

確率的探索アルゴリズムを用いた柱配置と部材断面最適化

～ABC アルゴリズムを用いた検討と GA との比較～

○上野 修平*1 山邊 友一郎*2
谷 明勲*3

キーワード：構造最適化 ABC アルゴリズム 遺伝的アルゴリズム

1.はじめに

建築構造の組み合わせは無数に存在し、通常、建築の構造設計を行う場合、設計者がそれらの中からいくつかの案を提案し、それらを比較・検討し、建築物の構造を決定していく。しかし、このような方法では、設計者の経験や勘に依存することも多く、検討を行っていないより優れた解が存在することも考えられる。また、近年急速に性能が向上しているコンピュータを用いる方法も考えられるが、建築構造の解は無数に存在するため解空間の全数探索を行うには未だに多くの時間を要する。このように、解が無数に存在する組み合わせ最適化問題の解決法として、確率的探索手法を用いることは有効である。本研究ではその中から遺伝的アルゴリズム^{[1][2]}(Genetic Algorithm：以下 GA と記す)や Artificial Bee Colony アルゴリズム^{[3][4]} (以下 ABC アルゴリズム) を用いてラーメン構造鉄骨建築物の柱配置と全部材の断面選定の最適化を行う。GA は、生物進化の過程(選択淘汰、突然変異)に着想を得たアルゴリズムで、確率的探索、学習、最適化の一手法と考えられる。GA を用いた建築構造に関する研究では、これまでコアを含む事務所ビルの構造要素最適配置^[5]や自由曲面シェルのひずみエネルギー最適化^[6]等が行われている。ABC アルゴリズムは 2005 年 Karaboga が提案したアルゴリズムで、ミツバチの採餌行動に基づいた手法である。

本研究では比較的新しい ABC アルゴリズムを用いて、鉄骨構造物の柱配置と部材断面選定に関する最適解の探索の検討を行い、既報^[7]で用いた GA との結果と比較し、適切な解探索手法の検討をおこなうことを目的とする。

2.対象モデル

本研究では、最適化の対象構造モデルは、長方形の平面形状を持つ 1 層鉄骨造構造物とし、規模はユーザ入力により決定される。階高は 3.6m で一定とし、設計用荷重は 1 層ではあるが事務所用の床荷重を想定する。また、床、壁、小梁等の二次的な部材は設計対象とせず、柱と梁のみで構成される柱脚固定ラーメン構造を考える。また、接合部は全て剛接合とし、接合部強度の検討は行わないものとする。なお、ここでは、全部材について断面の算定は行いが、部材配置については柱配置のみを最適化の対象とし、

問題の簡略化を図る。

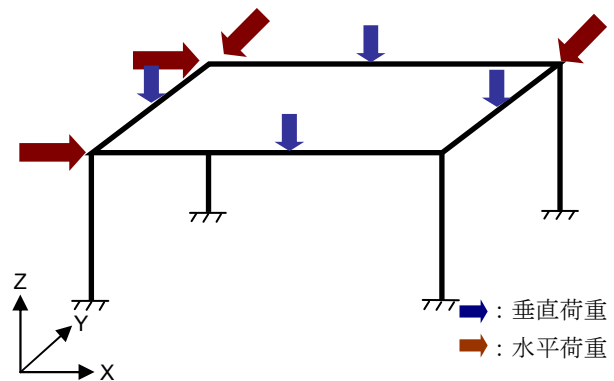


図1 対象モデル

部材断面の算定最適化で選択対象とする部材リストを表 1, 2 に示す。使用する鋼材種別は、柱部材には角型鋼管を、梁部材には H 型鋼を用いるものとし、柱要素は 6 種類、梁要素は 8 種類用意する。

表1 柱部材リスト

柱番号	H (mm)	B (mm)	T (mm)	重量 (kg/m)
1	150	150	4.5	20.1
2	175	175	5	26.2
3	200	200	9	52.3
4	250	250	9	66.5
5	300	300	9	80.6
6	350	350	12	124

表2 梁部材リスト

梁番号	H (mm)	B (mm)	Tw (mm)	Tf (mm)	重量 (kg/m)
0	100	50	5	7	9.30
1	148	100	6	9	20.7
2	200	100	5.5	8	20.9
3	250	125	6	9	29.0
4	300	150	6.5	9	36.7
5	400	200	8	13	65.4
6	500	300	11	18	128
7	588	300	12	20	151

解析に用いる荷重は、鉛直荷重として Pf(床荷重)、Pb(梁自重)、Pc(柱自重)の 3 種類を作用させる。床荷重は固定荷

重 (2.8kN/m²)、積載荷重 (1.8kN/m²) の合計として 4.6kN/m² を梁中央部に設けた接点に集中荷重として作用させる。水平方向の荷重は、X、Y 方向 2 方向から建物自重の 20% を作用させる。この水平荷重はそれぞれの方向のスパン数で分割して作用させる。

3. 目的関数

最適化に用いる目的関数を式 (1) で与える。

$$Ev = Ev.1 \times Ev.2 \quad (1)$$

以下に Ev.1, Ev.2 の詳細を示す。

(1) 構造制約条件 [Ev.1]: 建築構造物が、安全性、機能性を保持するために必ず満足すべき条件として以下の 6 種の制約を設ける。

- ① 柱: 圧縮と曲げの組合せ応力度 ≤ 許容応力度
- ② 柱: せん断応力度 ≤ 許容応力度
- ③ 梁: 曲げ応力度 ≤ 許容応力度
- ④ 梁: せん断応力度 ≤ 許容応力度
- ⑤ 梁: たわみ ≤ 1/300
- ⑥ 層間変形角 ≤ 1/200

配置された各柱・梁部材が上記の条件を満足しているかを確認する。これらの制約条件は、構造物として全てを満たすことが必要で、一つでも制約条件を満たさない部材がある場合は、式(2)を用いて評価を大きく低減させ、すべての部材がこれらの制約条件を全て満たす場合は、式(3)のように評価値を 1 とする。

$$Ev.1 = \frac{1 - \left(\frac{violation}{Total} \right)}{10} \quad (2)$$

$$Ev.1 = 1 \quad (3)$$

violation: 違反部材数, *Total*: 総部材数

(2) 部材総重量 [Ev.2]: 構造物の経済性に関する指標として、使用構造部材の総重量を評価指標に設定する。ここでは、建築構造コストが構造物の重量に比例すると考える。また、総重量が増えることで、構造物に作用する水平荷重も大きくなる。なお、部材総重量は染色体で決定される部材重量の合計とし、式(4)で評価値を求める。なお、最大総重量は、単位長さ当りの重量が最も重い部材を全ての柱、梁部材に選択した場合の構造部材総重量とする。式(4)より、部材総重量が小さいほど適応度が高くなる。

$$Ev.2 = 1 - \left(\frac{weight}{max\ weight} \right) \quad (4)$$

weight: 部材総重量, *max weight*: 最大重量

4. システムの概要

本研究で用いるシステムではユーザが建築物の規模を x 方向、y 方向について入力する。また、スパンの分割数についてもユーザの入力により決定し、規模と分割数に基づいて柱の候補座標と梁の座標設定される。座標に対応する

数列 xi を作り、表 1、2 の柱番号、梁番号を数列に代入することで部材を選定する。また、柱番号 0 を代入することでその座標の柱を抜き、柱の配置最適化を行う。

5. Artificial Bee Colony アルゴリズム

ABC アルゴリズムは、収穫蜂、追従蜂、偵察蜂の行動に基づいた 3 つのフェーズで構成される。収穫蜂と追従蜂のフェーズでは、解候補近傍の局所探索を行うが、収穫蜂は乱数によって解候補を選択し、追従蜂はルーレット選択をもとに解候補を選択する。これらの蜂の探索位置を xi の数列として目的関数の変数とする。本研究では部材番号によって数列を構成することで蜂の柱配置、部材断面種を決定していく。偵察蜂フェーズは、採餌行動において尽きた食糧源を捨てる行動を真似たもので、探索の進捗において有益ではなくなった解候補を捨て、探索空間の新たな領域を探索するため、新たな解候補を挿入する。アルゴリズム中では、指定した制限探索回数を超えて同じ xi に蜂が留まる場合は、新たな領域の探索を行う。図 7 に ABC アルゴリズムのフローを示す。

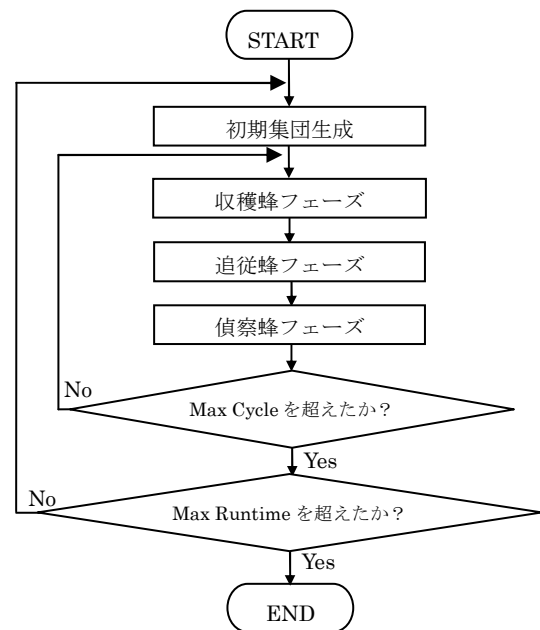


図 2 ABC アルゴリズムのフロー

本研究の対象モデルにおいて、ABC アルゴリズムの各パラメータ設定で最適化結果がどのように変化するかを検討するために、採餌行動の餌場数、フェーズの繰り返し回数 MaxCycle 数、最適化実行回数 MaxRuntime 数を変更して、32 種類のパターンについて最適化を行った。すべての場合で、建築物規模は 16m × 16m、分割数は 4 × 4 と一定として実行した。図 3、4 でその実行パターンを示す。

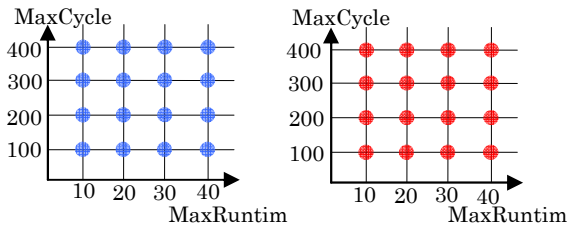


図3 餌場数 10 パラメータ

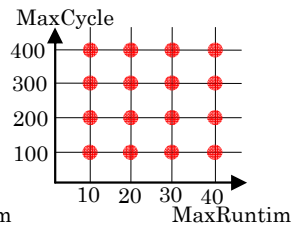


図4 餌場数 20 パラメータ

6.結果と考察

その最適化結果を目的関数の値、Runtime 数、Maxcycle 数のグラフとして図 5~8 に示す。目的関数の値については Runtime ごとの平均値と最終的な最大値を示す。

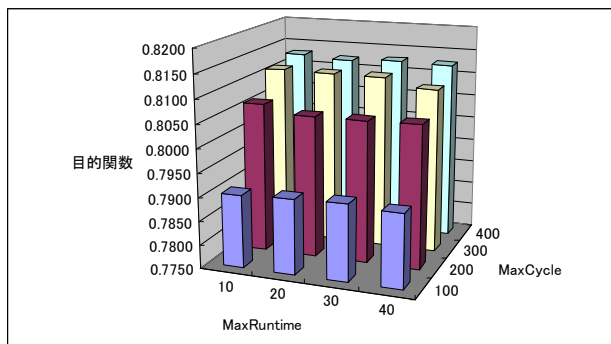


図5 餌場数 10 結果目的関数平均値

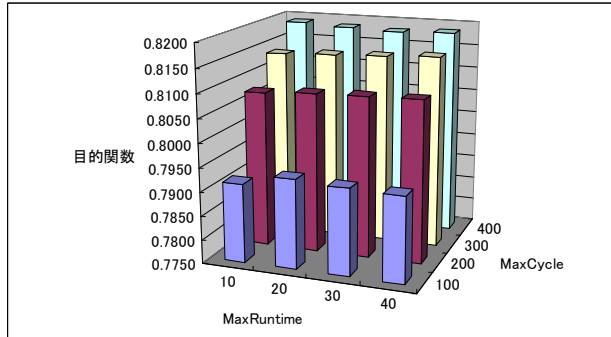


図6 餌場数 20 結果目的関数平均値

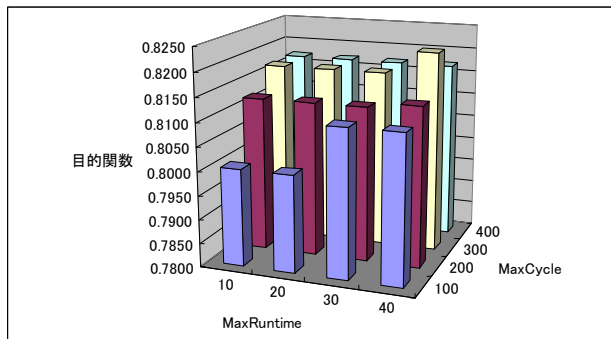


図7 餌場数 10 結果目的関数最大値

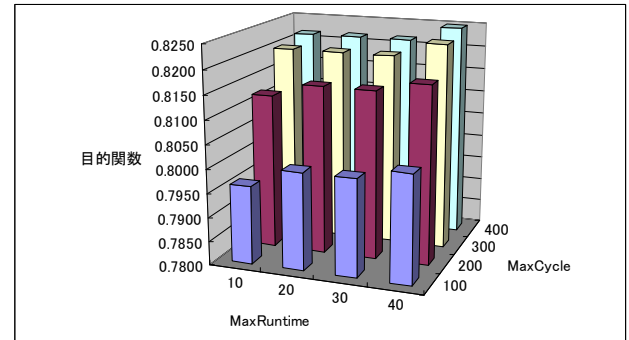


図8 餌場数 20 結果目的関数最大値

目的関数の値の Runtime 毎の平均値では cycle 数が増えるほど高い評価が得られるがすべての Runtime の最大値の場合では 300cycle と 400cycle では大きな差は見られなかった。餌場数 10 で Runtime 数 40 の場合では 300cycle のほうが高い最大値が得られた。これは偵察蜂により新たな解が探索されたためだと考えられる。多くの良解を見つけるためには Cycle 数を増やす必要があるが一つの良解探すには 300cycle 程度として、Runtime を 10 程度とすることで短時間で最適化することができる。また、餌場数 10 の 400cycle と餌場数 20 の 200cycle では探索する個体数は同程度となるが、餌場数 10 における最適化結果のほうが平均値、最大値ともに大きくなる結果となった。餌場数を少なくすることで同程度の時間で一つの餌場において長い探索ができると考えられるが、今回の結果では cycle 数にあわせて偵察蜂に設定した探索制限回数を変化させているためこのような結果となることも考えられる。餌場数と制限回数のパラメータの調節については今後更に検討を行う必要がある。

7.GA との比較

建築規模と分割数を同条件とし、実行世代数を 10000 世代として GA による最適化によって得られた結果とこれらの ABC アルゴリズムによって得られた結果とを比較する。本研究では構造解析の行列計算が実行時間の大部分を占める。また、実行時間で比較するとコンピュータの性能によって差が生じる。この二つの理由により、解析を行った個体数が同程度のものを ABC アルゴリズムの結果から選択する。図 9、10 に解析個体数と Cycle 数、Runtime 数の関係を示す。

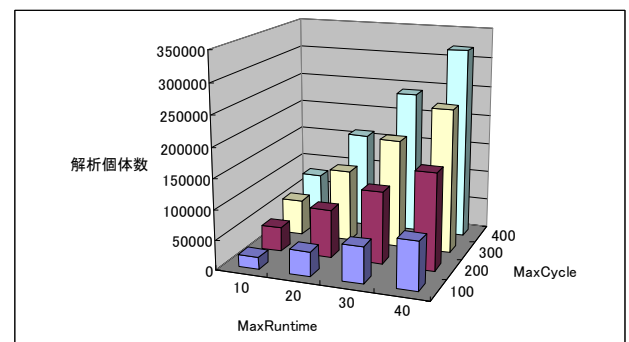


図9 餌場数 10 の解析個体数

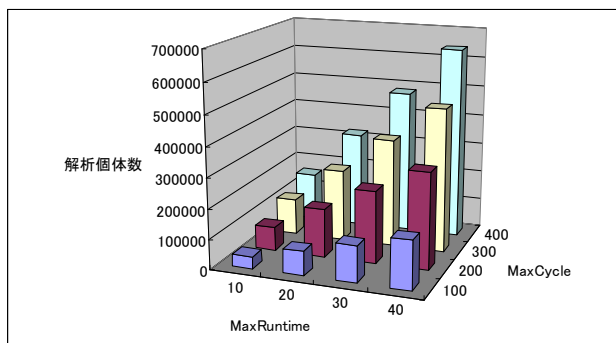


図 10 餌場数 20 の解析個体数

また、表 3 に GA における結果を示す。その配置を図 11、12 に示す。線やマークの太さや大きさは設定された部材断面の大きさを表し、大きいものほど大きな部材断面を示す。また、青いマークは柱位置を示し、赤いマークは候補座標であるが柱が抜かれた座標をしめす。

表 3 GA による結果

	乱数	実行世代	解析個体	目的関数
case1	1	10,000	223,285	0.813
case2	2	10,000	223,461	0.816

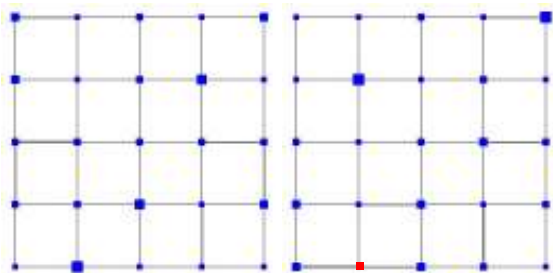


図 11 case1 部材配置 図 12 case2 部材配置

解析個体数が GA と同程度であったものを ABC アルゴリズムの結果より 4 つ選択して case3~6 として表 4 に示す。cases1,2 と同様に目的関数が最大値となった配置を図 13~16 に示す。

表 4 解析個体数が 22 万程度の ABC アルゴリズム結果

	餌場数	Run-Cycle	解析個体	目的関数
case3	10	30-400	240,464	0.817
case4	10	40-300	240,557	0.822
case5	20	20-300	240,515	0.820
case6	20	30-200	240,774	0.815

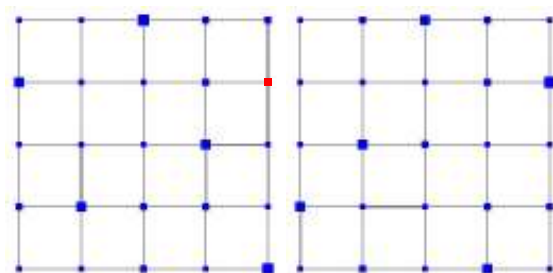


図 13 case3 部材配置 図 14 case4 部材配置

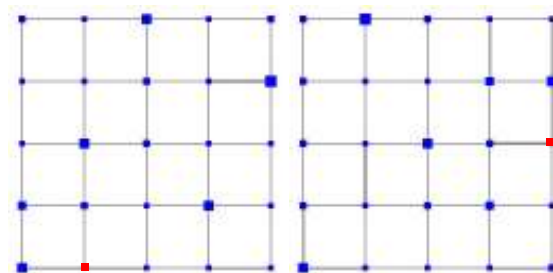


図 15 case5 部材配置 図 16 case6 部材配置

8. 考察とまとめ

cases3~6 では僅かに解析個体数が cases1、2 と比較して多いが、目的関数の最大値では高い値が得られた。また、解析個体数が cases1、2 より少ない場合においても目的関数の最大値では高いものが見られるため、今回扱った問題に対しては ABC アルゴリズムを用いたものの方が最適化効率が高いと考えられる。

しかし、cases1、2 は全体的に部材が最適化されているのに対して、cases3~6 では、部分的に十分最適化されていない部材が見られる。これらは GA における遺伝的操作と ABC アルゴリズムにおける餌場探索の数列変更ルールの違いより生じたものだと考えられる。

今後の課題としては、探索制限回数やより問題を複雑にした場合などについて、GA と ABC アルゴリズムを用いて検討を行っていく予定である。

【参考文献】

- Holland, J.H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan, 1975, and MIT press, 1992
- 北村 宏明 著: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.6
- the Intelligent Systems Research Group: Artificial Bee Colony Algorithm Home Page, <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/index.htm>
- Dervis Karaboga, Bahriye Akay: A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm, Applied Mathematics and Computation, Vol.3, pp.1980-1987, 2009
- 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.
- 和田大典, 本間俊雄: 解の多様性を考慮した GA 系解法による自由曲面シェル構造のひずみエネルギー最適化に関する研究, コロキウム 構造形態の解析と創生, pp25-30, 2009.
- 上野修平, 山邊友一郎, 谷明勲: 確率的探索アルゴリズムを用いた部材配置断面最適化~GA と ABC アルゴリズムの比較~, 第 29 回ファジィシステムシンポジウム論文集, 2013

*1 神戸大学大学院工学研究科 博士前期課程 学士 (工学)

*2 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士 (工学)

*3 神戸大学大学院工学研究科 教授 博士 (工学)