

戸建住宅団地内の夏季暑熱環境緩和のための最適設計に関する研究

主査 吉田 伸治*¹

委員 大岡龍三*², 陳 宏*³

本研究は、戸建住宅団地内の夏季暑熱環境への影響要因の把握とこれを緩和する最適設計に対する知見を得ることを目的に、CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法を用いた分析を行った。本論文前半では暑熱環境形成因子として敷地利用の影響を詳しく分析した。その結果、温熱快適性の良好な団地内屋外空間を形成するために「風の道」を生成するためにはオープンスペースを集中的に配置すると共に卓越風向による流れを誘引しやすい建物配置を計画する必要があること、が明らかとなった。この知見を踏まえ本論文後半では、遺伝的アルゴリズム GA と前述の屋外温熱環境 CFD 解析を連成した手法を用いて「風の道」の最適設計を行なった。

キーワード : 1) 戸建住宅団地, 2) 屋外温熱環境, 3) CFD 解析, 4) SET*, 5) 風の道, 6) 最適設計, 7) 遺伝的アルゴリズム,

STUDY ON OPTIMUM DESIGN FOR MITIGATING OUTDOOR THERMAL ENVIRONMENT WITHIN RESIDENSIAL ESTATE IN SUMMER

Ch. Shinji Yoshida

Mem. Ryoza Ooka, Hong Chen

In this study, we investigate the influencing factors to the outdoor thermal environment within residential estate in summer using the coupled simulation method based on CFD analysis. To begin with, the effects of arrangements of buildings and open spaces are evaluated. As the results, it is clarified that we have to plan the arrangement of buildings and open spaces, which eases the inflow of windward cool air, for forming the road of wind within residential estate. In the latter part of this paper, we carried out the optimum design for the road of wind using the method based on Genetic Algorithm coupled with the outdoor CFD analysis.

1. はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、東京首都圏、関西圏において、ヒートアイランド現象の顕在化が社会問題となっている。この現象は、都市化の進展に伴う緑地の減少・建物外表面被覆の改変・エネルギー利用の増加に伴う人工排熱の増加が主因であり、この現象が街区内屋外空間の温熱快適性を著しく悪化させている。現在多くの研究者が、上記地域を対象に夏期の屋外温熱環境緩和のための対策技術の効果を実測、実験、数値解析により検討している^{例えば文 1)~9)}。一方、地方中小都市では、ヒートアイランド現象の影響は大都市に比べ小さいが、大都市への人口流出、スプロール化と中心市街地の空洞化、脆弱な公共交通網に起因する自動車利用の増加等の問題を抱えている。そのため、現在は今後の地方都市の在り方を考える重要な岐路にあり、大都市には無い独自の魅力を持ちつつ持続的に発展可能な地方都市の計画が急務といえる。これを計画する上で、戸建住宅団地内の環境設計は重要な要素となる。なぜなら地方都市内の中心市街地は大都市のそれと比べて非常に小さいことに加え、地方都市には広範な自然溢

れるオープンスペースがあり、これを活用した環境共生型の空間整備による QOL の向上が期待できるからである。しかし、環境共生型戸建住宅団地の敷地利用についての検討は未だ不十分である。そこで、本研究は戸建住宅団地内の夏季暑熱環境の形成要因を詳しく分析し、屋外温熱環境を緩和する最適設計のための有効な知見を得ることを目的とする。

1.2 本論文の構成

本報は 6 章で構成される。2 章では本研究で用いる CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法^{文 7)~10)}の概要を簡単に説明する。3 章では福井県内における戸建住宅団地の空間利用の現状調査の事例^{文 11)}を参考に解析対象となる団地モデルの基礎データを設定する。4 章では、2 章に示した屋外温熱環境評価手法を用いて戸建住宅団地内の敷地利用の差異が屋外空間の温熱快適性に及ぼす影響を詳しく分析する。特に建物配置の差異が団地の「風の道」形成に及ぼす影響を詳しく分析する。5 章では、4 章で取り上げた戸建住宅団地の敷地利用と「風の道」の形成に着目し、近年工学分野で利用の注目

*¹ 福井大学大学院工学研究科 助教授

*² 東京大学生産技術研究所 助教授

*³ 東京大学生産技術研究所 助手

されている遺伝的アルゴリズム GA に基づく最適設計手法の住宅団地の環境設計に対する適用可能性を示す。

2. CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法の概要^{文 7)~10)}

2.1 評価手法全体の流れ

屋外温熱環境評価手法の流れを図 1 に示す。先ず、左端のプロセスにおいて各種入力条件 (Input data 1~3) より境界条件を設定する。次に中央のプロセスの前段階

において放射計算を実行する。この放射計算より得られた地表面や建物外表面の温度分布等を境界条件として与えることにより、対流・湿気輸送連成の CFD 計算を実行する。その結果、新たな風速、温度、湿度の分布が与えられ、これにより地表面、建物外表面からの顕熱輸送量や潜熱輸送量が変化し、各表面の熱収支も変わるため、この条件の下で再び放射計算を行う。これら一連の操作 (中央のプロセス) を繰り返すことにより CFD に基づく対流・放射・湿気輸送連成シミュレーションが完成す

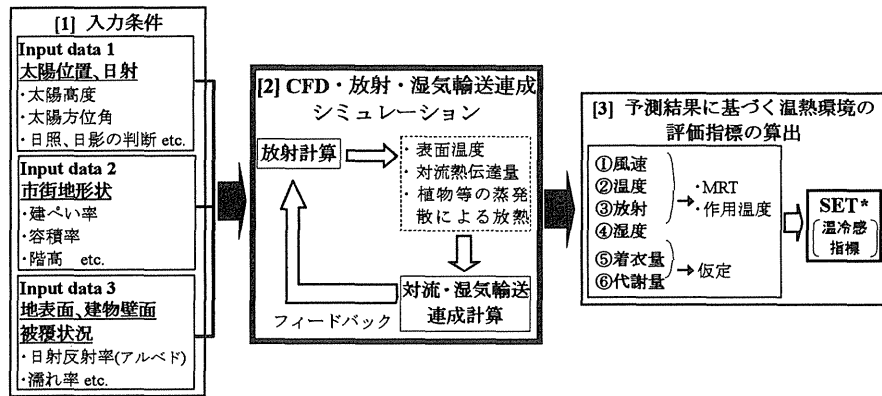


図 1 屋外温熱環境評価手法の全体の流れ

表 1 対流・湿気輸送解析の基礎方程式

[1] CFD解析の基礎方程式 (標準 $k-\epsilon$ モデル)

①連続式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

②運動方程式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] - g_i \beta (\langle \theta \rangle - \theta_0) \quad (2)$$

③乱流エネルギー k の方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + G_k - \epsilon \quad (3)$$

④粘性消散率 ϵ の方程式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k + C_3 G_k) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

⑤温度 θ の方程式

$$\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \{ -\langle u_i' \theta' \rangle \} \quad (5)$$

⑥絶対湿度 q の方程式

$$\frac{\partial \langle q \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \{ -\langle u_i' q' \rangle \} \quad (6)$$

$$G_k = -g_3 \beta \langle u_3' \theta' \rangle$$

[2] 浮力効果の組み込みのための修正モデル

①乱流熱フラックス $-\langle u_i' \theta' \rangle$

$$-\langle u_i' \theta' \rangle = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} + \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 3} g_3 \beta \langle \theta' \rangle^2 \quad (8)$$

②乱流水蒸気フラックス $-\langle u_i' q' \rangle$

$$-\langle u_i' q' \rangle = \frac{\nu_t}{\sigma_w} \frac{\partial \langle q \rangle}{\partial x_i} + \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 3} g_3 \beta \langle \theta' \rangle^2 \quad (9)$$

$$C_{\theta 3} = 0.25, \sigma_\theta = 0.5, \sigma_w = 0.5$$

[3] 建物風上側での乱流エネルギーの過大生産抑制のための修正モデルモデル

①標準 $k-\epsilon$ モデル

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (10) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (12)$$

②Launder-Kato モデル

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (13) \quad (\nu_t: (11) \text{式})$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (14)$$

②Launder-Kato モデル

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (\Omega / S \leq 1 \text{ の場合}) \quad (13) \text{再}$$

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (\Omega / S > 1 \text{ の場合}) \quad (10) \text{再}$$

$\langle \cdot \rangle$: 変数 f の時間平均またはアンサンブル平均、 f' : f の変動成分、 x_i : 空間座標 ($i=1$ (主流方向), 2 (主流直交方向), 3 (鉛直方向)), u_i : 風速の瞬時値 [m/s], θ : 温度 [°C], θ_0 : 基準温度 [°C], q : 絶対湿度 [kg/kg], ν_t : 渦動粘性係数 [m²/s], $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $\sigma_\theta=0.5$, $\sigma_w=0.5$, g_i : 重力加速度 ($g_1=0.0$, $g_2=0.0$, $g_3=-9.8$) [m/s²], β : 空気の体膨張率 [1/°C], p : 圧力 [kPa], ρ : 空気密度[kg/m³], $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_3=1.44$, $C_{\theta 3}=0.25$, $C_\mu=0.09$

る。この対流・放射・湿気輸送連成シミュレーションにより、風速、温度、湿度、平均放射温度 MRT (Mean Radiant Temperature) の空間分布を求めることができる。さらに人体の着衣量、代謝量を仮定することにより温熱快適性指標である新標準有効温度 SET* (Standard Effective Temperature)の空間分布を計算できる。

本章の次節以降では、この連成システムの重要なプロセスである (1) CFD に基づく対流・湿気輸送解析、(2) 放射熱移動解析、(3) 温熱環境評価尺度 SET*の算出について、基礎方程式を中心に補足説明を行なう。

2.2 CFD 解析に基づく対流・湿気輸送解析

屋外温熱環境の連成解析の中で、対流・湿気輸送解析に必要とされる CFD の方程式群を表 1 にまとめて示す。本研究では、室内気流解析等に汎用的に用いられている標準 k - ε モデルに対して、屋外温熱環境評価用に著者らが以下の 2 点の改良を加えた k - ε モデルを使用する。

- ① 乱流熱フラックス、乱流水蒸気フラックスの評価への浮力効果の組み込み (表 1[2]) ^{※12)}
- ② 建物風上側での乱流エネルギー k の過大生産の抑制 (表 1[3]) ^{※13)~16)}

2.3 放射熱移動解析

数値解析一般において計算の遂行上、適切な境界条件の設定は不可欠である。前節に示した屋外空間の対流・

湿気輸送解析では、特に地表面・建物外表面での気流、熱、湿気に関する境界条件を適切に設定する必要がある。本研究では地表面や建物外表面における吸熱量、放熱量の全ての要素を含む熱バランスを計算し、表面温度、熱フラックス (対流熱伝達量、潜熱放散量) を求める。これらは対流・放射連成計算を行う際に境界条件として用いられるもので、数値解析のキーポイントとなる重要な物理量となる。表 2 は上記の地表面・建物外表面における熱量バランスと各要素の算定式をまとめたものである。表 2 の式を用いる場合、まず大森らによるモンテカルロ法に基づく放射解析^{※17), 18)}により、地表面や建物外表面の各微小面要素 i における日射取得量 S_i 、大気放射を含む長波放射取得量 R_i を求める。次に(15)式で定義される熱収支式を地表面及び建物外表面の各微小要素において解き、各面の表面温度 T_i 、対流熱伝達量 H_i 、植物などの蒸発散による潜熱放散量 LE_i を求める。なお(15)式左辺において、正值は微小面要素 i へのエネルギーの流入を、負値は流出を表す。

2.4 温熱環境評価尺度 SET*

2.1 節の説明のとおり、図 1 中央のプロセス「CFD・放射・湿気輸送連成シミュレーション」により、解析領域内の気象要素の空間分布が求まる。しかし、空間の温熱環境を総合的に判断するためには、これらの気象要素の影響を統合した温熱快適性の評価尺度を用いる必要が

表 2 地表面、建物外表面温度算出のための各要素の算定式

$S_i + R_i + H_i + C_i + LE_i = 0$	(15)
① S_i : 微小面要素 i における日射取得量 [W]	
$S_i = \alpha_i (E_{Di} + E_{Si}) + \sum_{j=1}^n B_{ji} (1 - \alpha_j) (E_{Dj} + E_{Sj})$	(16)
$E_{Di} = A_i \beta_i I_N \cos \theta^*$	(17)
$E_{Si} = A_i F_{iS} I_{SH}$	(18)
② R_i : 大気放射を含む長波放射取得量 [W]	
$R_i = R_{i\downarrow} - R_{i\uparrow} = \sum_{j=1}^n B_{ji} (\varepsilon_j A_j \sigma T_j^4) - \varepsilon_i A_i \sigma T_i^4$	(19)
③ H_i : 対流熱伝達量 [W]	
$H_i = A_i \alpha_c (T_{ai} - T_i)$	(20)
④ C_i : 地中及び建物内部への伝導熱量 [W]	
[土壌の場合] $C_i = -A_i \lambda (T_i - T_g) / \Delta z$	(21)
[建物の場合] $C_i = -A_i K_i (T_i - T_{ra})$	(22)
⑤ LE_i : 植物などの蒸発散による潜熱放散量 [W]	
$L \cdot E_i = L \cdot A_i \alpha_w \beta_i (f_a - f_s)$	(23)

E_{Di} : 面要素 i への直達日射量 [W]、 E_{Si} : 面要素 i への天空日射量 [W]、 α_i : 面要素 i の短波放射 (日射) 吸収率 [-]、 B_{ji} : ゲッパートの吸収係数 [-]、 A_i : 面要素 i の面積 [m^2]、 I_N : 法線面直達日射量 [W/m^2]、 β_i : 面要素 i に直達日射が照射される割合 [-]、 θ^* : 検討している面要素の外向き法線ベクトルに対する太陽光の入射角 [rad]、 I_{SH} : 快晴時の水平面天空日射量 [W/m^2]、 F_{iS} : 面 i から天空を望む形態係数 [-]、 ε_i : 長波放射吸収率 [-]、 T_i : 面要素 i の温度 [K]、 α_c : 対流熱伝達率 [W/m^2K]、 σ : ステファン・ボルツマン定数 [$W/(m^2K^4)$] ($=5.69 \times 10^{-8}$)、 T_{ai} : 建物等の近傍の温度境界層外側の温度 [K]、 λ : 土壌の熱伝導率 [W/mK]、 T_g : 深さ Δz の地中温度 [K]、 K_i : 建物壁体から室内空気に至る総合的な熱伝達係数 [W/m^2K]、 T_{ra} : 室温 [K]、 L : 蒸発潜熱 (ここでは 2.5×10^6 [J/kg])、 E_i : 面要素における水分蒸発散量 [kg/s]、 $L \cdot E_i$ で蒸発散による潜熱放散量 [W] を示す、 α_w : 湿気伝達率 [$kg/(m^2skPa)$] ($=7.0 \times 10^{-6} \alpha_c$)、 β_i : 蒸発効率 [-]、 f_a : 大気中の水蒸気分圧 [kPa]、 f_s : 飽和水蒸気圧 [kPa]

表 3 温熱感覚と生理現象・健康状態との関係^{※20)}

SET* [°C]	温熱感覚		生理現象	健康状態
	[温冷感]	[快適感]		
40~45	・限界	・限界	・体温上昇 ・体温調節不良	・血液の循環不良
35~40	・非常に暑い ・暑い	・非常に不快	・激しい発汗 ・血流による圧迫感の増加	・ヒートショックの危険増加
30~35	・暖かい	・不快		・脈拍が不安定
25~30	・やや暖かい ・何とも無い	・快適	・発汗、脈拍の変化による体温調節 ・生理的中立	・正常
20~25	・やや涼しい			
15~20	・涼しい	・やや不快	・放熱量が増加し衣服または運動が必要	
10~5	・寒い ・非常に寒い	・不快	・手足の血管収縮、ふるえ	・粘膜や皮膚の乾燥による苦情の増加
5~10				・体の抹消部分への血液の循環不良による筋肉痛

表 4 各戸建住宅団地の敷地形状・面積、建築面積の平均値^{※11)} 建物配置を設定した^{※1)}。
(福井県坂井郡春江町)

団地名	A	B	C	D	E	F	G	H
間口	14	14	15	15	12	12	12	12
奥行	15	16	16	14	16	17	16	16
敷地面積 (m ²)	210	232	235	209	193	199	193	184
建築面積 (m ²)	100	114	112	99	103	110	96	104

ある。本研究では、空間の温熱環境評価は得られる温熱4条件(風速、温湿度、放射)の空間分布をGageeの2-node型人体温熱生理モデル^{※19)}に代入することにより得られる新標準有効温度SET*を用いて結果を評価する。表3に参考としてSET*の値と温熱感覚と生理現象・健康状態との関係を示す^{※20)}。

3. 戸建住宅団地の形状モデル生成のための基礎データの調査

前章2章では、本研究で使用する解析手法を説明した。実際この手法を本研究で用いるためには、戸建住宅団地に対応した各種入力条件を設定する必要がある。本研究では、原田・野嶋・栗袋ら^{※11)}らによる福井県内の戸建住宅団地を対象とした敷地利用状況の調査研究を参考に、解析対象となる戸建住宅団地モデル作成に必要なデータを抽出した。原田らの研究は、福井市のベッタウンである春江町にある8箇所の戸建住宅団地を対象としたものである。表4は各住宅団地の敷地図、建物位置図に基づき算出される団地内敷地利用状況を表すパラメータ値をまとめたものである。うちA~Dの団地は、春江市街地中心部に近いエリアにある土地区画整理事業により開発された団地であるのに対し、E~Hはやや離れた場所に立地する開発許可制度に基づき開発された団地であり、両者で敷地形状や面積に違いがみられる。本研究では、このうち、主としてA~Dの団地の調査データを参考に4章以降での解析対象となる住宅団地モデルの敷地形状、

4. 戸建住宅団地内の敷地利用形態の差異が屋外空間の温熱快適性に及ぼす影響の分析

4.1 はじめに

本章は、本研究のメインとなる温熱環境解析の概要を示す。本研究では特に戸建住宅団地内のオープンスペースと建物配置の形態の差異が屋外温熱環境形成に及ぼす影響を詳しく分析する。ここでは、まず両者の関係を包括的に捉えるため、形状の簡単な直方体の住宅で構成される団地モデルを対象に解析を行う(4.2節)。次に、区画内のオープンスペースの共用を意図した4棟のL字形の住宅モデルとオープンスペースの配置の差異が屋外温熱環境形成に及ぼす影響を検討する(4.3節)。

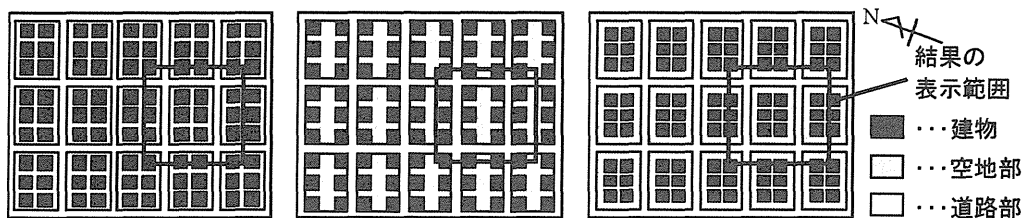
4.2 直方体型住宅で構成される戸建団地モデルを対象とした解析

4.2.1 解析概要

1) 解析対象及び解析ケース

図2に各解析ケースの団地の平面図を示す。また表5に1区画毎の団地形状に関するデータをまとめて示す。本節の戸建住宅団地モデルでは南北30m、東西40mの区画内に6棟の建物を配置し、これが南北5区画、東西3区画配置されている。表5に区画の形状データを示す。区画内の空地部は全て芝地で緑化され、区画の周囲は幅5mの道路で囲まれているものとする。

解析ケースは3ケースである。CASE1-1は基本ケースとして区画内に建物が均等配置されている場合を想定する。これに対して、CASE1-2は住宅を街路沿いに配置し、区画内部にオープンスペースを集中する場合を想定している。逆に住宅を区画中央に集中配置しオープンスペースを区画辺縁に設けたケースをCASE1-3とした。



CASE1-1(区画内均等配置) CASE1-2(街路沿いに配置) CASE1-3(区画中央に集中配置)

図2 CASE1 解析ケース

表5 団地モデル1 区画の形状データ(CASE1)

項目	値
住宅数	6
敷地面積	1200 m ²
建築面積	600 m ²
建物幅×奥行	10m×10m
建物高さ	7m
建蔽率	50%
容積率	100%

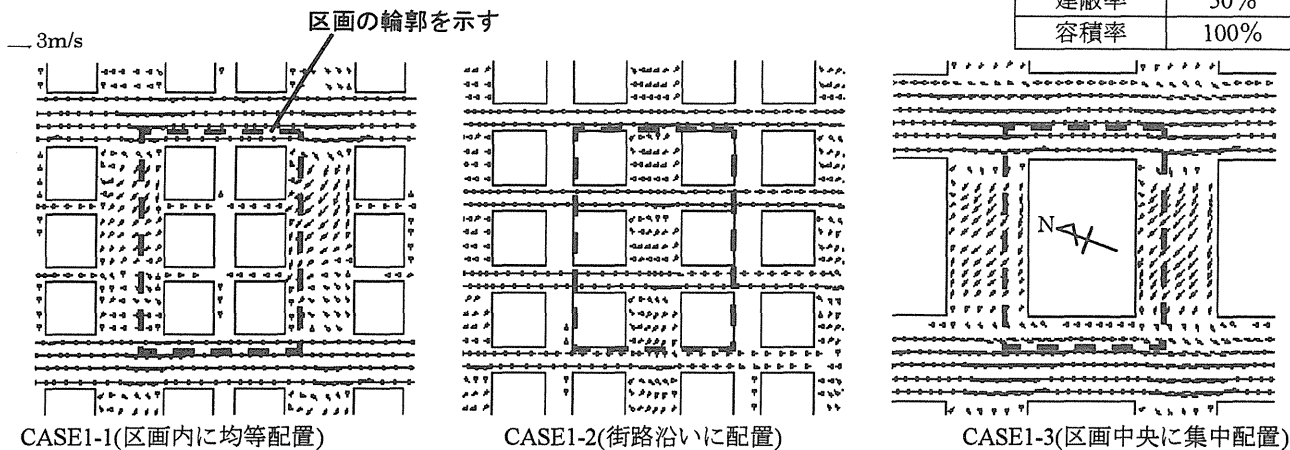


図3 風速ベクトルの水平分布 (高さ1.5m)

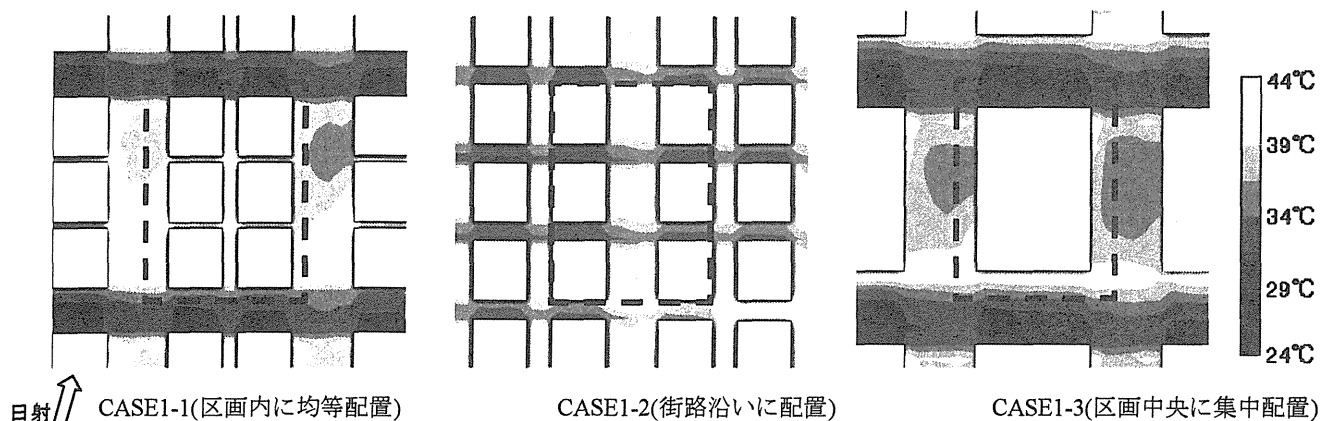


図4 SET*の水平分布(高さ1.5m)

2) 解析条件

夏季の代表日として7月23日の15時を解析対象日時とし、AMeDAS 観測データに基づき、気温 32.6℃、相対湿度 57.6%、風速 3.0m/s(高さ 1.5m)、風向北北西にそれぞれ設定した。新標準有効温度 SET*の算出時には、仮定値として着衣量 0.5clo (半袖シャツとズボンの着衣を想定)、代謝量 87.3W/m²(1.5Met、ゆったり歩行と立位静止時の中間)をそれぞれ与えた。その他の解析条件は、文献7、8を参考とした。

4.2.2 解析結果

1) 風速ベクトル分布

図3に高さ1.5mにおける風速ベクトルの水平分布を示す。CASE1-1とCASE1-3では、道路部を含む敷地間のス

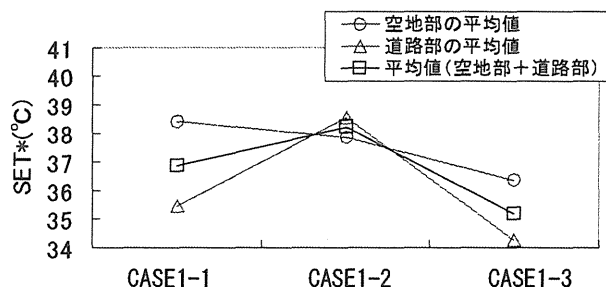


図5 各ケースの SET*の平均値 (高さ1.5m)

トリートキャニオン内²⁾への循環流が形成されるが、CASE1-2ではこれが見られない。これは街路沿いに建物を配置した結果、敷地を跨ぐ建物間距離に比べて敷地内のそれが広がり、鉛直・水平方向の循環流が敷地内空地部に流入しやすくなったためである。また CASE1-3では、住宅を隙間無く並べた結果、建物間の隙間へ流入する気流がなくなるため、全般に風速が高めな値となる。

2) SET*分布

図 4 に高さ 1.5m における SET*の水平分布を示す。CASE1-1 ではストリートキャニオン内の西部を中心に 40℃以上の高温域が生ずる。これは解析対象時刻 15 時には西側より日差しが入射するため区画内西側建物の受熱が多く、これに伴い周辺空気も高温となりやすいこと、並びにキャニオン空間内でも風速が弱い領域であることが影響していると考えられる。一方 CASE1-2 では、道路部を跨ぐキャニオン空間に吹き込む循環流が非常に弱く風通しが悪いためこの領域の SET*が高い値となる。また空地部では風通しが良くなるものの、日当たりも良くなるため、こちらにおいてもやや高めな値となる。CASE2-3 では、オープンスペース全般の風速が高いため他のケースに比べ全体的に低い SET*の値となった。建物西側の SET*が高温となるのは CASE1-1 同様、日射を受け高温となる建物西側壁面の影響によるものである。

図 5 は各ケースの高さ 1.5m における空地部、道路部の SET*の平均値を比較している。空地部・道路部ともに、CASE1-3 が最も SET*の値が低く快適な結果となった。これはオープンスペースの風通しの良さに加え、建物を集中配置した結果、住宅外表面積が小さくなり、その結果、人体側面に入射する放射の照り返しが少なくなったことも要因と推察される。

4.3 団地共有コミュニティスペースの確保を意図する敷地利用形態における分析

4.3.1 解析概要

表 6 に解析対象となる団地モデル 1 区画毎の形状に関するデータを示す。また、図 6 は各解析ケースの団地の平面図である。団地モデルは南北、東西とも 28m の区画内に 4 棟の住宅を配置する。緑化の種類、道路幅は前節と同じである^{注3)}。

解析ケースは CASE2-0～CASE2-4 までの計 5 ケースである。CASE2-0 は前節の解析と同じ建物を配置した街区である。本解析ではこの CASE2-0 を基本ケースとし、CASE2-1～CASE2-4 では容積率(102%)一定の条件で、建物の平面形状を正方形から L 字形に変更し、建物配置を変更した。CASE2-1 はオープンスペースを区画中央に集中的に設け、住民間の共用しやすい配置としたケースである。一方、CASE2-2 は各建物が個別の庭を有すると同時にオープンスペースの街路への表出を意図したケースである。CASE2-3 および CASE2-4 は住宅南側のオープンスペース確保を意図した上で異なる建物配置としたケースである。解析条件は前節と同様のため省略する。

4.3.2 解析結果

1) 風速ベクトル分布

図 7 に高さ 1.5m における風速ベクトルの水平分布を

表 6 団地モデル 1 区画の形状データ (CASE2)

	CASE2-0	CASE2-1～CASE2-4
建物形状	正方形	L 字形
建物棟数	4	4
敷地面積	784 m ²	784 m ²
建築面積	400 m ²	267 m ²
建物高さ	7m(2 階建て)	9m(3 階建て)
建蔽率	51%	34%
容積率	102%	102%

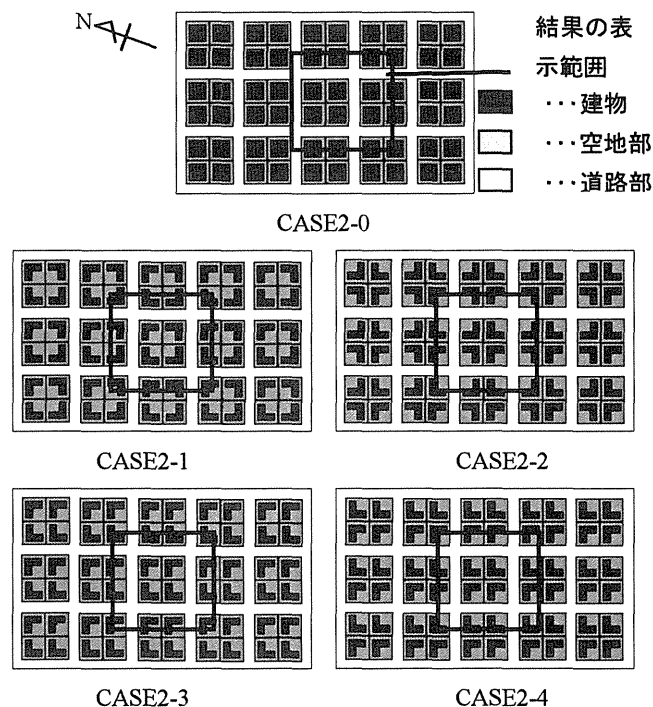


図 6 CASE2 解析ケース^{注4)}

示す。基本ケースである CASE2-0 では、前節の解析同様、南北に延びる街路に沿った流れと各区画南北のキャニオン空間で水平方向の循環流が形成される。CASE2-1 は、CASE2-0 と比べ、街路上では区画南側のキャニオン空間に周り込む循環流が増加し、これが中庭南側からやや強めに吹き込み、これが 2 つの水平方向の循環流を形成する。一方、CASE2-2 では敷地辺縁部に設けた空地で複雑な循環流が形成され、これが CASE2-1 の様な南北方向街路に沿った流れを消失させる。その結果、風速も全般的に弱い。CASE2-3、CASE2-4 では、CASE2-1 同様、敷地南側から空地部へ吹き込む逆流が共に形成されるが、CASE2-4 では、街路に面したオープンスペースを設けたことにより流れの一部がここに流入する結果、CASE2-3 よりも弱い逆流となる。

2) SET*分布

図 8 に各ケースの高さ 1.5m における SET*の水平分布を示す。CASE2-0 では、キャニオン空間で 41.5～44℃の高温域が、また主流軸（南北方向）に沿った街路上で 31.5～36.5℃程度の低温な領域が形成される。

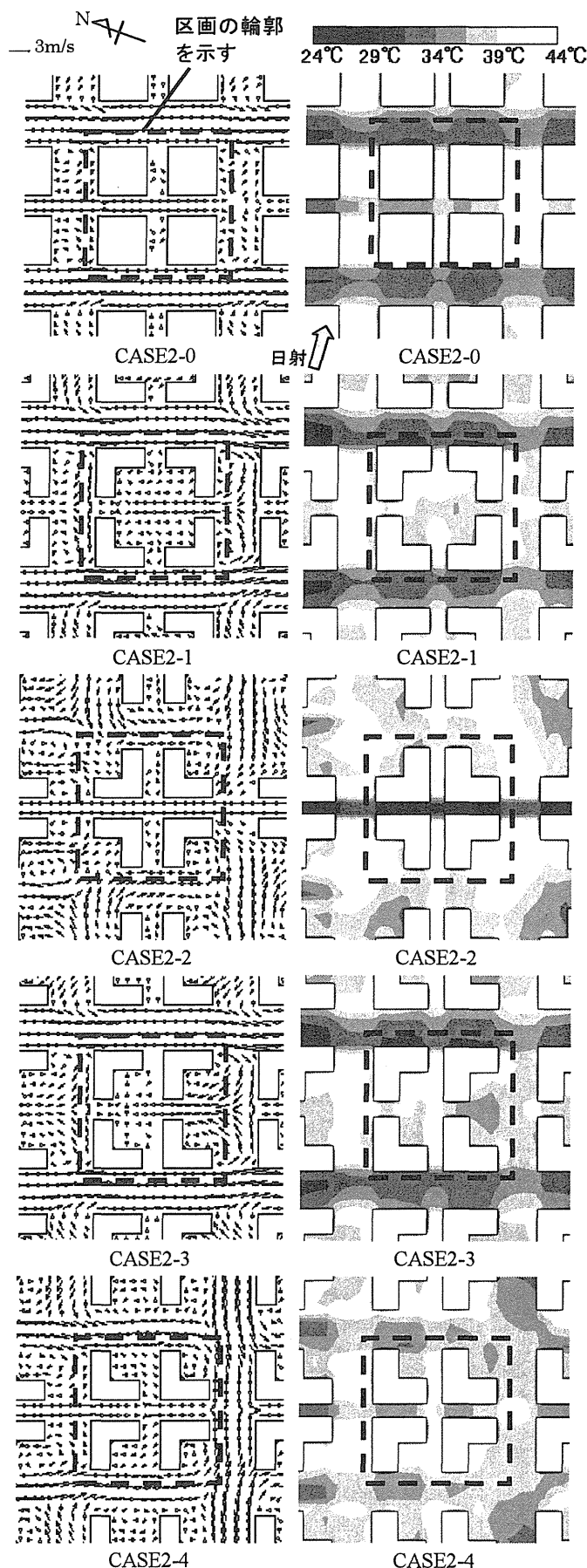


図7 風速ベクトルの水平分布
(高さ1.5m)

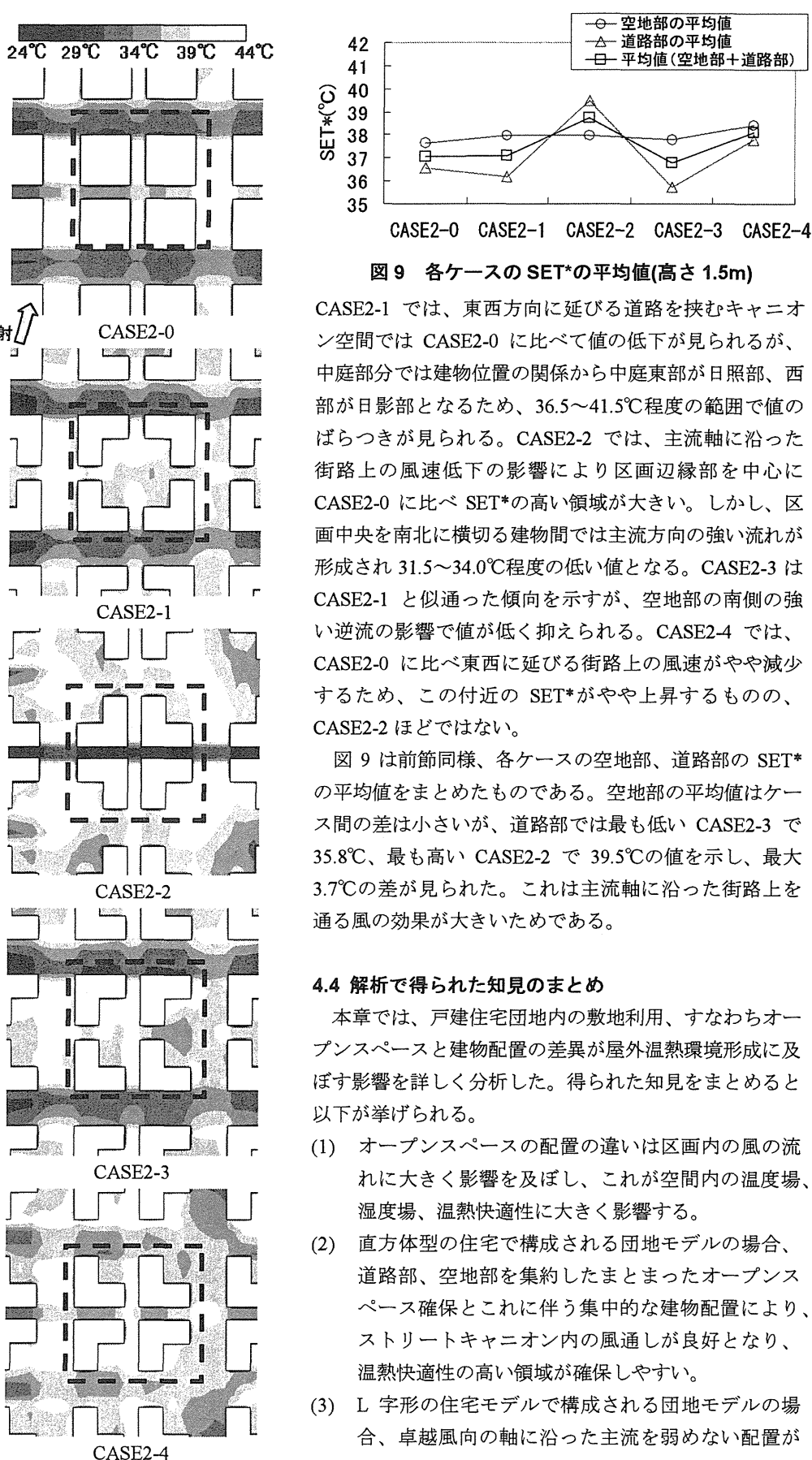


図8 SET*の水平分布
(高さ1.5m)

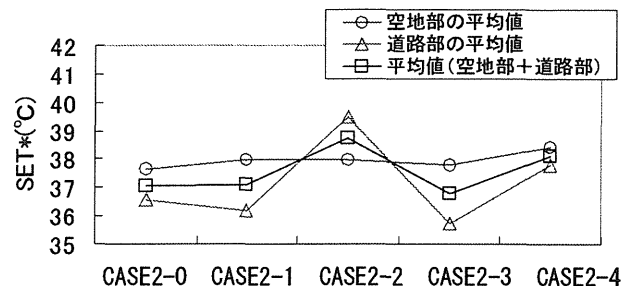


図9 各ケースのSET*の平均値(高さ1.5m)

CASE2-1 では、東西方向に延びる道路を挟むキャニオン空間では CASE2-0 に比べて値の低下が見られるが、中庭部分では建物位置の関係から中庭東部が日照部、西部が日影部となるため、36.5～41.5℃程度の範囲で値のばらつきが見られる。CASE2-2 では、主流軸に沿った街路上の風速低下の影響により区画辺縁部を中心に CASE2-0 に比べ SET*の高い領域が大きい。しかし、区画中央を南北に横切る建物間では主流方向の強い流れが形成され 31.5～34.0℃程度の低い値となる。CASE2-3 は CASE2-1 と似通った傾向を示すが、空地部の南側の強い逆流の影響で値が低く抑えられる。CASE2-4 では、CASE2-0 に比べ東西に延びる街路上の風速がやや減少するため、この付近の SET*がやや上昇するものの、CASE2-2 ほどではない。

図9は前節同様、各ケースの空地部、道路部の SET*の平均値をまとめたものである。空地部の平均値はケース間の差は小さいが、道路部では最も低い CASE2-3 で 35.8℃、最も高い CASE2-2 で 39.5℃の値を示し、最大 3.7℃の差が見られた。これは主流軸に沿った街路上を通る風の効果が大きいためである。

4.4 解析で得られた知見のまとめ

本章では、戸建住宅団地内の敷地利用、すなわちオープンスペースと建物配置の差異が屋外温熱環境形成に及ぼす影響を詳しく分析した。得られた知見をまとめると以下が挙げられる。

- (1) オープンスペースの配置の違いは区画内の風の流れに大きく影響を及ぼし、これが空間内の温度場、湿度場、温熱快適性に大きく影響する。
- (2) 直方体型の住宅で構成される団地モデルの場合、道路部、空地部を集約したまとまったオープンスペース確保とこれに伴う集中的な建物配置により、ストリートキャニオン内の風通しが良好となり、温熱快適性の高い領域が確保しやすい。
- (3) L 字形の住宅モデルで構成される団地モデルの場合、卓越風向の軸に沿った主流を弱めない配置が必要である。

以上を踏まえると、温熱快適性の良好な団地内屋外空間を形成する上で区画内の「風の道」の形成への配慮が

重要あり、そのためにはオープンスペースの集中的な配置と卓越風向（夏季日中の典型的な風向）に配慮した風を誘引しやすい建物配置の計画が肝要であること、が明らかとなった。

5. 遺伝的アルゴリズム GA を用いた住宅団地の「風の道」の最適設計

5.1 はじめに

前章での検討結果として、戸建団地内の「風の道」形成が街区内の温熱快適性に大きく影響することが明らかとなった。しかし、「風の道」の形成には前述の解析の通り、団地内の建物（住宅）の形状、街区幅、主風向等をはじめとする非常に多くの要因が関わっているため、最適な設計案を考えるのは非常に困難である。そのため、実際の街区設計では視覚的意味合い、経済面を優先した設計者の経験・手腕に頼る面が非常に大きいのが現状であり、設計そのものの目的に対して、より良い且つ効率的な「最適設計」手法の確立が期待されている。

このような問題に対して、設計目標を表す評価関数を設定し、これを最大化させる最適設計手法に関する研究が建築構造、計画分野で行われており^{21)~23)}、近年、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²⁴⁾。陳、大岡、加藤は、文献 25 において、これを屋外温熱環境設計に適用するため、遺伝的アルゴリズム GA (Genetic Algorithm、以下 GA)^{26,27)}を利用して、樹木の最適配置に関する最適設計手法を開発している。

本章では、この GA に基づく最適設計手法を「風の道」形成のための最適街区設計に適用した解析を行い、その利用可能性を検討する。

5.2 「風の道」最適設計手法の概要

5.2.1 遺伝的アルゴリズム GA

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方法である。GA では、固体と呼ばれる最

適候補をひとつの生物とみなす。生物の進化と同様に、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付ける。GA は世代の進展に伴い、各個体の染色体に対して選択、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が最適個体となる。GA に関する詳細は文献 26、27 を参照されたい。

5.2.2 本研究で行なった風の道の最適設計手法の概要

本研究では、陳らが提案する屋外温熱環境 CFD 解析と GA を連成した最適設計手法²⁵⁾を参考に「風の道」の最適設計手法を構築した。ただし、今回は「風の道」設計への GA の適用可能性を模索することを目的としたため、上記手法に比べてやや簡略な手法をとった。簡単に本研究で行なった手法のプロセスを箇条書きすると、以下のようになる。

- ・ 2 段階探索手法を採用する。
- ・ 第 1 段階探索において CFD 解析と GA を連成した解析を行う。ただし、今回は計算負荷を軽減させるため、放射解析との連成は行っていない。これに伴い、熱の境界条件は表面の土地利用状況に対応した表面温度は実測値を参考に与えた。また、領域内のメッシュ分割は粗メッシュを採用した。
- ・ 第 2 段階探索においては、第 1 段階探索での設計目標を表す評価関数の値の高い設計案を選定し、これに対して細メッシュを採用した詳細な解析を行った。

5.3 最適化問題の設定

5.3.1 解析対象

図 10 に解析対象となる街区モデルを示す。風上側に冷熱の供給プラントとなる水面が存在し、その風下に住宅が 5 棟が並ぶ団地とする。解析では、図中の破線で囲まれた領域を対象としており、解析領域側面の境界条件

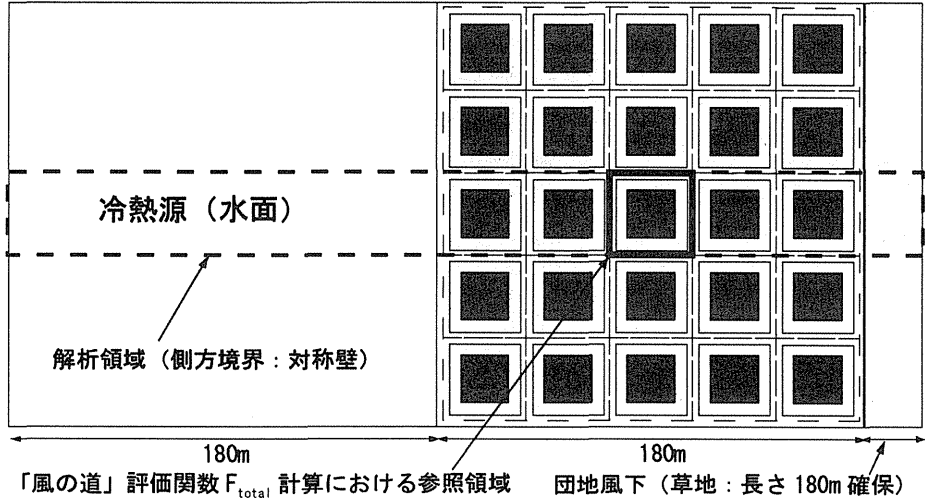


図 10 「風の道」最適設計のための解析対象

表 7 各土地利用の表面温度・放出される対流熱伝達量

		表面温度 [°C]	対流熱伝達量 [W/m ²]
①	水面	30.7	-34.8
②	草地	33.2	-5.8
③	建物側壁	38.3	53.4
④	道路	46.3	146.2
⑤	建物屋上	52.5	218.1

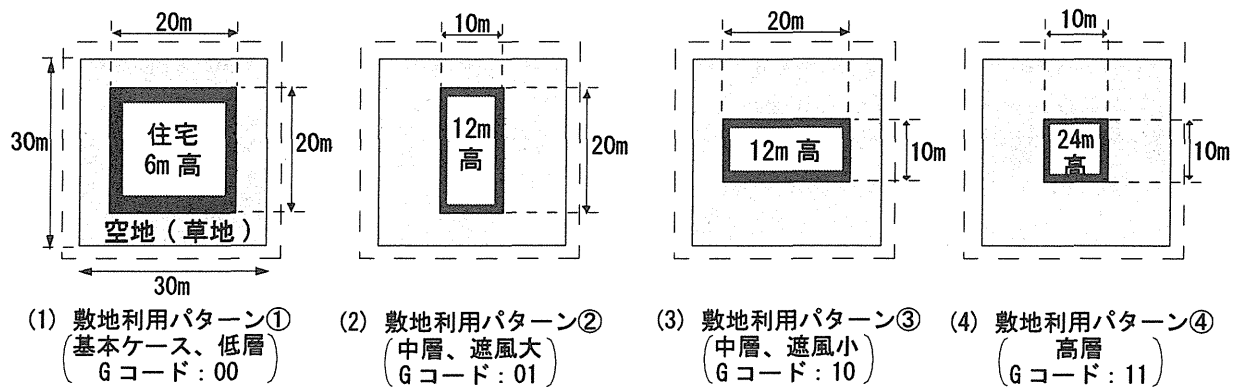


図 11 区画内に配置される住宅形状と配置位置のパターン

には対称壁条件^{※10)}を採用する。後述する設計パラメータとなる建物形状・配置のパターンは流入風の風向を軸に対称性を確保したものとしている。したがって、本解析では5棟の住宅が並ぶ領域のみを解析対象としているが、対称壁境界条件の採用により解析領域のスパン方向にも一様に建物が並ぶ住宅配置を想定している。

5.2.2 設計パラメータ

本研究では、団地内5箇所の敷地における建物配置・形状を設計パラメータとする。具体的には、各設計案に対する遺伝子コードに従い、図11に示す4つのパターンの中から1区画毎の建物形状・配置を決定する。これら4つのパターンは2桁の2進数表記で区別される。これを区画毎に設定するため、各設計案に対応する遺伝子コードは2桁×5区画=10桁の2進数で表記される。このコードに従い設定された建物形状・配置はCFD解析の境界条件の設定の折に利用される。

5.2.3 解析条件

気象条件は気象官署のデータ、並びに著者らによる実測結果^{※28)}を参考に与えた。流入境界では、高さ10mの風速を3m/sとする1/4乗則に従う分布を与えた。CFD解析における気温の初期値、流入空気温度をともに31.6℃とした。表面温度並びに対流熱伝達量は表7に示す値を与えた^{※9)}。ここでは対流熱伝達量の算出には α_c 型壁関数を使用しており、対流熱伝達率 α_c を11.6[W/m²K]、参照温度31.6[℃]の一定値を使用する。また、地表面・建物外表面の流れ場の境界条件は一般型対数則を使用する。上空境界では $\langle u_3 \rangle = 0$ 、その他の物理量については鉛直方向の勾配を0として与える。また、側方境界においては前述の通り対称境界条件を使用する。

5.2.4 設計目標・設計変数

本解析では、夏季における「風の道」の最適配置による屋外温熱環境の最適化を目標とする。一般に「風の道」に求められる機能は、①風上の冷温帯からの涼風の誘引、②街区内からの発熱の効率的な除去、と考えられ

表 8 GAパラメータの設定値

項目	値
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)	10
全個体数 (Total individual size)	600 (60×10)
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
突然変異率 (Rate of mutation)	0.02

る。そこで、本研究では団地中央の3列目の住宅周辺の気温が最も低温となる団地が最適と考える設計変数を使用した。具体的には、図10中に示す太い実線枠内の高さ1.5mにおける気温の平均値(建物部は除く)と基準温度 θ_0 の差を算出し、この逆数を評価に用いた^{※9)}。

$$F_{total} = \frac{1}{\theta_{ave} - \theta_0} \quad (24)$$

$$\theta_{ave} = \frac{\sum \{A_i \theta_{1.5i}\}}{\sum \{A_i\}} \quad (25)$$

F_{total} : 最適程度を判断するための評価値

θ_{ave} : 団地中央3列目の住宅周辺の1.5m高さの気温平均値[℃]

θ_0 : 基準温度 [℃] (=31.6)

A_i : 団地中央3列目住宅周辺のメッシュ*i*(建物部は除く)の水平面積 [m²]

$\theta_{1.5i}$: 団地中央3列目の住宅周辺のメッシュ*i*(建物部は除く)での高さ1.5mの気温[℃]

5.2.5 GAの設定条件

本解析では、陳らの解析を参考に種々提案されているGAアルゴリズムにおいても効率的と言われている島モデル遺伝的アルゴリズム (Multi-island Genetic Algorithm)^{※29)}を採用した。この「島モデル」は、並列分散(多点同時探索型)の最適化手法であり、1つの世代での個

体群を複数のグループ（島、sub-population）に分割し、各島で独立に遺伝的操作を行うと同時に、島間の移住（migration）と呼ばれる個体情報の交換を定期的発生させながら最適設計案を探索する手法である。詳しくは文献 25、29 を参照されたい。表 8 はこの GA 実施に際して用いる基本的なパラメータ値をまとめたものである。

5.3 解析結果

本稿では、解析結果の一例として最適設計案となった団地（以下「最適案」と呼ぶ）の解析結果と 3 章に示した住宅団地の基本パラメータに近い低層の住宅により構成される均等街区（以下「従来案」と呼ぶ）の解析結果を比較しながら、結果を分析する。各案に対する評価関数の値、遺伝子コードを表 9 にまとめて示す。

1) 風速ベクトル分布

図 12 に高さ 1.5m における風速ベクトルの水平分布を示す。また、図 13 は団地中央を主流方向に住宅中心を含む断面で切断した鉛直断面内における風速ベクトル分布である。従来案（図 12(1)、図 13(1)）では、風向と対応する主流に沿った街路上の流れと建物間のストリートキャニオン内における微弱な循環流が見られる。一方、最適案の団地（図 12(2)、図 13(2)）では、風上から 1、2 列目の建物の見つけ面積（風向に対して直交する断面内における建物断面の面積）が小さくなる様に中層住宅を配置し、風上からの涼風の効果的な誘引を図っている。3 列目、4 列目には高層住宅が配置されているため、これが上空の空気を地表付近に誘引する循環流が生じると同時に、設計変数の評価対象領域となる 3 列目の区画周辺で生じた熱を水平・鉛直双方へ効率よく排出する。5 列目は 1、2 列目とは異なる中層住宅の配置となってい

るが、これは 4 列目住宅風下に生じる鉛直方向の循環流を促進し効率的に熱を排出するためと推察される。

2) 気温分布

図 12、図 13 に対応する断面における気温分布を図 14、図 15 に示す。従来案では、建物間のストリートキャニオン内の循環流が微弱であるため、熱が滞留し、全般に高温となる。一方、最適案では、風上の冷温帯（流入風、水面）を通過する涼風の効果により団地風上から 2 列目住宅周辺付近まで 32℃以下の低温な領域が形成される。3 列目以降は高層建物周辺で生じる強い流れが、上空の冷涼な空気を誘引すると同時に団地内で発生する熱を水平・鉛直双方へ排出している。特に従来案と比べ鉛直方向への排出が大きい。加えて、同一水平面内における建物自体の表面積の減少（特に建物側壁面積の減少）とオープンスペース（緑地面積）の増加の効果が相乗する結果、「風の道」形成に有効な街路となったと考えられる。

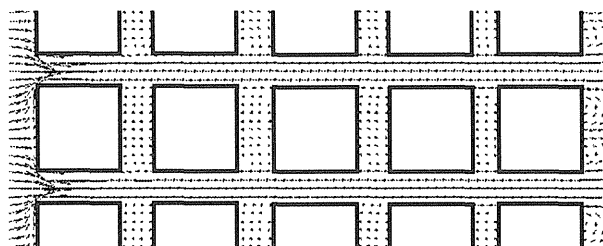
5.4 結果の総括

本章では、遺伝的アルゴリズム GA に基づく最適設計手法を「風の道」形成のための最適街区設計に適用し、その利用可能性を検討した。その結果として、「風の

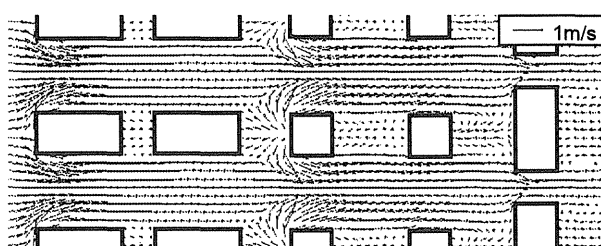
表 9 GA 解析により得られた最適設計案

	F_{total}	各設計案の遺伝子コード(2進数表記) 敷地毎の住宅形状パラメータ値 (風上側より順に表記)				
		1 列	2 列	3 列	4 列	5 列
		10 ③	10 ③	11 ④	11 ④	01 ②
最適案	1.51	10 ③	10 ③	11 ④	11 ④	01 ②
従来案	0.68	00 ①	00 ①	00 ①	00 ①	00 ①

※ 表中の○数字は、図 11 に示した住宅形状パターンと対応している。

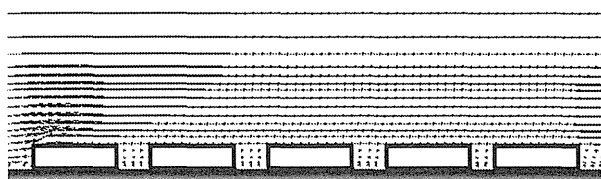


(1) 従来案（低層型の住宅配置）

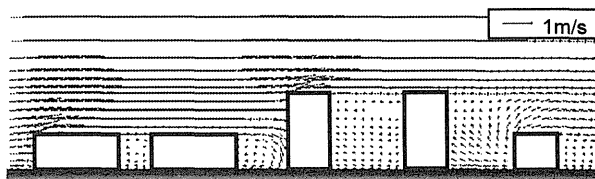


(2) 最適案

図 12 風速ベクトルの水平分布（高さ 1.5m）



(1) 従来案（低層型の住宅配置）



(2) 最適案

図 13 風速ベクトルの鉛直断面内の分布

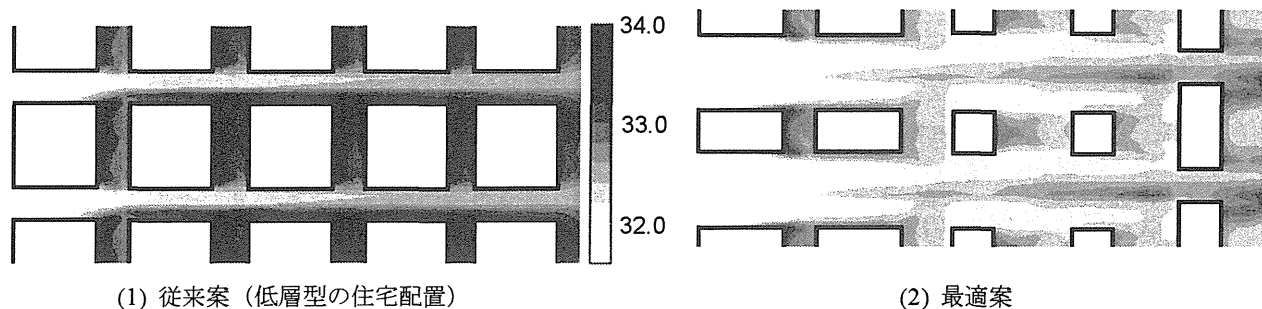


図 14 気温の水平断面内の分布 (高さ 1.5m)

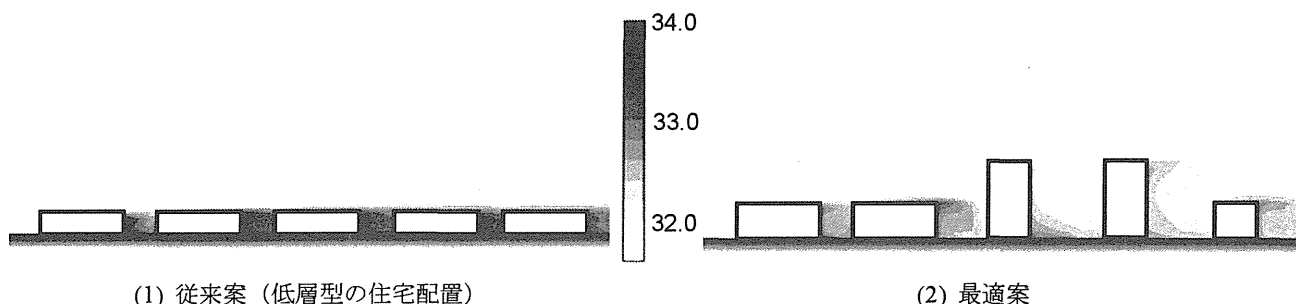


図 15 気温の鉛直断面内の分布

道」設計では、①設計目標を達成したい領域の風上側の住宅については風上側の涼風を誘引するため、風向に直交する建物断面の面積の減少を心がける必要があること、②設計目標を達成したい区画後方においては、区画内での発熱を効率的に除去することを心がける必要があること、特に水平方向のみならず鉛直方向への熱の除去への工夫が必要であること、が明らかとなった。しかし、本解析は計算負荷軽減のために条件設定を簡易なものとしたため、以下の点で課題が残る。

- (1) 解析領域のメッシュ数を減少させるため、CFD 解析の対象領域を対称境界条件の課すことのできるものとしたが、実際の団地はもっと複雑である。そのため、より複雑な対象の解析のための手法の改善が必要である。
- (2) 設計変数を平均気温のみの関数としたが、本来は前章までに示した SET*を含む関数とするのが理想と考えられる。しかし SET*を算出するには放射と連成した解析を行う必要があり計算負荷が増大すると考えられ、今回は断念した。今後は計算アルゴリズムの見直しを図り計算速度を高速化する必要がある。

6. まとめ

本研究は、戸建住宅団地内の夏季暑熱環境の形成要因を詳しく分析し、屋外温熱環境を緩和する最適設計のための知見を得ることを目的に、CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法を適用した解析を行なった。ここでは特に暑熱環境形成因子として敷地利用が「風の道」形成に及ぼす影響を詳しく分析した。さらに、遺伝的アルゴリズム GA に基づく最適設計手法をこの「風の

道」設計への適用を試みた。各解析のまとめは各章末に述べたので、ここでは研究全体としての課題を示す。

- (1) 本稿ではオープンスペースと建物配置の關係に着目したが、敷地内自体の利用（植栽の配置、建物表面被覆）、住宅熱負荷の観点の検討が不十分であった。
 - (2) 夏季に良好な住宅団地の設計が年間を通じて良好な環境形成に寄与すると考えるのは早計である。年間を通じた環境評価が必要である。
 - (3) 5 章末にも述べた GA を用いた最適設計は、より複雑な解析対象における検討も必要である。
- 以上を踏まえ、今後の研究を進める必要がある。

<注>

- 1) 著者らは葉袋との学内共同研究において福井市中心部（田原町）の住宅地における敷地利用状況の調査をしたことがあるが、この結果は表 4 の A～D の団地に近いものであった。そこで、本研究では福井市中心部の住宅地内の環境評価も視野に入れ、まず A～D によるデータを主として活用した。しかし、E～H の団地では 1 戸あたりの敷地面積が小さいものの、区画内の空地を共用の庭・公園としての活用、敷地 2 つ分を購入した広い庭の整備等、特徴的な利用例が見られる。今後は、上記の様な空地利用の工夫を温熱環境的な観点から検討する予定である。
- 2) 「ストリートキャニオン」とは、街区内の建物と建物の間に生じる凹んだ空間(建物間の谷間)のことであり、風環境等の研究分野でよく使用される。
- 3) 4.2 節の解析に比べて、区画あたりの建物棟数を 6 棟から 4 棟に減らしたのは、敷地中央につくる共通のオープンスペースの形状を正方形に近くするため、並びに建物形状を L 字型にするためのメッシュ分割の増加への対応、によるためである。
- 4) CASE2-1～2-4 で行なう L 字形の区画内の建物配置について、代表して CASE2-1 を拡大したものを図 16 に示す。

- 5) 文献 28 は東京での実測結果であるため、本研究で対象としている福井地方の夏季熱環境評価への適用への問題の有無も確認する必要がある。本研究では、福井市内での実測結果とも比較の上、最終的に表 7 の値を設定した。
- 6) 一般に GA では評価関数の値が大きい程、優秀な設計案とみなす。本解析は「風の道」の最適設計であるため、空間内の気温が低いほど最適である。そのため、単純に平均気温を評価関数とすると、最適個体ほど変数の値が小さくなるため、ここではその逆数を評価関数に用いた。

＜参考文献＞

- 1) 足永靖信, ヴァンカ: 空間平均処理を施した 3 次元都市キャノピーモデルの開発 都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その 2, 日本建築学会環境系論文集, 586 号, pp.45-51, 2004.12
 - 2) 鳴海大典, 大谷文人, 近藤明, 下田吉之, 水野稔: 都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響, 都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その 1, 日本建築学会計画系論文集, 562 号, pp.97-104, 2002.12
 - 3) 神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇: 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化の評価 (1) 1996 年夏期集中観測, 天気, 44, 10, pp.31-40, 1997.10
 - 4) 萩島理, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤: 街路樹のある街路の温熱環境予測 その 1 樹木の放射温度分布に関する実測, 日本建築学会計画系論文集, 516 号, pp.79-86, 1999.2
 - 5) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 大原健志: 改良・建築一都市一土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析, 第 1 報 モデルの理論構成及び標準化, 日本建築学会計画系論文集, No.550, pp.79-86, 2001.12
 - 6) 金相瑾, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 吉田伸治: 数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析, 日本建築学会計画系論文集, 534 号, pp.83-88, 2000. 8
 - 7) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 金相瑾: 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析 日本建築学会計画系論文集, 529 号, pp.77-84, 2000. 3
 - 8) 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, 536 号, pp.87-94, 2000. 10
 - 9) 原山 和也, 吉田伸治, 大岡 龍三, 持田 灯, 村上 周三: 非定常な対流・放射・伝導を考慮した 3 次元の屋外温熱環境予測手法の開発 第 1 報 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証, 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp.99-106, 2002.6
 - 10) 村上周三: CFD による建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 2000.9
 - 11) 原田陽子・野嶋慎二・薬袋奈美子・菊地吉信: 地方都市郊外戸建住宅地における複数区画利用プロセスと空区画利用の可能性一居住者による自律的住環境形成に関する研究一, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.41-3, p.1049-p.1054, 2006 年 10 月
 - 12) 野口康仁, 村上周三, 持田灯, 富永禎秀: 都市の温熱環境の数値シミュレーション (その 3), k-εモデルの乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, 65-66, 1994
 - 13) 村上周三, 持田灯, 林吉彦: 立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する k-εモデルと LES の比較一乱流エネルギーの生産の構造とノルマルストレスの非等方性の再現に関して, 日本建築学会計画系論文集報告集, 423, 23-31, 1991
 - 14) 近藤宏二, 村上周三, 持田灯: 改良 k-εモデルによる建物モデル周辺気流の数値計算, 第 8 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 363-366, 1994
 - 15) B. E. Launder and M. Kato: Modelling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Eng. Conf., 157, Unsteady Flows, 189-200, 1993
 - 16) M. Kato and B. E. Launder: The modeling of the turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, Prep. of 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto 10-4, Japan, 1-6, 1993
 - 17) 谷口博: モンテカルロ法による 3 次元ガスふく射の解析, 日本機械学会論文集, 261, 897-909, 1968
 - 18) 大森敏明, 谷口博, 工藤一彦: 室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 42, 9-18, 1990
 - 19) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions, 77, 247-262, 1971
 - 20) 中山昭雄: 温熱生理学, 理工学社, 1981.1,
 - 21) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造 1), 1211-1212, 1994
 - 22) 岡本英樹, 服部孝生: 非線形評価関数を含む最適設計へのニューラルネットワークの適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (建築計画 1), 773-774, 1993
 - 23) 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, 484 号, 129-135, 1996
 - 24) 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 段階型設計手法の開発, 空気調査・衛生工学会学術講演会講演論文集, 69-72, 2001
 - 25) 陳宏, 大岡龍三, 加藤信介: 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, 日本建築学会環境系論文集, 576 号, pp.65-72, 2004.2
 - 26) 石田良平, 小山修平, 村瀬比古: パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, 1997.7
 - 27) 伊庭奇志: Excel で学ぶ遺伝的アルゴリズム, オーム社, 2005.11
 - 28) 吉田伸治, 村上周三, 成田健一, 高橋岳生, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀: 団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測, 日本建築学会計画系論文集, 552 号, pp.69-76, 2002.2
 - 29) Reiko Tanese: Disributed genetic algorithms, Proc. 3rd ICGA, pp. 434-439, 1989
- ＜研究協力者＞
- 秋田知良 福井大学大学院工学研究科博士前期課程
藤本真悟 福井大学大学院工学研究科博士前期課程

秋田知良 福井大学大学院工学研究科博士前期課程
藤本真悟 福井大学大学院工学研究科博士前期課程