

対流・放射連成解析と遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた 屋外温熱環境設計のための建物最適配置に関する研究

Study on Optimum Design Method of Arrangement of Building for Pleasant Outdoor Thermal Environment Using Genetic Algorithm (GA) and Coupled Simulation of Convection and Radiation

陳 宏*・大岡 龍三**・加藤 信介***

Hong CHEN, Ryoza OOKA and Shinsuke KATO

1. はじめに

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。屋外温熱環境が悪化させる様々な要因のうち、都市の主な構成要素とする建物の配置は非常に重要な要因となっている。このような背景から、劣悪な夏季の屋外温熱環境を改善するための対策として、建物の配置、及び建蔽率の変化による屋外温熱環境の改善効果に関する研究が注目されている^{1,2)}。快適な屋外温熱環境を実現するためには、適正な建物配置が非常に重要な要因となる。しかしながら、実際の建物配置は視覚的意味合いから経験的になされることが多い。建物の最適配置により屋外温熱環境最適化の設計手法の開発・提案に関する研究例が殆どない。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³⁻⁵⁾。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⁶⁾。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、建物の最適配置により屋外温熱環境の改善に関する設計手法が確立されれば、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。本研究では屋外設計手法の研究の第1段階として、建物の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、良好な屋外温熱環境を実現するための建物の最適配置について CFD

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。最適解の探索については、近年注目を集めている遺伝的アルゴリズム (GA)⁷⁾ を利用する。

2. 最適化問題の設定

2.1 設計目標

本研究は夏季における建物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評価関数(ここでは温熱快適性指標である SET*⁸⁾の低下)に着目している屋外空間において最小化するような建物の最適

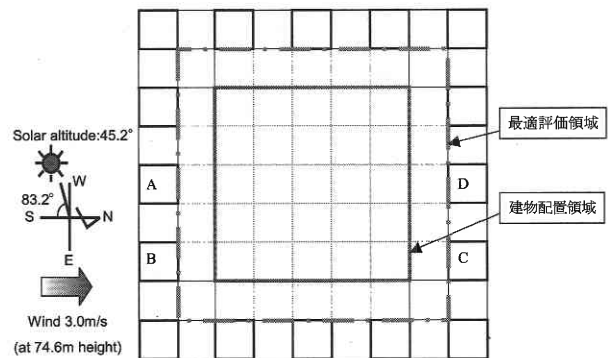


図1 解析対象

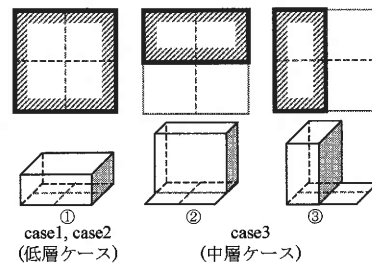


図2 建物ユニット

表1 解析ケース

case1	低層建物ケース。
case2	低層建物ケース、市街地ブロックを case1 に比べ45°右廻りに回転。
case3	中層建物ケース、市街地ブロックの方向は case1 と同じ。

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

***東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

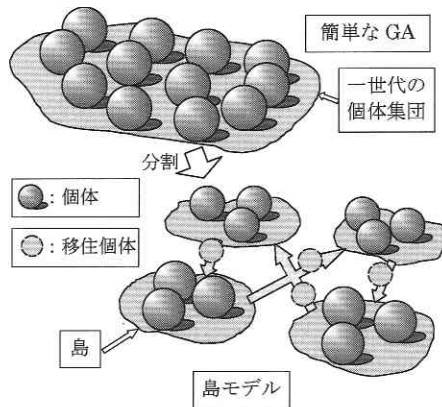


図3 島モデルGAの概念

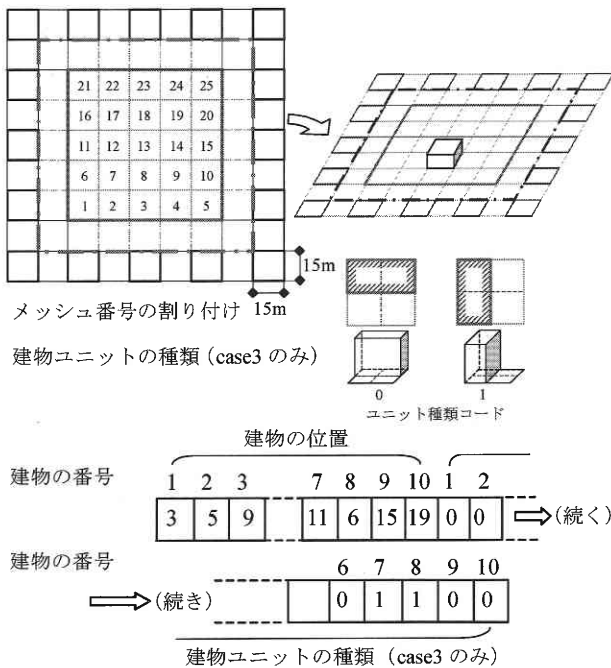


図4 染色体の記述

配置の探索を行う。

2.2 解析対象 (図1, 2 表1)

図1に解析対象とする街区の平面図を示す。解析の日時は東京の7月23日午後3時を対象とする。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。

本研究では解析対象とする街区の方位、及び建蔽率の変化が建物の最適配置にどんな影響を与えるかを検討するために、表1に示す3つの解析ケースを検討した。case1は低層ケースである。case2も低層建物ケースであるが、市街地ブロックをcase1に比べ45°右廻りに回転した。case3は中層建物ケース、市街地ブロックの方向はcase1と同じになる。本モデルにおける建物の棟数は10棟であると固定した。図2に建物ユニットを示す。case1とcase2では図2①のユニット(15m×15m×9m)を想定し、case3では図2②, ③の2種類ユニット(15m×7.5m×18m, ま

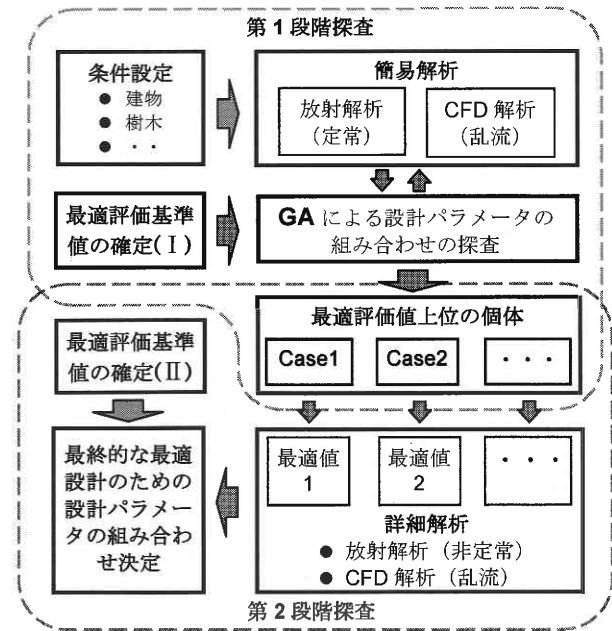


図5 2段階型最適設計手法

表2 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)	20
全個体数 (Total individual size)	1200 (60×20)
移住率 (Rate of Migration)	0.5
移住間隔 (Interval of Migration)	4
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

たは7.5m×15m×18m)を想定した。case1に比べ、case3での2つ種類のユニットは解析領域における容積率をcase1と同じにして、建蔽率は半分となる。

2.3 設計パラメータ

本研究では、図1に示す建物配置領域における建物の位置と建物ユニットの種類(case3のみ)を設計パラメータとする。

2.4 GAによる最適探索と染色体の記述方法(図3, 4 表2)

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される。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は各個体の染色体に対して選択、交叉、

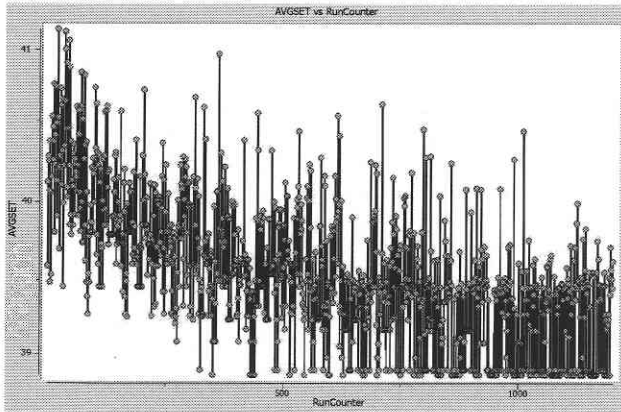


図6 case1 GAによる第1段階最適探索過程

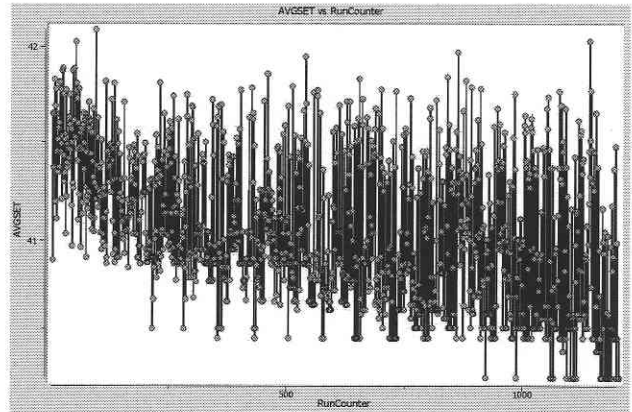


図7 case2 GAによる第1段階最適探索過程

突然変異などのオペレータを行い、それぞれの適合度を計算する。全て探索した個体のうち、適合度が最も高い個体が最適個体となる。また、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)⁹⁾ を用いた。図3に島モデル遺伝的アルゴリズムの概念を示す。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な発生させる。表2に今回の解析ではGAのパラメータを示す。島の個数は6個、各島での個体数は10個、一世代の個体数は6×10=60個、世代数は20に設定した。全部の解析個体数は60×20=1200個と設定した。

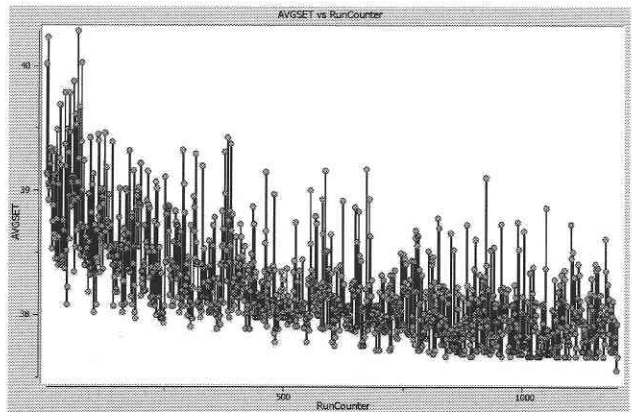


図8 case3 GAによる第1段階最適探索過程

図4に染色体の記述方法を示す。ここでは、「ユニット」とする上記の建物モデルに対して、建物配置領域においてメッシュ分割を行い、各メッシュに位置を表す番号を定義する。この操作により今回の建物の配置問題は2次元格子平面に建物配置できる25セルのうちに、どの10セルに建物を配置するかということを決定的な問題とした。1つの建物を「ユニット」とし、それぞれに「建物番号」を与える。この建物の並びに対して、それぞれの建物を配置される位置 (図4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。更に、case3における建物ユニットは2つの種類があるため、建物ユニットの種類も設計変数となる。このため、染色体においては建物の位置情報を記入された遺伝子座を続き、建物の並びに対してそれぞれに図4に示す建物の「ユニット種類コード」を与え、case3の染色体を定義する。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1~25で定義したメッシュ番号を2進表記に変更し、また、case3では建物ユニット種類コード (0, または1) も含めて、それぞれのコードを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。

により評価する。SET*は気温、湿度、風速、放射、着衣量、代謝量の影響を全て考慮した総合的温熱環境指標である。具体的には、各個体について放射・対流連成解析により図1で示す最適評価領域におけるSET*の空間分布を算出し、下記の式で目的関数 (適合度) を算出する：

$$F = \bar{D} \dots \dots \dots (1)$$

F : 最適程度を判断するための評価値 (適合度)
 \bar{D} : 各ケースにおけるSET*の面内平均値

本研究では、適合度が最小化になるケースは最適ケースとなる。

2.6 解析手順 (図5)

全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⁶⁾を利用する。図5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乱流解析で行った。また、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、最適評価値 (適合度) の上位10個体を第2段階の最適探索の候補とする。

② 第2段階探索：上記の10個体に対して、詳細な放

2.5 評価関数

最適の数量化評価は、夏季における建物の最適配置による屋外温熱環境の温熱快適性指標であるSET*の低下程度

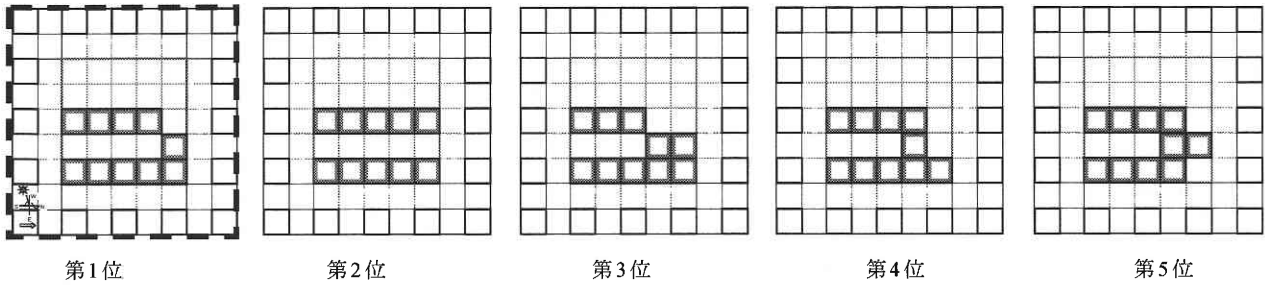


図9 case1 GAによる第1段階最適探索結果 (上位5位まで)

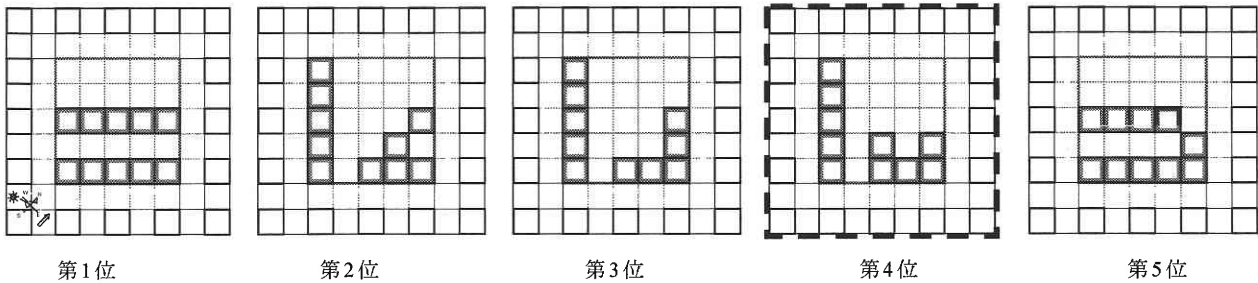


図10 case2 GAによる第1段階最適探索結果 (上位5位まで)

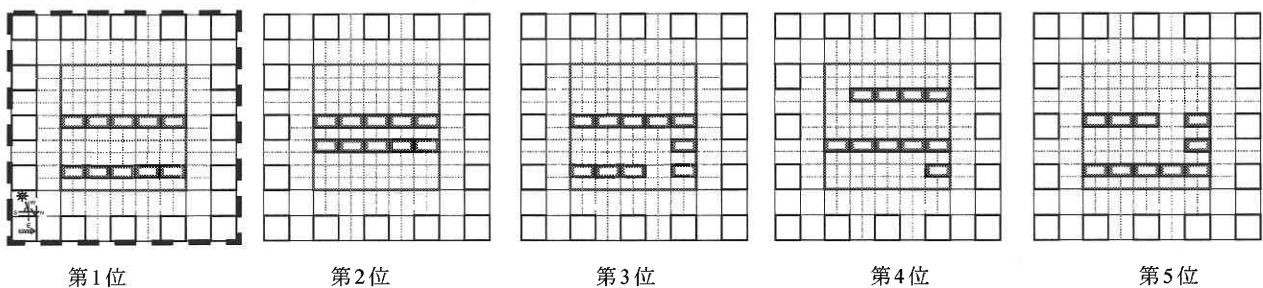


図11 case3 GAによる第1段階最適探索結果 (上位5位まで)

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、SET*の空間分布を求める。この段階では、放射解析は非定常解析、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）最も低い個体を建物の最適配置とする。

ここで、放射・対流連成解析の概要を説明する。まず、モンテカルロ法に基づき、形態係数の算出を行い、Gebhartの吸収係数を用いて、放射並びに壁体内や地中の熱伝導計算を実行する。次に放射計算より得られた壁体表面や地表面の温度分布などを境界条件としてCFD計算を行う。また、CFD解析においては、通常の標準型 $k-\epsilon$ モデルに対して、建物風上側の乱流エネルギーの過大生産を抑制する改良Launder-Katoモデル¹⁰⁾を使用した。流入風は2.2節で説明した風向、風速から1/4乗プロファイルを与えた。気温と湿度も2.2節の値を流入側を与えた。

3. 解析結果と考察

3.1 第1段階探索 (図6, 7, 8, 9, 10, 11)

図6, 7, 8にそれぞれcase1, case2とcase3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 (AVGSET) である。各ケースとも最適探索の進行に伴う、個体の適合度の向上、つまり、最適評価値 (SET*の面内平均値) が低くなる傾向がみられ、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。最適探索の全体の過程における最適評価値 (SET*の面内平均値) について、case1に比べcase2の平均SET*が高くなり、case3の平均SET*が低くなる傾向が示された。これらの原因としては、case2では風が街区ブロックの斜め方向から流入したため、建物により抵抗が増大し、最適評価領域における風速が低くなり、case3では建物ユニットの高さが高くなるため、日射が遮蔽され、最適評価領域におけるMRTを低下すること、及び遮蔽率の減少により解析領域内の通風性状を向

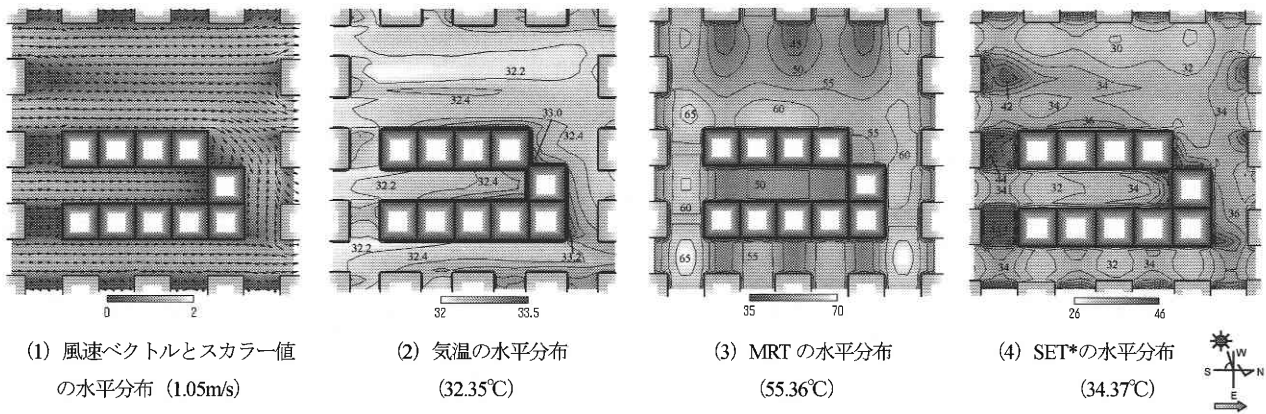


図12 case1 最適設計の温熱環境 (括弧内の値はそれぞれの面内平均値) (高さ1.5 m)

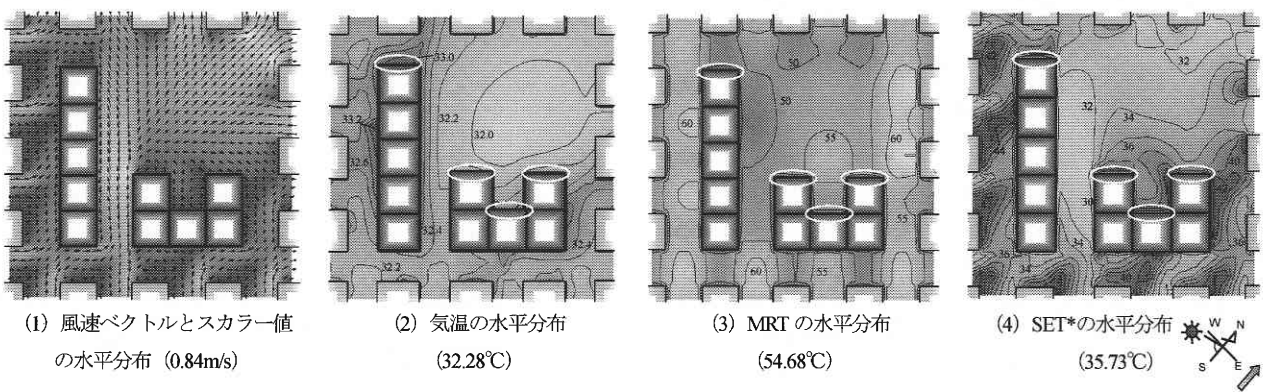


図13 case2 最適設計の温熱環境 (括弧内の値はそれぞれの面内平均値) (高さ1.5 m)

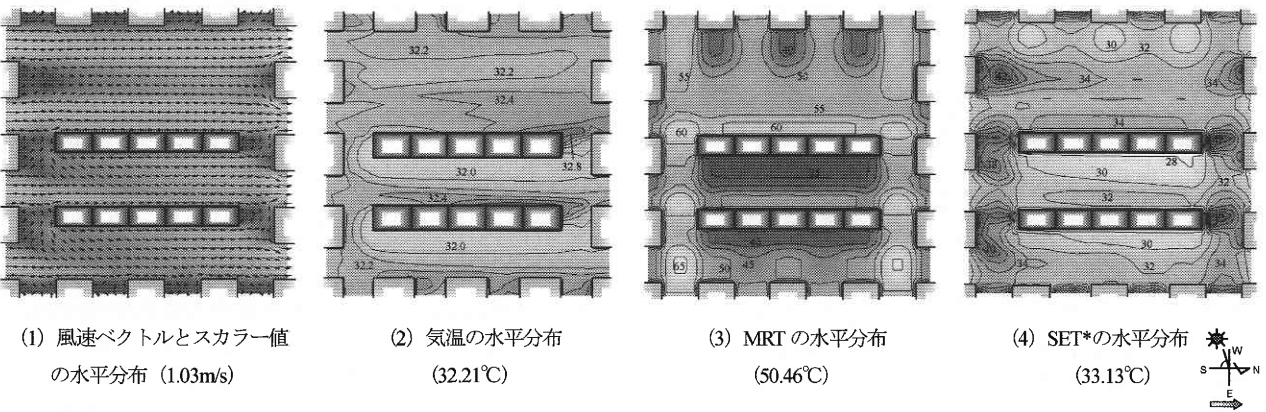


図14 case3 最適設計の温熱環境 (括弧内の値はそれぞれの面内平均値) (高さ1.5 m)

上になることであると考えられる。

図9, 10, 11にそれぞれ case1, case2と case3において第1段階の最適探索結果(上位5位まで)を示す。各ケースとも解析領域内の通風を確保するため、建物が風向と平行的に配置される傾向が見られる。また、case3では図2②と③の2種類の建物ユニットに設定したが、上位5位までの個体においては日射の遮蔽効果の増大、及び建物の

形状により風速低減効果の最小化のため、全ての建物ユニットは②の建物ユニット(15m×7.5m×18m)となった。

3.2 第2段階探索(図12, 13, 14)

case1, case2と case3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。詳細な放射・対流・湿気輸送連成解析により選ばれた最適個体は図

9, 10と11に点線で囲まれた建物配置のパターンで示されている。図12, 13, 14にcase1, case2とcase3の最適設計の温熱環境を示す。3つのケースにおける各物理量の面内平均値については, case1に比べcase2の方は風速が0.2 m/s程度低くなる。これは風が街区ブロックの斜め方向から流入したことにより解析領域における全体的に風速低下するためと考えられる。case2はcase1より0.1°C程度の気温, 0.7°C程度のMRTが低下することも示された。これはcase2における街区ブロックの方位がcase1に比べ45°右廻りに回転したことにより, 今まで多くの直達日射を受けていた西面壁が西北面を向くこととなり, その部分の表面温度が低くなるためと考えられる(図13中○参照)。また, case3はcase1に比べ, 風速スカラー値の面内平均値は大体同じ値となるが, 図1に示す風上側における番号AとBの建物の近傍では風速が増加し, 通風性状の向上が見られる。このため, この領域の気温もcase1より低くなる。これは通風性状が向上したことにより滞留していた熱を効率的に除去できるためと考えられる。MRTの面内平均値に関しては, case3はcase1より5°C程度低下する。これの原因としてはcase3の建物ユニットの高さはcase1の建物ユニットの9 mから18 mになり, 解析時刻では日陰の領域は広がるため, 地表面の表面温度が低下し, MRTの平均値が大幅に低くなる。地表面の表面温度の低下に伴い, case3の解析領域における平均気温もcase1より0.1°C程度低下する。3つのケースの最適設計評価値について, case1に比べcase2の平均SET*が1.5°C程度高くなり, case3の平均SET*が1.2°C程度低くなった。また, case1と比べ, case3では風上側における通風性状の向上によりSET*を低下し, 建物キャニオンにおけるMRTを低くなるためSET*を低下し, 夏季の屋外温熱環境を改善することが示された。解析対象とする街区ブロックの方位, 及び建蔽率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。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。

4. ま と め

- (1) 屋外温熱環境設計ため, GAを利用した建物の最適配置に関する最適設計手法の開発を行った。
- (2) 街区の方位, 及び建蔽率の違う3つのケースを解析し, 街区の方位, 及び建蔽率の違いが最適探索結果に影響を与えることが明らかになった。
- (3) 3つのケースにおけるSET*の面内平均値についてはcase1に比べcase2の平均SET*が1.5°C程度高くなり,

case3の平均SET*が1.2°C程度低くなった。

- (4) 本研究の解析結果においては, 3つの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°C程度を上昇し, 建物配置の異なりにより屋外温熱環境に大きな影響を与え, 建物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, 建物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。

謝 辞

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金・一般研究(S)の助成を得て行ったことを付記する。

(2003年12月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 足永, 村上, 森川, 持田, 大岡, 吉田, 大黒, 小野, CFDによる川風の熱空気環境改善効果の解析 その2 建物配置変更による川風の制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-1), 2002, pp. 881-882.
- 2) 陳, 大岡, 村上, 建物形状・配置の変化が都市の空気齢に及ぼす影響の検討 —換気効率指標(流入空気空気齢)を用いた都市空間の空気環境評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-1), 2001, pp. 933-934.
- 3) 三井, 富田, 登坂, 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.
- 4) 岡本, 服部, 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.
- 5) 青木, 村岡, 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.
- 6) 金, 加藤, 村上, 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.
- 7) 北野宏明編, 遺伝的アルゴリズム1, 産業図書株式会社, 1993.
- 8) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi, A Standard Predictive index of human response to the thermal environment, AHSRAE Transactions, 92(1), 709-731, 1986.
- 9) Reiko Tanese, Distributed genetic algorithms, Proc. 3rd ICGA, pp. 434-439, 1989.
- 10) B. E. Launder, M. Kato, Modelling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Eng. Conference, 157, Unsteady Flows, 189-200, 1993. 6.