対流・放射連成解析と遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた屋外温熱環境 の最適設計手法に関する研究

屋外温熱環境設計のための樹木の最適配置

STUDY ON OPTIMUM DESIGN METHOD FOR PLEASANT OUTDOOR THERMAL ENVIRONMENT USING GENETIC ALGORITHM (GA) AND COUPLED SIMULATION OF CONVECTION, RADIATION AND CONDUCTION

Optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor thermal environment

陳 宏*, 大岡龍三**, 加藤信介***

Hong CHEN, Ryoza OOKA and Shinsuke KATO

A lot of researches have been recently conducted on tree planting in order to improve outdoor thermal environment in summer. In this paper, the optimum design method with Genetic Algorithm (GA) about optimum arrangement of the trees for comfortable outdoor thermal environment is examined with the coupled simulation of convection, radiation and conduction. In this research, in order to clarify the effect of the different target area (all open space or pedestrian road) for optimization, the two cases which are different in target area are examined. As a result, the optimum arrangements of the trees are given using GA and simulation for the two cases.

Keywords: GA, Tree, Optimum Arrangement, Outdoor Thermal Environment

遺伝的アルゴリズム, 樹木, 最適配置, 屋外温熱環境

1. 研究の背景と目的

近年、都市化の進行に伴うヒートアイランド現象が進行し、都市の屋外温熱環境が悪化してきた。この劣悪な夏季の屋外温熱環境を改善するために、都市・建築計画と環境工学分野において多くの研究が行われている。このような背景から、近年緑地と樹木の配置による潜熱蒸発の促進、及び日射の遮蔽が注目されている。例えば、荻島らは、街路樹の放射温度分布を実測し、街路樹の暑熱緩和効果の数値解析を検討した^{文1)2)}。また、吉田らは、日射遮蔽効果、風速低減効果、蒸散効果等を総合的に組み込んだ3次元樹木モデルを提案し、街路樹の影響を考慮した市街地における屋外温熱環境の数値解析を行った^{文3)}。しかし、以上の研究では樹木の環境形成効果の評価技術の開発が主であり、樹木を用いた屋外温熱環境の設計手法の開発・提案にまで十分に至っているとは言えない。

なお、植樹による快適な屋外温熱環境を設計するためには、適正な樹木配置が非常に重要な要因となるが、実際の植樹は視覚的意味合いから経験的になされることが多い。屋外温熱環境に限らず何かを設計するためには、設計目標を達成することが肝要である。また、設計者にとっては、より良い、より効率的な「最適

設計」の手法を確立することが期待されている。しかしそれら経験的なデザインが実際に「最適」であるかどうかを確認するためには、考えられるデザインをすべて検討(全探索)する必要があるが、この方法では検討事数が膨大となり、実際的ではない。このような問題に対して、建築においても構造分野や計画分野においては比較的早い段階で設計目標となる評価関数値を最大化させる最適設計手法の研究が行われてきた^{文4)5)6)}。最近では環境分野においても室内空調設計を対象に最適設計の研究が進められている^{文7)}。屋外温熱環境設計においても同様のアプローチが可能である。尚、夏季の暑熱環境の緩和に対する要請が強い現在、樹木の温熱環境緩和効果に関する設計が確立されれば、多くの屋外環境設計に今後利用されるものと期待される。しかしながら、今まで、樹木の最適化が工学的問題として取り扱われることがなかったという原因の1つはその工学的設計手法が確立されていないということが考えられる。本研究では屋外設計手法の研究の第1段階として、樹木の温熱環境緩和効果に関わる最適配置設計手法の提案を行った。今後は他の要因も組み込んだ多目的最適設計手法の検討を行っていきたいと考えている。

本研究では屋外空間の温熱快適性に着目し、良好な屋外温

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生
** 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)
*** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

Graduate Student, University of Tokyo, M. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Ph. D.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

図1 最適設計システムの構成

図2 2段階最適設計手法

熱環境を実現するための樹木の最適配置について、放射・対流連成シミュレーションを援用した最適設計手法の検討を行う。尚、最適解の探索については、遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）^{※7)}を利用する。

2 最適設計システム

2.1 最適設計システムの構成

図1に本研究で用いた対流・放射連成解析とGAを用いた屋外温熱環境の最適設計システムの構成を示す。この最適設計システムは、①設計者により最適化問題を設定する部分、②対流・放射連成解析により屋外温熱環境を解析する部分、③GAにより屋外温熱環境の評価と最適探索過程の制御の部分等3つ部分により構成される。ここで、①の部分において、最適設計に関する設計目標と設計要素を決定し、最適設計手法、最適設計のための屋外温熱環境の数量化評価方法と最適解の候補を選ぶための基準値も決定する。②の部分において、解析対象における風速、気温、湿度、

MRTの空間分布を算出し、屋外温熱環境の最適評価値（本研究ではSET*）の空間分布を求める。③の部分において、①の部分で決めた最適解の候補を選ぶための基準値を用いて②の部分で算出される屋外温熱環境の評価値が適合するかどうかを検討する。この時、屋外温熱環境が設計目標を満たさない場合、設計変数の組み合わせを変更し、②の部分へフィードバックすることにより最適探索を進める。また、屋外温熱環境の評価値が設計目標を満たす場合、②の部分へフィードバックを終了する。この時の設計パラメータの設定値が最適値となる。

2.2 2段階型最適設計手法

GAを利用した探索について全て詳細な放射・対流連成解析により検討を行うと計算負荷が膨大となり、実用設計には適さない。そこで本研究では比較的な粗な計算で上位個体を抽出する第1段階探索とその上位個体群から詳細な解析を用いて最適個体を選ぶ第2段階探索に分ける2段階型最適設計手法^{※7)}を利用する。図2に解析手順を示す。

- ① **第1段階探索**: 放射解析は定常解析、CFD解析は粗メッシュの解析で行った。全て解候補のうちに、最適評価値が予め設定した最適候補基準値を越えるものを第2段階の最適探索の候補とする。
- ② **第2段階探索**: 上記の第2段階最適探索の候補に対して、詳細な放射・対流・湿気輸送連成解析を行った。各個体について気温、風速、相対湿度の空間分布を算出し、最適評価値を求める。この段階では、放射・伝導解析は非定常解析、CFD解析は細メッシュの乱流解析である。
- ③ 第2段階で解析された設計パラメータの組み合わせの内、最適評価値（適合度）最も高い個体を最適設計とする。

3. 最適化問題の設定

3.1 設計目標

本研究は夏季における樹木の最適配置による屋外温熱環境の最適化を設計目標とする。具体的には後述する最適化評価関数（ここではSET*の低下）の空間分布の値の屋外空間における空間積分を最大化するような樹木の最適配置の探索を行う。

3.2 解析対象

図3に街区モデルを示す。同一形状の建物モデルで構成される街区を想定する。解析の日時は東京の7月23日午後3時を対象

図3 解析対象

とする。太陽高度は 45.1° 、風向は南、風速は高さ 74.6m において 3.0m/s、外気温、相対湿度はそれぞれ 31.6°C 、58% と想定した。また、本モデルにおける樹木の本数は 8 本であると固定し、その高さは 7m、樹冠径 5m とする。本研究で利用する樹木モデルは吉田らが開発したものである³⁾。

3.3 設計パラメータ

本研究では、解析領域における樹木の位置を設計パラメータとする。具体的には、それぞれの樹木が後述する解析領域における全ての 26 箇所の樹木配置できるメッシュのうち、実際に樹木を配置するメッシュの番号を本研究の設計パラメータとした。

3.4 評価関数

最適の数量化評価は、基本ケースとする樹木が配置されないケースにおける SET^* ⁹⁾ の空間分布に対して、樹木を配置した場合の SET^* の変化量、すなわち、樹木の配置による屋外熱環境の改善程度により評価する。

具体的には、まず、基本ケースについて、放射・対流連成解析を行い、 SET^* の空間分布を求める。次に、樹木を配置した場合の放射・対流連成解析により SET^* の空間分布を算出し、下記の式で評価関数（適合度）を計算する：

$$F_{total} = \sum \{B_j - D_j\} \quad (1)$$

F_{total} : 最適程度を判断するための評価値（適合度）

B_j : 樹木がない場合の j ポイントの SET^* の値

D_j : 樹木を配置した場合の j ポイントの SET^* の値

本研究では、最適化評価関数の空間分布の値の屋外空間における空間積分値を最大化するような樹木の最適配置を設計目標とする。そのため、評価関数が高い最適解の候補が高適合度の個体となる。

3.5 GA による最適探索と染色体の記述方法

遺伝的アルゴリズム(GA)は最適化問題を生物の進化の過程に模倣した方法によって解く。ここでは、個体と呼ばれる最適の候補は一つの生物とみなす。生物の進化と同じように、個体の情報は「染色体」(chromosome)と呼ぶ記号列により記述し、個体と染色体を一対一に対応づけしておく。GA は各個体の染色体

図4 島モデルの概念

図5 染色体の記述

に対して選択、交叉、突然変異などのオペレートを行い、それぞれの適合度を計算する。探索した個体の全てのうち、適合度が最も高い個体は最適個体となる。

本研究はより効率的な島モデル遺伝的アルゴリズム (Multi-island Genetic Algorithm) ¹⁰⁾ を用いた。図4に島モデルの概念を示す。島モデル遺伝的アルゴリズム手法は並列分散（多点同時探索型）の最適化手法である。その特徴は1つの世代での個体群を複数の島 (sub-population) に分割し、各島で独立に遺伝的操作を行い、各島の間で移住 (migration) と呼ばれる個体情報の交換を定期的に行なわせる。今回の解析では、島の個数は6個、各島での一代の個体数は10個、一代の個体数の合計は $6 \times 10 = 60$ 個、世代数は12に設定した。探索の過程で解析された全個体数は $60 \times 12 = 720$ 個となる。

図5に染色体の記述方法を示す。今回の樹木の配置問題は2次元格子平面に樹木配置できる26セルのうちの、どの8セルに樹木を配置するかということを決める問題とした。1つの樹木を

「ユニット」とし、それぞれに「樹木番号」を与える。この樹木の並びに対して、それぞれの樹木を配置される位置（図5に定義したメッシュ番号）の情報を与えたものを今回のGAで用いた染色体とする。通常染色体は2進表記であり、遺伝子座には0か1が入るが、本研究では、染色体は1～26で定義したメッシュ番号を2進表記に変更し、対応的な遺伝子座に書き込みするという操作によって設定した。

表1に本研究で利用したGAのパラメータを示す。本研究における、GAの操作の手順は具体的には下記のように行った。まず初期値として、ランダムに初期集団（第1世代）の各個体（60個）を生成する。次に、放射・対流連成解析によりそれぞれ個体の適合度を算出する。各島の10個の個体のうち、適合度が上位4位の個体を選択し、この4つ個体に対してランダムに単純交叉（Simple crossover、交叉率100%）、あるいはランダムに突然変異（Normal mutation、突然変異率2%）などのオペレータを行い、次の世代の子供（個体）を10個体生み出す。そして更に同じオペレータを繰り返す。また、島モデルGAでは、2世代ごと（移住間隔2）で図4に示すように、各島間において移住という個体の交換を行う。移住先の島はランダムに決定し、各島の半分の個体（移住率0.5）を交換させる。このような移住を2世代ごと6回繰り返し、合計12世代の最適探索を行う。

また、本研究で利用した交叉は1点交叉であり、交叉や突然変異により遺伝子座（樹木の位置）が重なる場合にはその解を除外している^{注2)}。

3.6 解析ケース

表2に解析ケースを示す。注目される領域の異なりにより最適探索にどのような影響を与えるかを検討するために、下記の3つケースの解析を行った：① case0：基本ケース、樹木を配置しないケース。② case1：解析領域全体を注目対象とする。即ち、解析領域の高さ1.5mにおける各ポイントSET*の合計の検討を行う。③ case2：人間活動領域を注目対象とする。即ち、道路部におけるSET*の合計の検討を行う。

3.7 解析手順

本研究では図2に示す解析手順を用いた。第1段階探索ではCFD解析は粗メッシュの渦粘性係数を固定した解析で行った。この段階では全解析空間において屋外の気温と相対湿度の空間分布を一様に仮定した。全て解候補のうちに、最適評価値（適合度）の上

位10位個体を第2段階の最適探索の候補とする。また、2つの段階において基本ケース（樹木なし）のSET*をそれぞれに算出し、それぞれの段階の最適評価基準値とする。

4. 解析結果と考察

4.1 第1段階探索

図6、7にcase1とcase2の第1段階におけるGAによる最適探索過程を示す。横軸は最適探索のステップ数（RunCounter）であり、縦軸は評価関数（SUMSET）である。最適探索の進行に伴う、個体の適合度が向上となる傾向がみられ、GAによる最適探索は効率的なツールであると考えられる。また、図8、9にcase1

表1 GAのパラメータ

島のサイズ	(Size of Sub-Population)	10
島の数	(Number of Island)	6
一世代の個体数	(Population size)	60 (10×6)
世代数	(Number of Generation)	12
全個体数	(Total individual size)	720 (60×12)
移住率	(Rate of Migration)	0.5
移住間隔	(Interval of Migration)	2
トーナメント率	(Rate of tournament)	0.4
交叉率	(Rate of crossover)	1.0
突然変異率	(rate of mutation)	0.02

表2：解析ケース

case0	基本ケース（樹木を配置しない）
case1	領域全体を注目される（解析領域高さ1.5mにおける水平面）
case2	人間活動領域を注目される（道路部で高さ1.5mにおける水平面）

図6 case1 第1段階探索過程

図7 case2 第1段階探索過程

図8 case1 GAによる第1段階の最適探索結果(上位5位まで)

図9 case2 GAによる第1段階の最適探索結果(上位5位まで)

図10 case1 最適設計の温熱環境 (括弧内の値はそれぞれの面内平均値)(高さ1.5m)

図11 case2 最適設計の温熱環境 (括弧内の値はそれぞれの面内平均値)(高さ1.5m)

と case2 において第1段階の最適探索結果(上位5位まで)を示す。東京の7月23日午後3時の太陽方位は西南西であり、建物の西側と南側の外壁面の表面温度は高温となる。両ケースとも MRT を低減するため、樹木が建物の西側と南側に配置される傾向が見られる。解析領域全体を注目する case1 では、樹木は領域における平均的に配置されるが、これと異なり、人間活動領域を注目す

る case2 では、樹木が主に道路際を中心に配置されることが示される。

4.2 第2段階探索

case1 と case2 における第1段階探索で選ばれたそれぞれ10個体について第2段階探索を行う。詳細的な放射・対流・湿気輸送連成解析により選ばれた最適設計(最適個体)は図8、9に点線

で囲まれた樹木配置のボタンで示される。図 10、11 に case1 と case2 の最適設計の温熱環境を示す。case1 は case2 に比べ、面内平均値において、case1 は case2 より 0.5℃程度の気温が増加するが、気温の上昇に伴い case1 は case2 より 3%程度の相対湿度が低くなる。また、case1 の風速スカラー値は case2 より 0.04m/s 程度増加し、case2 より 0.5℃程度の MRT が低下となった。表 3 に最適個体の全領域と道路部における高さ 1.5m の平均 SET* の値を示す。基本ケースと比べ、case1 と case2 では SET* が低下し、樹木の配置による屋外温熱環境緩和効果が認められるが、case1 では全領域の平均 SET* は case2 に比べ若干低下するが、道路部における SET* が高くなる。最適評価の目標領域の異なりにより最適探索の結果に大きな影響を与えることが分かる。

MRT を低減するため、最適解では樹木が全て建物の南側と西側に配置されると想定したが、最適個体では両ケースとも建物の東側と北側に配置された樹木 (case1 の 25 番、case2 の 3,4,25 番) もあった。この原因としては以下 2 点と考えられる。ここで、例として case2 の第 3 位のような樹木を配置する個体と比べ、①case1 では、評価関数 (適合度) の注目領域は全解析領域であり、case1 の第 1 探索での最適個体 (第 4 位の個体) では、領域全体的に MRT がやや高くなるが、流れ場から見ると、上記の個体では、樹木が敷地の西南角に集中しているため、建物キャニオン空間における循環流を生じ、その場所での風速が大きくなった。また、メッシュ番号 25 の樹木は直接、直達日射を遮蔽しているわけではないが、建物壁面からの日射反射や照り通しによる長波放射を遮蔽するため、その周辺の MRT を低下させる効果があった。このため、第 4 位の個体の SET* が低下し、最適個体となった。②case2 では、評価関数 (適合度) の注目領域は道路部である。解析時刻の太陽方位は西南西であるので、case2 の第 1 探索での第 2 位のように樹木が道路の西側と南側に配置されると、道路部は日陰にならない。樹木の配置による日射遮蔽効果がないために、この配置については若干奇異な結果に思えるかもしれない。しかしながら、上記の個体では、メッシュ番号 3、4、25 の樹木は隣の建物壁面からの日射反射と照り通しによる長波放射を遮蔽するため、第 1 探索での第 3 位個体と比べ、道路部の MRT は逆に低くなる。このために、道路部を注目する case2 では、第 2 位個体が最適設計となったと考えられる。

尚、今回の解析で示された結果により、本最適設計手法は設計者の設計段階の参考として効果があると考えられる。

5. まとめ

(1) 屋外温熱環境設計ため、GA を利用した樹木の最適配置に関する最適設計手法の開発を行った。

(2) 全屋外空間と歩行者空間といった注目する領域の違う 2 つケースを解析し、注目する領域の違いが最適探索結果に影響を与えることが分かった。

(3) 基本ケースと比べ、今回の最適探索で得られた結果は case1、case2 とも樹木による屋外温熱環境緩和効果が認められる。また、case1 に対して、case2 では全解析領域における SET* の平均値が 0.4℃程度高くなったが、道路部における SET* の平均値が逆に 0.2℃程度低下した。このように注目した領域に応じて、その部分

表 3 高さ 1.5m の平均 SET* [℃]

	Case0	Case1	Case2
全領域	39.59	34.32	34.71
道路部	40.25	34.28	34.10

の温熱環境の最適化が達成され、本提案手法の妥当性が示唆されたと考えられる。

(4) 本研究の解析結果においては、両ケースとも最適個体に対する、不良個体の SET* の平均値は 2℃程度を上昇し、樹木配置の位置の異なりにより屋外温熱環境に大きな影響を与え、樹木の最適配置に関する検討は必要ということが分かった。また、近年、ヒートアイランドの進行に対する環境工学分野だけではなく、都市計画・建築計画分野においても多くの研究が行われている。このような背景から、実際の設計に対して、樹木の最適配置に関する解析結果は設計者の設計段階の参考として実用の効果があると考えられる。

注 1) 本報では屋外温熱環境に対する樹木の最適配置手法のプロトタイプを開発することが主目的である。一方、解析対象や条件に関してはモデルとして極めて簡素に設定している。従って、今回の解析結果をもって、汎用的な設計指針が得られたと考えることできない。あくまで手法の開発とそれによって何か可能かということを示唆していると理解されたい。また、植樹は冒頭に述べたように実際には温熱環境のみならず、様々な要因を考慮して設計される。今後はこの様々な要因や設計目標を統合的に取り扱う最適設計手法について検討を進めて行く予定である。

注 2) 本研究では、遺伝子型において各の遺伝子座の値が重なる場合があるため本研究では、下記の方法により対応した。各個体の評価関数 (適合度) の算出は遺伝子の遺伝子型 (genotype) から表現型 (phenotype) に翻訳した後に行われるため、遺伝子の遺伝子型から表現型に翻訳する方法を例として、下記の図に示す場合に説明する。まず、染色体において記載される遺伝子座の値 (樹木の位置) を大きい方から小さい方への順番に並べる。次に、樹木を配置するメッシュ番号の列の内に第 1 番目の樹木 (T1) 数値 (10) に対応する順番のメッシュ番号を取って、遺伝子の表現型における第 1 番目の樹木の位置を T1 (10) とする。また、1 つメッシュで 1 つ樹木しか配置しないということで、第 1 番目の樹木位置を与えた

図 遺伝子型 (genotype) から表現型 (phenotype) への翻訳方法

後、そのメッシュ番号(10)をメッシュ番号の列の内から削除する。つまり、第2番目の樹木が配置できるメッシュ数が11となる。但し、メッシュ番号の列の順番について10を消すと、順番10の位置でメッシュ番号は11となり、順番11の位置でメッシュ番号は12となる。その後、第2番目の樹木に対する、メッシュ番号の列にT2'の数値(7)に対応する順番のメッシュ番号を取って、遺伝子の表現型における第2番目の樹木の位置をT2(7)とする。更に、第2番目の樹木のメッシュ番号(7)をメッシュ番号の列の中から消す。順番7の位置でのメッシュ番号は8となり、順番8の位置でメッシュ番号は9となる。第3番目の樹木に対して、メッシュ番号の列にT3'の数値(7)に対応する順番のメッシュ番号(8)を取って、遺伝子の表現型における第3番目の樹木の位置をT3(8)とする。同じ方法で第4番目の樹木の位置(T4)は5となる。以上のような操作を繰り返すことにより表現型における遺伝子座の値の重なりを除外した。遺伝子座の値を大きい方から順番に並べたのはメッシュ番号が変化することによる煩雑さを避けるためである。

[参考文献]

- (1) 萩島理、片山忠久、林徹夫、谷本潤、樹木の放射温度分布に関する実測、街路樹のある街路の温熱環境予測 その1、日本建築学会計画系論文集、第516号、79-85 1999.2
- (2) 萩島理、片山忠久、林徹夫、谷本潤、数値計算による街路樹の暑熱緩和効果の評価、街路樹のある街路の温熱環境予測その2、日本建築学

会計画系論文集 第525号、83-90、1999.11

- (3) 吉田伸治、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、村上周三、樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討、日本建築学会計画系論文集 第536号、87-94、2000.10.
- (4) 三井和男、富田啓一、登坂宣好、構造形態解析における遺伝的アルゴリズムの応用、日本建築学会学術講演梗概集(構造1)、1211-1212、1994;
- (5) 岡本英樹、服部岑生、非線形評価関数を含む最適配置へのニューラルネットワークの適用、日本建築学会学術講演梗概集(建築計画1)、773-774、1993;
- (6) 青木義次、村岡直人、遺伝的アルゴリズムを用いた地域施設配置手法、日本建築学会計画系論文集、第484号、129-135、1996;
- (7) 金泰延、加藤信介、村上周三、遺伝的アルゴリズムとCFDを組み込んだ室内温熱環境の2段階型最適設計手法の開発、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、69-72、2001;
- (8) 北野宏明編、遺伝的アルゴリズム1、産業図書株式会社、1993;
- (9) A.P.Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi, A Standard Predictive index of human respons to the thermal environment, AHSRAE Transactions, 92(1), 709-731, 1986.
- (10) Reiko Tanese, Distributed genetic algorithms, Proc.3rd ICGA, pp. 434-439, 1989.

(2003年7月9日原稿受理、2003年11月17日採用決定)