

# 構造性能を考慮した室配置最適化 4室のフロアプランによる鋼構造骨組モデル

## Optimization of Floor Layout in Consideration of Structural Performance Steel structural framework model with four-room floor plan

○今村 萌絵<sup>\*1</sup>, 横須賀 洋平<sup>\*2</sup>  
Moe IMAMURA<sup>\*1</sup>, Yohei YOKOSUKA<sup>\*2</sup>

\*1 鹿児島大学大学院理工学研究科工学専攻建築学プログラム 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University.

\*2 鹿児島大学大学院理工学研究科工学専攻建築学プログラム 准教授・博士(情報科学)

Associate Professor, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Ph.D.

キーワード : 室配置; 複合最適化; グラフ理論; 遺伝的アルゴリズム

Keywords: Floor layout; composite optimization; graph theory; genetic algorithm.

### 1. はじめに

近年の計算機の高性能化と計算技術の進展は、建築設計における最適化の導入を現実化している。ただし、多くの設計事例は計画・構造・環境の各分野で与えられた評価関数による最適化問題を解くことが主な計算対象である。しかし、現実の設計過程は、各分野を統合した設計過程が必要である。したがって、建築設計における最適化問題は、各分野の性能を考慮した複合最適化問題に置き換えられる。設計の初期段階において各分野の制約条件を満足し、評価の高い解を発見することで有用な設計案を提供できると考える。しかし、このような複合最適化問題では、数値解析の膨大化や自明な最適解を避ける妥当な問題設定が必要となり、信頼性や可解性を踏まえた最適化問題の設定を与えることが重要となる。

本研究では、建築計画における室配置最適化問題に構造性能を評価することで複合最適化問題を解くことを目的とする。室配置問題は、建築の空間と用途を表す室を紐づけた室配置における総移動コストを目的関数とする最適化問題である。空間や室の数理モデルは、グラフ理論によるデータ構造を採用する。また、立体骨組みの解析モデルに対して構造解析を実行し、層間変形角と許容応力度の制約条件を与えることで構造性能を評価する。最適化手法には遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm : GA)を用いる。本稿では、4室のフロアプランによる鋼構造骨組モデルを対象として室配置問題の定式化、室面積を考慮した最適化問題の設定および構造性能を考慮した室配置最適化問題の数値結果を示すことで本手法の有用性を明らかとし、より現実性を持った建築設計に活用できることを示す。

### 2. 遺伝的アルゴリズム

本稿では、室配置最適化における最適化手法として遺伝

的アルゴリズム(Genetic Algorithm : GA)を採用する。GAは、最適化手法のうち、発見的手法に分類され、自然界の生物が進化してきた遺伝的な法則を工学的にモデル化し、自然淘汰説に基づいて最適解の探索を行う最適化手法である。プロセスとしては遺伝子の選択、交叉、突然変異を世代ごとに行って、評価の高い個体を次世代に継承することで適合度を大きくしていく。個体を遺伝子と呼ばれるビットで表現することが特徴的であり、大域的な最適解を探索することができる代表的なアルゴリズムである。

### 3. グラフ理論

グラフ理論とはノードとエッジの集合で表される接続関係を表すデータ構造であるグラフの数学理論である。室の隣接関係を考慮する室配置問題には、このグラフ表現が有効である。寺田他<sup>2)</sup>の研究では、要求される室の隣接関係を室の点、室の隣接を辺で表したグラフ(以下室隣接グラフと呼ぶ)が用いられる。その表現方法について以下に説明する。

#### 3.1. 室および空間隣接グラフ

図 1a 右に示す室配置の室隣接グラフは、室を頂点、隣接関係の有無を頂点間の辺の有無によって抽象化し、図 1a 左のように表現する。空間の隣接関係を表す空間隣接グラフについても同様に空間を頂点、隣接関係の有無を頂点間の辺の有無として表現する。

#### 3.2. 室隣接行列

$n$  個の頂点をもつ室隣接グラフで頂点  $k$  と頂点  $i$  が隣接している場合、この 2 頂点を結ぶ辺の数を  $q$  とすれば、この室隣接グラフについて 1)~3)のように室隣接行列  $x_{ki}$  を次式のように定義する。

- 1)  $n$  行  $n$  列の対称行列である。
- 2)  $k$  行,  $i$  列の要素を  $e_{ki}$  とする。
- 3)  $e_{ki} = e_{ik} = q$  とする。

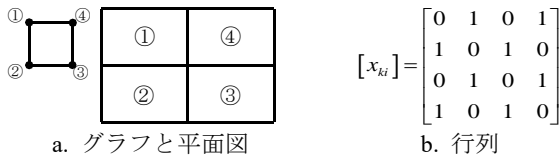


図1 室隣接グラフ

この行列の要素は、室隣接グラフにより0または1で、特に対角要素は常に0である。図1aの室隣接行列は図1bのように表される。

4. 室配置問題の定式化

室配置問題の目的関数として、総移動コストを式(2)のように表す。

Find  $\mathbf{P}$  (1)

to minimize  $f(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^p C_{ki}(\mathbf{P}) D_{mj}(\mathbf{P}) x_{ki} x_{mj} x_{ij} x_{km}$  (2)

subject to  $x_{ij} = x_{km} (i = k, j = m)$  (3.a)

$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, (j = 1, \dots, p)$  (3.b)

$\sum_{j=1}^p x_{ij} = 1, (i = 1, \dots, n)$  (3.c)

$x_{ij}, x_{km}, x_{mj}, x_{ki} \in \{0, 1\}$  (3.d)

ここで、 $\mathbf{P}$  : 設計変数ベクトル、 $i$  : 室番号、 $j$  : 空間番号、 $x_{ij}$  : 室  $i$  - 空間  $j$  割当て関係行列、 $x_{ki}$  : 室隣接行列、 $x_{mj}$  : 空間隣接行列、 $x_{km}$  : 室  $k$  - 空間  $m$  割当て関係行列、 $C_{ki}$  : 室移動コスト行列、 $D_{mj}$  : 空間移動距離行列、 $n, p, q, r$  : 室数および空間数である。このとき、室移動コスト行列は、室隣接グラフで頂点  $k$  と頂点  $i$  の2頂点を結ぶ移動コストを任意に設定し、定義する。コストが大きいくほど、室間の移動が頻繁であり、値が大きいくことを意味する。空間移動距離行列は、空間隣接グラフで頂点  $m$  と頂点  $j$  の2頂点を結ぶ移動距離(空間の中心点間の距離)を節点の座標をもとに算出し、定義する。

5. 空間配置のパターンの列挙

本章では、空間数を4に固定したときの空間配置のパターンの列挙を行う。次の条件にしたがい、手作業によって空間配置のパターンを列挙する。

- 1) 空間数は4とする。
- 2) 空間隣接グラフは異なったものとなるが空間番号の並べ方のみが異なる場合は同一配置とみなす。(図2)
- 3) 上下左右の線対称性は同一配置とみなす。(図3)
- 4) 対角線の線対称性は異なる配置とみなすが、他の配置と重複するものは除く。(図4)
- 5) L字型の空間は1つのみとする。

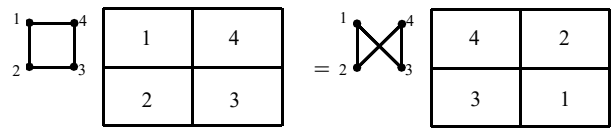


図2 空間隣接グラフは異なるが同一の空間配置図(例)

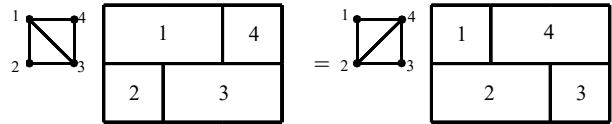


図3 線対称の空間配置図(例)

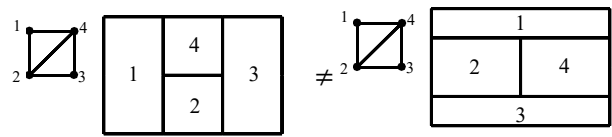


図4 対角線の線対称性のある空間配置図(例)

以上の条件により、94種類の空間配置のパターンを列挙することができた。本稿ではその中から、通り芯を考えたときに桁行3スパン、梁間2スパンとなる図5に示すような7種類を用いて最適化を行う。

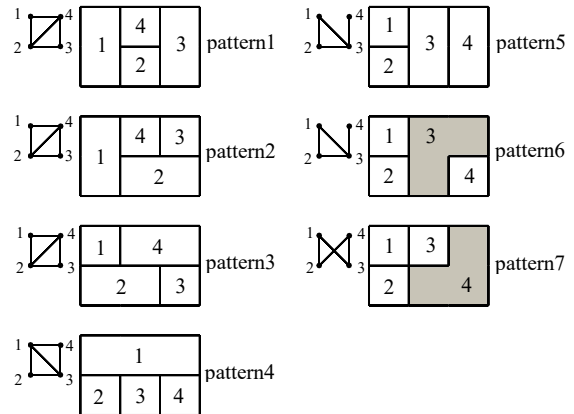


図5 最適化を行う空間配置

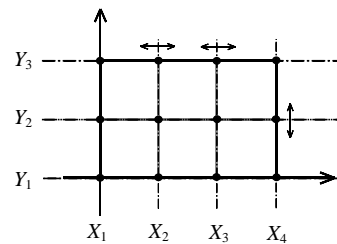


図6 通り芯

表1 設計変数

$P_{X_2}, P_{X_3}, P_{Y_2}$	通り芯 $X_2, X_3, Y_2$ の移動幅	
	$(0.0 \leq P_{X_2}, P_{X_3}, P_{Y_2} \leq 2.0)$	$(0.0 \leq P_{X_2}, P_{X_3}, P_{Y_2} \leq 4.0)$
	case-1	case-2,3
$P_s$	空間配置(1~7種類)	
$P_f$	室配置	

表2 GAパラメータ

	室配置最適化	面積差を考慮	構造性能を考慮
個体数	20	200	100
世代数	300	10000	1000
遺伝子長	8bit	8bit	8bit
突然変異率	0.05	0.2	0.2

表3 各種諸量

		寸法(mm)	断面積(cm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント(cm <sup>4</sup> )	
柱	角形鋼	400×400×22	316.0	$I_y = I_z$	
				73000	
梁	H型鋼	600×300×14×23	217.1	$I_y$	$I_z$
				134000	10600

6. 室配置最適化

表1の条件により、解析モデルを作成する。基準のスパン長さを6mとし、図6に示す通り芯  $X_2, X_3, Y_2$  の座標を変化させることで最小のスパン長さを4m、最大のスパン長さを8mとする。室配置最適化を case-1 とする。

6.1 定式化

目的関数は室数および空間数が4であるため式(2)と制約条件(3.a)~(3.d)において、 $n, p, q, r = 4$  として定義する。

6.2 数値結果

図8aに目的関数の遷移、図8bに室配置図と pattern の結果を示す。図8aより300世代終了時点で目的関数値は、3試行とも  $f(\mathbf{P}) = 10.825$  に収束する。このときの空間配置は pattern5 で、室配置は図8bに示す割当ておよびスパンに関する設計変数の値が得られた。

7. 面積差を考慮した室配置最適化

これまでは室を定義次第で様々な用途に対応可能なように番号で設定していたが、実際の設計においては用途に合わせた空間の面積も重要になる。そこで、空間の面積と必要面積の差を制約条件とする。用途と必要面積についてオフィスを想定して図7と表4のように設定する。柱スパンは初期値を8mとし、面積差を考慮した室配置最適化を case-2 とする。

7.1 定式化

目的関数は、空間の接続本数が多いほうを利便性があると考えて、値が小さくなるように式(5)と定義する。

$$\text{Find } \mathbf{P} \tag{4}$$

$$\text{to minimize } f(\mathbf{P}) = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r C_{ki}(\mathbf{P}) D_{mj}(\mathbf{P}) x_{ki} x_{mj} x_{ij} x_{km} \right) \tag{5}$$

$$\text{subject to } 0 < B_{ij} < 5 \tag{6}$$

ここで、 $\mathbf{P} = (P_{X_2}, P_{X_3}, P_{Y_2}, P_s, P_f)^T$ 、 $B_{ij} = |A_j - \bar{A}_i|$  : 面積差、

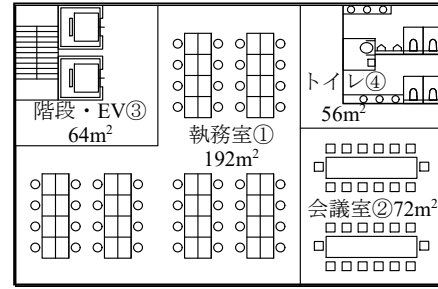


図7 室用途と必要面積

表4 室用途と必要面積

室番号	室用途	必要面積(m <sup>2</sup> )
①	執務室(48人)	192
②	会議室(28人)	72
③	階段・EV	64
④	トイレ	56
合計		384

$A_j$  : 空間面積、 $\bar{A}_i$  : 必要面積、 $n$  : 空間の接続本数である。なお、制約条件は(3.a)~(3.d)に加える。GAの計算パラメータは表2の値を用いる。最適化は3試行行い、収束性を確認する。

7.2 数値結果

図9aに目的関数の遷移、図9bに室配置図と pattern の結果を示す。図中の青丸内数字は必要面積を表す。図9aより、10000世代終了時点で目的関数値は、3試行とも  $f(\mathbf{P}) = 5.0807$  に収束する。このときの空間配置は pattern1 で、室配置は図9bに示す割当ておよびスパンに関する設計変数の値が得られた。必要面積にあった空間面積となっていて面積差が0~5 m<sup>2</sup>の間に収まっていることが表5にて確認できる。

8. 構造性能を考慮した室配置最適化

構造性能として5層の鋼構造骨組みの解析モデルに対する構造解析を実行し、層間変形角および許容応力度の制約条件を与える。本稿では、屋根荷重 7.1kN/m<sup>2</sup>、床荷重 5.4kN/m<sup>2</sup> と仮定した地震力を算定し、Y方向に水平外力を与える。構造性能を考慮した室配置最適化を case-3 とする。

8.1 定式化

目的関数は層ごとの総移動コストの合計であるため、式(8)のように定義する。

$$\text{Find } \mathbf{P} \tag{7}$$

$$\text{to minimize } f(\mathbf{P}) = \sum_{\alpha=1}^5 \left( \frac{1}{n} \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r C_{ki}(\mathbf{P}) D_{mj}(\mathbf{P}) x_{ki} x_{mj} x_{ij} x_{km} \right) \right) \tag{8}$$

$$\text{subject to } -\beta \bar{A}_i < B_{ij} < \beta \bar{A}_j \tag{9.f}$$

$$\theta \leq \frac{1}{200}, \frac{\sigma_b}{f_s} \leq 1 \tag{9.g,h}$$

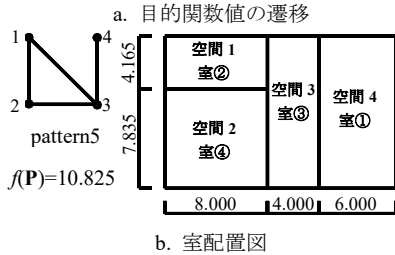
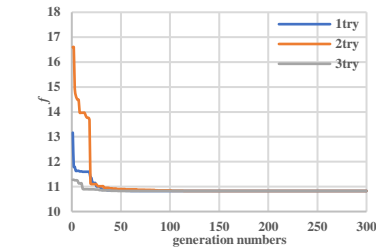


図 8 室配置の結果

表 5 面積差

室用途	空間面積 (m <sup>2</sup> )	必要面積 (m <sup>2</sup> )	$B_{ij}$
執務室	191.744	192	0.256
階段・EV	59.085	64	4.915
会議室	76.800	72	4.800
トイレ	56.371	56	0.371

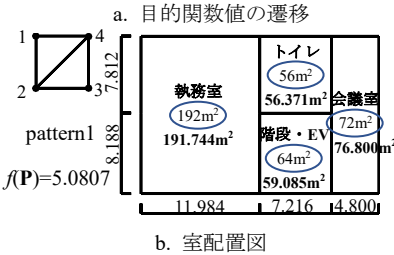
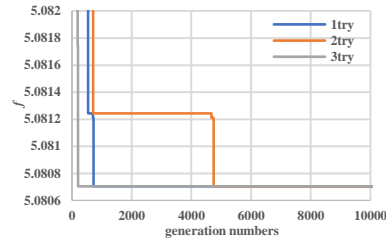


図 9 面積差を考慮した室配置の結果

表 6 構造解析の解析結果

各層の層間変位(mm)		各層の最大曲げモーメント(kNm)	
$\delta_{1max}$	0.930	$M_{1max}$	48.626
$\delta_{2max}$	0.404	$M_{2max}$	26.755
$\delta_{3max}$	0.502	$M_{3max}$	42.097
$\delta_{4max}$	1.272	$M_{4max}$	55.697
$\delta_{5max}$	0.486	$M_{5max}$	28.497

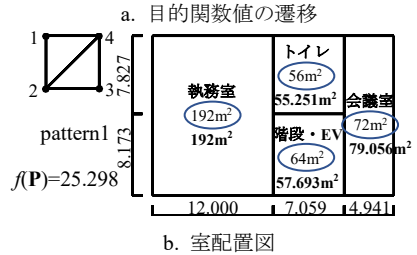
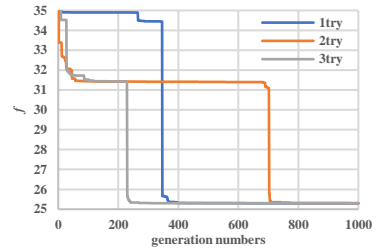


図 10 構造性能を考慮した室配置の結果

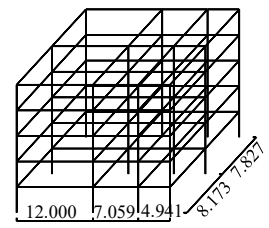


図 11 鋼構造骨組モデル

ここで、 $\alpha$  : 任意の階における層番号、 $B_{ij} = A_j - \bar{A}_i$  : 面積差、 $\beta$  : 面積差の増減率(=0.1)、 $\theta = \delta/h$  : 層間変形角、 $\delta$  : 層間変位、 $h$  : 階高、 $\sigma_b = M_z/Z$  : 曲げ応力度、 $f_s$  : 短期許容曲げ応力度、 $M_z$  : z 軸まわりの曲げモーメント、 $Z$  : 断面係数である。なお、式(6)の制約条件では制約を満たす解が確認できなかったため、面積差の制約条件の範囲を必要面積の 10%以内にとまるように設定する。 $\beta$  がその割合を示している。部材の断面性能と、GA の計算パラメータ等は表 2,3 の値を用いる。また、空間配置はすべての層で同じパターンとする場合を考えている。

## 8.2 数値結果

図 10a に目的関数の遷移、図 10b に室配置図と pattern の結果を示す。図 10a より 1000 世代終了時点で目的関数値に若干の差が生じたが、3 試行とも目的関数値は  $10^{-3}$  程度の差に収まっている。このときの空間配置は pattern1 で、室配置は図 10b のようになる。鋼構造骨組モデルは図 11 に示すような形態になる。表 6 の構造解析の結果より制約条件を満たしていることが確認できる。

## 9. 考察

室配置最適化の結果より、合理的な室配置パターンが得られていると考えられる。室配置最適化と面積差を考慮した室配置最適化において最適結果の空間配置のパターンと室配置が異なるため、必要面積にあった室配置となり、面積差の制約条件が有効に効いていることが判る。面積差

を考慮した室配置最適化と構造性能を考慮した室配置最適化で空間配置と室配置は一致したが、スパンに若干の変化が見られたため、多層化による構造性能の制約条件が影響を与えていると考えられる。したがって、建築計画と構造性能を考慮した複合最適化の有用性が確認できる。

## 10. まとめ

本稿では、室配置問題の定式化、最適化問題の設定および構造性能を考慮した室配置最適化問題の数値結果を示すことができた。制約条件の設定により、異なる解が得られ、構造性能の制約条件を加えることによって有意な解を得ることができた。今後は層ごとに異なる空間配置のパターンを組み合わせることで、PSO や ABC などといった他の最適化手法を用いること、日当たりやアスペクト比なども考慮した制約条件をさらに追加した最適化や多目的最適化の可能性について検討を行う。

## 【参考文献】

- 1) 宗本晋作, 加藤直樹, 今村元一: 直交グラフ描画法を用いた室配置手法—タプ探索法を用いた対話型多目的最適化—, 日本建築学会計画系論文集, 529号, pp.279-286, 2000
- 2) 寺田秀夫: 室空間の隣接関係により定義された長方形分割図を求める方法について—室空間の配置計画のための分析と総合の方法に関する研究(その 1)—, 日本建築学会計画系論文報告集, 414号, pp.69-80, 1990
- 3) 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, 計算工学シリーズ 4, コロナ社, 2004
- 4) 加藤直樹, 大崎純, 谷明勲: 建築システム論, 造形ライブラリー 03, 共立出版株式会社, 2002