究では意匠性の考慮の仕方により、さらに②の方法を以下の二つに小分類する。

(2)-1. 設計者の指定する形状(デザイン)を基に、その近傍で力学的に優れた構造形態を探索する方法。

(2)-2. 与えられた設計領域内で設計条件及び力学条件を満足する構造形態を探索する方法。

(2)-1は現在、実設計で一般的に用いられている構造形態創生法の活用方法であり、基本計画の次のステップとして行われていることが多い。この方法を用いた構造形態創生の実例として、アイランドシティ中央公園(意匠設計：伊藤豊雄, 構造設計：佐々木睦朗)や北方町生涯学習センターきらり(意匠設計：磯崎新, 構造設計：佐々木睦朗)がある。これらはいずれも設計者がイメージする形態の近傍で形状, 開口部の修正を行い、意匠性を考慮した構造形態の最適化を行っている。これに対し、(2)-2は基本計画段階で意匠設計者の発想支援を行おうとする観点から行われるアプローチであり、設計領域内に無から有を創生する考え方である^{[3.9], [3.10]}。この時、(2)-2の立場において設計条件を満たす多種多様な構造形態が提示できれば、意匠設計の幅を広げより自由な建築形態実現の可能性が広がる。

以上より、構造形態創生法の活用はどのような目的で構造形態創生法を利用するかにより、異なるアプローチが必要であり、利用する解の探索範囲も異なる。本研究は数値計算例の設定条件により(2)-1と(2)-2の考えを適宜使い分けることで問題に応じた解法の選択を行う。

以下の項では本研究で用いる GA 系解法の計算アルゴリズムとその特性について説明する。

3. 7. 1 SGA

自然界では生物同士の激しい生存競争が行われている。より環境に適合した生物は生き残り、適合できない生物は死滅する。また、生き残った生物は同一種の生物集団の中で生殖活動を行い、次世代へ遺伝子を受け継がせていく。つまり、生存競争に勝利した生物のみ自分の遺伝子を残すことができ、生存競争に敗れた生物の遺伝子は次世代に受け継がれることなく消滅する。優れた親同士により生まれた子は優れた親の遺伝子を受け継ぎ、生存環境下において適合性はより高いものになる。また、突然変異により優れた生物が生まれる可能性もある。こうして、生物集団の中で優秀な遺伝子は繁栄し、環境に適さない遺伝子は淘汰されることで生物集団の進化が行なわれる。遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm : GA) はこのDarwinの進化論に基づく生物集団の環境に対する適応的な進化の過程を工学的に模倣した演算システムである。

以下にSGA^[3.11]の基本的なアルゴリズムを説明する。図3.5にSGAの計算フローを示す。なお、ここでは目的関数の最小化問題を対象とする。

1) 初期個体群の生成

乱数を用いて初期個体群 $\mathbf{P}_0 = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_n\}$ を生成する。なお、本研究では個体群を0と1の配列で構成される二進数型で表現し、これを実数に変換する。

2) 各目的関数の計算

集団内にある各個体の目的関数 $f_k(\mathbf{x}_i)$ ($k=1, 2, 3, \dots, l$, $i=1, 2, 3, \dots, n$)を計算する。

3) 適応度の算定

算出した目的関数に基づき、各個体に適応度を与える。ここでは目的関数そのものを適応度として扱う。つまり、目的関数値が小さいほど優れた適応度が与えられる。

4) 次世代個体群の生成

算出した適応度を基に次世代の個体群を生成する。生成手順は以下の手順で行う。

①**個体の選択**：算出した適応度に基づき次世代に反映させる親個体の選択を行う。適応度が高い優秀な個体は高い確率で次世代に反映され、反対に適応度の低い個体はここで淘汰される。個体の選択方法は後述するルーレット方式とトーナメント方式に大別される。

②**交叉・突然変異**：選択した親個体に遺伝子操作として交叉・突然変異を行い次世代個体群を生成する。

以上 1)–4) までの操作を指定した世代数行い個体の進化と淘汰を繰り返す。なお、1)の操作は初期世代のみ行い、その後は2)–4)までの操作を1ループとして繰り返す。

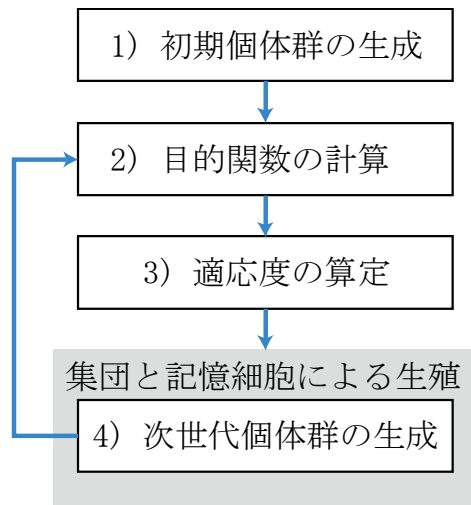


図3. 5 SGA 計算フロー

3. 7. 2 SPEA2

SPEA2 は優越の関係に基づく新たな適応度割り当てとエリート戦略的な考えであるアーカイブ個体群(非劣解集合)の保存、目的関数空間上でのクラスタリングによる解の多様性を維持した解法出である。従来の解法である SPEA に改良を加えた適応度割り当てとアーカイブ個体群(非劣解集合)の新たな選択法導入により優れた探索性能を持つ。特にアーカイブ個体群の選択に用いられる端切り法は混雑ソートやクラスタリングより妥当性の高い方法である。図 3.7 に計算フローを示す。

1) 初期個体群の生成

乱数を用いて初期個体群 $\mathbf{P}_0 = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_n\}$ を生成する。

2) 各目的関数の計算

集団内にある各個体の目的関数 $f_k(\mathbf{x}_i)$ ($k=1, 2, 3, \dots, l$, $i=1, 2, 3, \dots, n$) を計算する。

3) 適応度の計算

算出した目的関数に基づき個体強度 s を次式で算定する(図3.6a)。

$$s(i) = \{j \mid f_k(\mathbf{x}_i) \leq f_k(\mathbf{x}_j), k=1, 2, \dots\} \quad (3.7.1)$$

各個体の適応度 F は集団に支配される個体の強度 s を用いて次式で与えられる(図3.6b)。

$$F(i) = \sum_{f_k(\mathbf{x}_i) > f_k(\mathbf{x}_j)} s(j) \quad (3.7.2)$$

なお、SPEA2の適応度割り当てにおいて最も優れた個体の適応度は $F=0$ となる。

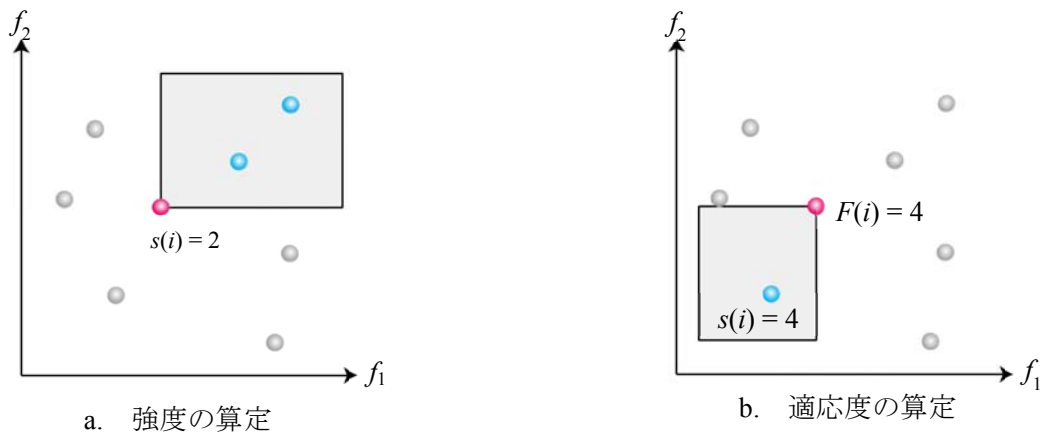


図 3. 6 SPEA2 の適応度割り当て

4) アーカイブ個体群(非劣解集合)の保存

適応度 $F=0$ の個体をアーカイブ個体群候補 $\tilde{\mathbf{P}}_t$ とし、アーカイブ個体群 $\bar{\mathbf{P}}_t$ に保存する。アーカイブ個体群内の個体数が設定数を超える場合、後述する端切り法を用いて個体数の調整を行う。

5) 次世代個体群の生成

算定した適応度に基づき母集団とアーカイブ個体群内から選択・交叉・突然変異を行い、次世代個体群を生成する。

以上1)－5)がSPEA2の計算アルゴリズムである。2)－5)は指定した世代数まで繰り返す。

端切り法

アーカイブ個体群の個体数が設定した数を上回る場合、解の多様性を考慮した端切り法を用いて個体数の調整を行う。以下にその流れを示す。

1) アーカイブ個体群内において、目的関数空間上で全ての個体間距離 d を算出し、最も近接する2個体 i, j を探索する。個体間距離は無次元ユークリッド距離を用い次式で算出する。

$$d(i, j) = \sum_{k=1} \left(\frac{f_k(\mathbf{x}_i) - f_k(\mathbf{x}_j)}{f_{k\max} - f_{k\min}} \right)^2 \quad (3.7.3)$$

2) さらに、2個体 i, j にそれぞれ隣接する個体 k, l を探索する。

3) 個体間距離 $d(i, k)$, $d(j, l)$ を比較し、近い方の個体を削除する。

以上1)－3)の操作を設定個体数になるまで繰り返す。

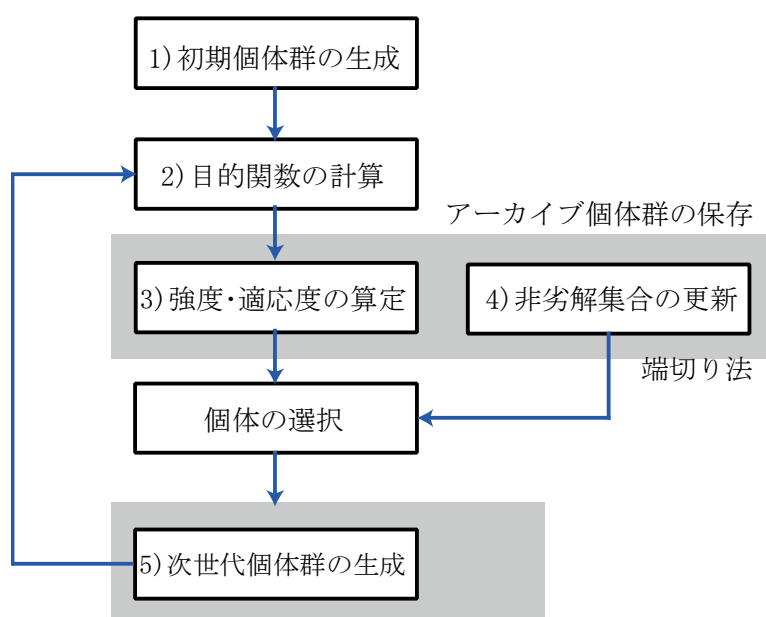


図3. 7 SPEA2の計算フロー

3. 7. 3 ISGA

ISGAは多点探索解法である遺伝的アルゴリズム系解法であり、基本的なフローは従来のGA系解法に即している。加えて、本解法は従来のGA系解法で設定するパラメータの他に、新たにグループ数 r 、上位個体選択率 H 、記憶細胞数(アーカイブ個体群) M の3つのパラメータを導入している^[3,12]。以下にその計算アルゴリズムを示す。なお、ここでは目的関数の最小化問題を対象に説明する。計算フローを図3. 8に示す。

1) 初期個体群の生成

乱数を用いて初期個体群 $\mathbf{P}_0 = \{ \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_n \}$ を生成する。ただし、 \mathbf{x}_i : 個体 i の部材断面、節点情報などの設計変数ベクトル($\mathbf{x}_i = [\mathbf{A}_i \ \mathbf{R}_i]^T$, \mathbf{A}_i : 部材断面、板厚、密度などの断面情報ベクトル, \mathbf{R}_i : 節点情報ベクトル)である。

2) 各目的関数の計算

集団内にある各個体の目的関数 $f_k(\mathbf{x}_i)$ ($k=1, 2, 3, \dots, l$, $i=1, 2, 3, \dots, n$)を計算する。

3) 適応度 $F(i)$ の算定

以下の手順を用いて適応度を算定する。

3)-1 個体が集団内で支配される個体数 $S(i)$ を算定する(強度の算定)。

強度算定はMOGAに用いられているパレートランキング方式を採用している。まず、第 t 世代での母集団 \mathbf{P}_t と後述する $\hat{\mathbf{P}}_{t+1}$ を含む集団内の要素 i に対して、次式を満たす集合 $Q(i)$ を定義する。

$$Q(i) = \{ j | (f_k(\mathbf{x}_j) \leq f_k(\mathbf{x}_i), k=1, 2, 3, \dots, l), i \in \mathbf{P}_t, j \in \mathbf{P}_t \cup \hat{\mathbf{P}}_t \} \quad (3.7.4)$$

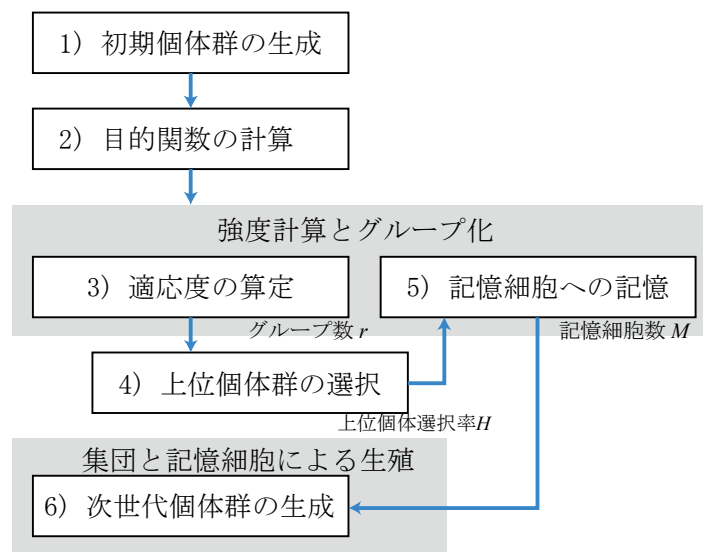


図3. 8 ISGA 計算フロー

図3. 9aにパレートランキング方式による強度算定例を示す。これより強度 $S(i)$ は次式で算定される。

$$S(i) = |Q(i)| \quad (3.7.5)$$

3)-2母集団と記憶細胞内の個体群を後述するグループ $G_s (s=1, 2, 3, \dots, r)$ に分ける。

3)-3個体 i が同一グループ内で支配される個体の強度を次式のように合計し、適応度 $F(i)$ とする。

$$F(i) = \sum_{\bigwedge_{k=1}^l f_k(\mathbf{x}_i) \geq f_k(\mathbf{x}_j)} s(j) - \sum_{\bigwedge_{k=1}^l f_k(\mathbf{x}_i) = f_k(\mathbf{x}_j)} s(m) \quad \left(i \in \mathbf{P}_t; i, j, m (i \neq m) \in_{G_s} \mathbf{P}_t (\equiv \mathbf{g}_s) \subset (\mathbf{P}_t \cup \hat{\mathbf{P}}_t) \right) \quad (3.7.6)$$

ここで、 $_{G_s} \mathbf{P}_t$: グループ G_s に属する母集団と記憶細胞内の個体群, $\bigwedge_{k=1}^l$: 論理記号であり、 $l=2$ の時次式となる。

$$\bigwedge_{k=1}^2 A_k = A_1 \cap A_2 \quad (3.7.7)$$

図3. 9bに適応度の算定例を示す。

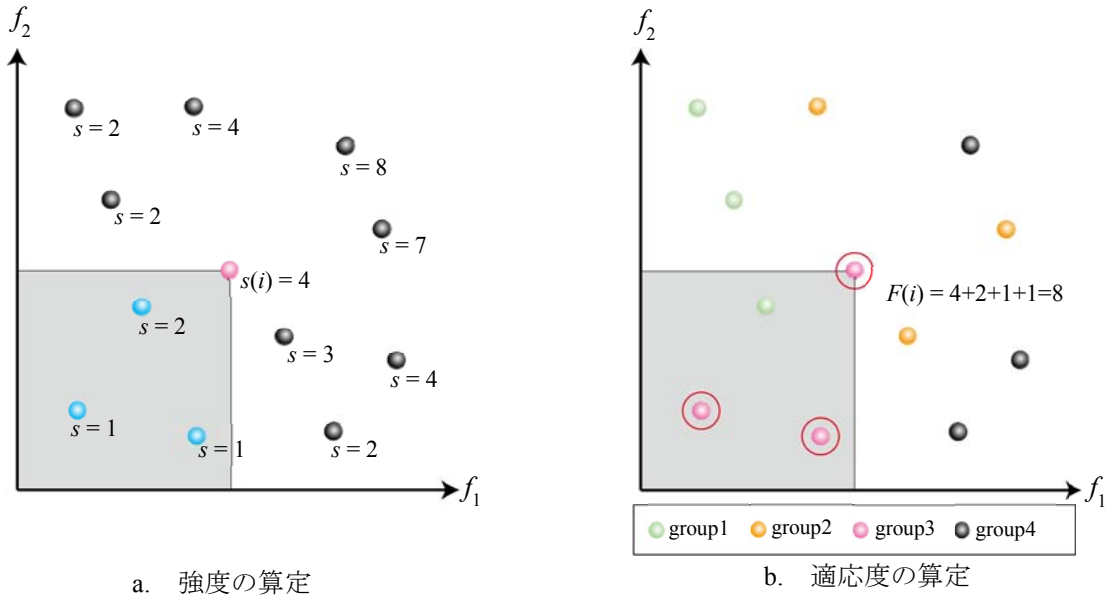


図3. 9 強度・適応度の算定

4) 記憶細胞候補の選択

算定した適応度に基づき、集団 \mathbf{P}_t の中から適応度が高い上位 H (上位個体選択率)の個体を記憶細胞候補 $\tilde{\mathbf{P}}_t$ とする。

5) 記憶細胞への記憶

記憶細胞候補 $\tilde{\mathbf{P}}_t$ と記憶細胞 $\hat{\mathbf{P}}_t$ (暫定非劣解集合)を統合し、新たな記憶細胞 $\hat{\mathbf{P}}_{t+1}$ とする。この時、記憶細胞の個体数が記憶細胞数 M を超える場合、後述する設計変数空間上での端切り法により個体を削除する。この操作は記憶細胞の個数が設定数 M になるまで繰り返し行う。なお $t=0$ の時、記憶細胞 $\hat{\mathbf{P}}_0$ は空集合である。

6) 次世代個体群の生成

求めた適応度に基づき、母集団 \mathbf{P}_t と記憶細胞 $\hat{\mathbf{P}}_{t+1}$ から次世代個体群 \mathbf{P}_{t+1} を生成する。

以上1)－6)までの操作がISGAの計算アルゴリズムである。なお、1)は初期世代のみ行い、以後2)－6)の手順を1ループとして指定された世代数まで繰り返し計算する。また、手順6)ではSGA同様の更新方法である世代交代率, 交叉, 突然変異の操作を行う。

3. 7. 3. 1 クラスタリングの導入

ISGAは適応度を算出する際、設計変数空間上で個体間距離が近い個体同士でグループを形成し、局所的に優れた個体に高い評価を与える。以下にその計算手順を示す。図3.10に設計変数空間と目的関数空間におけるグループと個体の位置関係を2次元($\mathbf{x}=[x_1 \ x_2]$), $\Phi=\{f_1, f_2\}$)で示す。

1) 集合の定義

グループ G_s の各個体 $\beta_k(k=1, 2, 3, \dots, k_l)$ を要素とする集合 \mathbf{g}_l とその個体数 k_l を次のように定義する。

$$\mathbf{g}_l = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{k_l}\} \quad k_l = |\mathbf{g}_l| \quad (3.7.8)$$

2) 集合間距離の計算

設計変数空間において、全ての集合距離 $d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_n)$ を次式で計算する。

$$d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_n) = \frac{1}{k_m \cdot k_n} \sum_{i \in \mathbf{g}_m, j \in \mathbf{g}_n} d(i, j) \quad (3.7.9)$$

ここで、 $d(i, j)$: 個体 i と個体 j の設計変数空間上で無次元化したユークリッド距離である。

3) 集合の統合

設計変数空間上で最短距離を持つ2つの集合を同一集合として統合し、2)に戻る。この操作はグループ数が設定された数 r になるまで繰り返し行う。

以上に示す1)－3)がクラスタリングの計算手順である。初期値は1個体1グループから始まる。なお、指定されたグループ数が1の場合($r=1$)、適応度算定は絶対評価である。

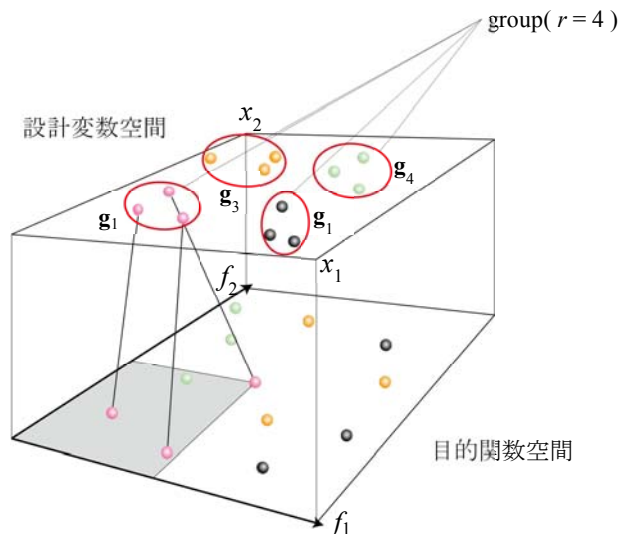


図3. 10 強度・適応度の算定

3. 7. 3. 2 設計変数空間上での端切り法

記憶細胞候補 $\hat{\mathbf{P}}_t$ と記憶細胞 $\hat{\mathbf{P}}_t$ の和が設定数 M を超える場合、設計変数空間上での端切り法 (archive truncation method) により個体の削除を行う。この方法はニッチ操作 (niche: 生態的地位) として行う。

SEPA2 や GA 系解法のほとんどが目的関数空間上でニッチ操作を行っているのに対し、ISGA は設計変数空間上でニッチ操作を行う。これは、形態決定に重要である設計変数空間上での解の多様性を維持するためである。また、目的関数空間上の一点において存在する解は一つだけとは限らず、複数存在すると考えられる。そのため、形態決定の解探索を行う際は目的関数空間の一点において設計変数の異なる複数の解が提示できることが望ましい。ただし、設計変数空間上での端切り法はエリート戦略に基づく操作でないため、目的関数空間上で解の位置をプロットした際、形成されたパレートフロントの解密度が均一にならない、パレート最適解であっても設計変数空間上での多様性の有無によって削除されてしまう可能性があることに注意する必要がある。



— 第4章 有限要素法の離散化と パラメトリック曲面による形状表現 —

数値計算を行うに当たり、骨組構造の離散化について示す。構造解析は有限要素法とし梁要素を用いる。また、本論では曲面と部材断面の表現及び製作・施工性に関する評価指標にパラメトリック曲面を採用する。これに際し、節点情報と要素情報に対応したパラメトリック曲面の定式化を示す。

－第4章－

有限要素法の離散化とパラメトリック曲面による形状表現

4. 1 梁要素の離散化定式化

本研究は骨組架構の構造形態創生を行う際、梁要素を用いた有限要素モデルにて構造解析を行う。以下に、梁要素の離散化定式化を示す。なお、構造解析は線形弾性範囲内である。

i) 軸方向変形に対する要素剛性マトリクス

図4.1に関して、梁の軸方向変位 u は以下の仮定を与える。

$$u = a_1 + a_2 x \quad (4.1.1)$$

ここで、 a_1, a_2 : 未定定数である。上式に局所座標系での節点座標を代入すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.1.2)$$

式(4.1.2)を未定定数について解くと次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/l & 1/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (4.1.3)$$

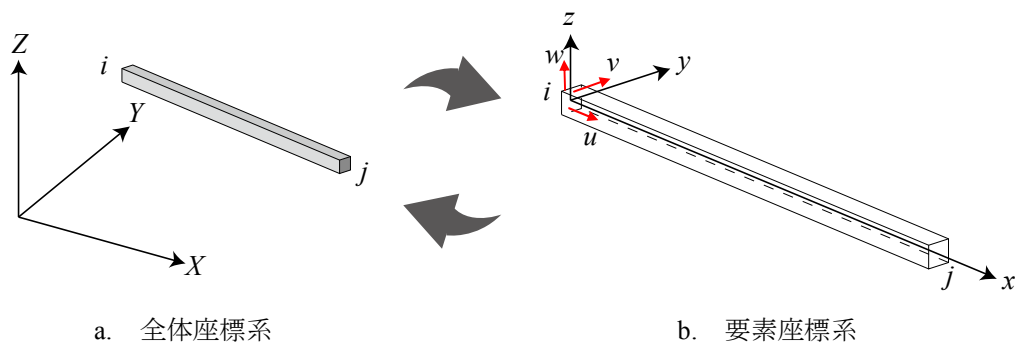


図 4. 1 梁要素の座標関係

式(4.1.3)を式(4.1.1)に代入すると、要素内の任意点の変位 u と軸方向節点変位の関係式が次式で得られる。

$$u = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{l} & \frac{x}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (4.1.4)$$

軸変形に対する応力-ひずみ関係は次式となる。

$$\begin{aligned} \sigma_e &= E \varepsilon_0 \\ \varepsilon_0 &= \frac{du}{dx} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.1.5)$$

ここで、 σ_e :要素軸応力, E :ヤング係数である。

以上より、離散化定式化を行う。構造モデルの線形平衡方程式(4.1.6)に式(4.1.4), (4.1.5)を代入すると次式の要素剛性マトリクスが得られる。

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \sigma d\Omega - \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f} = 0 \quad (4.1.6)$$

$$\mathbf{k}_{eu} \mathbf{u}_e - \mathbf{f}_e = 0 \quad (4.1.7)$$

$$\mathbf{k}_{eu} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.8)$$

ここで、 \mathbf{k}_{eu} :軸変形に対する要素剛性マトリクス, $\mathbf{u}_e = [u_i, u_j]^T$, \mathbf{f}_e :節点変位ベクトルに対応する軸力ベクトルである。

ii) 曲げ変形に対する要素剛性マトリクス

梁の曲げ変形に対する変位 v, w と回転角 θ_z, θ_y は梁の基礎式から以下に示す3次式で仮定する。

$$\begin{aligned} v &= b_1 + b_2x + b_3x^2 + b_4x^3 & w &= c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3 \\ \theta_z &= b_2 + 2b_3x + 3b_4x^2 & \theta_y &= c_2 + 2c_3x + 3c_4x^2 \end{aligned} \quad (4.1.9)$$

ここで、 $b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4$: 未定定数である。上式に局所座標系での節点座標を代入すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} v_i \\ w_i \\ \theta_{yi} \\ \theta_{zi} \\ v_j \\ w_j \\ \theta_{yj} \\ \theta_{zj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l & l^2 & l^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & l & l^2 & l^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2l & 3l^2 \\ 0 & 1 & 2l & 3l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (4.1.10)$$

式(4.1.10)を未定定数について解くと次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{l^2} & 0 & 0 & -\frac{2}{l} & \frac{3}{l^2} & 0 & 0 & \frac{1}{l} \\ \frac{2}{l^3} & 0 & 0 & \frac{1}{l^2} & -\frac{2}{l^3} & 0 & 0 & \frac{1}{l^2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{l^2} & -\frac{2}{l} & 0 & 0 & \frac{3}{l^2} & -\frac{1}{l} & 0 \\ 0 & \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & 0 & 0 & -\frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ w_i \\ \theta_{yi} \\ \theta_{zi} \\ v_j \\ w_j \\ \theta_{yj} \\ \theta_{zj} \end{bmatrix} \quad (4.1.11)$$

式(4.1.11)を式(4.1.9)に代入すると、要素内の任意点の変位と曲げ方向節点変位の関係式が次式で得られる。

$$v = \mathbf{N}_v \mathbf{w}_e \quad w = \mathbf{N}_w \mathbf{w}_e \quad \theta_z = \frac{d\mathbf{N}_v}{dx} \mathbf{w}_e \quad \theta_y = \frac{d\mathbf{N}_w}{dx} \mathbf{w}_e \quad (4.1.12)$$

ここで、各諸量は以下の通りである。

$$\mathbf{w}_e = [v_i \quad w_i \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \quad v_j \quad w_j \quad \theta_{yj} \quad \theta_{zj}]^T \quad (4.1.13)$$

$$\mathbf{N}_v = [N_1 \quad 0 \quad 0 \quad N_2 \quad N_3 \quad 0 \quad 0 \quad N_4] \quad \mathbf{N}_w = [0 \quad N_1 \quad N_2 \quad 0 \quad 0 \quad N_3 \quad N_4 \quad 0] \quad (4.1.14)$$

$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 \quad N_2 = \left(\frac{x}{l}\right) - 2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \left(\frac{x}{l}\right)^3 \quad N_3 = 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 \quad N_4 = -\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \left(\frac{x}{l}\right)^3$$

曲げ変形に対する応力-ひずみ関係は次のひずみを用いる。

$$\kappa_y = -y \frac{\partial v}{\partial x^2}, \quad \kappa_z = -z \frac{\partial w}{\partial y^2} \quad (4.1.15)$$

以上より、離散化定式化を行う。構造モデルの線形平衡方程式(4.1.6)に式(4.1.14), (4.1.15)を代入すると次式の要素剛性マトリクスが得られる。

$$\mathbf{k}_{eb} \mathbf{w}_e - \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (4.1.16)$$

$$\mathbf{k}_{eb} = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} \\ 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & \frac{4EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & \frac{4EI_y}{l} \\ \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\ -\frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & -\frac{12EI_y}{l^3} & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_y}{l^2} & \frac{2EI_y}{l} & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l} & -\frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad \text{SYM} \quad (4.1.17)$$

ここで、 \mathbf{k}_{eb} : 曲げ変形に対する要素剛性マトリクス, \mathbf{w}_e : 曲げ変形に関する節点変位ベクトル, I_z, I_y : 断面二次モーメントを表す。

iii)ねじれ変形に対する要素剛性マトリクス

梁要素の剛性マトリクスは前項で得られた梁要素の軸変形と曲げ変形に対する要素剛性マトリクスとねじれ変形に対する要素剛性マトリクスの重ね合わせにより構築される。ここでは、 x 軸周りのねじり変形に対してサンブナンねじり変形に関する以下の要素剛性マトリクスを用いる。

$$\mathbf{k}_{et} = \frac{GK}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.18)$$

ここで、 \mathbf{k}_{et} : ねじれ変形に対する剛性マトリクス, G : せん断弾性定数, K : サンブナンねじり定数である。

以上、式(4.1.8), (4.1.17), (4.1.18)の重ね合わせにより梁要素の要素剛性マトリクスは導出される。

$$\mathbf{K}_{eF} = \mathbf{k}_{eu} + \mathbf{k}_{eb} + \mathbf{k}_{et} \quad (4.1.19)$$

座標変換

梁要素の局所座標系と全体座標系の座標変換にはk節点法を採用する。梁要素の方向指定と同様に各要素にk節点という任意節点を全体座標系上に設定する。この時、局所座標系と全体座標系間の座標変換行列は次式となる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_x \\ \mathbf{t}_y \\ \mathbf{t}_z \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{t}_x = \frac{\vec{ij}}{|\vec{ij}|} \quad \mathbf{t}_z = \frac{\vec{ij} \times \vec{jk}}{|\vec{ij} \times \vec{jk}|} \quad \mathbf{t}_y = \mathbf{t}_z \times \mathbf{t}_x \quad (4.1.20)$$

ここで、 i, j, k : 梁要素の節点 i, j 及び k 節点を表す。以上より、 $i-j$ 方向に局所座標系の x 軸、 $i-k$ 方向に局所座標系の y 軸を定めた右手系直交座標軸が決定される。

4. 2 ベジェスプライン

曲面構造における有限要素法を用いた最適化は曲面形状を細かく離散化することから、膨大な設計変数を扱う必要がある。特に、発見的手法であるGAを用いた最適化は、設計変数に乱数を用いることから形状が滑らかな曲面に収束しにくい。そのため、曲面構造の最適化は一般にパラメトリック曲面を用いた形状表現を行う。パラメトリック曲面は複数の制御点と基底関数を用いて曲面を定義する。さらに、曲面上の任意位置ベクトルを求めることが可能であり、制御点を設計変数とすれば、大幅な設計変数の削減が可能である。本研究は、このパラメトリック曲面で用いられるスプライン関数の一つであるベジェスプラインによって曲面記述される方法を曲面と部材断面の表現に用いる^[4.1]。ベジェスプラインによる曲線, 曲面は端部を除き制御点を通らない。また、制御点は小区間を形成する結び目である節点とはならず、曲線, 曲面の形状を制御する結合係数として利用される。以下ではまず、2次元空間におけるベジェ曲線について述べ、その後3次元空間におけるベジェ曲面へと展開する。

4. 3 ベジェ曲線

ベジェ曲線はバーンスタイン基底関数と制御点を用いて定義される。曲線上の任意節点座標は位置情報パラメータ $t \in [0.0, 1.0]$ を用いて次式で表される。

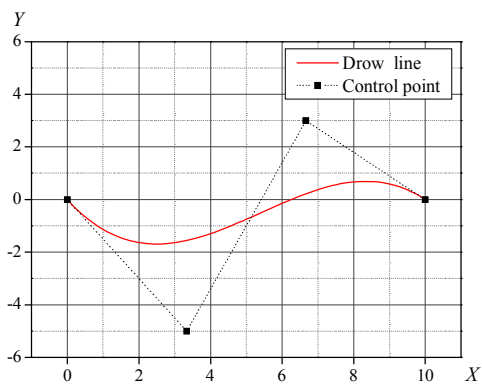
$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) \quad y = y(t) \quad (4.3.1)$$

n 次のバーンスタイン基底関数は次式で与えられる。

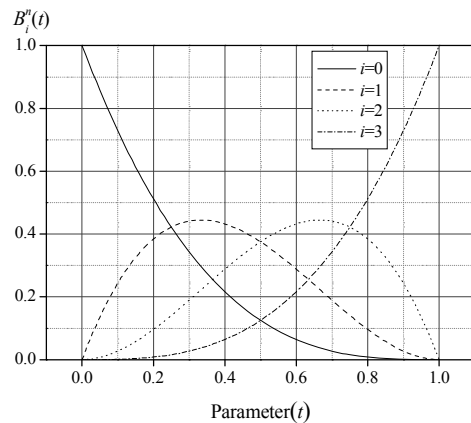
$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (4.3.2)$$

以上よりベジェ曲線で表現される曲線の任意節点ベクトル $\mathbf{x}(t) = (x(t), y(t))$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \mathbf{P}_i \quad (4.3.3)$$



a. 制御点と形成曲線



b. 3次バーンスタイン基底関数

図4. 2 数値例 (ベジェ曲線 $n=3$)

ここで、 \mathbf{P}_i :2次元空間内の制御点ベクトルである。図4.2に制御点を4点設定した3次ベジェ曲線($n=3$)の例と3次のバーンスタイン基底関数を示す。

ベジェ曲線の性質

ベジェ曲線は次に示す性質を持つ。

端点一致

$t = 0$ において、 $B_0^n(t)$ のみが値1で他は値0を持ち、 $t = 1$ では $B_n^n(t)$ のみが値1で他は0である。したがって、ベジェ曲線の両端は $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_n$ に一致する。

大域的定義

各 i に対して、図4.2bより $B_i^n(t)$ は唯一の極大値をもち、そこから離れるに従ってなだらかに0に近づく。また、 $B_i^n(t)$ の極大値を得る t の値は i が大きくなるに従って大きくなる。したがって、 $\mathbf{x}(t)$ は t が0から1へ動くのに伴って、係数の値が最大となる制御点が $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_n$ 順に変化する。つまり、制御点 \mathbf{P}_i の位置を動かすと、曲線上の両端点以外のすべての点が影響を受ける。

凸包性

ベジェ曲線は $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_n$ の凸結合である。したがって、表現される曲線は $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_n$ の凸包に含まれる。

次数と制御点数

ベジェ曲線の次数は、制御点の設定数より1つ少ないものとなる。

直線再現性

制御点が直線状に配置されたとき得られる曲線は直線となる。

変動減少性

曲線は制御点配置に沿った滑らかな形状となるが、その変動は制御点の変動より小さくなる。

4. 4 ベジエ曲面

4. 4. 1 テンソル積ベジエ曲面

テンソル積ベジエ曲面はバーンスタイン基底関数と制御点を網目状に配置した制御点ネットを用いて定義される。制御点配置と想定曲面の関係を図4.3に示す。

曲面上の任意節点座標は位置情報パラメータ $u, v \in [0.0, 1.0]$ を用いて次式で表される。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} \quad (4.4.1)$$

基底関数はベジエ曲線で定義した式(4.3.2)を用いる。また、曲面形状を決定する制御点ネットを $(m'+1) \times (n'+1)$ 配置し、各点の制御点ベクトルを次式で定める。

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} x P_{ij} \\ y P_{ij} \\ z P_{ij} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m', \quad j=1, 2, 3, \dots, n') \quad (4.4.2)$$

以上よりテンソル積ベジエ曲面で表現される曲面上の任意節点ベクトル $\mathbf{r}(u, v)$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} B_i^{m'}(u) B_j^{n'}(v) \mathbf{P}_{ij} \quad (4.4.3)$$

次式により制御点座標を設定することで、滑らかな曲面形状が記述される。ここで、本研究は有限要素法によって曲面形状の解析を行うため、テンソル積ベジエ曲面と曲面上の離散化された節点座標とを対応させる必要がある。有限要素の各節点は曲面を u, v 方向に $(n+1) \times (m+1)$ 分割される。したがって、制御点ネットの領域内の節点を次式で表現し、離散データ u_k, v_l を用いて有限要素と対応させたテンソル積ベジエ曲面で表現される曲面の節点座標は次式となる。

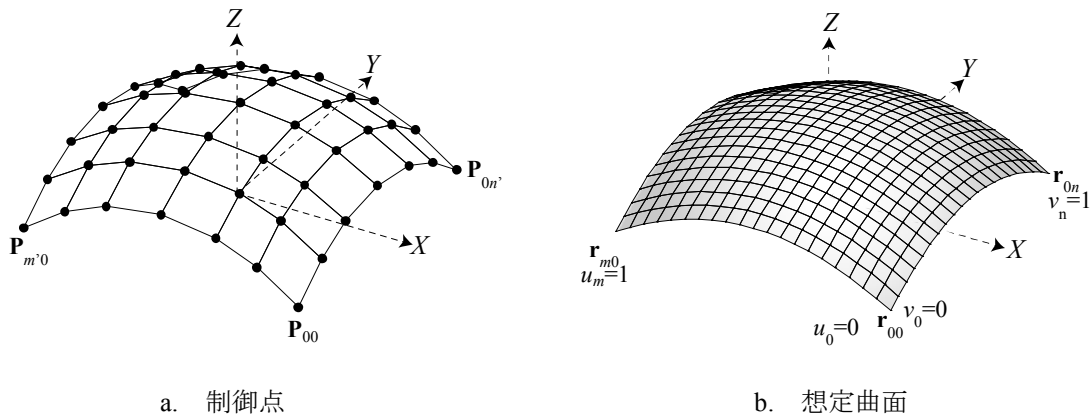


図4. 3 有限要素と制御点の関係（テンソル積ベジエ曲面）

$$\mathbf{r}_{kl} = \mathbf{r}(u_k, v_l) = \sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} B_i^{m'}(u_k) B_j^{n'}(v_l) \mathbf{P}_{ij} \quad (k=0,1,2,\dots,m, l=0,1,2,\dots,n) \quad (4.4.4)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u_k, v_l) = \begin{bmatrix} x(u_k, v_l) \\ y(u_k, v_l) \\ z(u_k, v_l) \end{bmatrix} \quad (4.4.5)$$

ここで、 $B_j^{n'}(u_k), B_i^{m'}(v_l) : u(v)$ 方向に対応したバーンスタイン基底関数である。なお、 u に関して n' 次、 v に関して m' 次であれば、形成される曲面は $n' \times m'$ 次曲面、 $n'=m'$ であれば双 n' 次曲面と呼ぶ。本研究は $n'=m'$ とする双 n' 次曲面を扱う。

以上より離散化された曲面上の節点座標をテンソル積ベジェ曲面で算出する。テンソル積ベジェ曲面もベジェ曲線と同様な性質を持つ。

4. 4. 2 テンソル積ベジェ曲面による部材断面の表現

本研究は鉄骨格子シェルを対象とした最適化を行う。その際、部材断面に関わる設計変数の削減を目的にベジェ曲面を利用した部材断面に対する変数の表現を行う。以下にテンソル積ベジェ曲面を用いた定式化を説明する。

各要素の断面に関する変数は位置情報パラメータ ${}_a u, {}_a v \in [0.0, 1.0]$ を用いて次式で表される。

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}({}_a u, {}_a v) \quad (4.4.6)$$

部材断面を定義する制御点ネットを $(m^a+1) \times (n^a+1)$ 配置し、各点の制御点ベクトルを次式で定める。

$${}_a \mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} {}_{ax} P_{ij} \\ {}_{ay} P_{ij} \\ {}_{az} P_{ij} \end{bmatrix} \quad {}_a \mathbf{P}_x = \begin{bmatrix} {}_{ax} P_{00} \\ {}_{ax} P_{01} \\ \vdots \\ {}_{ax} P_{a^m, a^n} \end{bmatrix} \quad {}_a \mathbf{P}_y = \begin{bmatrix} {}_{ay} P_{00} \\ {}_{ay} P_{01} \\ \vdots \\ {}_{ay} P_{a^m, a^n} \end{bmatrix} \quad {}_a \mathbf{P}_z = \begin{bmatrix} {}_{az} P_{00} \\ {}_{az} P_{01} \\ \vdots \\ {}_{az} P_{a^m, a^n} \end{bmatrix} \quad (4.4.7)$$

ここで、 ${}_a \mathbf{P}_x, {}_a \mathbf{P}_y, {}_a \mathbf{P}_z$: 制御点の x, y, z 軸座標ベクトルを表す。この時、鉄骨格子シェルを構成する任意節点での z 軸座標値は次式で示される。

$$z_{kl} = z({}_a u_k, {}_a v_l) = \sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} B_i^{a^m}({}_a u_k) B_j^{a^n}({}_a v_l) {}_a \mathbf{P}_z \quad (4.4.8)$$

部材断面は断面リストを作成し、断面リスト番号と式 (4.4.8) の絶対値を対応させる。 ij 要素における i 点における式 (4.4.8) の値を $z_{k_i l_i}$ 、 j 点における値を $z_{k_j l_j}$ とした場合、 ij 要素に対応する断面リストのリスト番号は次式となる。

$$N_{Area} = \left\lfloor \frac{(z_{k_i l_i} + z_{k_j l_j})}{2} \right\rfloor \quad (4.4.9)$$



— 第5章 遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態 創生と最適設計— 離散系構造への適用例 —

各遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計例として離散系構造の例を示す。扱う構造モデルはアーチフレーム、平面トラスフレーム、ラーメンフレームであり、問題に応じた最適化手法の選択から最適化問題の設定と、最終的な形態決定に至るまでの設計手順を示す。設計例を通して種々の構造形式における構造形態創生法の設計支援ツールとしての有効性を確認する。

—第5章—

遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計—離散系構造への適用例—

5. 1 構造形態創生概要

以下では、遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計例の内容をラーメンフレームやトラスフレーム等の「離散系構造」と形態と力学性状が密接に関係する「空間構造」の二つに大きく分類する。第5章は一般構造として取り扱うことの多い離散系構造の構造形態創生と最適設計例について述べる。扱う構造モデルはアーチフレーム(5章2節)、平面トラスフレーム(5章3節)、ラーメンフレーム(5章4節)であり、問題に応じたGA系解法の選択から、目的関数、設計変数、制約条件の設定手順と解形態決定に至るまでの設計手順を示す。5章2節はGA系解法の中でも最も単純なアルゴリズムを有するSGAを用いた実建物への適用事例として円筒形状を有する曲面骨組構造の構造形態創生を示す。ここでは、意匠設計者のデザイン条件に着目した制約条件の設定を行い、デザインと構造合理性の同時最適化を、目的関数を一つ設定した単一目的最適化問題を駆使して行った例を示す。さらに、形態決定から建物の実現に至るまでの製作・施工内容についても説明する。5章3節は多目的最適化による最適化手法としてSPEA2を用いた平面トラスフレームの構造形態創生例である。5章4節は解探索の範囲を優良解にまで広げ優良解探索手法ISGAを用いた低層建物を想定した骨組構造の設計に構造形態創生例を示す。具体的な建物の設計に対して、機能を想定した目的関数を提案し、実設計における最適設計法の有効性を確認し、機能性と構造合理性を考慮した構造形態創生により設計支援につながる種々の形態が獲得できることを示す。

5.2 SGAを用いた構造形態創生:円筒形状を有する曲面構造の最適設計—TOTOミュージアムの曲面形態デザイン—

本節は、構造形態創生法を実建物の形態決定に適用し、構造安全性を確認した例である。当該建物は福岡県北九州市に計画された TOTO ミュージアム(2015 年 5 月竣工)(図 5.1)^{[5.1]-[5.5]}である。この建物は、「大地を潤す水」をデザインコンセプトに、研修・事務所機能を主用途とする北側建物と、ショールームを主用途とする南側建物の二棟から成る、地上 4 階建ての基礎免震構造を採用した二棟一体型となっている。図 5.2 に建物の代表階平面プランを示す。

構造形態創生法を活用した既往の事例^{[1.20]-[1.22],[5.7]}は、RC 曲面シェルを対象とした例が多い。構造形態創生は建物の全体形状を適用範囲とし、得られた構造合理性の高い自由曲面形態の実設計への利用が示されている。これに対し、本適用例は鉄骨造による曲面構造物を対象とし、構造形態創生法の適用範囲を、曲面形態を形成する部材形状に限定させる。これにより、躯体の製作性・施工性を考慮した曲面形態全体の形成ルールを単純化させ、構造形態創生部と詳細設計部との情報共有・試行錯誤を容易に行える等の設計手順の合理化を図る。対象とする構造形態の創生部は、南側建物の曲面形態であり、定式化から形態決定に至るまでの一連の設計過程を説明する。



図5. 1 建物全体鳥瞰図

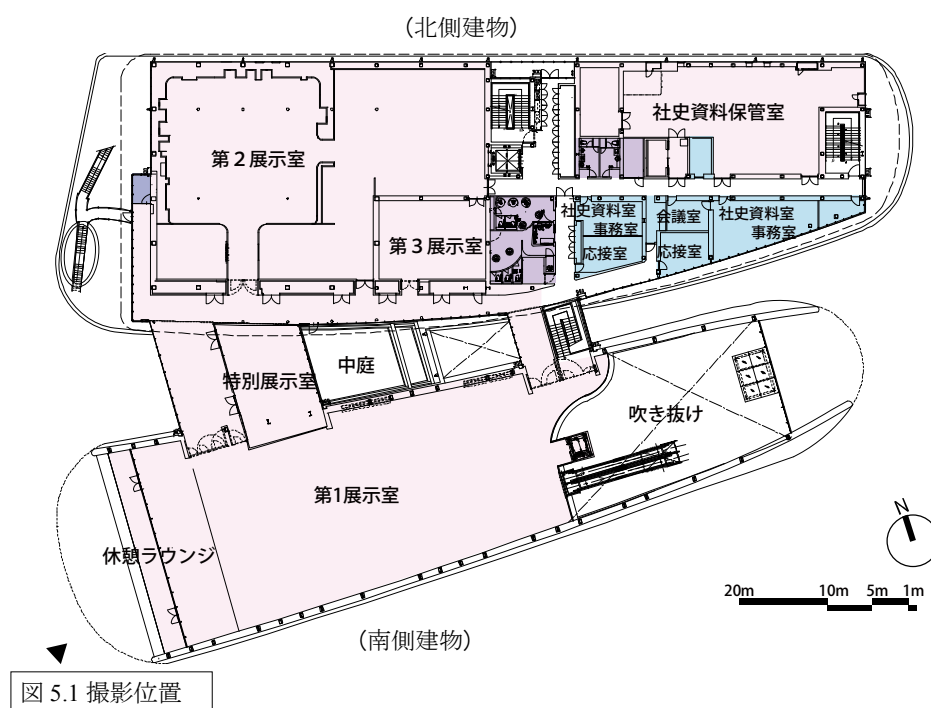


図5. 2 建物2階平面プラン

5. 2. 1 構造計画概要

対象とする円筒部の南側建物は水滴形状を想定した建物高さ 12[m]、長辺方向 70[m]スパン、短辺方向 17~25[m]スパンの鉄骨造建物である。円筒部内は一部 2 階が計画されている。図 5.3 に架構概要を示す。図 5.3a は南側建物の全体構造フレーム鳥瞰図、図 5.3b は曲面部鉄骨フレームの伏図を示している。円筒部の曲面形状は通り芯上にリングアーチを一方向に配置し、各リングアーチを小梁とブレースで直線的につなぐことで全体の曲面形態を形成させている。リングアーチはアーチ頂部を中心とした軸対称の形状を有しており、梁成 450[mm]の H 形断面である。円筒端部は両側とも約 10[m]の片持ち庇が計画され、同様の架構形式となっている。図 5.4 に代表的な短辺方向断面の架構詳細図を示す。曲面形態は長辺方向へアーチスパンが異なることから、各リングアーチは異なる曲線形状となり全体として水滴形状を模す形式とする。なお、図 5.4 に示す 2 階床梁はリングアーチのスラストを処理するアーチタイとしての役割も果たしている。外装仕上げは、親水性を有する塗料が塗布された膜材を採用し、開口小口部はガラス繊維 強化セメント (glassfiber reinforced cement : GRC) による曲面仕上げとすることで白く・角のないなめらかな質感を表現する。図 5.5 に曲面仕上げの様相がわかる完成した建物外観を示す。

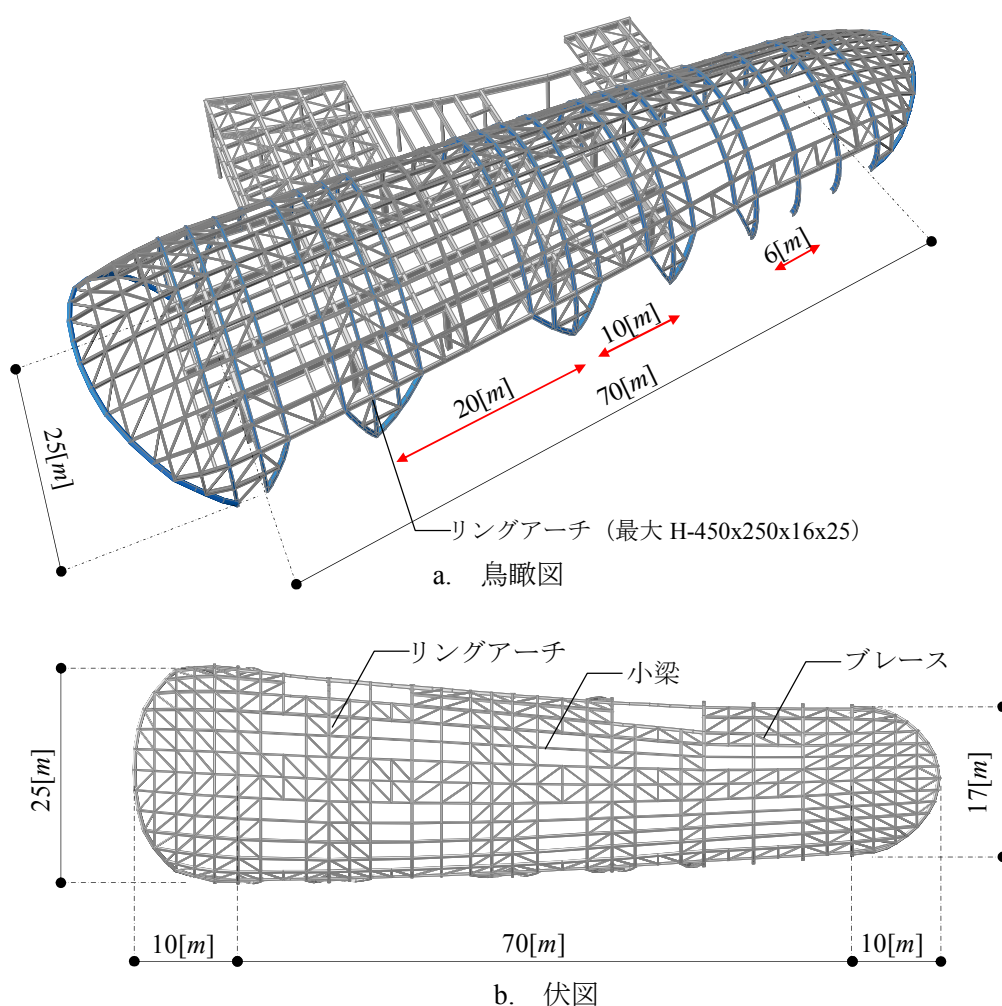
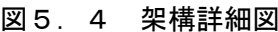


図 5. 3 構造フレーム概略図



5. 2. 2 最適化の目的と各設計条件の設定

本建物は水滴形状を模したリングアーチより全体形状が構成されており、リングアーチはその形状特性から柱脚曲げモーメントが卓越する。そこで、水滴形状を維持しつつ脚部曲げモーメントの小さい曲面形状の獲得を目的に構造形態創生法を活用する。構造形態創生に用いる最適化手法には、よく知られている大域的最適解の解探索手法 SGA を採用する。前述したように対象建物の曲面形態は各通りのリングアーチを小梁で直線的に接続することで全体形状を構成している。この形態生成ルールに着目し、構造形態創生は対象建物全体ではなく各通りのリングアーチに適用する。最適化問題は構造特性・設計条件を考慮した目的関数と制約条件を設定することで、構造・意匠・機能を満足した解形態を探索する。以下に最適化問題の定式化の概要を示す。

5. 2. 2. 1 最適化問題の定式化

本建物は基礎免震構造であること及び水滴形状の形態的特徴より、長期荷重時の曲げモーメントが部材の断面決定に大きく影響する。最適化問題はリングアーチの長期最大曲げモーメント最小化を目的関数とする単一目的最適化である。設計変数は、通り芯に配置された各基本形状のリングアーチ節点座標の移動量とする。最適化は同一平面内にある k 番目のリングアーチに対して式 (5.2.1) – (5.2.4) で与える。

$$\text{Find} \quad \Delta \mathbf{R} \quad (\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_{k, initial} + \Delta \mathbf{R}) \quad (5.2.1)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{R}_k) = {}_L M_{\max} \quad (5.2.2)$$

$$\text{subject to} \quad h_k = \bar{h}_k \quad (\text{高さ制約}) \quad (5.2.3)$$

$$\Delta \mathbf{R}^L \leq \Delta \mathbf{R} \leq \Delta \mathbf{R}^U \quad (\text{側面制約}) \quad (5.2.4)$$

ここで、 \mathbf{R}_k : 節点情報ベクトル (有限要素節点座標値), $\mathbf{R}_{k, initial}$: 初期形状の節点情報ベクトル, $\Delta \mathbf{R}$: 節点情報ベクトルの移動量 (設計変数), ${}_L M_{\max}$: 長期最大曲げモーメント, $\Delta \mathbf{R}^L, \Delta \mathbf{R}^U$: 側面制約の下限値と上限値, h_k : 各リングアーチ頂部の高さ, \bar{h}_k : 各リングアーチの高さ制約値 (初期形状値) を示す。

5. 2. 2. 2 曲面形状の表現

設計変数は各リングアーチの初期形状からの節点座標値の面内移動量である。その際、節点座標値を直接設計変数とするとリングアーチの滑らかな曲線形状が損なわれた解が生成されやすい。したがって、テンソル積ベジェ曲線を使用した設計変数の定式化を行い滑らかなアーチ曲線形状と解の収束性の改善を図り、構造全体として滑らかな曲面形状を構成する。 k 番目のリングアーチに対するテンソル積ベジェ曲線は曲線上の位置情報を示すパラメータ u と制御点座標ベクトル、基底関数を用いて以下で表される。

$$\mathbf{r}_k(u) = \sum_{i=0}^n B_i^n(u) \mathbf{P}_{k,i} \quad \mathbf{P}_{k,i} = \begin{pmatrix} x p_{k,i} & y p_{k,i} \end{pmatrix} \quad (5.2.5)$$

$$B_i^n(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (5.2.6)$$

ここで、 $\mathbf{r}_k(u)$ ：曲線上の節点座標ベクトル、 $\mathbf{P}_{k,i}$ ：制御点座標ベクトル、 $B_i^n(u)$ ：バーンスタイン基底関数、 n ：制御点の配置数を示す。以下にテンソル積ベジェ曲線を用いたリングアーチ形状の表現手順を示す。

- 1) 設計変数は制御点座標ベクトルの X 座標値 $x p_{k,i}$ を用いる。
- 2) 高さ制約条件のもと、テンソル積ベジェ曲線の曲線上の座標 $\mathbf{r}_k(u)$ を計算する。
- 3) 曲線上の座標 $\mathbf{r}_k(u)$ を用いてリングアーチ形状を次式で表現する。

$$\mathbf{R}_k(u) = \mathbf{R}_{k,initial} + \mathbf{r}_k(u) \quad (5.2.7)$$

ここで、 $\mathbf{R}_k(u)$ ： u 点の節点座標ベクトルを示す。なお、各リングアーチはアーチ頂部を中心とする軸対称形状であり、移動量も軸対称で与える。図 5.6 にリングアーチの表現手順を表現した模式図を示す。

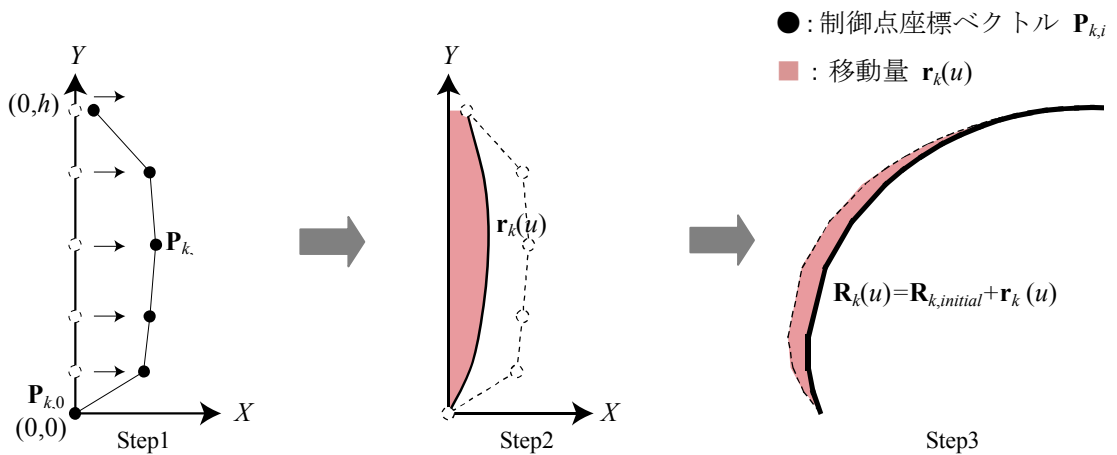


図 5. 6 リングアーチ形状の表現手順

5. 2. 2. 3 設計条件を考慮した制約条件の設定

円筒部の建物は以下の2点が設計条件として要求された。

- (1)水滴形状のような滑らかな曲面形状
- (2)ショールームとして自由度の高い無柱空間

式(5.2.1)－(5.2.4)に示した最適化問題をリングアーチ形状へ適用した場合、得られる最適解はカテナリー形状に近似し、意匠設計者の意図する水滴形状を有するリングアーチ形状が得られない可能性がある(図5.7)。したがって、本解法は設計変数の側面制約条件の上限値と下限値を複数設定することで、節点座標の移動量を制御し、得られたリングアーチ形状を用いた構造全体の曲面性状を確認する。数値解析では側面制約条件の設定値による初期形状からカテナリー形状へ至るまでの種々のリングアーチ形状を探索させ、リングアーチの組み合わせによる全体の曲面形態の決定については意匠設計者とのやりとりにより、(1)の条件を満足させる最終的なリングアーチ形状の決定を行う。(2)の条件については、高さ制約条件と前述の側面制約条件を組み合わせることで内部空間の機能性に関する内包体積を確保する。

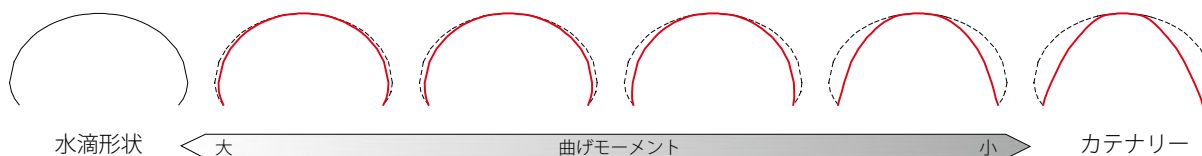


図5. 7 水滴形状と構造合理性の相反関係

5. 2. 2. 4 構造形態創生アルゴリズム

以上の手順をまとめた最適設計フローを図5.8に示す。本論で提案している基本的な最適設計フローに加えて、ここではモデリング時にいくつかの形状パターンを提示し、意匠設計者と協議することで最終形状を決定するプロセスを設けた。これにより意匠設計者のデザインイメージを損なっているか否かを直接判断し、形状決定におけるプロセスの合理化を図っている。

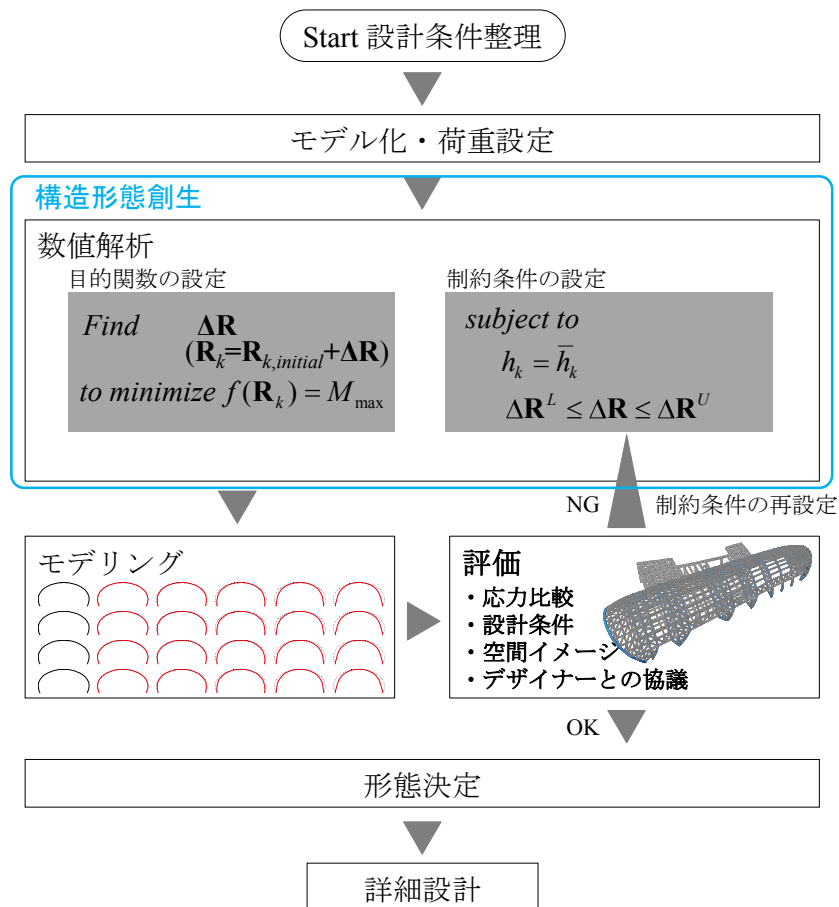


図5. 8 最適設計フロー

5. 2. 3 構造形態創生

5. 2. 3. 1 解析モデル

解析モデルは図 5.9 に示す円筒形状モデルである。初期形状は意匠設計者のイメージスケッチを基に各リングアーチを図 5.9b に示すように 3 芯円で近似させた形態である。ここでは図 5.9a に示す No.1–5 のリングアーチ形状を代表な数値解析結果として示す。設計荷重は長期荷重として自重と等分布荷重(仕上荷重+積載荷重) $w = 1.3 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ を設定する。弾性係数は $E = 2.05 \times 10^8 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ 、せん断弾性定数は $G = 7.8 \times 10^7 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ である。支持条件はリングアーチ脚部を固定とする。設計変数は制御点座標ベクトルの X 座標 $xp_{k,i}$ とし、各リングアーチの制御点座標ベクトルは独立して設定する。したがって、設計変数の総数は各アーチ 5 であり、 $8 \times 5 \text{ bit}$ の二進数でコーディングする。なお、リングアーチ頂部と脚部節点是不動点とし、移動量はゼロである。リングアーチ頂部に対する高さ制約値は各リングアーチ初期形状の高さとする。応力制約は SN490B を想定し長期荷重に対する許容応力度設計を行う。SGA の計算パラメータは表 5.1 に示す通りである。設定した設計変数の側面制約条件は制御点の X 座標 $xp_{k,i}$ に対して表 5.2 に示す全 5 ケースとした。

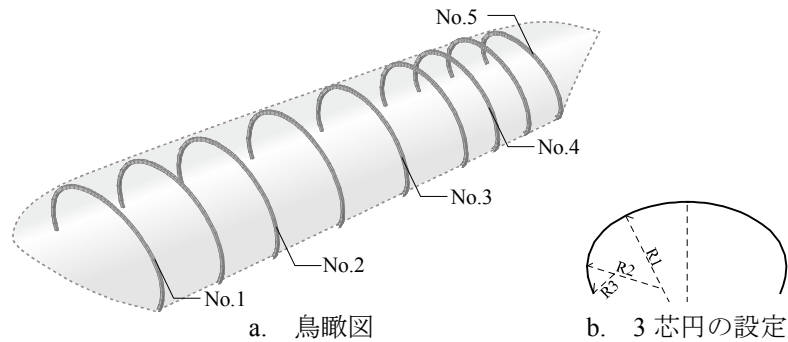


図 5. 9 解析モデル

表 5. 1 SGA パラメータ

個体数	200	制御点の遺伝子長	$8 \times 5 \text{ bit}$
世代数	100	coding	gray表現
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント方式
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉
突然変異率	0.03	—	—

表 5. 2 設計変数の側面制約条件

Case-1	$0.0[m] \leq xp_{k,j} \leq 0.2[m]$	Case-4	$0.0[m] \leq xp_{k,j} \leq 1.5[m]$
Case-2	$0.0[m] \leq xp_{k,j} \leq 0.5[m]$	Case-5	$0.0[m] \leq xp_{k,j} \leq 2.0[m]$
Case-3	$0.0[m] \leq xp_{k,j} \leq 1.0[m]$	—	—

5. 2. 3. 2 解析結果

解析結果を図 5.10 に示す。この図は側面制約条件を 5 ケース設定した際に得られた No.1—5 リングアーチの最終世代の最適化形状とその時の長期最大曲げモーメントの値である。なお、図中破線部は初期形状、実線部は最終世代の最適化形状を示し、▲印位置は最大曲げモーメント発生位置を示している。図 5.10 より節点座標値の移動量を小さくした Case-1—3 の場合、得られる解は水滴形状を損なわない形状であり、節点移動量を大きくすると得られる解はカテナリー形状へ近づく (Case-4,5)。長期最大曲げモーメントもカテナリー形状に近似するほど小さくなる傾向を確認している。なお、長期最大曲げモーメント発生位置は柱脚固定としているため、形状の違いによらず柱脚部が最大を示す。本設計は図 5.10 に示したリングアーチ形状を通り毎に示し、リングアーチ形状のマトリクス表を作成して意匠設計者と協議を行い、最終形状を決定した。なお、全体形状の評価は同一の側面制約条件で得られたリングアーチで構成された曲面形態にて評価した。Case-1 は曲げモーメントの低減割合が低く、Case-3—5 は水滴形状が損なわれ、ショールームとして使用する空間の内法体積が小さいことから、最終的に採用した形態は Case-2 で得られた各リングアーチの組み合わせによる曲面形態とした。

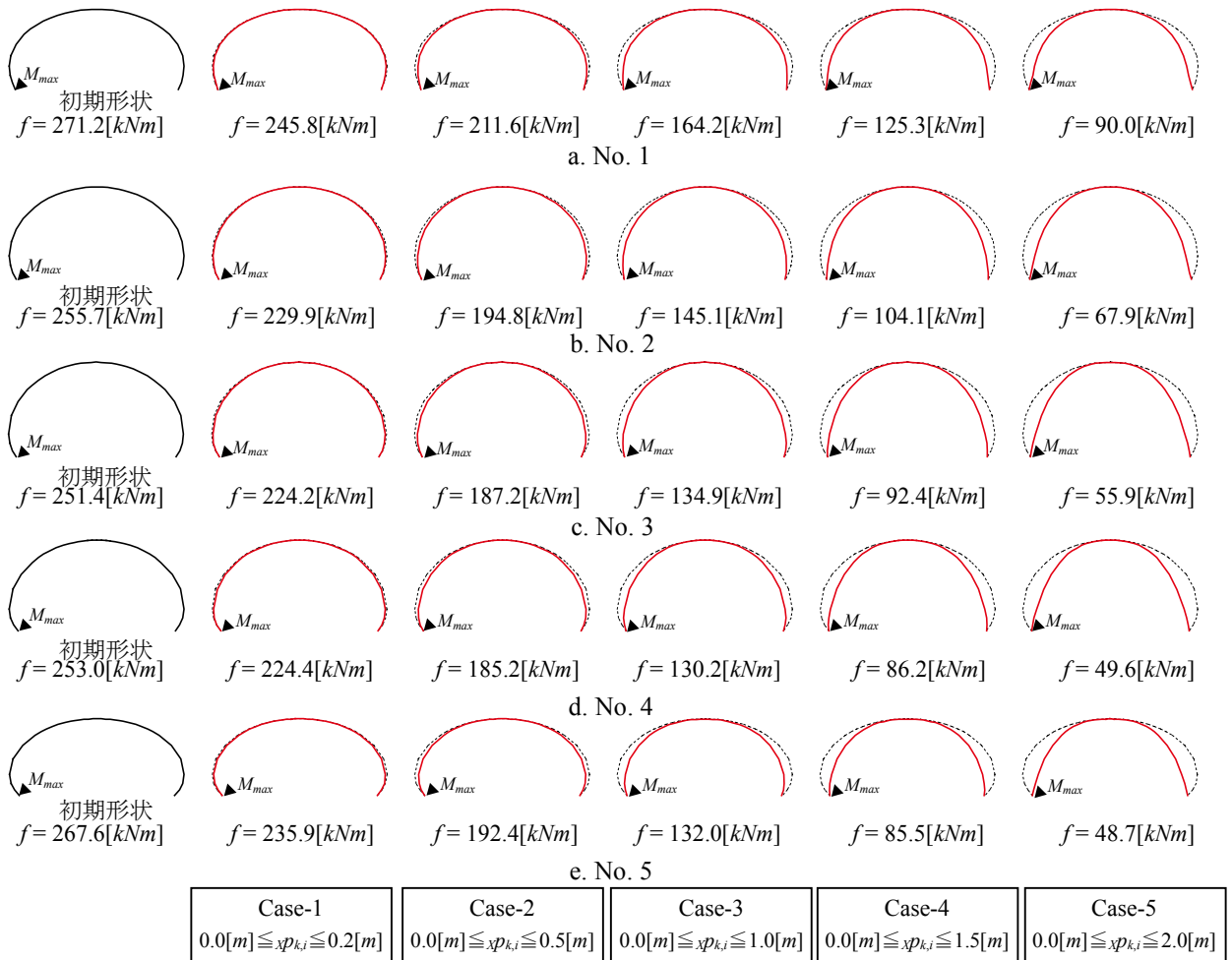


図 5. 10 解析結果
(破線：初期形状 実線：最適化形状 ▲印は最大曲げモーメント位置を示す)

5. 2. 4 詳細設計

5. 2. 4. 1 形態決定と構造安定性

初期形状と採用した形状の比較を図 5.11 に示す。図 5.11a は初期形状と採用した形状のリングアーチ形状の比較図である。なお、図 5.11a 破線部は初期形状を、実線部は採用したリングアーチの曲線形状を示す。図 5.11b はリングアーチの長期曲げモーメントの比較図である。図 5.11b 中+側(赤色)は正曲げ、-側(青色)は負曲げの強弱を意味する。図 5.11a,b より、採用した形状は初期形状と比較して水滴形状特有の膨らみが小さくなっているものの水滴形状のイメージは崩さず、初期形状から最大曲げモーメントが 20%低減されている。その結果、詳細設計においてリングアーチの部材断面はフランジ板厚を 2 サイズ縮減、リングアーチのみの鋼材量比で 20%縮減した。各リングアーチの線形座屈解析の結果を表 5.3 に示す。表 5.3 に示す座屈荷重係数は長期荷重時における解析結果であり、最適化した全リングアーチの結果を示している。表 5.3 より採用した各リングアーチは初期形状から 0~16%座屈荷重係数が上昇しており、部材耐力のみでなく座屈に対する構造安定性も改善されていることを確認した。

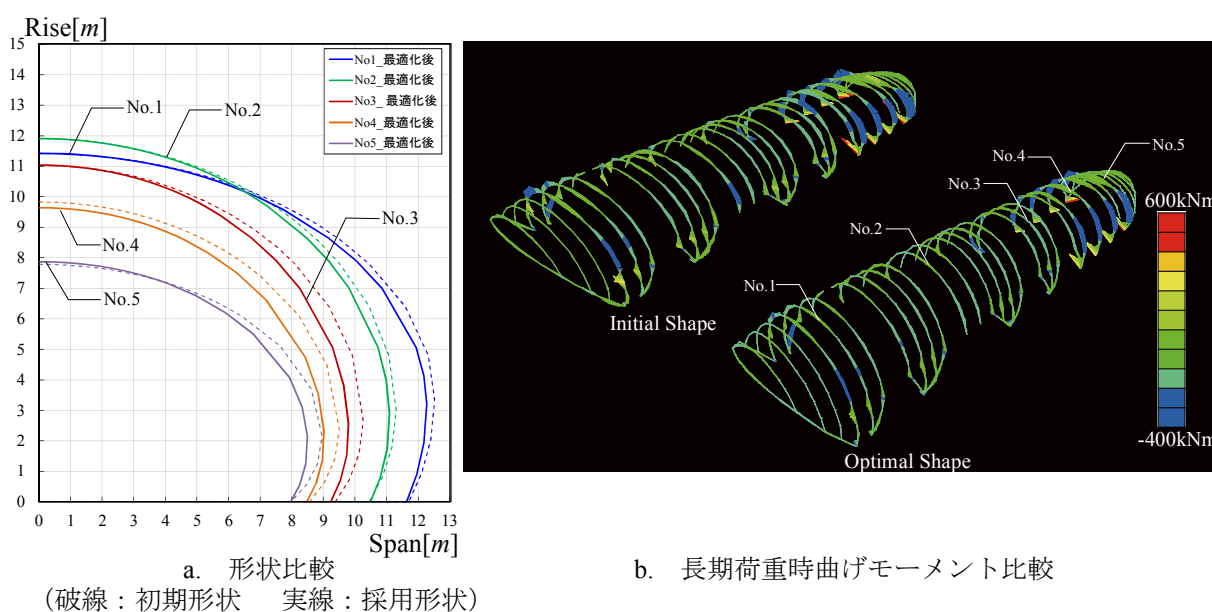


図 5. 1 1 初期形状と採用形状の比較

表 5. 3 線形座屈解析結果(長期荷重時の座屈荷重係数)

	1 (No.1)	2	3 (No.2)	4	5 (No.3)	6	7 (No.4)	8	9 (No.5)
①初期形状	8.29	9.19	9.19	10.80	11.64	14.23	15.70	16.58	20.50
②採用形状	8.69	9.37	9.68	10.85	12.89	16.37	17.00	19.25	22.66
②／①	1.05	1.02	1.05	1.00	1.11	1.15	1.08	1.16	1.11

5. 2. 4. 2 リングアーチの製作・施工性^{[5.7], [5.8]}

採用した曲面形態の各リングアーチは異なる曲線形状を有し、テンソル積ベジェ曲線を用いて表現された自由曲線である。そのため、リングアーチの製作はリングアーチ部材芯の節点座標値を部材長 0.5[m]毎に押さえ、座標値に対して $\pm 0.05[m]$ の精度で3芯円に近似させて最終的に製作するリングアーチ形状を決定した。また、曲げ加工は残留応力の少ない高周波曲げ加工を採用した。なお、3芯円に近似させた後のリングアーチの曲げモーメントの変化はほとんど生じていないことを確認している。図 5.12 に製作されたリングアーチ鉄骨と建て方風景を示す。一部の柱脚はリングアーチ同士が斜めに接合される。この部分については仕口部フランジ板厚を3サイズアップさせ、リングアーチ形状を変更することなくフランジ部の目違いが吸収可能な納まりとしている。図 5.13 に柱脚部鉄骨架構詳細図と製作された柱脚鉄骨を示す。



図5. 12 鉄骨建て方

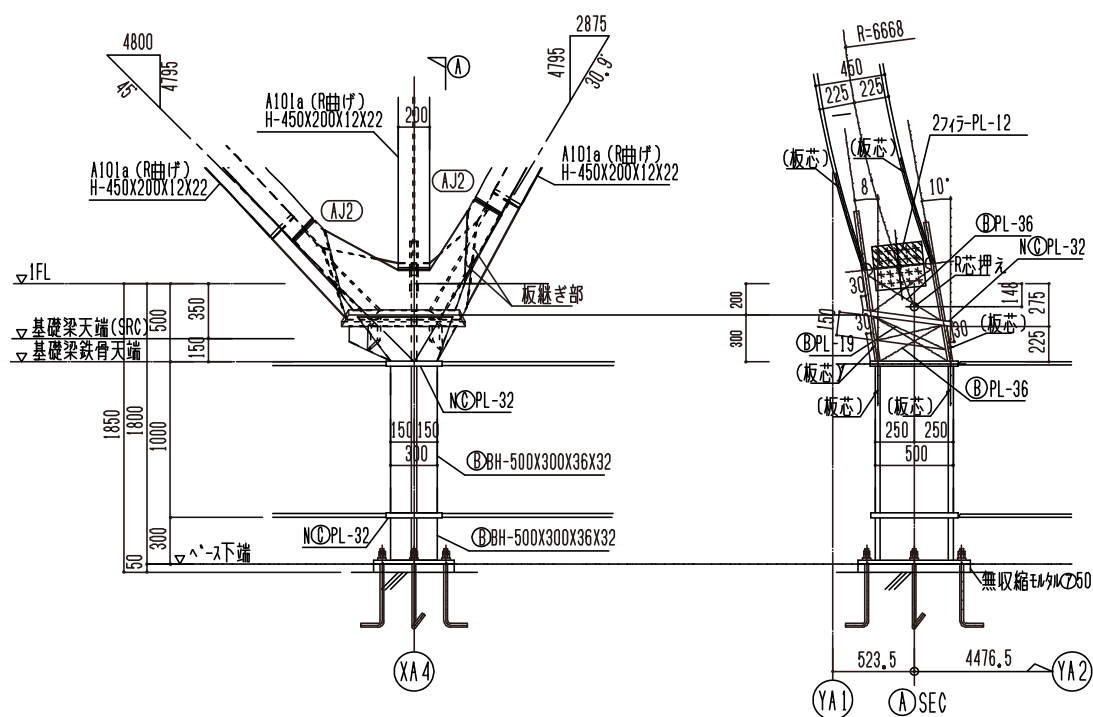


図 5. 13 リングアーチ脚部の納まり

5. 3 SPEA2 を用いた構造形態創生：平面トラスフレームの構造形態創生

本計画は地上 7 階建ての鉄骨造建物の地下階増築に伴う施工中の上部構造地震力伝達部材の設計である。本建物は場所打ちコンクリート杭による杭基礎により地震力を地盤面に伝達させているが、施工中は杭周囲の土が撤去されるため、別躯体にて地震力を地盤に伝達させる必要がある。計画された伝達部材は 1F 基礎梁と建物外周に設けた RC 連壁を連結する鉄骨ストラット材（平面トラスフレーム）である。鉄骨ストラット材は建物の地震力を RC 連壁へ伝達させる耐力と強固な剛性が要求される。本計画ではストラット材の実施設計段階を想定し、必要剛性を確保してさらなる鋼材量縮減を目的に構造形態創生法を活用した部材断面の設計を行う。図 5.14 に建物の構造フレーム外観と鉄骨ストラット材の計画例を示す。

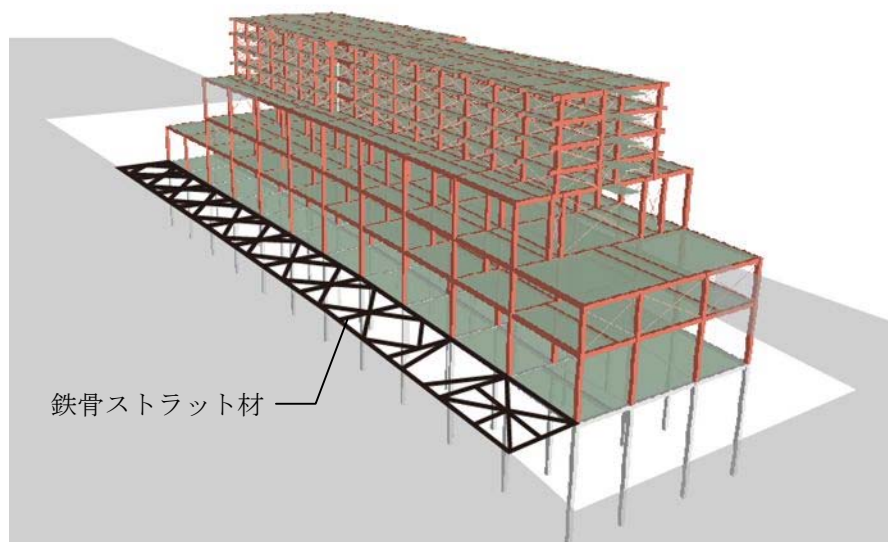


図 5. 1 4 建物概要

5. 3. 1 最適化の目的と各設計条件の設定

5. 3. 1. 1 目的関数と設計変数の設定

本節は地震力の伝達部材である鉄骨ストラット材の必要剛性を保持しつつ、部材断面の省力化を行うことを目的に構造形態創生法を活用する。したがって、目的関数は部材総重量と水平剛性とする多目的最適化を行う。なお、水平剛性は部材総重量とのトレードオフの関係を考慮して逆数を扱う。

設計変数は構造形態創生の適用フェーズが実施設計であることを考慮して部材断面のみとし、形状に対する変数は設定しない。上記の目的の基、解探索は目的関数空間上での解の多様性を重視する。したがって、解探索手法は目的関数空間上での多様性を考慮した GA 系解法である SPEA2 を採用する。

5. 3. 1. 2 設計外力の設定

設計外力は水平剛性を評価することを目的に長辺方向の地震力とする。地震力は上部構造より伝達されるせん断力を節点荷重として与える。

5. 3. 1. 3 部材耐力の評価

部材耐力の評価は許容応力度設計とし、上部構造が崩壊形に達する時に伝達される水平力に対して短期許容応力度以下とする。

5. 3. 2 構造形態創生

5. 3. 2. 1 解析モデル

解析モデルの初期形状は2パターン(Model-A,B)扱う。図5.15に初期形状を示す。

図5.15a Model-A は長辺方向 137.5[m], 短辺方向 11[m], フレーム間の斜材をダイヤモンド状に配置したトラスフレームモデル(節点数:60, 要素数:113)である。境界条件は RC 連壁と接続する節点部をピン支持とし、建物側と接続する節点を水平ローラーとする。設計変数は部材断面とし、解析上は作成した部材断面リストのリスト番号を扱う。なお、部材断面の設定は初期形状解析の結果から4つのグループに分けて同一断面を与える(図5.15c)。したがって、設計変数の総数は4であり $16 \times 4 \text{bit}$ の二進数でコード化する。載荷荷重は建物基礎梁側から伝達される二次設計時の水平力を節点荷重として与える。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8 [\text{kN/m}^2]$, せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7 [\text{kN/m}^2]$ とする。

図5.15b Model-B は長辺方向 175[m], 短辺方向 10.6[m], フレーム間の斜材を W 状に配置したトラスフレームモデル(節点数:169, 要素数:358)である。境界条件は RC 連壁と接続する節点部をピン支持とし建物側と接続する節点を水平ローラーとする。設計変数は部材断面とし、解析上は作成した部材断面リストのリスト番号を扱う。なお、部材断面の設定は初期形状解析の結果6つのグループに分けて同一断面を与える(図5.1d)。したがって、設計変数の総数は6であり $16 \times 6 \text{bit}$ の二進数でコード化する。載荷荷重は建物基礎梁側から伝達される二次設計時の水平力を節点荷重として与える。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8 [\text{kN/m}^2]$, せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7 [\text{kN/m}^2]$ とする。

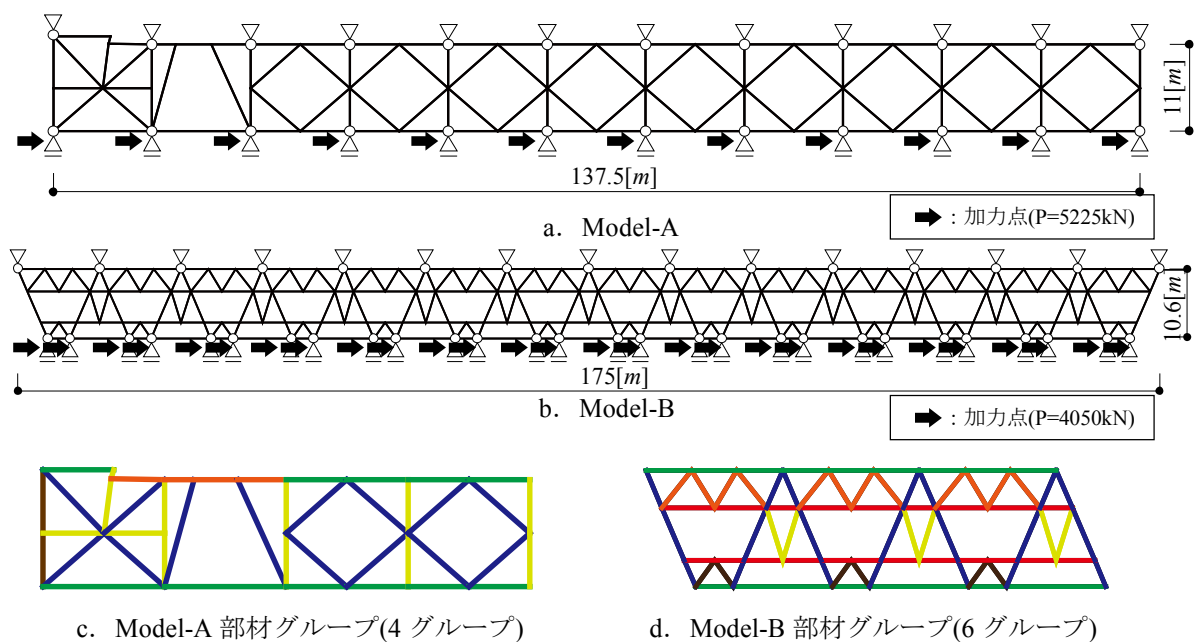


図5. 15 解析モデル

5. 3. 2. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法は目的関数空間上で多様な形態を獲得することを目的に SPEA2 を用いる。解析パラメータを表 5.4, 5 に示す。鉄骨造の構造形態創生では部材断面をリスト化して設計変数と対応させる。ここで用いる部材断面リストを表 5.6, 7 に示す。

表 5. 4 SPEA2 パラメータ Model-A

個体数	50	設計変数の遺伝子長	16 x 4 <i>bit</i>
世代数	200	coding	gray表現
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント方式
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉
突然変異率	0.005	—	—
アーカイブ個体群	50	—	—

表 5. 5 SPEA2 パラメータ Model-B

個体数	50	設計変数の遺伝子長	16 x 6 <i>bit</i>
世代数	100	coding	gray表現
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント方式
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉
突然変異率	0.005	—	—
アーカイブ個体群	50	—	—

表 5. 6 部材断面リスト(SN490B) Model-A

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	BH-900x900x40x40	1 1	BH-900x900x22x36
2	BH-900x900x36x40	1 2	BH-900x900x32x32
3	BH-900x900x32x40	1 3	BH-900x900x28x32
4	BH-900x900x28x40	1 4	BH-900x900x25x32
5	BH-900x900x25x40	1 5	BH-900x900x22x32
6	BH-900x900x22x40	1 6	BH-900x900x28x28
7	BH-900x900x36x36	1 7	BH-900x900x25x25
8	BH-900x900x32x36	1 8	BH-900x900x22x22
9	BH-900x900x28x36	1 9	BH-900x900x25x25
1 0	BH-900x900x25x36	2 0	BH-900x900x22x25

表 5. 7 部材断面リスト(SN490B) Model-B

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	BH-700x700x40x40	1 1	BH-700x700x22x36
2	BH-700x700x36x40	1 2	BH-700x700x32x32
3	BH-700x700x32x40	1 3	BH-700x700x28x32
4	BH-700x700x28x40	1 4	BH-700x700x25x32
5	BH-700x700x25x40	1 5	BH-700x700x22x32
6	BH-700x700x22x40	1 6	BH-700x700x28x28
7	BH-700x700x36x36	1 7	BH-700x700x25x25
8	BH-700x700x32x36	1 8	BH-700x700x22x22
9	BH-700x700x28x36	1 9	BH-700x700x25x25
1 0	BH-700x700x25x36	2 0	BH-700x700x22x25

5. 3. 2. 3 数値結果 1(Model-A)

数値結果 1 は Model-A の水平剛性の逆数+部材総重量を目標とした多目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find } \mathbf{A} \quad (5.3.1)$$

$$\text{to minimize } f_1(\mathbf{A}) = \frac{1}{K} \quad (5.3.2a,b)$$

$$f_2(\mathbf{A}) = V$$

$$\text{subject to } \sigma_i \leq \sigma^L \quad (5.3.3a,b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U$$

$$\mathbf{A}^L = \begin{bmatrix} A_1^L & A_2^L & A_3^L & A_4^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}^U = \begin{bmatrix} A_1^U & A_2^U & A_3^U & A_4^U \end{bmatrix}$$

ここで、 K ：水平剛性、 V ：部材総重量、 $\mathbf{A}^L, \mathbf{A}^U$ ：設計変数の側面制約条件であり $A^L = 1.0$ 、 $A^U = 20.0$ である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。水平剛性の算出は水平力の合計値を建物基礎梁側の平均水平変位で除して算出する。Model-A の必要剛性は $K_{min} = 1.25 \times 10^7 [kN/m]$ である。

数値結果

解析結果を図 5.16, 17 に示す。図 5.16 は 1 回の試行において最終世代で得られた非劣解集合の目的関数空間上の解の状況である。ここで図 5.16 は縦軸が部材総重量の値を横軸が水平剛性を示す。また、赤丸(●)でプロットした点は初期形状である。図 5.17 は非劣解集合内の必要剛性を満足する解形状の一例である。なお、図 5.17 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率を示す。

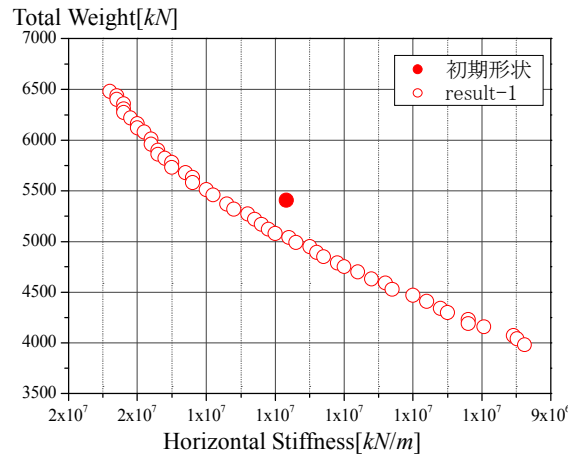
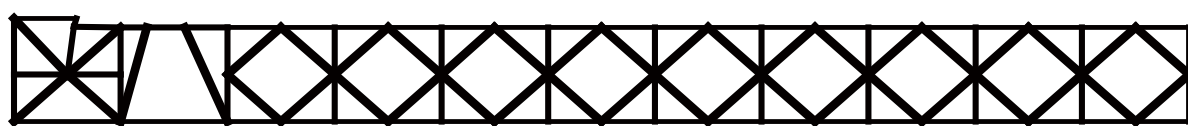


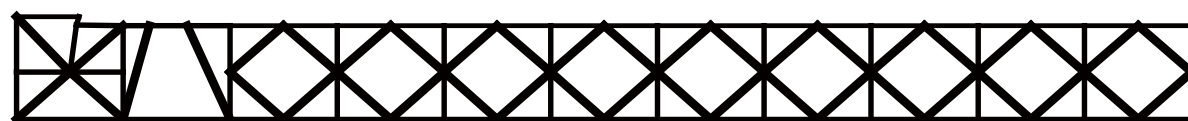
図 5. 1 6 数値結果 (目的関数空間の解状況)



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.28 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 5406.0 \text{ [kN]}$$

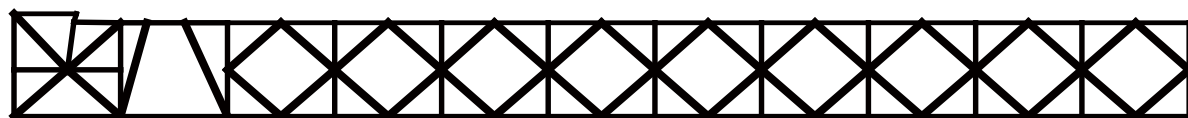
初期形状



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.32 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 5170.0 \text{ [kN]}$$

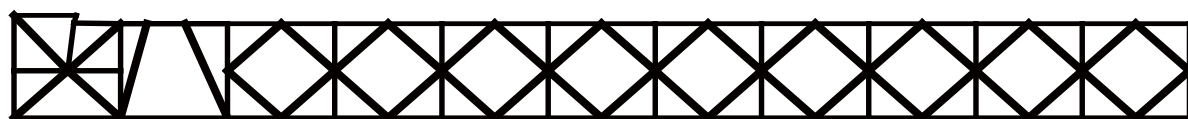
form-A



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.31 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 5120.0 \text{ [kN]}$$

form-B



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.30 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 5080.0 \text{ [kN]}$$

form-C

図5. 17 解形状 (Model-A)

5. 3. 2. 4 数値結果 2(Model-B)

数値結果 2 は Model-B の水平剛性の逆数+部材総重量を目標とした多目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A} \quad (5.3.4)$$

$$\text{to minimize} \quad f_1(\mathbf{A}) = \frac{1}{K} \quad (5.3.5a,b)$$

$$f_2(\mathbf{A}) = V$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (5.3.6a,b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U$$

$$\mathbf{A}^L = \begin{bmatrix} A_1^L & A_2^L & \dots & A_6^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}^U = \begin{bmatrix} A_1^U & A_2^U & \dots & A_6^U \end{bmatrix}$$

ここで、 K ：水平剛性、 V ：部材総重量、 $\mathbf{A}^L, \mathbf{A}^U$ ：設計変数の側面制約条件であり $A^L = 1.0$ 、 $A^U = 20.0$ である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。水平剛性の算出は水平力の合計値を建物基礎梁側の平均水平変位で除して算出する。Model-B の必要剛性は $K_{min} = 1.20 \times 10^7 [kN/m]$ である。

数値結果

解析結果を図 5.18, 19 に示す。図 5.18 は 1 回の試行において最終世代で得られた非劣解集合の目的関数空間上の解の状況である。ここで図 5.18 は縦軸が部材総重量の値を横軸が水平剛性を示す。また、赤丸(●)でプロットした点は初期形状である。図 5.19 は非劣解集合内の必要剛性を満足する解形状の一例である。なお、図 5.19 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率を示す。

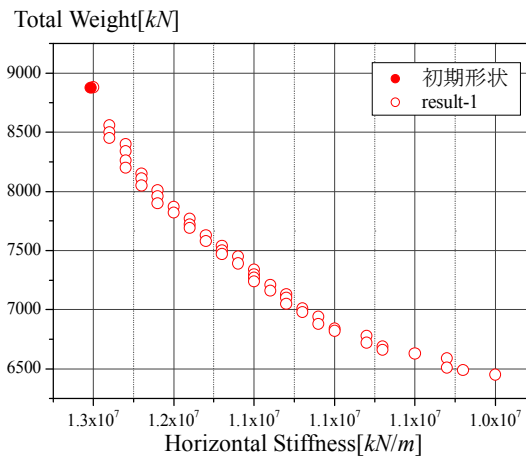


図 5. 1 8 数値結果(目的関数空間の解状況)



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.25 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 8876.0 \text{ [kN]}$$

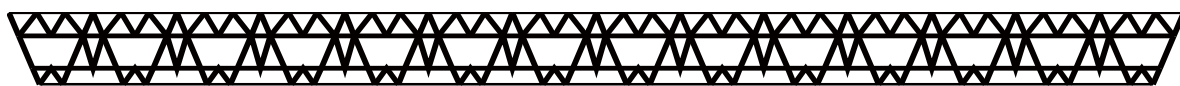
初期形状



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.22 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 8204.0 \text{ [kN]}$$

form-D



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.21 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 8045.0 \text{ [kN]}$$

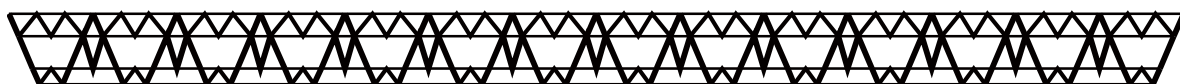
form-E



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.20 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 7901.0 \text{ [kN]}$$

form-F



$$f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 1.14 \times 10^7 \text{ [kN/m]}$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = 7241.0 \text{ [kN]}$$

form-G

図5. 19 解形状 (Model-B)

5. 3. 3 解の評価と形態決定

Model-A

図 5.16 より、設定した両目的関数はトレードオフの関係があり、非劣解集合は目的関数空間上でパレートフロントを形成する。初期形状と比較し、得られた非劣解集合の解は必要剛性を満足し、部材総重量の小さい形状が獲得されている。特に、form-C は初期形状と水平剛性の値がほぼ同値であり、部材総重量が約 10%縮減されている。図 5.17 より form-C 部材断面はトラス部の上弦材。下弦材の断面積は小さいものが選択されており、ダイヤモンド部の部材断面を大断面とすることで必要剛性を確保している。以上の結果から、必要剛性を満足し、部材総重量が最も小さい form-C を最終形態として選択する。

Model-B

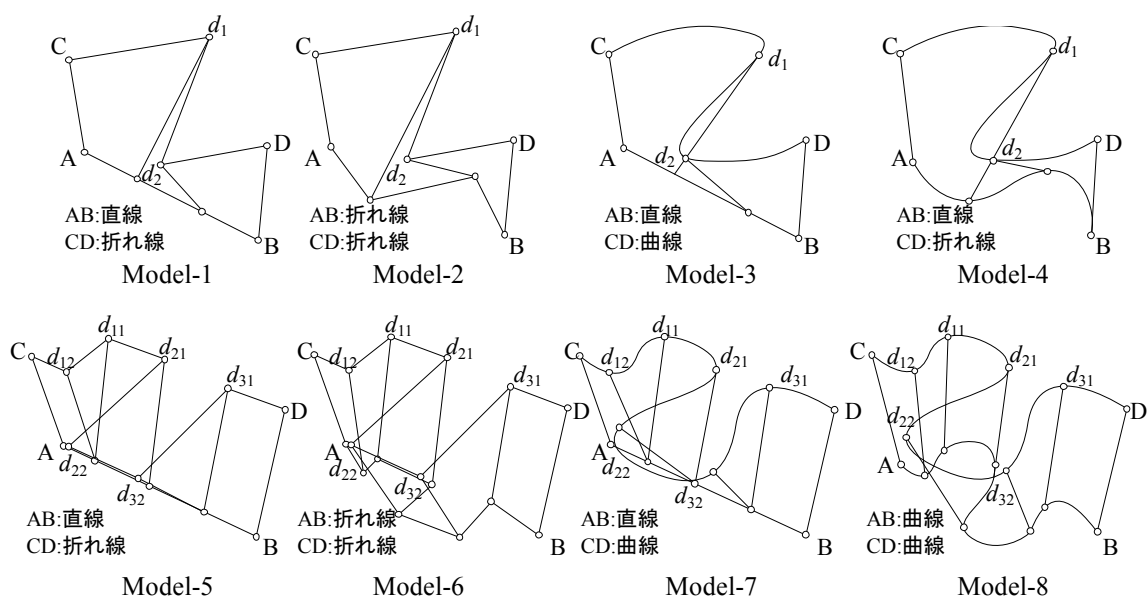
図 5.18 より、Model-B も設定した両目的関数はトレードオフの関係があり、非劣解集合は目的関数空間上でパレートフロントを形成する。なお、パレートフロントを形成している解の特徴として縦方向に解が並んでプロットされている箇所が複数存在する。これは水平剛性に寄与しにくい部材の部材断面が縮減された解群が目的関数空間上に多数存在しているためと考える。つまり、必要以上に大断面となっている部材があることを意味する。初期形状と比較し、得られた非劣解集合内の解は必要剛性を満足し、部材総重量の小さい形状が獲得されている。なお、初期形状の部材断面はすべて部材リスト番号 20 の部材で構成されているため、部材断面が最大を示す。図 5.19 より form-G が必要剛性を満足し部材総重量が最も縮減されている解である（約 20%縮減）。以上の結果から、必要剛性を満足し、部材総重量が最も小さい form-G を最終形態として選択する。

5. 4 ISGA を用いた構造形態創生：低層集合住宅を想定した構造物のアルゴリズムックデザイン

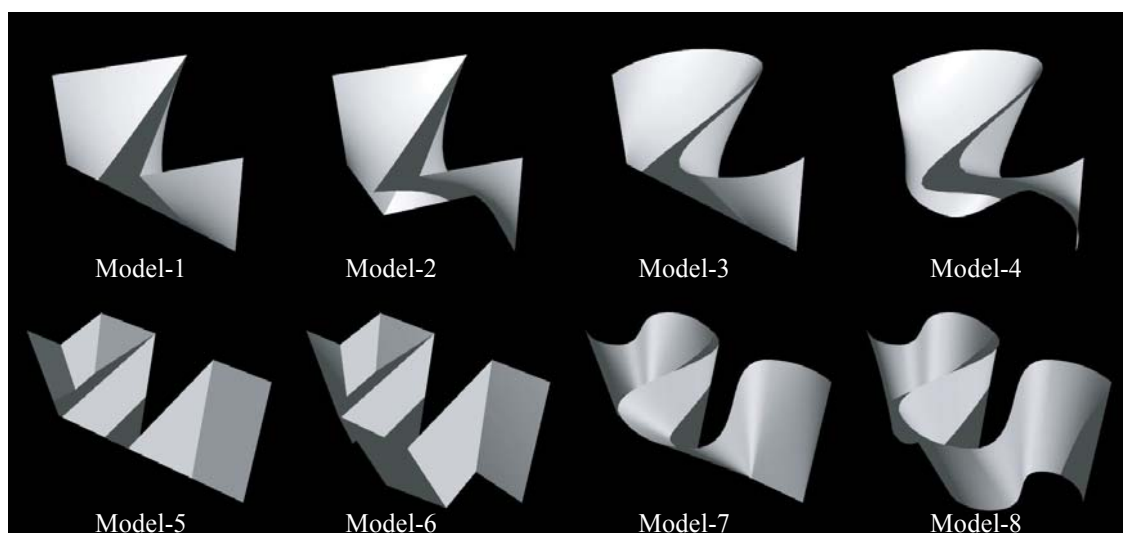
工学技術の発達、これまで建設不可能であった建築物の設計を可能とし、設計者の要求は多様化しつつある。最近、これら複数の設計要求に対して、コンピュータプログラミングにより建築形態を創り上げようとするアルゴリズムック・アーキテクチャ(アルゴリズムック・デザイン)が注目されている。アルゴリズムック・アーキテクチャとは、敷地や力学性能、経済性や環境条件、設計コンセプトなどの設計条件に対し、形態を生成する一連の手続き(アルゴリズム)を用いたデザインであり、設計条件を満足させた建築形態を創生していく作業である^{[5-9], [5-10]}。構造設計におけるアルゴリズムック・アーキテクチャは構造形態創生法の適用に対応する。本節ではここまで示してきた形態創生アルゴリズムを発展させ、集合住宅形態を生成する形態生成ルールをアルゴリズム内に組み込み、アルゴリズムック・アーキテクチャによる低層集合住宅の試設計を行う。

5. 4. 1 形状生成ルール

本提案の中核をなす掃引による3次元形態の生成ルールを説明する^{[5-11]-[5-13]}。基本となる形態モデルを図5.20に示す。掃引とは平面上(XY 座標系)の点や線、図形を立体方向(Z 軸座標)に移動させ、その軌跡を結ぶことにより3次元形態を生成する操作である。この操作は掃引する形状を直線、多角形、2次曲線などの曲線、あるいは曲線上に設けた節点 d の移動により多様な形状が表現できる(図5.20参照)。図5.20に示すモデルはいずれも単純な線の形と節点位置の設定と掃引による多様な3次元形状である。また、各形状は3次元フレームや連続体で表現されるため、構造物のモデル化が容易に行える利点を持つ。以下では、掃引する形状が単純な直線と節点位置の移動のみのModel-1を基準とした形状の生成ルールを示す。



a. 3次元形状の生成



b. 形状のモデリング

図 5. 20 掃引による 3 次元形状の生成とモデリング(n :端点間の節点数)

操作(1)：3次元空間の XY 平面上に線分 \overline{AB} , \overline{CD} ($\overline{AB}=\overline{CD}$)を設ける。 \overline{AB} , \overline{CD} に対して、各直線上の端点間に n 個の節点 $d_k^{ab}(x, y, z)$, $d_l^{cd}(x, y, z)$ を設ける。

$$\begin{aligned} d_k^{ab}(x, y, z) \quad (k=1, 2, 3, \dots, n \quad z=0) \\ d_l^{cd}(x, y, z) \quad (l=1, 2, 3, \dots, n \quad z=0) \\ d_k^{ab}(x, y, z) = d_l^{cd}(x, y, z) \quad \text{if } k=l \end{aligned} \quad (5.4.1abc)$$

操作(2)：両端点を含む \overline{CD} 上の各節点を \overline{AB} の水平・垂直方向に u_{ni} , v_{ni} ($ni = 1, 2, 3, \dots, n+2$)移動させる。

操作(3)： \overline{CD} を Z 軸方向に掃引する。

以上、操作(1)–(3)より3次元形状を生成する(図5.21参照)。構造物への離散化は骨組構造の場合、掃引した直線が柱、梁となる。形状が曲面の場合は、平面シェル要素や格子状骨組に離散化する。なお、曲面形状を表現する場合、パラメトリック曲面の制御点座標 \mathbf{P} を節点 d の代わりに用いれば、操作(1)–(3)に示した同様の手順で曲面形状が表現可能である。制御点の掃引による3次元曲面形状の生成例を図5.22に示す。

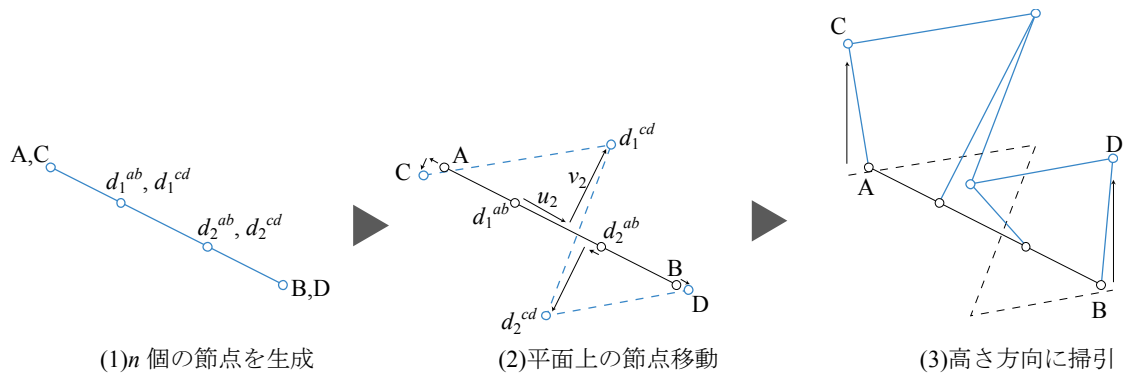


図5.21 構造形状の生成手順($n=2$ の場合)

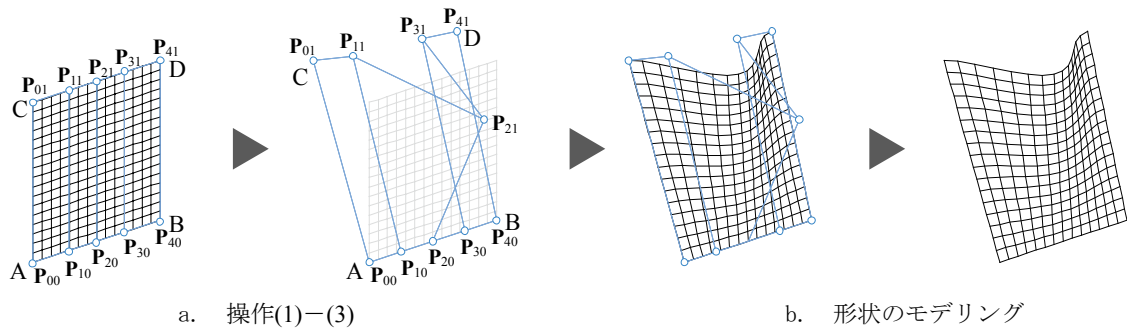


図5.22 パラメトリック曲面を用いた掃引($n=3$ の場合)

5. 4. 2 構造形態創生アルゴリズム

本節で提案する構造形態創生法は、第3章で述べた解の多様性を考慮した優良解探索GA系解法 ISGAのアルゴリズムに前項で説明した形態生成ルールと敷地条件, 配置に関するアルゴリズムを組み込み、第3章式(3. 1. 1)–(3. 1. 5), (3. 4. 1)に示す制約条件付き多目的最適化問題を解くものである。形態創生アルゴリズムの流れを以下に示す。

形態創生アルゴリズム

- step1 敷地情報を設定する。対象敷地は m 個の等間隔にグリッド分割した節点の集合とする。
- step2 敷地に対し、 β 個の形態モデルの配置位置を決定する。配置は以下の手順で行う。
- A) グリッド化された敷地に対して二つの節点 i, j 節点を選択する。
- B) i, j が次式で表す条件を満足する時、 i, j をモデル s ($s = 1, 2, 3, \dots, \beta$) の配置位置 i_s, j_s とする。

$$0 \leq \sqrt{(x_{i_s} - x_{j_s})^2 + (y_{i_s} - y_{j_s})^2} \leq L^U \quad (5.4.2)$$

$$i_s, j_s \neq i_t, j_t \quad (t = 1, 2, 3, \dots, \beta \quad t \neq s)$$

$$\begin{cases} \tilde{x}_{st} < x_{i_s}, x_{i_t} & \text{or} & \tilde{x}_{st} > x_{j_s}, x_{j_t} & (x_{i_s} \leq x_{j_s} \quad x_{i_t} \leq x_{j_t}) \\ \tilde{y}_{st} < y_{i_s}, y_{i_t} & \text{or} & \tilde{y}_{st} > y_{j_s}, y_{j_t} & (y_{i_s} \leq y_{j_s} \quad y_{i_t} \geq y_{j_t}) \end{cases}$$

- step3 GAの基本的なパラメータを設定する。
- step4 乱数を用いて初期個体群 \mathbf{P}_t を二進数により生成する。世代数 $t=0$ とする。
- step5 構造形態を前項で述べた操作①–③で表現し、構造解析により目的関数 $f(\mathbf{A}, \mathbf{R})$ の計算及び制約条件の判定を行う。
- step6 ISGAにより解の評価 $F(i)$ 、優良解の保存を行う。
- step7 世代数が設定数に達していない場合、ISGAオペレータにより全個体群の更新を行う。
- step8 $t = t + 1$ とし、step5に戻る。
- step9 数値計算終了後、解候補の中から設計者の意向に沿って形態を決定する。設計者の意向する形態が得られない場合、step3に戻り再計算する。
- step10 図面や模型, CGを用いて形態を表現し、全体計画を考慮した住戸や導線をスタディする。

世代数が設定数に達した場合、step6の段階で数値計算は終了する。

また、本手法は制約条件を満たさない解に対しペナルティを与える。ここでは、ペナルティとして制約条件を満たさない解は記憶細胞内に保存させないこととする。設計変数は掃引する節点の座標値である。構造解析は線形弾性範囲内とする。

以上より、ここで提案する構造形態創生法を活用した最適設計手順を第2章に示した最適設計フローに当てはめると次のようになる。

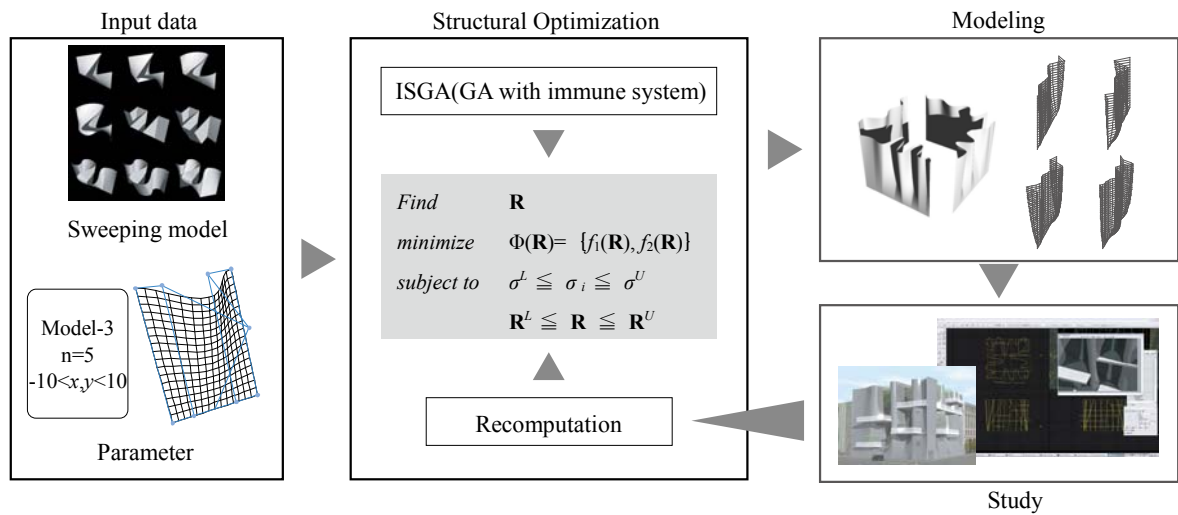


図5. 23 最適設計フロー

5. 4. 3 構造形態創生 1

構造形態創生例1は第5章4節2項で提案した形態創生アルゴリズムを用いたアルゴリズムミックアーキテクチャを行う。ここでは低層集合住宅の構造要素となるファサード形状を第5章4節1項で説明したテンソル積ベジェ曲線を使用した形状生成ルールにて生成し、構造形態創生法を活用して構造形態を得る。次に、ファサード形状を組み合わせた低層集合住宅の試設計例へと展開し、構造形態創生法を活用した一連の最適設計を実践する。

5. 4. 3. 1 設計条件

低層集合住宅の設計を行うにあたり、設計条件を設定する。設計条件は以下の通りである。

- a) 対象敷地は矩形 ($35[m] \times 35[m]$)。
- b) ここでは、得られた構造形態を組み合わせて試設計を行うものとし、配置数は設定しない。
- c) 生成するモデルは図5. 20に示すModel-3のみとする。図5. 24にモデルの初期形状を示す。
- d) 構造は鉄骨格子シェルを採用する。ただし、板・シェル要素を用いることも可能である。
- e) 構造解析は鉛直荷重に対する形態モデルの構造合理性のみに着目する。載荷荷重は自重と各階に集合住宅を想定した積載荷重として $w = 10.0[kN/m]$ 作用させる。

ここでは、得られた複数の構造形態を自由に組み合わせて低層集合住宅を設計することを考える。そのため、構造形態の配置に関するstep-1, 2は本節の数値計算では省略する。

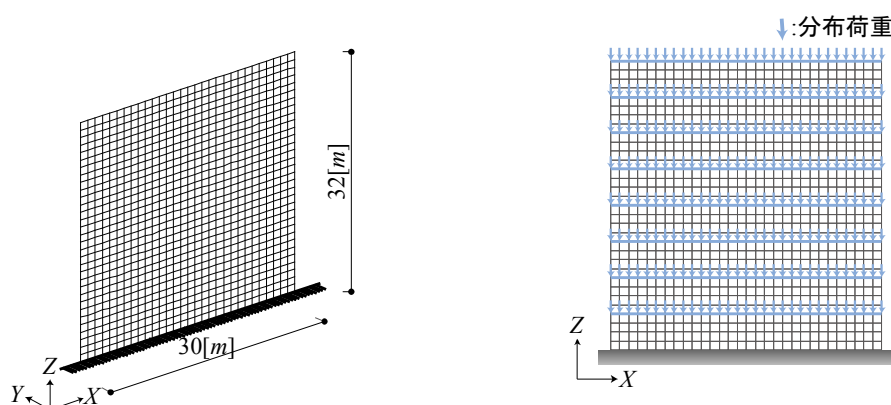


図 5. 24 パラメトリック曲面を用いた掃引($n=3$ の場合)

5. 4. 3. 2 最適化問題の定式化

評価指標として機能的な指標と構造的な指標を設定する。機能的な指標は内部空間に関する構造形態の表面積とする。表面積を目的関数とすることで内部空間の床面積の確保と種々の曲面形状の探索をねらう。構造的な指標は構造形態の最大節点変位である。最適化問題は次式で定式化される。なお、表面積は最大節点変位のトレードオフの関係を鑑み逆数とする。

$$\text{Find} \quad \mathbf{R} \quad (5.4.3)$$

$$\text{to minimize} \quad f_1(\mathbf{R}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n S_i(\mathbf{R})} \quad (5.4.4a,b)$$

$$f_2(\mathbf{R}) = \max \delta(\mathbf{R})$$

$$\text{subject to} \quad \sigma^L \leq \sigma_i \leq \sigma^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (5.4.5)$$

ここで、 $S_i(\mathbf{R})$: i 要素の要素表面積, $\delta(\mathbf{R})$:節点変位を表す。応力制約はSN400Bを想定し長期許容応力度設計を行う。設計変数はModel-3を表現する制御点の x, y 座標 ($-10.0[m] \leq x, y \leq 10.0[m]$) である。分割数は全モデル $n=5$ とする。したがって、設計変数の総数は11であり、 $8 \times 11 \text{ bit}$ の二進数でコーディングする。材料は鉄骨構造を想定し、ヤング係数 $E = 2.05 \times 10^8 [kN/m^2]$, セン断弾性定数 $G = 7.8 \times 10^7 [kN/m^2]$ とする。

解探索手法は多様な曲面形状を得ることを目的に目的関数空間と設計変数空間の多様性を同時に考慮したGA系解法ISGAを採用する。GAの基本的なパラメータは表5.8に示す通りとする。

表5. 8 ISGAパラメータ

個体数	200	記憶細胞数	100
世代数	500	制御点の遺伝子長	8 x 11 bit
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.01	交叉方式	二点交叉

5. 4. 3. 3 数値結果

数値結果を図5. 25, 26に示す。図5. 25はISGA($r = 100, H = 0.01$)の2回試行した結果を目的関数空間上にプロットした図である。ここで、図5. 25目的関数空間は横軸：最大節点変位、縦軸：総表面積の逆数を表す。図5. 26はresult-2で得られた構造形態(form-A-E)である。図5. 25より式(5. 3. 4a,b)の各目的関数はトレードオフの関係があり、表面積の値は構造形態の凹凸の広がりに影響する。ISGAは優良解探索より、パレートフロントが帯状に形成されており、図5. 26より目的関数空間上の各点において種々の曲面形態が得られた。

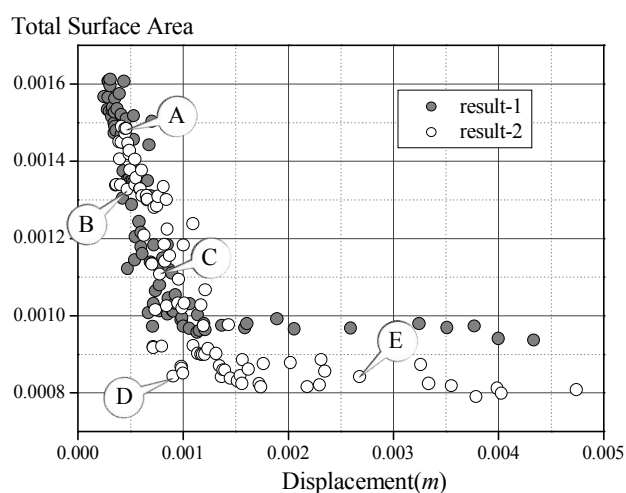


図 5. 25 数値結果(目的関数空間)

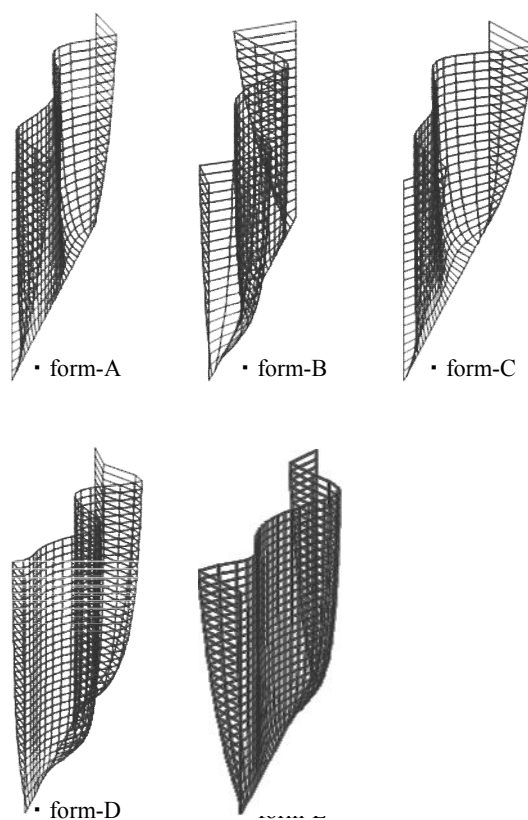


図 5. 26 構造形態例(result-2)

5. 4. 3. 4 試設計

得られた構造形態を基準に低層集合住宅の試設計を行う^{[5.14],[5.15]}。図5.27に試設計の流れを示す。選択した構造形態は各形態の高さが統一されたモデル(form-A, B, D, E)である。まず、構造形態を図面や模型・CGを用いて表現し、その配置を決定する。次に解析では考慮されていない各住戸の開口やボリュームのスタディを行い、随時プランの修正を加える。特に、模型制作は解析や図面で考慮しきれない断面や空間スタディに有効である。その際、修正された形態を再度形態創生アルゴリズムにかけ、解探索することも可能である。図5.28-30に最終形態プランのCGパースと模型写真を示す。最終プランの設計コンセプトは構造形態の凹凸形状によって区切られる空間のプライバシーと断面方向に変化する凹凸形状の違いによる各階の用途の違いを意識しながら設計した。

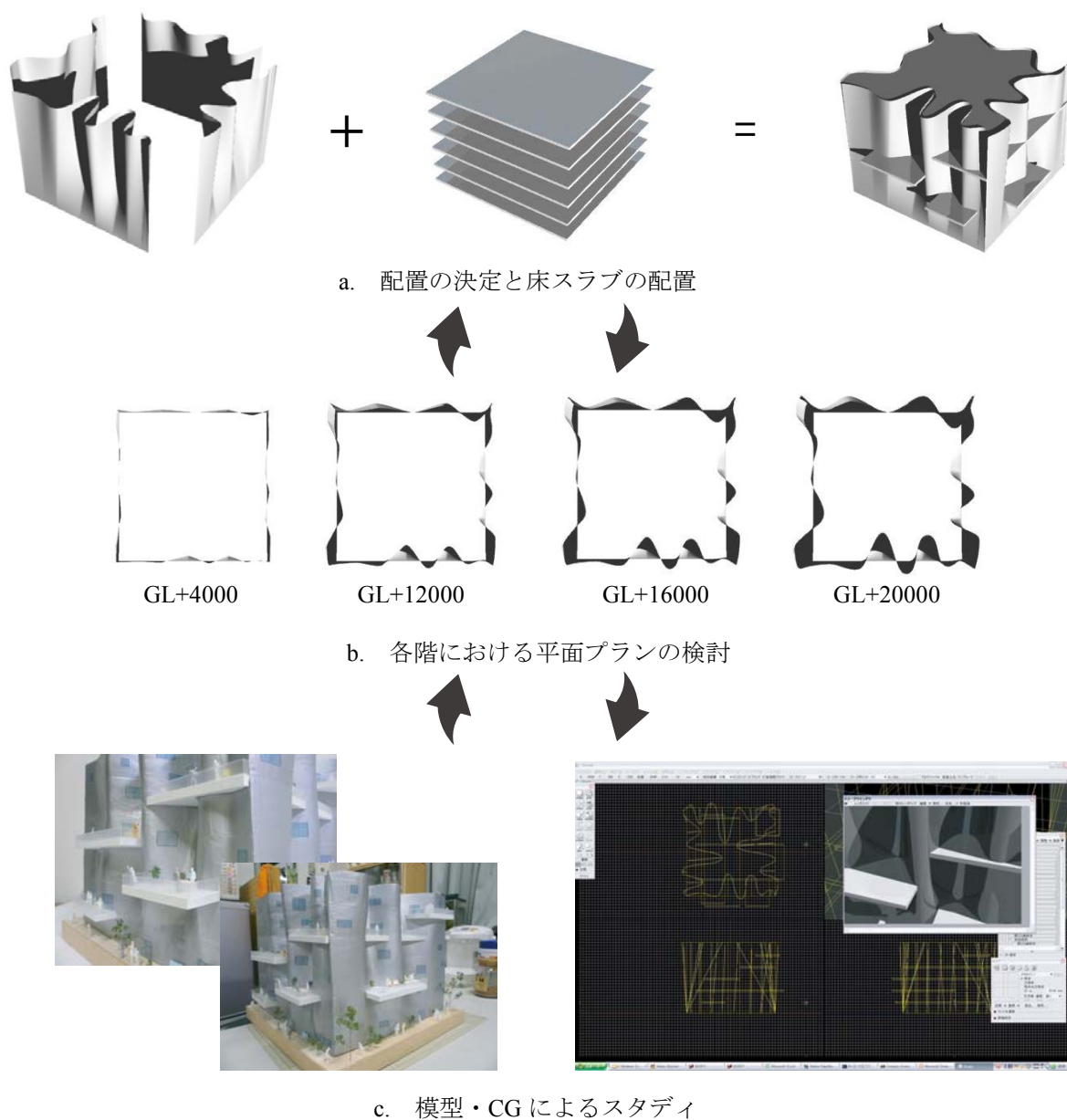


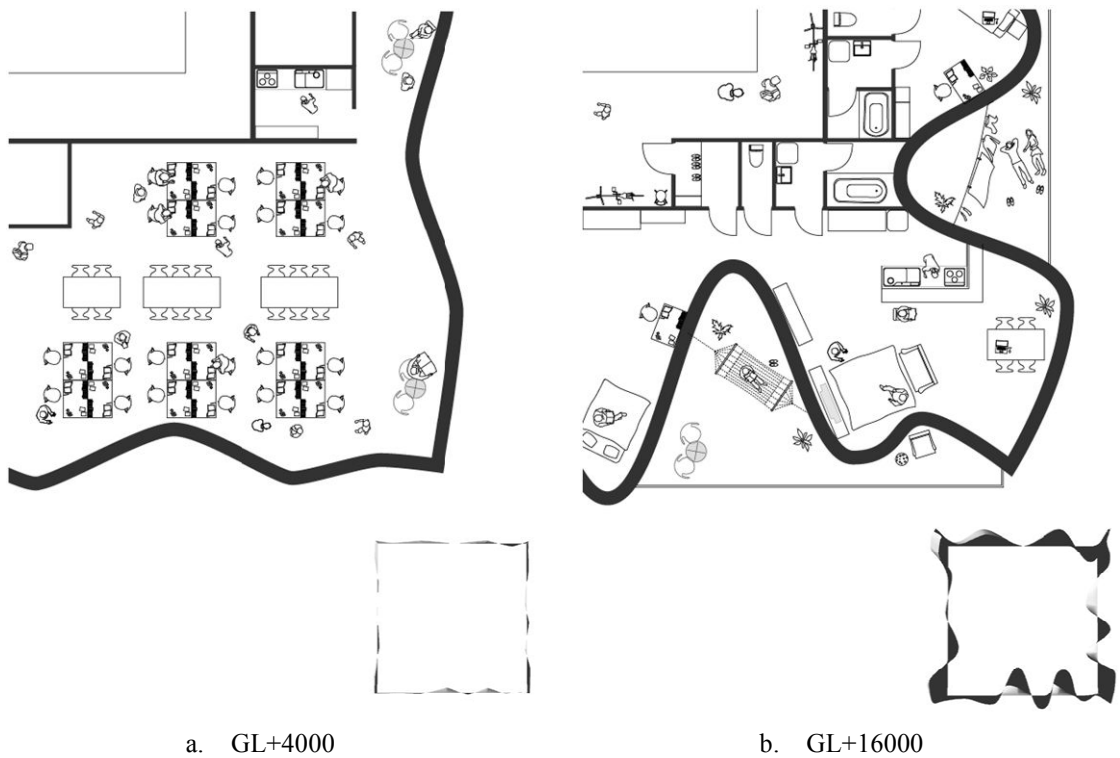
図5.27 試設計の流れ



図5. 28 最終形態 CG パース



図5. 29 最終形態模型写真



a. GL+4000

b. GL+16000

図5. 30 平面プラン例

5. 4. 4 構造形態創生 2

構造形態創生例2は第5章4節2項で提案した形態創生アルゴリズムを用いて形態の配置も含めた低層集合住宅のアルゴリズム・アーキテクチャを行う。扱うモデルは図5. 20に示すModel-5を用いる。ここでは、集合住宅形態を評価するに当たり、形態の機能性を評価する目的関数を提案する。形態創生例では正方形の敷地を想定し、機能と構造の両方を考慮した多目的最適化問題を扱う。さらに試設計へ展開し、構造形態創生を用いた提案アルゴリズムによる建築設計の可能性について考察する。

5. 4. 4. 1 機能面を評価する目的関数の設定

力学的な評価に関する部材総体積や最大節点変位、ひずみエネルギーなどの目的関数の設定は、形態決定に大きな要因となる。しかし、建築形態の構造以外の機能に対して、これらは影響しにくい。したがって、ここでは多目的最適化の目的関数として力学的な評価指標に加えて集合住宅の設計に重要な各住戸の関係性(通風, 採光など)を考慮した目的関数を式(5.4.6)に与える。

$$f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = w_a \sum_{s=1, s \neq t}^{\beta} \sum_{t=1}^{\beta} A_{st}(\mathbf{A}, \mathbf{R}) + w_b \sum_{s=1}^{\beta} L_s(\mathbf{A}, \mathbf{R}) + w_c D(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \quad (5.4.6)$$

ここで、 \mathbf{A} : 部材情報ベクトル, \mathbf{R} : 節点情報ベクトル, A_{st} : 構造形態長手方向を直径とする円 O_s と O_t の重なる部分の面積, L_s : 構造形態間の距離, D : 立体方向に関する評価, β : 形態配置数, w_a, w_b, w_c : 重み係数を表す。建築物の機能は各構造形態の大きさを直径とする同心円の重なりと構造形態間の距離で評価される。図5.31にその詳細を示す。つまり、式(5.4.6)は構造形態間の距離の総和であり、これを物理的な意味から密集性と定義する。

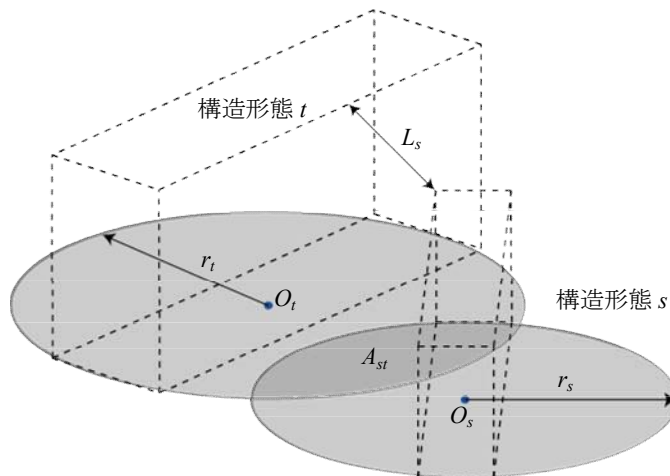


図 5. 3 1 密集性の定義

5. 4. 4. 2 設計条件

低層集合住宅の設計を行うにあたり、設計条件を設定する。設計条件は以下の通りである。

- a) 対象敷地は矩形($30[m] \times 30[m]$)敷地モデルを図5.32に示す。
- b) 敷地のグリッドスパンは経済スパンを想定した $6[m] \times 6[m]$ とする。
- c) 生成するモデルは図5.20に示すModel-5のみとする。
- d) モデルの配置数は $\beta=6$ とする。
- e) 構造は鉄骨骨組構造を採用する。
- f) 構造解析は鉛直荷重に対する形態モデルの構造合理性のみに着目する。載荷荷重は自重と積載荷重, 床荷重を設定する。積載荷重は建築基準法施行令で定められている単位荷重を用い、各階に $6[m] \times 6[m]$ 四方のスラブを柱1本が負担するものとして鉛直方向に作用させる。床荷重も同様とする。

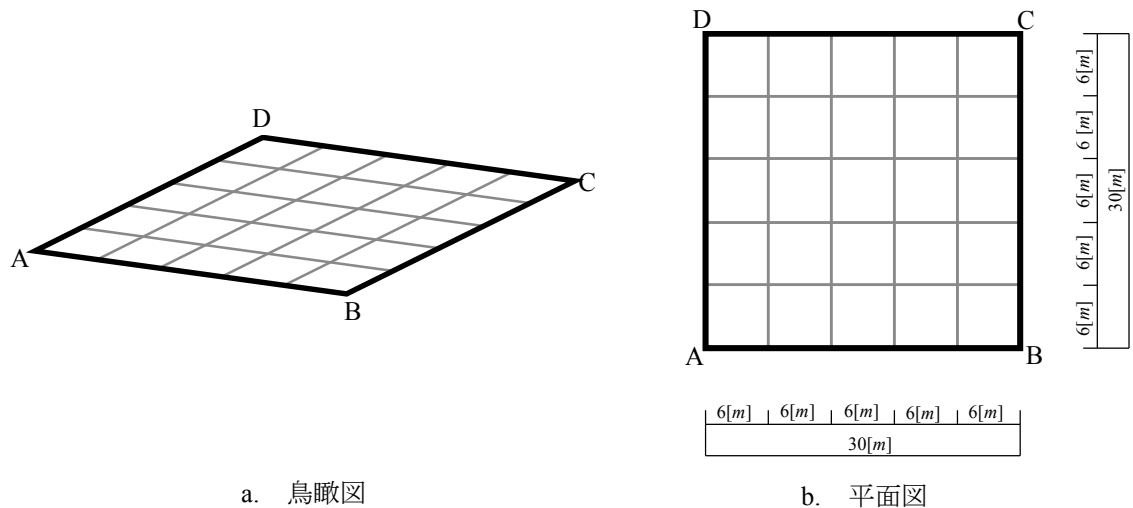


図5. 3 2 敷地モデル

5. 4. 4. 3 最適化問題の定式化

ここでは、式(5.4.6)に示す密集性の逆数と部材総体積の同時最小化を目標とした多目的最適化問題を扱う。最適化問題は次式で定式化される。なお、ここでは形態の配置を固定とした構造形態の創生を行うため、密集性は配置に関する項を除いた簡略式を用いる。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (5.4.7)$$

$$\text{to minimize} \quad f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{\left(\sum_{s=1}^{\beta} L_s(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \right)} \quad (5.4.8)$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \mathbf{L}(\mathbf{R})^T \mathbf{A} \quad (5.4.9)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma^L \leq \sigma_i \leq \sigma^U \quad (5.4.10)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (5.4.11ab)$$

ここで、 \mathbf{L} :部材長ベクトルを表す。なお、部材総体積は単位重量を乗じ部材総重量として計算する。応力制約はSN400Bを想定した長期許容応力度設計を行う。設計変数は形態の分割数 n , 節点の移動距離 ($-1.5[m] \leq u \leq 1.5[m]$, $3.0[m] \leq v \leq 5.0[m]$), 構造形態の高さ h ($8.0[m] \leq h \leq 20.0[m]$)、部材断面であり各々8bitの二進数でコーディングする。なお、部材断面は後述する部材断面リストに対応させた番号を設計変数とする。材料はSN400Bを想定し、ヤング係数 $E = 2.05 \times 10^8 [kN/m^2]$, せん断弾性定数 $G = 7.8 \times 10^7 [kN/m^2]$ とする。

解探索手法は配置パターンの多様性を考慮して目的関数空間と設計変数空間の多様性を同時に考慮したGA系解法ISGAを採用する。GAの基本的なパラメータは表5.9に示す通りとする。また、設計変数に対応させる部材断面リストは柱,梁で表5.10,11のように設定する。

表 5. 9 ISGA パラメータ

個体数	200	記憶細胞数	100
世代数	2000	制御点の遺伝子長	8 x 78 bit
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.01	交叉方式	二点交叉

表 5. 10 部材断面リスト(SN400B) 柱

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	□-200x200x6	1 2	□-300x300x8
2	□-200x200x8	1 3	□-300x300x9
3	□-200x200x9	1 4	□-300x300x12
4	□-200x200x12	1 5	□-300x300x14
5	□-250x250x6	1 6	□-300x300x16
6	□-250x250x8	1 7	□-300x300x19
7	□-250x250x9	1 8	□-350x350x9
8	□-250x250x12	1 9	□-350x350x12
9	□-250x250x14	2 0	□-350x350x14
1 0	□-250x250x16	2 1	□-350x350x16
1 1	□-300x300x6	2 2	□-350x350x19

表 5. 11 部材断面リスト(SN400B) 梁

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	H-198x99x4.5x7	9	H-396x199x7x11
2	H-200x100x5.5x8	1 0	H-400x200x8x13
3	H-248x124x5x8	1 1	H-446x199x8x12
4	H-250x125x6x9	1 2	H-450x200x9x14
5	H-298x149x5.5x8	1 3	H-496x200x9x14
6	H-300x150x6.5x9	1 4	H-500x200x10x16
7	H-346x174x6x9	1 5	H-596x199x10x15
8	H-350x175x7x11	1 6	H-600x200x11x17

5. 4. 4. 4 数値結果

数値結果を図5.33, 34に示す。図5.33はISGA ($r=100, H=0.01, 0.05$) の複数回試行した数値結果の一例を目的関数空間上にプロットしたものである。図5.34はresult-1により得られた解個体の構造形態例である。なお、図5.33において縦軸は部材総体積を横軸は密集性を示す。図5.34において実線太さは部材断面の比率を表している。図5.33より各目的関数はトレードオフの関係があり、密集性の値は構造形態の高さと水平・垂直方向の広がりに影響する。ISGAはパレートフロント及びその近傍の優良解を捉えており、目的関数空間上の各点において種々の構造形態が得られた。

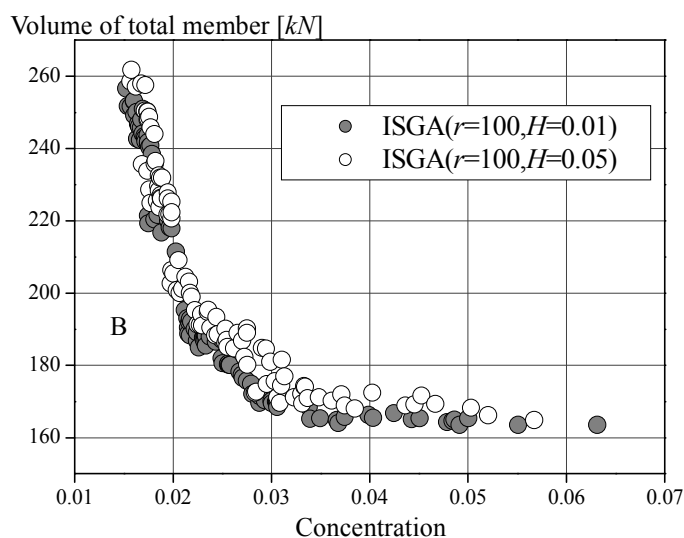


図 5. 3 3 数値結果 (目的関数空間)

5. 4. 4. 5 試設計

得られた構造形態を基準に、低層集合住宅の全体計画・設計を行う。選択した形態は各形態モデルの高さが異なり多くの住戸が確保できるform-Aである。構造形態を図面や模型で表現し、解析では考慮されていないスラブ、通路、階段などを導入する。設計コンセプトに基づき、図面と模型で導線や採光、各住戸の開口やボリュームのスタディを行い、随時プランの修正を加える。特に、模型制作は解析や図面では表現しきれない断面方向の設計に有効である。その際、修正された形態を再度構造形態最適化アルゴリズムにかけ解探索することも可能である。図5.35, 36に最終形態プランの図面および模型写真を示す。最終プランの設計コンセプトとして、各住戸に十分なオープンスペースを設け、連続的に広がりのある住空間を目指した。構造形態の特徴を利用し、住戸は上階に行くに従って広い空間を確保できるよう配置する。その際、屋上部分はオープンスペースとして開放し、立体的に導線を計画した。同様に設計パラメータを変更し、別コンセプトで行った設計例の模型写真を図5.37に示す。図5.37a,bは形態モデルの水平・垂直方向と高さのパラメータ v_{ni}, u_n, h の側面制約条件を変更し、密集度を上げた例である。また、対象敷地を大きく設定し、集合住宅に加えて商業施設などの機能を導入した多目的空間の設計例を図5.37cに示す。

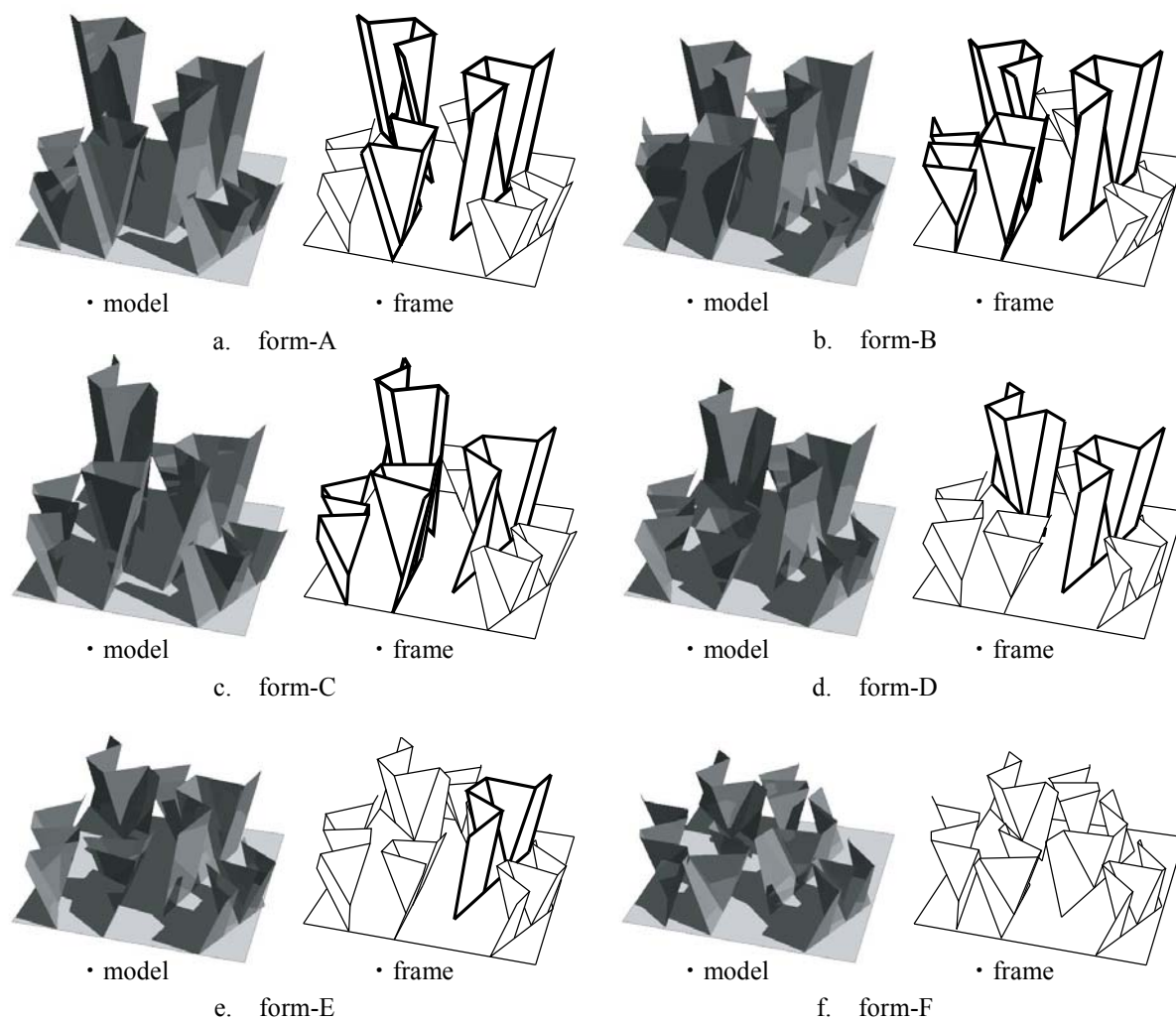


図5. 3 4 数値結果(目的関数空間)

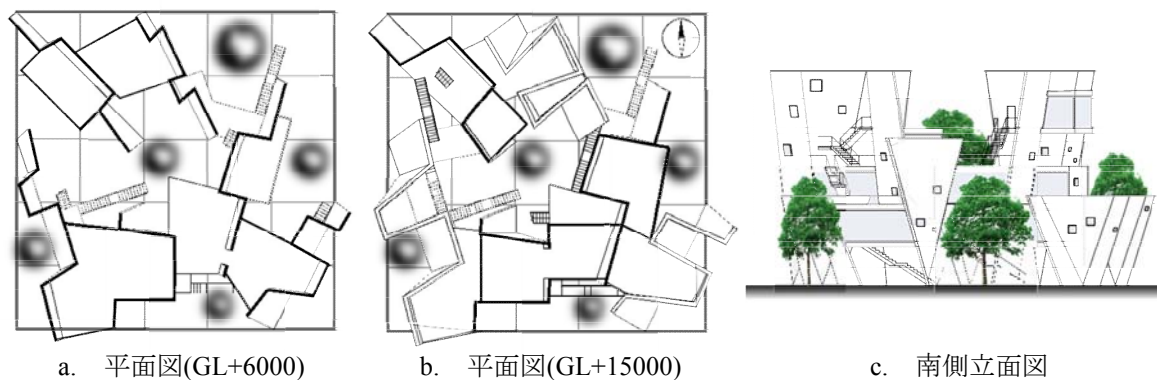


図5. 35 最終形態プラン

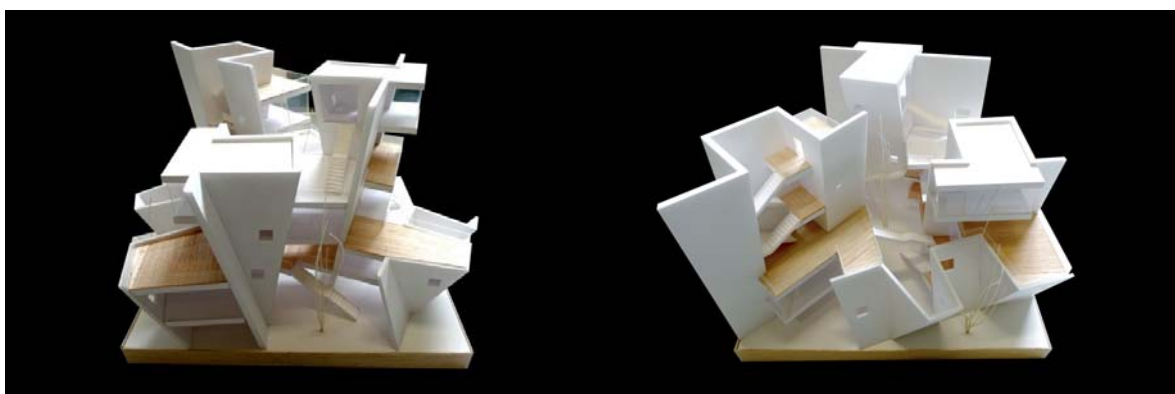
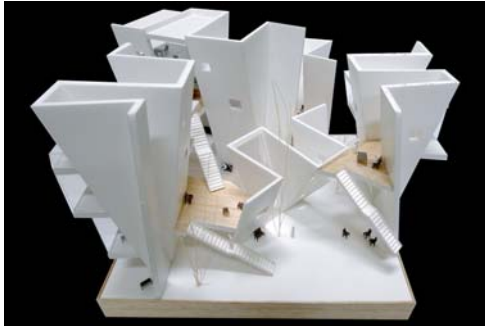
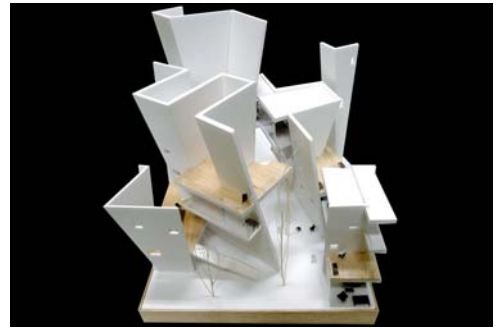


図5. 36 模型写真



a. 変更パラメータ : u, v



b. 変更パラメータ : h



e. 変更パラメータ:敷地条件, n

図5. 37 数値結果(目的関数空間)

5. 5 結語

SGA を用いた構造形態創生と最適設計

SGA を用いた構造形態創生法を実物件へ活用した事例として TOTO ミュージアムの形態決定手順を示した。建築形態への構造形態創生法の適用は設計条件をどのように定量化し最適化問題へ組み込むか、また、得られた解をどのように意匠設計者に提示して、形態の情報を共有していくかが重要である。以下に得られた知見を示す。

(a) 本法は広く知られている最適化手法の SGA を採用し、側面制約の範囲を調整するという極めてシンプルな設計手法を用いることで、構造合理性と意匠性を満足させた解形態が獲得できること、構造形態創生法が設計手法の一つのスタディツールとして活用できることを示した。

(b) 最適化の適用範囲は曲面を構成するリングアーチのみに限定し、曲面形態全体の構成部と構造形態創生部を切り離して扱ったことは、構造形態創生法が利便性の高い設計スタディツールとして活用できた要因の一つである。

(c) このような単純化した設計手順によるデザイン性を考慮した構造形態創生法は設計条件の反映が容易であり、種々の建築形態決定の設計スタディツールとして適用性が高いと考える。

SPEA2 を用いた構造形態創生と最適設計

SPEA2 による構造形態創生法を活用した最適設計例として平面トラスフレームの経済設計を行った。最適化問題は水平剛性の逆数と部材総体積を最小化させる多目的最適化問題を設定し、必要剛性を満足し部材総体積が最小となる断面パターンを、構造形態創生法を活用して検討した。得られた知見を以下に示す。

(a) 構造形態創生の基本問題ともいえる部材総体積の最小化問題をトラスフレームの経済設計へ利用した。最適設計の結果、必要剛性を満足し部材総体積を最小化させる断面配置パターンが得られた。

(b) 本手法はトラスパターンを変更した場合においても解析モデルの変更のみで簡単に汎用することが可能である。

(c) 部材断面の割り当てを部材の応力レベルに応じてグルーピングさせることで設計変数を縮減させ、解析時間の短縮が図れることを確認した。

(d) 部材断面積のみを設計変数として扱うことで、計算アルゴリズムを単純化させ、本設計で扱ったモデル以外にも構造形態創生法が活用できる可能性が示せたと考える。

ISGA を用いた構造形態創生と最適設計

ISGAを用いた構造形態創生法の活用例として掃引による構造形態生成ルールを用いた低層集合住宅形態のアルゴリズムック・アーキテクチャを行った。ISGAによる多種多様な形態の獲得から得られた構造形態を基にスタディから試設計まで展開し、構造形態創生法を用いた最適設計手順の一連の流れを提案した。得られた知見を以下に示す。

(a) 形態生成ルールを用いるに際し、優良解探索解法ISGAはその他のアルゴリズムを容易に組み込むことができ、形態の意匠性を反映した形態創生アルゴリズムを提案することができた。

(b) 試設計を行う際、優良解探索の利用は種々の形態パターンをスタディすることができ、設計スタディツールとして利用できる可能性が示せた。

(c) 提案アルゴリズムは形態に関するパラメータの設定値により種々の形状がモデリングでき、形態創生手法として汎用性の高い。さらに、設定パラメータを有効利用することで、集合住宅以外の機能に対しても形態創生が適用可能である。

(d) 構造形態創生例1では形状の最適化を主眼としたが、構造形態創生例2のように意匠性に関する目的関数を提案することにより配置計画まで含めた構造形態創生が可能となることを示した。

(e) 構造形態創生例2で提案した密集性は形状の配置に関する評価を行うことが可能であり、今後式(5.3.6)第2項も含めた目的関数の設定を行うことにより配置によるボリューム間のより詳細な評価が行える可能性がある。



— 第6章 遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態 創生と最適設計—空間構造への適用例—

鉄骨格子シェルの構造形態創生例を示す。空間構造の実設計へ構造形態創生を応用していく上で、製作・施工性に関する一評価指標を提案し、複雑形態の製作・施工性を改善させる手段として構造形態創生が活用できることを示す。まず、基礎問題を設定し数値解析結果より本評価指標が目的関数および制約条件として活用できること及び得られた解形態の特徴について考察する。さらに解析モデルを任意平面形状に拡張し、基本問題にて得られた知見を基に最適設計を実践する。数値結果より構造形態創生を活用した一連の設計手順を示すとともに提案手法の有効性を確認する。

—第6章—

遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生と最適設計—空間構造への適用例—

6. 1 構造形態創生概要

本章は、解析モデルを形態と力学特性が密接に関係する空間構造に発展させ、構造形態創生と最適設計を適用した例を示す。解析モデルは鉄骨格子シェルである。ここでは、第2章で提案した部材間の回転角に関する評価指標を格子シェルの製作・施工性を改善させる一指標として活用する。まず、本評価指標の特性把握を行うため、基本問題をいくつか設定して本評価指標を目的関数とする単一目的最適化を行い、得られた解形状の基本特性を考察する。次に、本評価指標に定量的な値を導入し、本評価指標を制約条件とする総ひずみエネルギー最小化問題および、総ひずみエネルギーと本評価指標を目的関数とする多目的最適化に発展させ、製作・施工性及び力学合理性に優れた解形状が獲得できることを示す。最終的にはこれらの知見を基に任意モデルを設定した最適設計を実施し、本評価指標を含めた最適設計例を示す。

6. 2 基本問題への適用

6. 2. 1 基礎問題 1 : 総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨格子シェルの単一目的最適化

本項は基本問題として正方形平面を有する鉄骨格子シェルの単一目的最適化問題に SGA を適用する。本項は基礎問題 2- 4 に対する基礎的問題として扱う。数値解析は形態の対称性を考慮した構造形態創生を行い、意匠的な制約条件は与えないものとする。

6. 2. 1. 1 解析モデル(Model-A, B)

解析モデルの初期形状は 2 パターン(Model-A,B)扱う。図 6.1,2 に初期形状を示す。

図 6.1 Model-A は一辺がスパン 30[m]の正方形平面を有する対称格子シェルモデル(節点数:121, 要素数:220)である(図 6.1a)。境界条件は四隅をピン支持とする。なお、解析はモデルの対称性を考慮して 1/4 領域(節点数 36, 要素数 60)を扱う(図 6.1b)。図 6.1d に設計変数である制御点座標の配置を示す。設計変数は形状と部材断面に関わる制御点座標とし、形状は X, Y, Z 軸座標値、部材断面は Z 軸座標値を設計変数とする。なお、初期形状の制御点座標は形状・断面ともに $p_{ij}=0.0[m]$, $p_{aij}=0.0[m]$ である。制御点座標は 1/4 領域にて 4×4 の等分割配置とする。図 6.1d において黒丸で示している部分が設計変数であり、形状を表現する制御点の境界点は支持点と一致することから設計変数から除く。したがって、設計変数の総数は対称性を考慮して 32(形状 : 22, 断面 : 10)であり $16 \times 32 \text{bit}$ の二進数でコード化する。載荷荷重は長期荷重として自重と等分布荷重 $w=1.0[kN/m^2]$ を作用させる。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8[kN/m^2]$, せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7[kN/m^2]$ とする。

図 6.2 Model-B は一辺がスパン 30[m]の正方形平面を有する対称斜格子シェルモデルである(節点数:61, 要素数:120)である(図 6.2a)。境界条件は四隅をピン支持とする。なお、解析はモデルの対称性を考慮して 1/4 領域(節点数 20, 要素数 31)を扱う(図 6.2b)。図 6.2d に設計変数である制御点座標の配置を示す。設計変数は形状と部材断面に関わる制御点座標とし、形状は X, Y, Z 軸座標値、部材断面は Z 軸座標値を設計変数とする。なお、初期形状の制御点座標は形状・断面ともに $p_{ij}=0.0[m]$, $p_{aij}=0.0[m]$ である。制御点座標は 1/4 領域にて 4×4 の等分割配置とする。図 6.2d において黒丸で示している部分が設計変数であり、形状を表現する制御点の境界部は支持点と一致することから設計変数から除く。したがって、設計変数の総数は対称性を考慮して 32(形状 : 22, 断面 : 10)であり $16 \times 32 \text{bit}$ の二進数でコード化する。設計荷重は長期荷重として自重と等分布荷重 $w=1.0[kN/m^2]$ を作用させる。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8[kN/m^2]$, せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7[kN/m^2]$ とする。

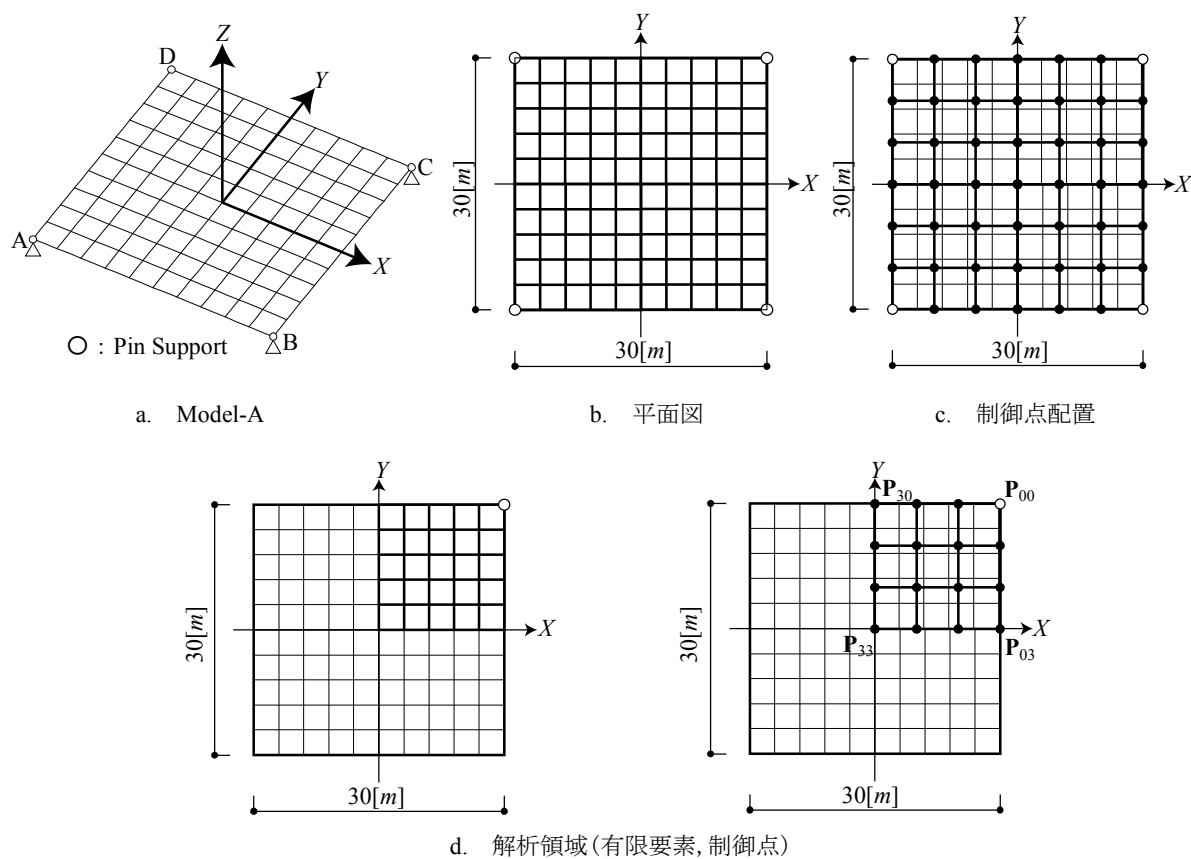


図6. 1 解析モデル Model-A

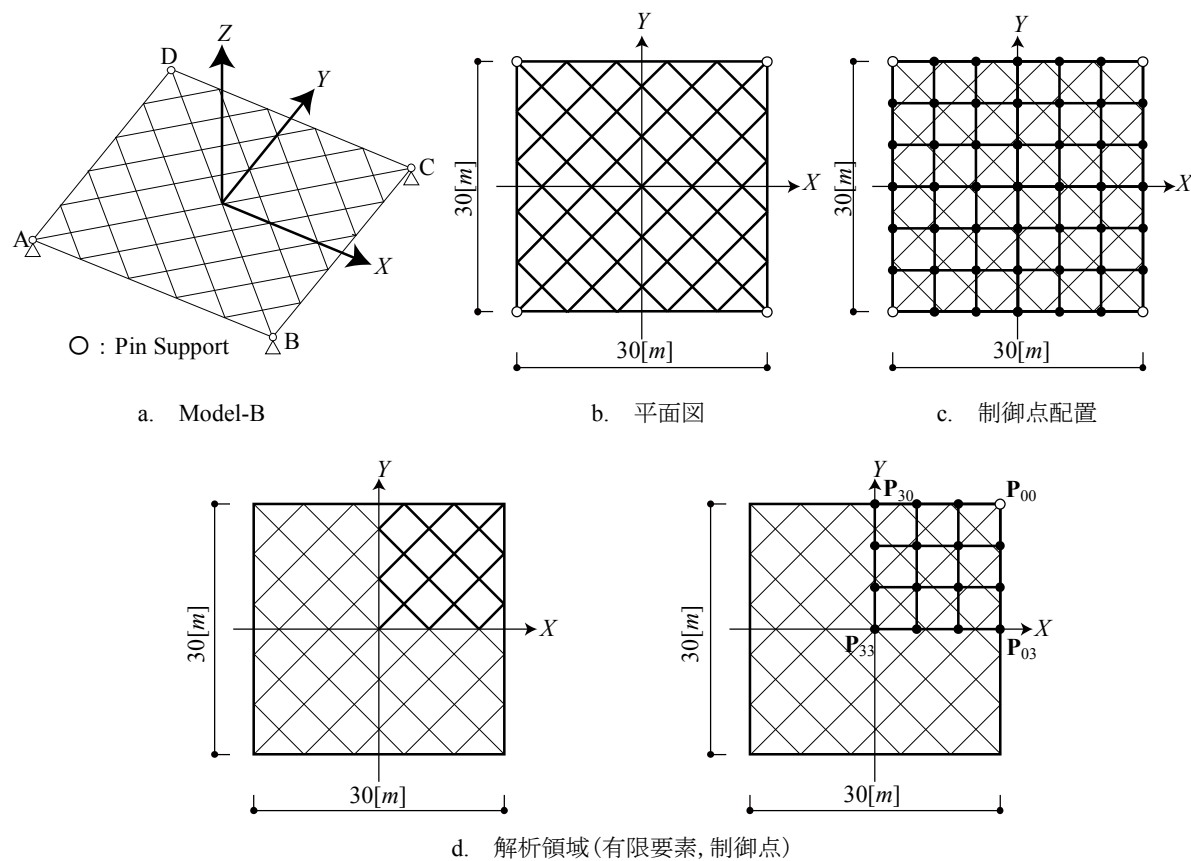


図6. 2 解析モデル Model-B

6. 2. 1. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法は SGA を用いる。解析パラメータを表 6.1 に示す。Model-A, B とも基本的な GA パラメータは同一とする。また、鉄骨造の構造形態創生では部材断面をリスト化してパラメトリック曲面の諸量と対応させる。ここで用いる部材断面リストを表 6.2 に示す。

表 6. 1 SGA パラメータ (Model-A,B)

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 22 <i>bit</i>
世代数	5000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 10 <i>bit</i>
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.002	交叉方式	二点交叉

表 6. 2 部材断面リスト(SN490B)

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	H-396x199x7x11	5	H-400x200x12x22
2	H-400x200x8x13	6	H-390x300x10x16
3	H-400x200x12x16	7	H-400x400x13x21
4	H-400x200x12x19	—	—

6. 2. 1. 3 数値結果 1 Model-A 総ひずみエネルギー最小化

数値結果 1 は Model-A の総ひずみエネルギー最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.1)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (6.2.2)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.3a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U]$$

ここで、 \mathbf{A} ：部材断面ベクトル、 \mathbf{R} ：節点座標ベクトル、 \mathbf{d} ：節点変位ベクトル、 \mathbf{K} ：全体剛性マトリクス、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$ ：形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$ である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $9.0 [m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 3.33$ である。

数値結果

解析結果を図 6.3–5 に示す。図 6.3 は 3 回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図 6.3 は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が世代数を示す。図 6.4 は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状である。図 6.4 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率を示す。代表形状の力学性状を図 6.5 に示す。図 6.5 は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを表し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。

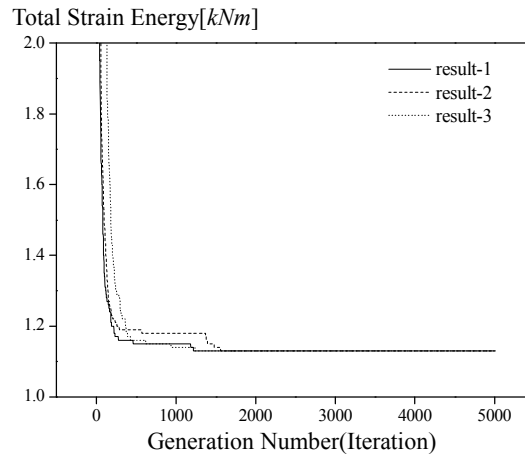


図 6. 3 数値結果 (目的関数の収束状況)

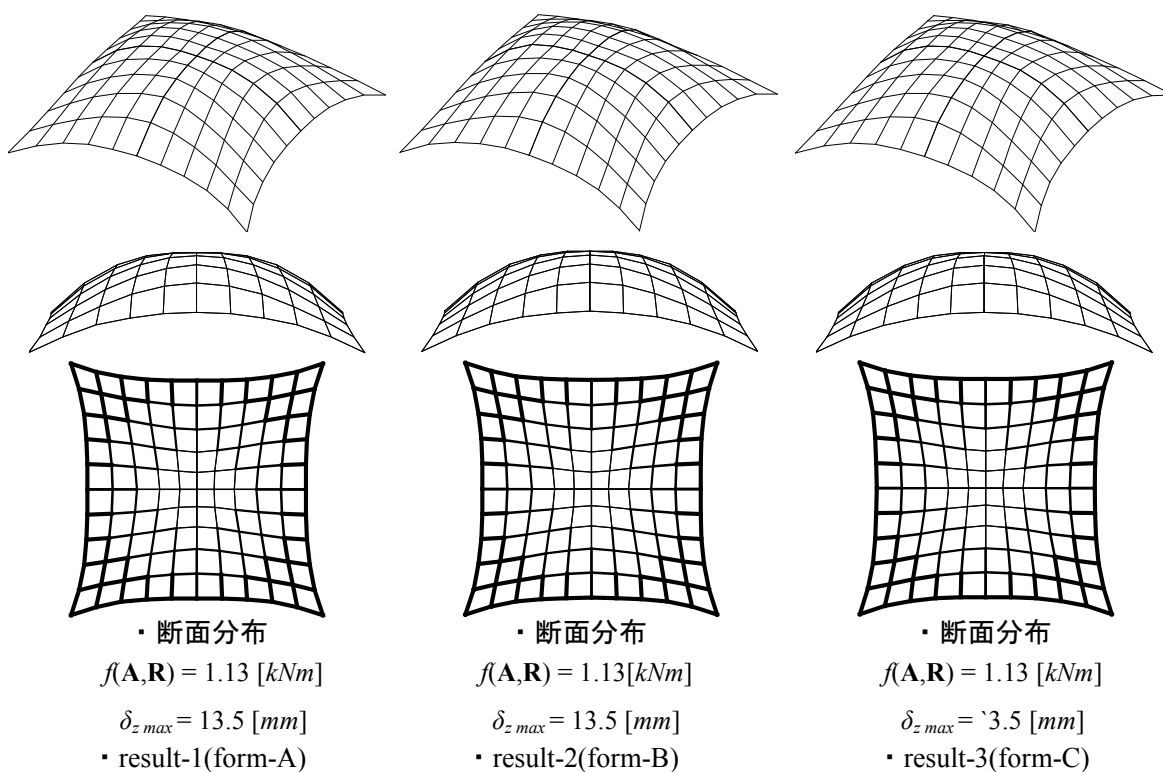


図6. 4 最終世代で得られた解形状

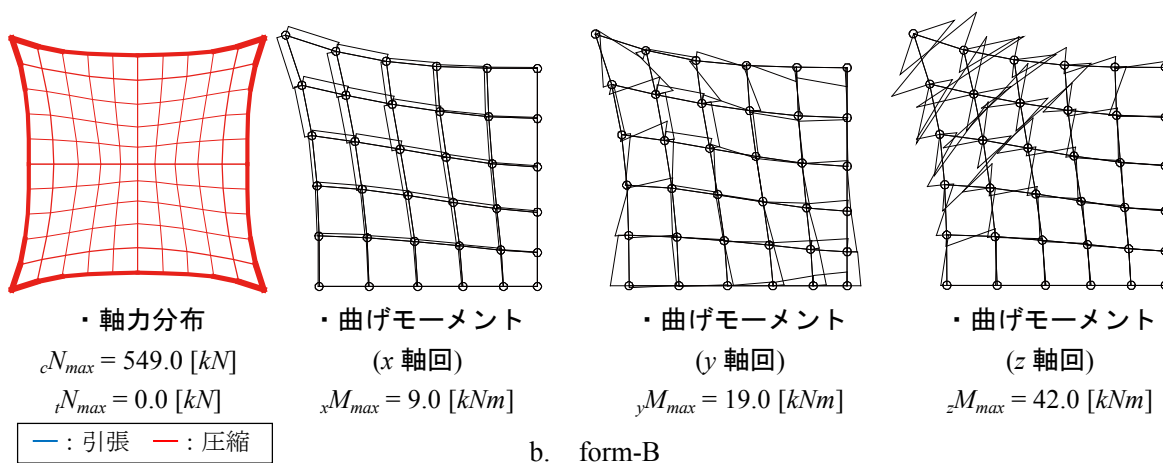
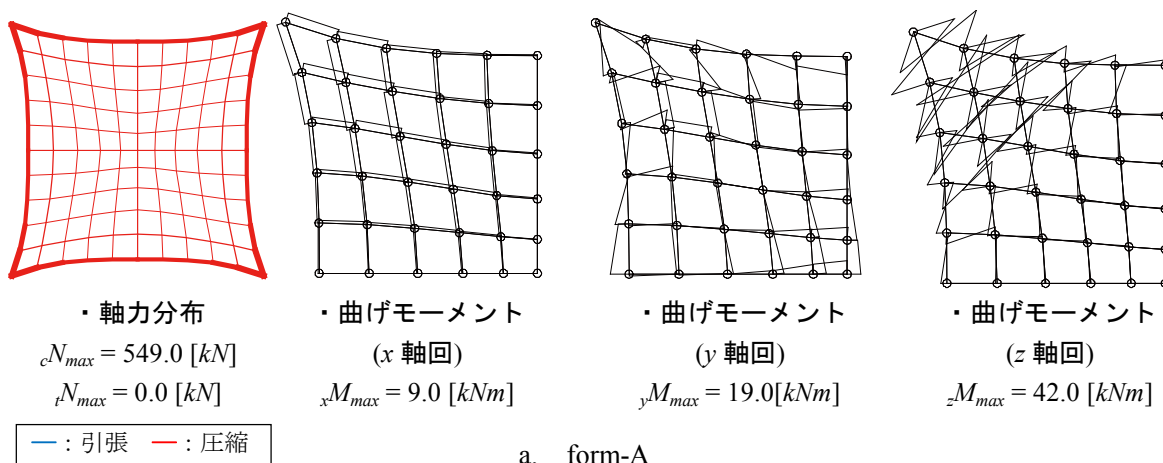


図6. 5 form-A,B の力学性状

6. 2. 1. 4 数値結果 2 Model-B 総ひずみエネルギー最小化

数値結果 2 は Model-B の総ひずみエネルギー最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.4)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (6.2.5)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (6.2.6a,b)$$

$$\mathbf{A}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^L & \mathbf{A}_2^L & \dots & \mathbf{A}_{31}^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}^U = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^U & \mathbf{A}_2^U & \dots & \mathbf{A}_{31}^U \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x^L & \mathbf{R}_y^L & \mathbf{R}_z^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^U = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x^U & \mathbf{R}_y^U & \mathbf{R}_z^U \end{bmatrix}$$

ここで、 \mathbf{d} : 節点変位ベクトル, \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス, $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$ である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $9.0 [m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 3.33$ である。

数値結果

解析結果を図 6.6–8 に示す。図 6.6 は 3 回の試行における目的関数の解の収束状況である。ここで図 6.6 は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が世代数を示す。図 6.7 は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状である。図 6.7 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率を示す。代表形状の応力性状を図 6.8 に示す。図 6.8 は軸力分布、曲げモーメント分布 (x, y, z 軸回り) である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。

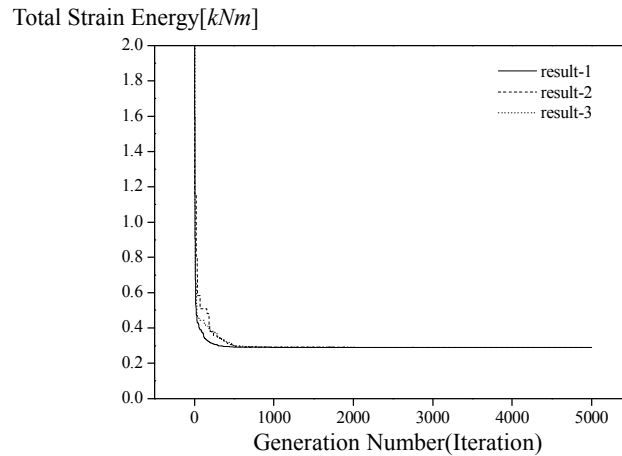


図 6. 6 数値結果 (目的関数の収束状況)

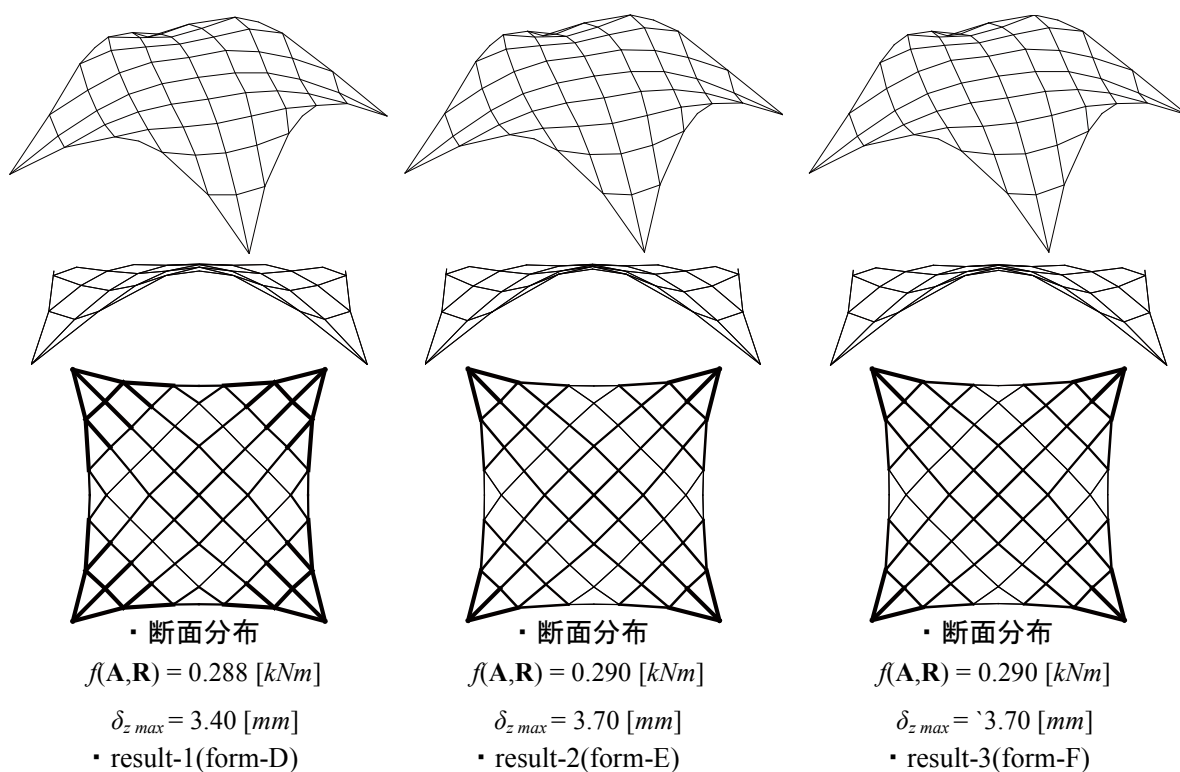


図6. 7 最終世代で得られた解形状

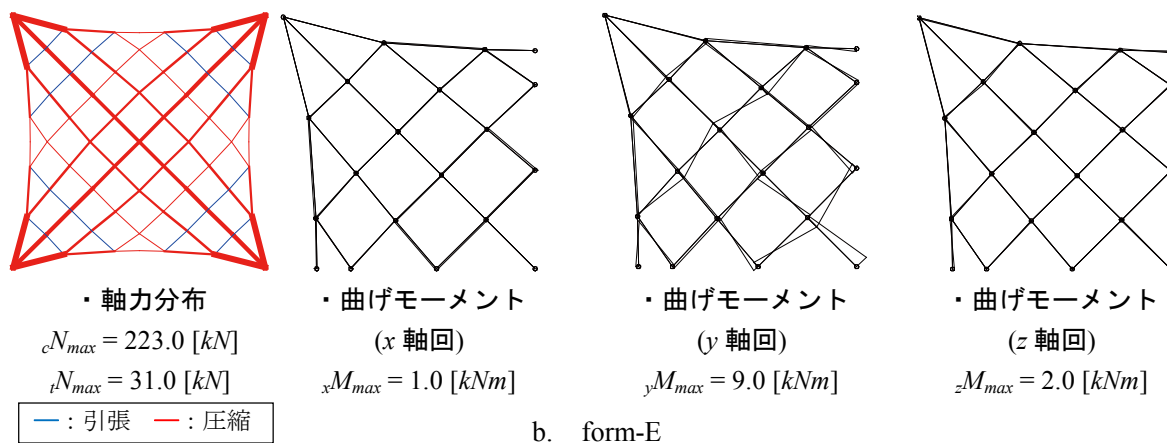
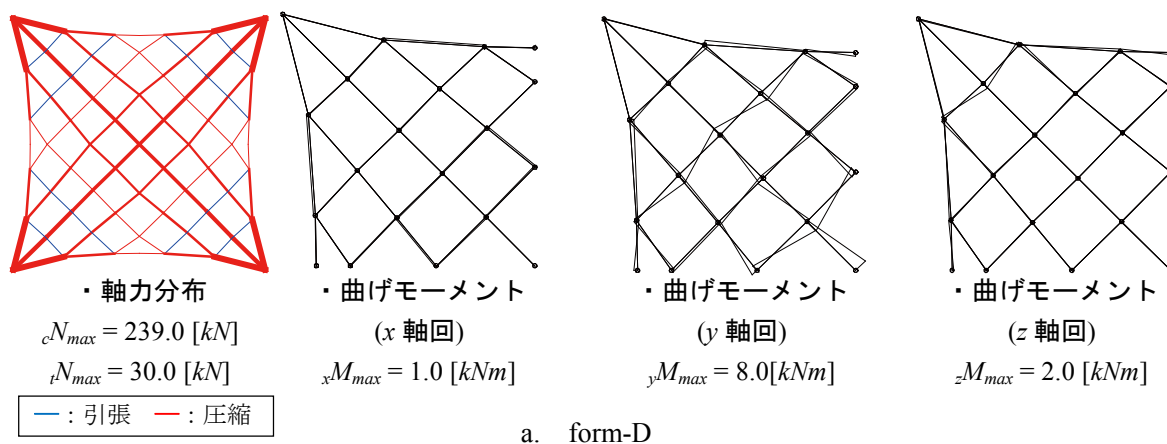


図6. 8 form-D,E の力学性状

6. 2. 2 基礎問題2：部材間の回転角最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェル構造の単一目的最適化

本項は製作性・施工性を考慮した構造形態創生問題として正方形平面を有する鉄骨格子シェルの単一目的最適化問題にSGAを適用する^[6.1]。本節は第2章7節で提案した製作性・施工性に関する評価指標を目的関数として設定し、得られる解の解形状を考察する。解析モデルは基本問題1で扱った図6.1に示すModel-A,Bである。

6. 2. 2. 1 部材間の回転角の評価グループ

第2章7節にて提案した評価指標を適用するにあたって、部材間の回転角を評価する部材グループを設定する。部材間の回転角は設定した部材グループ内に所属している要素同士でのみ評価する。Model-A,Bの部材グループの設定を図6.9に示す。部材グループは連続する要素同士で一つのグループを形成する。部材グループは形状の対称性を考慮して設定し、Model-Aは12グループ、Model-Bは9グループである。

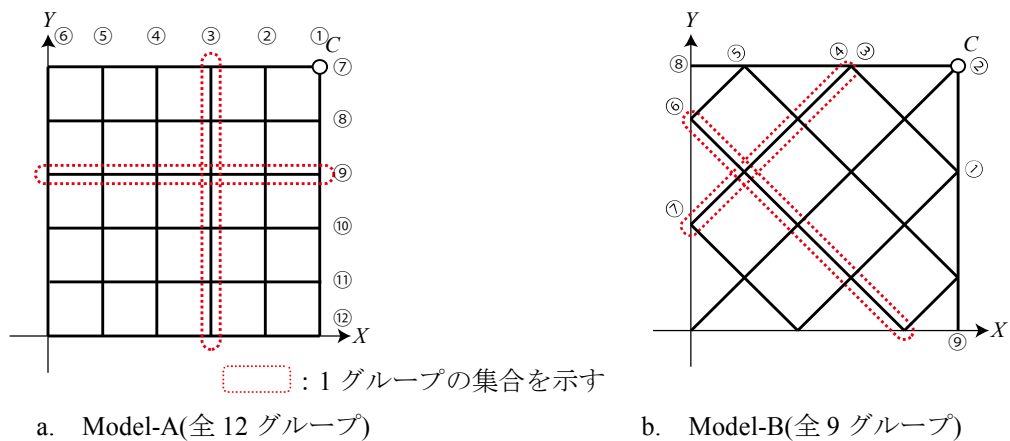


図 6. 9 部材間の回転角を評価する部材グループ

6. 2. 2. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法は SGA を用いる。解析パラメータを表 6.3 に示す。Model-A,B とも基本的な GA パラメータは同一とする。また、鉄骨造の構造形態創生では部材断面をリスト化してパラメトリック曲面の諸量と対応させる。ここで用いる部材断面リストは表 6.2 と同様である。

表 6. 3 SGA パラメータ (Model-A,B)

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 22 <i>bit</i>
世代数	5000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 10 <i>bit</i>
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.002	交叉方式	二点交叉

6. 2. 2. 3 数値結果 1 Model-A 部材間の回転角最小化

数値結果 1 は Model-A の部材間の回転角最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.7)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (6.2.8)$$

$$Q_1 = \sum_{j=1} t_x \quad (\text{Case-A: } x \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_2 = \sum_{j=1} t_y \quad (\text{Case-B: } y \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_3 = \sum_{j=1} t_z \quad (\text{Case-C: } z \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_4 = Q_1 + Q_3 \quad (\text{Case-D: } x, z \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_5 = Q_2 + Q_3 \quad (\text{Case-E: } y, z \text{ 軸回り回転角})$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.9a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U]$$

ここで、 t_x : x 軸回りの回転角評価値、 t_y : y 軸回りの回転角評価値、 t_z : z 軸回りの回転角評価値、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$ である。目的関数は各要素の交点における式 (2.7.12) – (2.7.14) の合計値であり、Case-A～E の全 5 ケースとする。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $9.0 [m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 3.33$ である。

数値結果

解析結果を図 6.10–22 に示す。図 6.10 は目的関数を Case-A～E とした場合の各 3 回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図 6.10 は縦軸が目的関数の値を横軸が世代数を示す。図 6.11–20 は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状と代表形状の力学性状である。図 6.11, 13, 15, 17, 19 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率である。また、解形状の比較のため、各解の総ひずみエネルギーの値を fe として示す。図 6.12, 14, 16, 18, 20 は軸力分布、曲げモーメント分布 (x, y, z 軸回り) である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張りであることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。また、各要素の交点における部材間の回転角に関する式 (2.7.12) – (2.7.14) の値を示したグラフと各要素の要素座標軸の向きを示した図を 6.21, 22 に示す。

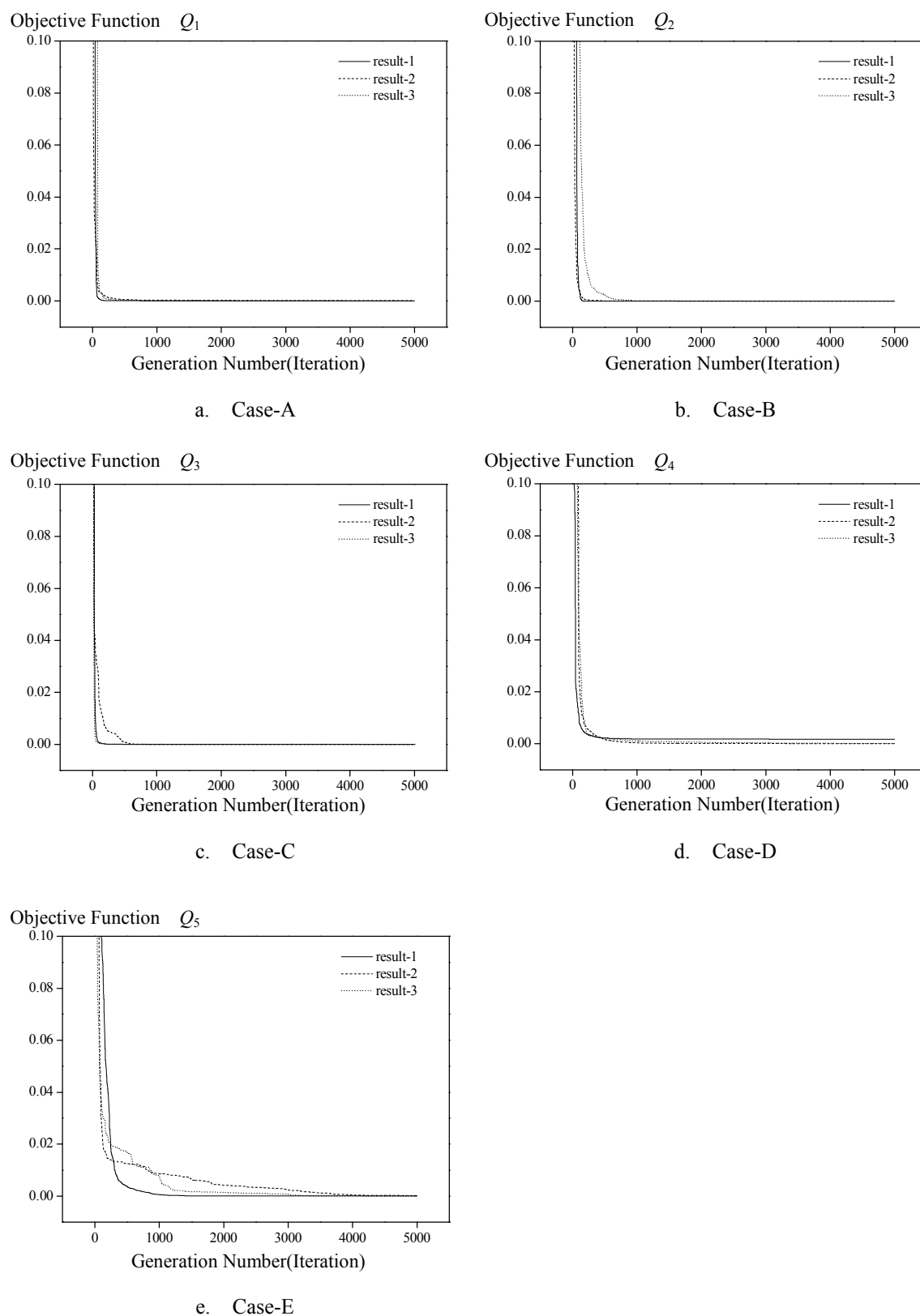


図6. 10 数値結果(目的関数の収束状況)

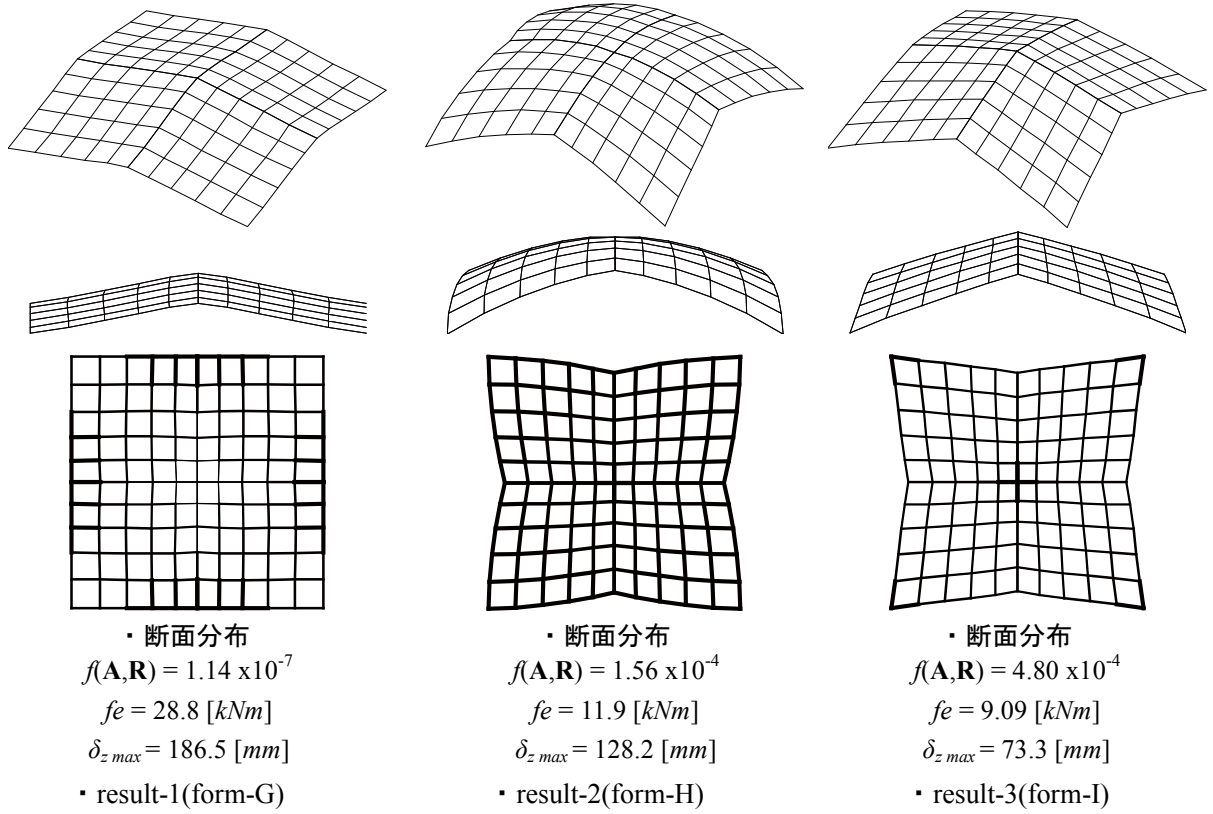


図6. 1 1 最終世代で得られた解形状 Case-A(x 軸回り回転角最小化)

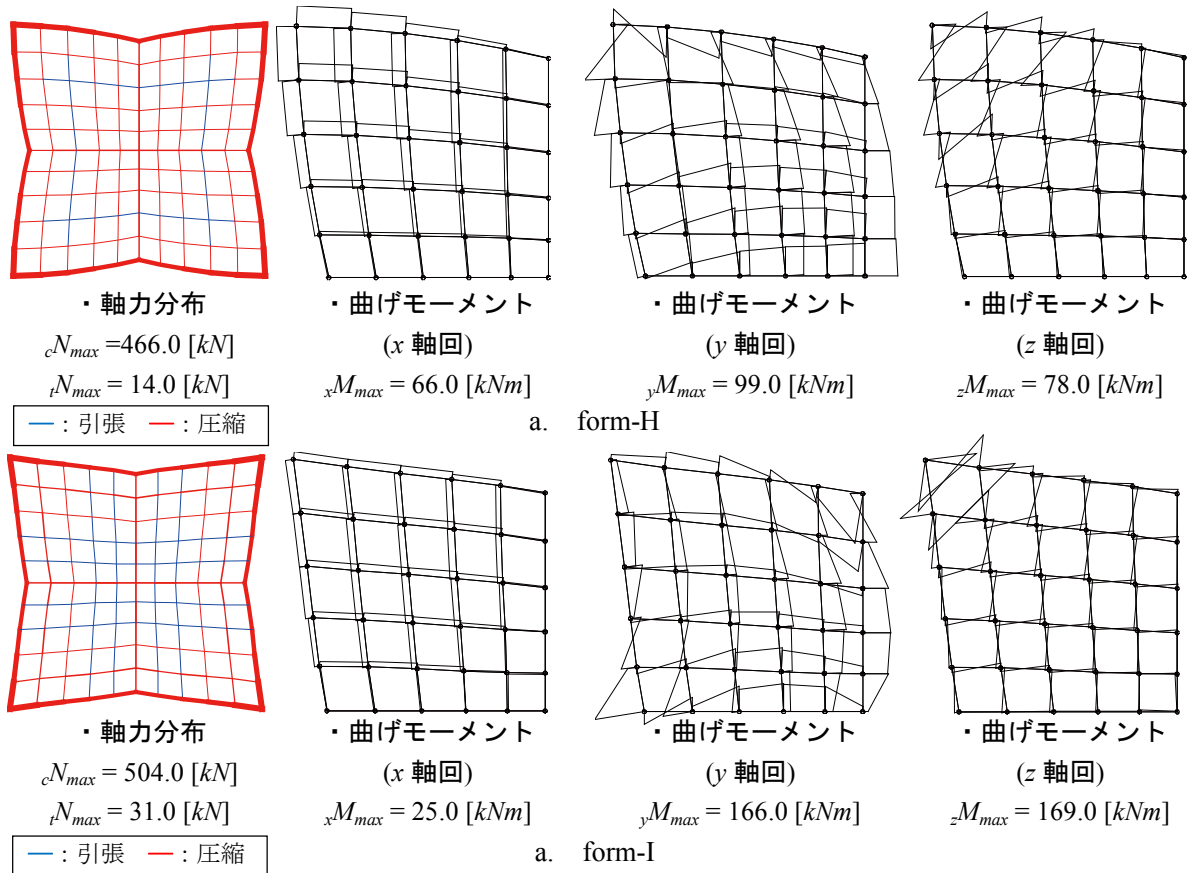


図6. 1 2 form-H, J の力学性状 Case-A(x 軸回り回転角最小化)

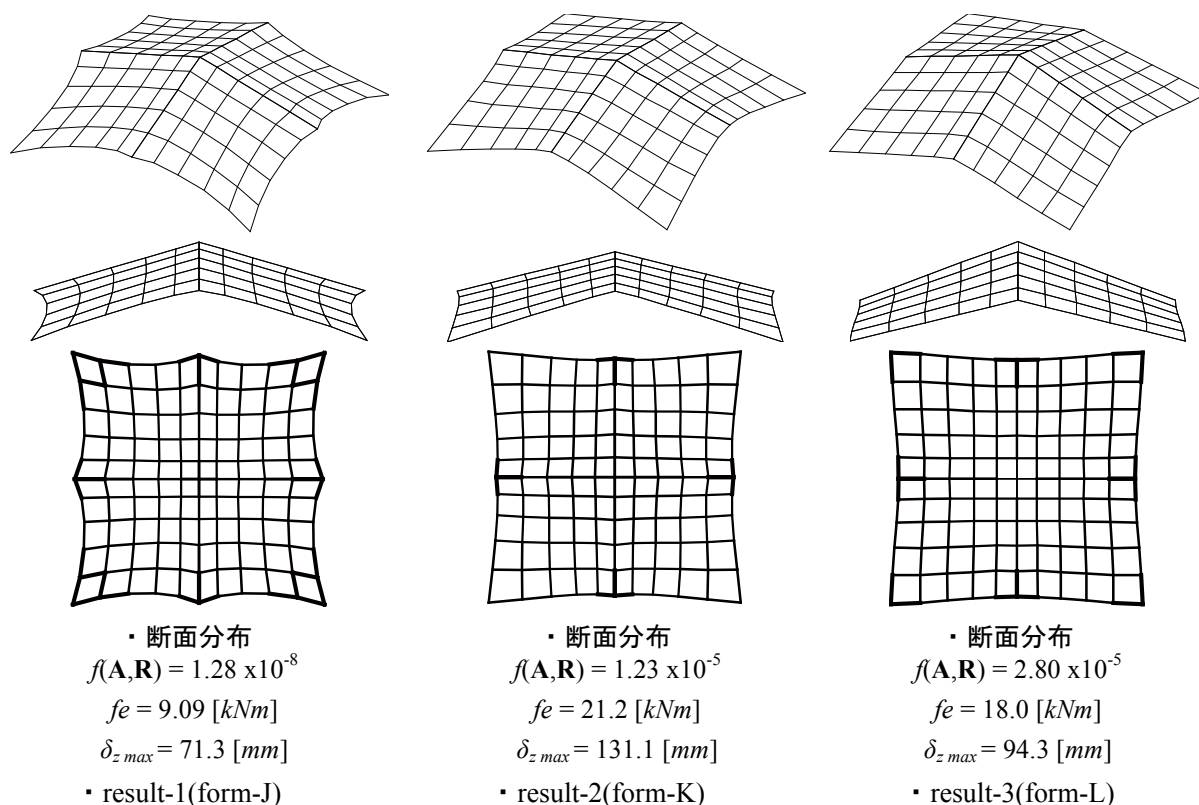


図6. 13 最終世代で得られた解形状 Case-B(y 軸回り回転角最小化)

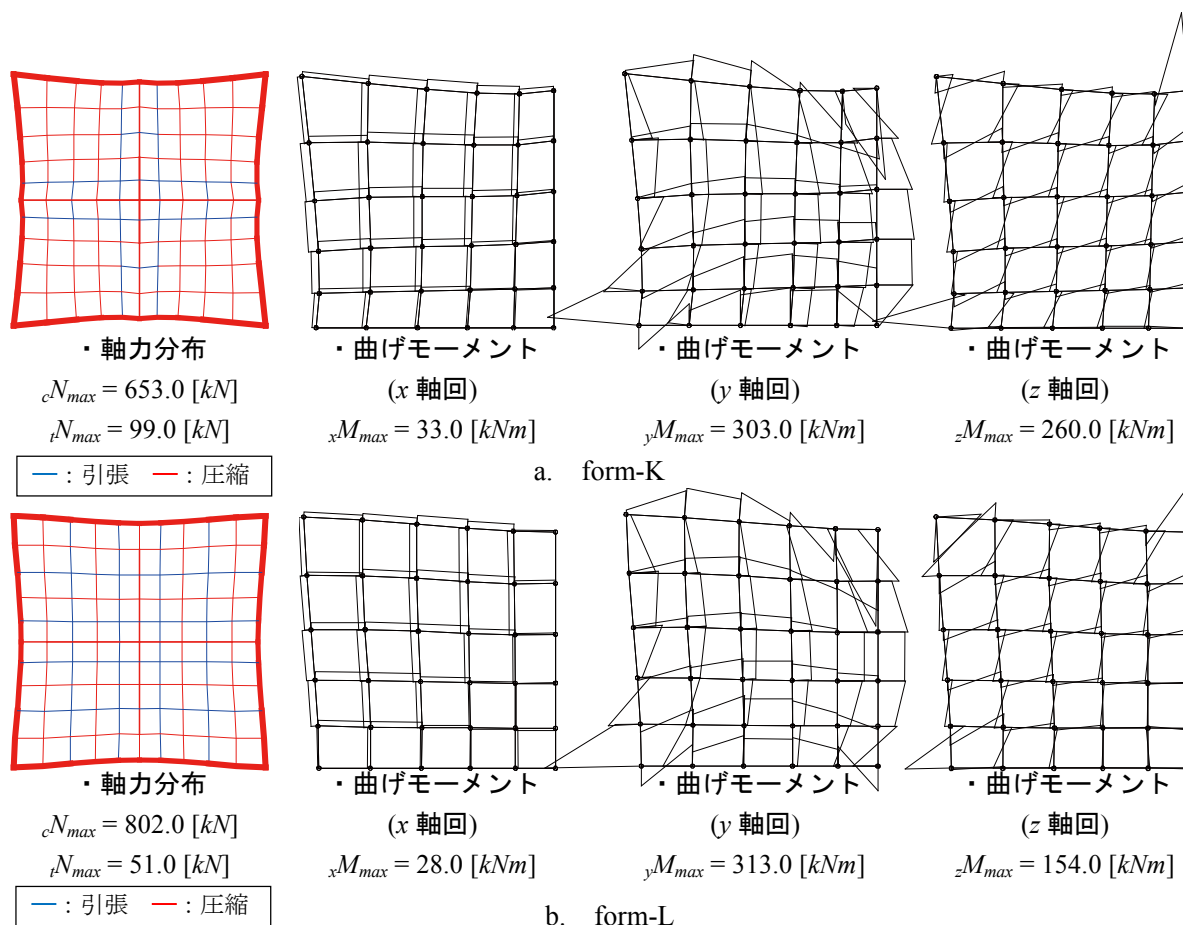
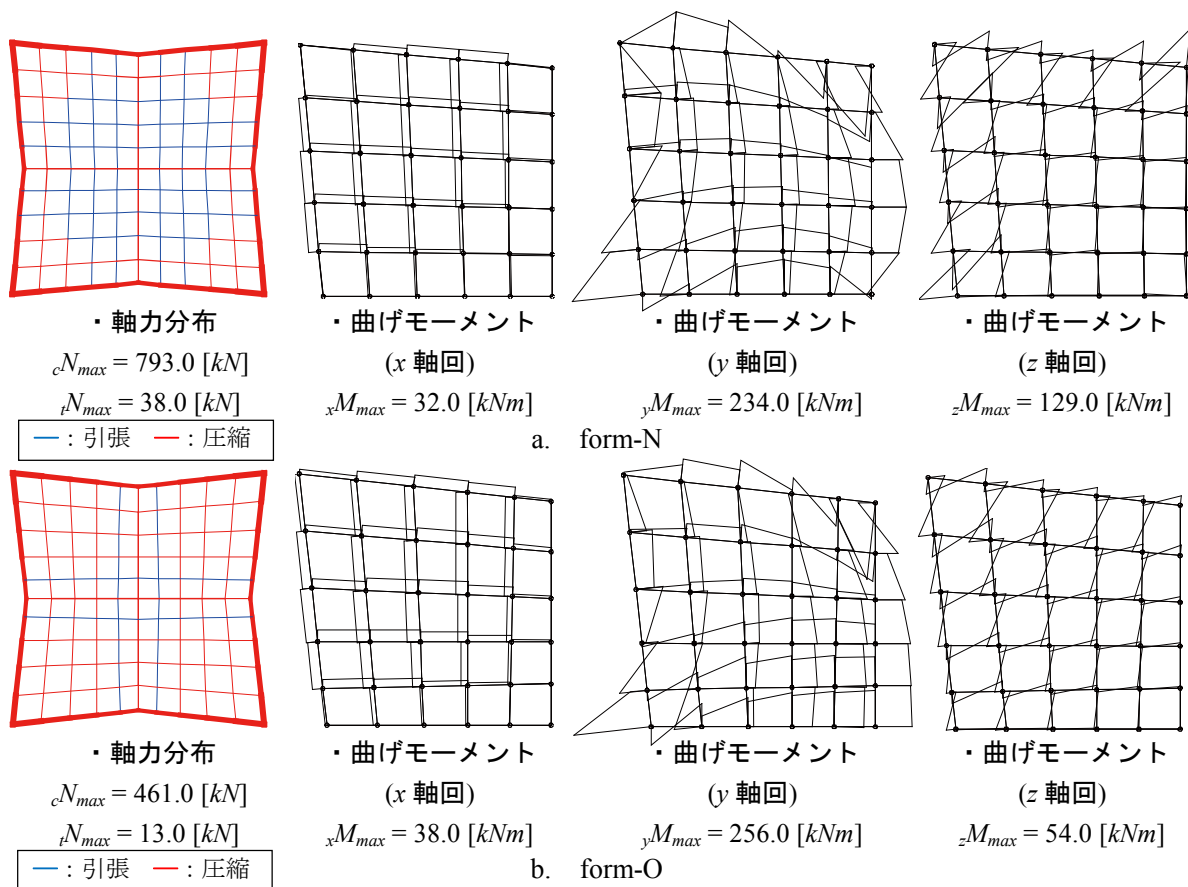
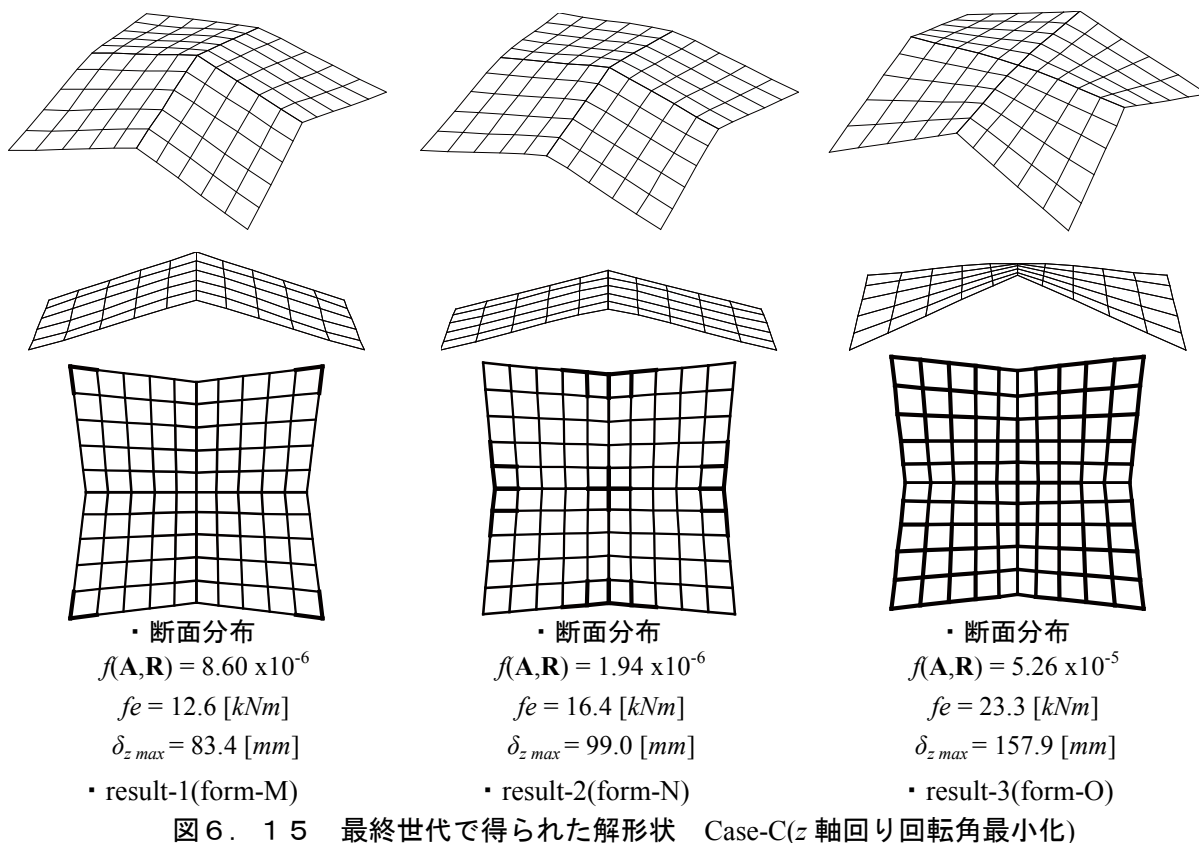


図6. 14 form-K, L の力学性状 Case-B(y 軸回り回転角最小化)



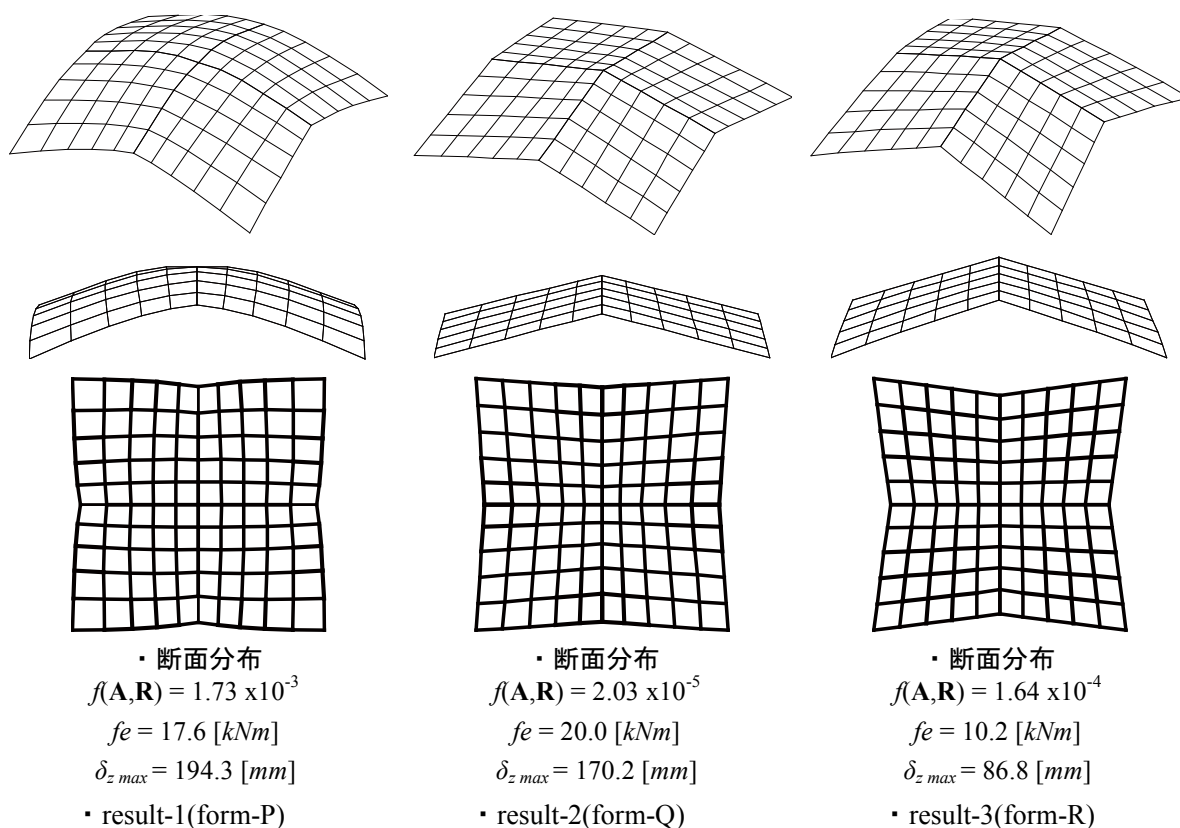


図6. 17 最終世代で得られた解形状 Case-D(x, z 軸回り回転角最小化)

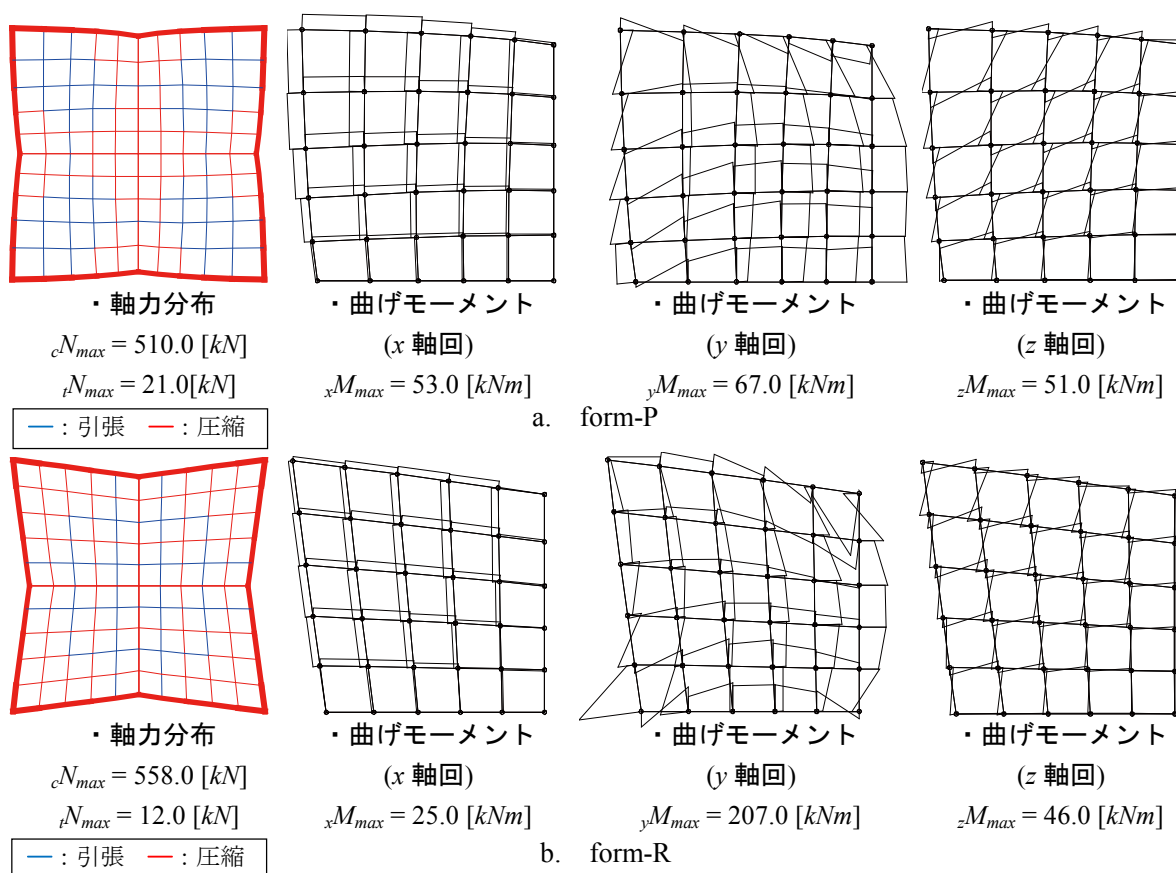


図6. 18 form-P,R の力学性状 Case-D(x, z 軸回り回転角最小化)

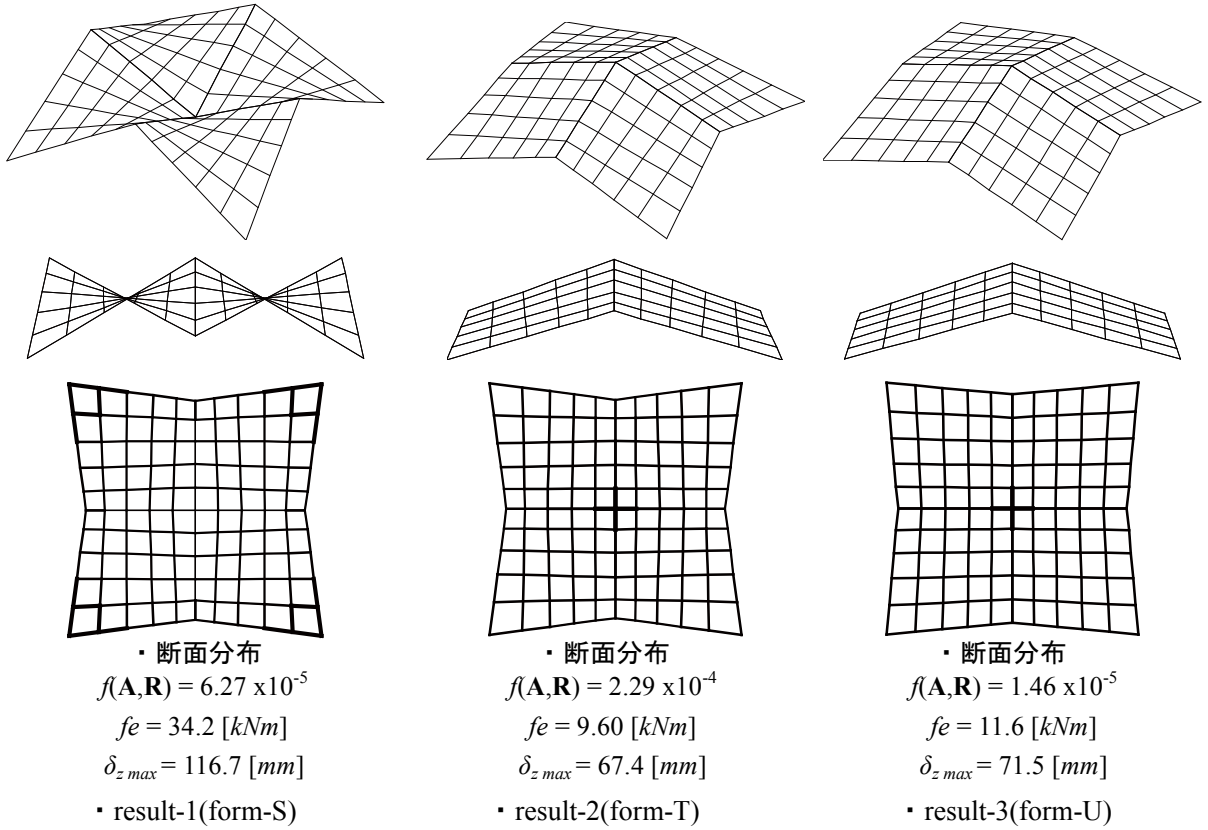


図6. 19 最終世代で得られた解形状 Case-E(y,z 軸回り回転角最小化)

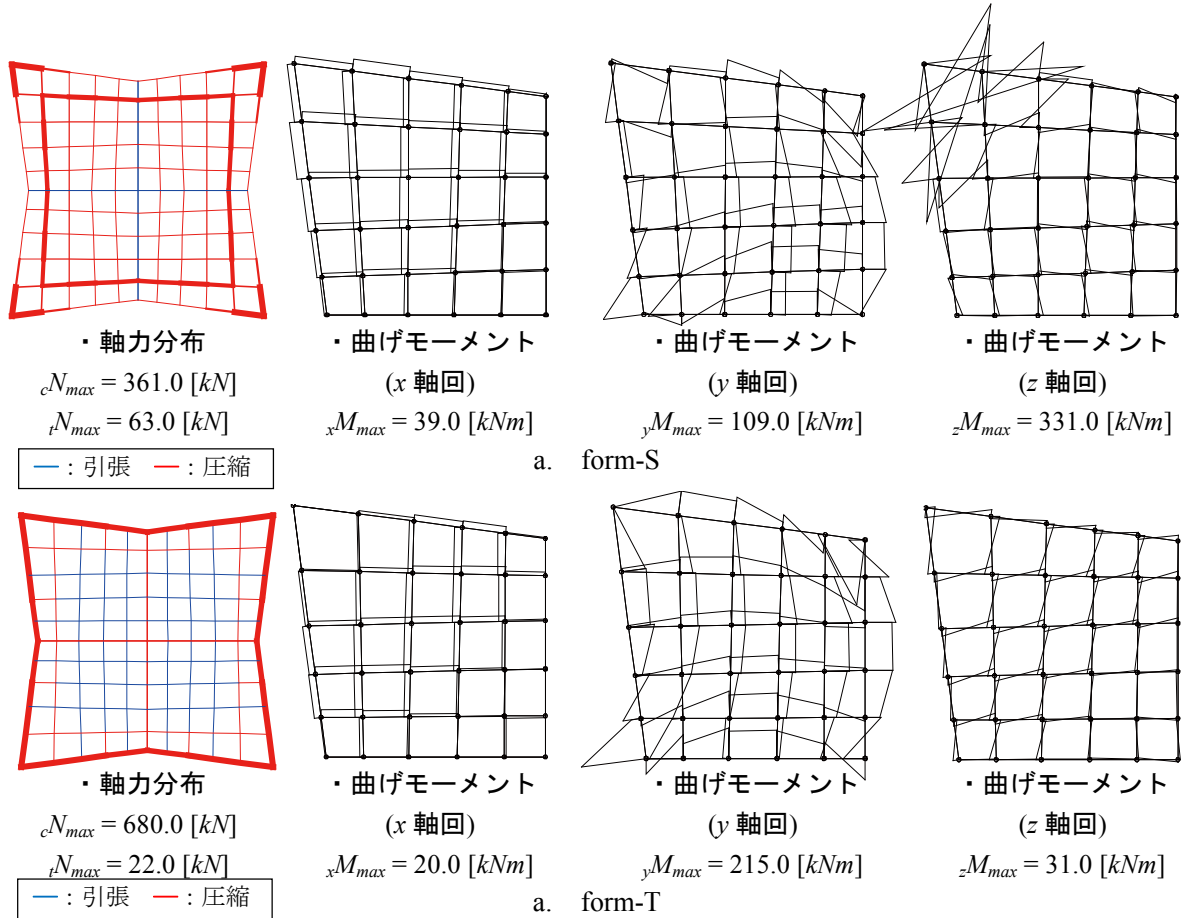
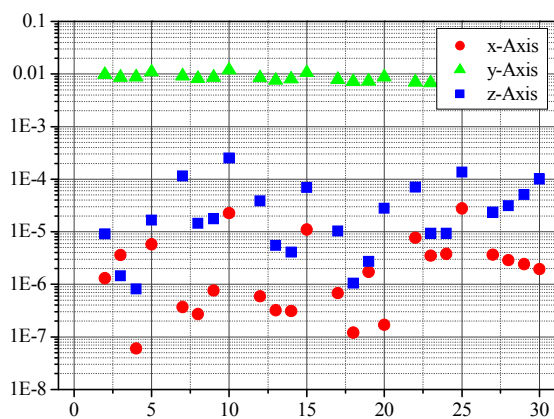


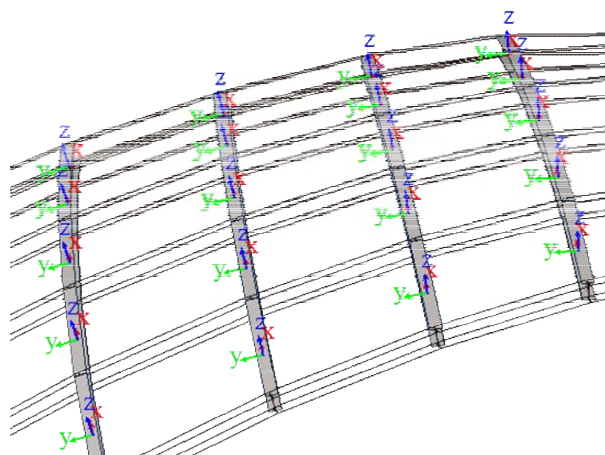
図6. 20 form-S,T の力学性状 Case-E(y,z 軸回り回転角最小化)

Torsion value



Number of element

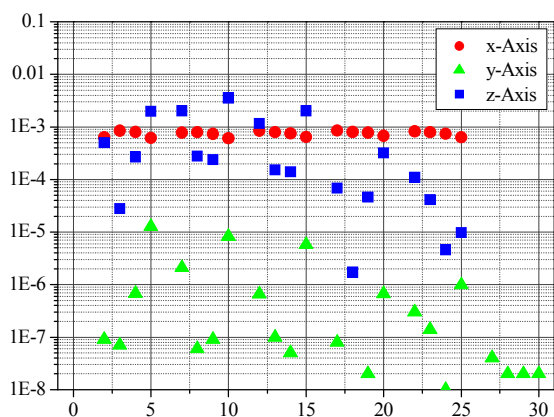
・評価指標の値



・各要素の要素座標軸の関係

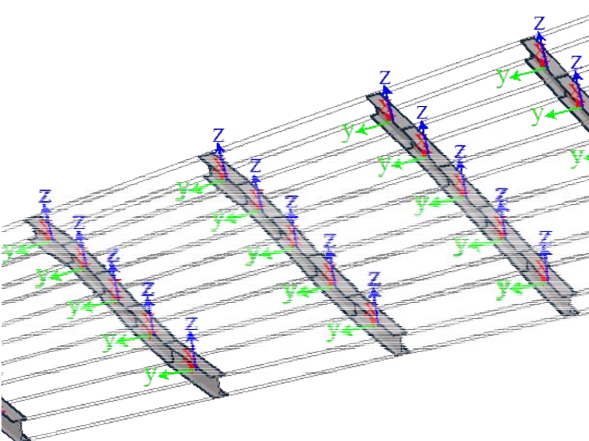
a. Case-A(form-H)

Torsion value



Number of element

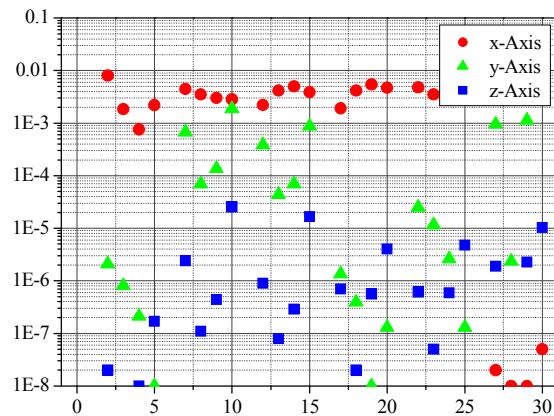
・評価指標の値



・各要素の要素座標軸の関係

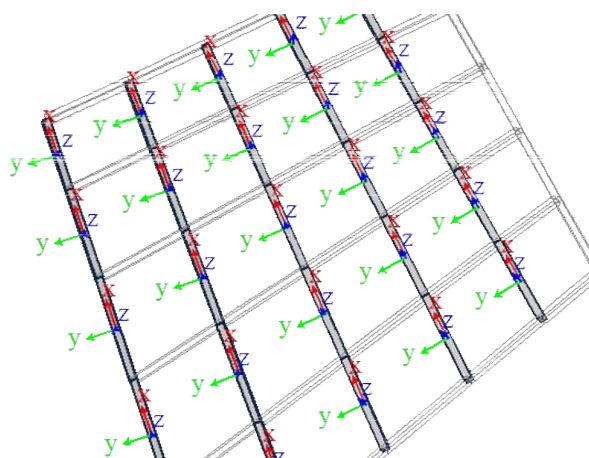
b. Case-B(form-L)

Torsion value



Number of element

・評価指標の値



・各要素の要素座標軸の関係

c. Case-C(form-O)

図6. 21 各交点における部材間の回転角の評価値と要素座標軸の関係

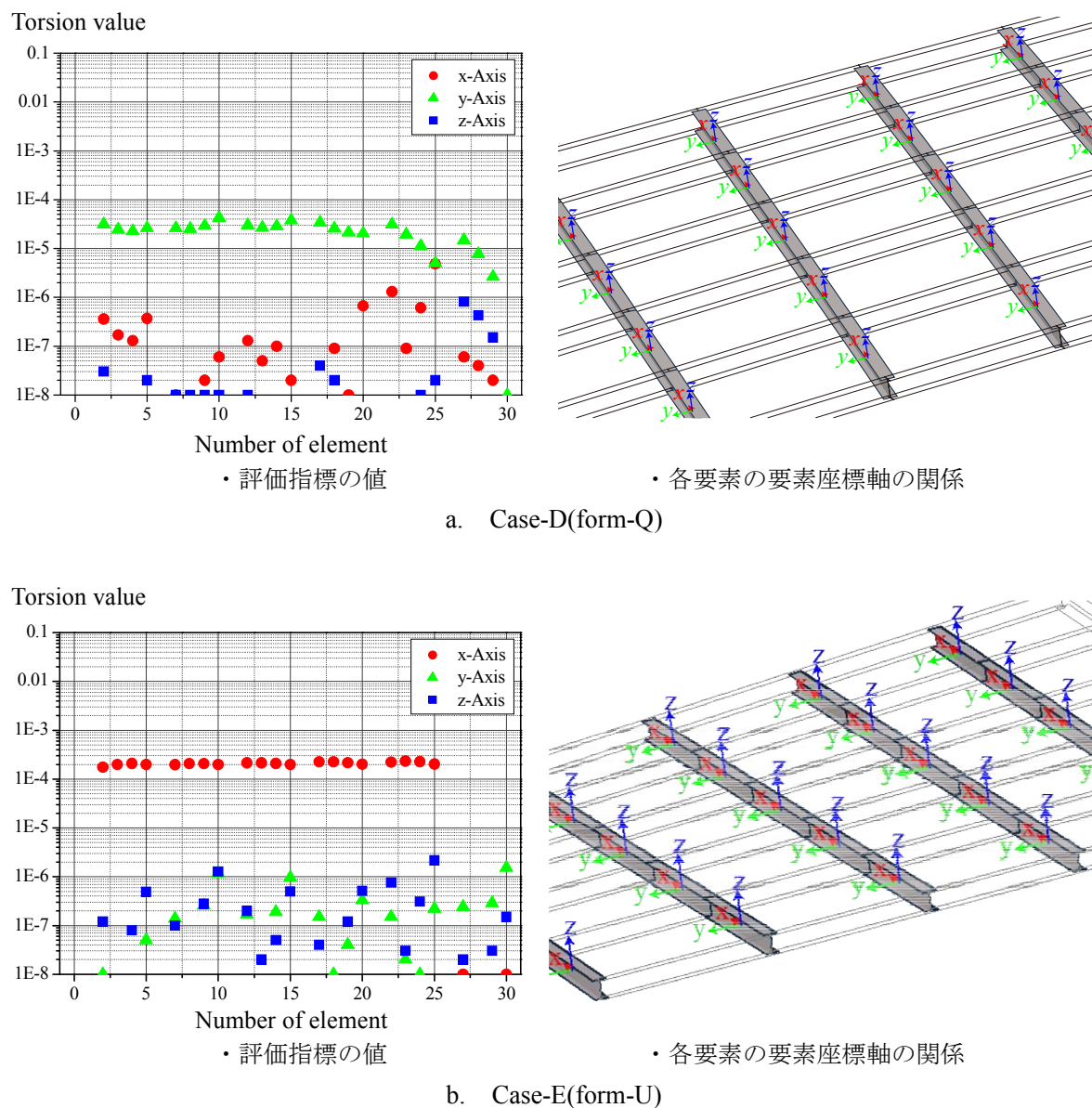


図 6. 2 2 各交点における部材間の回転角の評価値と要素座標軸の関係

6. 2. 2. 4 数値結果2 Model-B 部材間の回転角最小化

数値結果2はModel-Bの部材間の回転角最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.10)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (6.2.11)$$

$$Q_1 = \sum_{j=1} t_x \quad (\text{Case-A: } x \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_2 = \sum_{j=1} t_y \quad (\text{Case-B: } y \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_3 = \sum_{j=1} t_z \quad (\text{Case-C: } z \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_4 = Q_1 + Q_3 \quad (\text{Case-D: } x, z \text{ 軸回り回転角})$$

$$Q_5 = Q_2 + Q_3 \quad (\text{Case-E: } y, z \text{ 軸回り回転角})$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.12a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

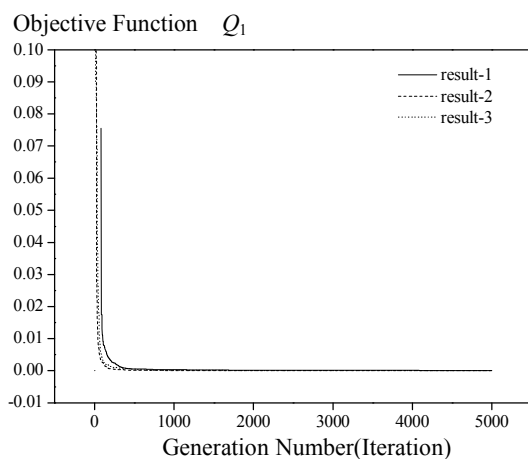
$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{31}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{31}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U]$$

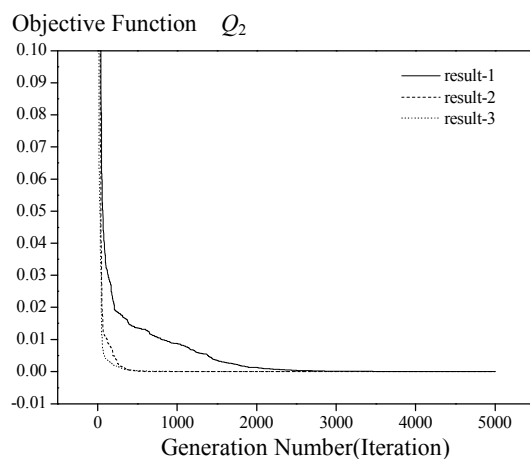
ここで、 t_x : x 軸回りの回転角評価値、 t_y : y 軸回りの回転角評価値、 t_z : z 軸回りの回転角評価値、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$ である。目的関数は各要素の交点における式(2.7.12) – (2.7.14)の合計値であり、Case-A～Eの全5ケースとする。応力制約はSN490Bを想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $9.0 [m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 3.33$ である。

数値結果

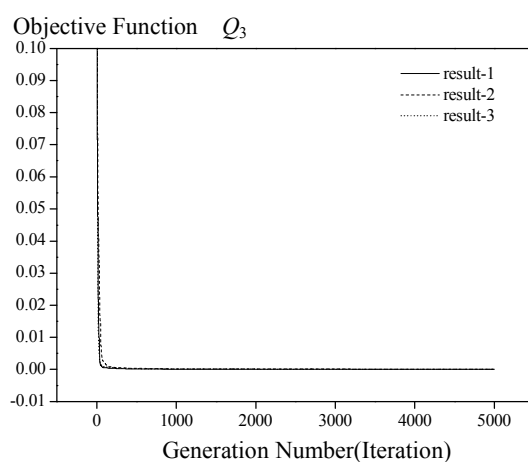
解析結果を図6.23–35に示す。図6.23は目的関数をCase-A～Eとした場合の各3回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図6.10は縦軸が目的関数の値を横軸が世代数を示す。図6.24–33は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状と代表形状の力学性状である。図6.24, 26, 28, 30, 32中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率である。また、解形状の比較のため、各解の総ひずみエネルギーの値を f_e として示す。図6.25, 27, 29, 31, 33は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。また、各要素の交点における部材間の回転角に関する式(2.7.12) – (2.7.14)の値を示したグラフと各要素の要素座標系の向きを示した図を6.34, 35に示す。



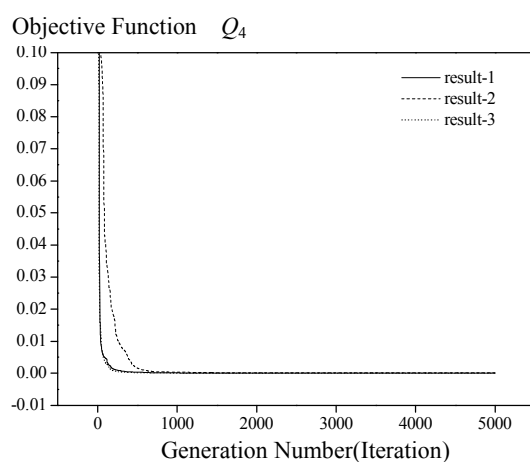
a. Case-A



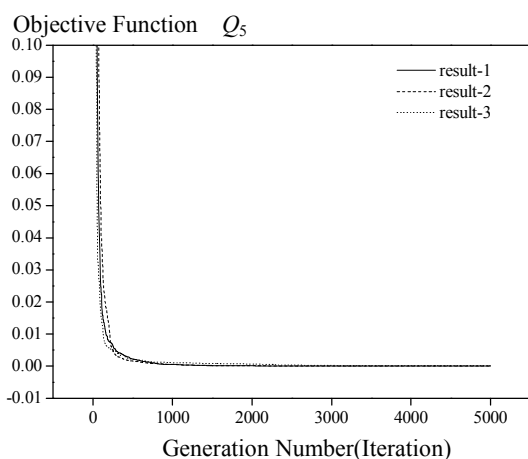
b. Case-B



c. Case-C



d. Case-D



e. Case-E

図6. 23 数値結果(目的関数の収束状況)

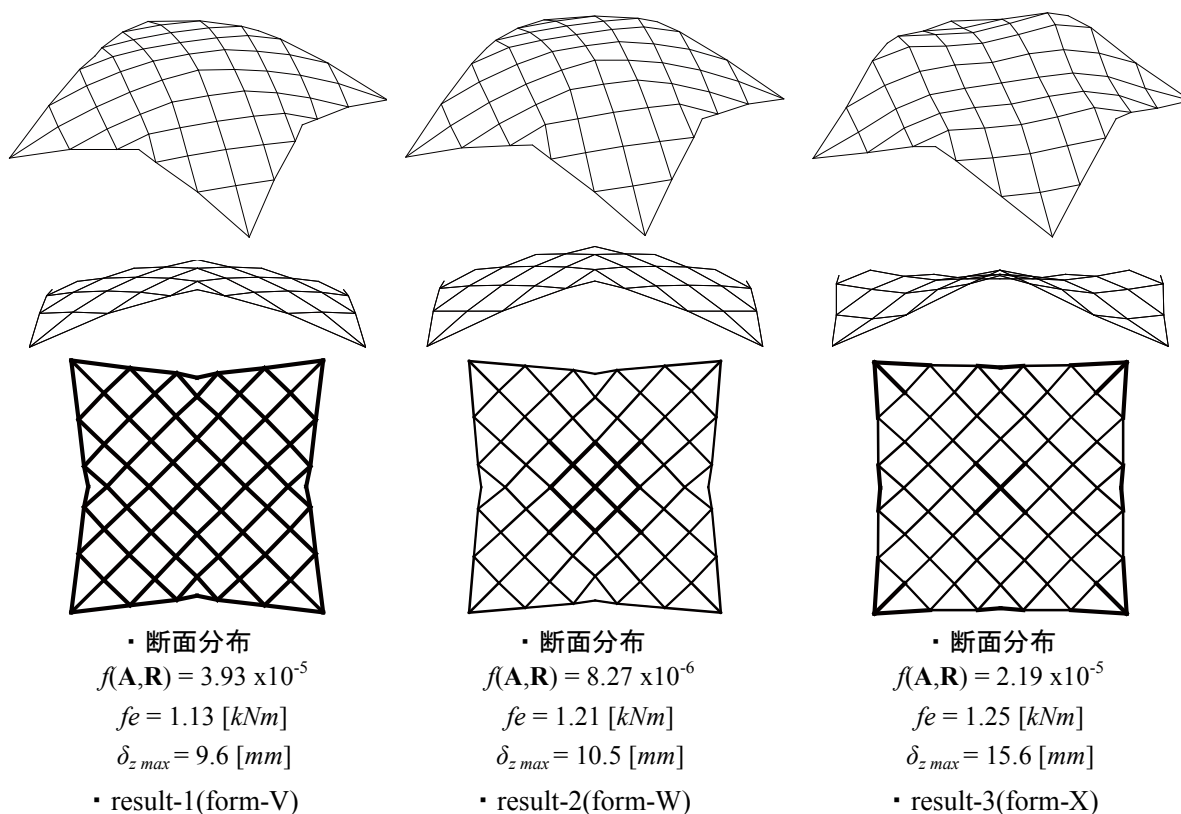


図6. 24 最終世代で得られた解形状 Case-A(x 軸回り回転角最小化)

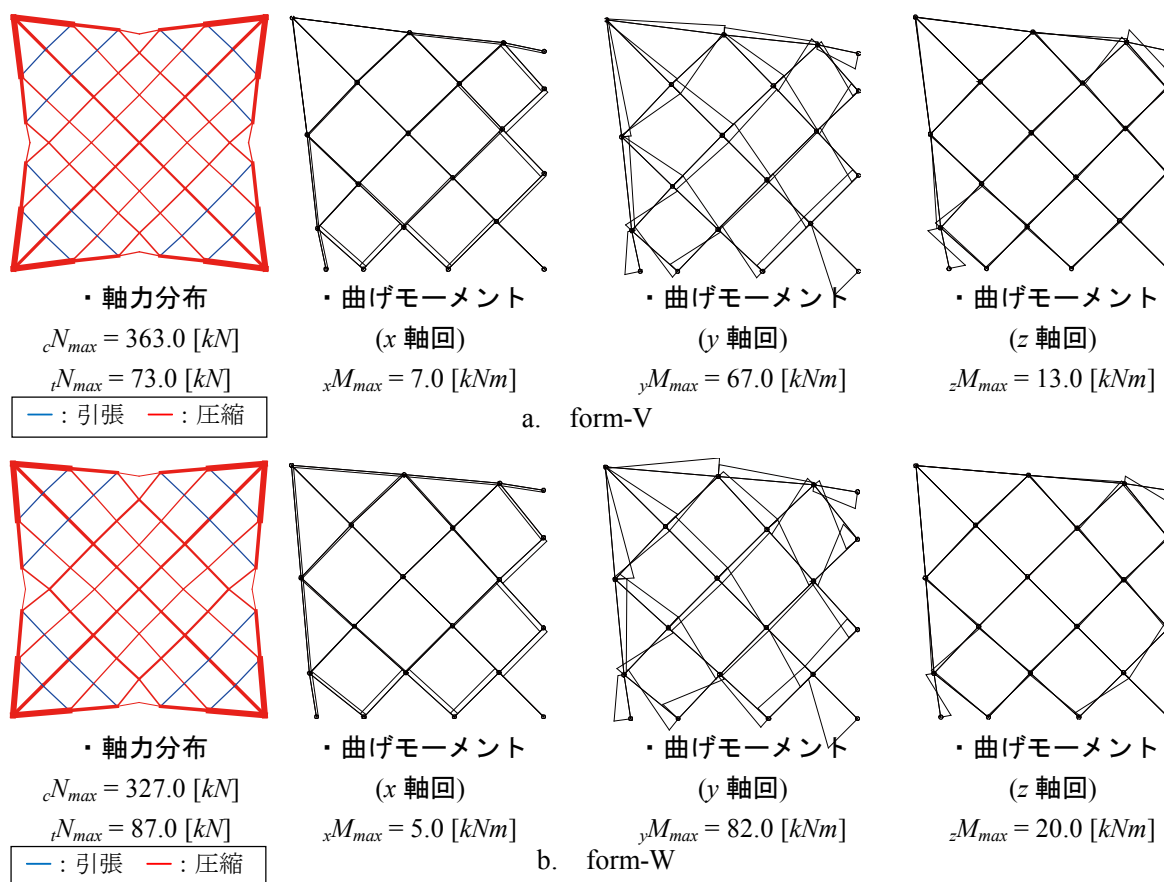


図6. 25 form-V,W の力学性状 Case-A(x 軸回り回転角最小化)

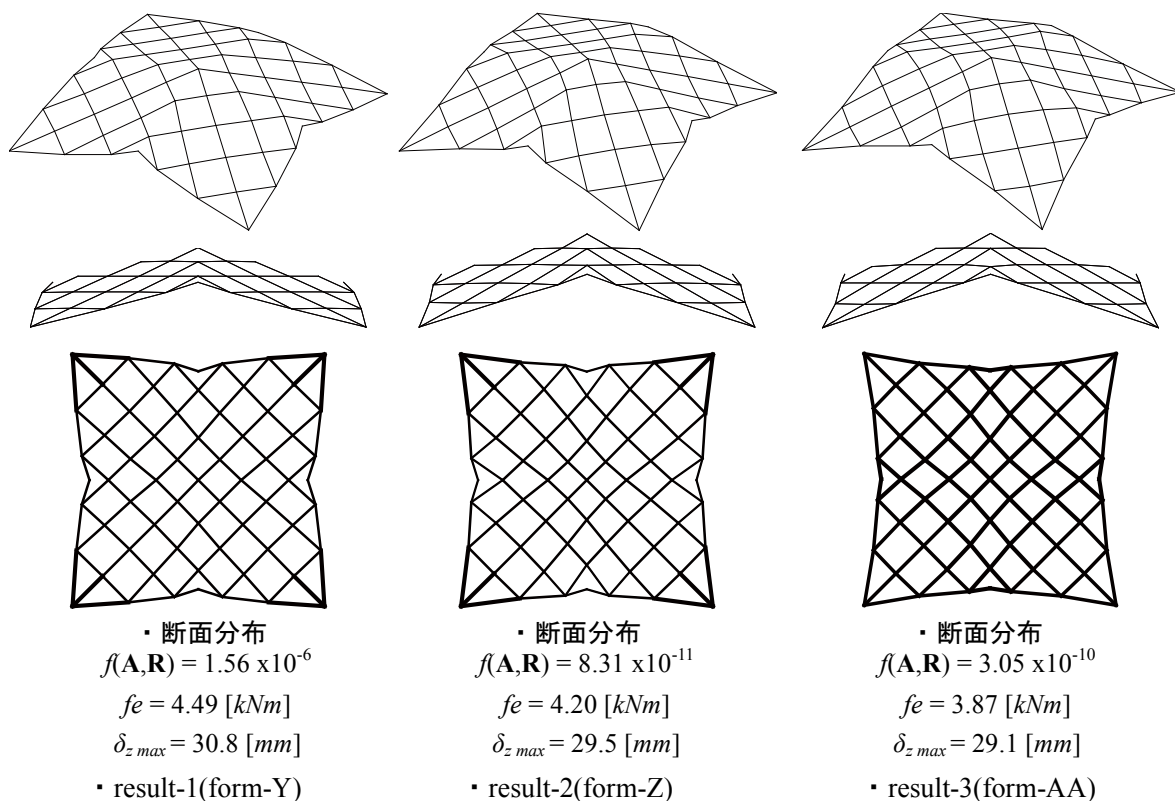


図6. 26 最終世代で得られた解形状 Case-B(y 軸回り回転角最小化)

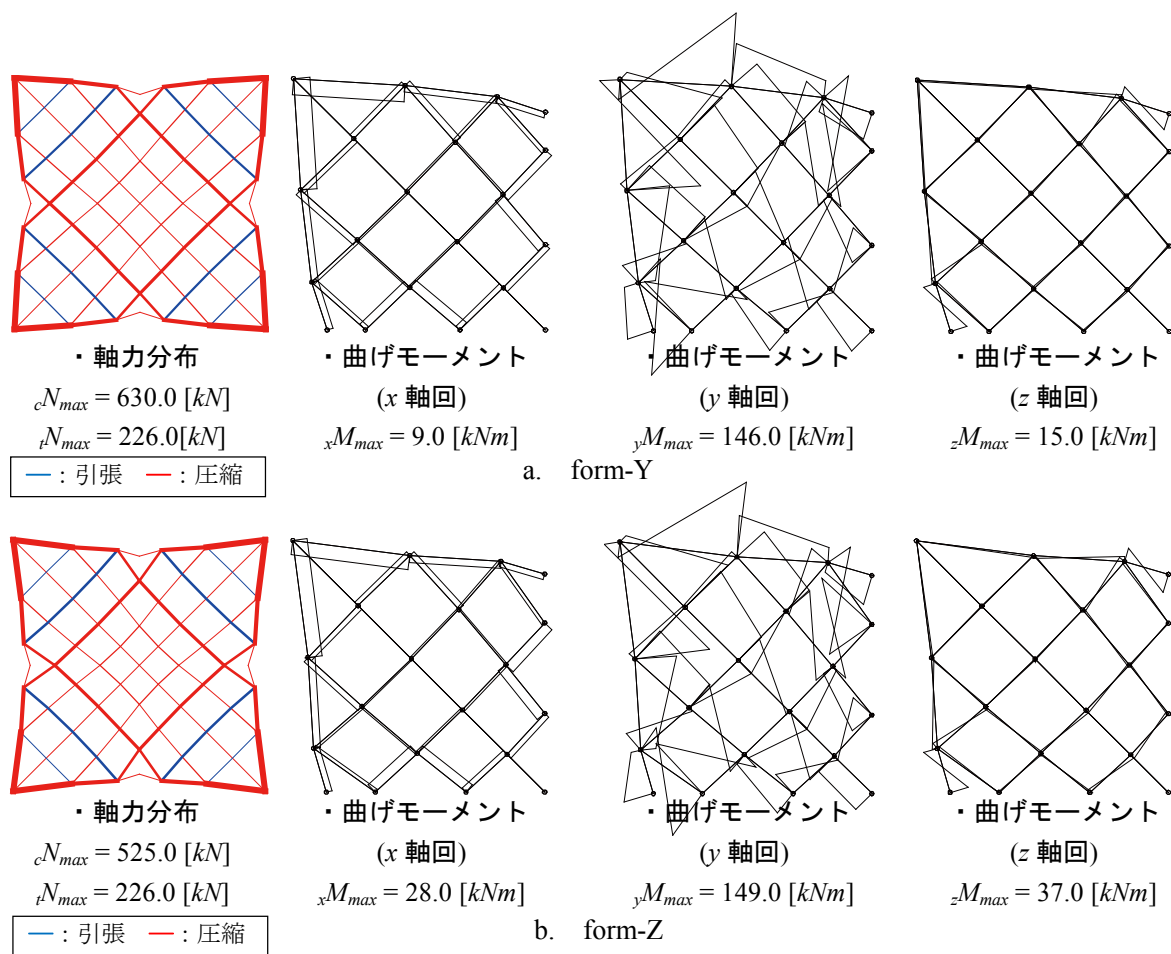


図6. 27 form-Y,Z の力学性状 Case-B(y 軸回り回転角最小化)

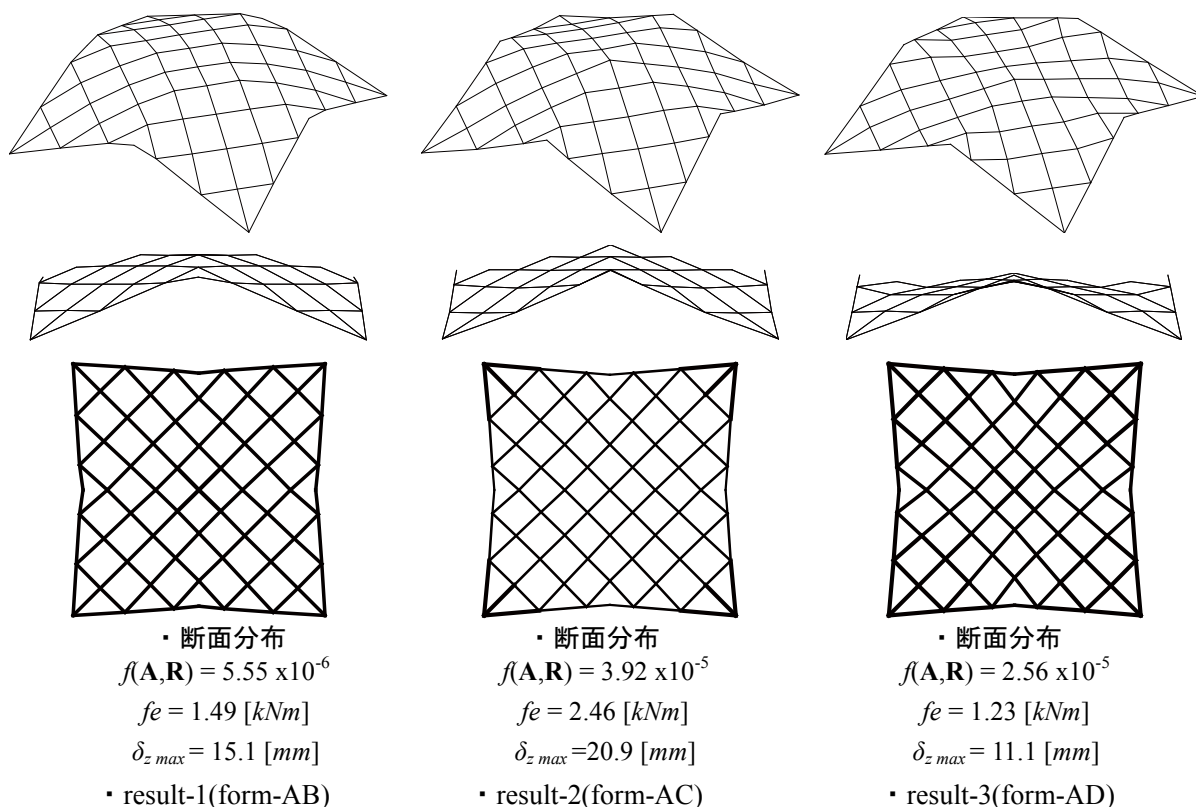


図6. 28 最終世代で得られた解形状 Case-C(z 軸回り回転角最小化)

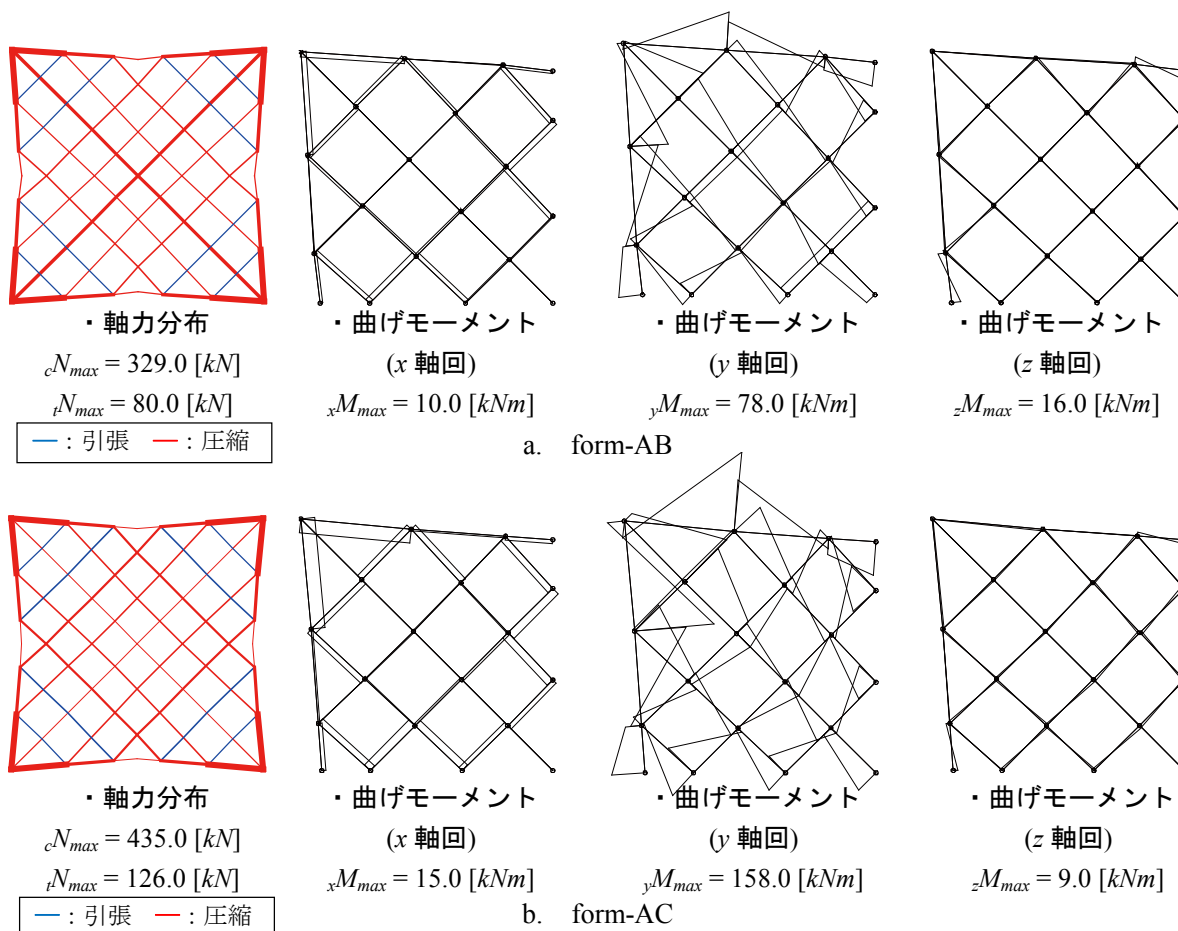


図6. 29 form-AB,AC の力学性状 Case-C(z 軸回り回転角最小化)

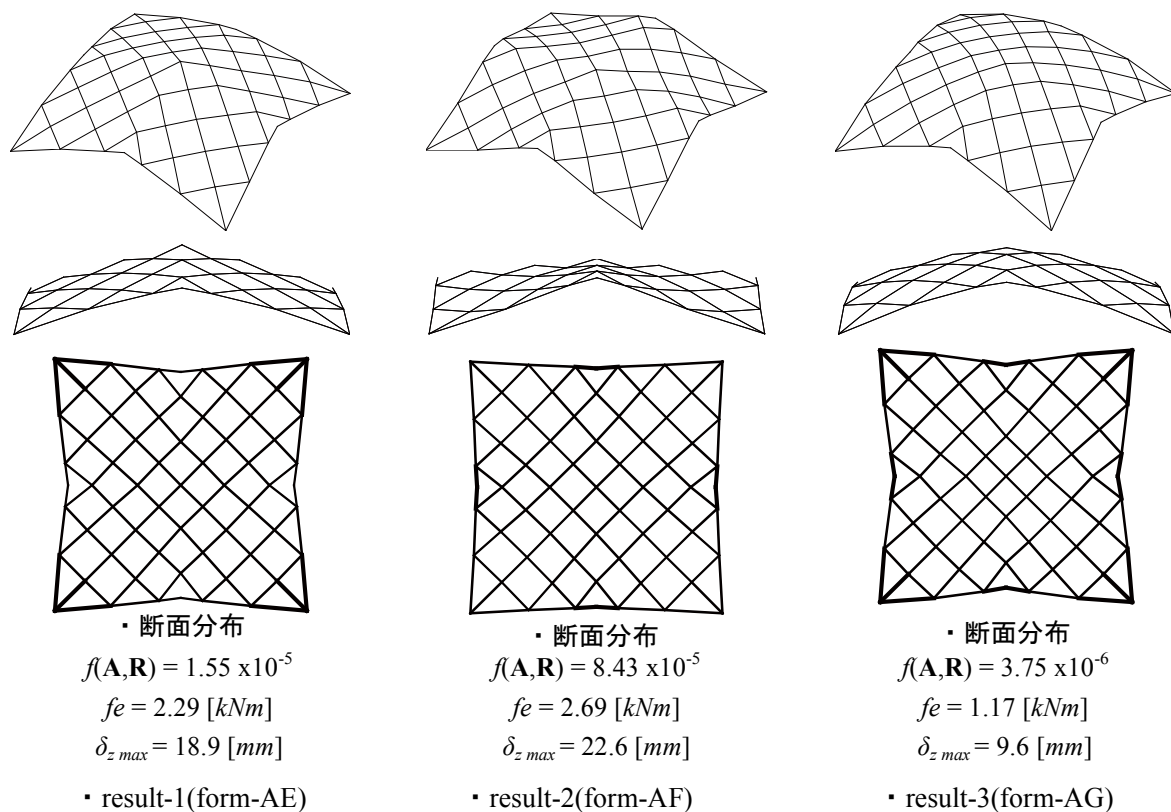


図6. 30 最終世代で得られた解形状 Case-D(x,z 軸回り回転角最小化)

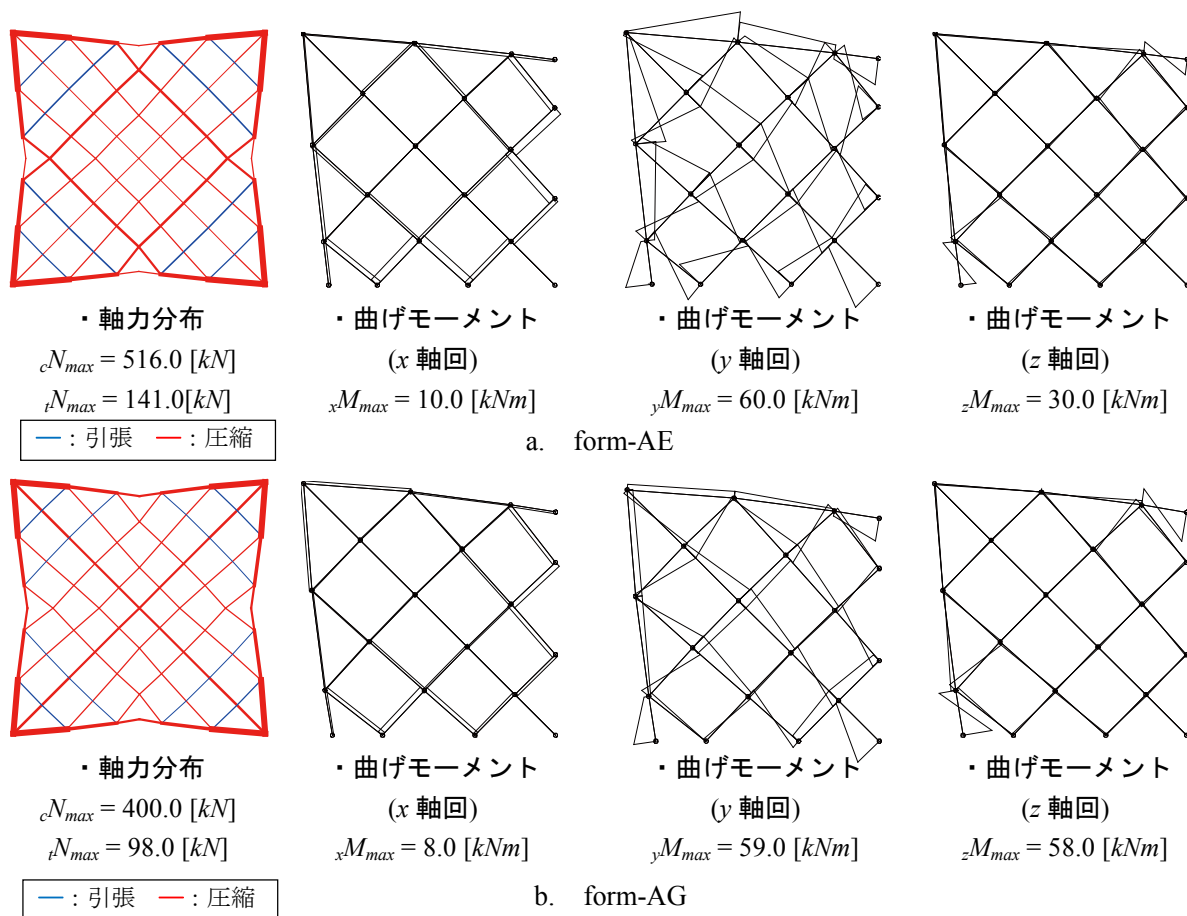
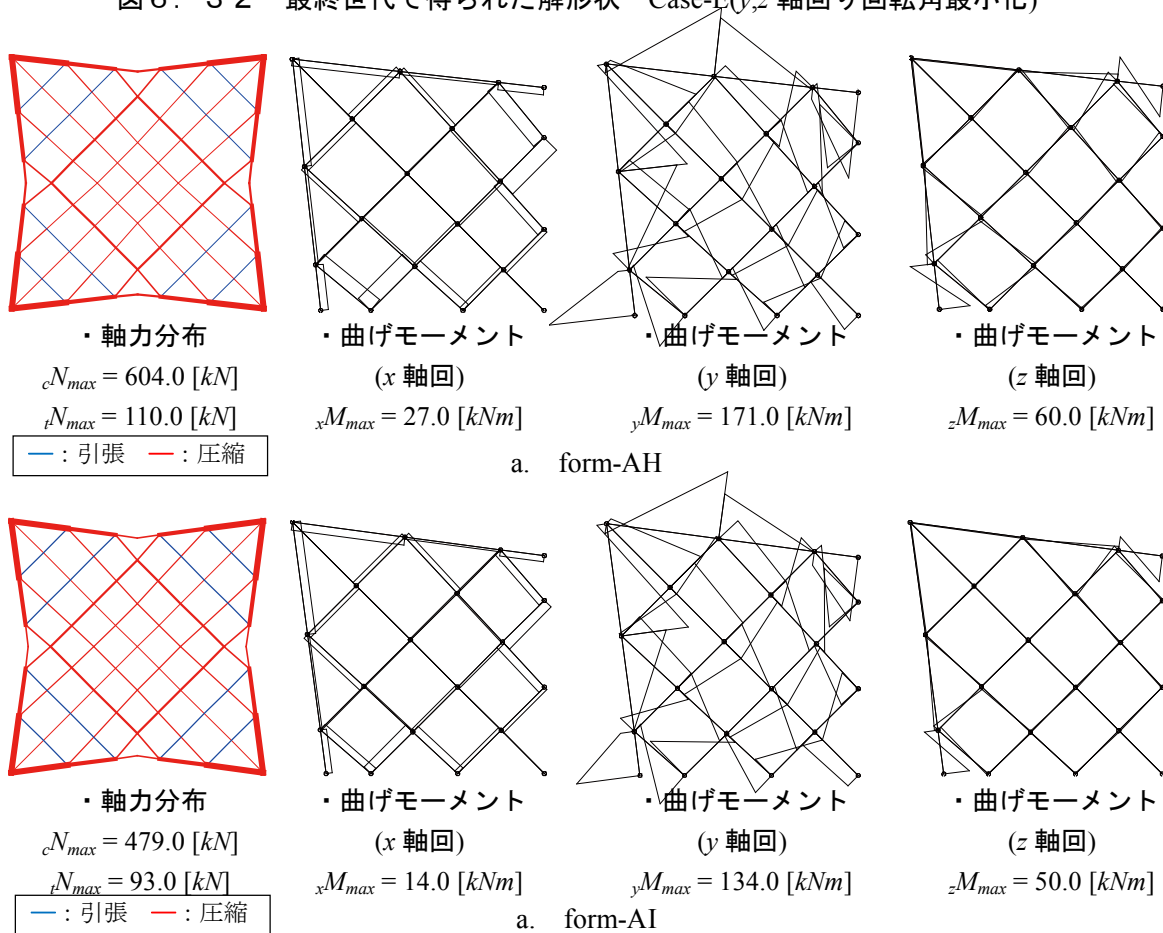
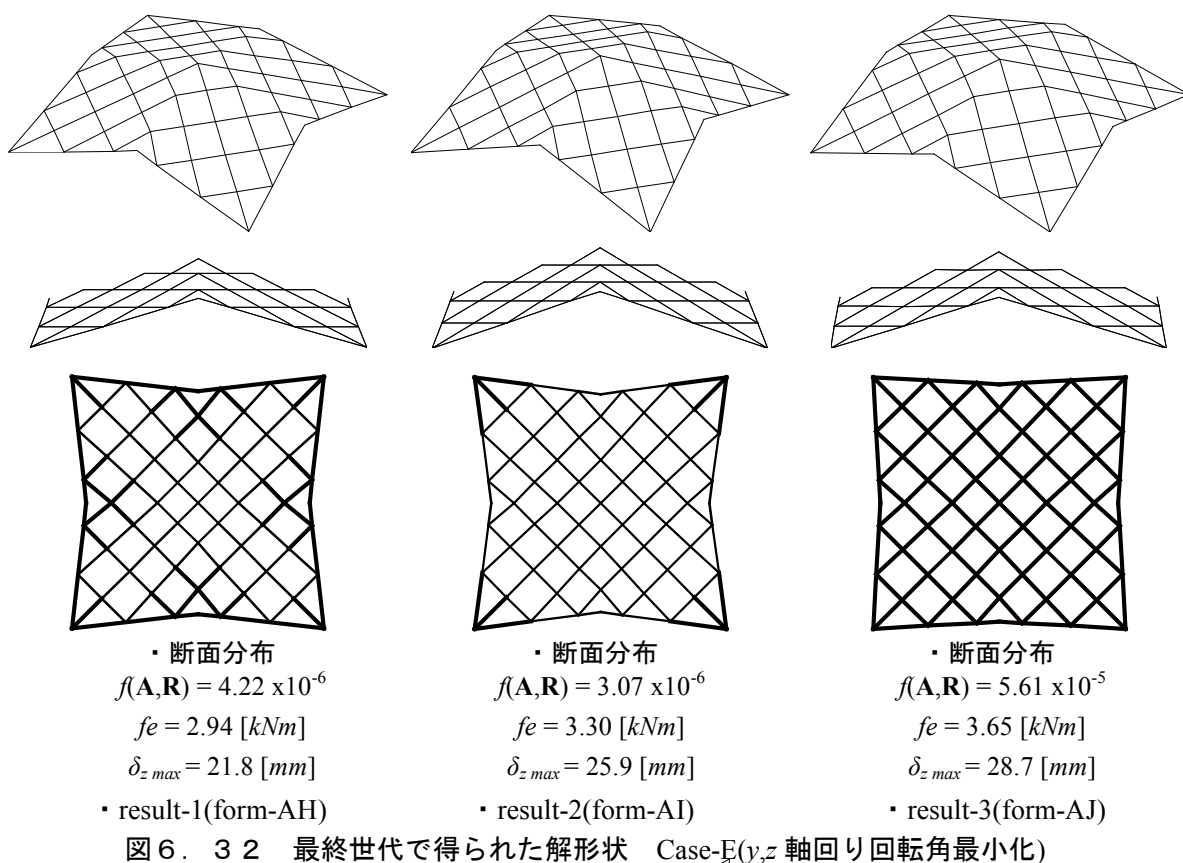
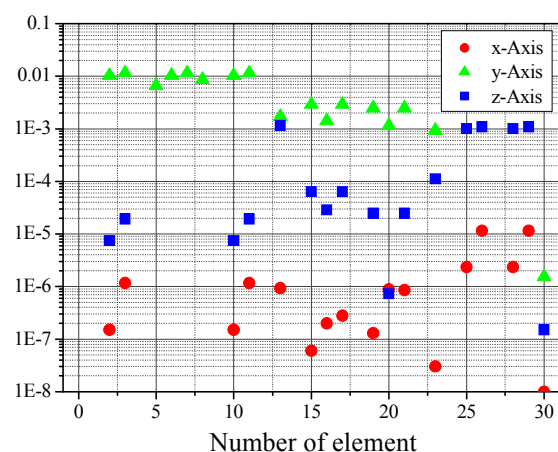


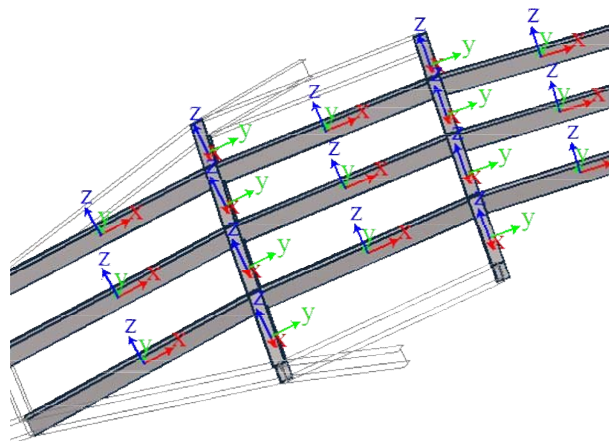
図6. 31 form-AE,AG の力学性状 Case-D(x,z 軸回り回転角最小化)



Torsion value



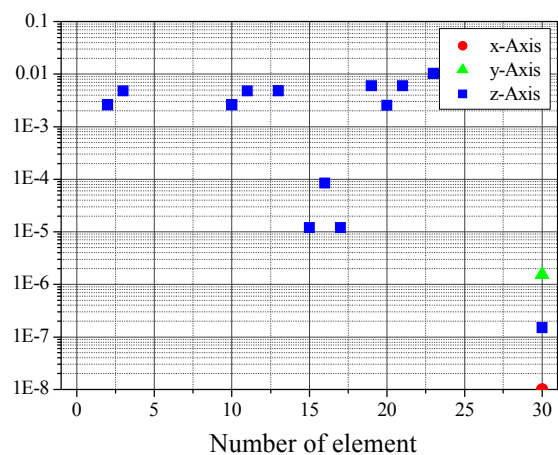
・評価指標の値



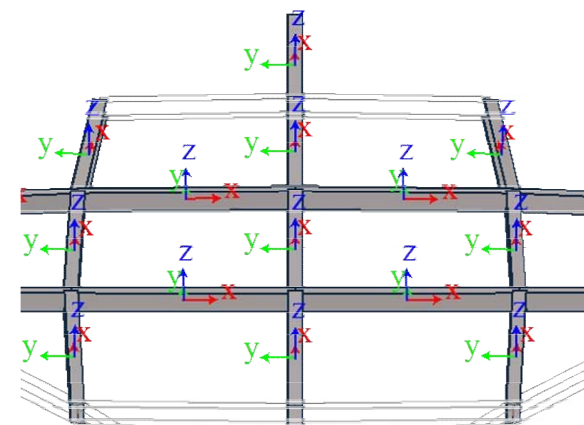
・各要素の要素座標軸の関係

a. Case-A(form-W)

Torsion value



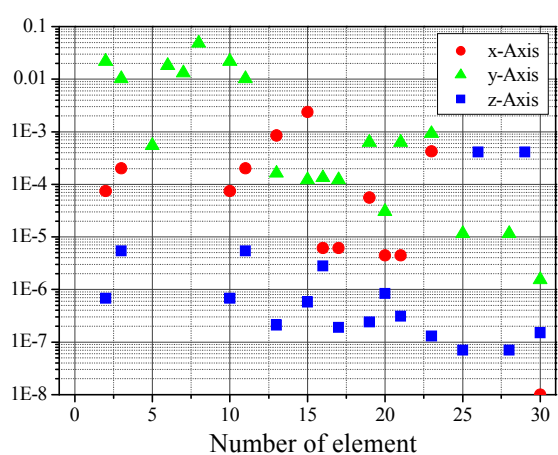
・評価指標の値



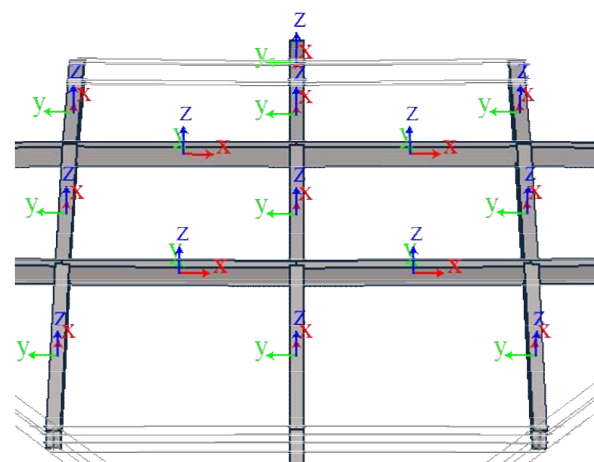
・各要素の要素座標軸の関係

b. Case-B(form-AA)

Torsion value



・評価指標の値

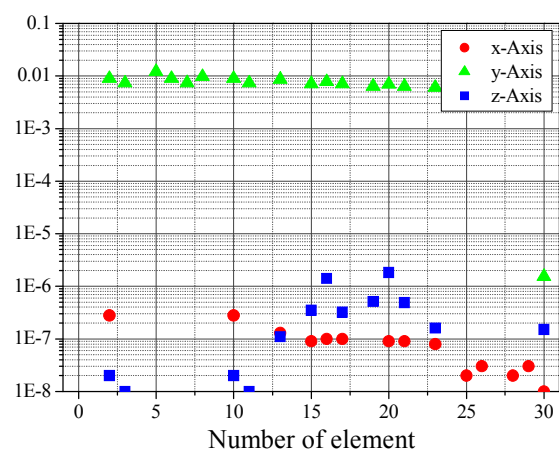


・各要素の要素座標軸の関係

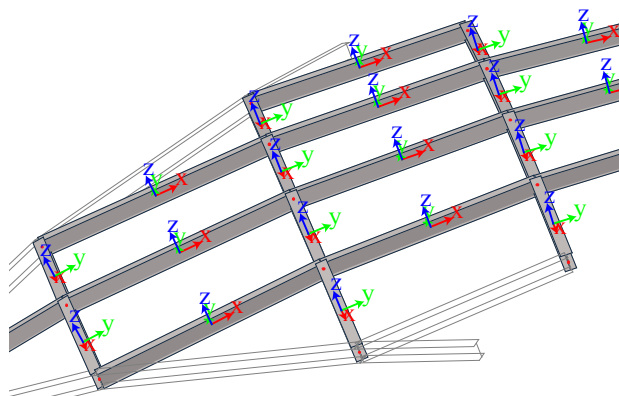
c. Case-C(form-AB)

図6. 34 各交点における部材間の回転角の評価値と要素座標軸の関係

Torsion value



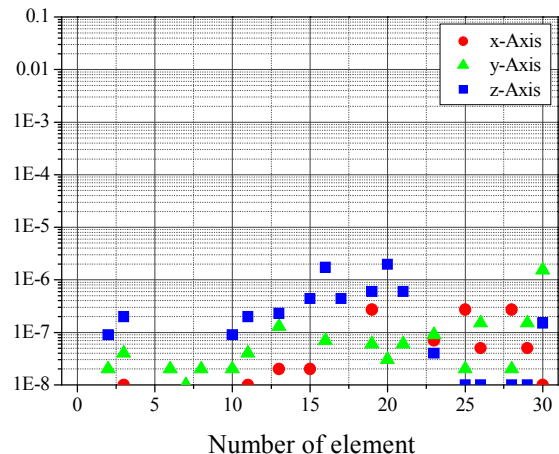
・評価指標の値



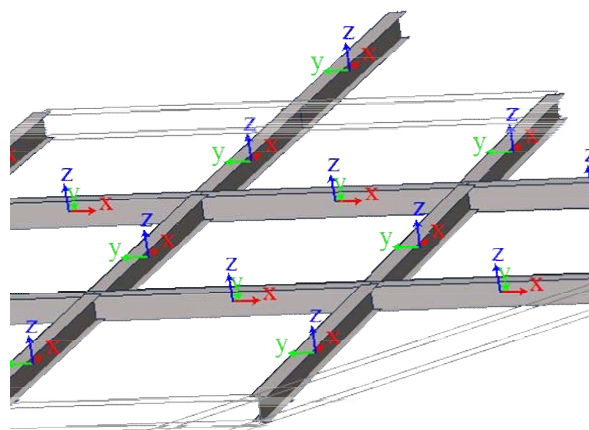
・各要素の要素座標軸の関係

a. Case-D(form-AG)

Torsion value



・評価指標の値



・各要素の要素座標軸の関係

b. Case-E(form-AI)

図6. 35 各交点における部材間の回転角の評価値と要素座標軸の関係

6. 2. 2. 5 考察

Model-A

図 6.10 より各ケースは応力制約を満足した解を得るまで数十ステップ要するが、その後目的関数は 0 に収束する。特に y 軸回り回転角を目的関数とした Case-B, Case-E は許容解を得てから目的関数が収束するまで他のケースと比較して数千ステップを要していることから、制約条件を満足する解の設計領域が狭いことが考えられる。図 6.11, 13, 15, 17, 19 より得られた解形状は各目的関数で異なる曲面形状を有する。これは格子を構成するフレームの部材間の回転角が曲面形状表現に影響していることを意味する。図 6.11 (Case-A) は x 軸回りの回転角が最小化された曲面形状である。同一グループ内の要素は材軸方向へねじれることなく連続しており、曲面形状全体は x 軸方向へねじれないフレームで構成される。なお、得られた曲面形状は球形に近似するものも含まれる。図 6.13 (Case-B) は y 軸回りの回転角が最小化された曲面形状である。同一グループ内の要素は面外方向への曲率は生じず x 軸方向へのねじれと曲面面内方向へ曲率を有する。曲面形状全体は材軸方向へのねじれと y 軸回りに曲率を持つフレームで構成される。図 6.15 (Case-C) は z 軸回りの回転角が最小化された曲面形状である。同一グループ内の要素は曲面面外方向と材軸方向へねじれを持った形状となる。曲面形状全体は材軸方向へのねじれと面外方向にのみ曲率を持ったフレームのみで構成される。図 6.17 (Case-D) は x, z 軸回りの回転角が最小化された形状である。同一グループ内の要素はねじれなく、面外方向にのみ曲率を有する。したがって、曲面形状全体は単曲率のフレームのみで構成される。図 6.19 (Case-E) は y, z 軸回りの回転角が最小化された曲面形状である。同一グループ内の要素はねじれのみ有する直線部材となる。したがって、曲面の 1/4 領域は線織面である。力学性状については総ひずみエネルギー最小化で得られた form-A と比較して各応力値が高い。特に、form-H(Case-A) は面内曲げやねじれ曲げが大きく、form-K(Case-B), N(Case-C) は面外曲げが大きくなる傾向を示す。なお、今回設定した目的関数と応力性状については明確な関連性は見られなかったものの、力学性状に対する評価は応力制約しか設けていないため、形状に関する評価を優先し曲げモーメントが極端に増大する方向が存在する傾向があることを確認した。図 6.21, 22 に各ケースにおける代表形状の 1/4 領域の各接点における式 (2.7.12) – (2.7.14) の値と各要素の要素座標軸の向きを示す。なお、図 6.21, 22 中横軸は要素番号、縦軸は要素の接点における式 (2.7.12) – (2.7.14) の値を示す。図 6.21a より form-H(Case-A) は x 軸回り回転角最小化であるため、各要素における式 (2.7.12) の値は 0 となる。また、図 6.21a より格子を構成する各フレームは部材が材軸方向へねじれなく連続していることが確認される。なお、図 6.21a より form-H は z 軸回り回転角も 0 へ収束している。そのため、form-H と form-P は曲面形状が類似している。

Model-B

Model-B も同様に図 6.23 より各ケースは応力制約を満足した解を得るまで数十ステップ要するが、その後目的関数は 0 に収束する。 y 軸回り回転角を目的関数とした Case-B, Case-E の収束性が悪い傾向も Model-A と同様である。図 6.24, 26, 28, 30, 32 より Model-B は曲面の主曲率方向に格子フレームが配置されやすいため、目的関数の収束状況は Model-A よりも良く、各ケースにより Model-A と同様の特徴を有する曲面形状が得られている。特に、図 6.35b に示した式(2.7.12) – (2.7.14)の評価値の図より form-AI(Case-E)は x, y, z 軸回りの回転角評価値が全て 0 に収束しており、1/4 の領域で平面に近似する形状となっている。力学性状についても Model-A 同様に総ひずみエネルギー最小化で得られた form-D と比較して各応力値が高い。なお、ここで得られた解の総ひずみエネルギーの値は form-D の 5~10 倍程度の値である。form-W(Case-A)は面外曲げが大きく、form-Z(Case-B), AC(Case-C)はねじれ曲げや面外曲げが大きくなる傾向を示す。どの解形状も面外曲げが卓越する原因は次のことが考えられる。式(2.7.12) – (2.7.14)を最小化する最も単純な形状のひとつが平面である。つまり、式(2.7.12) – (2.7.14)の値を最小化させるため、曲面全体のライズが低くなる傾向がある。これにより、曲げ変形が卓越する解が得られやすく、得られた解形状は面外曲げモーメントが大きい値となる。

6. 2. 3 基礎問題3：部材間の回転角制約条件とする総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェルの単一目的最適化

本項は製作性・施工性を考慮した構造形態創生問題として正方形平面を有する鉄骨格子シェル構造の単一目的最適化問題に SGA を適用する^[6.1]。本節は第2章7節で提案した製作性・施工性に関する評価指標を制約条件として設定し、総ひずみエネルギー最小化を行うことで、力学合理性と製作・施工性の高い解が得られることを示す。解析モデルは基本問題1で扱った図6.1に示す Model-A,B である。

6. 2. 3. 1 部材間の回転角に対する制約条件の設定

第2章に示す式(2.7.18)の制約値は部材長さと設定した部材リストの最大梁成より以下の値となる。

$$\begin{aligned}
 &\text{部材条件} \quad H=400[mm] \quad l=6000[mm] \\
 &\text{制約値} \quad \bar{t}_{x1} = 3.5 \times 10^{-5} \quad \bar{t}_{x2} = 7.6 \times 10^{-5} \\
 &\quad \bar{t}_{y1} = 7.1 \times 10^{-6} \quad \bar{t}_{y2} = 1.6 \times 10^{-5} \\
 &\quad \bar{t}_{z1} = 7.1 \times 10^{-6} \quad \bar{t}_{z2} = 1.6 \times 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{6.2.13a,b,c}$$

6. 2. 3. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法は SGA を用いる。解析パラメータを表6.4に示す。Model-A,B とも基本的な GA パラメータは同一とする。部材断面リストを表6.2と同様である。

表6. 4 SGA パラメータ(Model-A,B)

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 22 bit
世代数	10000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 10 bit
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.002	交叉方式	二点交叉

6. 2. 3. 3 数値結果 1 Model-A の総ひずみエネルギー最小化

数値結果 1 は Model-A の総ひずみエネルギー最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.14)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (6.2.15)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.16a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U]$$

$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_x \leq \bar{t}_{x1} \quad t_{x\max} \leq \bar{t}_{x2} \quad (\text{Case-F: } x \text{ 軸回り回転角制約})$$

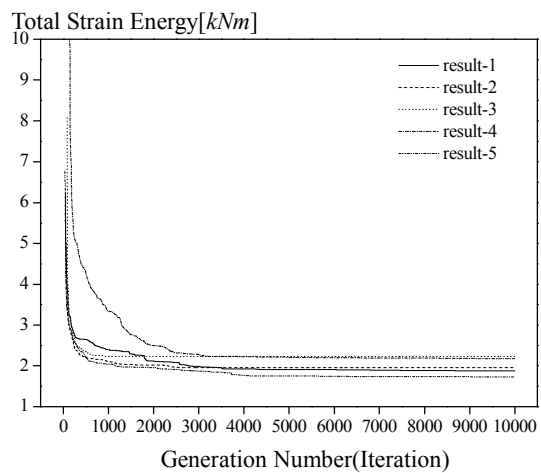
$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_y \leq \bar{t}_{y1} \quad t_{y\max} \leq \bar{t}_{y2} \quad (\text{Case-G: } y \text{ 軸回り回転角制約}) \quad (6.2.16c)$$

$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_z \leq \bar{t}_{z1} \quad t_{z\max} \leq \bar{t}_{z2} \quad (\text{Case-H: } z \text{ 軸回り回転角制約})$$

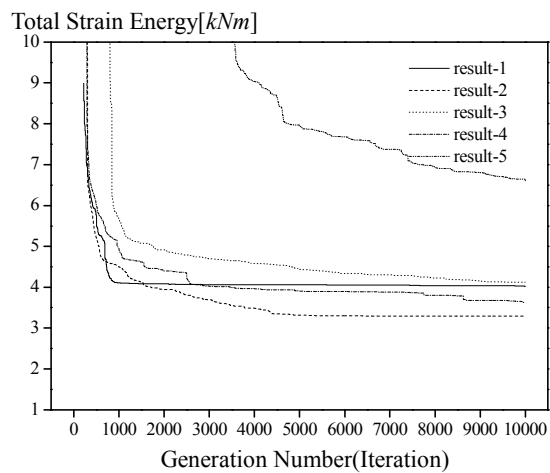
ここで、 \mathbf{d} : 節点変位ベクトル, \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス, $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$, σ_i : i 要素の応力度, σ_A : 許容応力度である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。部材間の回転角に関する制約条件は Case-F-H の 3 ケースである。側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $9.0 [m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 3.33$ である。

数値結果

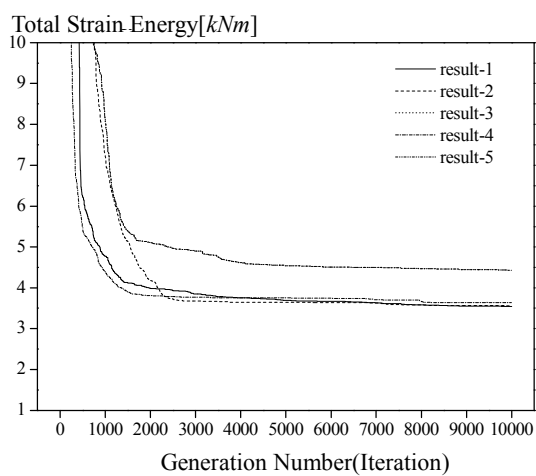
解析結果を図 6.36–44 に示す。図 6.36 は部材間の回転角に関する制約条件を Case-F–G とした場合の各 5 回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図 6.36 は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が世代数を示す。図 6.37–42 は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状と代表形状の力学性状である。図 6.37, 39, 41 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率である。解形状の比較のため、各解の制約条件として設定している回転角評価値の最大値を示す。図 6.38, 40, 42 は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。また、各要素の交点における部材間の回転角に関する式 (2.7.12) – (2.7.14) の値を示した図を 6.43 に示す。図 6.44 は基本問題 1 で得られた form-A との稜線形状の比較図である。



a. Case-F



b. Case-G



c. Case-H

図 6. 3 6 数値結果 (目的関数の収束状況)

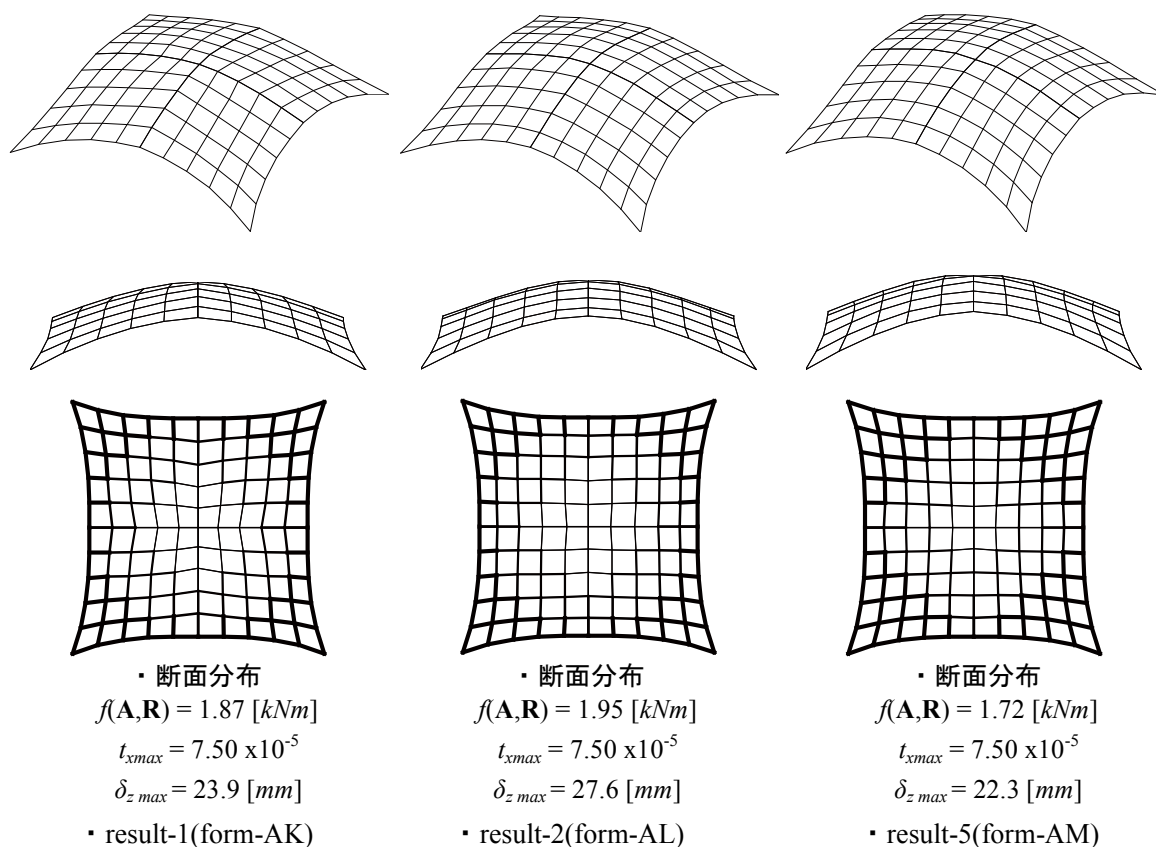


図6. 37 最終世代で得られた解形状 Case-F(x 軸回り回転角最小化)

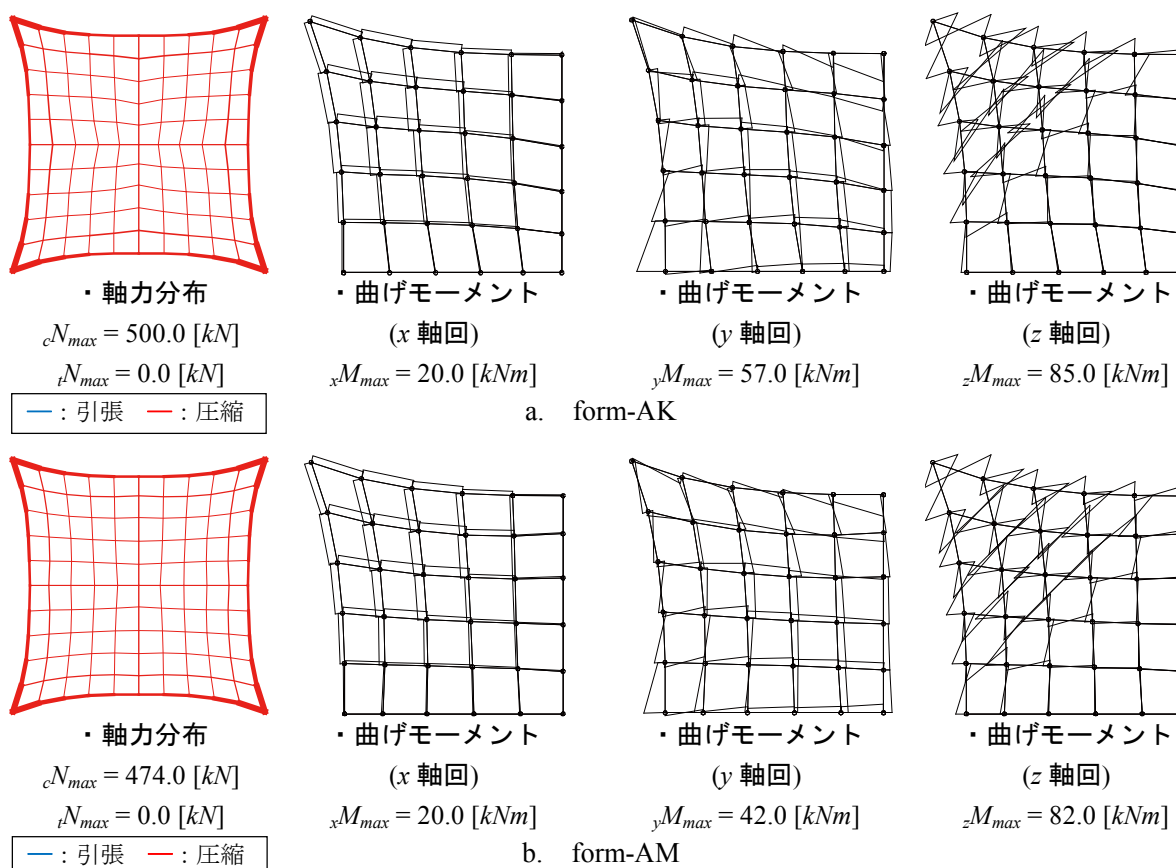


図6. 38 form-AK,AM の力学性状 Case-F(x 軸回り回転角最小化)

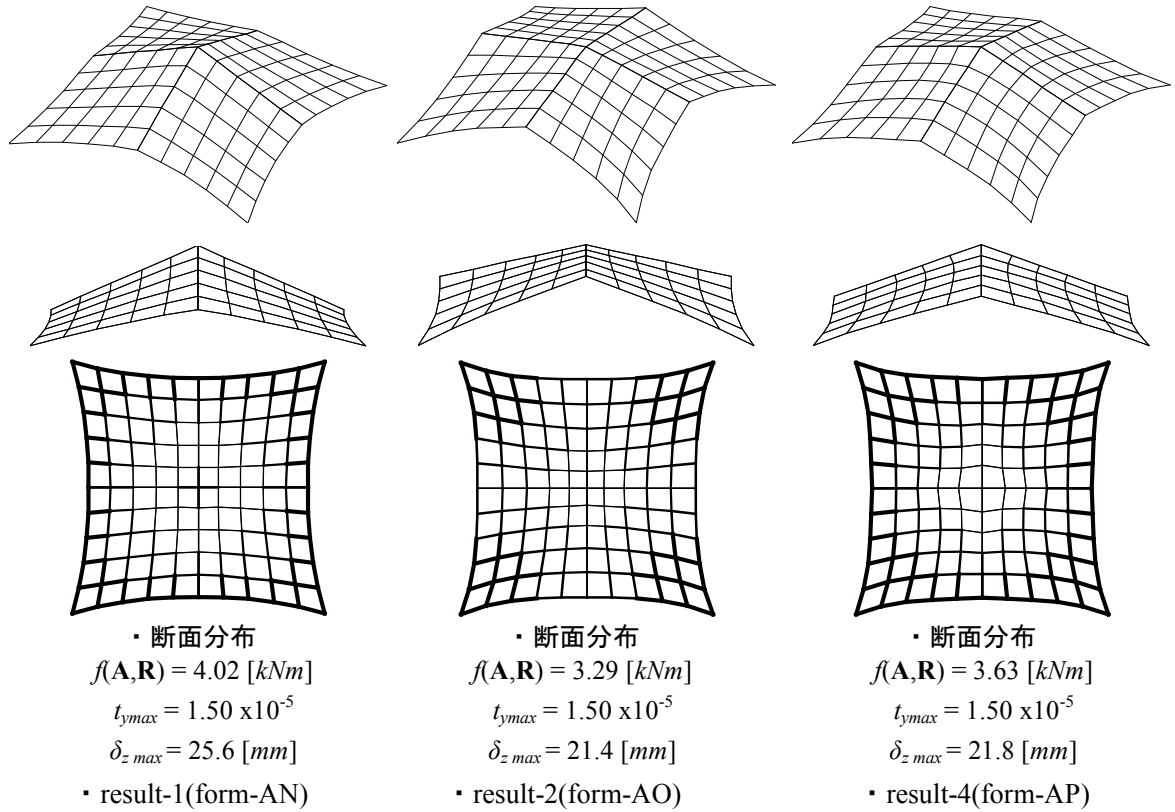


図6. 39 最終世代で得られた解形状 Case-G(y 軸回り回転角最小化)

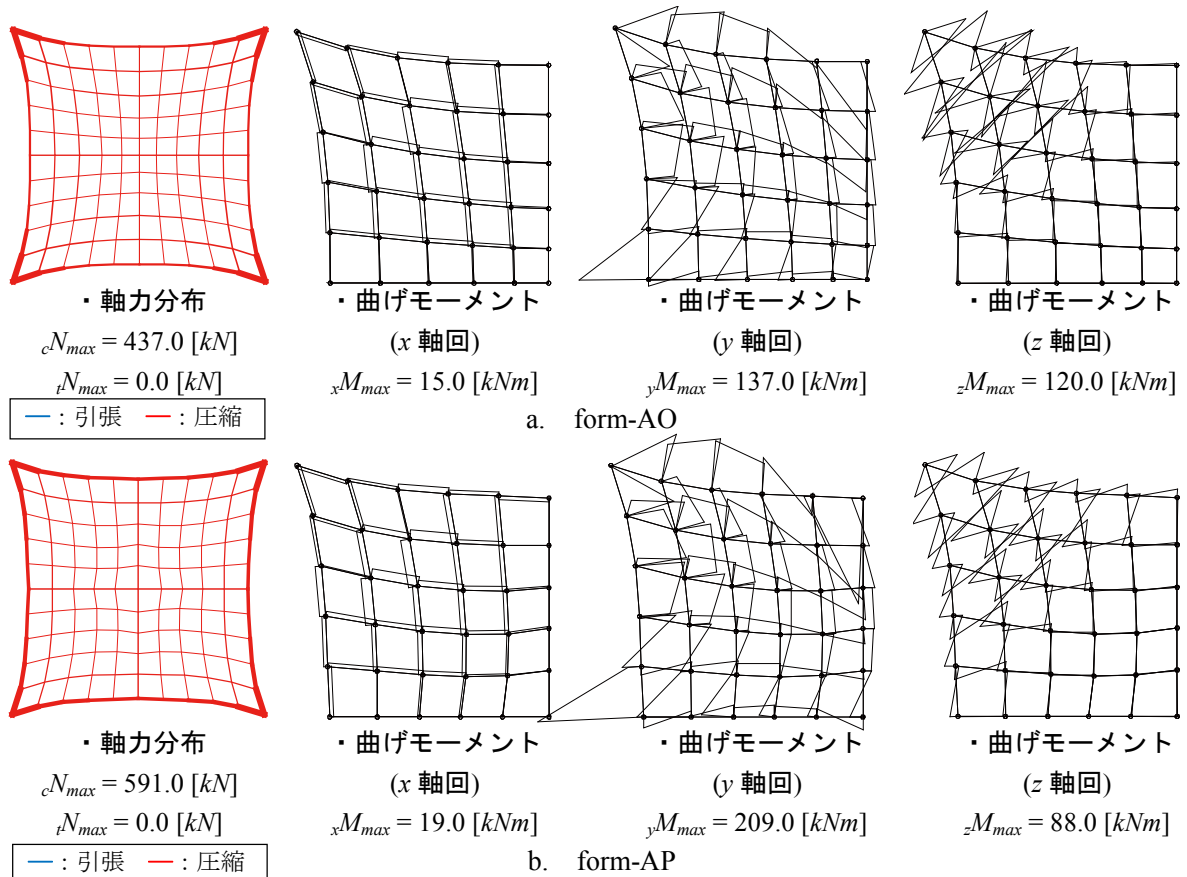


図6. 40 form-AO,AP の力学性状 Case-G(y 軸回り回転角最小化)

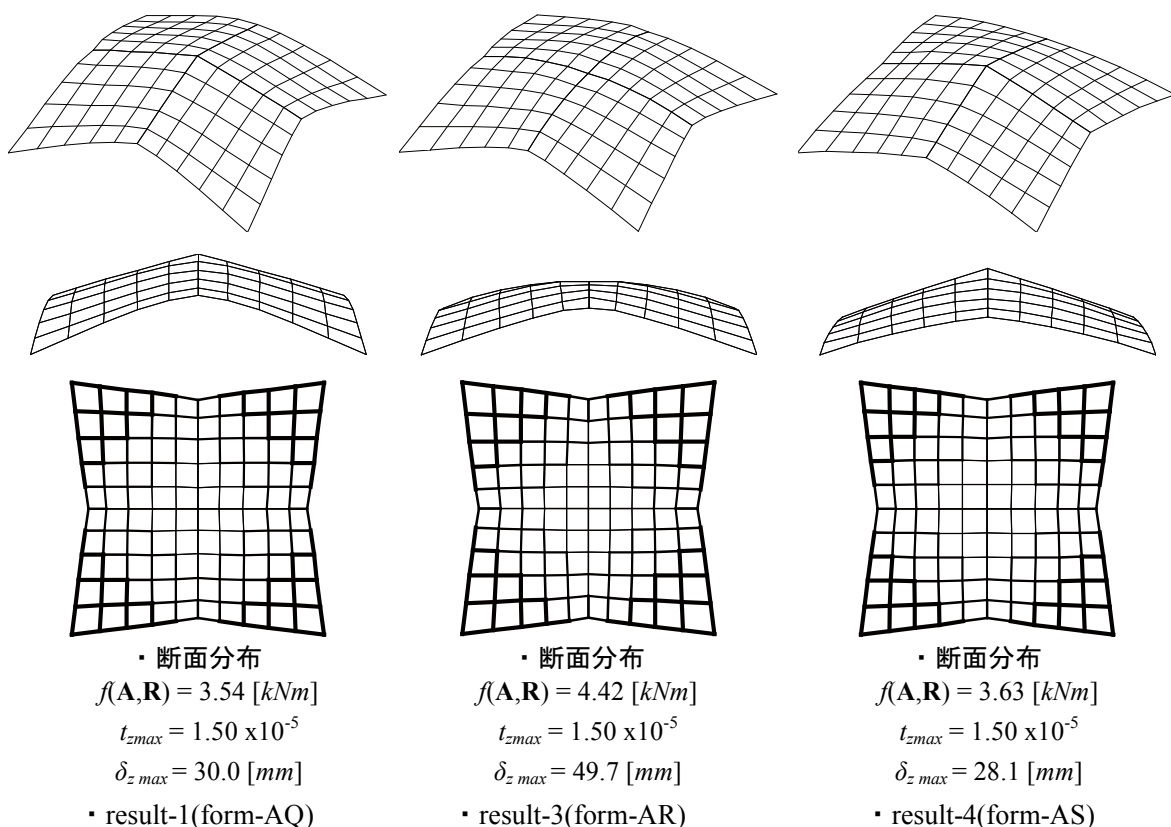


図6. 4 1 最終世代で得られた解形状 Case-H(y,z 軸回り回転角最小化)

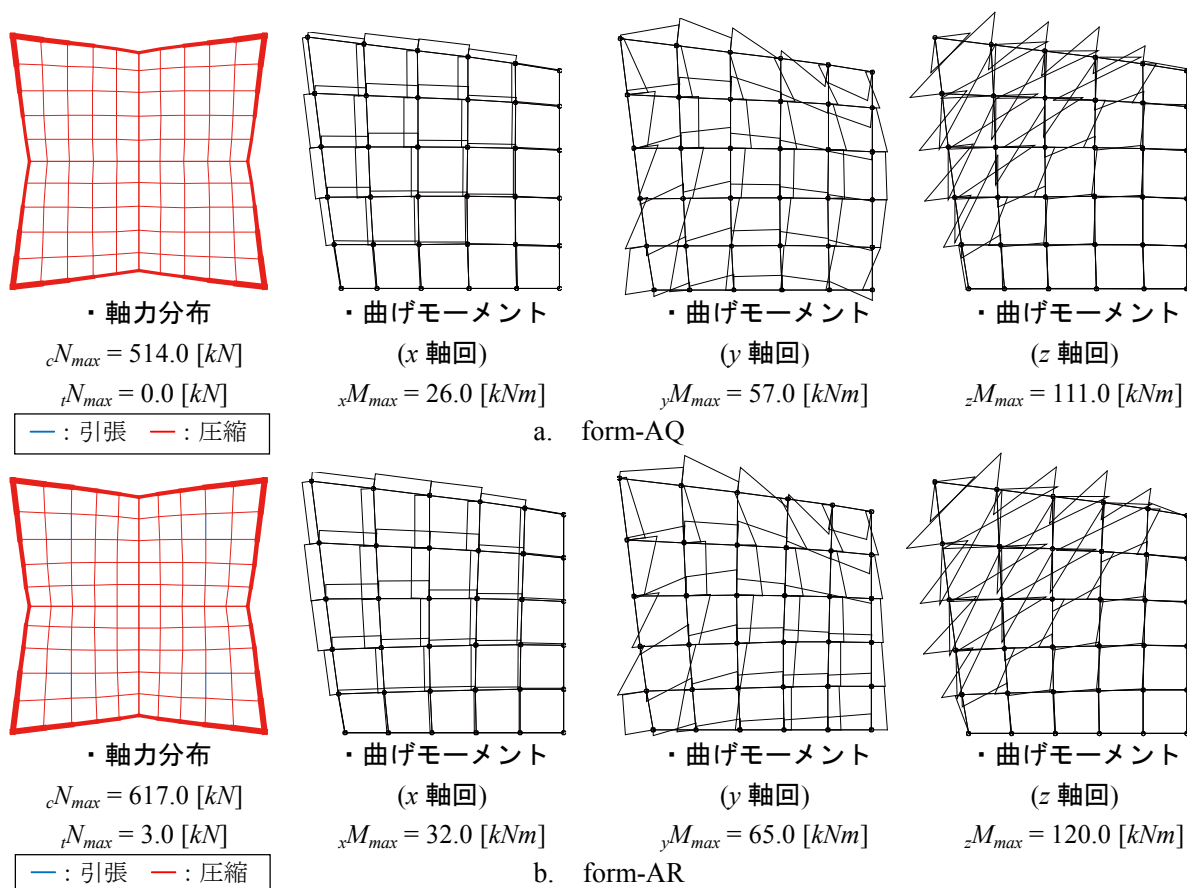


図6. 4 2 form-AQ,AR の力学性状 Case-H(y,z 軸回り回転角最小化)

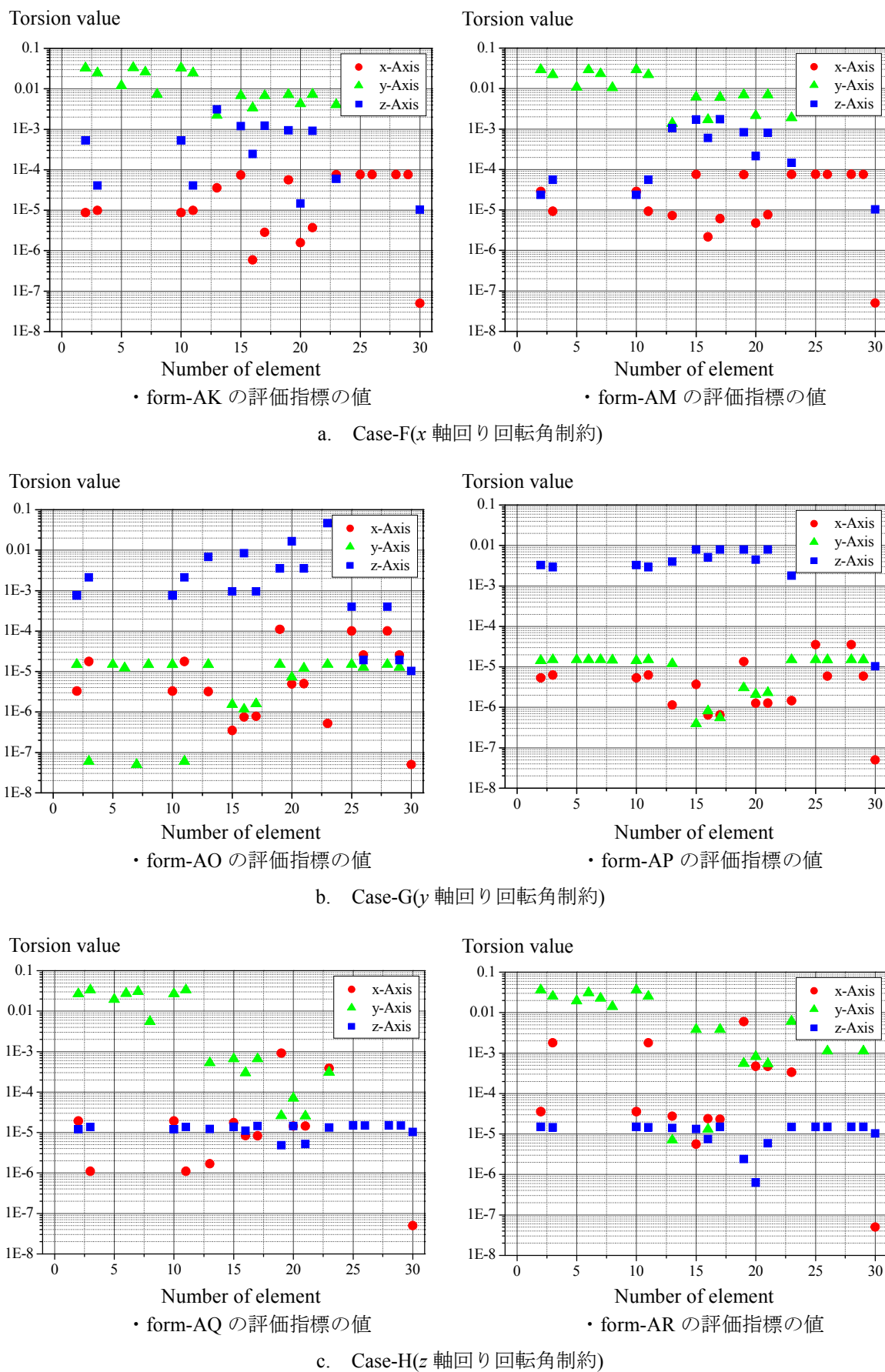
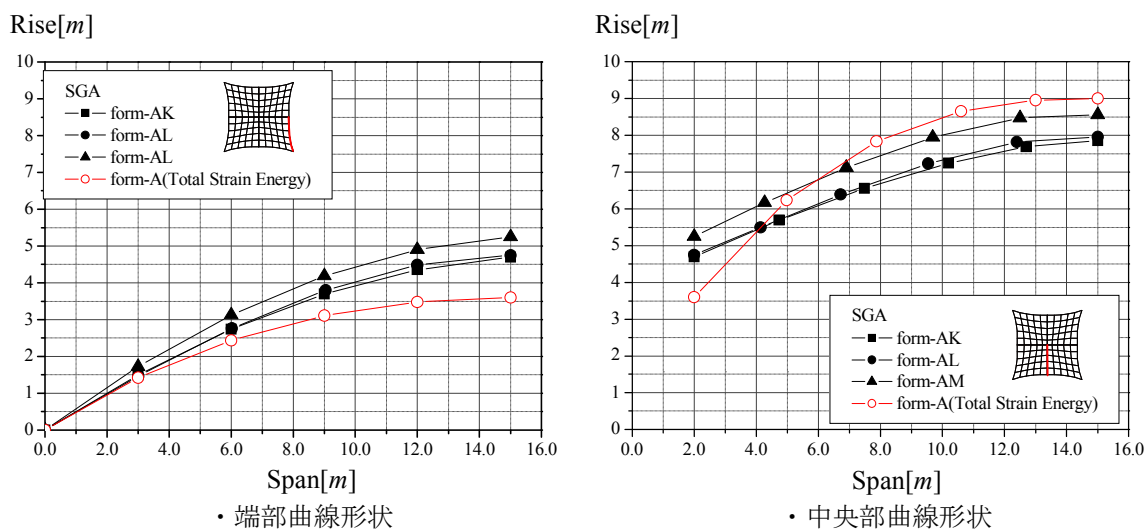
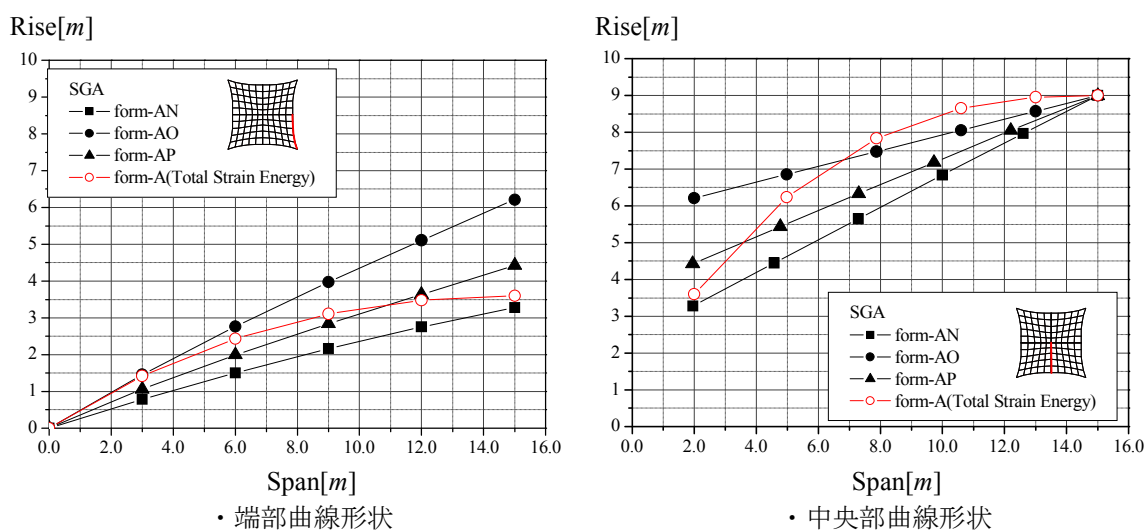


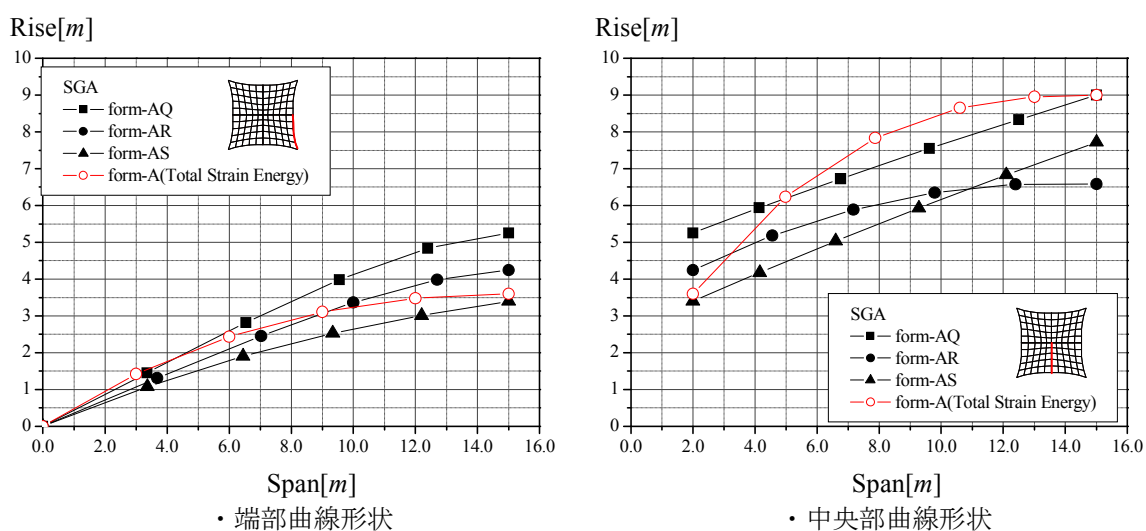
図6. 43 各交点における部材間の回転角の評価値



a. Case-F(x 軸回り回転角制約)



b. Case-G(y 軸回り回転角制約)



c. Case-H(z 軸回り回転角制約)

図6. 44 稜線形状の比較

6. 2. 3. 4 数値結果2 Model-B の総ひずみエネルギー最小化

数値結果2はModel-Bの総ひずみエネルギー最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.17)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (6.2.18)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.19a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$\mathbf{A}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^L & \mathbf{A}_2^L & \dots & \mathbf{A}_{31}^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}^U = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^U & \mathbf{A}_2^U & \dots & \mathbf{A}_{31}^U \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x^L & \mathbf{R}_y^L & \mathbf{R}_z^L \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^U = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x^U & \mathbf{R}_y^U & \mathbf{R}_z^U \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_x \leq \bar{t}_{x1} \quad t_{x\max} \leq \bar{t}_{x2} \quad (\text{Case-F: } x \text{ 軸回り回転角制約})$$

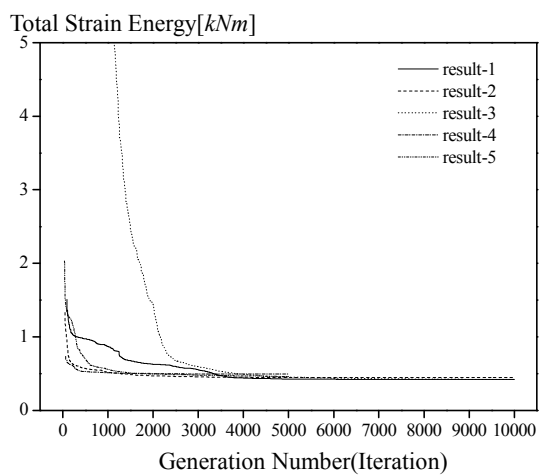
$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_y \leq \bar{t}_{y1} \quad t_{y\max} \leq \bar{t}_{y2} \quad (\text{Case-G: } y \text{ 軸回り回転角制約}) \quad (6.2.19c)$$

$$\frac{1}{n''} \sum_{j=1}^{n''} t_z \leq \bar{t}_{z1} \quad t_{z\max} \leq \bar{t}_{z2} \quad (\text{Case-H: } z \text{ 軸回り回転角制約})$$

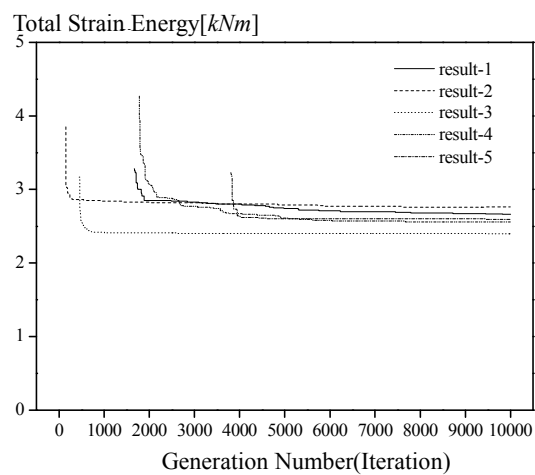
ここで、 \mathbf{d} : 節点変位ベクトル、 \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0 [m]$, $R_x^U = R_y^U = 2.0 [m]$, $R_z^L = 0.0 [m]$, $R_z^U = 9.0 [m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$, σ_i : i 要素の応力度, σ_A : 許容応力度である。応力制約はSN490Bを想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。部材間の回転角に関する制約条件はCase-F-Hの3ケースである。側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは9.0[m]であり、曲面形状の最大ライズスパン比は1:3.33である。

数値結果

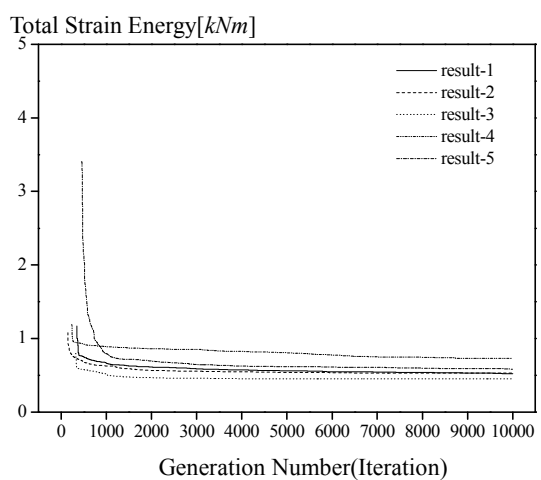
解析結果を図6.45-53に示す。図6.45は部材間の回転角に関する制約条件をCase-F-Gとした場合の各5回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図6.45は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が世代数を示す。図6.46-51は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状と代表形状の力学性状である。図6.46, 48, 50中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率である。解形状の比較のため、各解の制約条件として設定している回転角評価値の最大値を示す。図6.47, 49, 51は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。また、各要素の交点における部材間の回転角に関する式(2.7.12)-(2.7.14)の値を示した図を6.52に示す。図6.53は基本問題1で得られたform-Dとの稜線形状の比較図である。



a. Case-F



b. Case-G



c. Case-H

図6.45 数値結果(目的関数の収束状況)

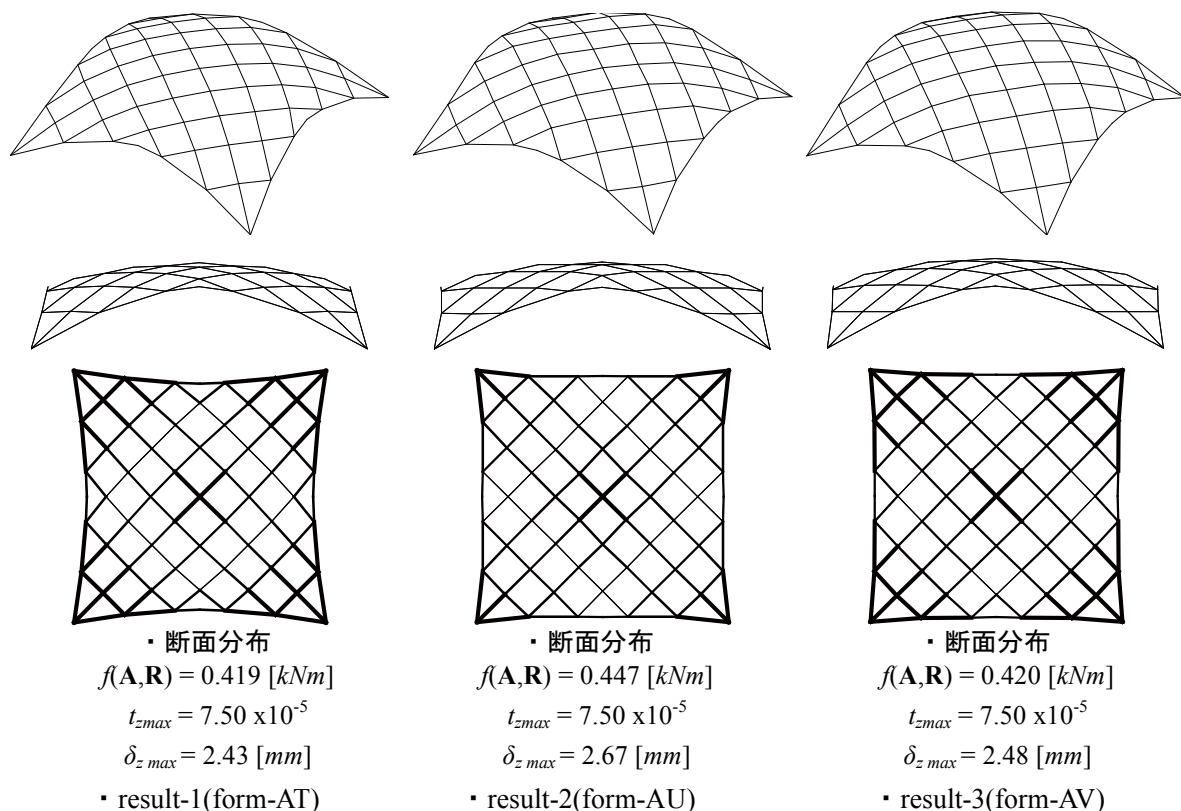


図6. 4 6 最終世代で得られた解形状 Case-F(x 軸回り回転角最小化)

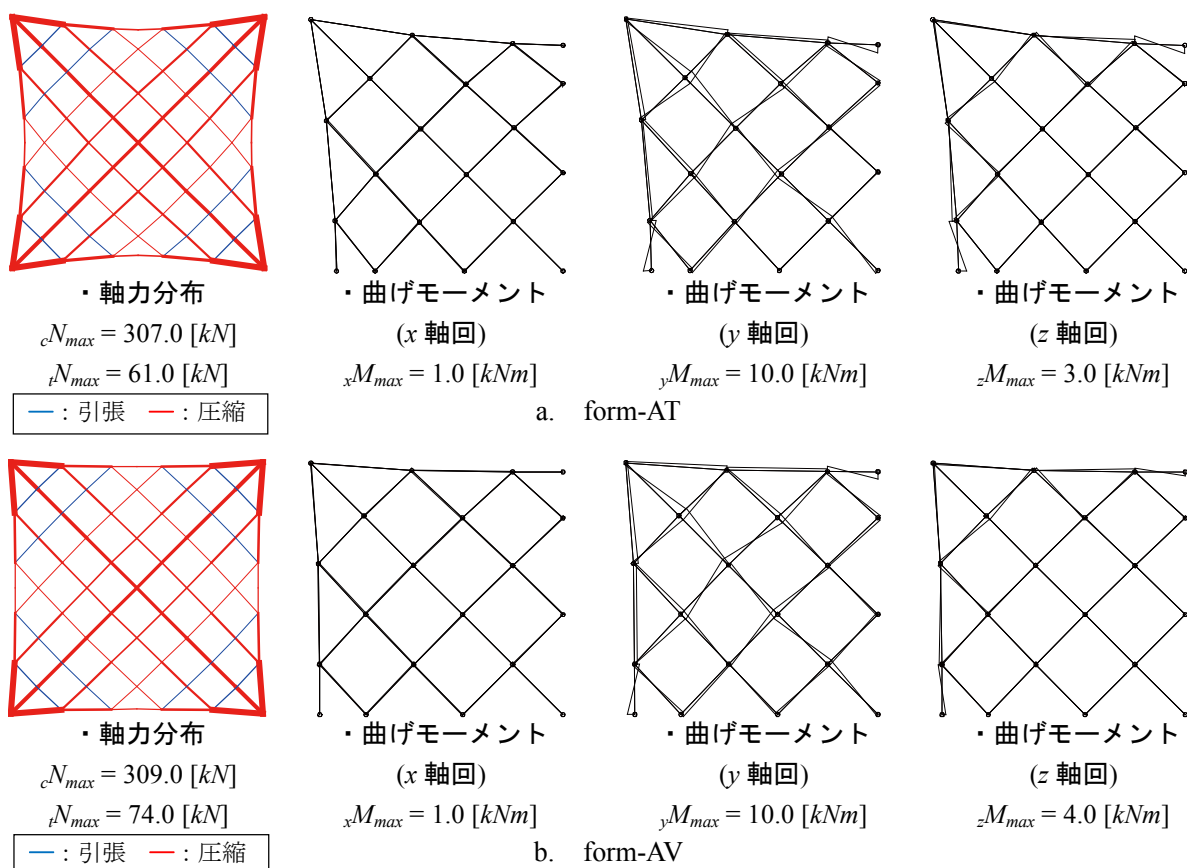


図6. 4 7 form-AT,AV の力学性状 Case-F(x 軸回り回転角最小化)

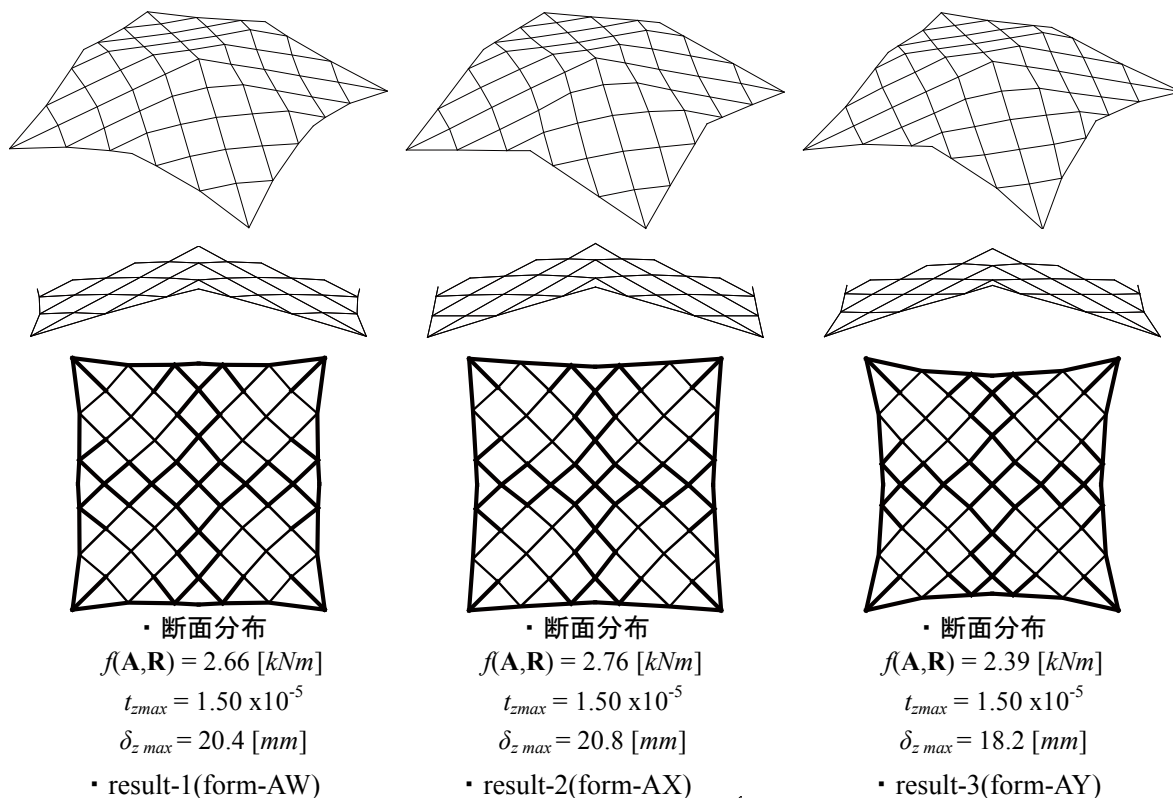


図6. 48 最終世代で得られた解形状 Case-G(y 軸回り回転角最小化)

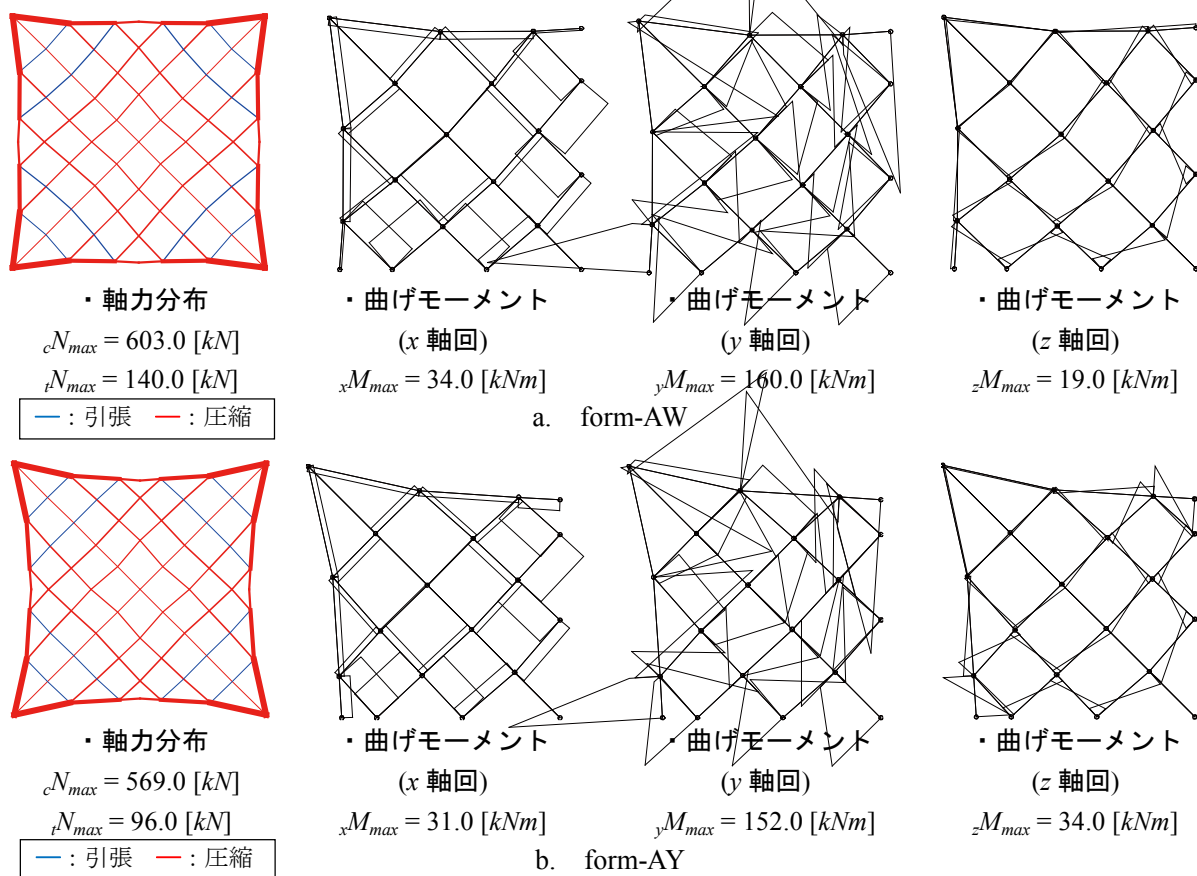


図6. 49 form-AW,AY の力学性状 Case-G(y 軸回り回転角最小化)

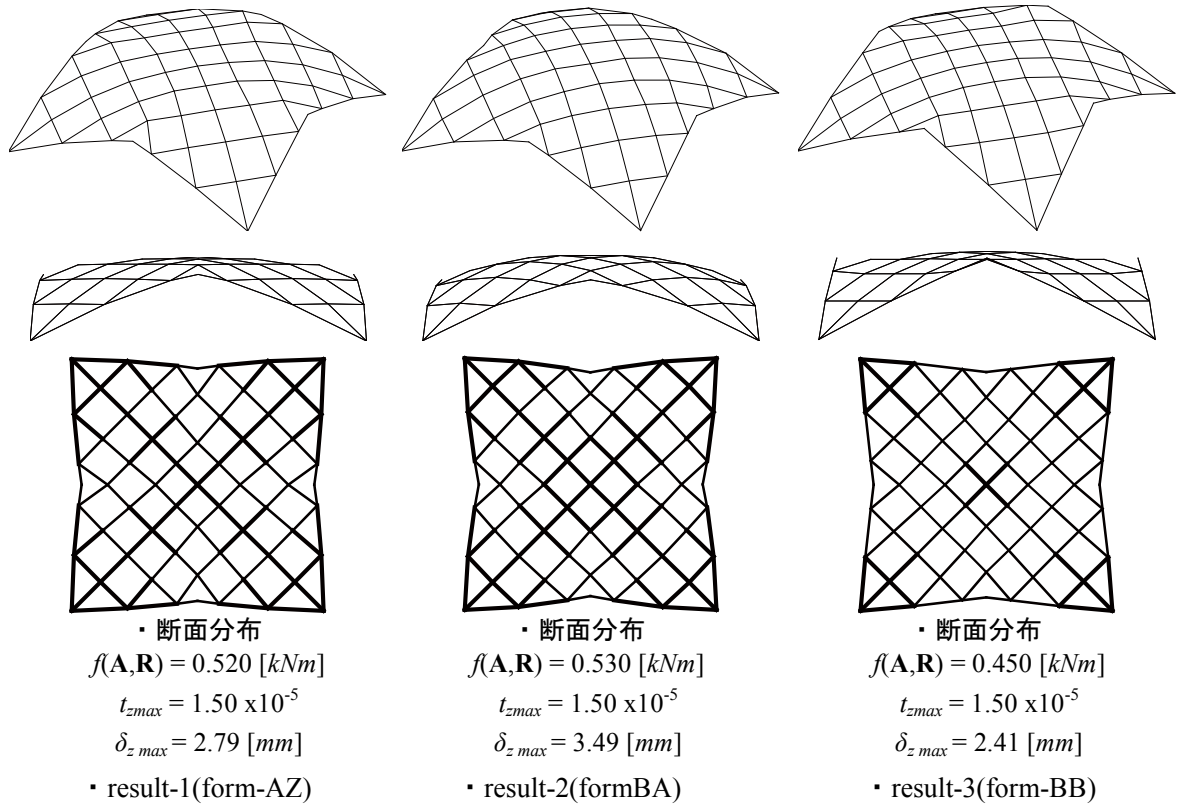


図6. 50 最終世代で得られた解形状 Case-H(z 軸回り回転角最小化)

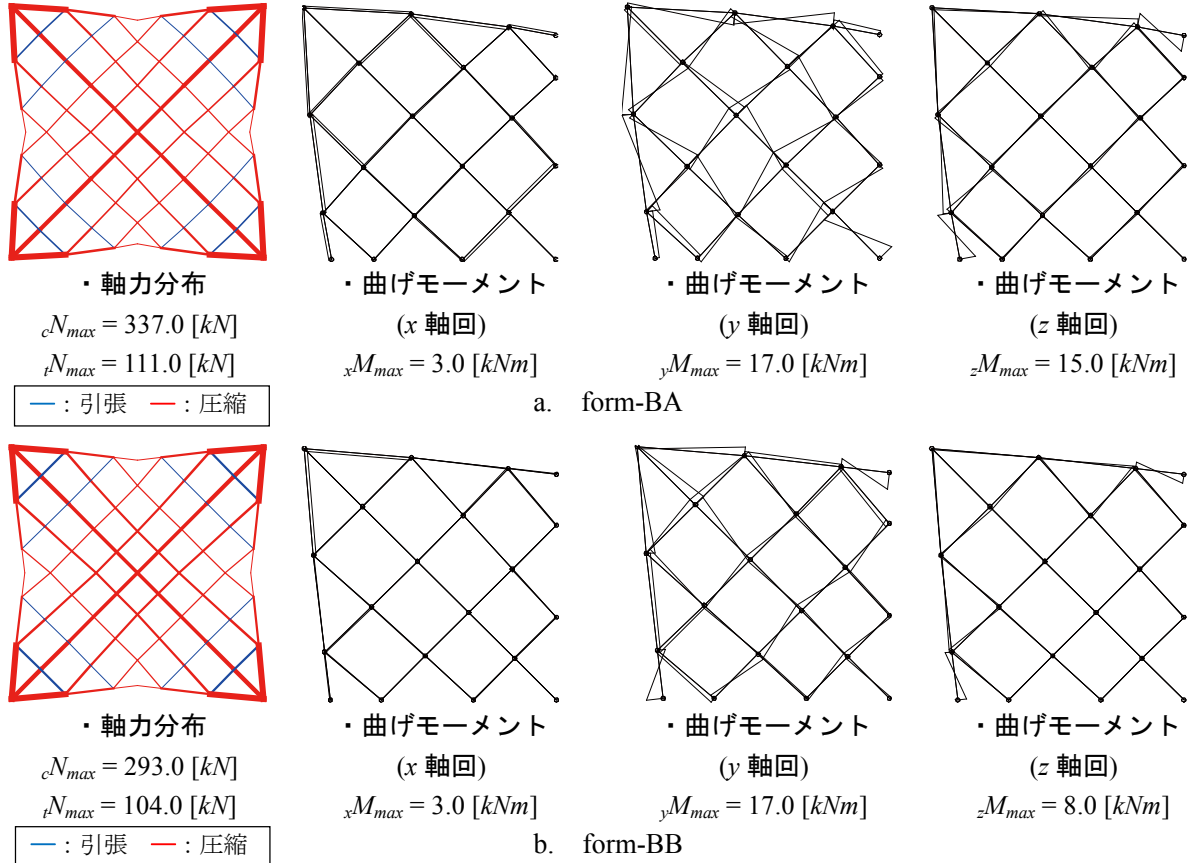


図6. 51 form-BA, BB の力学性状 Case-H(z 軸回り回転角最小化)

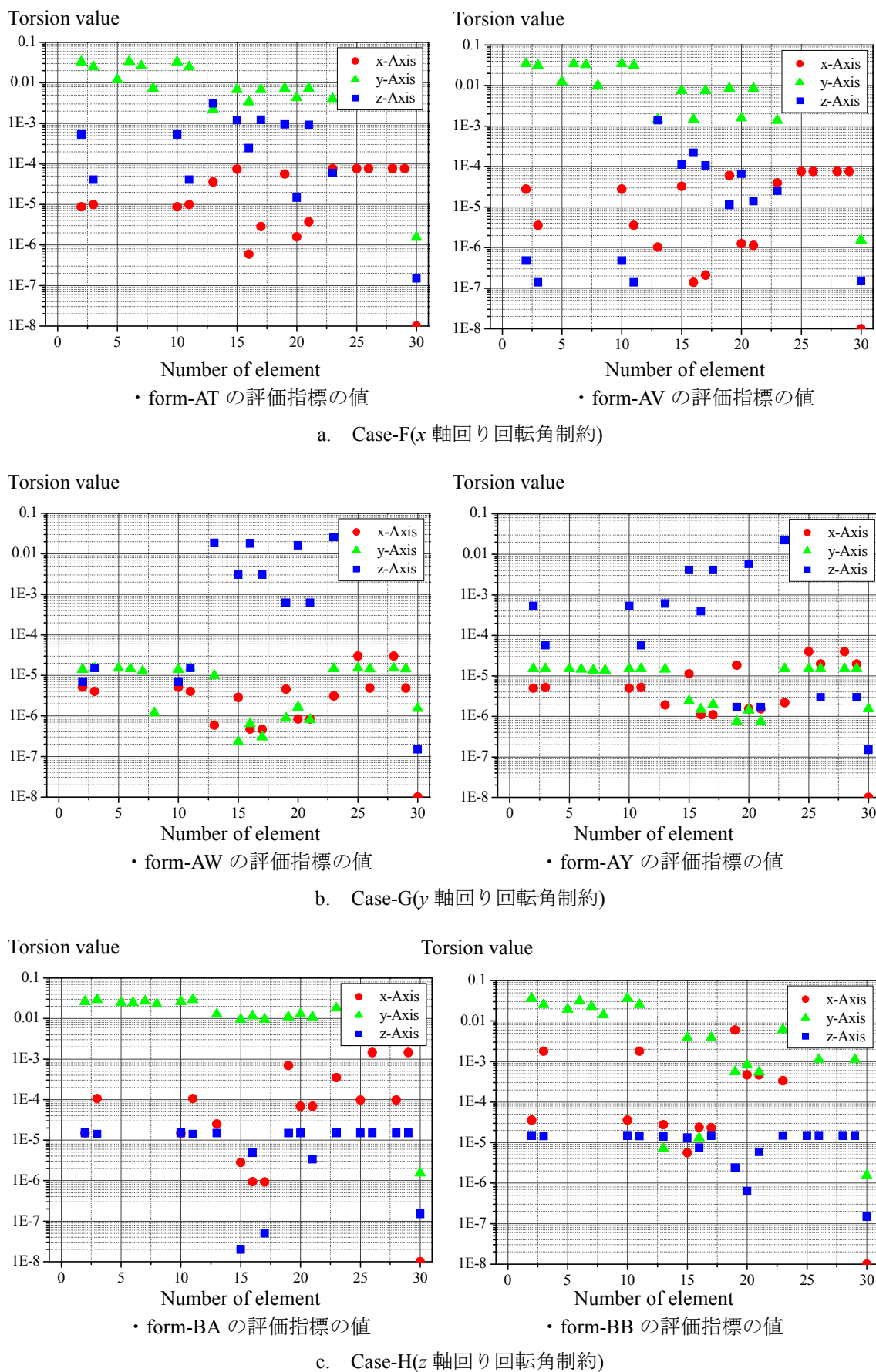
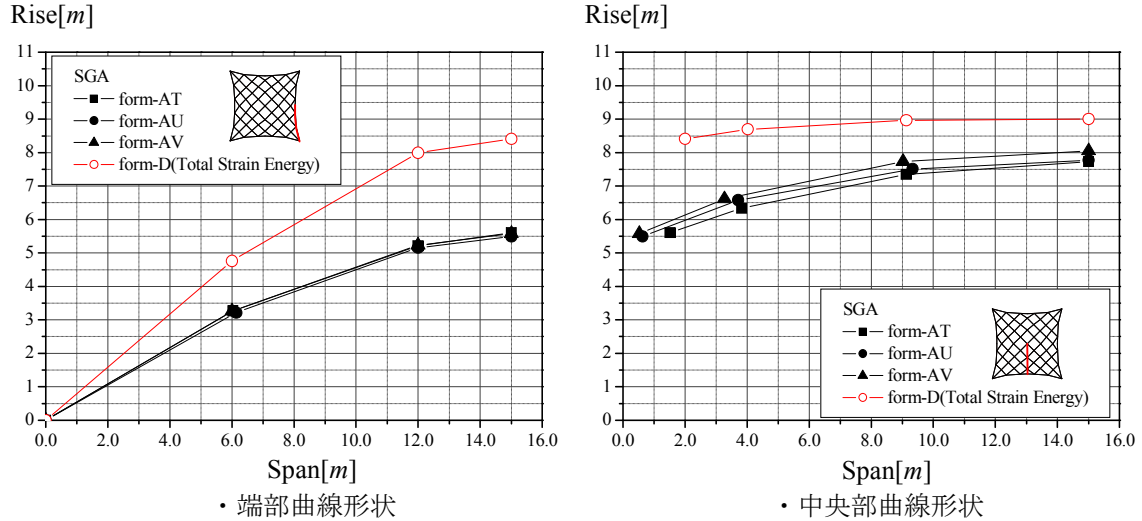
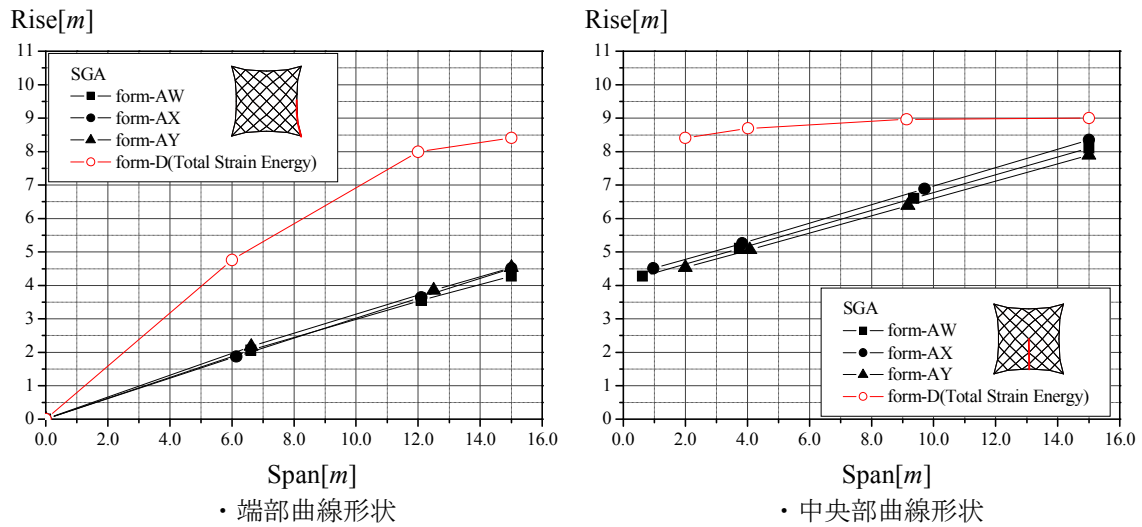


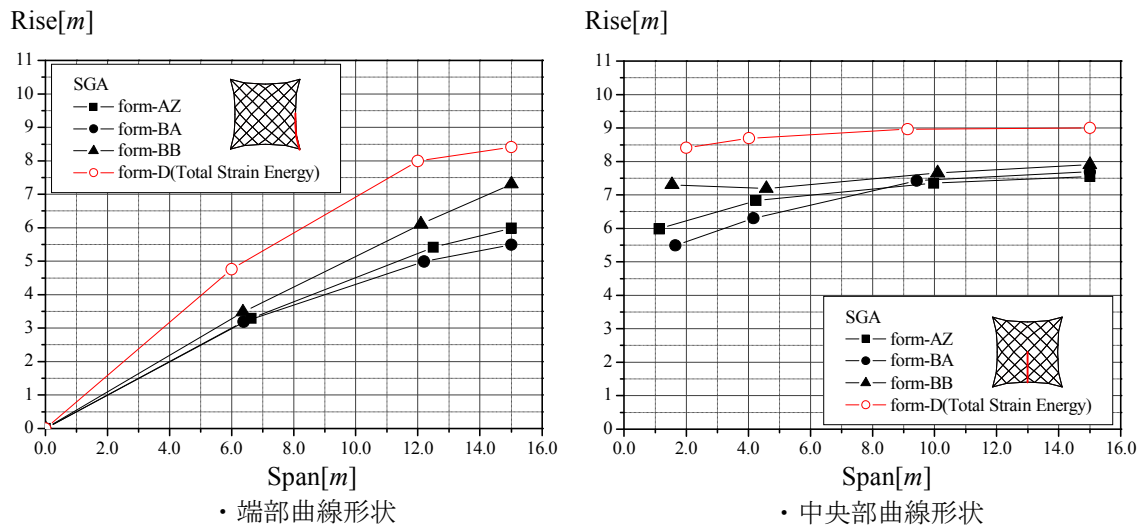
図6. 5 2 各交点における部材間の回転角の評価値



a. Case-F(x 軸回り回転角制約)



b. Case-G(y 軸回り回転角制約)



c. Case-H(z 軸回り回転角制約)

図 6. 53 稜線形状の比較

6. 2. 3. 5 考察

Model-A

図 6.36 より Case-F と比較し、Case-G, H は制約条件を満足する許容解を得るまで数百世代要する。最終世代の目的関数値も Case-G, H は Case-F と比較して高い。つまり、Case-G, H で設定された y, z 軸回転角の制約値を満足する解は目的関数空間上の力学合理性が低い範囲に多く存在している可能性が高い。なお、最も目的関数値の小さい form-AM (Case-F) の最終世代の目的関数値は $1.72 [kNm]$ であり、form-A の約 1.52 倍である。図 6.37, 39, 41 より得られた解形状は基本問題 2 同様に各々異なる曲面形状を示し、制約条件が曲面形状に影響していることが確認される。中でも、form-AK, AL, AM の曲面形状は form-A に最も近く、図 6.44a に示す中央形状のライズ比較より、form-A に近いライズを有しており、基本問題 2 にて確認されたライズの低い解形状に収束しやすい傾向も改善されている。図 6.38, 40, 42 に代表形状の力学性状を示す。各形状は総ひずみエネルギーを目的関数としているため、基本問題 2 で得られた各形状と比較して断面分布が部材応力に応じた断面サイズに最適化されている。特に、Case-F, G で得られた解形状(form-AK-AP)は軸力が全断面圧縮力となっている。また、form-AK-AM(Case-F), AQ-AS(Case-H)は曲げモーメントの値も form-A の値に近く、構造合理性が高く施工性も改善された曲面形状が得られている。

Model-B

図 6.45 より、Model-B においては Case-F, G は比較的許容解が得やすく、最終世代の目的関数もほぼ同じ値に収束する。これは、斜格子の方が部材数も少なく、得られる曲面の曲率方向に合理的に斜格子パターンが配置されていることが理由と考える。そのため、同じ荷重条件にも関わらず、総ひずみエネルギーの値は Model-A より約 1/10 小さい。反対に Case-G は許容解が得られにくく、最終世代の目的関数値も他のケースと比べて大きい。これは、 y 軸回り回転角制約は面外方向へフレームが曲率をもたないことから、1/4 形状が平面形状になりやすく、全体として面外方向の曲げモーメントが卓越する曲面形状が得られたと考える。なお、図 6.53b より曲面中央のライズ形状について form-AW-AY(Case-G)は直線となっている。力学性状については図 6.47, 49, 51 より Model-B も Model-A 同様に総ひずみエネルギーを目的関数とすることで、応力値は図 6.7 に示した form-D の力学性状に近づき、構造合理性と施工性の両方が考慮された曲面形状が得られている。

6. 2. 4 基礎問題4：部材間の回転角と総ひずみエネルギー最小化を目的関数とする鉄骨曲面シェルの多目的最適化

本項は製作性・施工性を考慮した構造形態創生問題として正方形平面を有する鉄骨格子シェルの多目的最適化問題に SPEA2 を適用する^[6,2]。本節は第2章7節で提案した製作性・施工性に関する評価指標を目的関数として設定し、部材間の回転角および総ひずみエネルギー最小化を行うことで、力学合理性と製作・施工性の高い解が得られることを示す。また、設計変数として位相情報であるテンソル積ベジエ曲面の u, v パラメータを扱い位相最適化を行うことで、理想曲面の近傍で最適化形状の解探索を行う。

6. 2. 4. 1 解析モデル(Model-C)

数値解析に用いる解析モデルを図 6.54 (Model-C) に示す。Model-C はスパン 30[m]、正方形平面を有する対称格子シェルモデルである。ここでは、初期形状の近傍で製作・施工性が改善された曲面形状を得ることを目的に、初期形状は総ひずみエネルギー最小化で得られた form-A の形状を用いる(図 6.54a)。境界条件は四隅をピン支持とする。なお、解析はモデルの対称性を考慮して 1/4 領域(節点数 36, 要素数 60)を扱う(図 6.54b)。曲面形状の表現はテンソル積ベジエ曲面を用いる。図 6.54b にベジエ曲面の制御点座標の配置を示す。制御点座標は 1/4 領域にて 4×4 の等分割配置とする。設計変数は形状と部材断面に関わるベジエ曲面の u, v パラメータと制御点座標とし、形状は u, v パラメータと制御点 Z 軸座標値、部材断面は Z 軸座標値を設計変数とする。図 6.54d において黒丸で示している部分が設計変数であり、形状を表現する制御点の境界部は支持点と一致することから設計変数から除く。したがって、設計変数の総数は対称性を考慮して 49(形状：39, 断面：10)であり 16x49bit の二進数でコード化する。回転角の評価グループは図 6.54e の通りである。なお、ここでは、モデル境界形状は Z 軸座標のみ設計変数となるため、回転角の評価グループから外す。載荷荷重は長期荷重として自重と等分布荷重 $w=1.0[kN/m^2]$ を作用させる。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8 [kN/m^2]$, せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7 [kN/m^2]$ とする。

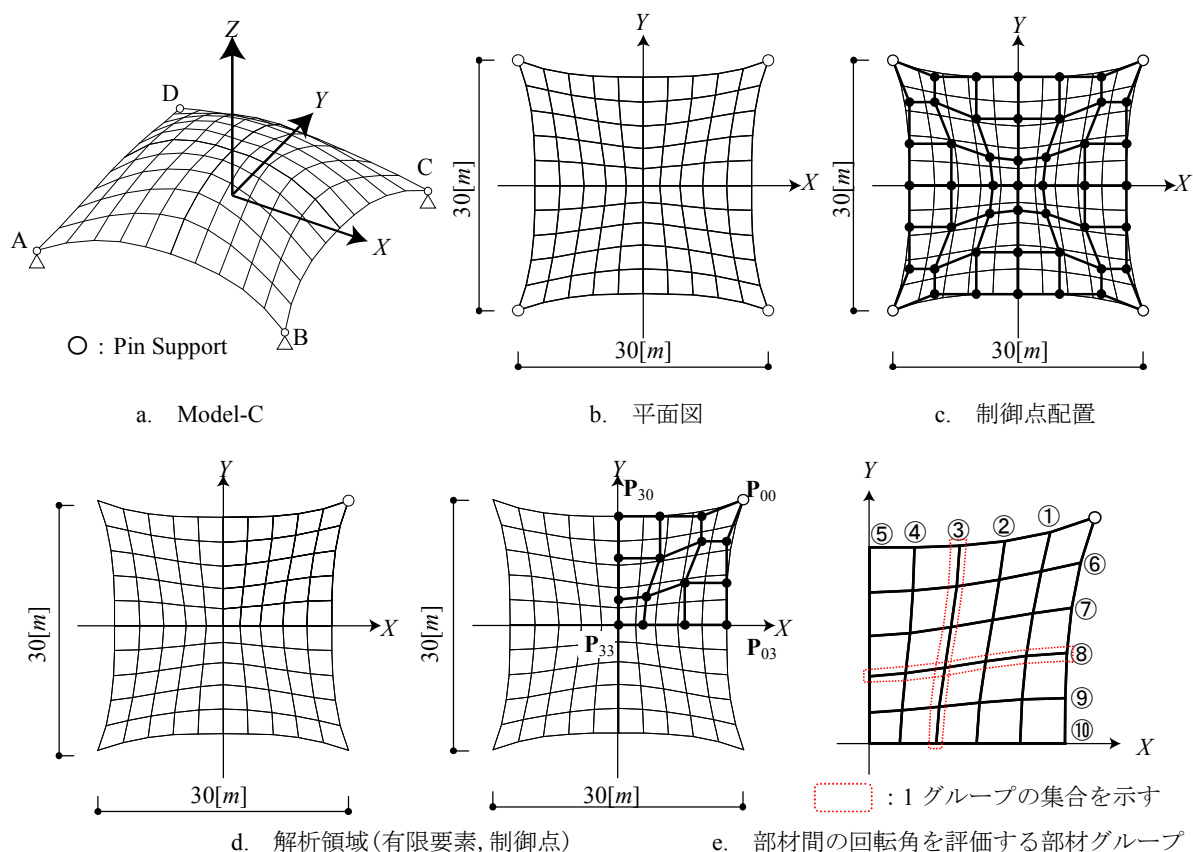


図 6. 5 4 解析モデル Model-C

6. 2. 4. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法はパレート最適解の解探索 GA 系解法である SPEA2 を用いる。解析パラメータを表 6.5 に示す。部材断面リストを表 6.2 と同様である。

表 6. 5 SPEA2 パラメータ

個体数	200	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 39 bit
世代数	50000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 10 bit
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.002	交叉方式	二点交叉
アーカイブ個体群	100	—	—

6. 2. 4. 3 数値結果 Model-C 部材間の回転角＋総ひずみエネルギー同時最小化

Model-C の部材間の回転角＋総ひずみエネルギー同時最小化を目標とした多目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find } \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.2.20)$$

$$\text{to minimize } f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = Q_i \quad (\text{部材間の回転角}) \quad (6.2.21a,b)$$

$$f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (\text{総ひずみエネルギー})$$

$$Q_1 = t_{x\max} \quad (\text{Case-I : } x \text{ 軸回りの回転角})$$

$$Q_2 = t_{z\max} \quad (\text{Case-J : } z \text{ 軸回りの回転角})$$

$$\text{subject to } \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.2.22a,b,c)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$l_j \geq l_{\min}$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U]$$

ここで、 \mathbf{d} : 節点変位ベクトル、 \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = 0.0, R_x^U = R_y^U = 1.0, R_z^L = -2.0[m], R_z^U = 2.0[m], A^L = 1.0, A^U = 7.0, \sigma_i$: i 要素の応力度、 σ_A : 許容応力度、 l_j : j 要素の部材長、 l_{\min} : 部材長さの下限值($l_{\min}=1.5[m]$)である。部材間の回転角に関する目的関数は x 軸回りの回転角を扱ったケース(Case-I)と z 軸回りの回転角を扱った(Case-J)2 ケースとする。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。また、ここではテンソル積ベジェ曲面の u, v パラメータを設計変数として扱うことから、部材長が極端に短くならない様、部材長制約を与える。したがって、得られる曲面形状の最大ライズは $11.0[m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 2.73$ である。

数値結果

解析結果を図 6.55－64 に示す。図 6.55, 60 は Case-I, J の各 3 回の試行における目的関数空間上にアーカイブ個体群内の解個体をプロットした図である。ここで図 6.55, 60 は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が部材間の回転角の評価値を示す。図 6.56, 57, 61, 62 は各試行において最終世代で得られたアーカイブ個体群の内 result-2 の代表形状の力学性状である。図 6.57, 62 は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。また、各要素の交点における部材間の回転角に関する式(2.7.12)－(2.7.14)の値を示した図を 6.58, 63 に示す。図 6.58, 63 は初期形状(form-A)との稜線形状の比較図である。

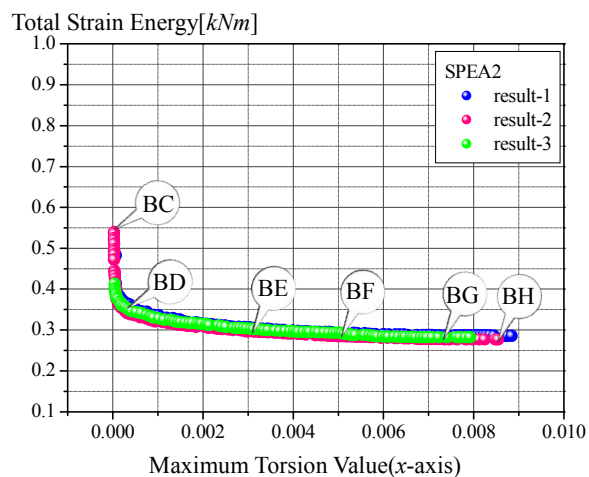


図6. 55 数値結果(目的関数空間) Case-I

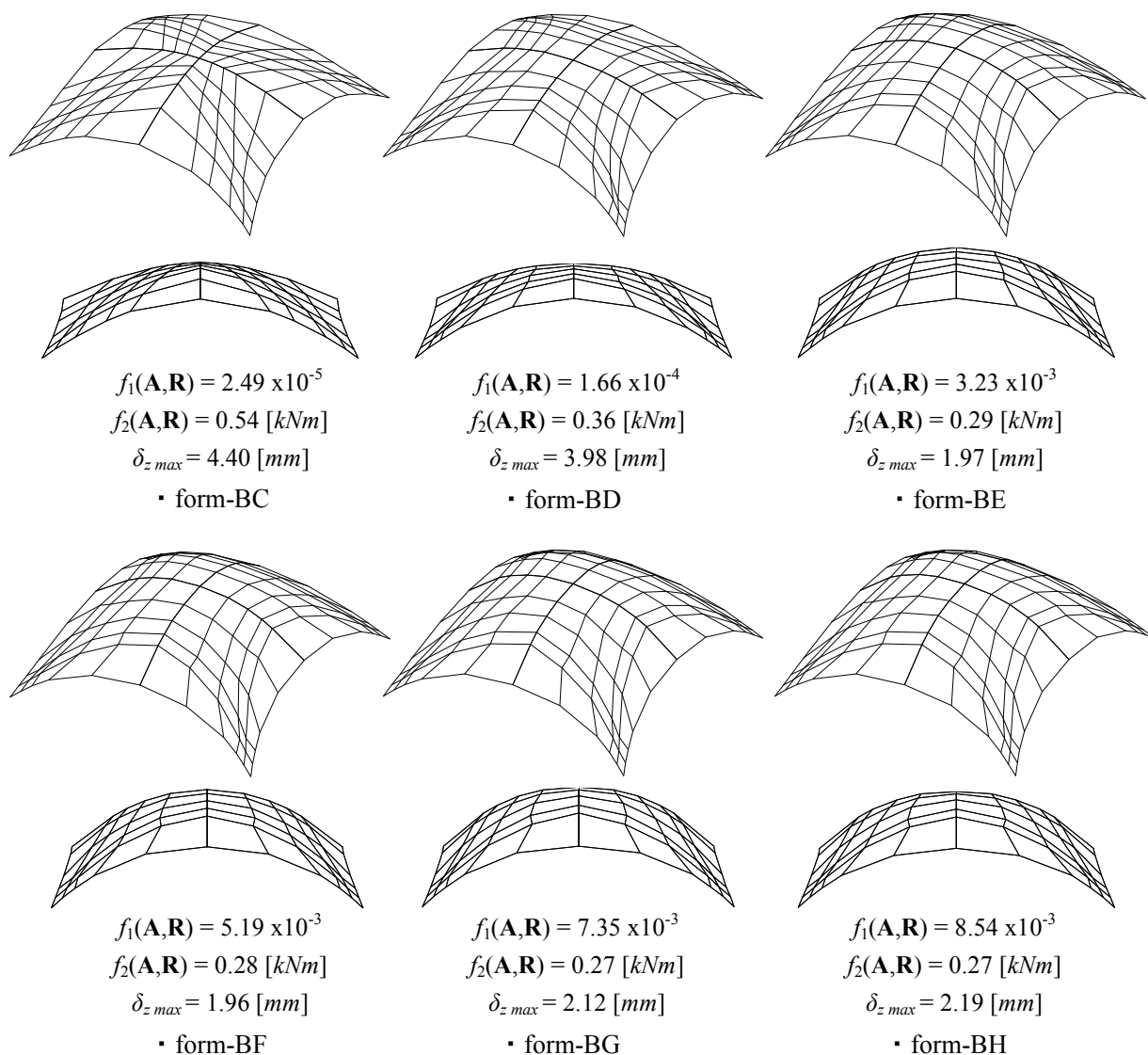


図6. 56 アーカイブ個体群内の解形状(result-2) Case-I

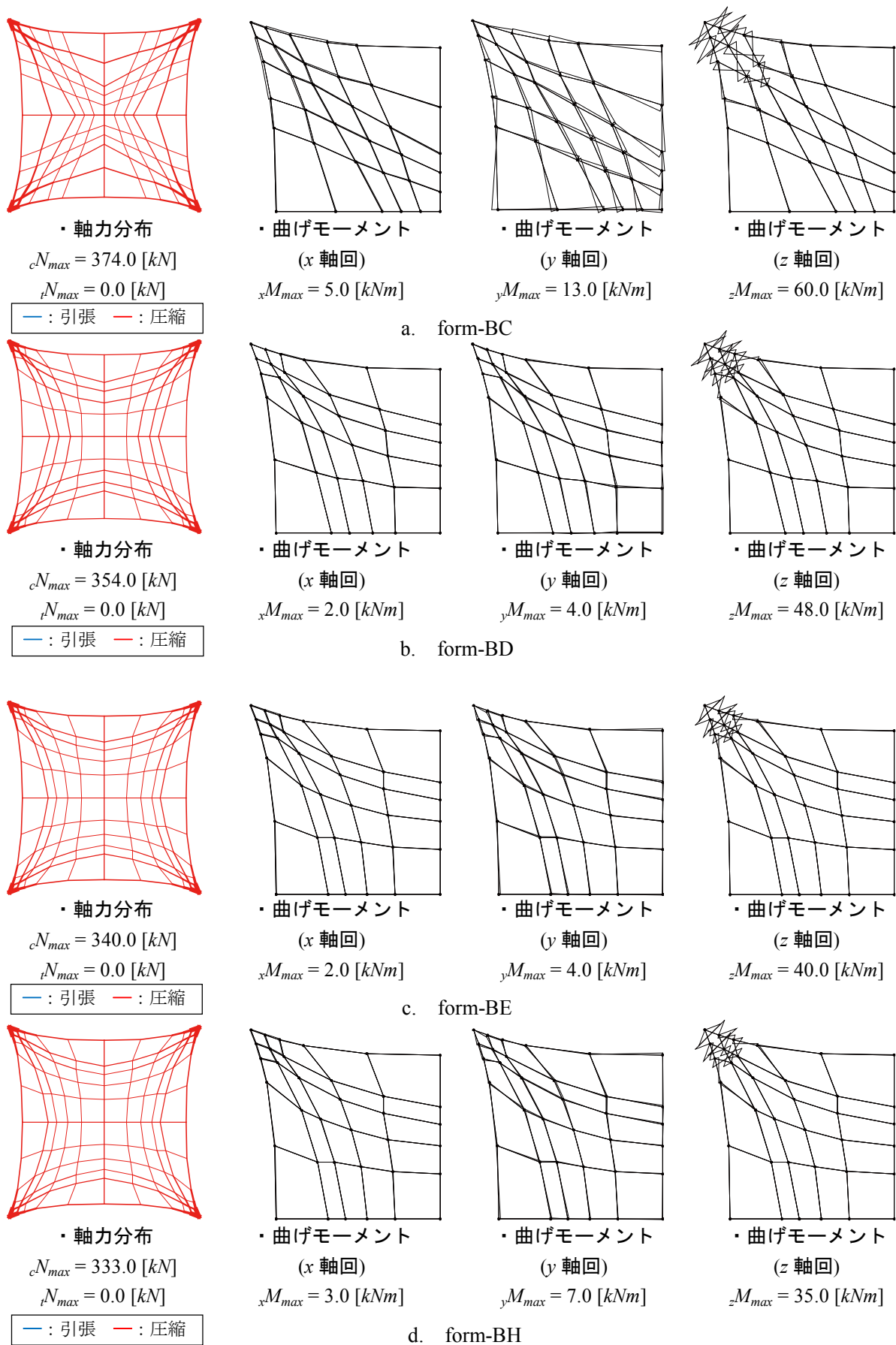
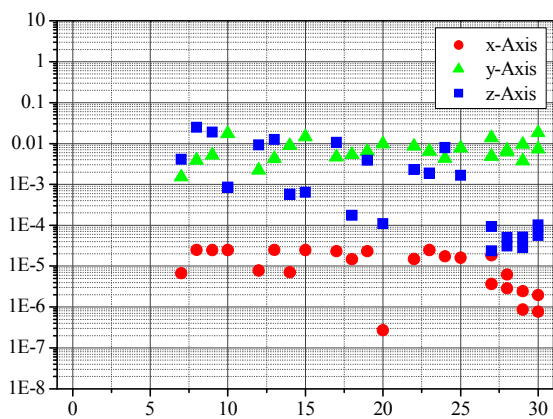


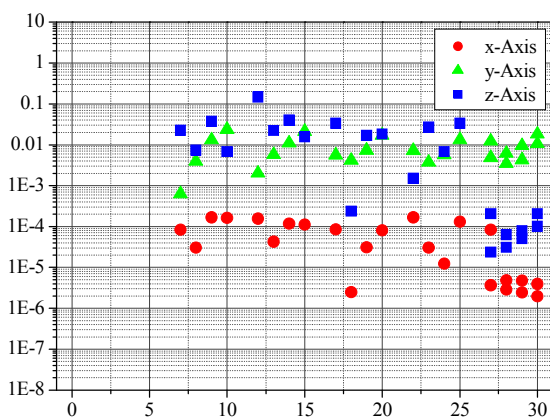
図6. 57 form-BC,BD,BE,BH の力学性状(result-2) Case-I

Torsion value



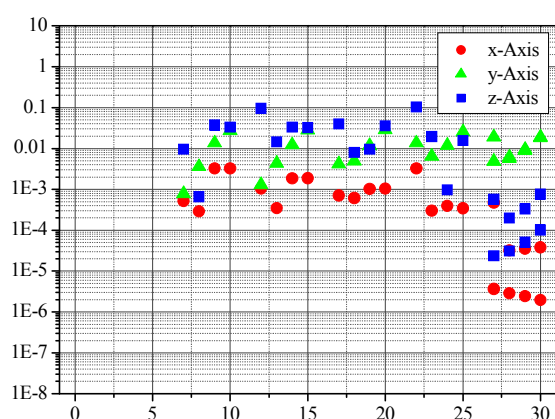
• form-BC の評価指標の値

Torsion value



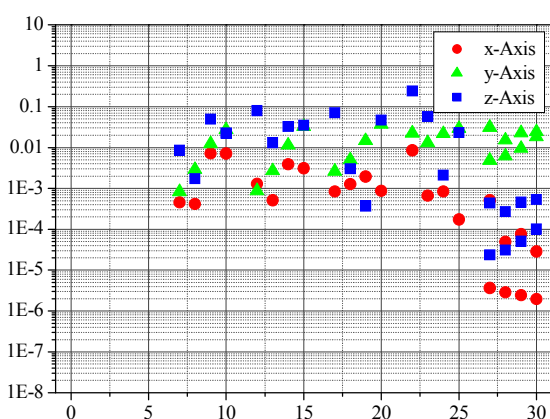
• form-BD の評価指標の値

Torsion value



• form-BE の評価指標の値

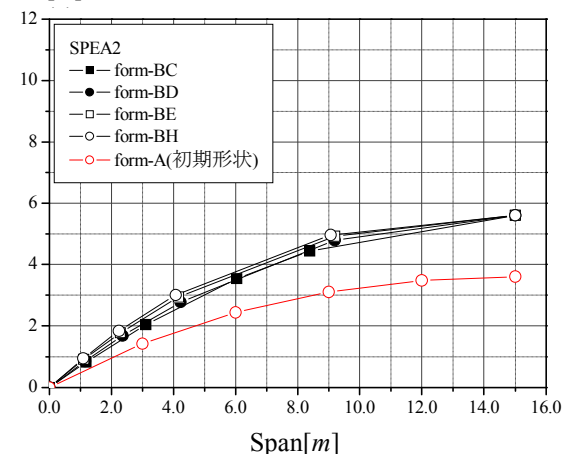
Torsion value



• form-BH の評価指標の値

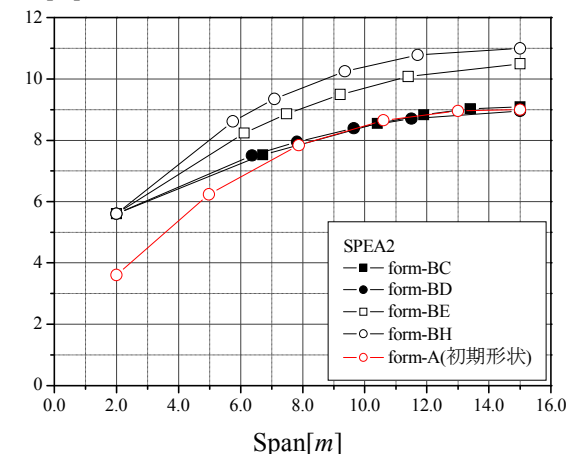
図6. 58 各交点における部材間の回転角の評価値 result-2 Case-I(x 軸回り回転角)

Rise[m]



• 端部曲線形状

Rise[m]



• 中央部曲線形状

図6. 59 稜線形状の比較 result-2 Case-I(x 軸回り回転角)

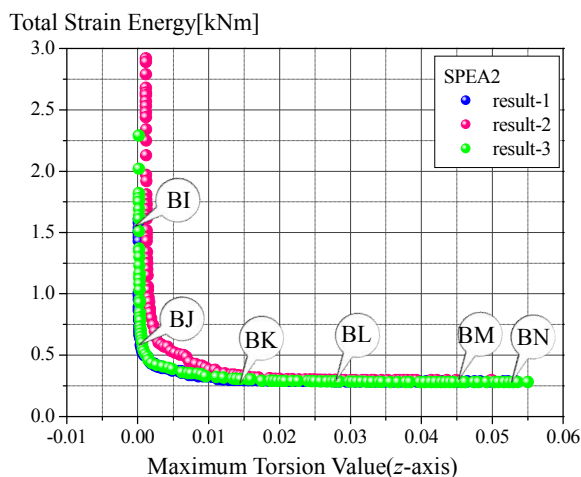


図6.60 数値結果(目的関数空間) Case-J

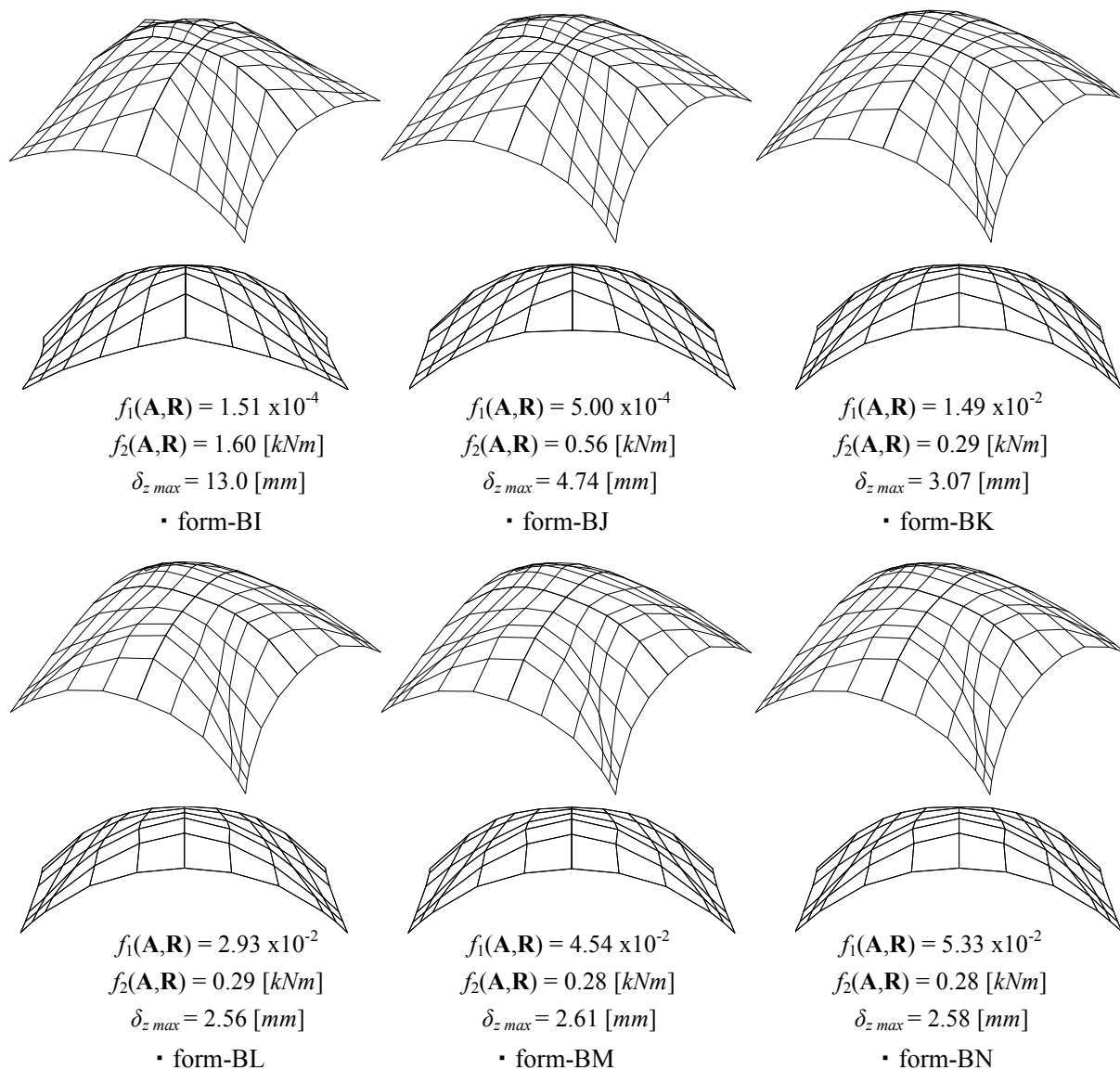


図6.61 解形状(result-1) Case-J

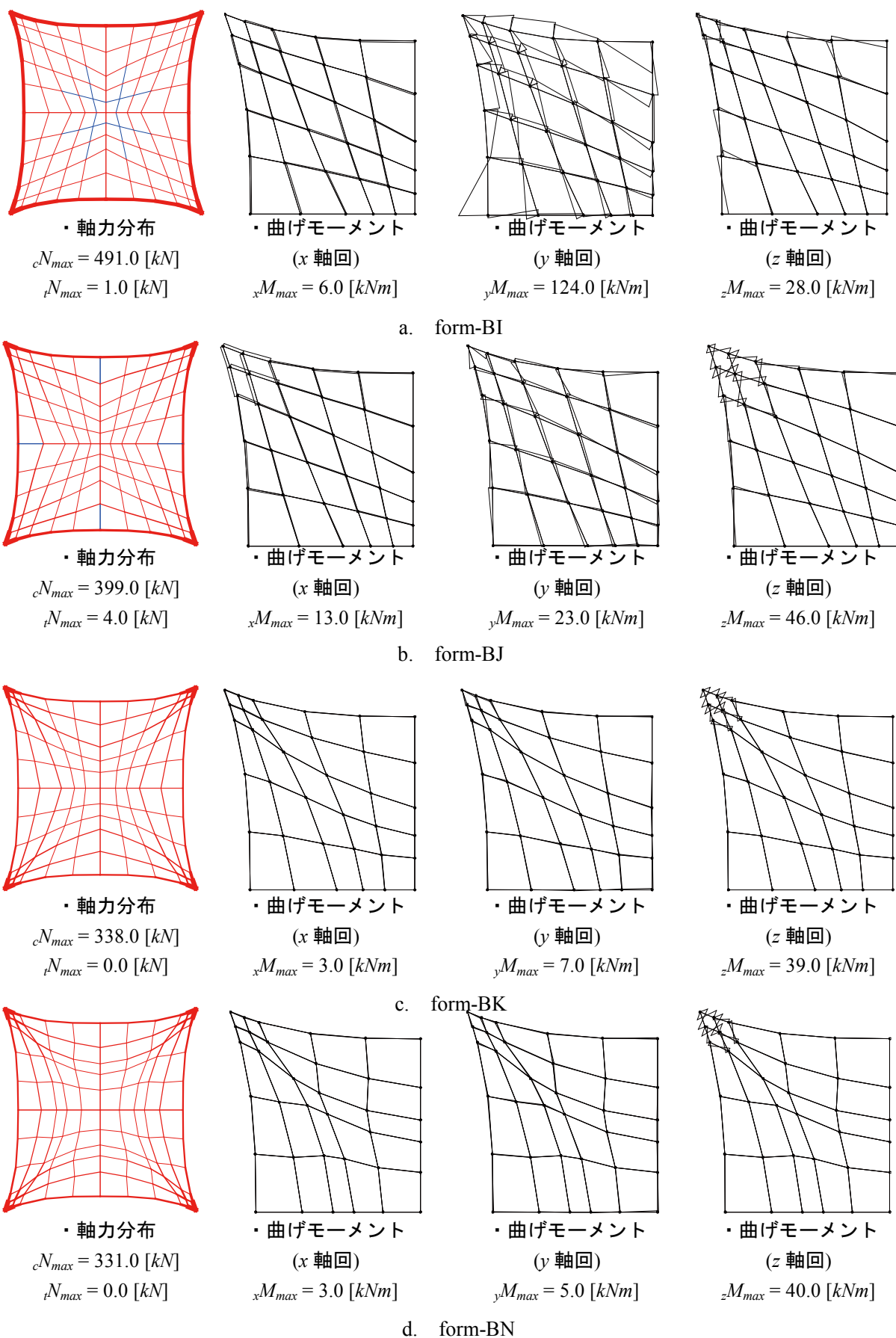


図6. 62 form-BI,BJ,BK,BN の力学性状(result-1) Case-J

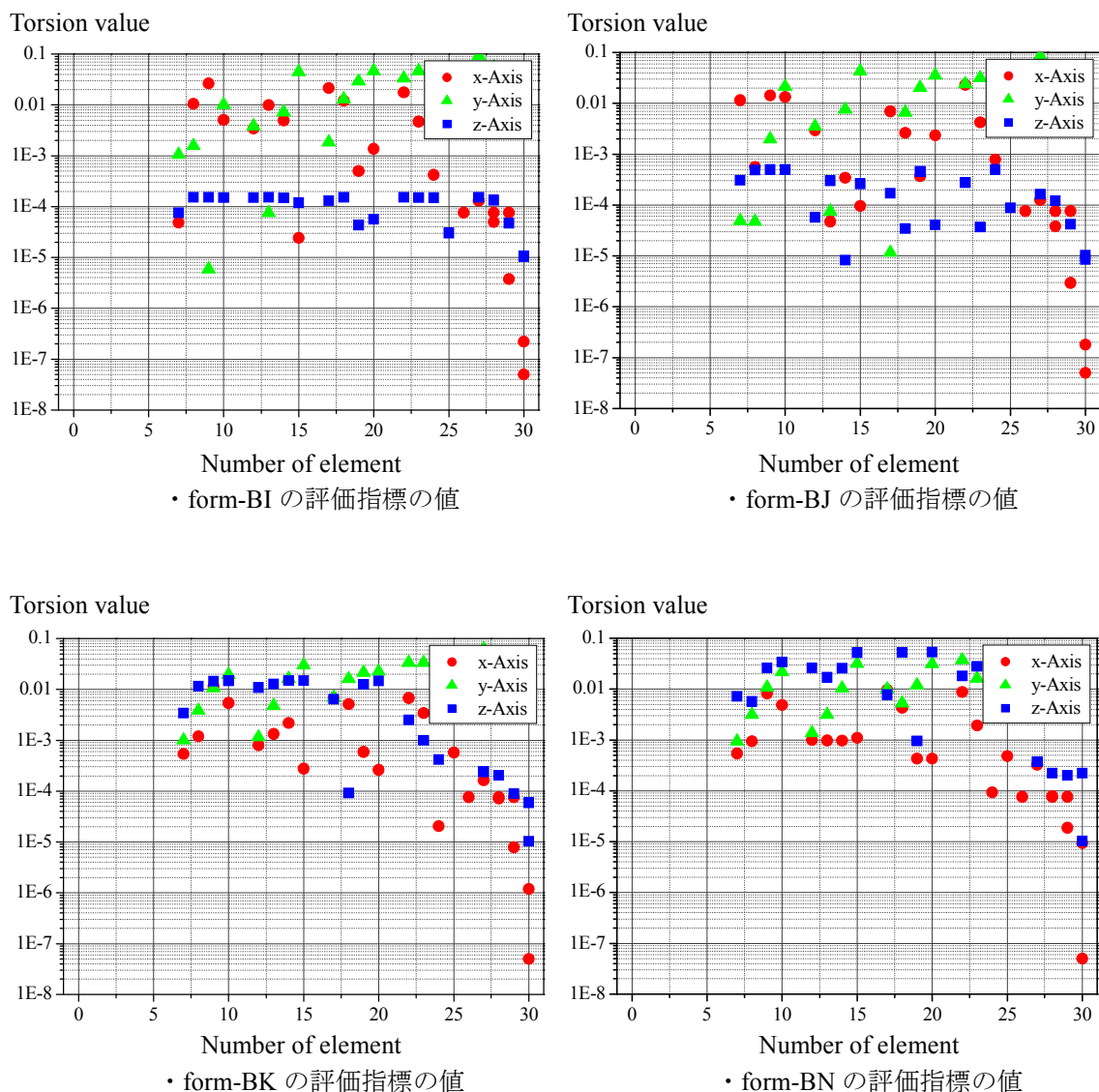


図 6. 6 3 各交点における部材間の回転角の評価値 result-1 Case-J(z 軸回り回転角)

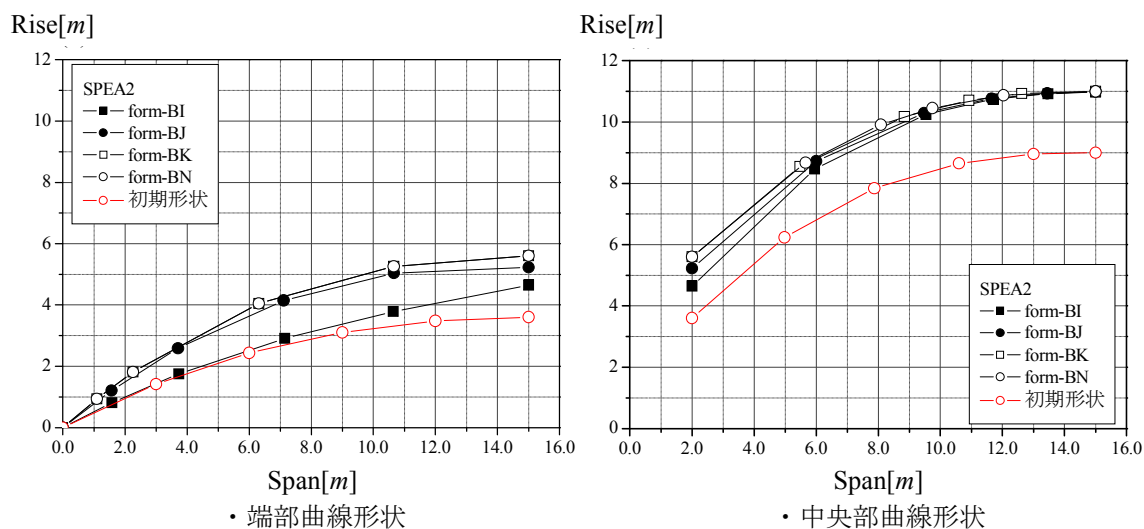


図 6. 6 4 稜線形状の比較 result-1 Case-J(z 軸回り回転角)

6. 2. 4. 4 考察

図 6.55, 60 より部材間の回転角に関する評価関数と総ひずみエネルギーはトレードオフの関係にあり、試行回数によらず目的関数空間上の同位置でパレートフロントが得られる。また、アーカイブ個体群内の全ての解は初期形状より両目的関数値が改善されている。初期形状よりライズの高い解が得られるような最適化問題の設定条件となっているため、剛性の高い形状が得られやすかったと考える。図 6.56 より Case-I で得られた解形状は部材間の回転角に関する評価指標値が小さくなるほど端部と中央部の z 軸座標値の差が小さくなる傾向がある。これは、連続する部材が直線的に配置される方が x 軸回りの回転角が最小化(ねじれを解消)されやすいためである。反対に、Case-J で得られた解形状は端部と中央部のライズ差が大きな形状となる。また、Case-I, J とともに支点部分に部材が集中する解形状が得られやすく、力の流れに沿って部材配置が最適化されている。図 6.57 より Case-I で得られた解の力学性状は軸力抵抗型の応力性状を示す。また、部材間の回転角の評価値が小さい form-BC, BD は面内方向の曲げモーメントが卓越し、総ひずみエネルギーの値が小さくなるにつれ、面内曲げモーメントの小さい解形状が得られている。Case-I は x 軸回り回転角の最小化であることから材軸方向のねじれを解消させるために部材の角度が急変する箇所があり、面内曲げが卓越しやすい形状となっている。一方 Case-J で得られた解の力学性状は図 6.62 より面外曲げモーメントが支配的であり、総ひずみエネルギーが小さい解につれて曲げモーメントが小さくなり、軸力分布も圧縮抵抗型に変化する。図 6.59, 64 より Case-I については曲面形状は回転角の評価値が小さい解ほど最大ライズが初期形状と一致し、総ひずみエネルギーの値が小さい解ほど、曲面の最高高さが側面制約条件の最大値となり曲面形状の様相が初期形状に近似する。反対に Case-J は得られた解の最大ライズはどの形状も側面制約の最大値を示し、端部形状の修正により部材間の回転角の改善を図っている。なお、Case-I, J と比較すると初期形状に最も近いイメージで曲面形状の最適化が行われているのは Case-J であった。

6. 2. 5 ロバスト性判定を活用した製作・施工性指標のロバスト性評価

6. 2. 5. 1 ロバスト性判定手順

本研究では構造形態創生で得られた解形状の構造安定性を検証する評価指標の一つとして第2章6節に示したロバスト性判定を実施する。ロバスト性判定を行う目的関数には力学指標を用いることとする。本研究は最適化問題にロバスト判定を組み込まないため、rank法によるロバスト性の高い解の判別を行わず、比較する解との相対評価によりロバスト性の高い解を決定する。その際に、ロバスト性判定を行う際にランダムに発生させた乱数個体に対し、制約条件の判定を行い、制約条件を満足しない乱数個体の個数をロバスト性評価の一判断指標として扱う。

以下にその判別手順を示す。

STEP1：比較個体を M 個選択する。

STEP2：ロバスト判定の乱数個体 N 、標準偏差 σ 、目的関数 \mathbf{f} 、外乱として与える設計変数 \mathbf{x} を設定する。

STEP3：個体 $M_i (i = 1, 2, 3, \dots, M)$ に対し、乱数個体を N 個発生させる。

STEP4：乱数個体 $N_j (j = 1, 2, 3, \dots, N)$ に対し制約条件の判定を行う。

STEP5：乱数個体 N_j に対し、ロバスト判定値を計算する。

STEP6：STEP3~5を M 回繰り返してロバスト判定値 μ および、制約条件を満足しなかった乱数個体の総数を制約条件 k に対するペナルティ値 P_k として算出する。

STEP7：ロバスト判定値 μ およびペナルティ値 P_k を基にロバスト性の高い解を相対的に決定する。

ロバスト判定に用いる乱数個体 N 、標準偏差 σ は文献[2.5]を参考に表6.6のように設定する。

表 6. 6 ロバスト判定解析パラメータ

乱数発生個体 N	2000
標準偏差 σ	0.3

6. 2. 5. 2 数値例題 1

ロバスト性判定の数値例題として基本問題2のCase-A: x 軸回りの回転角最小化で得られた5つの解形状を基にロバスト性判定を行う。ロバスト性判定に用いる各設定は以下とする。

設定条件

目的関数：総ひずみエネルギー

設計変数：各節点の Z 軸座標値

変動量の最大値：部材長の 1.5/1000

また、乱数個体に対する制約条件の評価として以下の制約条件を与える。

$$\begin{aligned} \text{subject to } \quad & \sigma_i \leq \sigma^L \\ & t_{x\max} \leq \bar{t}_{x2} \end{aligned} \quad (6.2.23a,b)$$

ここで、 σ^L ：長期許容応力度、 $t_{x\max}$ ： x 軸回りの回転角評価値の最大値、 \bar{t}_{x2} ： x 軸回り回転角の限界許容値を示す。図 6.65 に評価を行う解形状と総ひずみエネルギーの値 f_e と x 軸回り回転角評価値の最大値を示す。

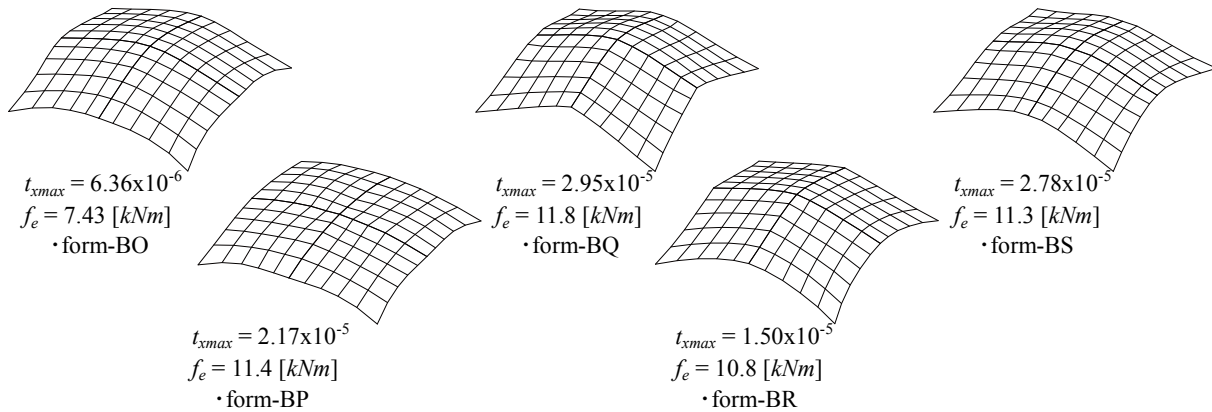


図 6. 6 5 比較個体(5 個体)

解析結果を図 6.66 に示す図 6.66a は各個体のロバスト判定結果を示す。横軸に個体名、縦軸にロバスト判定値 μ とペナルティ値 P_k を示す。比較のため図 6.66b,c に縦軸にロバスト判定値 μ と総ひずみエネルギーを取った図と x 軸回り回転角の評価値の最大値をとった図を示す。

図 6.66b より、 μ は各個体で異なる値を示し、総ひずみエネルギーの値が小さい解ほど μ が小さな値を示す。ペナルティ値 P_k に着目した場合、図 6.66a より全ての個体は許容応力度に関する制約条件を満足するが($P_k=0$)、回転角に関する制約条件を満足しない解も存在する。回転角に対するペナルティ値は t_{xmax} の値が大きい解ほど大きな値を示す。図 6.66a より form-BO, BR はロバスト回転角に対するペナルティが最も小さい。特に、form-BO は μ の値も最も小さい。以上の比較より比較 5 個体の中で最もロバスト性の高い解は form-BO と判断する。

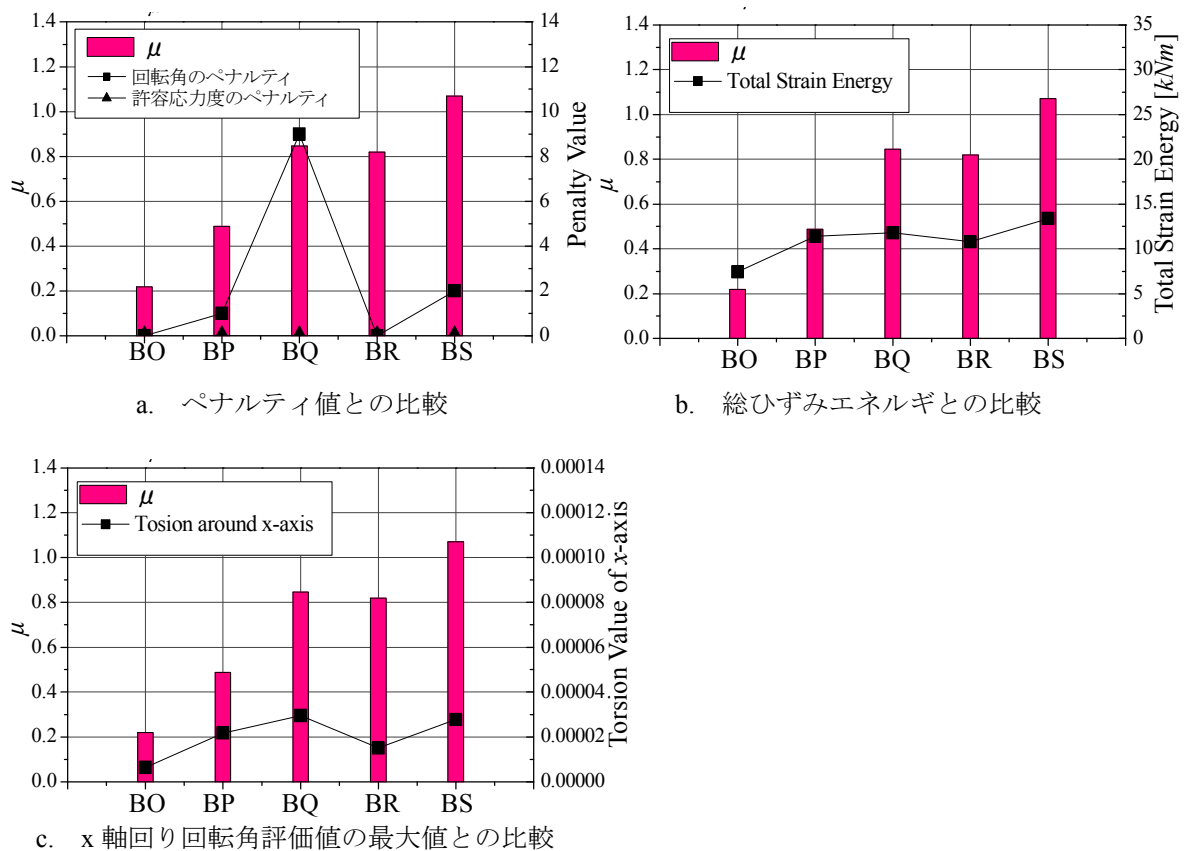


図 6. 66 ロバスト判定値

6. 2. 5. 3 数値例題 2

ロバスト性判定の数値例題として基本問題 3 の Case-F : x 軸回りの回転角制約で得られた 5 つの解形状を基にロバスト性判定を行う。ロバスト性判定に用いる各設定は以下とする。

設定条件

目的関数：総ひずみエネルギー
 設計変数：各節点の Z 軸座標値
 変動量の最大値：部材長の 1.5/1000

また、乱数個体に対する制約条件の評価として以下の制約条件を与える。

$$\begin{aligned} \text{subject to } \quad & \sigma_i \leq \sigma^L \\ & t_{x\max} \leq \bar{t}_{x2} \end{aligned} \quad (6.2.24a,b)$$

ここで、 σ^L ：長期許容応力度、 $t_{x\max}$ ： x 軸回りの回転角評価値の最大値、 \bar{t}_{x2} ： x 軸回り回転角の限界許容値を示す。図 6.67 に評価を行う解形状と総ひずみエネルギーの値 f_e と x 軸回り回転角評価値の最大値を示す。

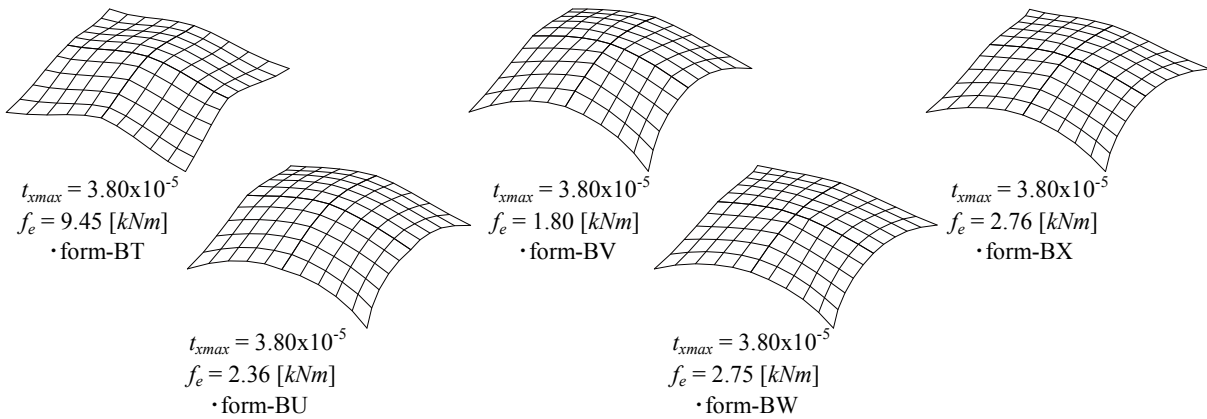


図 6. 6 7 比較個体(5 個体)

解析結果を図 6.68 に示す図 6.68a は各個体のロバスト判定結果を示す。横軸に個体名、縦軸にロバスト判定値 μ とペナルティ値 P_k を示す。比較のため図 6.69b,c に縦軸にロバスト判定値 μ と総ひずみエネルギーを取った図と x 軸回り回転角の評価値の最大値をとった図を示す。

図 6.68b より、 μ は各個体で異なる値を示し、総ひずみエネルギーの値が小さい解(form-BU, BV, BW)ほど μ は小さな値を示す。ただし、form-BX は総ひずみエネルギーの値は小さいが、 μ の値は 5 個体の中で最大を示す。ペナルティ値に着目した場合、全ての個体は許容応力度に関する制約条件を満足する($P_k=0$)。一方、回転角に関する制約条件はすべての個体で満足しない乱数個体が存在している。比較した 5 個体は t_{xmax} が同値であるが、図 6.68c より form-BV はロバスト回転角に対するペナルティが最も小さい。以上の比較より比較 5 個体の中で最もロバスト性の高い解は form-BV と判断する。

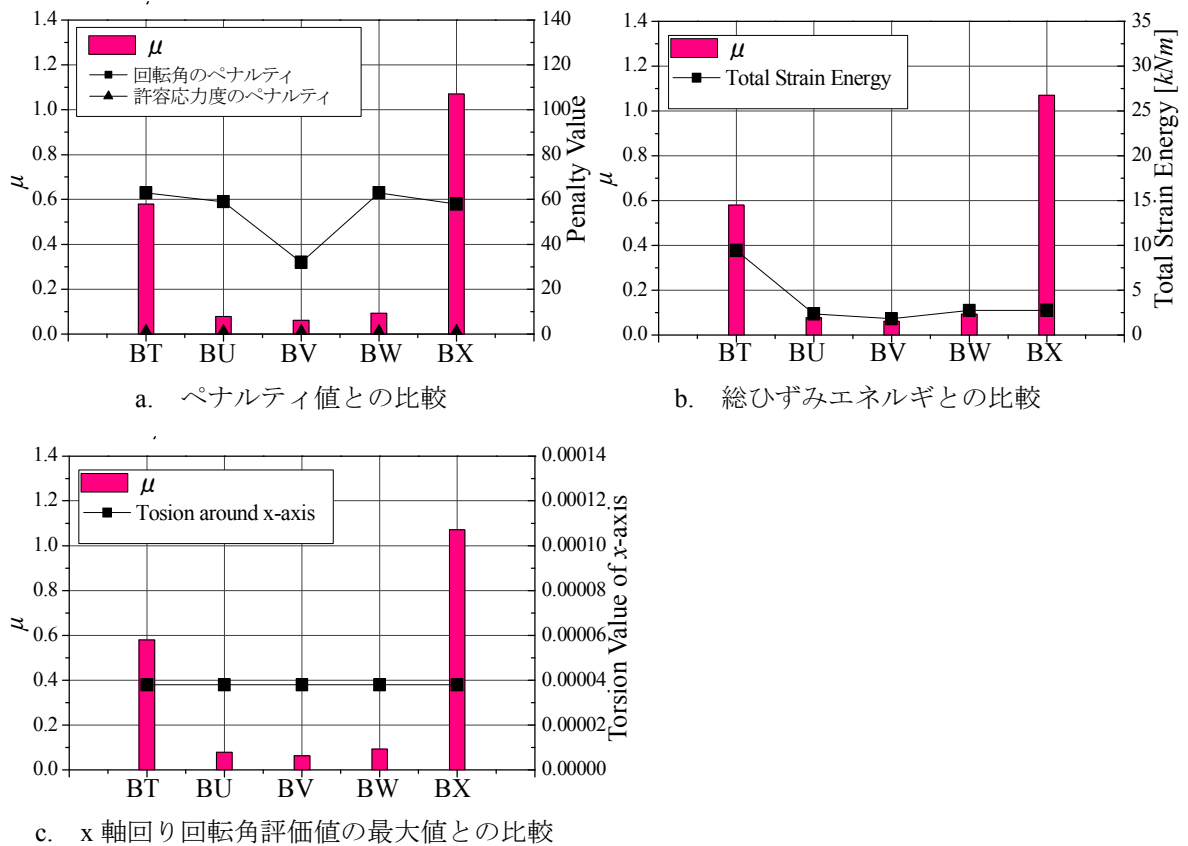
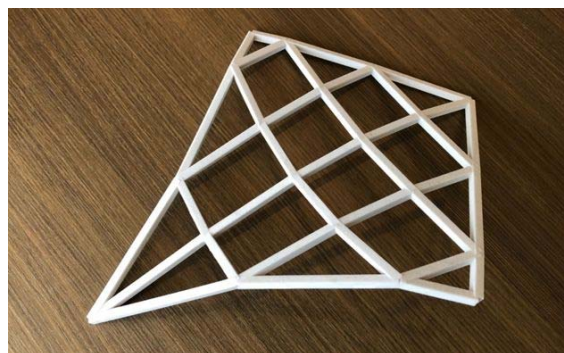
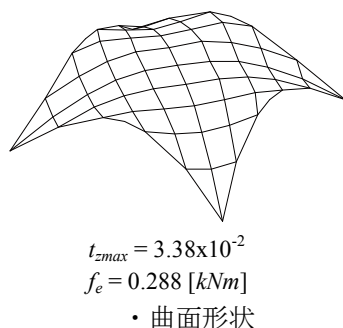


図 6. 68 ロバスト判定値

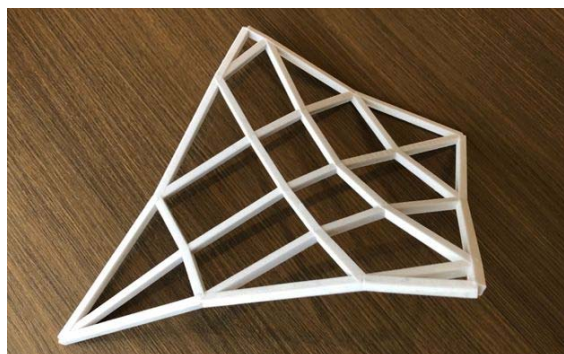
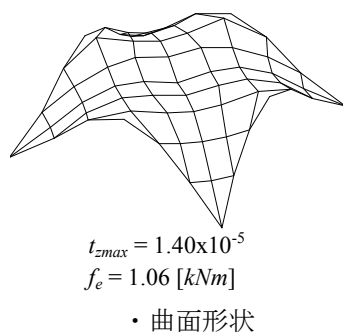
6. 2. 6 模型による曲面形状の定性的確認

本評価指標により得られた解形状の特徴を定性的に確認することを目的に、模型を作成して得られた曲面形状の回転角の評価を行う。評価を行う解は基本問題1で得られた form-D と基本問題4・Case-Cで得られた斜格子シェルの曲面形状である。図6.69に比較個体の解形状と作成した3Dプリンタによる模型を示す。比較する2個体は t_{zmax} の値が500倍異なる。

解形状の確認は1本の幅5[mm]を有する直線状の紙テープにて確認した。 z 軸回り回転角が最小化された解は格子を構成する一本の部材がねじれおよび曲面面外の曲率のみ有しているため、直線状の紙テープが部材に沿って重ねることができる。つまり平面展開可能な測地線による格子形状となる。検証の結果、図6.70に示すように form-A は z 軸回りの回転角も有しているため、直線状の紙テープが重なることは不可能であるが、 z 軸回り回転角最小化で得られた形状は回転角評価しているすべてのフレームが紙テープときれいに重なる。つまり、 z 軸回り回転角最小化で得られた曲面形状は構成フレームを全て平面展開可能であり、2次元のフレーム図による製作図の作成が可能となる(図6.71)。なお、今回の比較形状はねじれを考慮していないため、実際には部材が材軸方向にねじれており、実際の製作図作成の際はねじれを考慮した製作図を作成する必要がある。この問題点については、 x , z 軸回り回転角の同時最小化問題により得られた解形状にて解消可能である。

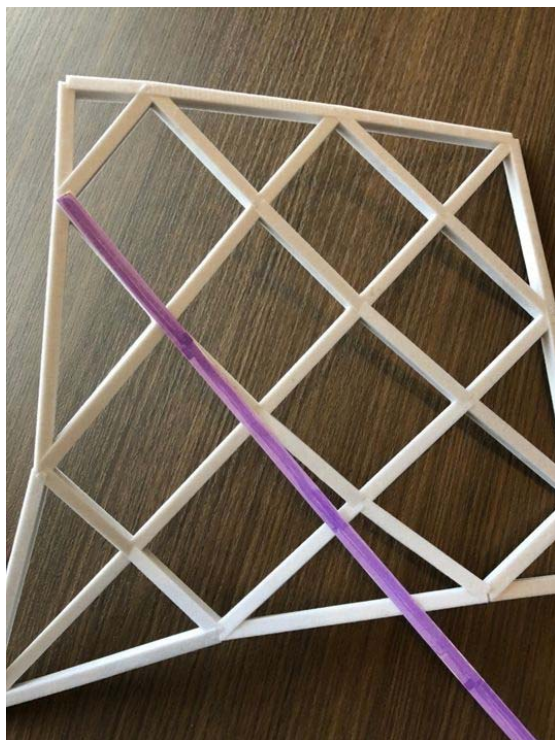


a. form-D

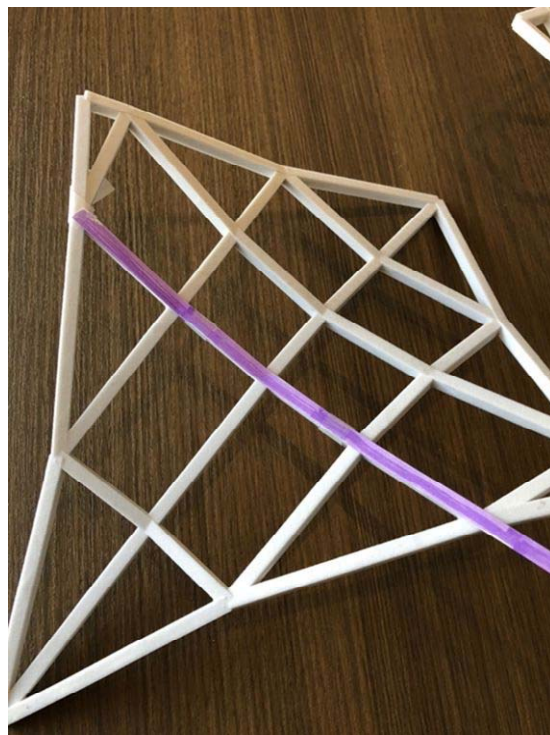


b. z 軸回り回転角最小化で得られた曲面形状

図6. 69 比較形状と製作模型



a. form-D



b. z 軸回り回転角最小化で得られた曲面形状

図6. 70 紙テープによる定性的な検証

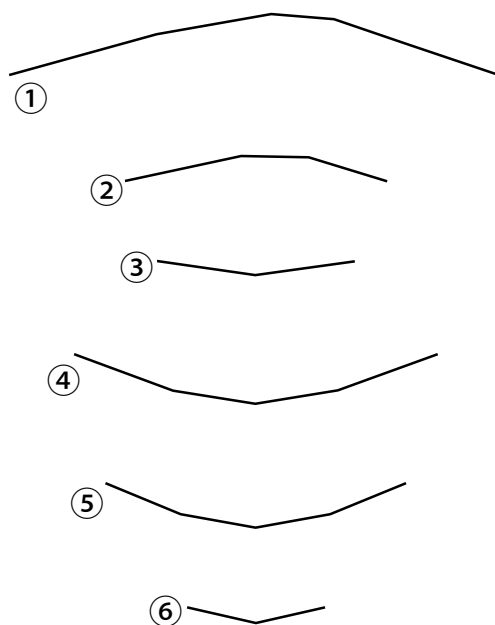
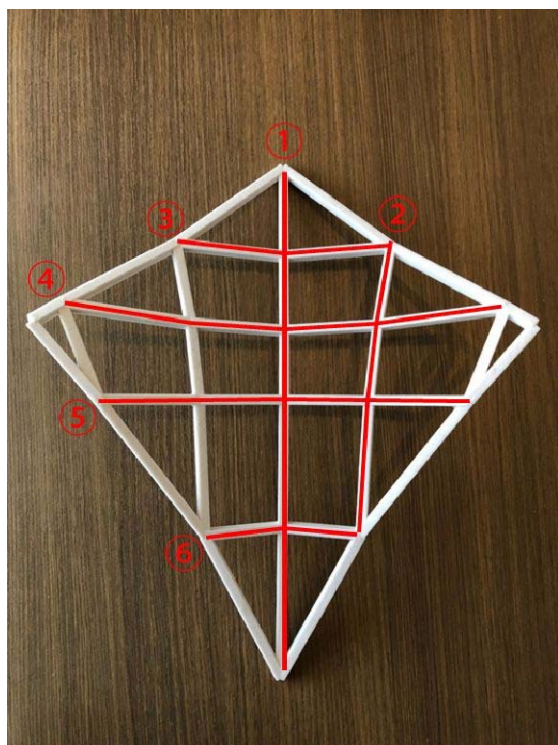


図6. 71 単線による構成部材の平面展開図

6. 3 任意形状モデルへの適用と最適設計

本節は屋内球技場を想定した任意平面を有する大屋根架構の構造設計において最適設計を適し、本手法が空間構造の形状決定に活用できることを示す。対象建物を図 6.72 に示す。対象建物は $45[m] \times 40[m]$ のアリーナ空間を有する屋内球技場とし、ラーメンフレームで構成されたアリーナ空間を覆うような屋根形状を想定する(図 6.72a)。屋根形状は平面形状が 6 角形形状を有し、Y 軸を基準とした鏡面对称形状である(図 6.72c)。平面寸法は長辺方向最大 $100[m]$ 、短辺方向最大 $66.6[m]$ であり、頂点 A, C, D はグラウンドレベルを支点とする(図 6.72b)。屋根フレームは $3[m] \times 3[m]$ を基準とした直交格子フレームであり、面内剛性を高めるために屋根境界部とアリーナ空間の外壁ラインに沿って面内ブレースを計画している。

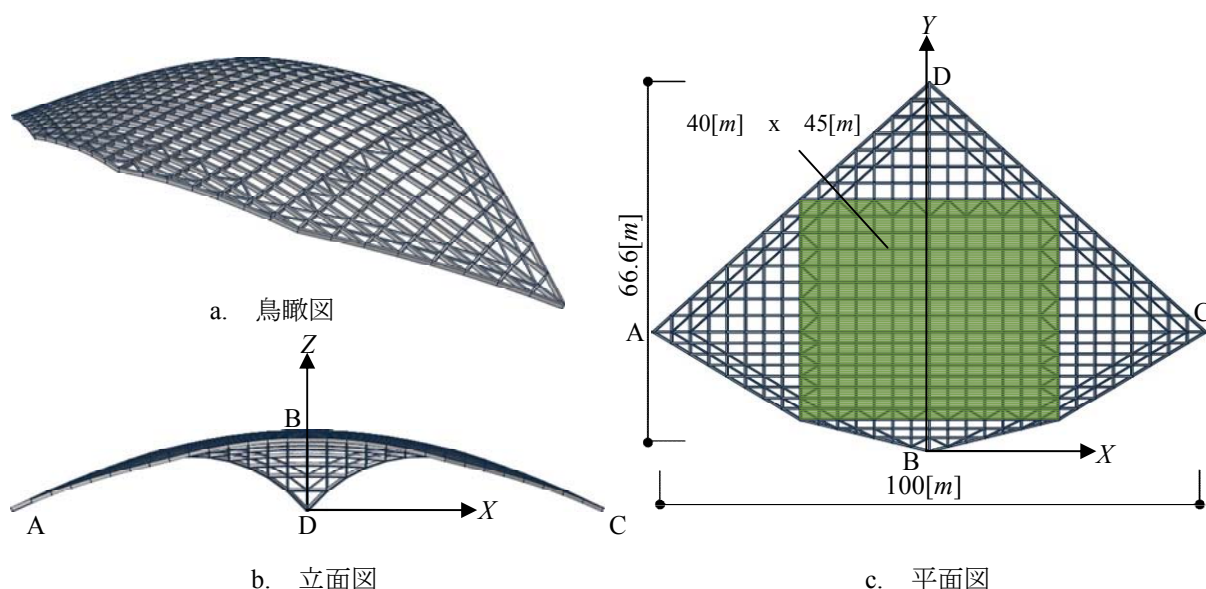


図 6. 7 2 屋根架構概要

6. 3. 1 最適化の目的と各設計条件の設定

構造形態創生に用いる最適化手法には、目的関数空間上での解の評価に重点を置くことを目的に単一目的最適化の解探索手法はSGAを、多目的最適化の解探索手法はSPEA2を採用する。大屋根架構に要求される条件は耐力・剛性・構造安定性・製作性・施工性等多岐にわたる。これらの全ての項目において性能の高い曲面形状を得ることを目的に最適設計を活用する。以下に最適設計の定式化を説明する。

6. 3. 1. 1 目的関数と設計変数の設定

本節は上記に示した耐力・剛性・構造安定性・製作・施工性に関する評価指標を満足した構造形態を得ることを目的に構造形態創生法を活用する。構造形態創生ではまず、空間構造にとって重要となる剛性の高い曲面形状を得ることを目的に総ひずみエネルギーを目的関数として設定した構造形態創生を行い、最適設計を進める方針とする。

設計変数は多様な曲面形状を探索することを目的に形状および部材断面とする。

6. 3. 1. 2 設計外力の設定

最適設計にて扱う外力は長期荷重・積雪荷重・地震荷重(X, Y 方向)とする。表6.7, 8に扱う各荷重設定と組み合わせ荷重ケースを示す。構造形態創生に用いる荷重条件は全ての荷重ケースを扱った場合多大な計算時間を要することからも荷重ケースはクリティカルとなる1ケースのみ構造形態創生の中では扱い、解の二次評価にて対象とする荷重ケースに対する安全性を確認する。その際に、支配的となる荷重ケースが変化した場合は、支配的となる荷重ケースを構造形態創生にて扱う荷重ケースとして、再度構造形態創生を行う。

表 6. 7 設定荷重

設定荷重	設定条件
長期荷重(L)	DL 自重+仕上げ荷重 $1.0[kN/m^2]$
	LL 0 $[kN/m^2]$
	TL $DL+LL = 1.0[kN/m^2]$
積雪荷重(SL)	単位積雪荷重 $0.02[kN/m^2/cm]$
	垂直積雪深 $0.2[m]$
	荷重割り増し係数 $\alpha = 1.1$
	積雪荷重 $= 0.02 \times 0.02 \times 1.1 = 0.44 [kN/m^2]$
地震荷重(EX, EY)	水平震度 $K = 0.2$

表 6. 8 荷重ケース

荷重条件	組み合わせケース
長期	L
短期	L+SL
	L+EX
	L+EY

6. 3. 1. 3 解の二次評価

最適設計を適用するにあたり、構造形態創生で得られた解の二次評価指標を設定する。設定した二次評価指標を表 6.9 に示す。最適設計では解の二次評価を行い、その中で評価の低い項目を構造形態創生の目的関数，制約条件，荷重条件に反映し、構造形態創生と解の二次評価を繰り返すことで、設計条件の全てを満足する形態を探索する。

表 6. 9 解の二次評価指標

項目	評価内容
耐力	許容応力度設計
剛性	総ひずみエネルギー
製作・施工性	回転角指標の評価
構造安定性 1	線形座屈解析
構造安定性 2	ロバスト判定解析

6. 3. 2 構造形態創生アルゴリズム

以上の条件を基にした最適設計フローを図 6.73 に示す。

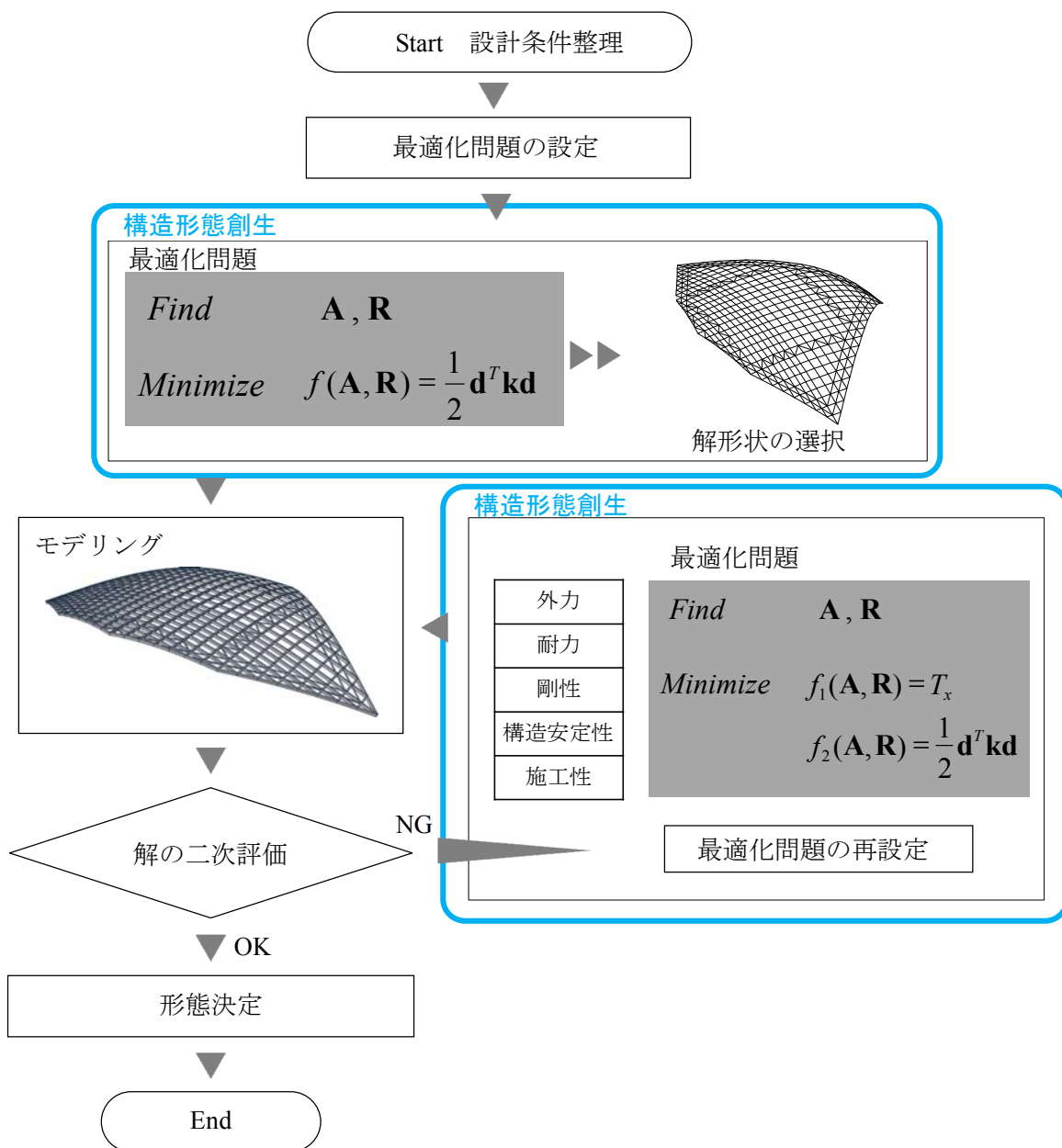


図 6. 7 3 最適設計フロー

6. 3. 3 最適設計

6. 3. 3. 1 解析モデル(Model-D)

図 6.74 に解析モデルの初期形状を示す。Model-D は長辺最大 100[m]，短辺最大 66.6[m]の Y 軸を基準とする鏡面对称を有する格子シェルモデル(節点数:459,要素数:1054)である(図 6.74a)。境界条件は図 6.74a に示す A, C, D をピン支持とし、アリーナ下部構造を想定した範囲の四隅は下部構造へ接続することを想定しローラー支持とする。図 6.74b に設計変数である制御点座標の配置を示す。設計変数は形状と部材断面に関わる制御点座標とし、Z 軸座標値を設計変数とする。なお、初期形状の制御点座標は形状・断面ともに $x_{ij}=0.0[m]$, $y_{ij}=0.0[m]$ である。制御点座標は平面形状を包絡するように 100[m]x66.6[m]を 6 分割に等分割配置する。図 6.74b において黒丸で示している部分が設計変数であり、形状を表現する制御点の境界点は支持点と一致することから設計変数から除く。したがって、設計変数の総数は鏡面对称性を考慮して 46(形状：18,断面：28)であり 16x46bit の二進数でコード化する。部材間の回転角を評価する部材グループは形状の鏡面对称性を考慮した図 6.74c に示す設定とする。載荷荷重は長期荷重として自重と等分布荷重 $w=1.0[kN/m^2]$ を作用させる。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8[kN/m^2]$,せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7[kN/m^2]$ とする。

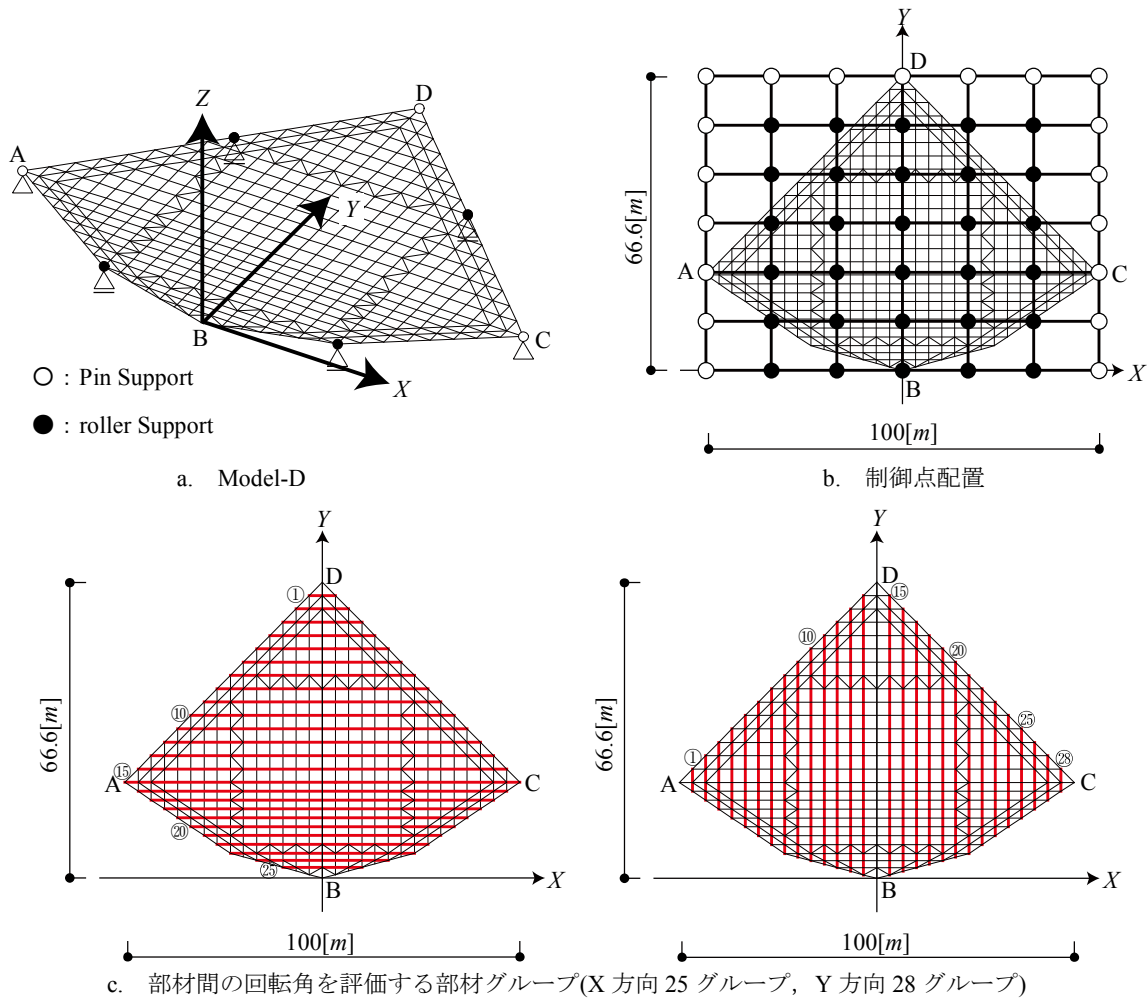


図 6. 7 4 解析モデル Model-D

6. 3. 3. 2 解析パラメータ

最適化に用いる解探索手法はGA系解法SGAを用いる。解析パラメータを表6.10に示す。また、鉄骨造の構造形態創生では部材断面をリスト化してパラメトリック曲面の諸量と対応させる。ここで用いる部材断面リストを表6.11に示す。

表 6. 1 0 SGA パラメータ

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 18 <i>bit</i>
世代数	5000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 28 <i>bit</i>
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.001	交叉方式	二点交叉

表 6. 1 1 部材断面リスト(SN490B)

番 号	断面サイズ	番 号	断面サイズ
1	H-488x300x10x18	7	BH-500x350x22x32
2	H-500x300x11x18	8	BH-500x350x22x36
3	H-500x300x16x25	9	BH-500x400x22x32
4	H-500x300x16x28	1 0	BH-500x400x22x36
5	H-500x300x16x32	1 1	BH-500x500x22x32
6	BH-500x350x22x28	1 2	BH-500x500x22x36

なお、第2章に示す式(2.7.18)の制約値は部材長さとして設定した部材リストの最大梁成より以下の値となる。

$$\begin{aligned}
 &\text{部材条件} \quad H=500[mm] \quad l=6000[mm] \\
 &\text{制約値} \quad \bar{t}_{x1} = 4.05 \times 10^{-5} \quad \bar{t}_{x2} = 8.09 \times 10^{-5} \\
 &\quad \quad \bar{t}_{y1} = 7.1 \times 10^{-6} \quad \bar{t}_{y2} = 1.6 \times 10^{-5} \\
 &\quad \quad \bar{t}_{z1} = 7.1 \times 10^{-6} \quad \bar{t}_{z2} = 1.6 \times 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{6.3.1a,b,c}$$

6. 3. 3. 3 数値結果 1 総ひずみエネルギー最小化

数値結果 1 は Model-D の総ひずみエネルギー最小化を目標とした単一目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.3.2)$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (6.3.3)$$

$$\text{subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma^L \quad (6.3.4a, b)$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{1054}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{1054}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_z^U]$$

ここで、 \mathbf{A} : 部材断面ベクトル, \mathbf{R} : 節点座標ベクトル, \mathbf{d} : 節点変位ベクトル, \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス, $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_z^L = 0.0[m]$, $R_z^U = 15.0[m]$, $A^L = 1.0$, $A^U = 7.0$ である。応力制約は SN490B を想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $15.0[m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1 : 6.67$ である。

数値結果

解析結果を図 6.75–77 に示す。図 6.75 は 4 回の試行における目的関数空間上での解の収束状況である。ここで図 6.75 は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が世代数を示す。図 6.76 は各試行において最終世代で得られた最も評価が高い解の解形状である。図 6.76 中部材断面分布は線の太さが部材断面の断面積の比率を示す。代表形状の力学性状を図 6.77 に示す。図 6.77 は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。

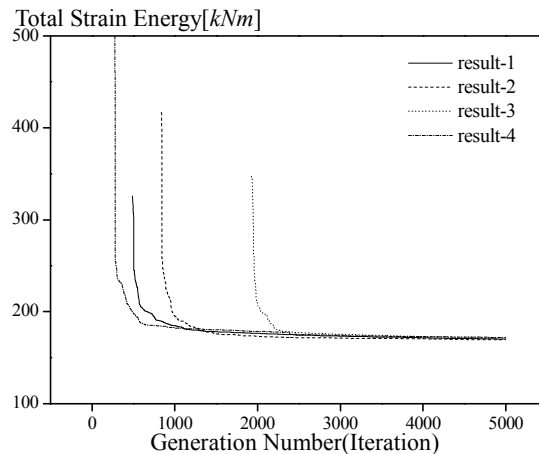


図 6. 7 5 数値結果(目的関数の収束状況)

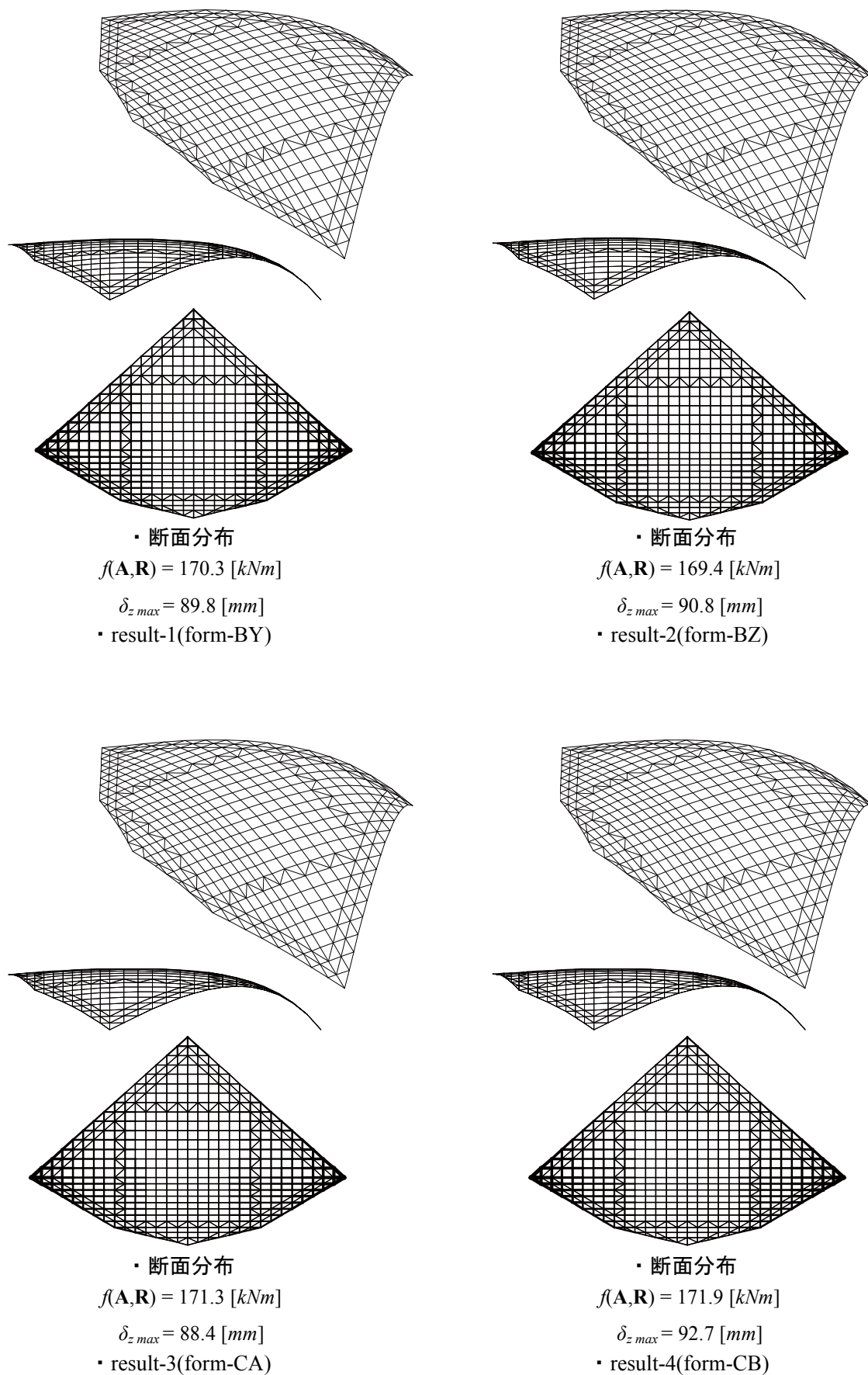


図6. 7 6 最終世代で得られた解形状

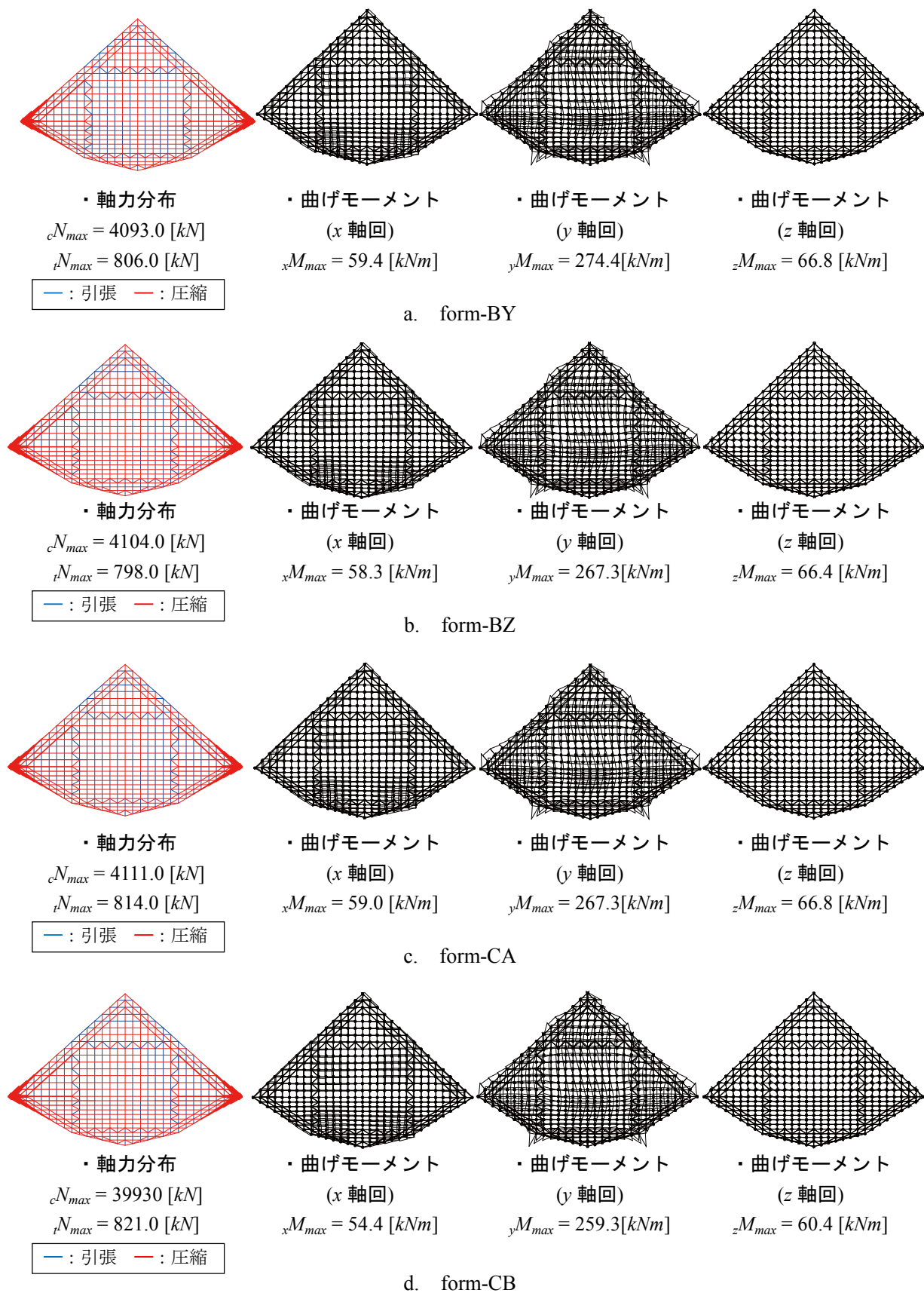


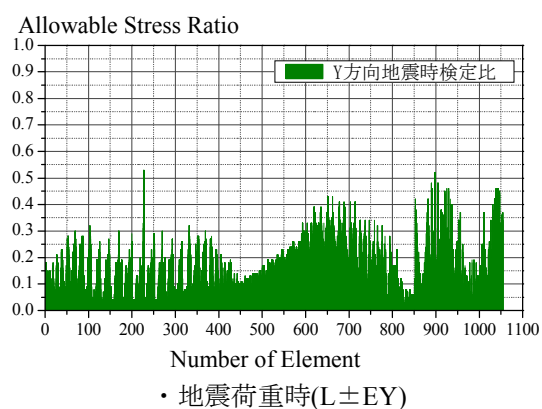
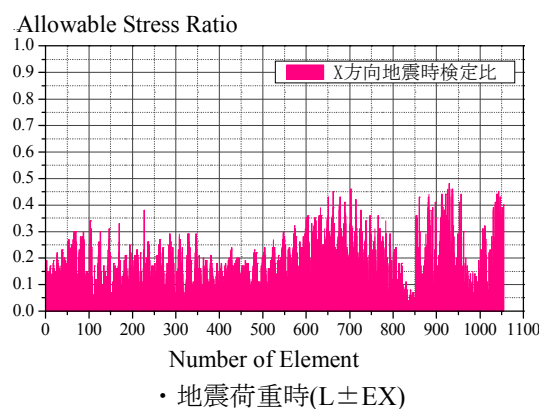
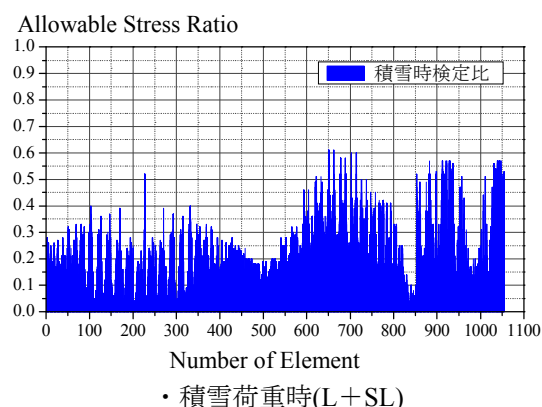
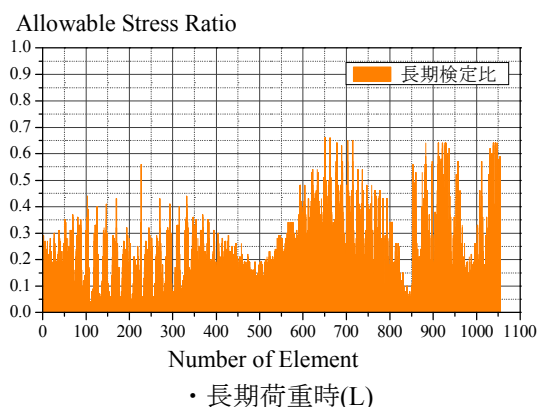
図 6. 7 7 form-BY,BZ,CA,CB の力学性状

6. 3. 3. 4 解の二次評価(1回目)

解の二次評価の結果を図 6.78- 82, 表 6.12 に示す。図 6.78-80 は各荷重ケースに対する断面検定比である。図中横軸は要素番号、縦軸は断面検定比である。表 6.12 に各荷重ケースの最大検定比を示す。図 6.81 は x, y, z 軸回りの部材間の回転角に対する評価値である。なお、図 6.81 は横軸が要素番号を縦軸が対象要素に対する部材間の回転角の評価値を示す。図 6.82 は長期荷重時に対する線形座屈解析による座屈モードと座屈荷重係数の値である。

表 6. 1 2 最大検定比

解形状	form-BY	form-BZ	form-CA	form-CB
長期 L	0.66	0.66	0.66	0.68
積雪 L+SL	0.61	0.61	0.60	0.61
地震 L+EX	0.48	0.48	0.48	0.49
地震 L+EY	0.53	0.52	0.53	0.57



a. form-BY

図 6. 7 8 断面検討結果

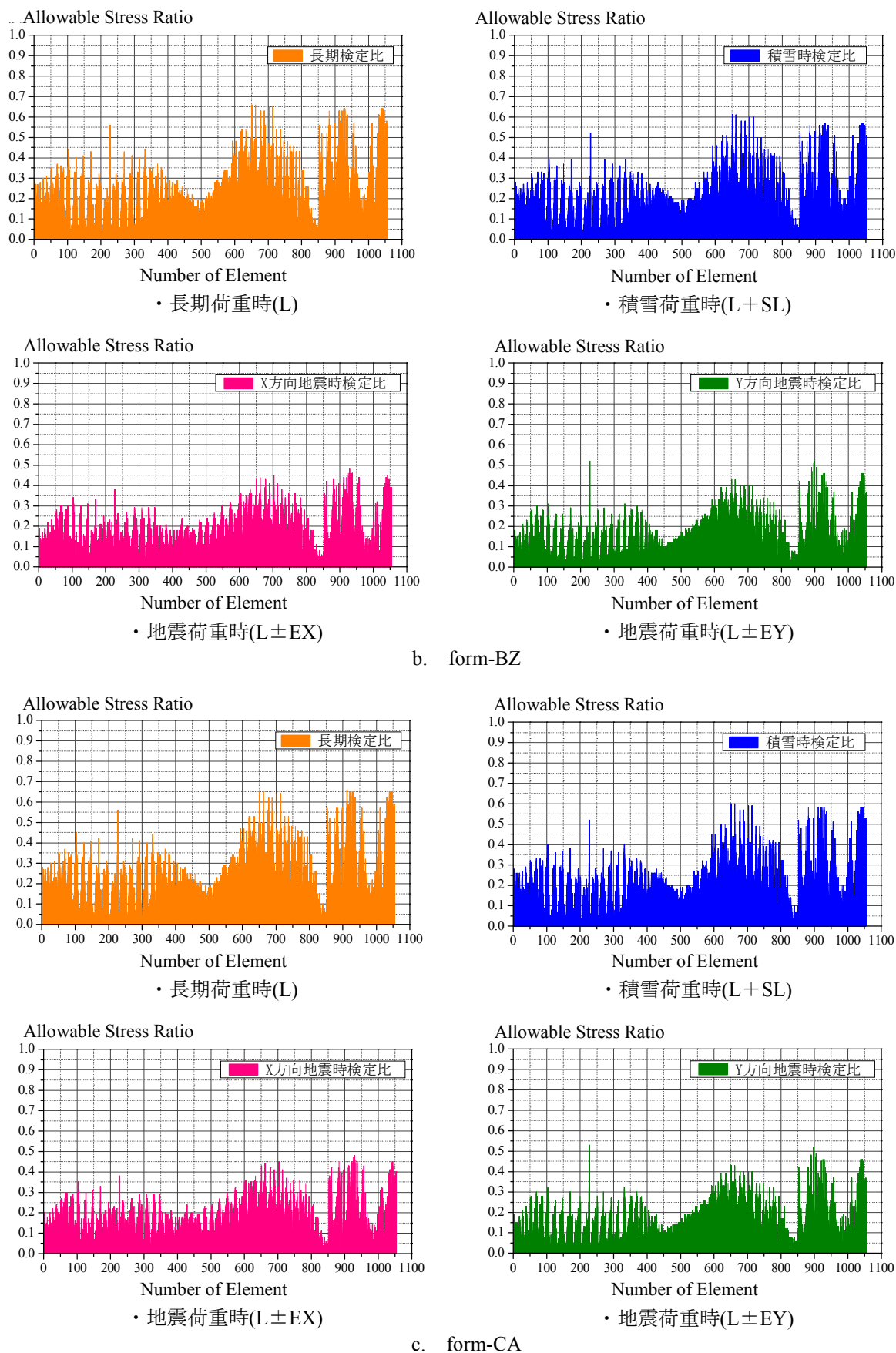
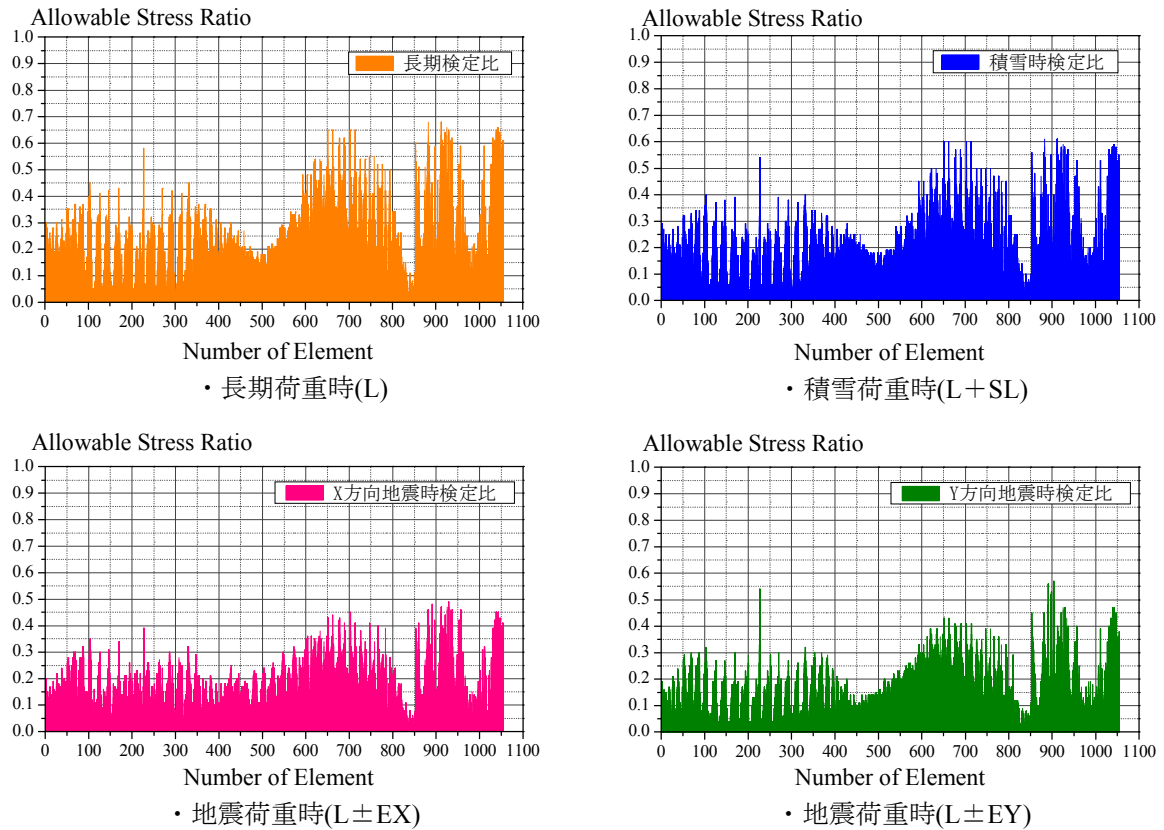


図6. 7 9 断面検討結果



d. form-CB

図6. 80 断面検討結果

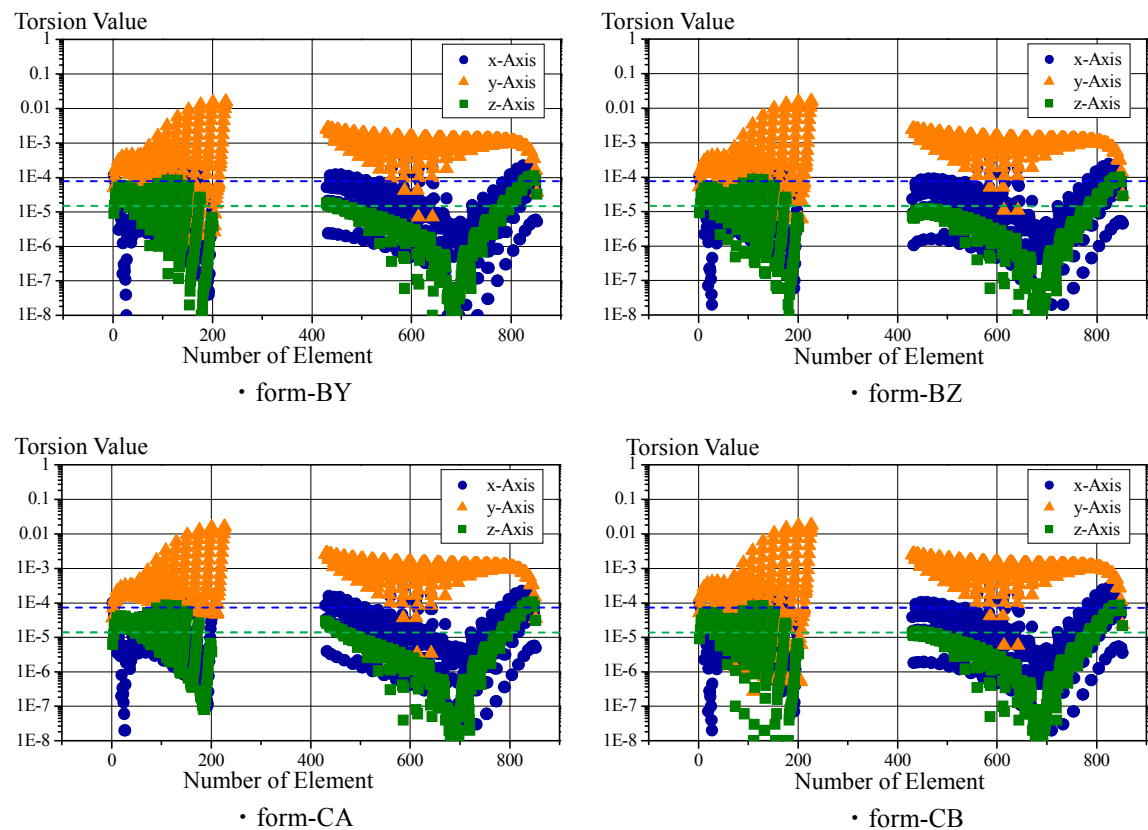


図6. 81 回転角の評価値 (---: x-Axis 限界許容値, ---: y,z-Axis 限界許容値)

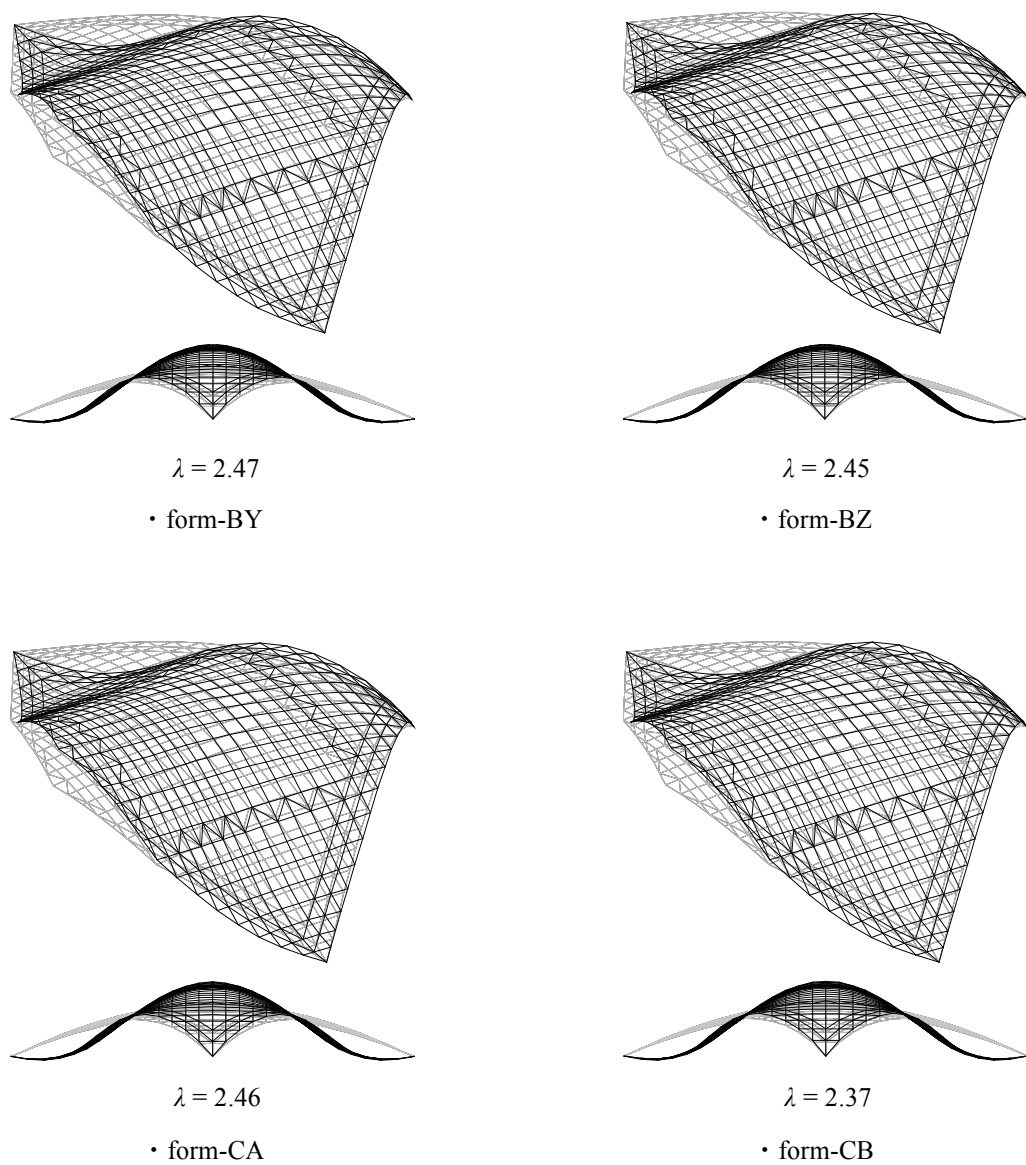


図 6. 8 2 線形座屈解析結果 (線形座屈モードと座屈荷重係数)

6. 3. 3. 5 最適化問題の再設定

図 6.74 より各試行は制約条件を満足した許容解を得るまでに数千世代を要するが、最終的には目的関数空間上のほぼ同値に収束する。表 6.12 より解の二次評価の結果、form-BY-CA は全ての荷重ケースについて許容応力度設計を満足する。なお、最大検定比の値より荷重ケースは長期荷重が支配的であることを確認した。部材間の回転角については制約条件を設定していないため、全個体において部材間の回転角の評価値が限界許容値を満足していないエリアが存在する。線形座屈解析については form-CA のみ値が $\lambda=2.37$ と最小値となったが、残りの 3 個体はほぼ同値を示した。Form-CA は長期荷重時に対する最大検定比が 4 個体中最大を示すため、線形座屈荷重係数の値も小さくなったと考える。

以上より、数値結果 1 で得られた解は目的関数空間上の解の評価に重点を置いた SGA を採用したため、同様の力学性状を示す解形状が得られており、曲面形状も相似する。ここでは、線形座屈解析結果が最もよかった form-BY を選択し、以後の最適設計を進めることとする。

form-BY は力学的評価が優れているものの、製作・施工性に関する性能が低い。このことから、総ひずみエネルギーに加えて、製作・施工性に関する評価指標を目的関数として設定する。最適化問題は両目的関数を最小化する多目的最適化問題とし、構造形態創生により両性能に優れた解形状の獲得を目指す。なお、総ひずみエネルギーを算出する荷重ケースについては長期荷重が支配的であることを確認したため、長期荷重のまま変更しない。また、アリーナ空間の高さ制約条件としてアリーナ隅角部のローラー支点の高さ制約条件を追加する。

解析モデルの初期形状は form-BY とする。設計変数は形状、部材断面を表現する制御点座標とする。その際、形状に関する設計変数は初期形状における制御点位置からの X,Y,Z 座標値の変動量とする。部材断面は数値結果 1 と同様の手法で扱う。解析モデルを図 6.83 に示す。

多目的最適化に用いる解探索手法は製作・施工性に関する評価指標に重点を置くことを目的に、目的関数空間上での解の多様性を考慮した SPEA2 を選択する。SPEA2 の設定パラメータは表 6.13 の通りである。部材断面リストは表 6.11 と同様とする。

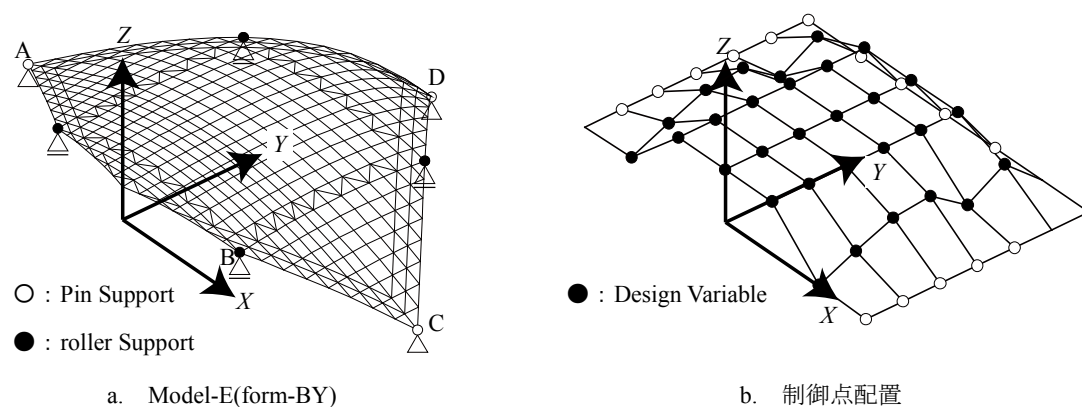


図 6. 8 3 解析モデル Model-E

表 6. 1 3 SPEA2 パラメータ

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 52 <i>bit</i>
世代数	5000	制御点の遺伝子長(部材断面)	16 x 28 <i>bit</i>
世代交代率	0.9	coding	gray表現
交叉率	0.7	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.001	交叉方式	二点交叉
アーカイブ個体群	100	—	—

6. 3. 3. 6 数値結果2 部材間の回転角+総ひずみエネルギー最小化

数値結果2はModel-Eの部材間の回転角+総ひずみエネルギー同時最小化を目標とした多目的最適化である。最適化問題の定式化は次式で示される。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (6.3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{to minimize} \quad & f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = t_{x\max} \quad (\text{x 軸回りの部材間の回転角}) \\ & f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (\text{総ひずみエネルギー}) \end{aligned} \quad (6.3.6a,b)$$

$$\begin{aligned} \text{subject to} \quad & \sigma_i \leq \sigma^L \\ & \mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (6.3.7a,b,c) \\ & h_j \leq \bar{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^L &= [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U] \\ \mathbf{R}^L &= [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L \quad \mathbf{R}_z^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U \quad \mathbf{R}_z^U] \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{d} : 節点変位ベクトル、 \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス、 $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_z^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U, \mathbf{R}_z^U$: 形状に関する設計変数の側面制約条件であり、 $R_x^L = R_y^L = -5.0, R_x^U = R_y^U = 5.0, R_z^L = -5.0[m], R_z^U = 5.0[m], A^L = 1.0, A^U = 13.0, \sigma_i$: i 要素の応力度、 σ_A : 許容応力度、 h_j : j 点の z 軸節点座標値、 \bar{h} : 高さ制約値($\bar{h}=10.0m$)である。部材間の回転角に関する目的関数は x 軸回りの回転角とする。応力制約はSN490Bを想定し、部材毎に細長比を考慮した長期許容応力度 σ^L を設定する。なお、側面制約条件は初期形状の座標値を基準とした値である。したがって得られる曲面形状の最大ライズは $20.0[m]$ であり、曲面形状の最大ライズスパン比は $1:5$ である。

数値結果

解析結果を図6.84–88に示す。図6.84は3回の試行における目的関数空間上での非劣解集合のプロット図である。ここで図6.84は縦軸が総ひずみエネルギーの値を横軸が x 軸回りの部材間の回転角評価値の最大値を示す。図6.85, 86は各試行においてresult-1, 2で得られた代表解の曲面形状と力学性状である。図6.87, 88は軸力分布、曲げモーメント分布(x, y, z 軸回り)である。なお、軸力分布は赤線が圧縮、青線が引張力であることを示し、線の太さが軸力の大きさの比率を示す。

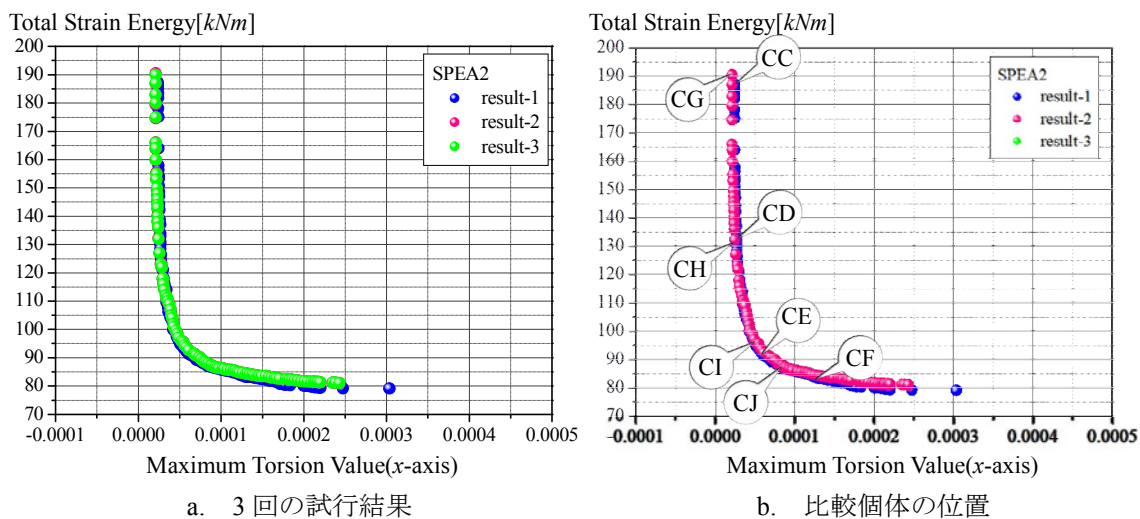


図6.84 数値結果(目的関数空間)

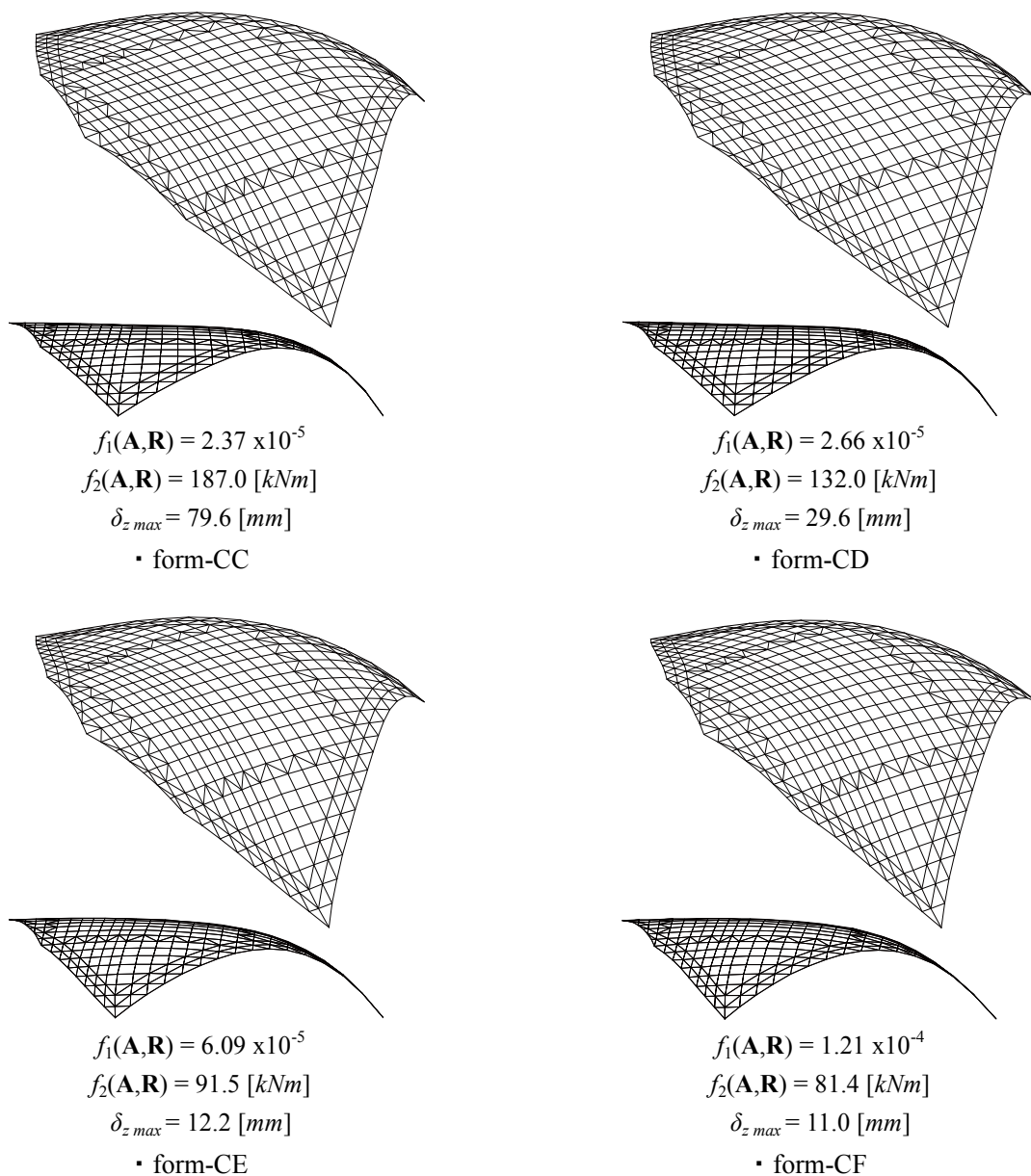


図6.85 result-1の代表解形状

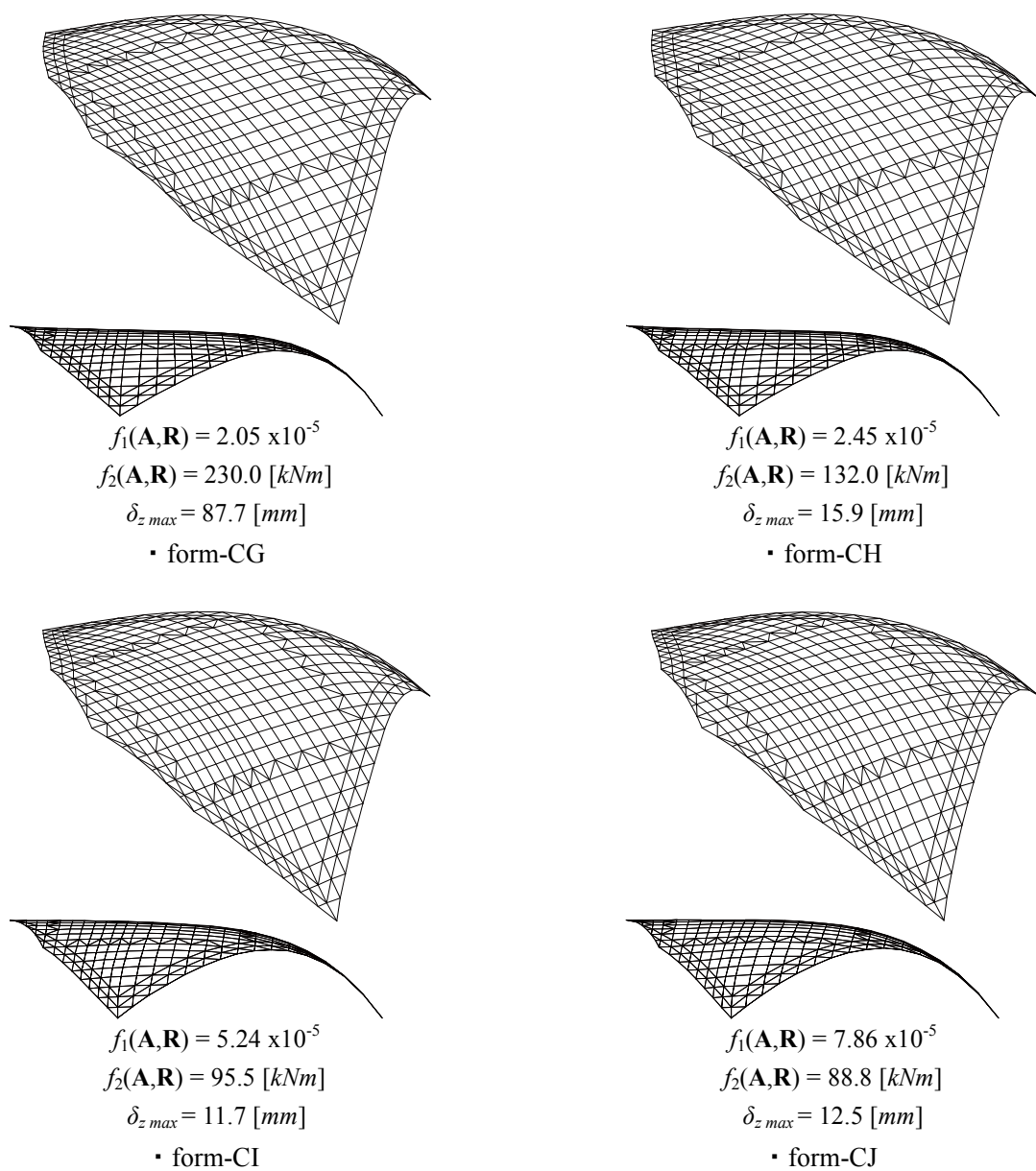


図6. 86 result-2 の代表解形状

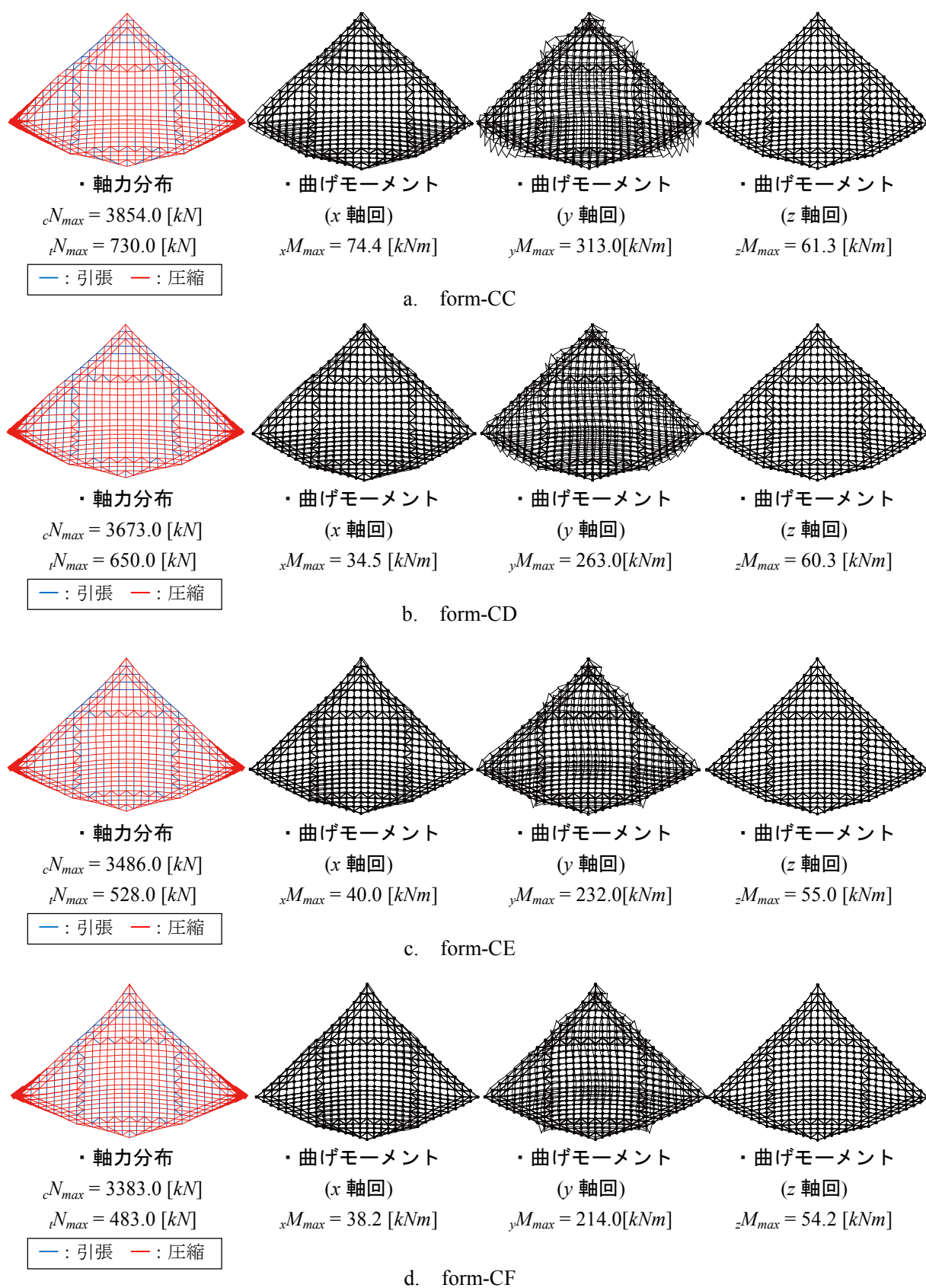


図6. 8 7 form-CC,CD,CE,CF の力学性状

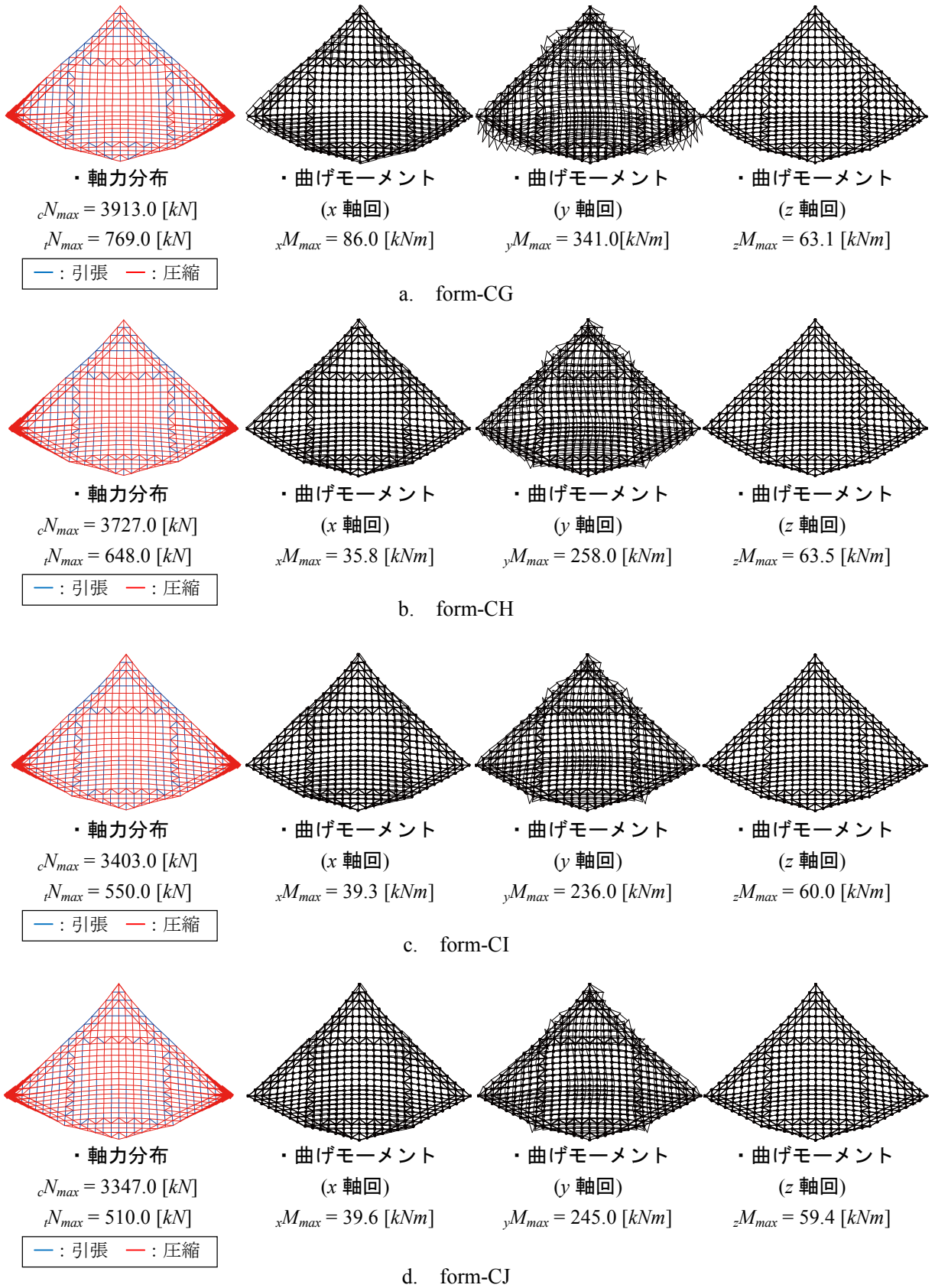


図6. 88 form-CG,CH,CI,CJ の力学性状

6. 3. 3. 7 解の二次評価(2回目)

解の二次評価の結果を図 6.89–94, 表 6.14 に示す。図 6.89, 90, 91 は各荷重ケースに対する form-CC–CJ の断面検定比である。図 90, 91 中横軸は要素番号、縦軸は断面検定比であり、橙棒は長期、青棒は積雪、桃棒は地震時(X 方向加力時)、緑棒は地震時(Y 方向加力時)の結果である。図 89, 表 6.13 は各荷重ケースにおける最大検定比のまとめである。図 6.92 は x, y, z 軸回りの部材間の回転角に対する評価値である。なお、図 6.92 は横軸が要素番号を縦軸が対象要素に対する部材間の回転角の評価値を示す。図 6.93 は長期荷重時に対する線形座屈解析による座屈モードと座屈荷重係数の値である。図 6.94 は form-CC–CJ のロバスト判定解析の結果である。なお、ロバスト性判定の定式化は第 6 章 2 節 5 項 2 目と同条件とする。

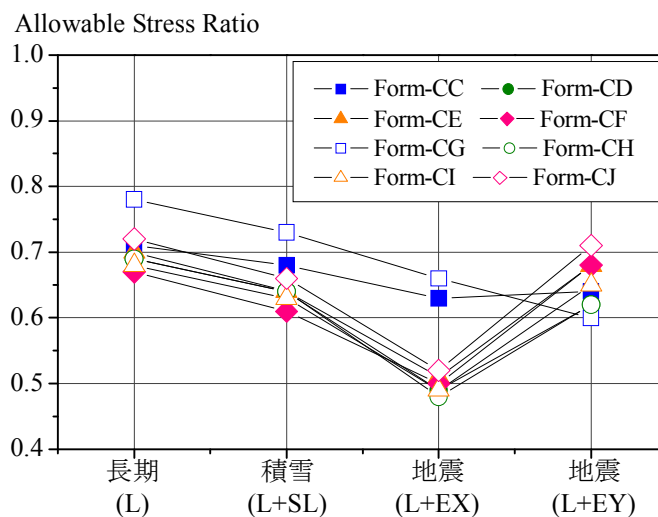


図 6. 8 9 最大検定比

表 6. 1 4 最大検定比まとめ

解形状	form-CC	form-CD	form-CE	form-CF	form-CG	form-CH	form-CI	form-CJ
長期 L	0.71	0.69	0.70	0.67	0.78	0.69	0.68	0.72
積雪 L+SL	0.68	0.64	0.64	0.61	0.73	0.64	0.63	0.66
地震 L+EX	0.63	0.49	0.51	0.50	0.66	0.48	0.49	0.52
地震 L+EY	0.64	0.62	0.68	0.68	0.60	0.62	0.65	0.71

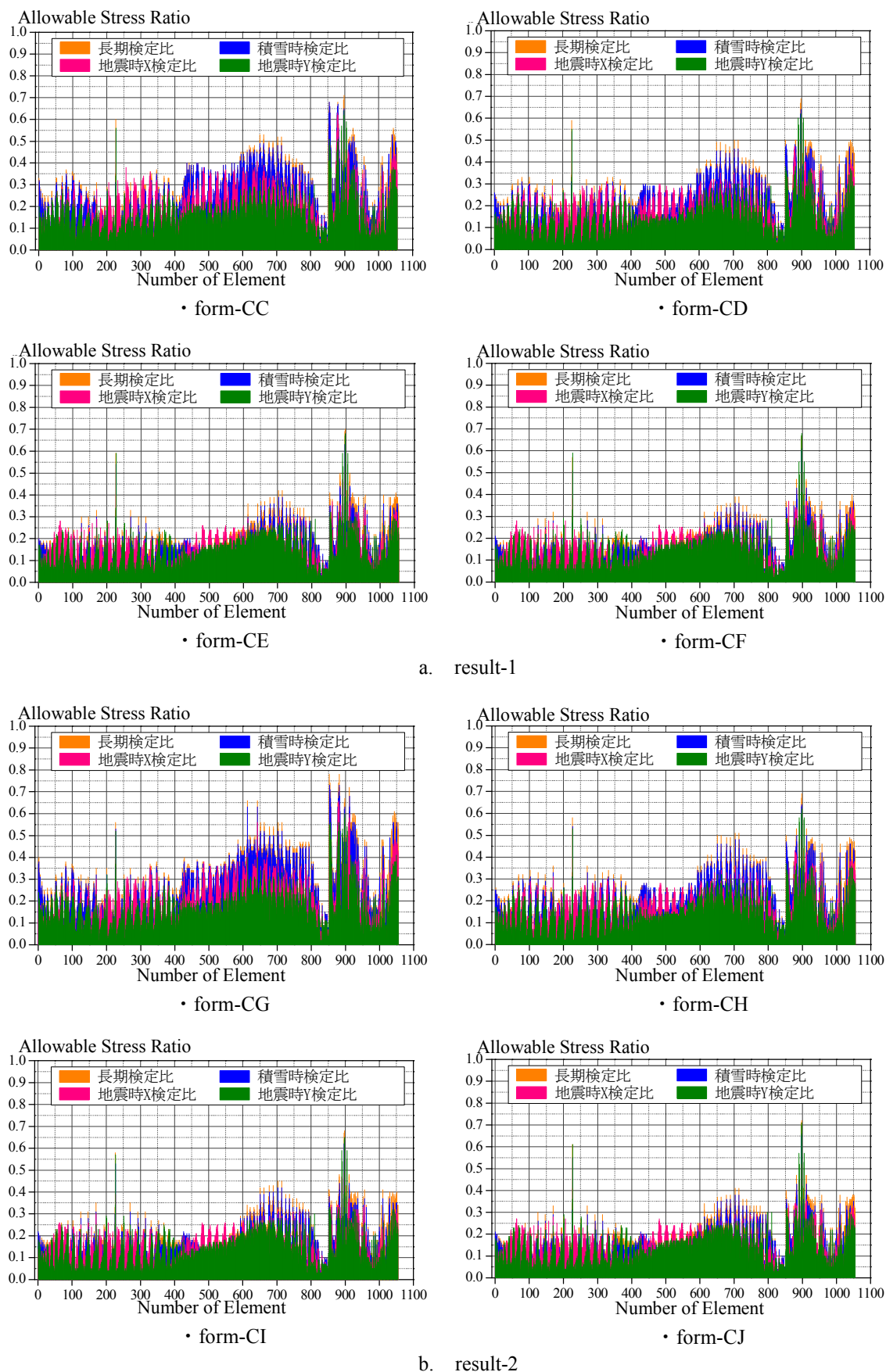


図6.90 断面検討結果

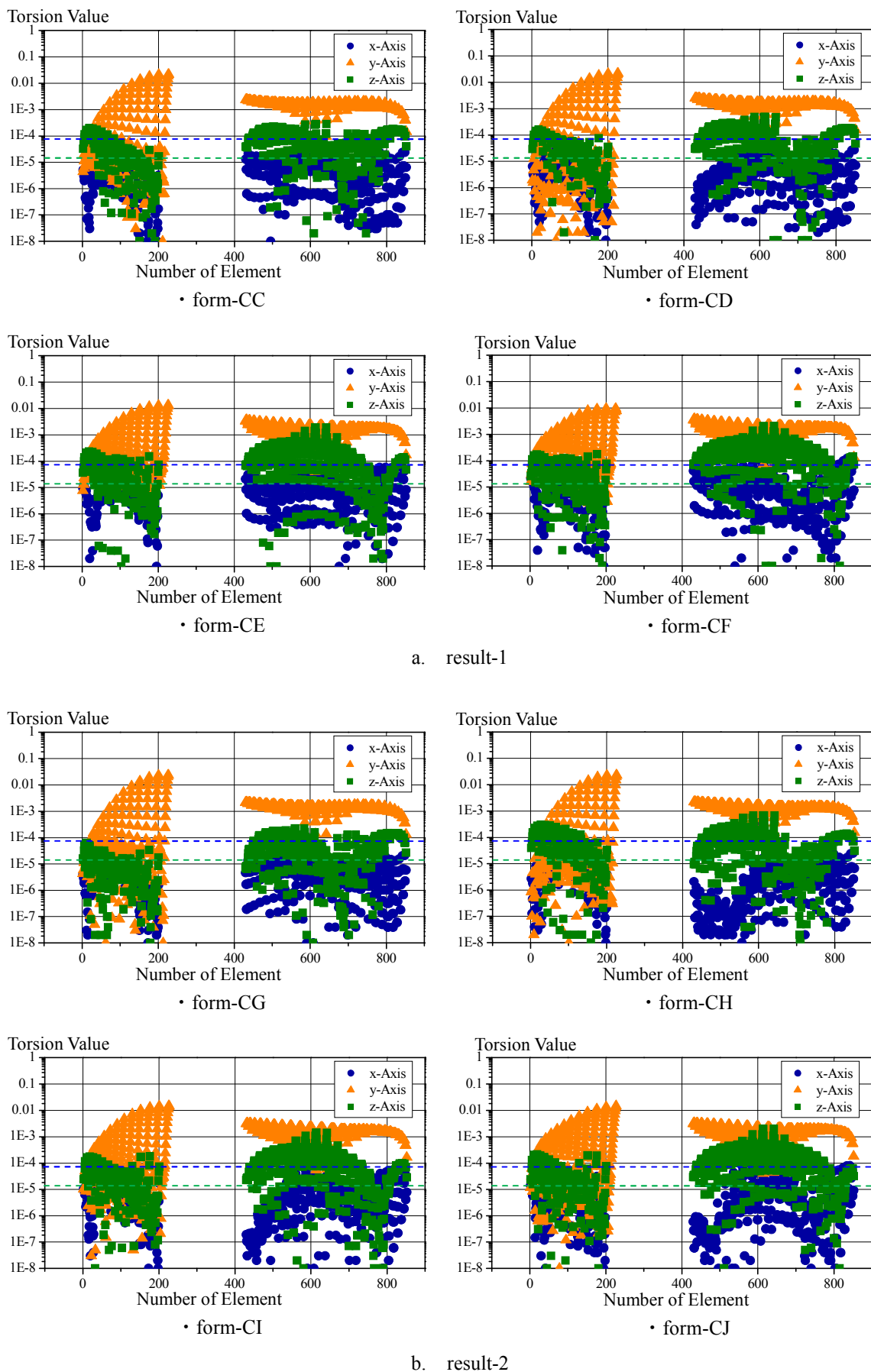
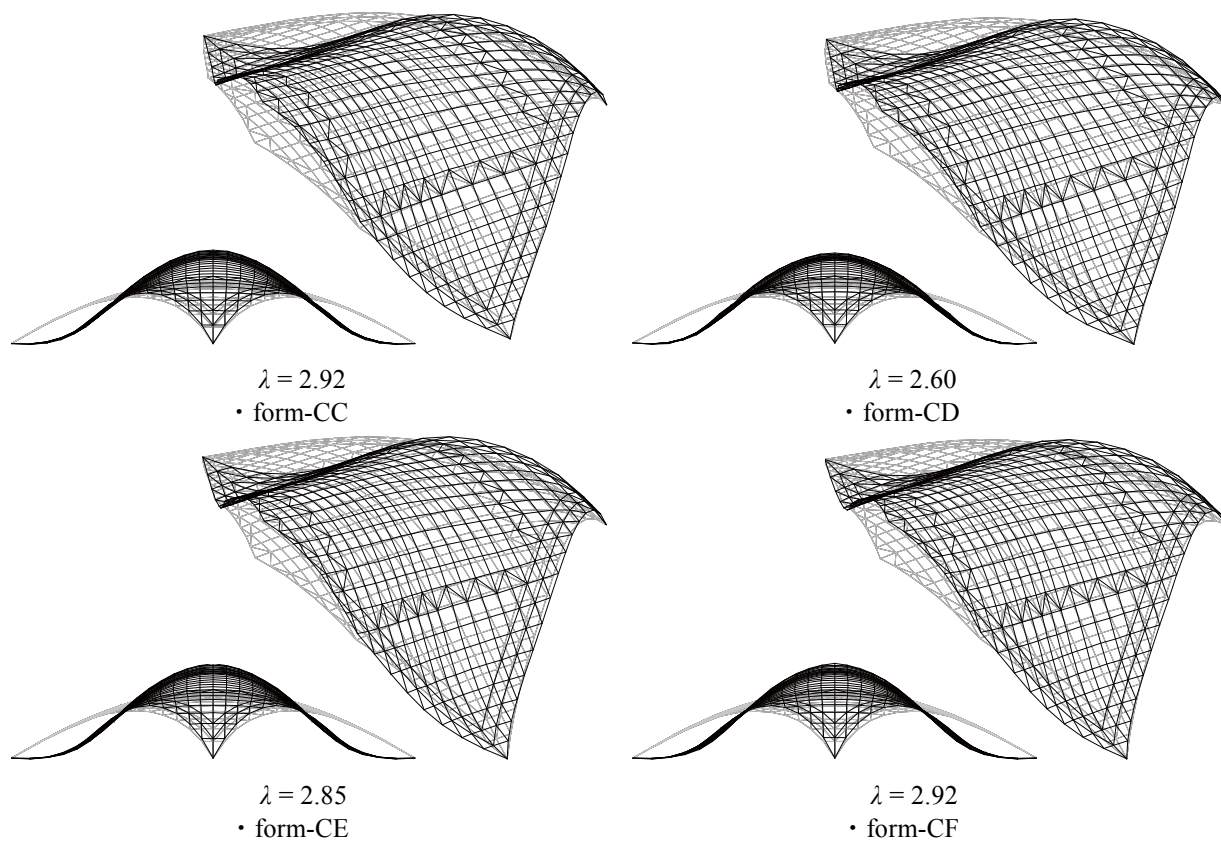
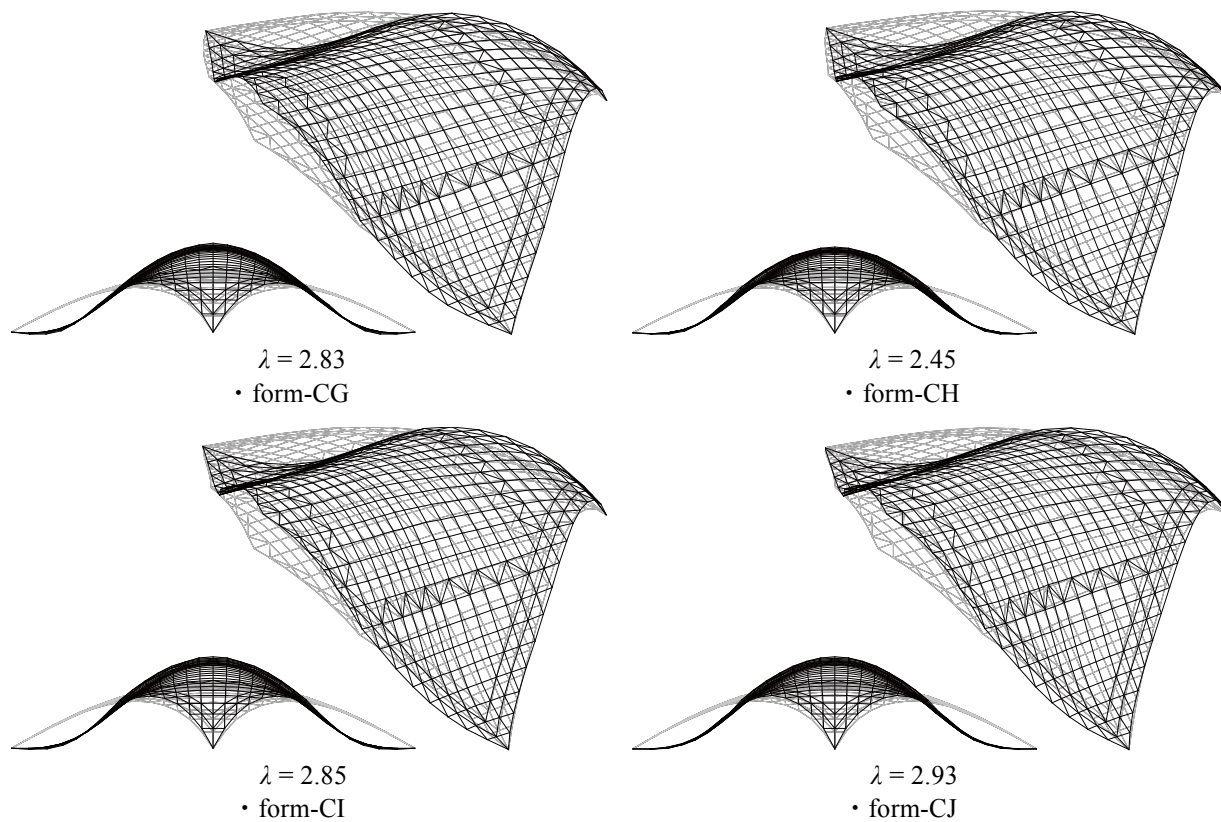


図6. 9 1 回転角の評価値 (--- : x-Axis 限界許容値, --- : y,z-Axis 限界許容値)



a. result-1



b. result-2

図6. 9 2 線形座屈解析結果(線形座屈モードと座屈荷重係数)

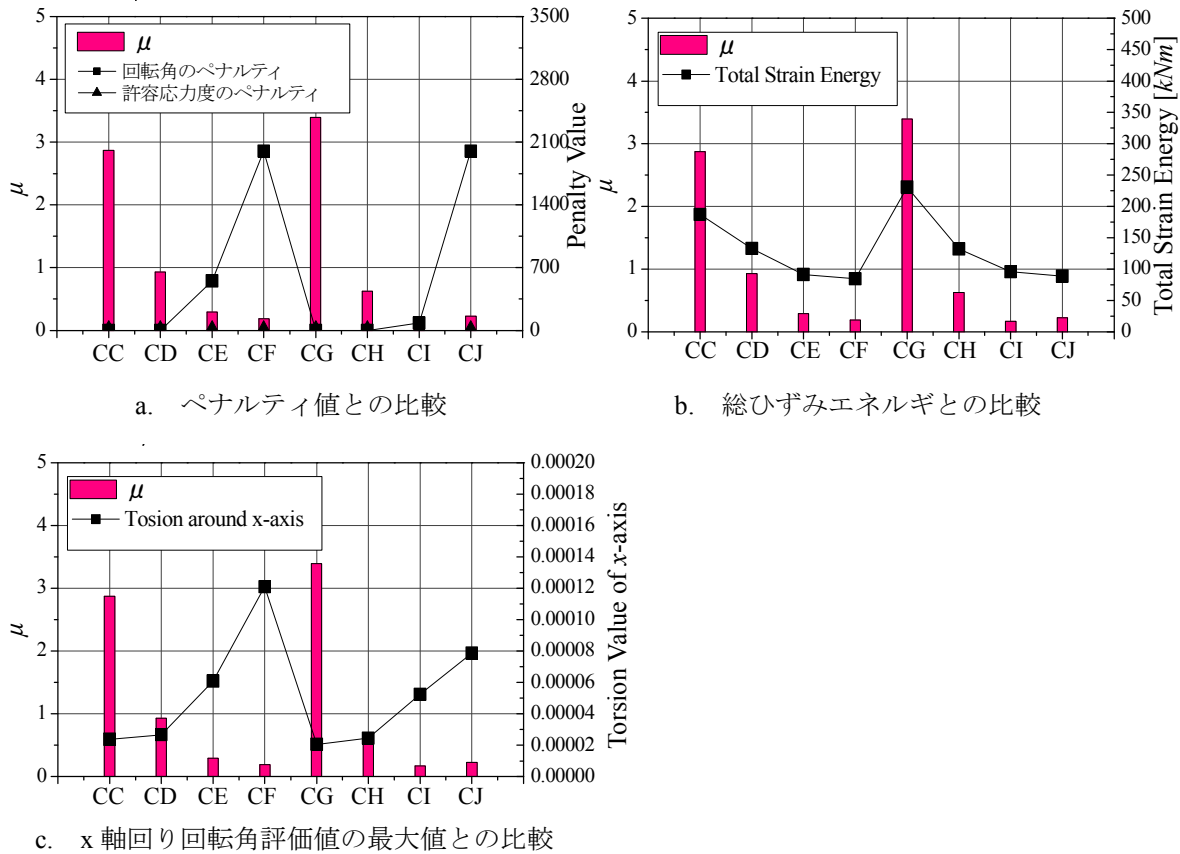


図 6. 9 3 ロバスト判定値

6. 3. 3. 8 最終形状の決定

図 6.89, 90 より比較した全 8 個体は全ての荷重ケースにおいて許容応力度設計を満足する。最大検定比は総ひずみエネルギーが小さい個体ほど長期荷重時においては小さくなる傾向を示す。ただし、図 8.89 より、form-CF, CJ は長期荷重時に対する検定比は 8 個体中最も小さいが、地震時は 8 個体中最も高い値を示す。反対に form-CD, CH は荷重ケースの違いによる最大検定比のばらつきが小さく、どの荷重状態においても同等の性能を有していることが確認できる。回転角の評価値において、図 6.92 より x 軸回りの部材間の回転角は各接続点において初期形状より改善されている。部材間の回転角と総ひずみエネルギーは相反関係にあるため、総ひずみエネルギーが小さくなるほど、部材間の回転角に対する評価は低くなる。特に form-CF は限界許容値を満足しない箇所が存在する。構造安定性の評価指標の一つである線形座屈荷重については比較した 8 個体中 form-CH を除く 7 個体が初期形状を上回ることを確認した。なお、今回の解析結果では目的関数と線形座屈荷重係数の関連性は確認されなかった。最後に 8 個体のロバスト性判定結果を図 9.93 に示す。図 9.93 よりロバスト性判定値 μ は総ひずみエネルギーを目的関数として算出しているため、 μ の値は総ひずみエネルギーの小さい個体ほど小さい。ペナルティ値に着目した場合、図 9.93a より form-CC, CD, CG, CH は発生させた乱数個体 ($N=2000$) 全てが制約条件を満足している。なお、部材間の回転角に対する制約条件は部材間の回転角に対する評価値が大きい個体ほど、制約条件を満足しない

乱数個体が多くなる傾向がある。以上の結果より相対的にロバスト性の高い個体は form-CD, CH, CI と判断する。

以上、全評価を一覧でまとめたものを表 6.15 に示す。総合評価の結果、外力・ロバスト性に対する安定性が特に優れている form-CD が、8 個体中最も耐力・剛性・製作・施工性・構造安定性に優れた解であると判断し最終形状とした。図 6.94 に最終形状のモデリング図を示す。

表 6. 1 5 総合評価

項 目	form-CC	form-CD	form-CE	form-CF	form-CG	form-CH	form-CI	form-CJ
総ひずみ エネルギー [kNm]	187.0	132.0	91.0	84.0	230.0	132.0	95.0	88.0
部材間の 回転角	2.37×10^{-5}	2.66×10^{-5}	6.09×10^{-5}	1.21×10^{-4}	2.05×10^{-5}	2.45×10^{-5}	5.24×10^{-5}	7.86×10^{-5}
最大 検定比	0.71	0.69	0.70	0.68	0.78	0.69	0.68	0.72
線形座屈 荷重係数	2.92	2.60	2.85	2.92	2.83	2.45	2.85	2.93
ロバスト性	低	高	低	低	低	高	高	低
総合 評価	◎							

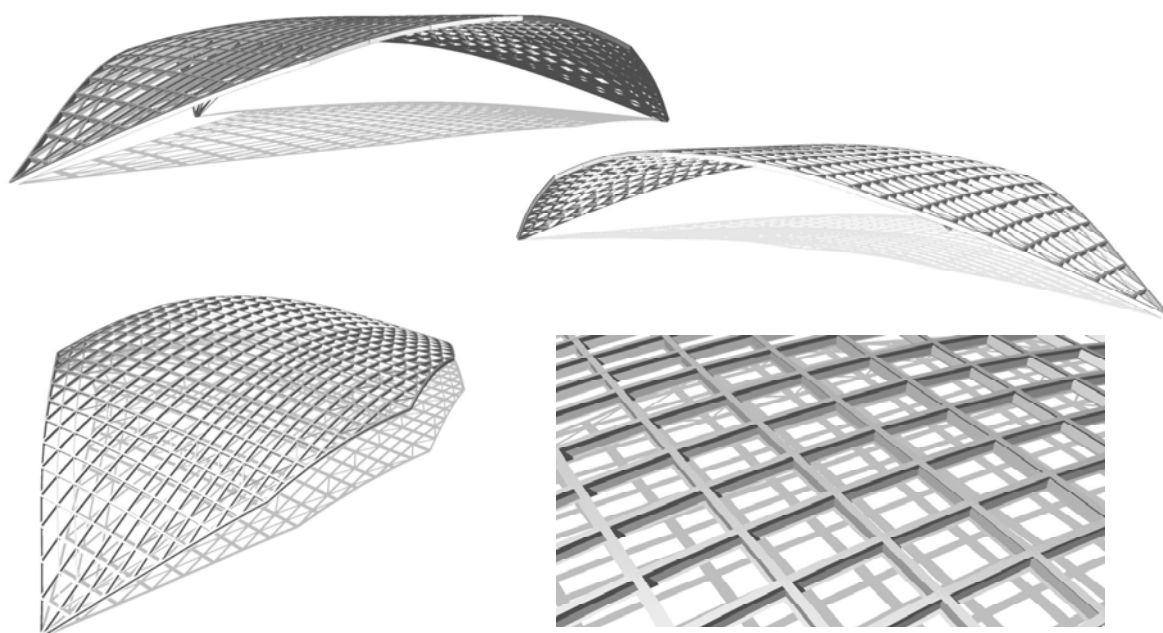


図 6. 9 4 最終決定形状の 3D パース(form-CD)

6. 4 結語

本章は製作・施工性を考慮した評価指標を用いて格子シェルの構造形態創生を実施した。まず、評価指標の特性を把握するため、単純な整形平面を有する格子シェルモデル 2 モデルを用いて単一目的最適化及び多目的最適化を実施した。次に、解析モデルを実設計を考慮した任意平面モデルへ拡張し、構造形態創生を活用した最適設計を行った。以下に得られた知見を示す。

基本問題による特性把握

(a) 提示した評価関数は部材間の回転角が制御可能であり、3 方向の回転角の組合せで、(1)材軸方向へねじれない形状(x 軸回り回転角最小化)、(2)単曲率のフレームのみで構成された形状(y 軸もしくは z 軸回り回転角最小化)、(3)直線フレームのみで構成された線織面形状(y, z 軸回り回転角の同時最小化)など、製作性・施工性の改善につながる種々の曲面形状が獲得可能であることを確認した。

(b) 評価関数を制約条件として設定することで、構造合理性と施工性の両方を考慮した曲面形状の獲得に本評価関数が利用可能であることを示した。このような形状を獲得することは、実設計において時間を要する詳細検討の手間を省力化させ、構造形態創生法を利用した最適設計を種々の建築形態へ活用できると考えている。

(c) 多目的最適化の結果より本評価指標と総ひずみエネルギーはトレードオフの関係があり、力学指標との同時最適化が可能である。

(d) ロバスト性判定を導入し、乱数個体の制約条件の満足の可否をペナルティ値として評価することで相対的に本評価指標のロバスト性判定を行うことが可能である。

(e) 模型による接続点の特徴を定性的に検証した結果、部材間の回転角の制御により、意図する曲面形状が得られていることを確認した。

(f) 本評価指標は要素間のねじれ角・部材角を扱うことから式(2.7.12)－(2.7.14)の値の制約値の設定により部材角一様化へも応用できる可能性がある。

任意平面モデルを用いた最適設計

(a)最適設計フローの適用により、構造形態創生から解の詳細検討、最終形状決定に至るまでの一連の検討手順を示すことができた。

(b)提案した最適設計フローは構造形態創生で扱う評価項目をしぼり、構造形態創生後の解の二次評価にて複数の項目を評価することで、実設計における構造形態創生のツールとしての在り方を明確化した。

(c)解の二次評価により、評価の低い項目を抽出することで、構造形態創生へのフィードバックの方法を提案した。最終的には収斂計算によりすべての評価項目において高い評価を有する解形状が獲得できることを確認した。

(d)部材間の回転角に関する評価指標は任意形状モデルにおいてもSGAやSPEA2により限界許容値を満足する値まで最小化された解が探索可能である。



—第 7 章 結論—

—第7章—

結論

本研究は設計支援という立場から遺伝的アルゴリズム系解法を用いた構造形態創生法を実設計へ活用した最適設計法を提案し、種々の構造形式の架構に対して設計支援ツールとしての構造形態創生法の立場を明らかにするとともに、最適設計法が種々の構造形態に利用できることを目指した。第2章では本研究で扱う構造物の性能を述べ、最適設計法を提案した。その際に、全ての評価を構造形態創生に組み込むのではなく、構造形態創生部と詳細検討部を分離した設計フローを提案し、構造形態創生部で扱う情報を単純化させ、最適設計の効率化を図ることの重要性を述べた。さらに、空間構造において製作・施工性の重要性を述べ、製作・施工性を改善させる評価指標の一つとして部材間の回転角に着目した評価指標を提案した。第3章において単一・多目的最適化における最適化問題の定義と本研究で用いる最適化手法の定式化を行った。また、本研究で扱う解の分類を説明し、構造形態創生において優良解を活用することの重要性を説明した。第5章は構造形態創生法を活用した最適設計例として、アーチ架構、平面トラス架構、ラーメン架構を解析モデルとする離散系構造の構造形態創生と最適設計例を示した。第6章は解析モデルを空間構造へ拡張し、構造形態創生法の活用例として格子シェルの構造形態創生と最適設計を行った。格子シェルの架構形成にとって重要となる部材同士の接続状態を部材間の回転角と定義し、製作・施工性の改善に本評価指標が活用可能であることを示した。さらに、得られた知見を基に解析モデルを任意平面モデルへ拡張し、具体的な設計条件を想定した任意平面形を有する格子シェルの最適設計へと発展させた。以下に得られた知見を示す。

(a) 本研究で扱った遺伝的アルゴリズム系解法は最も単純なアルゴリズムを有する解法から目的関数空間の多様性や設計変数空間の多様性に重点を置いた解法等多岐にわたる。これらの解法を設計条件や構造形態創生に求める要件に応じて使い分けることで大域的最適解を含む優良解が探索可能であり、得られた解形態は実設計においても十分に活用可能である。

(b) 遺伝的アルゴリズム系解法は計算アルゴリズムがシンプルであり、ランダム探索手法であることから、独自のアルゴリズムを組みこみやすい。したがって、離散系構造から空間構造まで種々の構造形式に適用可能である。さらに、今回示した最適設計例のように設計条件に応じた目的関数の設定や、形態生成ルール等のアルゴリズムを容易に組み込むことが可能であり、多様性が求められる設計支援ツールという立場にあって汎用性の高い解法である。

(c) 最適設計例では単純な解法を用いながらも構造形態創生法の使い方や構造形態創生法の中で評価する項目を明確化させることで、詳細設計と構造形態創生の試行錯誤をスムーズに行うことが可能となる。

(d) 部材間の回転角を考慮した評価指標は部材の接続状態を制御することが可能であり、製作・施工性の改善につながる曲面形状が獲得可能である。本評価指標は接合角の内積値を用いるため、具体的な数値を設定すれば等部材角を有する曲面形態の構造形態創生等にも今後利用できる可能性がある。

(e) 本研究で提案した最適設計法を適用することで、構造設計にて検証が必要な様々な項目を、構造形態創生法を活用して最適化していくことが可能であり、最終的に耐力・剛性・製作・施工性・構造安定性などの種々の評価項目を満足した構造形態が獲得可能である。

以上、構造形態創生法の活用は種々の設計条件を満足させる必要がある構造設計において利便性の高い演算手法であり、種々の構造形式に対する設計支援ツールとしての可能性が示せた。さらに、構造形態創生法の適用範囲を空間構造へ発展させ、製作・施工性に関する評価指標を提案した構造形態創生と最適設計例を示すことで複雑形状を有する構造形態においても実設計へ活用可能な構造形態が獲得できることを示した。特に、著者自ら設計した TOTO ミュージアムにおける構造形態創生法を活用した実設計例や、アルゴリズムミックアーキテクチャによる構造形態創生法を用いた具体的な試設計例は、本手法の有効性がより裏付けされたと考える。

本研究の今後の可能性としては、「解析モデルの拡張」、「実設計を考慮した目的関数の提案」・「提案指標の鋼板シェル構造への活用」・「最適設計法のインターフェースの開発」等が考えられる。特に、今後のコンピュータスペックの向上や、AI 技術等の活用により、最適化技術は汎用性の高い設計支援ツールとして普及していくものと考えている。

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

—参考文献—

参考文献

第 1 章

- [1.1] 斎藤公男,岡田章:大空間建築の展開,Japan Society of Steel Construction, **15**, 5-23, 1995
- [1.2] 本間俊雄,加治広之,登坂宣好:免疫アルゴリズムによる構造システムの最適化と解の多様性,日本建築学会構造系論文集,**588**,103-110,2005
- [1.3] J. Kennedy : Particle swarm optimization, Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks, Perth, 1942-1948, 1995
- [1.4] M. Dorigo, G. D. Caro and L. M. Gambardella : Ant Algorithms for Discrete Optimization, Artificial Life, **5**(2), 137-172, 1999
- [1.5] D. Karaboga and B. Akay : algorithms simulating bee swarm intelligence, Artificial Intelligence Review, **31**, 61-85, 2009
- [1.6] 森一之, 築山誠, 福田豊生 : 免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化, 日本電気学会論文誌C, **117**(5), 593-598, 1997
- [1.7] Xin-She Yang: Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Proc. 5th Inter. Conf. on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications , 169-178, 2009
- [1.8] 田中奈津希, 本間俊雄, 横須賀洋平 : ホタルアルゴリズムによる連続体シェル構造の形状最適化と解の安定性, 日本機械学会 第11回最適化シンポジウム2014(OPTIS2014: No.14-39), CD-1109, DEC.2014
- [1.9] J.D.Schaffer:Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms,In Proceedings of 1stInternational Conference on Genetic Algorithms and their Applications,93-100,1985
- [1.10] P.Hajela and C.-Y.Lin:Genetic Search Strategies in Multicriterion Optimal Design, Structural Optimization, **4**(2), 99-107, 1997
- [1.11] E. Zitzler, M. Laumanns and L. Thiele: SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, In Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2001
- [1.12] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.: A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, **6**(2), 182-197, 2002
- [1.13] 本間俊雄, 野瑞憲太 : 解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, **614**, 35-43, 2007
- [1.14] 金和美,廣安知之,三木光範:目的関数空間と設計変数空間におけるパレート最適解の多様性を維持するアーカイブメカニズム,情報処理学会論文誌,数理モデル化と応用 **46**(SIG17(TOM13)),102-113,2005

- [1.15] 小林賢二,廣安知之,三木光範:ネットワークインバージョンを利用した多目的遺伝的アルゴリズムのための多様性維持メカニズム,情報処理学会論文誌,数理モデル化と応用 **1**(1),27-42,2008
- [1.16] 北山哲士,宮川智栄,山崎光悦,荒川雅生:領域適応型Particle Swarm Optimizationによる複数の最適解の探索,日本機械学会論文集C編,**75**(751),198-206,2009
- [1.17] S.Habaguchi,S.Kitayama and K.Yamazaki:Muluti-Objective Particle Swarm Optimization using the Pareto-Fitness Function, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems,J-61,2010
- [1.18] D.Karaboga and B.Basturk: A powful and efficient algoritm for numerical function optimization: artificial bee colony(ABC), Journal of Glob Optimization **39**,459-471, 2007
- [1.19] 永田洸大, 本間俊雄: 優良解探索機能を導入した群知能による自由曲面シェル構造の形態, 日本建築学会構造系論文集, **684**, 345-354, 2013
- [1.20] 佐々木睦朗:FLUX STRUCTURE フラックスストラクチャー,TOTO出版,2005
- [1.21] 坪井義昭, 川口衛, 佐々木睦朗, 大崎純, 植木隆司, 竹内徹, 河端昌也, 川口健一, 金箱温春: 力学・素材・構造デザイン, 株式会社建築技術, 2012
- [1.22] Structural design of free-curved Rc shells, Proc. IASS 2010 Shanghai,2010
- [1.23] Toshiaki Kimura, Yoshiyuki Hiraiwa, Mutsuro Sasaki : Structural design of the crematorium in Kaawguchi, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016,Tolyo, CD-ROM Proceeding, ID1335, 2016.9
- [1.24] 与那嶺仁志, 後藤一真, 松本仁, 保坂猛: ほうとう不動, 日本建築学会大会建築デザイン発表会梗概集(北陸), pp.312-313, 2010.9
- [1.25] 大森博司, 風袋宏幸, 飯嶋俊比古, 武藤厚, 長谷川泰稔: 構造形態創生法によるオフィスの設計, 日本建築学会技術報告集, **20**, 77-82, 2004
- [1.26] 大森 博司, 崔 昌禹: 等値線を利用した拡張ESO法による構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, **539**, 87-94, 2001
- [1.27] 崔 昌禹, 大森 博司, 佐々木 睦朗: 拡張ESO法による構造形態の創生: 三次元構造への拡張, 日本建築学会構造系論文集, **576**, 79-86, 2004
- [1.28] 柳沼大樹, 森田明, 大森博司, 平林竜次, 蓑和健太郎: 文京総合体育館—構造最適化法を用いた単層ラチスシェル屋根—, 鉄構技術2013年8月号, 鋼構造出版, pp.50- 59,2013.8
- [1.29] 柳沼大樹,森田明,大森博司: モーメント分布最小化による大空間骨組構造の曲面形状最適化—(その1)形状変化に対する考察—,日本建築学会学術講演梗概集(北海道), 構造 I , pp.975-976, 2013.8
- [1.30] 薫田匡史,栗田光樹夫,大森博司: ホモログス変形を考慮したトラス構造物の構造形態創生に関する研究—光赤外線望遠鏡支持構造物への適用—,日本建築学会構造系論文集, **676**, pp.899-904, 2012.6
- [1.31] 笹谷真通,江村哲哉,後藤一真: 木質ルーフ—東北大学キャンパス設計で行った二つの試み—,建築技術2015年8月号, 鋼構造出版, pp.132-133,2015.8

- [1.32] 金田充弘, 笹谷真通: みんなの森ぎふメディアコスモスの構造計画, 建築技術2016年2月号, 鋼構造出版, pp.34-37, 2016.2
- [1.33] 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, 日本建築学会学術講演梗概集(九州) 構造 I, pp.1079-1080, 2016.8
- [1.34] 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第74巻第639号, pp.857-863, 2009.5
- [1.35] 西森裕人, 本間俊雄, 横須賀洋平: 部材長一様化と接合角を考慮したグリッドシェル構造の多目的最適化, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.277-280, 2015.3
- [1.36] 柴田恭一郎, 大森博司: 接合部の問題を考慮した空間構造物の曲面形状最適化, 日本建築学会東海支部研究報告書第52号, pp.129-132, 2014.2

第2章

- [2.1] 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6
- [2.2] 日本建築学会編, 鋼構造設計規準, 丸善, 2005
- [2.3] 日本建築学会編, 空間構造の数値解析ガイドライン, 丸善, 2001
- [2.4] 松尾圭介, 本間俊雄: 優良解探索手法によるグリッドシェル構造の解形態に対するロバスト判別, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 構造系51, pp.277-280, 2012.3
- [2.5] 永田洸大, 本間俊雄: 優良解探索機能を導入した群知能による自由曲面シェル構造の形態, 日本建築学会構造系論文集, 684, pp.345-354, 2013.2
- [2.6] 本間俊雄, 和田大典, 永田洸大, 沖田裕介: 優良解探索機能を導入したGA系解法及びSI系解法の特性と構造形態創生, 日本建築学会, ソフトコンピューティングの最前線, 2011
- [2.7] 和田大典, 本間俊雄: 施工性を考慮した骨組グリッドシェル構造の構造形態創生, 構造工学論文集, Vol.64B, pp.533-540, 2018.3
- [2.8] 和田大典, 本間俊雄: 部材間の回転角を考慮した鉄骨曲面構造の構造形態創生, コロキウム構造形態の解析と創生2017, (CD-ROM), 2017.10
- [2.9] 日本建築学会編, 建築工事標準仕様書JASS6鉄骨工事, 丸善, 2016

第3章

- [3.1] 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 発見的手法による構造フォルムとシステム, コロナ社, 2004
- [3.2] K. Deb: *Multio-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Wiley, 2001
- [3.3] 本間俊雄: 構造形態の創生と最適化, 第9回「シェル・空間構造」セミナー 設計への計算機の応用と解析状の留意点, 25-32, 2010.7
- [3.4] 日本建築学会編, シンポジウム「ソフトコンピューティングによる建築・都市・環境デザインのためのモデリングと最適化技術」資料集, 2015
- [3.5] J. Kennedy: Particle swarm optimization, Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks, Perth, 1942-1948, 1995

- [3.6] M.Dorigo, G. D. Caro and L. M. Gambardella: Algorithms for Discrete Optimization, Artificial Life, **5**(2), 137-172, 1999
- [3.7] 石井一夫: 膜構造の形状解析(形状決定の問題)概説, 膜構造研究論文集, **3**, 83-107, 1989
- [3.8] 本間俊雄, 西村敏雄: 膜構造の形状決定問題, 応用力学シリーズ2, 建築構造物の設計力学と制御力学(日本建築学会編), 4章, pp.89-123, 丸善, 1994
- [3.9] 和田大典, 本間俊雄: 自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.453-460, 2012.31
- [3.10] D.Wada, T.Honma : Structural Morphogenesis for Free Surface Sell Structure with Convexo-Concave Form of Curved Surface -Application of Genetic Algorithms with Diversity of Solution-, Proceeding of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design ALGODE TOKYO 2011, CD-ROM Proceeding, ID20, 2011
- [3.11] 日本建築学会編: 実践優しくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 丸善, 2009
- [3.12] 和田大典, 本間俊雄: 解の多様性を考慮した優良解を探索する遺伝的アルゴリズム系解法と解の多様性, バイオメディカル・ファジィ・システム学会第22回年次大会講演論文集, pp.21-24, 2009.10

第4章

- [4.1] 杉原厚吉, グラフィックスの数理, 共立出版, 1995
- [4.2] D.Wada, T.Honma : Structural Morphogenesis for Free Surface Sell Structure with Convexo-Concave Form of Curved Surface -Application of Genetic Algorithms with Diversity of Solution-, Proceeding of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design ALGODE TOKYO 2011, CD-ROM Proceeding, ID20, 2011

第5章

- [5.1] 新建築社, 新建築2015年9月号, pp.178-184, 2015.9
- [5.2] 日経BP社, 日経アーキテクチャ2015年11月号, pp.70-77, 2015.11
- [5.3] Daisuke Wada, Koichi Tanaka, Toshio Honma : Structural Morphogenesis for Tunnel-Shaped Frame Structure by Using Genetic Algorithms, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016, Tolyo, CD-ROM Proceeding, ID1180, 2016.9
- [5.4] 和田大典, 本間俊雄: 構造形態創生法を活用した鉄骨曲面形態の構造デザイン—遺伝的アルゴリズムを用いたTOTOミュージアム建屋の曲面形状決定と力学検討—, 日本建築学会技術報告集第24巻56号, pp.117-122, 2018.2
- [5.5] 和田大典, 田中浩一: リングアーチ構造を有する円筒形状建物の構造形態創生 TOTO MUSEUMの例, 日本建築学会大会学術講演会(九州), 構造 I, pp.1071-1072, 2016.9
- [5.6] H.Hamada, H.Komatsu, M.Sasaki: Structural Design of the Teshima Art Museum, Proceeding of IASS 2010, pp.555-556, 2010.8

- [5.7] 宮本裕也,和田大典:柱の存在を感じさせない構造システム,鉄構造技術2017年11月号,鋼構造出版, pp.46-48, 2017.11
- [5.8] 永廣正邦,金子明日美,田中浩一,宮本裕也,和田大典,田中成人,高畑聡人:TOTOミュージアム—衛生陶器を思わせる曲線建築を実現した技術—,鉄構造技術2018年6月号,鋼構造出版, pp.48-55, 2018.6
- [5.9] 日本建築学会:アルゴリズム・デザインによる建築形態の現状と展望,第30回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.231-248, 2007.12
- [5.10] 日本建築学会:アルゴリズム・デザイン *Algorithmic Design* 建築・都市の新しい設計法, 鹿島出版, 2009.3
- [5.11] 和田大典,本間俊雄:曲線・曲面の掃引を用いた低層集合住宅形態の計画・試設計—解の多様性を考慮したGA系解法の適用—,バイオメディカル・ファジィ・システム学会第22回年次大会講演論文集,pp.17-20,2009.10
- [5.12] 和田大典,本間俊雄:曲線・曲面の掃引による構造・計画を考慮した低層集合住宅の形態創生,コロキウム構造形態の解析と創生2009,pp.127-132,2009.11
- [5.13] 和田大典,本間俊雄:解の多様性を考慮したGA系解法による低層集合住宅形態のアルゴリズム・デザイン,第32回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集pp.1-6,2009.12
- [5.14] 藤井誠,小佐見友子,本間俊雄,友清貴和:模擬育手法による低層集合住宅の配置決定と已設計例—多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる優良解利用—,第24回ファジィシステムシンポジウム講演論文集pp.480-485,2008
- [5.15] 加世田朋子,小佐見友子,藤井誠,本間俊雄,友清貴和:発想支援システムを用いた低層集合住宅の配置計画・設計手法,日本建築学会研究報告九州支部,第48・3号計画系,pp.41-44,2009.3

第6章

- [6.1] 和田大典, 本間俊雄:部材間の回転角を考慮した目的関数による曲面シェルの構造最適化,日本建築学会大会学術講演会(中国),構造 I, pp.1019-1020, 2017.9
- [6.2] 和田大典, 本間俊雄:部材間の回転角を考慮した目的関数による鉄骨曲面シェル構造の多目的最適化,日本建築学会学術講演会(東北),構造 I, pp.919-920, 2018.9



－学位論文に関連する論文・雑誌掲載・賞歴一覧－

—学位論文に関連する論文・雑誌掲載・賞歴一覧—

審査論文

番 号	論 文 名 称	関連する章
1	和田大典, 本間俊雄: 施工性を考慮した骨組グリッドシェル構造の構造形態創生, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.64B, pp.533-540, 2018.4	第 2 章 第 6 章
2	和田大典, 本間俊雄: 構造形態創生法を活用した鉄骨曲面形態の構造デザイン—遺伝的アルゴリズムを用いた TOTO ミュージウム建屋の曲面形状決定と力学検討—, 日本建築学会技術報告集第 24 巻 56 号, pp.117-122, 2018.2	第 5 章
3	和田大典, 本間俊雄: 自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.453-460, 2012.3	第 3 章 第 4 章
4	和田大典, 本間俊雄: 解の多様性を考慮した GA 系解法による低層集合住宅形態のアルゴリズムック・デザイン, 第 32 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.1-6, 2009.12	第 5 章

口頭発表 (国際シンポジウム)

番 号	論 文 名 称	関連する章
1	D.Wada, K.Tanaka, T.Honma : Structural Morphogenesis for Tunnel- Shaped Frame Structure by Using Genetic Algorithms, The International Association for Shell and Spatial Structures Annual Symposium 2016 (IASS2016), Tokyo, CD-ROM Proceeding, ID1180, 2016.9	第 5 章
2	D.Wada, T.Honma : Structural Morphogenesis for Free Surface Sell Structure with Convexo-Concave Form of Curved Surface -Application of Genetic Algorithms with Diversity of Solution-, Proceeding of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design ALGODE TOKYO 2011, CD-ROM Proceeding, ID20, 2011	第 3 章 第 4 章
3	D.Wada, H.Honma : Structural Morphogenesis for Free Surface Shell Structure by Using Genetic Algorithms with Diversity of Solution, 6 th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, CD-ROM Proceeding, J35(69pages), 2010.6	第 3 章 第 4 章

口頭発表（国内シンポジウム）

番 号	論 文 名 称	関連する章
1	和田大典, 本間俊雄:部材間の回転角を考慮した目的関数による鉄骨曲面シェル構造の多目的最適化,日本建築学会学術講演会(東北),構造 I, pp. 919-920, 2018.9	第 2 章 第 6 章
2	和田大典, 本間俊雄:部材間の回転角を考慮した鉄骨曲面構造の構造形態創生, コロキウム構造形態の解析と創生 2017, (CD-ROM), 2017.10	第 2 章 第 6 章
3	和田大典, 本間俊雄:部材間の回転角を考慮した目的関数による曲面シェルの構造最適化, 日本建築学会大会学術講演会(中国), 構造 I, pp.1019-1020, 2017.9	第 2 章 第 6 章
4	和田大典: リングアーチ構造を有する円筒形状建物の構造形態創生 TOTO MUSEUM の例, 日本建築学会大会学術講演会(九州), 構造 I, pp.1071-1072, 2016.9	第 5 章
5	和田大典, 本間俊雄: 曲線・曲面の掃引による構造・計画を考慮した低層集合住宅の形態創生, コロキウム構造形態の解析と創生 2009, pp.25-30, 2009.11	第 5 章
6	和田大典, 本間俊雄: 曲線・曲面の掃引を用いた低層集合住宅形態の計画・試設計-解の多様性を考慮した GA 系解法の適用-, バイオメディカル・ファジィ・システム学会第 22 回年次大会講演論文集, pp.17-20, 2009.10	第 5 章
7	和田大典, 本間俊雄: 解の多様性を考慮した優良解を探索する遺伝的アルゴリズム系解法と解の多様性, バイオメディカル・ファジィ・システム学会第 22 回年次大会講演論文集, pp.21-24, 2009.10	第 5 章

掲載雑誌

番 号	雑 誌 名 称	関連する章
1	TOTO ミュージアム, 鉄構造技術 2018 年 6 月号,鋼構造出版, pp.48-55, 2018.6	第 5 章
2	TOTO ミュージアム, 鉄構造技術 2017 年 11 月号,鋼構造出版, pp.46-48, 2017.11	第 5 章
3	TOTO ミュージアム,日経アーキテクチャ 2015 年 11 月号,日経 BP 社, pp.70-77, 2015.11	第 5 章
4	TOTO ミュージアム,新建築 2015 年 10 月号,新建築社, pp.178-185, 2015.10	第 5 章

賞歴

番 号	名 称	関連する章
1	TOTO ミュージアム, 2017 年度第 58 回 BCS 賞, 一般財団法人 日本建設業連合会	第 5 章
2	コロキウム構造形態の解析と創生 2010 形態創生コンテスト, 入選	第 5 章

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

— 付録 —

付録 A

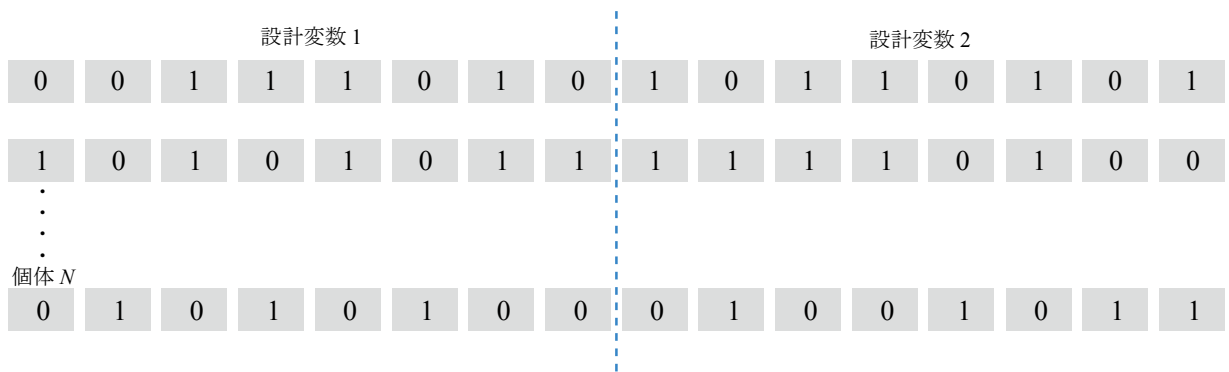
GA の基本的な計算アルゴリズムと数値特性

自然界では生物同士の激しい生存競争が行われている。より環境に適合した生物は生き残り、適合できない生物は死滅する。また、生き残った生物は同一種の生物集団の中で生殖活動を行い、次世代へ遺伝子を受け継がせていく。つまり、生存競争に勝利した生物のみ自分の遺伝子を残すことができ、生存競争に敗れた生物の遺伝子は次世代に受け継がれることなく消滅する。優れた親同士により生まれた子は優れた親の遺伝子を受け継ぎ、生存環境下において適合性はより高いものになる。また、突然変異により優れた生物が生まれる可能性もある。こうして、生物集団の中で優秀な遺伝子は繁栄し、環境に適合しない遺伝子は淘汰されることで生物集団の進化が行なわれる。遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm: GA) はこの Darwin の進化論に基づく生物集団の環境に対する適応的な進化の過程を工学的に模倣した演算システムである。以下では第3章で説明した各遺伝的アルゴリズム系解法に共通する基本的な計算アルゴリズムの詳細を示す。また、本研究で使用した各解法の数値特性を把握するため、2変数関数を用いたベンチマーク問題を行いその特徴をまとめる。

A. 1 初期個体群の生成

GAでは初期個体群の個体の遺伝子を乱数により生成する。その際、本研究では0と1の配列で構成された二進数により遺伝子を表現する。個体数 N , 遺伝子長 L とすると、乱数を L 回発生させて各遺伝子座に数値を代入する。これが遺伝子型となり、一つの設計変数を構成する。設計変数が複数存在する場合はそのまま連ねて遺伝子長を大きくする。図A. 1に初期個体群の生成例を示す。

設計変数 : 2 遺伝子長 : $L = 8 \times 2 \text{ bit}$ の場合



図A.1 初期個体群

A. 2 コーディング

上述したように各個体の遺伝子は0と1の二進数で表現する(GTYPE)。GTYPEはさらに表現型であるPTYPEへコーディングされる。その際、2進法を用いた方法としてバイナリ表現とグレー表現がある。

バイナリ表現

バイナリ表現は、生成されGTYPEを直接2進法で計算し、整数値にする方法である。図A.2にバイナリ表現による計算例を示す。

遺伝子長 : $L=8bit$ の場合

0	0	1	1	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

$$\text{表現型} : 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^1 = 58$$

図A.2 バイナリ表現

グレー表現

グレー表現は変換則に従ってバイナリ表現に変換し、2進法による計算を用いる。 n ビットで表現された遺伝子 A において、 A の i 番目の遺伝子座を A_i とすると、グレー表現では次の変換則が成立する。

$$A_i = \begin{cases} 1 & \text{if } A_i \neq A_{i-1} \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

なお、 $A_0=0$ とする。これよりグレー表現は図A.3のように計算される。バイナリ表現とグレー表現の大きな違いはバイナリ表現は遺伝子座に1が多く存在する方が大きな値を示すのに対し、グレー表現は0と1のランダムな配列で大きな値が表現できる点である。したがって、ランダム探索を行うGAでは、グレー表現を用いた方が発見的に設計変数空間上の端の解も容易に捉えることが可能であり、バイナリ表現に比べて解が収束しやすい。そのため、本研究ではグレー表現を採用している。

遺伝子長 : $L=8bit$ の場合

グレー表現	0	0	1	1	1	0	1	0
-------	---	---	---	---	---	---	---	---



バイナリ表現	0	0	1	0	1	1	0	0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---

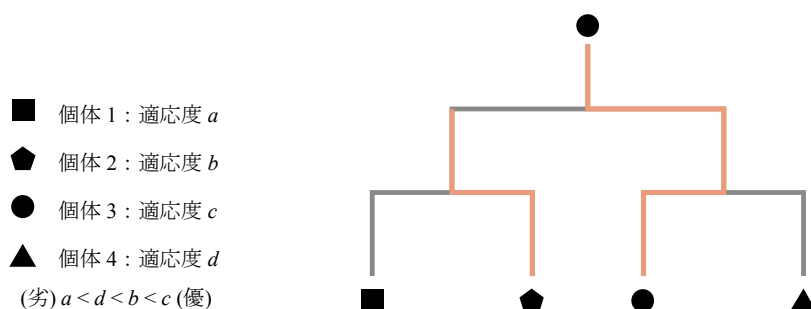
$$\text{表現型} : 2^5 + 2^3 + 2^2 = 44$$

図A.3 グレー表現

A. 3 選択方式

トーナメント方式

トーナメント方式は、集団の中からランダムに選ばれた個体 S_t 個の適応度の優劣を用いてトーナメントを行う。結果、ランダムに選ばれた個体の中で最も適応度が高い個体を選択する方法である。図A. 4はサイズ: $S_t=4$ の時のトーナメント方式を示した図である。

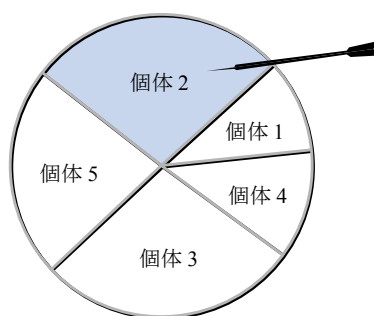


図A.4 トーナメント方式

ルーレット方式

ルーレット方式は、個体の適応度の比例した割合でルーレットの領域を決定し、ルーレットを回して当たった領域の個体を選択する。適応度が高い個体ほど領域が広く設定され、選択されやすくなる。図A. 5に個体数5とした時のルーレット方式の模式図を示す。

個体1: 適応度 a
 個体2: 適応度 b
 個体3: 適応度 c
 個体4: 適応度 d
 個体5: 適応度 e
 (劣) $a < d < e < b < c$ (優)



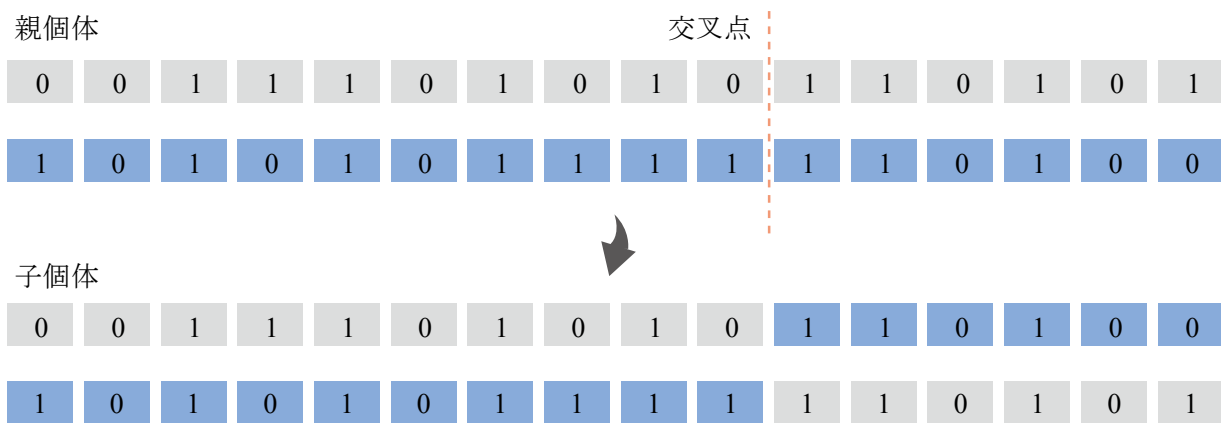
図A.5 ルーレット方式

A. 4 交叉

交叉は選択で選ばれた親個体間の遺伝子を組み換えて子個体の遺伝子を生成する作業である。交叉は選択された親個体2つの遺伝子内に交叉点を設け、その前後の遺伝子を組み換える。なお、交叉点は毎回ランダムに設定される。交叉方法は交叉点の数により一点交叉、二点交叉、一様交叉の3種類が一般的である。以下にその詳細を示す。

一点交叉

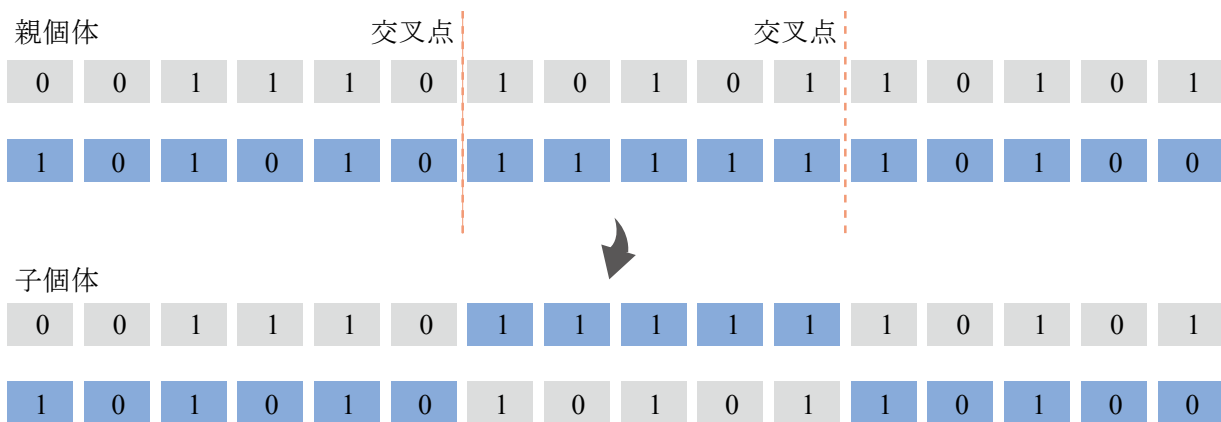
一点交叉は交差点を一点設定し、2個体間の遺伝子を組み換える方法である。図A. 6にその方法を示す。



図A.6 一点交叉

二点交叉

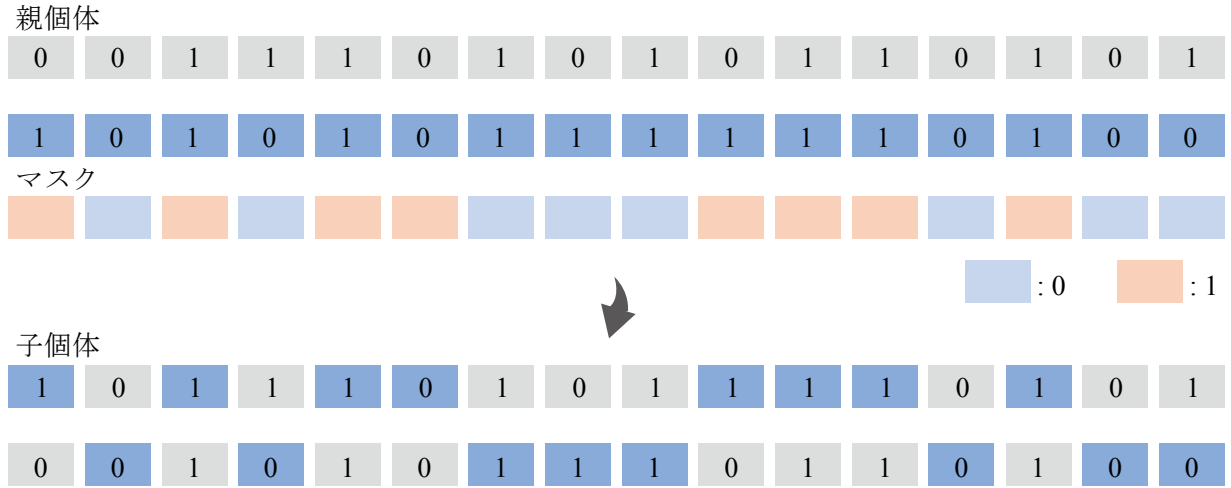
二点交叉は2個体の遺伝子に交差点を二点設定し、交叉点の間の遺伝子を組み換える方法である。図A. 7にその方法を示す。本研究ではこの方法を採用している。



図A.7 二点交叉

一様交叉

一様交叉は、交叉の際ランダムに発生させた0と1のマスクをかけて、どちらの親個体の遺伝子を受け継がせるかを決定する方法である。図A. 8にその方法を示す。図A. 8ではランダムに発生させたマスクに対し、マスクが0の場合はその遺伝子座を組み換えず、マスクが1の時はその遺伝子座を組み換えて子個体を生成する。



図A.8 一様交叉

A. 5 突然変異

突然変異は交叉により得られた子個体の遺伝子を一定確率で変化させる操作である。この確率のことを突然変異率という。交叉により生成される子個体は親個体の遺伝子の組み合わせに支配されるため、解の多様性に限界が生じてしまう。そのため、遺伝子の一部を無作為に変化させることで解の多様化を図る。一般に突然変異率は遺伝子長さの逆数により設定する。これは毎世代全ての個体の遺伝子長さの中から一つの遺伝子座を突然変異させることになる。図A. 9に突然変異による遺伝子の変換を示す。一個体の遺伝子長を L bit、個数を n とすると突然変異はすべての遺伝子長 $L \times n$ bitの中から突然変異率に基づいて遺伝子座をランダムに決定し、遺伝子座の値が0なら1へ、1なら0に変換する。

遺伝子長 : $L = 16$ bit, $n=3$, 突然変異率 0.06 の場合

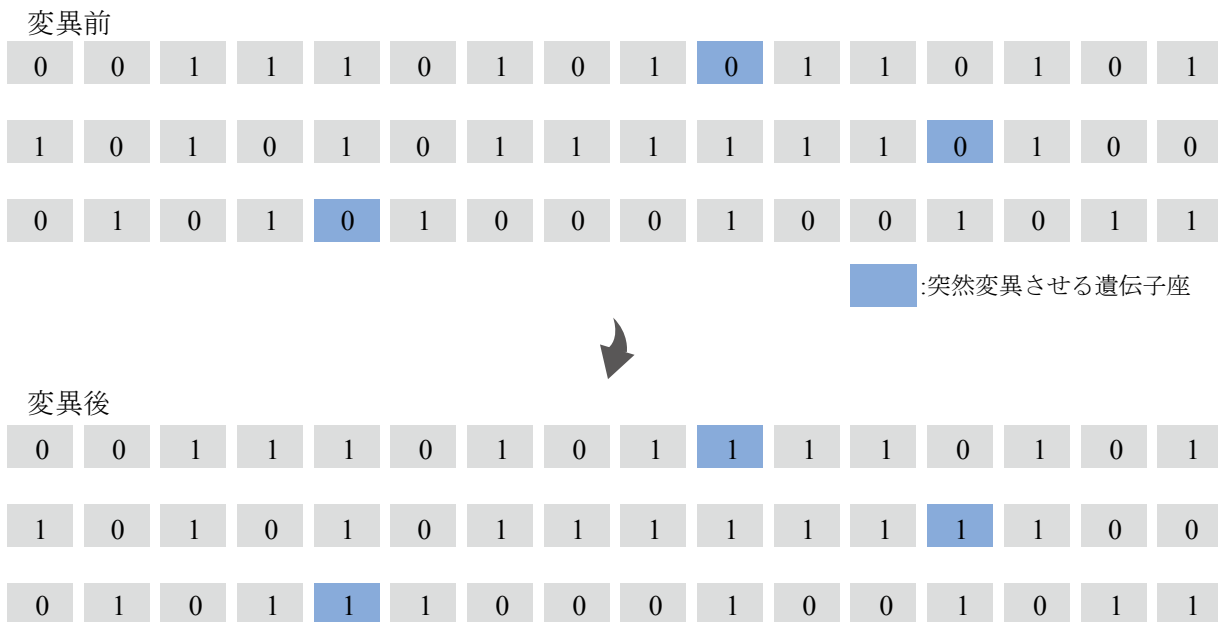


図 A.9 突然変異

A. 6 2 変数関数を用いたベンチマーク問題

ベンチマーク問題に用いる 2 変数関数を式(A.2)―(A.4)に示す。単一目的最適化に用いる単純曲面関数と sin-cos 関数は式(A.2),(A.3)で与えられる。多目的最適化に用いる平面関数は式(A.4)である。なお、図 A.10 に示す各関数の解空間の状況から、多目的最適化に用いる式(A.2),(A.4)はトレードオフの関係があることが分かる。

1)単純曲面関数

式(A.1)は単峰性の単純曲面を有する関数である。解空間状況を図 A.10a に示す。

$$f_1(x, y) = -\{x(x-20) + y(y-20)\} \quad (0.0 \leq x, y \leq 20.0) \quad (\text{A.2})$$

2)sin-cos 関数

式(A.2)は多峰性を有する関数である。解空間状況を図 A.10b に示す。

$$f_2(x, y) = x + y + 4(\sin x + \cos y) + 1 \quad (0.0 \leq x, y \leq 20.0) \quad (\text{A.3})$$

3)平面関数

式(A.3)は平面形状を有する関数である。解空間状況を図 A.10c に示す。

$$f_3(x, y) = -20 - x - y \quad (0.0 \leq x, y \leq 20.0) \quad (\text{A.4})$$

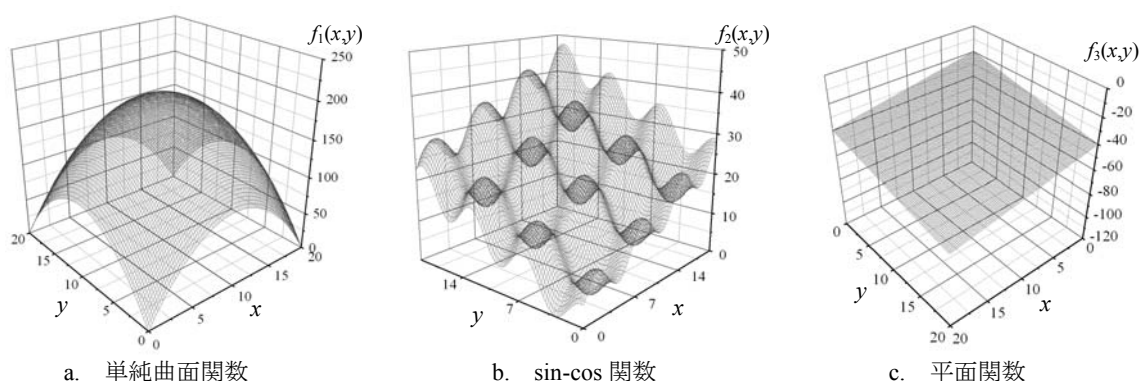


図 A.10 2 変数関数

A. 7 単一目的最適化問題

関数 $f_1(x,y), f_2(x,y)$ の最大化を目標とした単一目的最適化問題に SGA, ISGA を適用する。最適化問題は次式で定式化される。

$$\begin{aligned}
 & \textit{Find} && x,y \\
 & \textit{to maximize} && f_1(x,y) \quad \text{or} \quad f_2(x,y) && (\text{A.5a,b,c}) \\
 & \textit{subject to} && (0.0 \leq x,y \leq 20.0)
 \end{aligned}$$

A. 7. 1 解析パラメータ

SGA と ISGA の基本的な解析パラメータを表 A.1,2 に示す。ISGA 特有のパラメータであるグループ数 r と上位個体選択率 H は $r=10, H=0.01, 0.1, 0.2, 0.3$ とする。

表 A. 1 SGA パラメータ

個体数	200	遺伝子長	16 x 2 bit
世代数	200	coding	gray表現
世代交代率	1.0	選択方式	トーナメント方式
交叉率	1.0	交叉方式	二点交叉
突然変異率	0.01	—	—

表 A. 2 ISGA パラメータ

個体数	200	記憶細胞数	100
世代数	200	遺伝子長	16 x 2 bit
世代交代率	1.0	coding	gray表現
交叉率	1.0	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.01	交叉方式	二点交叉

A. 7. 2 数値結果

各関数の数値結果を図 A.11,12 に示す。図 A.11,12 は各試行結果の最終世代で得られた解を解空間上にプロットしたものである。なお、図中黒丸●は SGA の結果を橙丸●は ISGA の結果を示す。

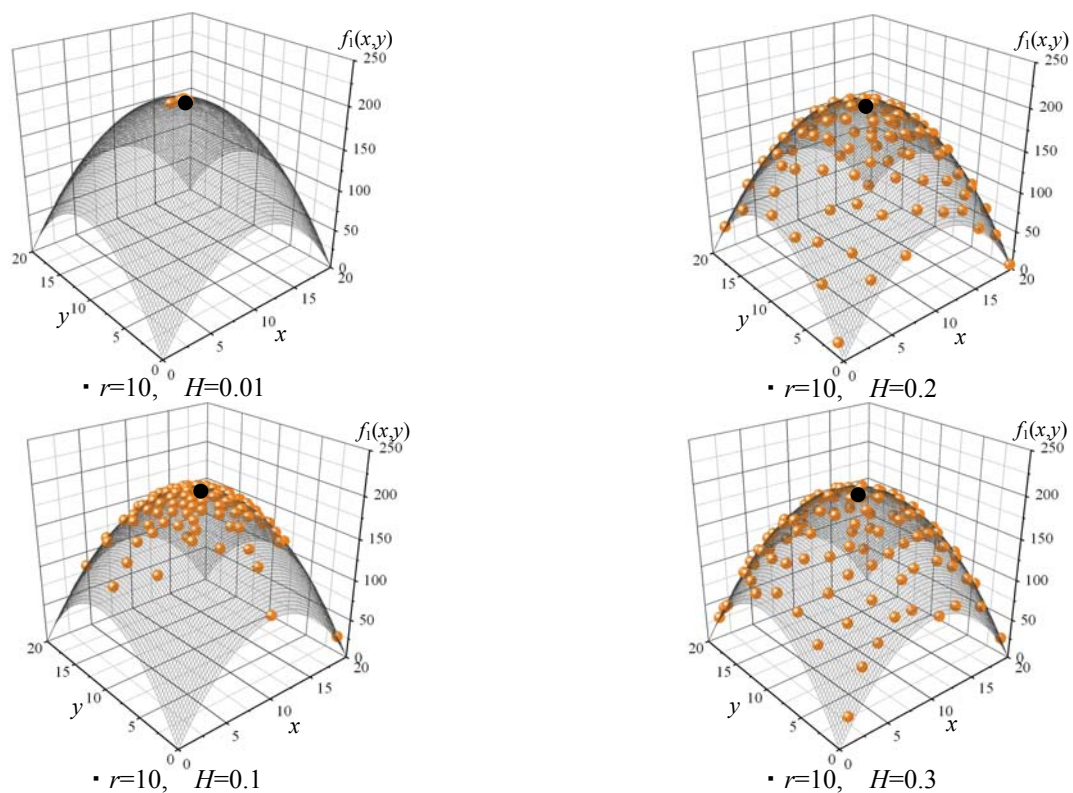


図 A.11 SGA,ISGA の数値結果($r=10$) $f_1(x,y)$

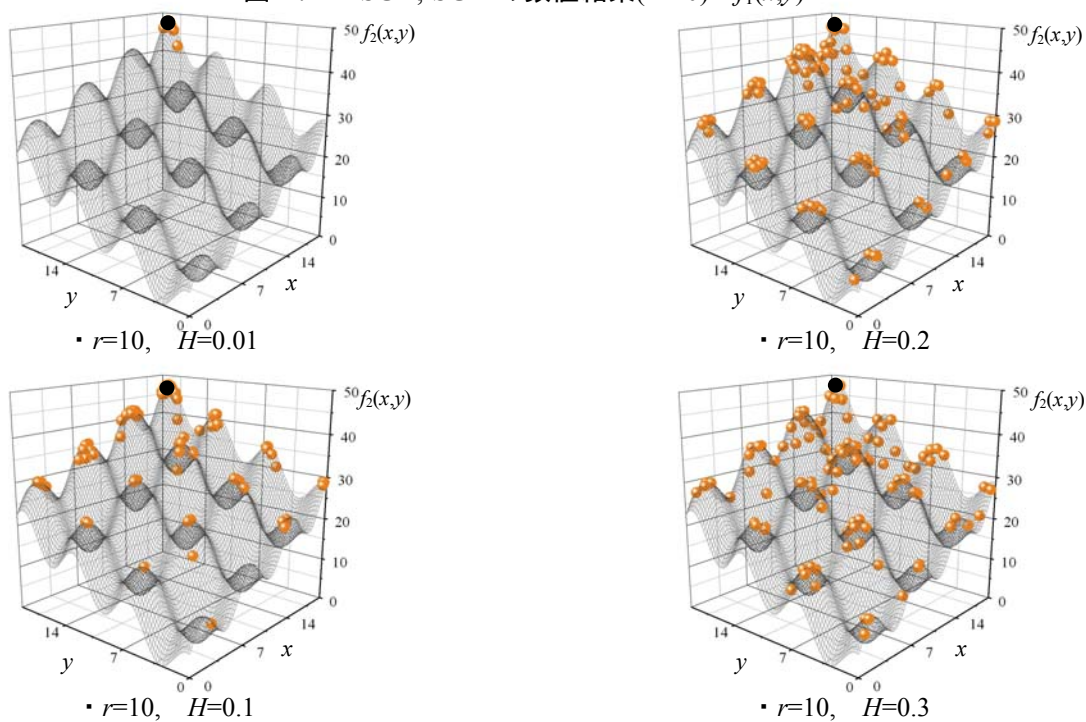


図 A.12 SGA,ISGA 数値結果($r=10$) $f_2(x,y)$

A. 8 多目的最適化問題

関数 $f_1(x,y), f_3(x,y)$ の最大化を目標とした多目的最適化問題に SPEA2, ISGA を適用する。最適化問題は次式で定式化される。

$$\begin{array}{ll}
 \textit{Find} & x,y \\
 \\
 \textit{to maximize} & f_1(x,y) \\
 & f_3(x,y) \\
 \textit{subject to} & (0.0 \leq x,y \leq 20.0)
 \end{array}
 \tag{A.6a,b,c}$$

A. 8. 1 解析パラメータ

SPEA2 と ISGA の基本的な解析パラメータを表 A.3,4 に示す。ISGA 特有のパラメータであるグループ数 r と上位個体選択率 H は $r=10, H=0.01, 0.1, 0.2, 0.3$ とする。

表 A. 3 SPEA2 パラメータ

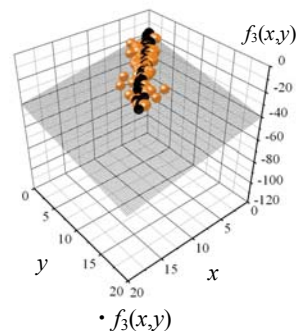
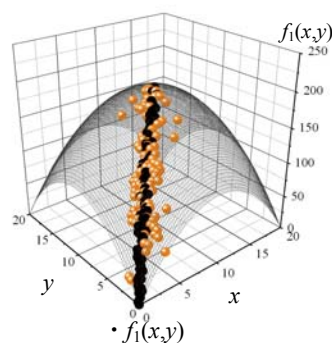
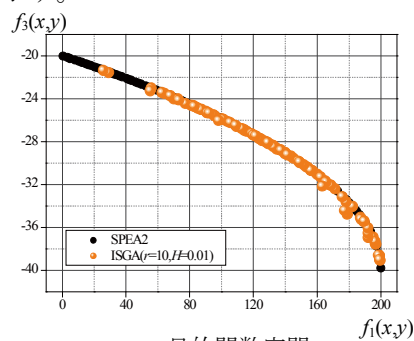
個体数	200	アーカイブ個体群	100
世代数	200	遺伝子長	16 x 2 bit
世代交代率	1.0	coding	gray表現
交叉率	1.0	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.01	交叉方式	二点交叉

表 A. 4 ISGA パラメータ

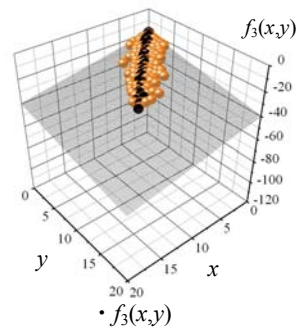
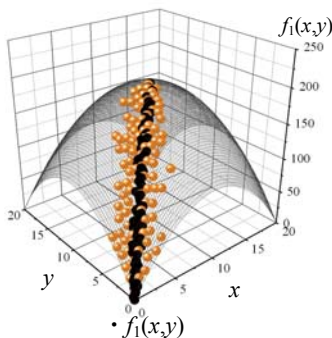
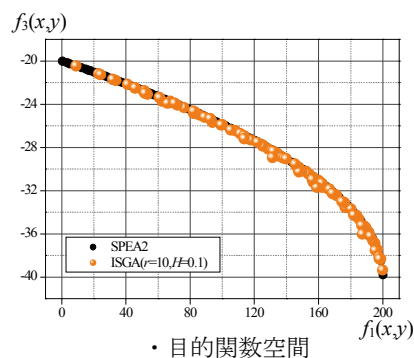
個体数	200	記憶細胞数	100
世代数	200	遺伝子長	16 x 2 bit
世代交代率	1.0	coding	gray表現
交叉率	1.0	選択方式	トーナメント方式
突然変異率	0.01	交叉方式	二点交叉

A. 8. 2 数値結果

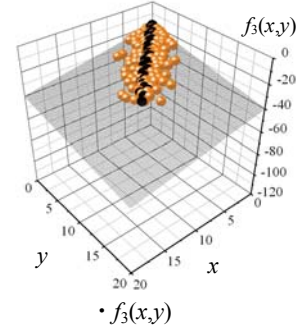
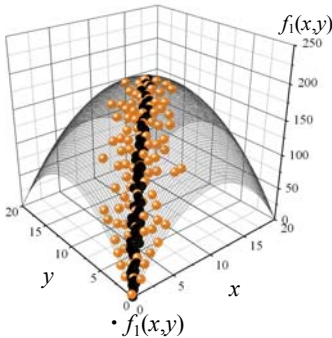
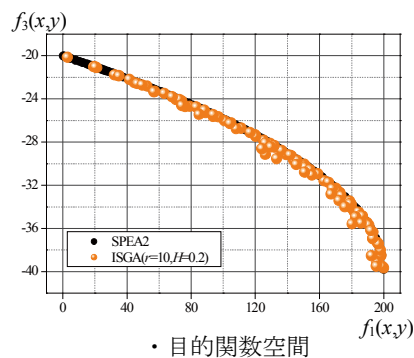
数値結果を図 A.13 に示す。図 A.13 は各試行結果の最終世代で得られた解を目的関数空間と設計変数空間上にプロットした図である。なお、図中黒丸●は SPEA2 の結果を橙丸●は ISGA の結果を示す。



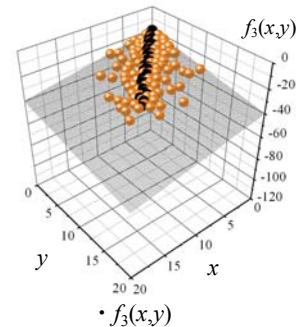
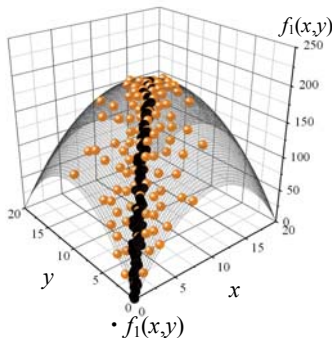
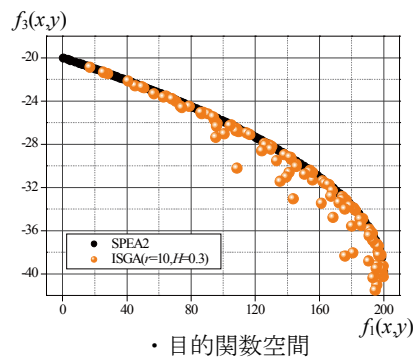
a. $r=10, H=0.01$



a. $r=10, H=0.1$



a. $r=10, H=0.2$



a. $r=10, H=0.3$

図 A.13 SPEA2,ISGA 数値結果($r=10$)

A. 9 数値特性

SGA

SGA は単一目的最適化に適用可能な解法である。SGA は一般的な遺伝的アルゴリズムの設定パラメータ以外は特別な設定値を与える必要がなく、種々の問題に汎用可能である。数値結果より、SGA は目的関数空間上の最大値となる大域的最適解を捉える。また、sin-cos 関数のような多峰性を有する複雑な解空間においても、局所解に陥ることなく大域的最適解を捉える。なお、今回は 1 回の試行結果しか示していないが、SGA は試行回数に限らず、同一解に収束しやすい傾向がある。

SPEA2

SPEA2 は多目的最適化に適用可能な解法である。各世代において評価の高い解を保存するアーカイブ個体群の設定以外は他の GA 系解法と同様のパラメータ設定となる。数値結果より、SPEA2 により得られたアーカイブ個体群は目的関数空間パレート最適フロント上の解を捉える。また、得られた解は目的関数空間上の広い範囲に分布する。これは SPEA2 が目的関数空間上での解の多様性に重点を置いておいているためである。そのため、設計変数空間上での解の位置は局所的な範囲となる傾向がある。

ISGA

ISGA は単一・多目的最適化の両方に適用可能な解法である。ISGA は GA 系解法の設定パラメータに加え、グループ数 r と上位個体選択率 H の設定により種々の解を捉える。単一目的最適化について、今回の試行結果では上位個体選択率を厳しく設定した場合($H=0.01$)、ISGA は大域的最適解を捉え、SGA で得られた解と一致する。 H の値を 0.1, 0.2, 0.3 と大きくすることで解空間上の広い範囲で大域的最適解近傍の優良解を探索する。特に、sin-cos 関数の最大化問題では、 $r=10$, $H=0.1$ と設定することで全ての峰の頂上の解を捉えることを確認している。つまり、ISGA は複雑な解空間を有する問題でも、グループ数 r と上位個体選択率 H の設定値により優良解が探索可能であることを意味する。なお、今回の試行においてグループ数 r は定値としたが、 r の設定値を変更すれば捉える優良解の範囲を制御することも可能である。

多目的最適化について ISGA は $H=0.01$ と設定すればパレート最適フロント上の解を捉え、その結果は SPEA2 で得られたパレート最適フロントと一致する。 H の値を大きく設定するとパレート最適フロント近傍の優良解を捉える。特に、設計変数空間上での解の位置関係に着目した場合、ISGA は設計変数空間上の広い範囲で解と捉えていることが確認できる。これは ISGA が目的関数空間上での解の多様性に加え、設計変数空間上での解の多様性にも重点を置いておいているためである。つまり、ISGA は同一目的関数値で設計変数の異なる解を同時に探索可能である。なお、グループ数 r と上位個体選択率 H の設定値は決まった組み合わせがあるわけではなく、各問題に応じて数値スタディを行い、最適な設定を求める必要がある。特に、上位個体選択率 H は設計変数空間上での解の多様性に大きく関係し、設定値によっては解が完全に収束しないこともあるため、注意を要する。

付録 B

測地線形状との比較

ここでは第 2 章 7 節で提案した製作・施工性に関する評価指標を用いて得られた第 6 章で得られた解形態と左記の解形態を基準に得られた測地線形状との比較を行う。比較形状は第 6 章で得られた Model-A を初期形状とする部材間の回転角最小化により得られた解個体とする。以下ではまず、測地線形状を探索する構造最適化問題の定式化を行い、測地線形状の探索を行う。次に、得られた解形状の力学性状や部材間の回転角に関する式(2.7.12)－(2.7.14)の比較を行い、形態的特徴を考察する。

B. 1 解析モデル

数値解析に用いる解析モデルを図 B.1 に示す。解析モデルは全 5 ケースであり、第 6 章 2 節 2 項 3 目で得られた form-H,K,O,P,U であり、設計条件は同一条件とする。設計変数は同一曲面形状で測地線により表現された曲面形状を得ることを目的に形状に関する u,v パラメータを設計変数とする。なお、図 B.1(f)において黒丸で示した点が形状に関する設計変数の設定位置であり、曲面境界部の節点は不動点とする。したがって、測地線は境界部の曲線フレームを除くフレーム部を対象とする。したがって、設計変数の総数は対称性を考慮して 20(形状 : 20)であり 16x20bit の二進数でコード化する。材料は SN490B を想定し、弾性係数 $E=2.05 \times 10^8 [kN/m^2]$ 、せん断弾性係数 $G=7.8 \times 10^7 [kN/m^2]$ とする。

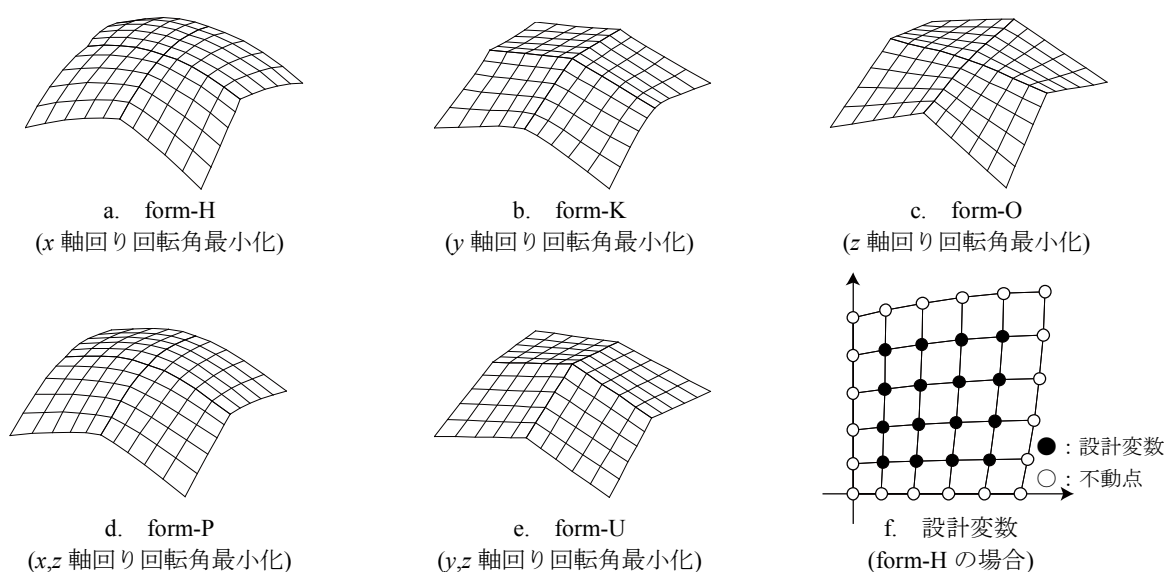


図 B.1 解析モデル

B. 2 解析パラメータ

解の更新を行う GA 系解法は SGA を用いる。解析パラメータを表 B.1 に示す。各モデルとも基本的な GA パラメータは同一とする。

表 B. 1 SGA パラメータ

個体数	100	制御点の遺伝子長(形状)	16 x 20 <i>bit</i>
世代数	20000	coding	gray表現
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント方式
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉
突然変異率	0.002	—	—

B. 3 測地線形状を探索する構造最適化問題の定式化

測地線形状の探索は測地線の定義の一つである最短曲線の定義を利用する。ある曲面形状内におけるに転換を結ぶ測地線の一つは二点を結ぶ最短形状曲線である。このことから、ある曲面形状内において二点を結ぶ曲線長さが各々最小となる曲面形状を構造最適化により探索する。最適化問題は式(B.1)–(B.4)で与える。

$$\text{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \quad (\text{B.1})$$

$$\text{to minimize} \quad f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \sum_{j=1} l_j \quad (\text{高さ制約}) \quad (\text{B.2})$$

$$\text{subject to} \quad l_j = l_{\min} \quad (\text{B.3})$$

$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (\text{側面制約}) \quad (\text{B.4})$$

$$\mathbf{A}^L = [\mathbf{A}_1^L \quad \mathbf{A}_2^L \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^L] \quad \mathbf{A}^U = [\mathbf{A}_1^U \quad \mathbf{A}_2^U \quad \dots \quad \mathbf{A}_{60}^U]$$

$$\mathbf{R}^L = [\mathbf{R}_x^L \quad \mathbf{R}_y^L] \quad \mathbf{R}^U = [\mathbf{R}_x^U \quad \mathbf{R}_y^U]$$

ここで、 \mathbf{R} : 節点情報ベクトル(有限要素節点座標値), \mathbf{A} : 断面情報ベクトル(要素断面), l_j : j 要素の部材長, l_{\min} : 部材長の制約値, $\mathbf{R}_x^L, \mathbf{R}_y^L, \mathbf{R}_x^U, \mathbf{R}_y^U$: 形状に関する設計変数 u, v の側面制約条件であり $\mathbf{R}_x^L = \mathbf{R}_y^L = 0.0, \mathbf{R}_x^U = \mathbf{R}_y^U = 1.0, \mathbf{A}^L, \mathbf{A}^U$: 断面に関する設計変数の側面制約条件であり $\mathbf{A}^L = 1.0, \mathbf{A}^U = 7.0$ である。なお、側面制約条件は曲面形状を表現するテンソル積ベジェ曲面の u, v パラメータである。したがって曲面形状は変わらず曲面形状内での格子フレームの位相情報のみ変動する。また、ここでは形状の違いによる応力性状を比較することを目的に部材断面は初期形状のままとする。

B. 4 解析結果

解析結果を図 B.2-6 に示す。図 B.2-4 は図 B.1 を初期形状とする各試行において最終世代で得られた最も評価の高い解形状である。比較のため初期形状の総部材長と、測地線形状を探索したフレームにおける部材間の回転角に対する式(2.7.12)–(2.7.14)の値を示す。また、重ね図は黒線が初期形状、赤線が最適化形状を。軸力図は赤線が圧縮を青線が引張を示し、線の太さが応力値の比率を表す。図 B.5,6 は部材間の回転角に対する式(2.7.12)–(2.7.14)の値を示した図である。図中横軸は要素番号、縦軸は回転角の評価値である。

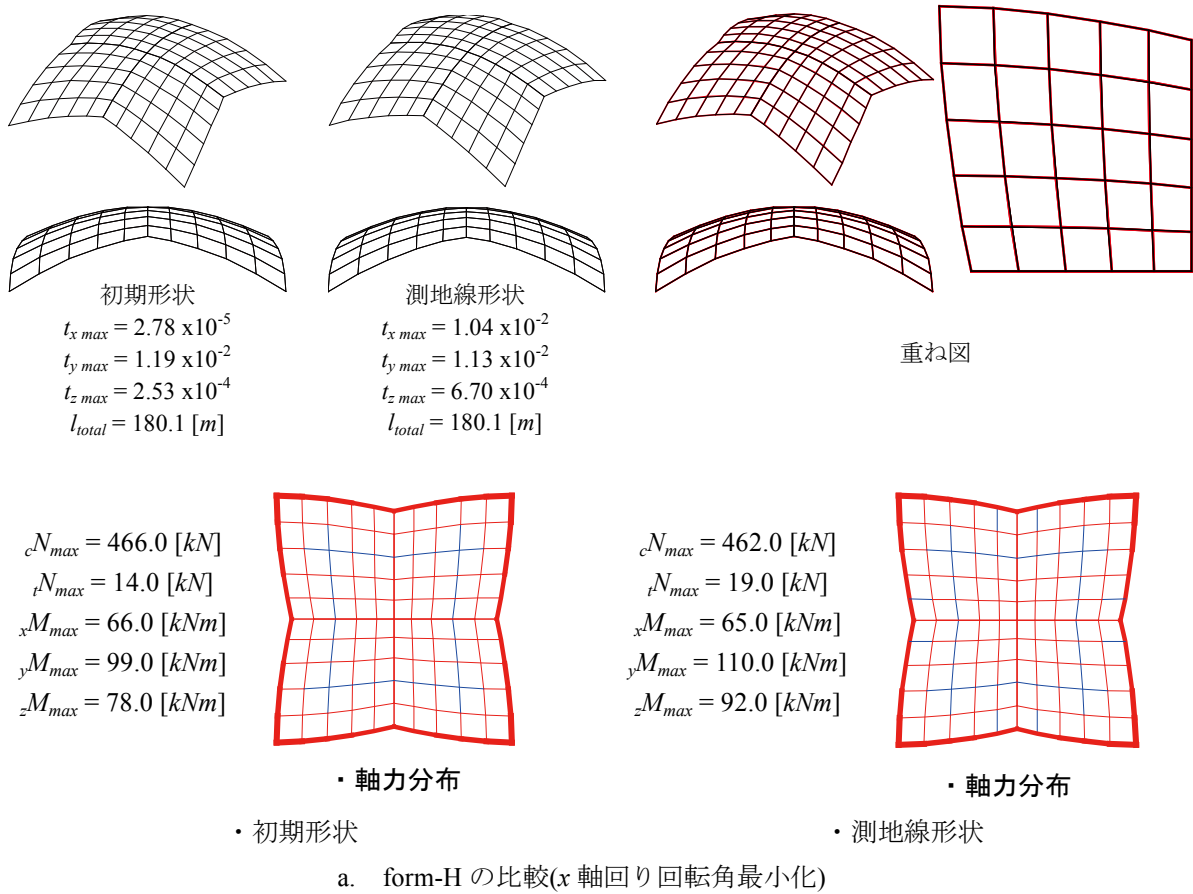
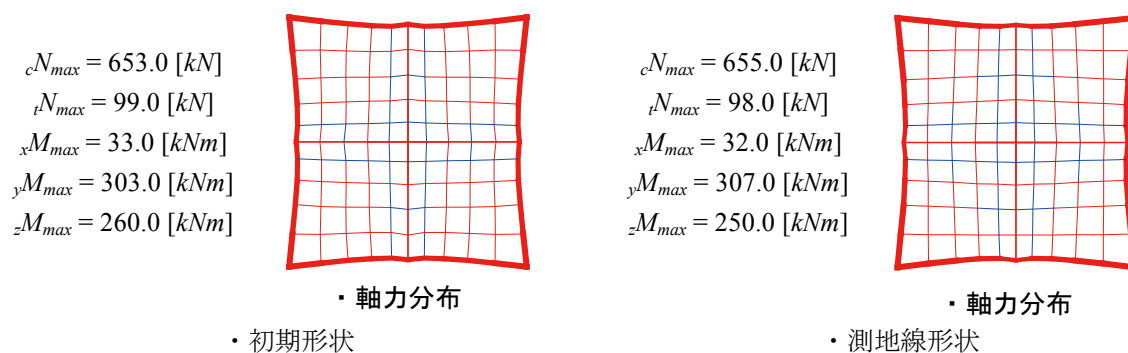
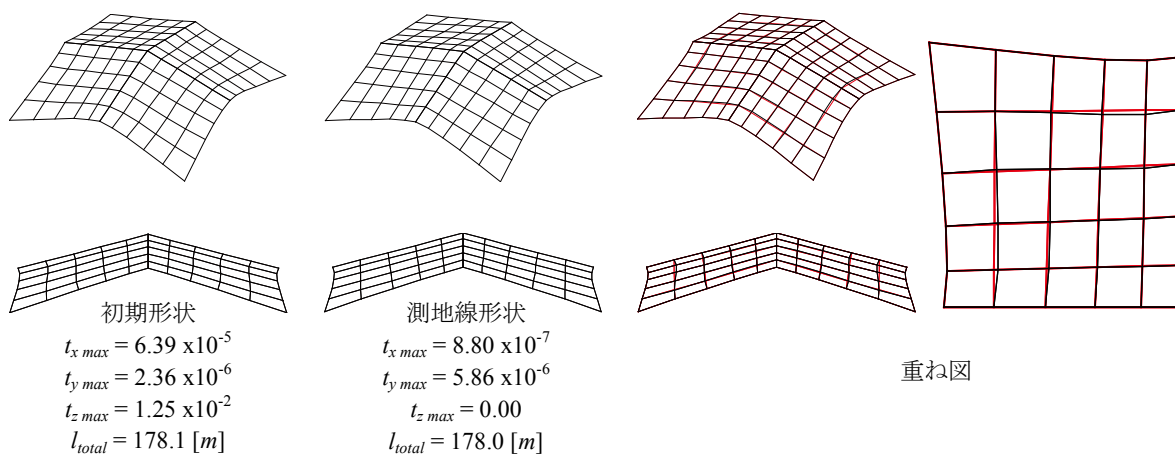
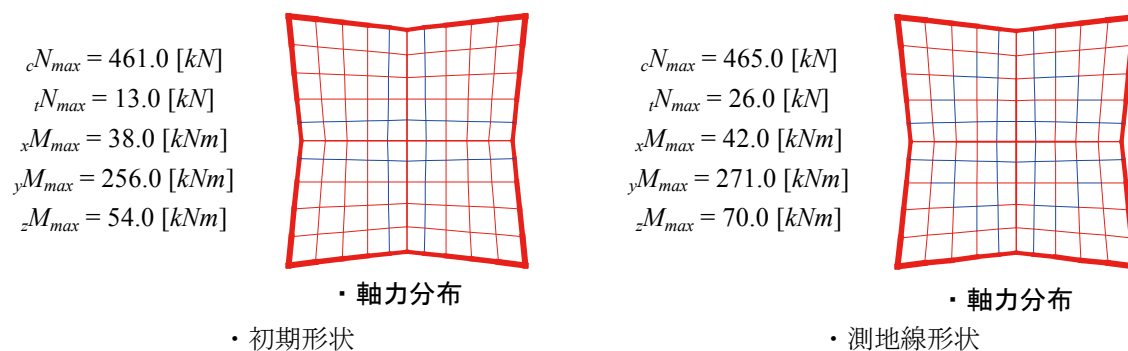
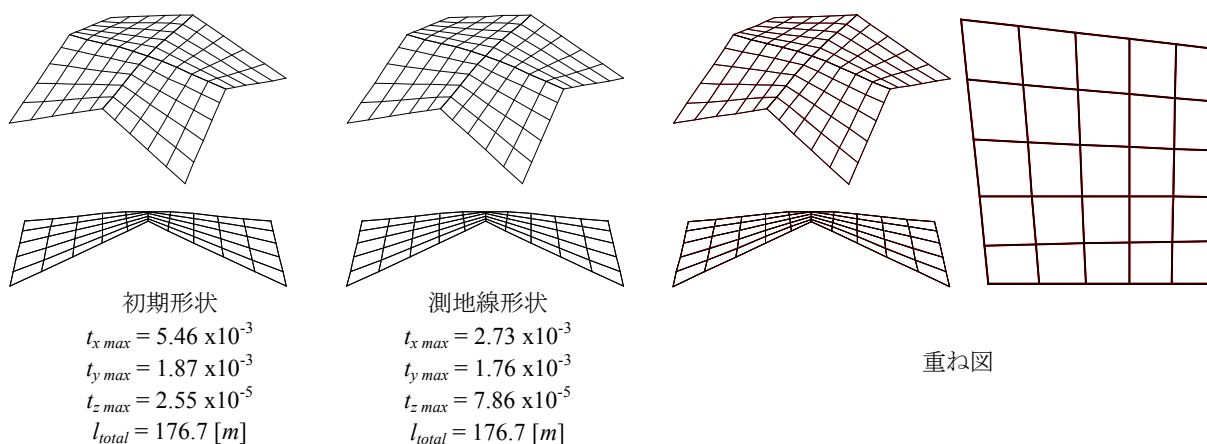


図 B.2 解析結果

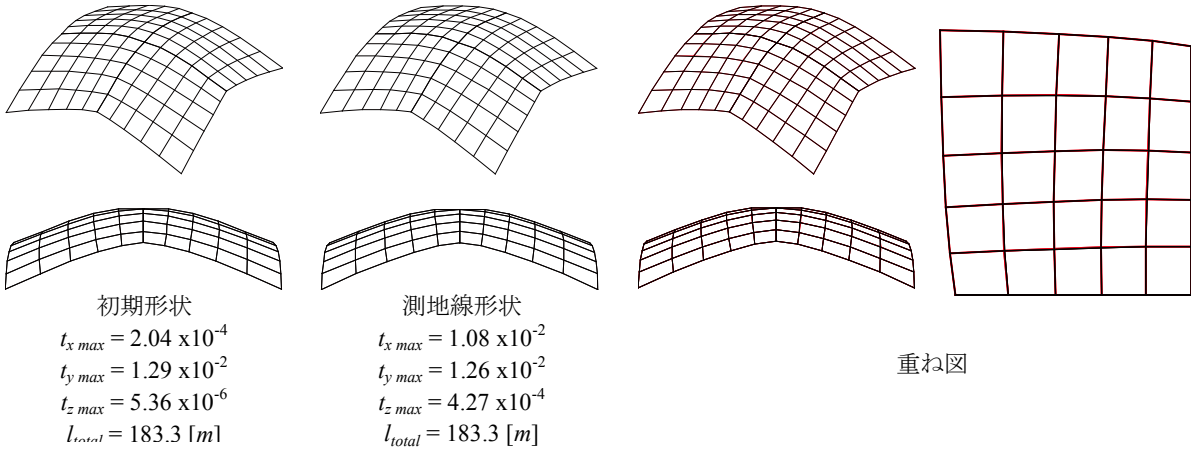


a. form-K の比較(y 軸回り回転角最小化)



b. form-O の比較(z 軸回り回転角最小化)

図 B.3 解析結果



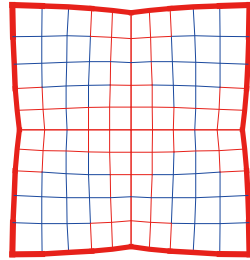
$$cN_{\max} = 510.0 [kN]$$

$$tN_{\max} = 21.0 [kN]$$

$$xM_{\max} = 53.0 [kNm]$$

$$yM_{\max} = 67.0 [kNm]$$

$$zM_{\max} = 51.0 [kNm]$$



・軸力分布

・初期形状

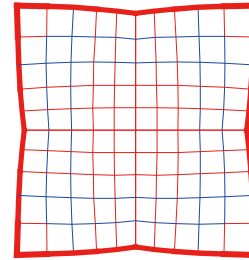
$$cN_{\max} = 547.0 [kN]$$

$$tN_{\max} = 24.0 [kN]$$

$$xM_{\max} = 53.0 [kNm]$$

$$yM_{\max} = 125.0 [kNm]$$

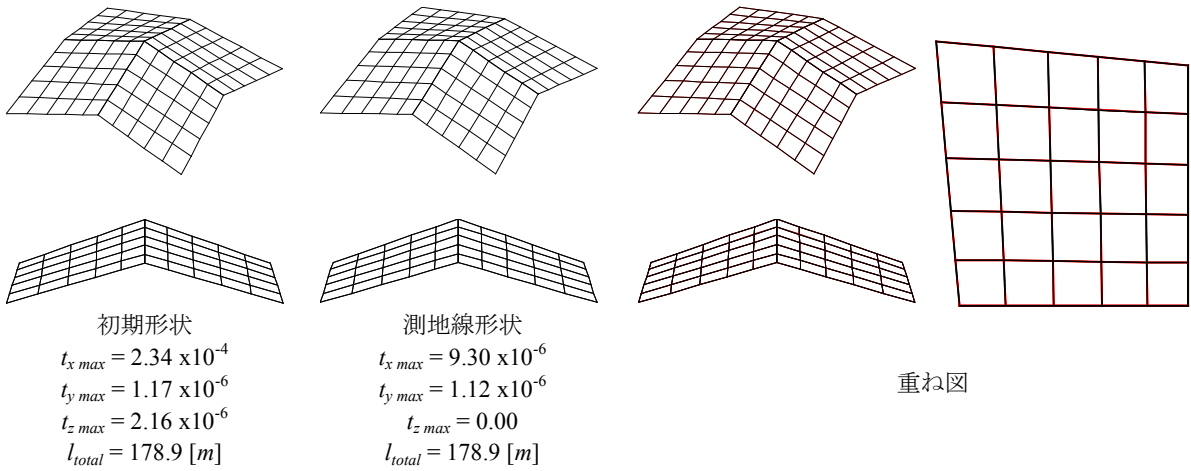
$$zM_{\max} = 53.0 [kNm]$$



・軸力分布

・測地線形状

a. form-P の比較(x,z 軸回り回転角最小化)



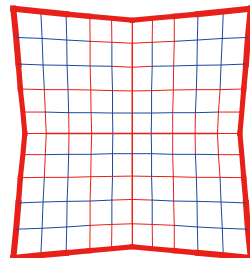
$$cN_{\max} = 734.0 [kN]$$

$$tN_{\max} = 16.0 [kN]$$

$$xM_{\max} = 26.0 [kNm]$$

$$yM_{\max} = 235.0 [kNm]$$

$$zM_{\max} = 67.0 [kNm]$$



・軸力分布

・初期形状

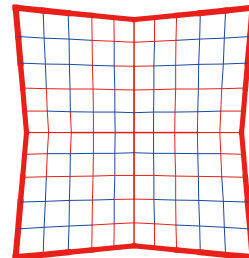
$$cN_{\max} = 733.0 [kN]$$

$$tN_{\max} = 16.0 [kN]$$

$$xM_{\max} = 27.0 [kNm]$$

$$yM_{\max} = 232.0 [kNm]$$

$$zM_{\max} = 68.0 [kNm]$$

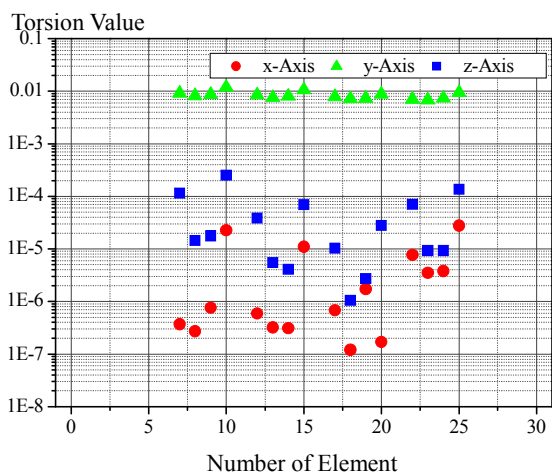


・軸力分布

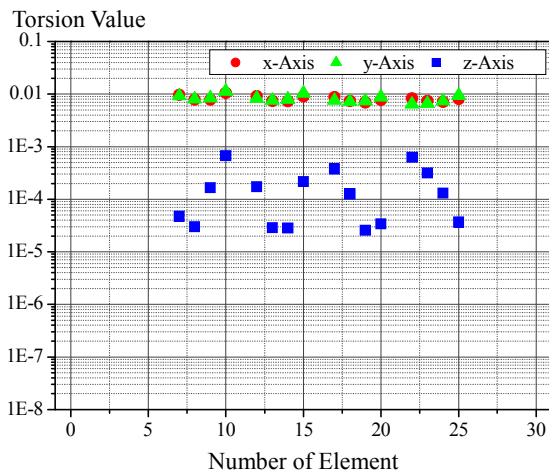
・測地線形状

b. form-U の比較(y,z 軸回り回転角最小化)

図 B.4 解析結果

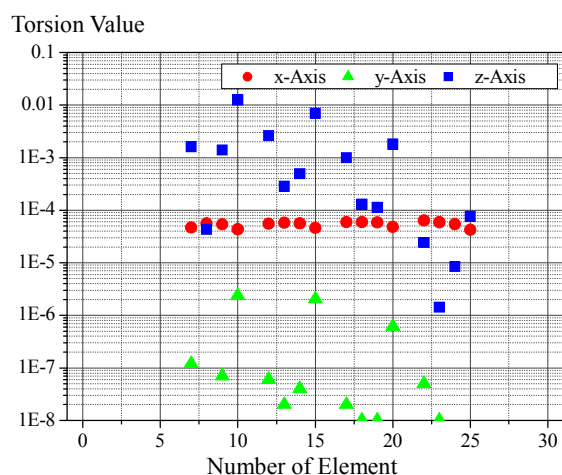


・初期形状

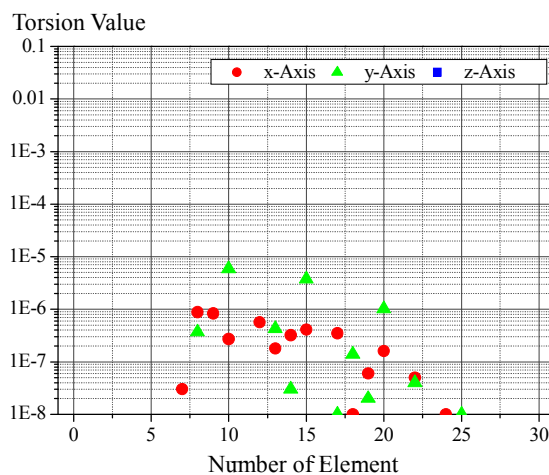


・測地線形状

a. form-H の比較(x 軸回り回転角最小化)

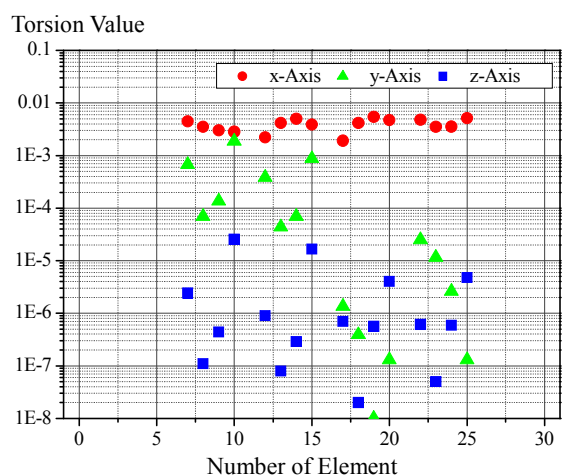


・初期形状

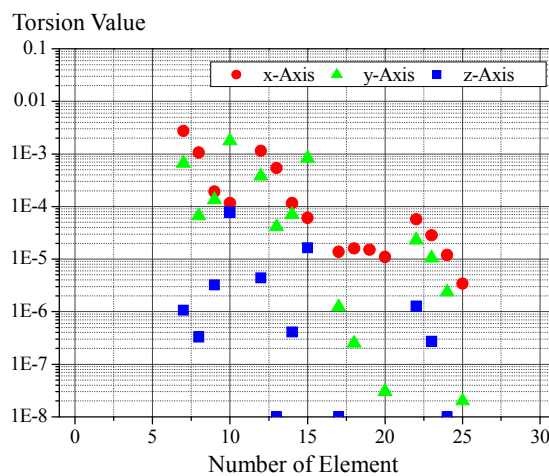


・測地線形状

b. form-K の比較(y 軸回り回転角最小化)



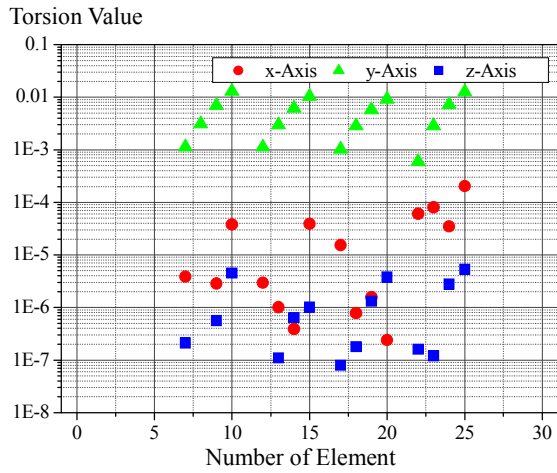
・初期形状



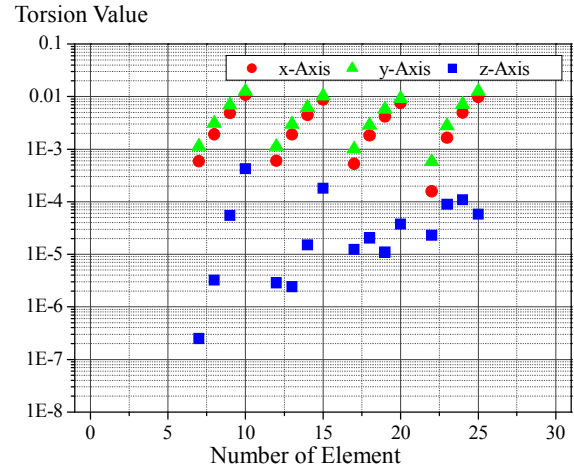
・測地線形状

c. form-O の比較(z 軸回り回転角最小化)

図 B.5 解析結果

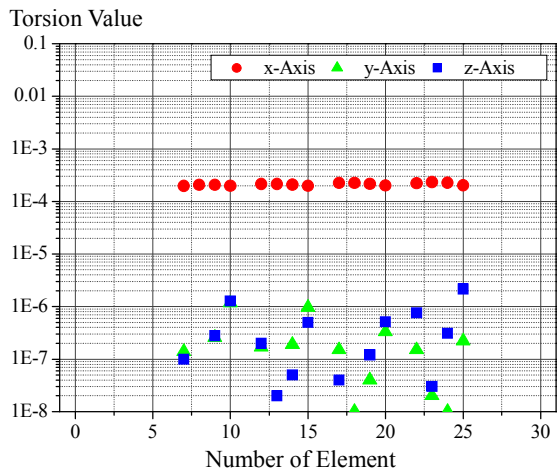


・初期形状

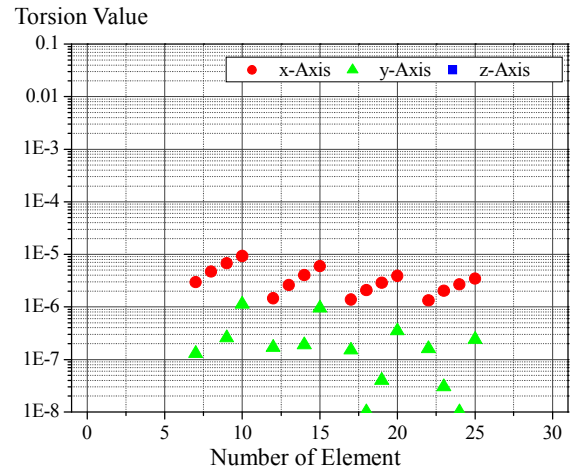


・測地線形状

a. form-P の比較(x,z 軸回り回転角最小化)



・初期形状



・測地線形状

b. form-U の比較(y,z 軸回り回転角最小化)

図 B.6 解析結果

B. 5 考察

解析結果より、測地線形状は一本の連続した部材が最短部材長となるように最適化される。特に、図 B.3a に示す form-K は重ね図より、部材が直線的な配置に修正されているのが確認できる。なお、form-K 以外の形状について、総部材長については全ての形状について測地線形状の方が値が小さくなったもののその差は $0.1[m]$ 未満であり、重ね図からも部材配置に大きな差は見られなかった。部材間の回転角の評価値に着目した場合、図 B.5,6 より測地線形状は全形状 z 軸回り回転角の評価値が最小化されていることが確認される。つまり、測地線形状を構成する部材は面内方向に曲率を持たない曲線部材で構成されやすいことを示す。なお、form-K, form-U は z 軸回り回転角の評価値が 0 となっているが、これは 1/4 曲面形状全体が平面形を有しており、 z 軸回り回転角の評価値が収束しやすい形状であったことが考えられる。力学性状について、各形状は初期形状の方が最大応力値が小さい。また、全ての形状において軸力分布における引張力が生じている部材の範囲が変わっており、測地線形状と初期形状の力の流れが変わっていることが確認される。なお、form-P については図 B.4a より曲げモーメントの値が初期形状の約 2 倍の値を示しており、本評価指標を用いた解形状の方が力学性状に優れた解であることを確認した。

以上より、総部材長最小化問題を解くことにより近似的に測地線により表現される格子シェルの探索を行い、初期形状との比較を行った。得られた解は総部材長が小さくなっているものの初期形状と大きさ差は見られなかったことから本評価指標を目的関数とする最適解形状は測地線形状近傍の解である可能性が高い。測地線形状は z 軸回り回転角の評価値が小さくなる傾向があるため、本評価指標において、 z 軸回り回転角最小化問題を解くことにより近似的に測地線形状を得られる可能性がある。また、form-K, form-U のように曲面形状が平面形で構成された部材ほど部材配置が直線的となることから測地線形状に収束しやすい可能性がある。力学性状については測地線形状の方が曲げモーメントが上昇する傾向があり、本評価指標を目的関数として得られた解形状の方が力学性状に優れている。今回比較を行った解形状において、本評価指標により得られた解形状は測地線形状の近傍に存在している解である可能性が高く、力学性状について特に曲げモーメントの存在応力が小さい解がとなることを確認した。

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

— 謝 辞 —

謝辞

本論文は鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻教授 本間先生のご指導により著者が先生の研究室に所属してから10年間に及ぶ研究の集大成として完成したものです。学生時代から未熟な著者を丁寧かつ熱心にご指導いただき、心から感謝の意を申し上げます。大学院生時代には漠然としか捉えていなかった構造設計という分野でしたが、実際に実務経験を積んだことは、構造設計に求められる職能の奥深さや研究分野である構造形態最適化を実務設計へ活用していくことの可能性を見出すきっかけとなりました。また、大学院生時代から研究を進めていくことの意義を本間先生に熱心に指導して頂きました。「応用力学は構造設計を語るための言語である」本間先生よりいただいたこの言葉は今でも著者の中に強く残っており、著者の目指すべき構造設計者像の一つとなりました。この言葉が常に頭の中にあっただからこそ、著者が社会人ドクターへ進むことの決断にいたりしました。社会人ドクター生活3年間という期間の中で、仕事に勤しみながら研究することは非常に大変なことでありましたが、実務の中で構造形態最適化の技術を取り入れることの可能性を見出し、客観的な視点から実務と研究を両立して進めてこられたことは大変貴重な経験となりました。

本論文の審査にあたり、鹿児島理工学研究科建築学専攻教授 塩屋晋一先生、同学科建築学専攻准教授 黒川善幸先生には本論文の副査として多くのご指導をいただきました。本研究を進め始めた当初は漠然としていたテーマでしたが、先生方の指導により著者の考え方が整理され、本論文の完成度を高めることができました。ここに深く感謝いたします。

今回、論文をまとめるにあたっては著者の所属する株式会社梓設計エンジニアリング部門構造部の多くの協力と支援をいただき、本論文を完成させることができました。同構造部 常務執行役員 柴田昭彦氏、構造部部長 小林裕明氏は社会人ドクターとして大学に通わせていただくことを快諾してくださり、多大な協力と支援をいただきました。特に、構造最適化技術を活用した設計業務に携われることができたのは株式会社梓設計が魅力的なプロジェクトを遂行し、著者に挑戦させていただく機会を与えてくださったおかげです。実務設計の中で構造最適化技術を活用した建物が実現できたことは著者にとって大変幸せなことでした。ここに深く感謝いたします。

3年間の社会人ドクター生活の中でともに切磋琢磨した同輩の永田洸大氏、沖田裕介氏とは同じ志を持った仲間としてお互いを高めあうことができました。著者が本論文を完成させることができたのも高い目標を掲げて努力する二人の姿があったからです。ここに感謝するとともに、これからの二人の活躍を願っています。

最後に、本生活を一番傍で支えてくれた妻、家族に心から感謝いたします。
本当にありがとうございました。

2019年3月

和田大興