

建築における最適化について

山邊友一郎（神戸大学）

1

最適化計算技術

■ 数理計画法

線形計画法

非線形計画法

■ 発見的手法

単点探索法

多点探索法

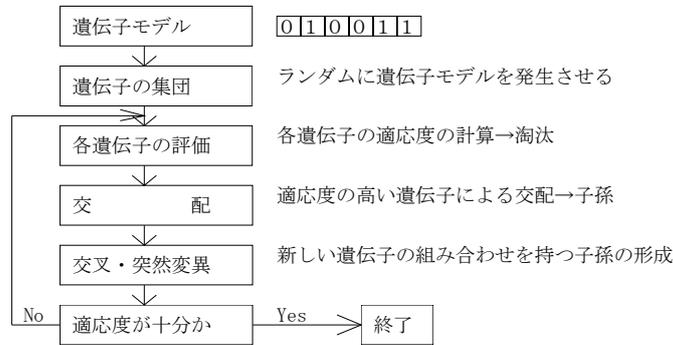
群知能計算法

進化的計算法（遺伝的アルゴリズム：GA）

2

遺伝的アルゴリズム

(1) GA処理のフロー



・コード化

- a) 問題空間内の表現型は全て染色体の遺伝子列として表現できること
- b) GA空間内の染色体は問題空間内の表現型に対応できること
- c) それらの対応は1対1であること

3

遺伝的アルゴリズム

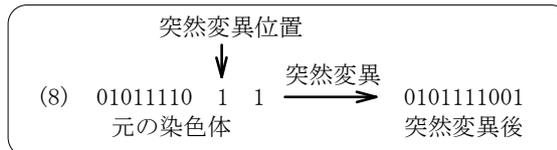
(2) GA処理の概要

・選択・淘汰：適応度(Fitness)は、選択淘汰を行う際の基準となる値であると同時に、各個体の染色体が環境にどの程度適応しているかを表す指標となる。
 →適応度は、適応能力の高い個体が残る、適応能力の低い個体が淘汰されるように設定する。

・交叉

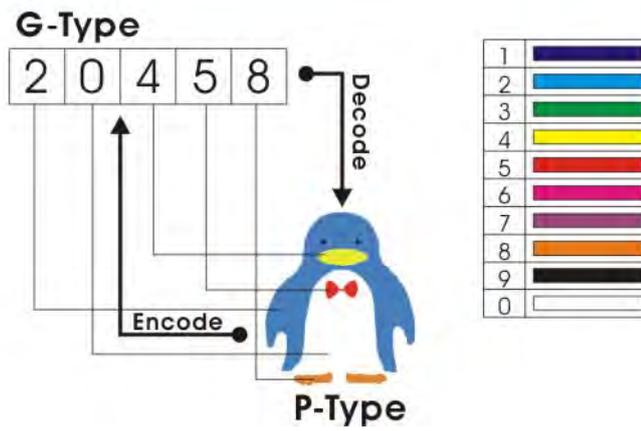


・突然変異



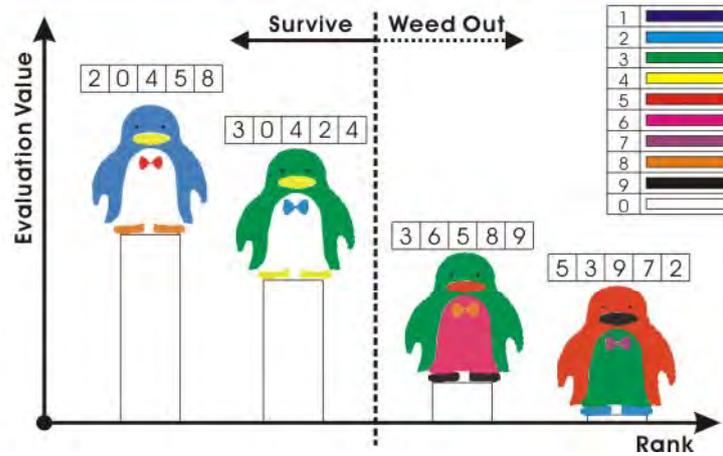
4

Decode and Encode



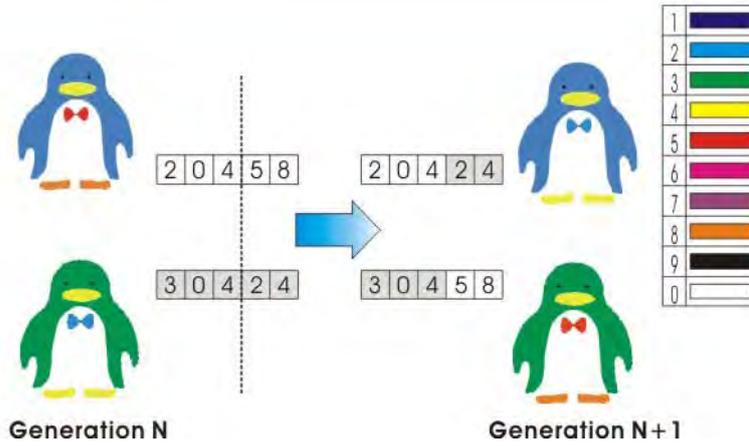
5

Evaluation and Selection



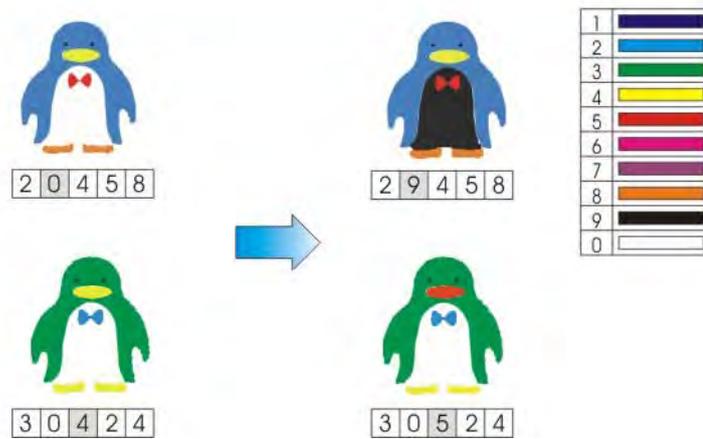
6

Crossover



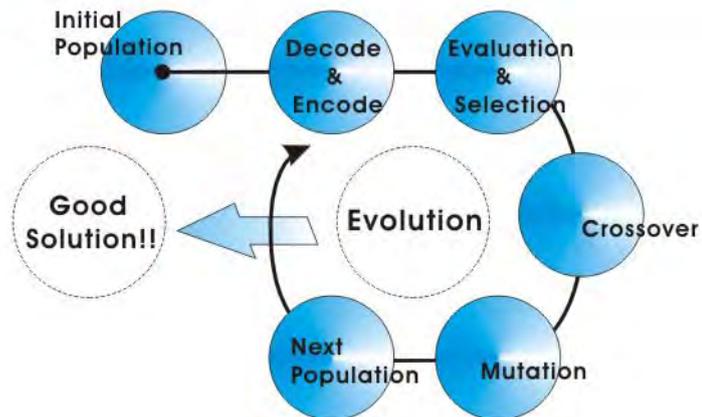
7

Mutation



8

Schematic of GA



最適化問題の3要素

■ モデル化

解の多様性

解空間の広さ

問題の難易度とトレードオフ

■ 最適化手法

最適化の精度, 効率

解の提示, 利用方法

■ 評価

進化の方向性 (単一 or 複数)

プログラムで処理可能

人間の主観的評価をシステム化することは難しい

10

本日の話題

■ 形態生成

山邊友一郎, 河村廣, 谷明勲: 知的人工生命の手法を用いた建築的立体構造形成 (評価の進化を伴う多重最適化システムの試み), 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp.193-199, 1998.4

■ 集合住宅の形態生成

斎藤暁, 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: 人工生命の手法を用いた建築空間創生 - 多重最適化の効率化に関する検討 -, 第28回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 (論文), pp.181-186, 2005.12

■ 単層ドームの最適設計

浅野史彦, 堤和敏, 谷明勲, 河村廣: 拡張遺伝的アルゴリズムを用いたラチスドームの最適設計 - グリッドドームの場合 -, 日本建築学会技術報告集, 第8号, pp.229-233, 1999.6

■ 鋼構造建築の多目的最適化

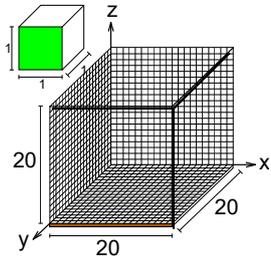
山邊友一郎, 藤井健司, 谷明勲: GAを用いた低層鉄骨構造物の構造要素最適配置システム 単一目的最適化と多目的最適化の比較, 構造工学論文集, Vol.57B, pp.61-67, 2011.3

11

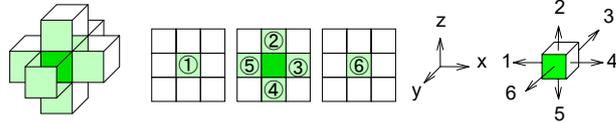
形態生成

12

形態生成ルール



空間設定

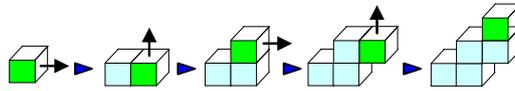


Rule 1 : (①,②,③,④,⑤,⑥) → D 1

Rule 2 : (①,②,③,④,⑤,⑥) → D 2

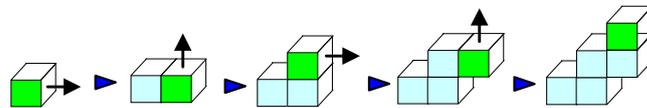
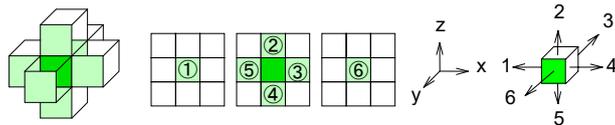
⋮

Rule 64 : (①,②,③,④,⑤,⑥) → D64



セルの増殖

形態生成ルール



1) (0, 0, 0, 0, 0, 0) → 4

2) (0, 0, 0, 0, 1, 0) → 2

3) (0, 0, 0, 0, 0, 1) → 4

4) (0, 0, 0, 0, 1, 0) → 2

形態生成ルール

Rule1 : (0,0,0,0,0) → 2
 Rule2 : (0,0,0,0,1) → 6
 Rule3 : (0,0,0,1,0) → 5
 Rule4 : (0,0,0,1,1) → 5
 Rule5 : (0,0,1,0,0) → 3
 Rule6 : (0,0,1,0,1) → 6
 Rule7 : (0,0,1,1,0) → 4
 Rule8 : (0,0,1,1,1) → 2

 Rule 9 : (0,0,1,0,0,0) → 5
 Rule 10 : (0,0,1,0,0,1) → 5
 Rule 11 : (0,0,1,0,1,0) → 3
 Rule 12 : (0,0,1,0,1,1) → 6
 Rule 13 : (0,0,1,1,0,0) → 3
 Rule 14 : (0,0,1,1,0,1) → 6
 Rule 15 : (0,0,1,1,1,0) → 3
 :
 Rule 60 : (1,1,1,0,1,1) → 5
 Rule 61 : (1,1,1,1,0,0) → 1
 Rule 62 : (1,1,1,1,0,1) → 1
 Rule 63 : (1,1,1,1,1,0) → 3
 Rule 64 : (1,1,1,1,1,1) → 1

増殖ルールと形態生成例

15

評価1.a: 採光性

評価1.b: 稠密度

評価1.c: 最小アスペクト比

評価1.d: 安定性

Fitness

Fitness

採光性

Fitness

稠密度

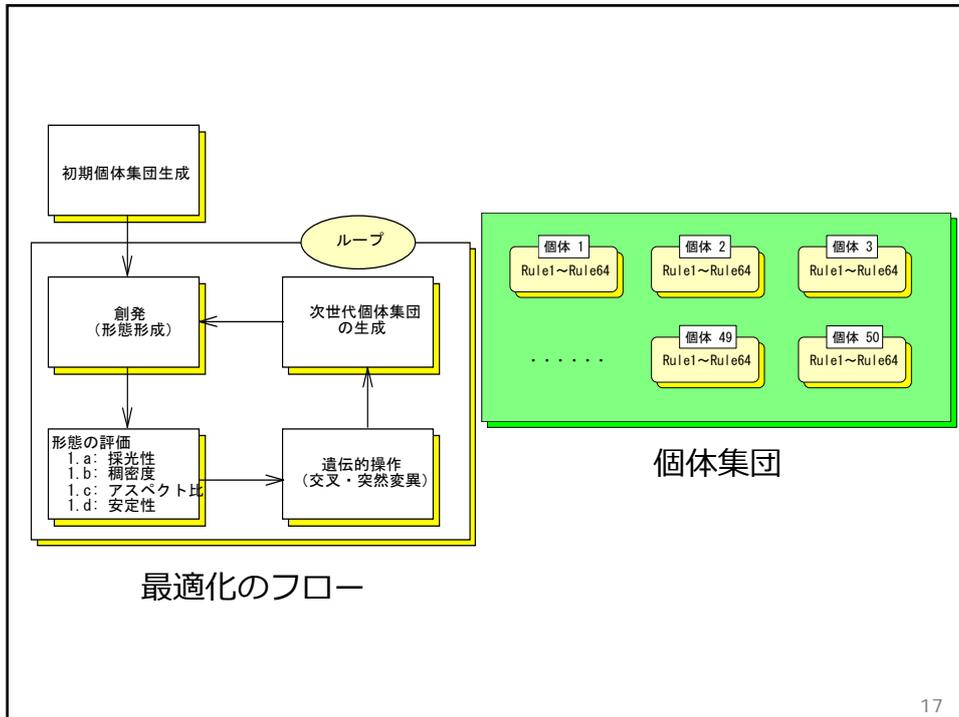
Fitness

最小アスペクト比

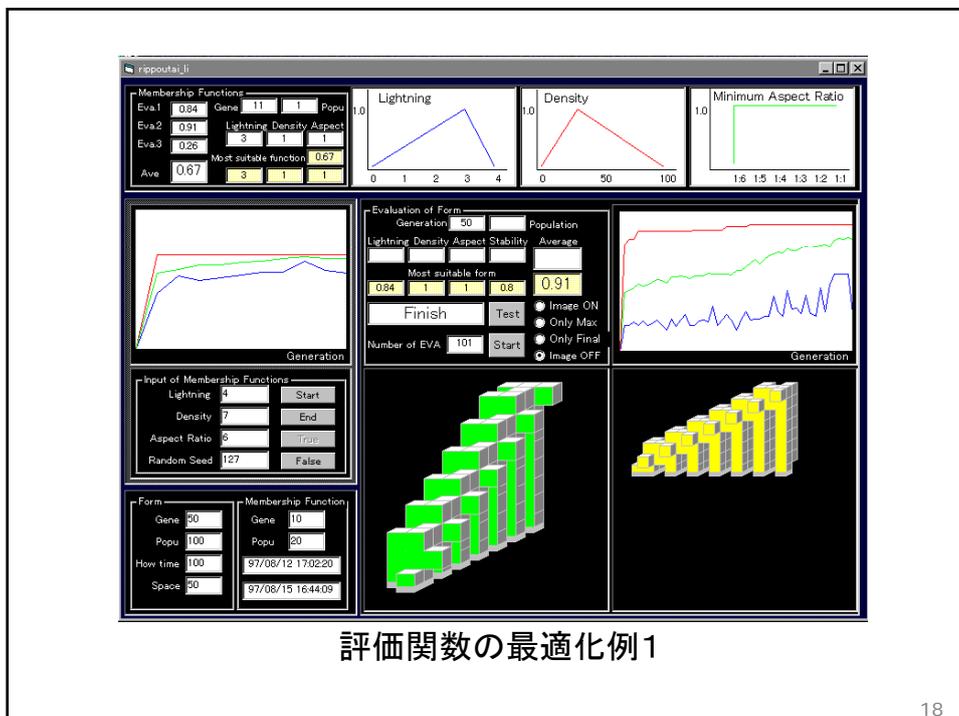
形態の評価

総合評価値 = 各評価値の平均値

16



17



評価関数の最適化例1

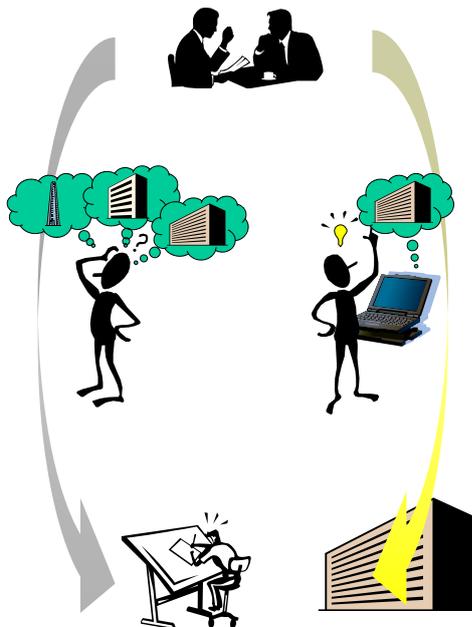
18

集合住宅の形態生成

19

背景

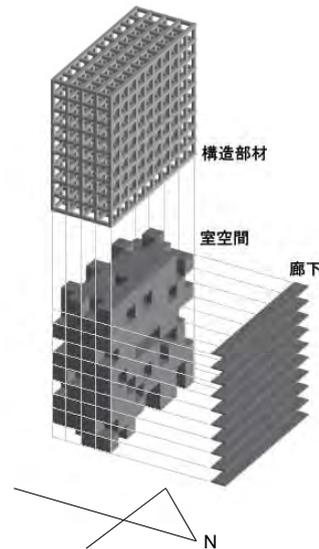
- 集合住宅の計画でユーザーの意見が設計に反映されるケースは少ない
- アンケートやワークショップなどが行われているが、時間や手間がかかる
- 本研究では、コンピュータを用いて建築空間生成を行い、**施主、ユーザー両方の意見を反映**させ、集合住宅を設計する際に活用可能な**設計支援ツール**を構築する



20

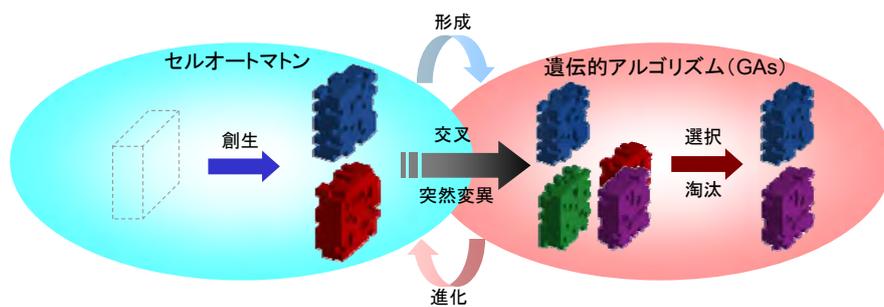
モデル化

- 片廊下型を対象とする
- 入力→住戸数と各床面積
出力→形態生成
- モデル化
室空間、廊下、構造部材
- 室空間：南側，廊下：北側
- 構造部材は室空間を包むように配置する
- エレベータ等の縦動線は考慮しない



21

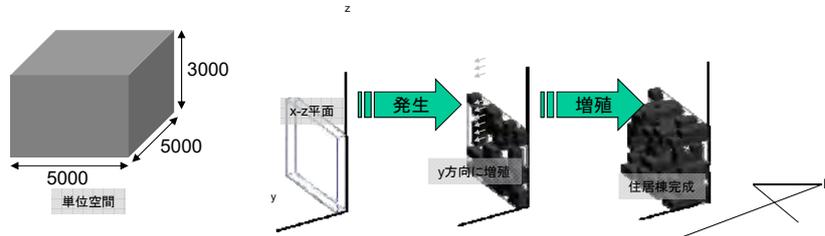
システムの流れ



- 形態生成
- 評価
- 遺伝的操作
選択・淘汰
交叉・突然変異
- ループ

22

形態生成手法

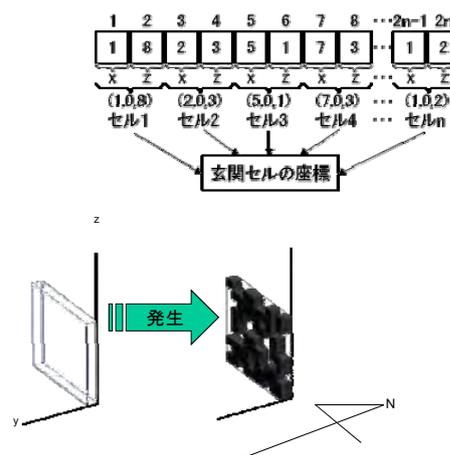


- 5m×5m×3mのセルを単位空間とし、そのセルを配置・増殖させることにより集合住宅の空間創生を行う
- x-z平面状に初期セル（玄関セル）を必要とされる住戸数だけ発生、配置
- それぞれの玄関セルが独立してy方向（南方向）に増殖を繰り返すことによって、それぞれの居住空間（住居ユニット）を形成していく
- 住居ユニットが互いに絡み合うことにより、集合住宅（住居棟）が形成される

23

玄関セルの配置ルール

- 住居ユニット最適化の際に使用するGA（外ループ）の遺伝子にランダムに入力された0~9の値をそれぞれの玄関セルの(x, z)座標に変換することによって行われる
- これにより、y=0のx-z平面上に互いに重なり合わないよう必要住戸数の玄関セルが配置される



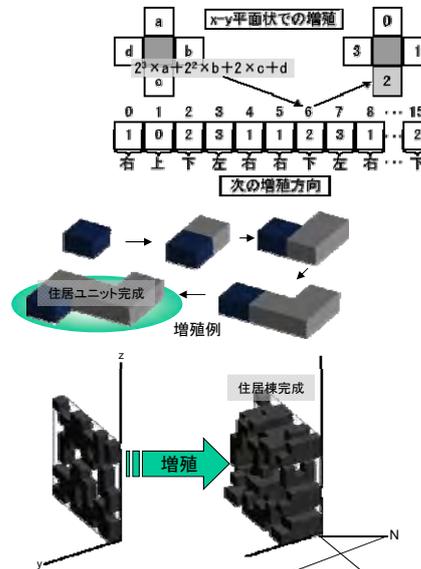
24

玄関セルの増殖ルール

■ 増殖ルール

セルオートマトン, 近傍型は
ノイマン近傍

- 配置された玄関セルは、近傍の状況に応じて、住居ユニット最適化の際に使用するGA (内ループ) の遺伝子にランダムに入力された0~3の値を元に増殖方向を決定する
- この操作を繰り返し、玄関セルが各々の要求された室空間 (住居ユニット) を形成する

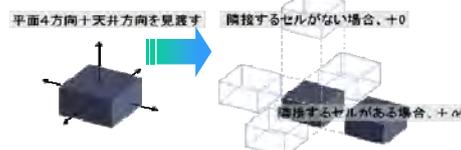


25

住居ユニットの評価

ユーザーの要望である通風、採光を総合的に考える指標として開放性を定義する。

開放性



方向によるα値の変化

重み	α
東面	3
西面	2
南面	4
北面	1
天井面	5

- 開放性は個々のセルごとに東西南北4方向と天井方向に占める開放面を数え、住居ユニットのすべての面に占める割合を重みをつけて算出したものである。

$$(\text{Openness}) = \frac{\text{open}_{\text{exist}}}{\text{open}_{\text{max}}}$$

open_{exist}: 創生した住居ユニットの開放面数
open_{max}: 最大開放面数 = 創生した住居ユニットの空間セル数 × 15

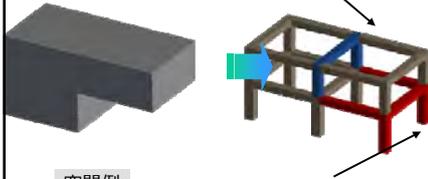
26

住居棟の評価

施主の要望である建築コストを考える指標として部材数、廊下長を定義する

部材数

2つのセルで共有するので、-3



空間例

上部のセルを支えるため、+5

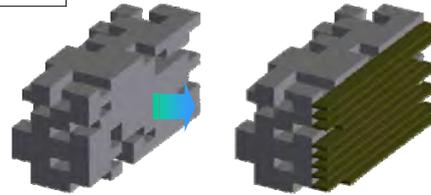
- セルを支えるため図のように部材を発生させる。

(FrameWork) = frame

frame : 住居棟を構成する部材数

廊下長

廊下は各階ごとに発生させる



すべての階の合計を廊下長とする

- 外ループ（住居棟最適化）で発生させた玄関セルを各階ごとに繋ぐように廊下を発生させる

(Corridor) = corr

corr : 住居棟の廊下長

27

評価の統合と最適化

ユーザーの要望(開放性)

- 開放性の評価は住居ユニット単位で行われるため住居ユニットの数だけ発生する。
- それらを統合する方法としてすべての最小値をとる。

$$(Eval.1) = \text{Min}(\text{Result}_{\text{Openness}})$$

施主の要望(建築コスト)

建築コストの評価は、部材数、廊下長の2つである。

それらを統合する方法として、相乗平均を用いる。

なお、今回は評価間の重みに関する検討は行っていない。

$$(Eval.2) = \sqrt{(\text{Result}_{\text{FrameWork}}) \times (\text{Result}_{\text{Corridor}})}$$

住居ユニット最適化(内ループ)

$$\text{Evaluation} = (\text{Eval.1})$$

$$\text{Evaluation} \rightarrow \max$$

- 住居ユニット最適化ではEval.1が高いものを優良個体として最適化を行う。

住居棟最適化(外ループ)

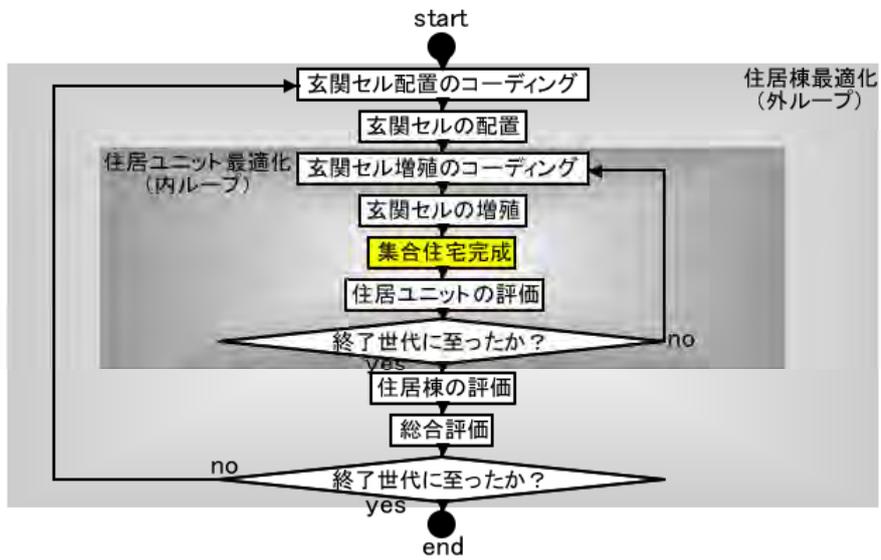
$$\text{Evaluation} = \sqrt{(\text{Eval.1}) \times (\text{Eval.2})}$$

$$\text{Evaluation} \rightarrow \max$$

- 住居棟最適化ではEval.1とEval.2の相乗平均の値が高いものを優良個体として最適化を行う。

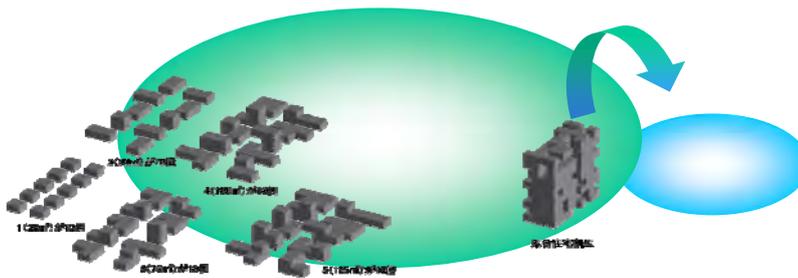
28

多重最適化



29

実行結果



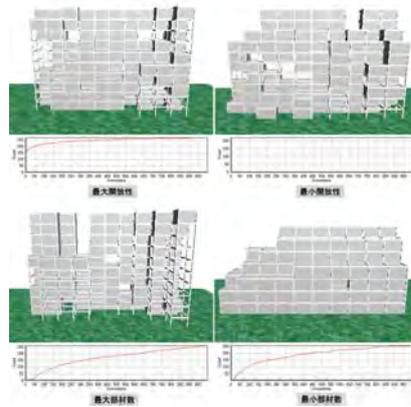
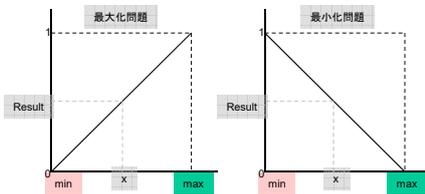
セル数	1(25㎡)	2(50㎡)	3(75㎡)	4(100㎡)	5(125㎡)
発生数	10	10	10	10	10

- 設定項目
住居ユニット数（住居数）とセル数（床面積）
- 本例では、25㎡～125㎡までの5種類の住居（それぞれ10戸、計50戸）からなる集合住宅を生成する

30

実行結果

- 設定した世代数で各評価ごとにGAを実行し、評価関数の基準化の際に必要な最大値, 最小値を得る
- その際に使用する外ループのGAは家族数10、実行世代数1000世代とした

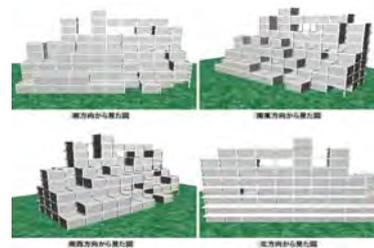
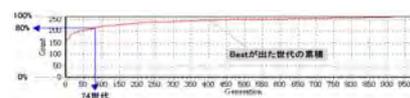


	世代数 (max)	max値	世代数 (min)	min値
開放性	89	0.093	1	0.013
部材数	658	530	458	197
廊下長		100		50

31

実行結果

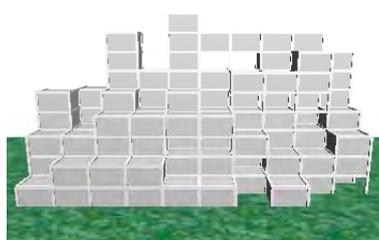
- 住居ユニット最適化（内ループ）は、検討結果から得られた実行世代数（74世代）、家族数10で行う
- 住居棟最適化（外ループ）は実行世代数10000世代、家族数10と設定した
- 出力結果と評価値を右に示す



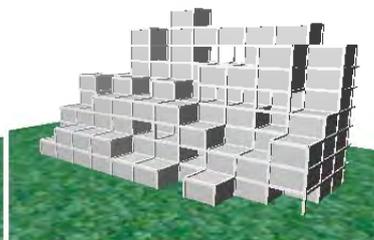
開放性 (0-1)	部材数 (0-1)	廊下長 (0-1)	評価値 (0-1)
0.84	0.74	0.72	0.78

32

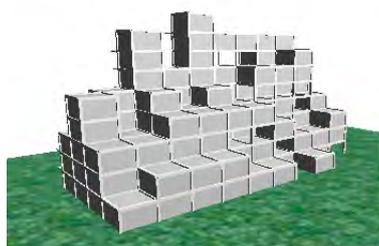
実行結果



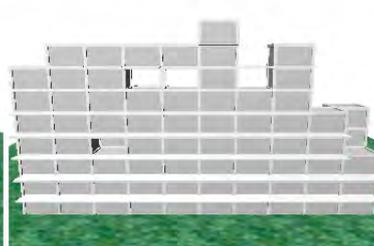
南方向から見た図



南東方向から見た図



南西方向から見た図



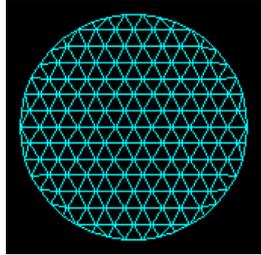
北方向から見た図

33

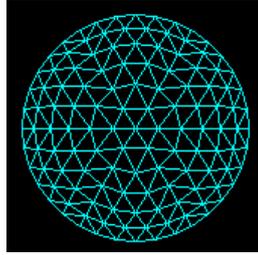
単層ドームの最適設計

34

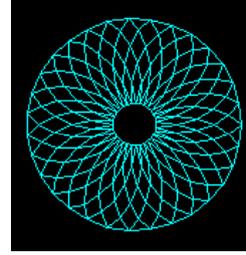
ドーム形状



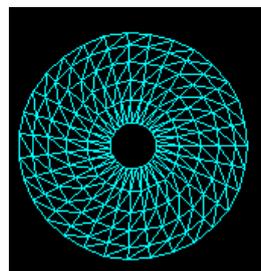
Grid D



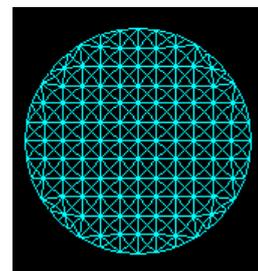
Parallel Lamella D



Lamella D



Schwedler D



Lattice D

35

構造パラメータ

- ドーム直径R（ここでは固定とする）

$$n = \text{Round}\left(\frac{RR \times \theta}{1}\right)$$

- 概略部材長 l

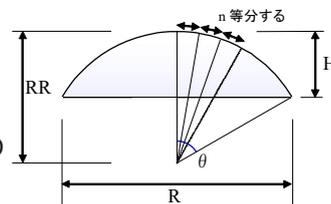
ドームの曲率半径RR、 θ と概略部材長lによって分割数nを決定

- ライズ比

ドーム直径Rに対するドーム高さHの比ライズ比 = H / R

- 径比

部材長lに対する部材径rの比率径比 = l / r



36

構造パラメータ

■ 管厚比

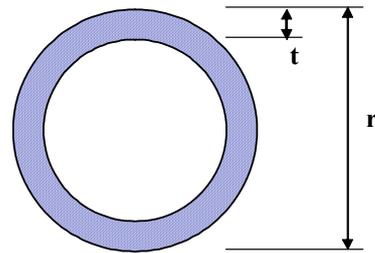
部材径 r に対する部材管厚 t の比で既製品 (4, 6, 9, 12, 16, 19, 22, 25, 28, 30, 32, 35mm) から選択

ただし、管厚はドームの頂部の部材の管厚

■ 管厚差

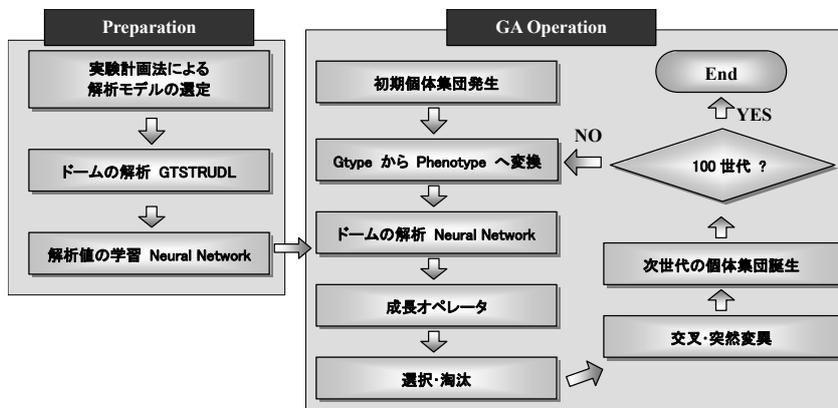
ドームの頂部と足元の部材で管厚を変える

頂部と足元の間中部材は、分割数に応じて振り分けられた中間の管厚をとる



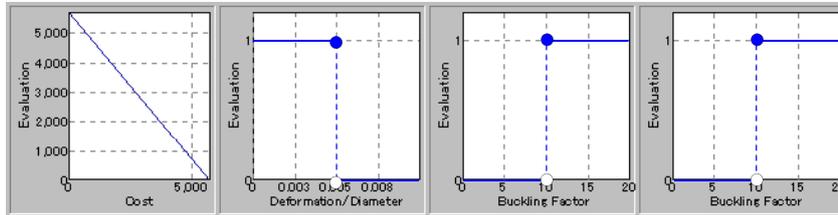
37

遺伝子型とフロー



38

評価



- ①コスト評価 μ_1 ②変形評価 μ_2 ③全体座屈評価 μ_3 ④個材座屈評価 μ_4
- $\mu_1 = 5700 - V$ $\frac{\delta}{L} \leq \frac{1}{200} \rightarrow \mu_2 = 1$ $b_g < 10 \rightarrow \mu_3 = 1$ $b_1 < 10 \rightarrow \mu_4 = 1$
 V : 等価重量 $\frac{1}{200} < \frac{\delta}{L} \rightarrow \mu_2 = 0$ $10 \leq b_g \rightarrow \mu_3 = 0$ $10 \leq b_1 \rightarrow \mu_4 = 0$
 最大等価重量: 5657.73tf δ : ドーム頂部変形 b_g : 全体座屈係数 b_1 : 個材座屈係数
 L : ドーム直径

$$\text{総合評価: } \mu = \mu_1 \times \mu_2 \times \mu_3 \times \mu_4$$

39

シミュレーションの実行

■ GTDOME.exe 実行

遺伝的アルゴリズム を選択

ドーム形状 を選択

「常に描画する」 にチェック

実行ボタン を押す

データ参照先として, 「実行ファイルフォルダ/送データ」
を選択

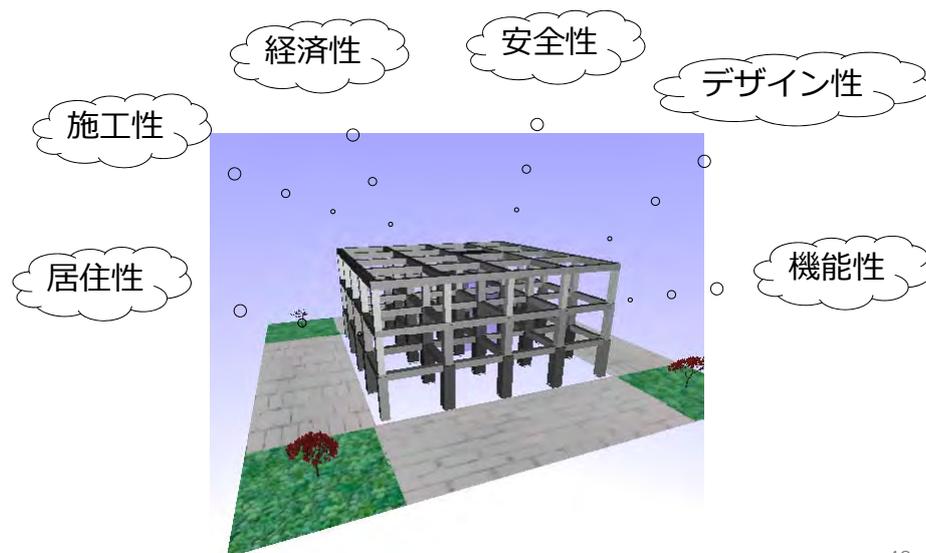
GA実行

40

鋼構造建築の多目的最適化

41

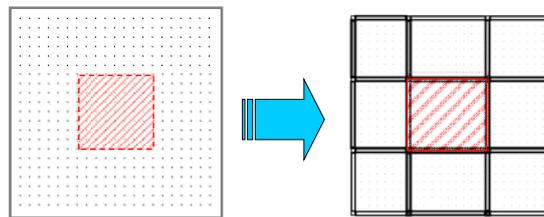
目的



42

目的

- 対象：鋼構造事務所ビルにおける部材配置問題
- 手法：遺伝的アルゴリズム
 - 単一目的最適化 (PfGA)
 - 多目的最適化 (SPEA2)



43

対象モデル

鉄骨造事務所ビルを対象

コアは右図の3つから選択

平面規模を
m単位で入力

階数を選択
(階高：4.0m)

最大柱数を
2～6で選択

最適化手法を
選択

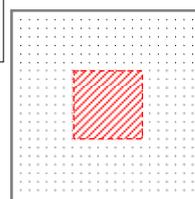
部材せいを
選択

設定項目

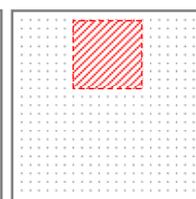
X(m)	30	コア	センターコア
Y(m)	24	コア面積%	15
階数	1	コア縦横比	1.0
X(本)	6	柱	□-200*200
Y(本)	5	梁	H-400*200

最適化手法
 多目的【SPEA2】 単目的【PfGA】

①センターコア

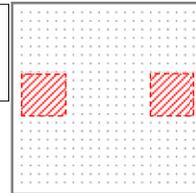


②サイドコア



建物面積に
対するコア面積
を入力(%)

コアの縦辺を
10とした時の
横辺を入力

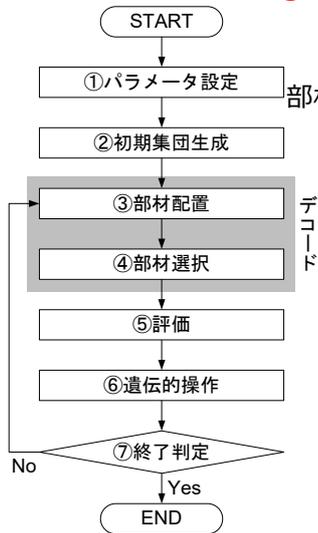


③ダブルコア

44

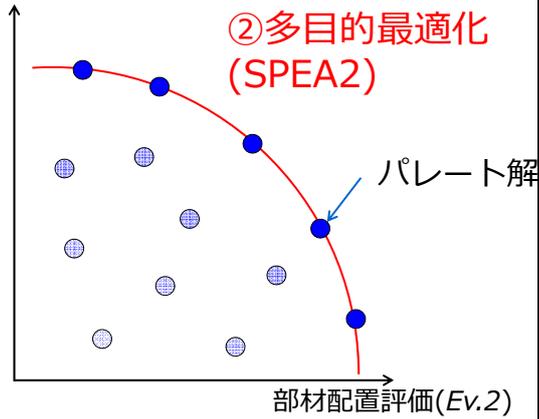
システムのフロー

①単一目的最適化(PfGA)



$$\text{maximize } Ev.3 = \sqrt{Ev.1 \times Ev.2}$$

部材選択評価(Ev.1)



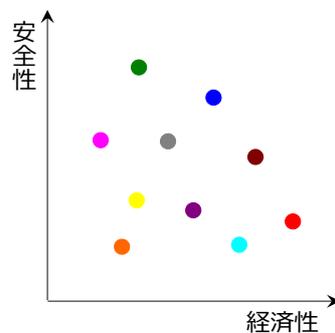
②多目的最適化(SPEA2)

部材配置評価(Ev.2)

45

多目的最適化

- 実社会に存在する様々な最適化問題は多くの場合、複数の評価基準を同時に考慮する必要がある



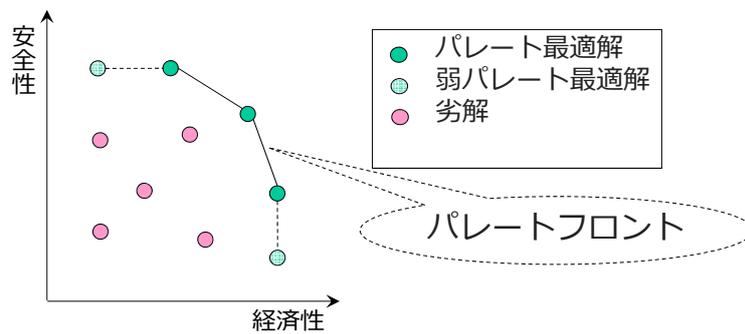
トレードオフの関係

このように、互いに競合する複数の目的関数のもとで最適解を求める問題を多目的最適化問題という

46

パレート最適解

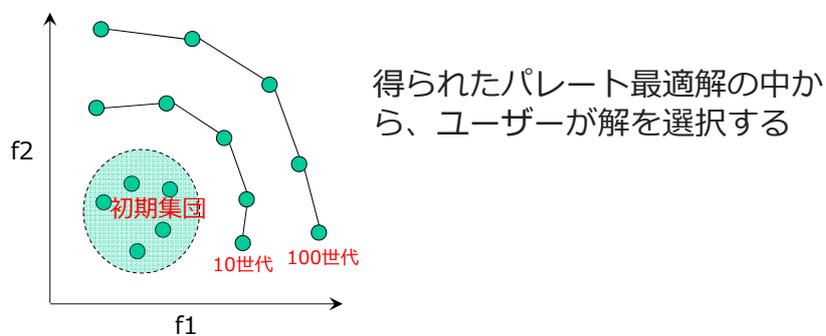
- x に強い意味で優越する $x \in n$ が存在しないとき, x を弱パレート最適解という.
- x に優越する $x \in n$ が存在しないとき, x をパレート最適解という.



47

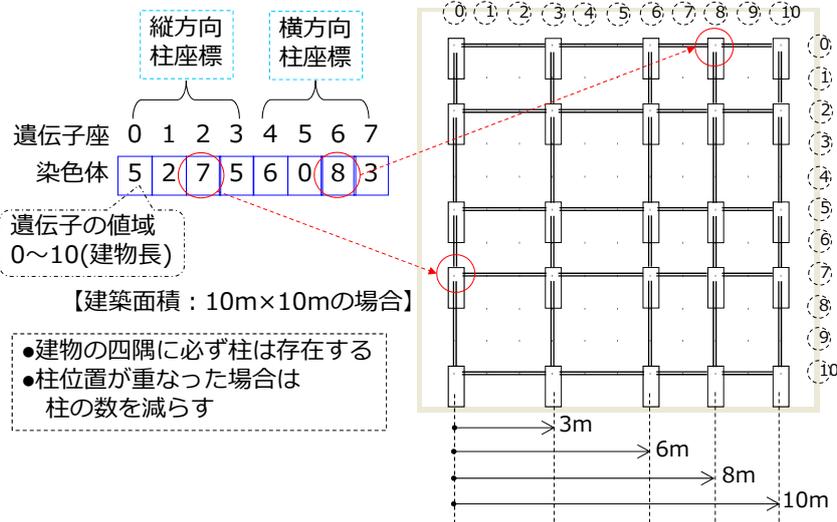
多目的GAの適用

- GAは多点探索であり, 一度の探索で複数のパレート解集合が求まるため, 多目的最適化問題に対して有効である



48

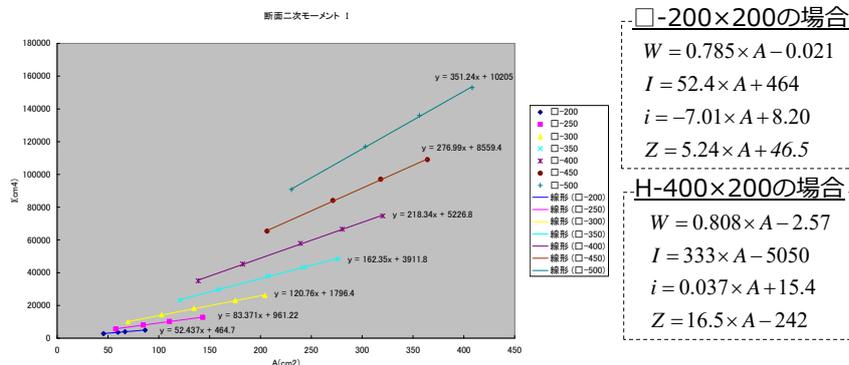
部材配置



49

部材選択

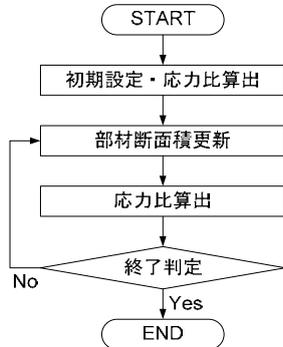
- 部材断面積と断面二次モーメントなどの部材断面性能との間に近似関係が成立する



部材断面積を連続設計変数として部材断面を決定

50

部材選択



部材断面積を連続設計変数 (実数)
 min : 幅厚比の制限により決定される断面積
 max : 部材が中実断面となったときの断面積
 ⇒全部材 A (min) の断面を選択

⇒ ■ 応力比 < 0.9 のとき
 部材断面積を 1 応力比 倍
 ■ 応力比 > 1.0 のとき
 部材断面積を (応力比)² 倍

⇒繰り返しが10回に達すると終了

部材番号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	...
Step1 部材断面	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.5	...
応力比	0.97	1.91	1.02	1.09	1.05	1.88	2.97	1.63	1.68	...
Step2 部材断面	48.5	176	50.9	57.7	53.4	171	400	128	136	...
応力比	0.46	0.91	0.61	0.60	0.56	0.80	0.73	0.80	0.47	...

評価

部材選択評価 (Ev.1)

・構造制約条件 (ev.a)

・応力度 ≤ 許容応力度

・柱: 圧縮・曲げ応力度

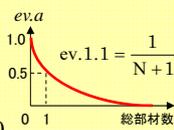
・柱: せん断応力度

・梁: 曲げ応力度

・梁: せん断応力度

・層間変形角 ≤ 1/200

・梁のたわみ ≤ 1/300

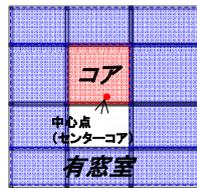
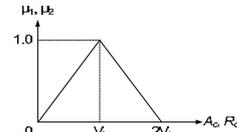


n: 制約条件を満たさない部材数

・総重量の軽減 (ev.b)

$$ev.1.2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n W_i - W_{min}}{W_{max} - W_{min}}$$

部材配置評価 (Ev.2)



・コア形状 (ev.2.1)

コア面積 (ev.a) と
 コア縦横比 (ev.b) の
 入力値との差異を評価

$$ev.2.1 = \sqrt{ev.a \times ev.b}$$

・有窓室面積 (ev.2.2)

$$ev.2.2 = \frac{\text{有窓室面積}}{\text{建物面積} - \text{入力コア面積}}$$

・柱スパン (ev.2.3)

$$c.v. _XY = \sqrt{c.v. _X \times c.v. _Y}$$

c.v.: 変動係数 = 標準偏差 / 平均

$$ev.2.3 = 1 - c.v. _XY$$

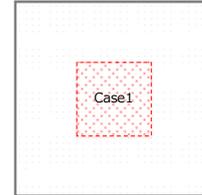
$$Ev.1 = ev.1.1 \times ev.1.2$$

$$Ev.2 = \sqrt[3]{ev.2.1 \times ev.2.2 \times ev.2.3}$$

設定

対象建物の設定

	建築面積(m)	最大柱数(本)	階数	コアtype	コア面積(%)	コア縦横比
Case1	30×30	6×6	1	センター	15	1:1
Case2	30×30	6×6	1	サイド	15	1:2
部材せい(共通)	柱:□-200×200		梁:H-400×200			

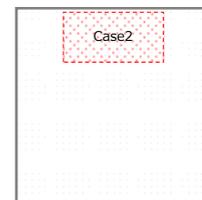


PfGA設定

実行世代数	1000
家族数	12

SPEA2設定

実行世代数	1000
個体数	30
アーカイブ数	30



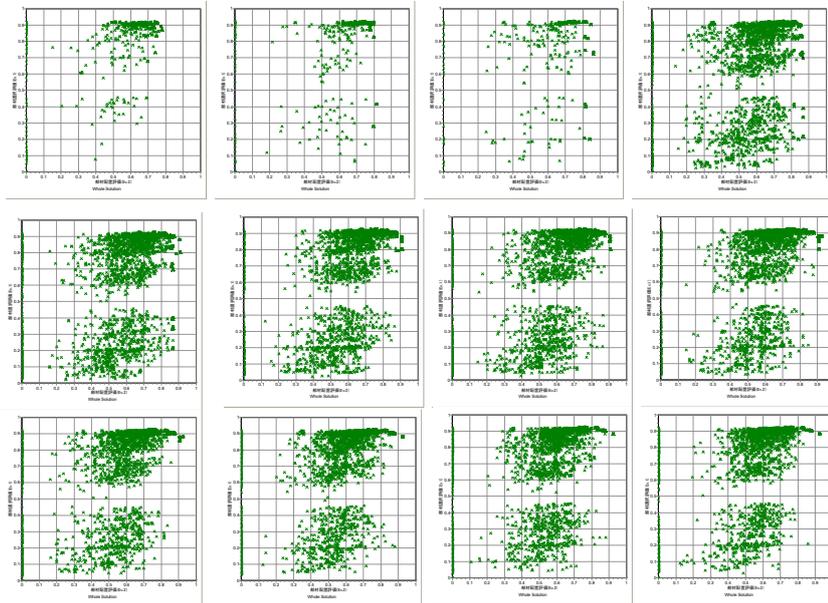
評価回数：約5万回，時間：約24時間

53

プログラムの紹介

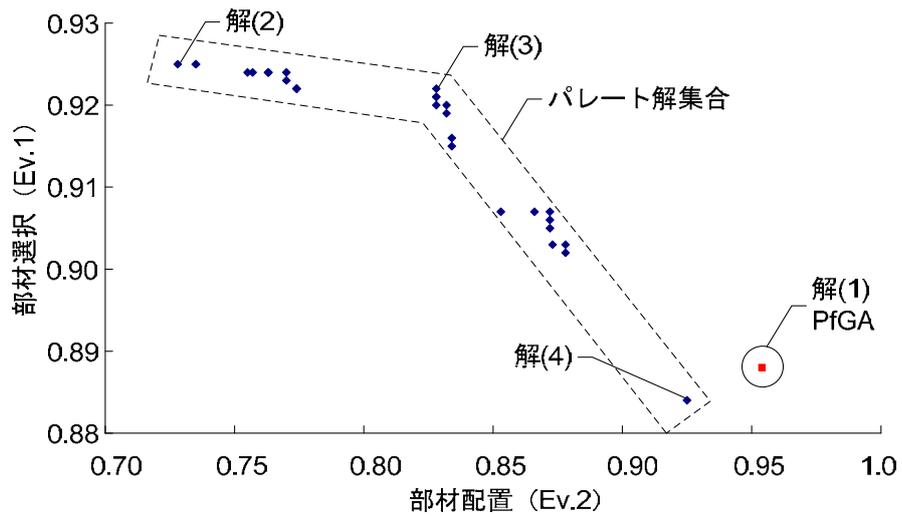
54

解の分布 (SPEA2, 20~1000世代)



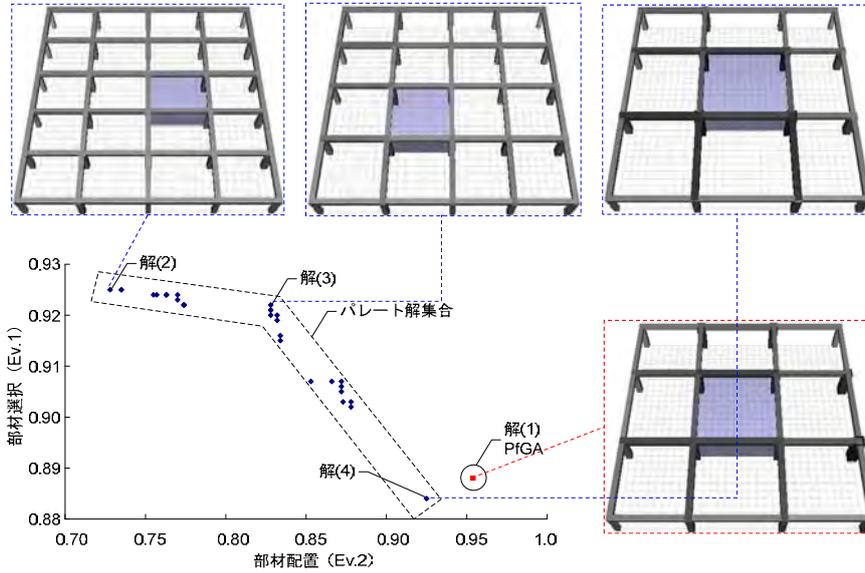
55

解の分布 (Case1 : センターコア)



56

【Case1】部材配置図



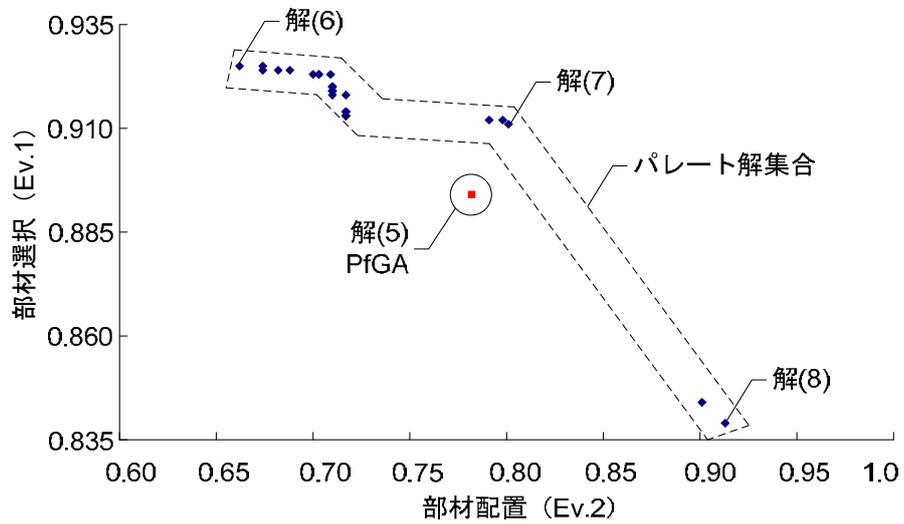
57

【Case1】評価値

	①(1目的)	②(2目的)	③(2目的)	④(2目的)
構造制約条件 (ev.a)	1.000	1.000	1.000	1.000
総重量の軽減 (ev.b)	0.888	0.925	0.922	0.884
部材選択評価 (Ev.1)	0.888	0.925	0.922	0.884
コア形状 (ev.c)	0.947	0.516	0.689	0.947
コア面積 (ev.a)	0.896	0.356	0.474	0.978
コア縦横比 (ev.β)	1.000	0.750	1.000	0.917
有窓室面積 (ev.d)	1.000	0.800	0.882	1.000
柱スパン (ev.e)	0.918	0.933	0.933	0.837
部材配置評価 (Ev.2)	0.954	0.728	0.828	0.925
総合評価 (Ev.3)	0.921	0.820	0.873	0.905

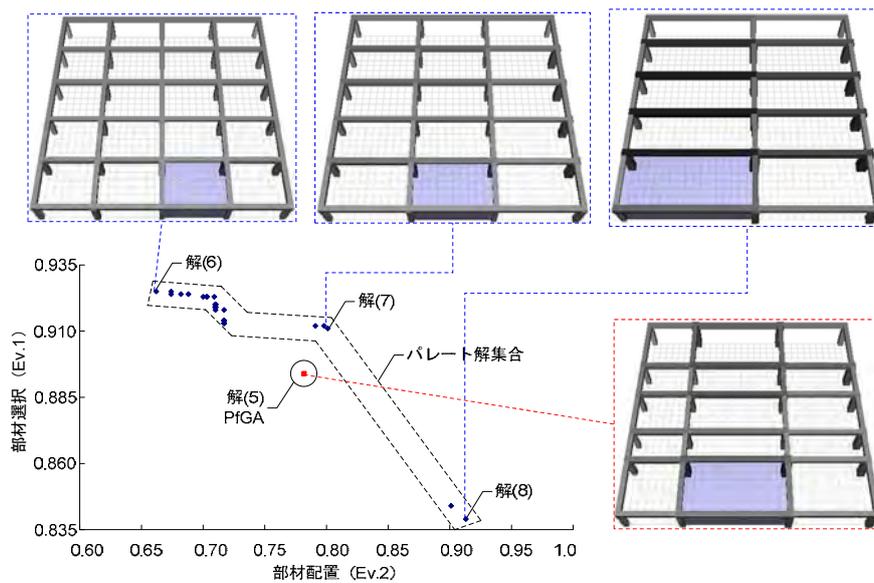
58

解の分布 (Case2 : サイドコア)



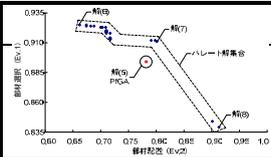
59

【Case2】部材配置図



60

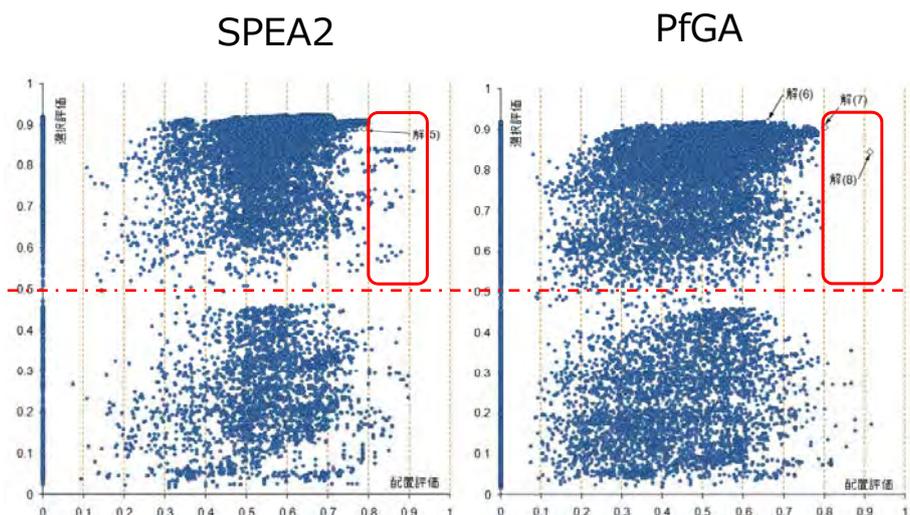
【Case2】 評価値



	①(1目的)	②(2目的)	③(2目的)	④(2目的)
構造制約条件 (ev.a)	1.000	1.000	1.000	1.000
総重量の軽減 (ev.b)	0.894	0.925	0.911	0.839
部材選択評価 (Ev.1)	0.894	0.925	0.911	0.839
コア形状 (ev.c)	0.789	0.422	0.596	0.852
コア面積 (ev.a)	0.674	0.356	0.444	0.830
コア縦横比 (ev.β)	0.923	0.500	0.800	0.875
有窓室面積 (ev.d)	0.803	0.737	0.863	1.000
柱スパン (ev.e)	0.755	0.933	1.000	0.895
部材配置評価 (Ev.2)	0.782	0.662	0.801	0.913
総合評価 (Ev.3)	0.837	0.783	0.854	0.876

61

全探索解の分布 (Case2)



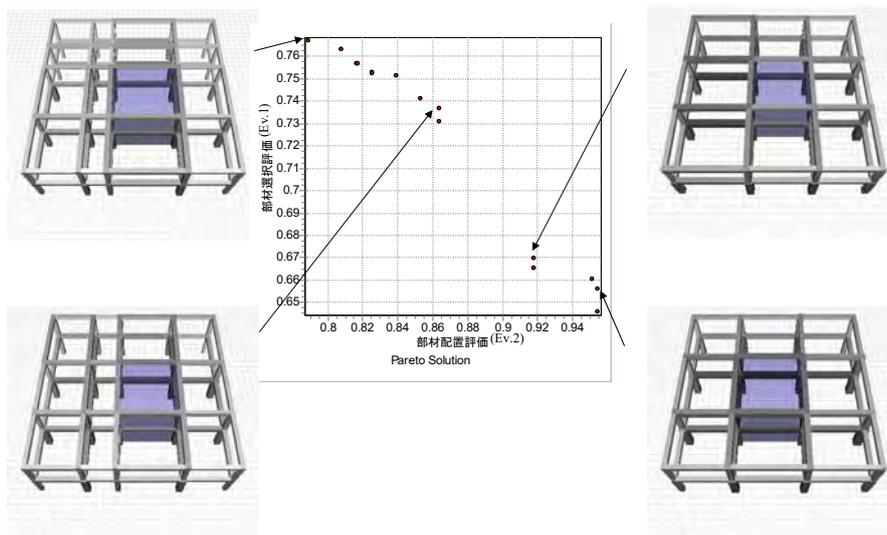
62

まとめ

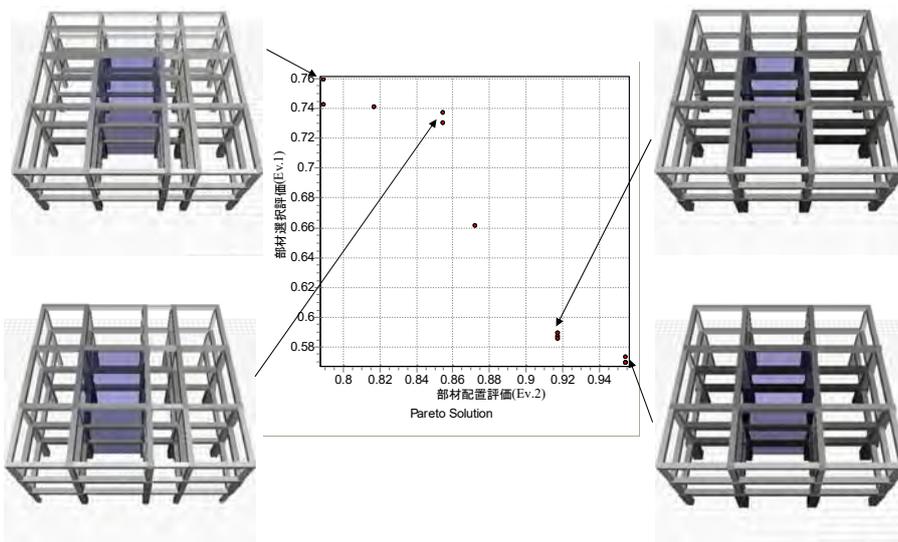
- 部材選択評価と部材配置評価の間にはトレードオフ関係が存在する
- 使用鉄骨重量を減らすためには、スパン割を細かく分割する方が有利である
- 多目的最適化の方が単目的最適化よりも評価値の高い解を発見した例を示した

63

Case II（2層）：部材配置図



CaseⅢ（3層）：部材配置図



65