研　究　速　報

対流・放射連成解析を用いた中国・深圳市の集合住宅の屋外温熱環境に関する研究

Study on Outdoor Thermal Environment of Apartment Block in Shenzhen, China with Coupled Simulation of Convection, Radiation and Moisture Transport

陳　　宏*・大　岡　龍　三*・原　山　和　也**・加　藤　信　介**

Hong CHEN, Ryozo OOKA, Kazuya HARAYAMA and Shinsuke KATO

1. はじめに

中国の各地方都市は現在急激な発達を遂げている．特に香港に隣接する深圳市は1980年に経済特別区となったことをきっかけに，わずか20年の間に，人口2万人の小都市から380万人の大都市へと急成長した．また，これにともない都市温暖化等の屋外環境の悪化も認められるようになった[1]．既報[2]において，深圳市に実在する集合住宅を対象として数値解析を行い，劣悪な屋外温熱環境を改善するための計画案を提示した．

本研究では，①上記の集合住宅で行った屋外温熱環境の実測による集合住宅の夏季の屋外温熱環境の実態把握，②実測対象領域における温熱環境の数値解析，以上の2点を行い，団地内の夏季の屋外温熱環境を評価する．なお，本解析では筆者らが開発したCFD解析に基づく屋外温熱環境の予測評価手法[3]を用いた．

2. 実　測　概　要

2.1　実測対象（図1，2，3）

本研究では，図1に示す中国・深圳市に実在する集合住宅を実測対象とする．そのうち，領域Aを実測領域とする．図2に実測領域の写真を示す．実測領域においては，建物は4～5階建て，実測領域の周辺の建物は7～9階建てであった．また，測定ポイントを図3に示すが，A棟とC棟の1階にはピロティーがある（灰色部）．

2.2　実測期間並び測定項目（図3，4，表1）

実測期間は平成14年8月13～15日である．測定項目の一覧を表1に示す．実測対象領域である領域A内の数点において，風向，風速，気温，グローブ温度，相対湿度，地表面温度並び建物表面温度を測定した．図3に各測定ポイントを示す．実測期間の上空の気象条件（風向，風速，気温，湿度）を実測対象領域南側にある9階建て住宅棟（建物高さ30.5 m）の屋上で測定した．また，上空の風向・風速（表1にNo. 2）は9階建て住宅棟屋上に設置した6 m

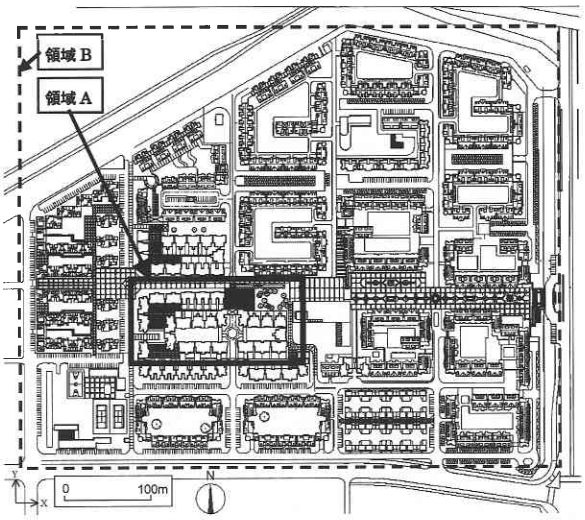


図1　実測対象

図2　実測領域

*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

のポールの上で測定した（地上36.5 m）．温度･湿度（表1にNo. 3）は，9階建て団地棟屋上の屋上面より1.5 mの高さ（地上32.0 m）で測定．

2.3　実測結果（図5）

図5(1) に屋上測定点において測定した全天日射量の時間変化を示す．実測中，8月13と15日は晴れ一時曇り，14日は曇天であった．8月13日，15日においては正午前後に1000 W/m^{2}を超える値を示し，雲が多い14日においても正午前後に900 W/m^{2}程度の値となった．また，図5(2) に8月14日，15日の上空の風向・風速の時間変化，

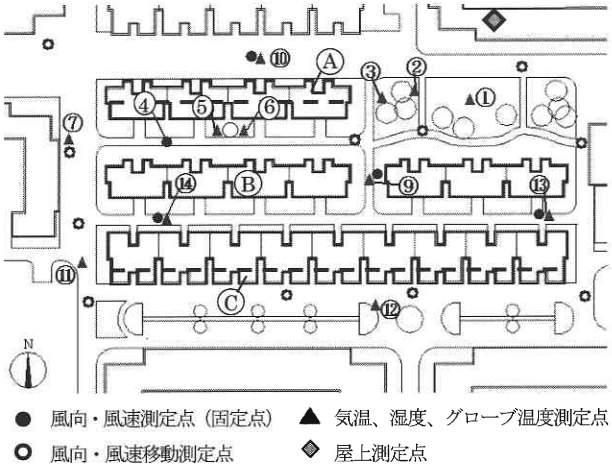
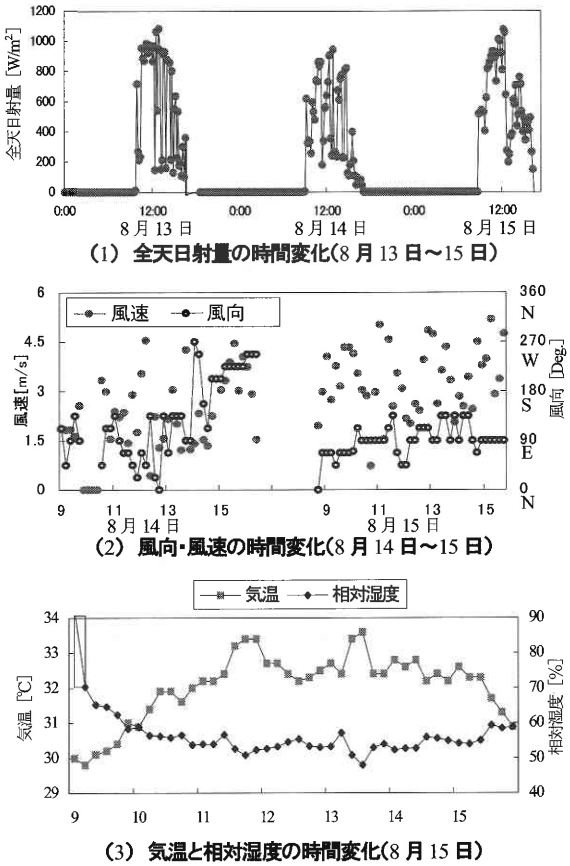


図3　測定ポイント

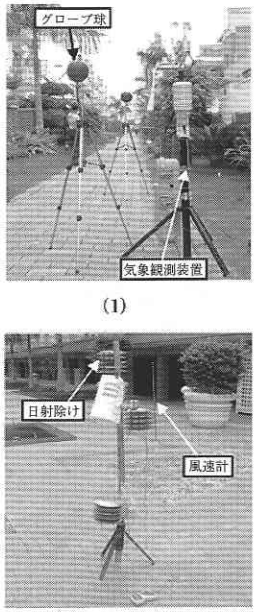


(1) 全天日射量の時間変化(8月13日～15日)

(2) 風向･風速の時間変化(8月14日～15日)

(3) 気温と相対湿度の時間変化(8月15日)

図5　気象条件



(1)

(2)

図4　実測風景

表1　測定項目一覧

No.	測定位置	測定項目	測定装置	測定点数
1	測定点：屋上（9 階建住宅の屋上）	全天日射	全天日射計	1
2		上空風向、風速	熱線風速計＋flag	1
3		上空温度、湿度	アスマン通風乾湿計	1
4	測定領域A	風向、風速（高さ 1.5m）	気象観測装置	2
5			熱線風速計＋flag	3
6			微風速計＋スモークテスタ	10
7		気温、湿度分布（高さ 1.5m）	温・湿度記憶計	10
8			気象観測装置	2
9		グローブ温度（高さ 1.5m）	グローブ温度計	12
10		建物壁面表面温度	赤外線放射温度計	16
11		地表面温度：・　舗装面（日向、日陰）	熱電対＋データロガー	2
			赤外線放射温度計	16
12		草地表面温度（日向、日陰）	熱電対＋データロガー	2
			赤外線放射温度計	16

注）上空風向･風速（No. 2）は、9階建て住宅棟屋上に設置した6mのポールの上で測定した(地上36.5m)。一方、温度･湿度（No. 3）は、9階建て団地棟屋上の屋上面より1.5mの高さ(地上32.0m)で測定。

図5(3) に8月15日の上空の気温，相対湿度の時間変化を示す．風向は北東から南東を示し，8月15日は大変安定しており，風速は平均値で3 m/s程度の値となった．気温は最高で約34°Cであり，相対湿度については最低約50％程度の値となった．

3. 解　析　概　要

3.1　解析領域（図6，表2）

図1の実線で囲まれた実測対象領域 （領域A）を解析領域とする．図6に解析領域Aの土地利用データ，表2に建物表面・地表面被覆材料の物性値を示す．

3.2　解析日時

解析日は8月15日を対象とする．CFD解析は8月15日12時を対象に行う．また，放射・伝導解析は8月14日0時～8月15日24時の48時間を対象に行い，8月15日の24時間を検討対象とする．そのうち8月15日12時の地表面，建物壁面温度を境界条件としてCFD解析を実行した．

3.3　気象条件

気象条件は屋上測定点で測定した実測データを利用した．また，CFD解析（8月15日12時）における風向は東南東，風速は高さ36.5 mにおいて3.5 m/s，気温，相対湿度をそれぞれ33.2°C，52.6％に設定した．

3.4　乱流モデル

通常の標準型k-ε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[5] を使用した．

3.5　解析手順

計算は広さの異なる2つの領域A，Bを対象に2段階で行った．

(1) 広領域計算（領域B）

図1の点線で囲まれた大きな領域（領域B）を対象として，CFD解析を行う．この結果を用いてより狭い領域A（図1の実線で囲まれた領域）の側面の風速の境界条件を作成する．

(2) 建物周辺領域計算（領域A）

図1の実線で囲まれた小さな領域（領域A）を対象に対流･放射･湿気輸送連成解析を行う．まず，非定常放射・伝導解析を用いて屋外の地表面，建物壁面の表面温度，対流熱伝達量，湿気伝達量を算出する．次に，上記の結果と広領域計算（領域B）の結果を用いて，図1の実線で囲まれた小さな領域（領域A）を対象としたCFD解析（定常解析）を行う．そして，風速，温度，絶対湿度等の空間分布を求める．

4. 解析結果と実測結果の比較

4.1　地表面温度分布（図7，8，表3）

図7に領域Aにおける地表面温度分布の計算結果を示す．草地表面温度は日照部で38～41°C，日陰部で30～32°C，コンクリート表面温度は日照部で50～52°C，日陰部で41～42°C，アスファルト表面温度は，日照部で61～63°C，日陰部で46～47°Cの値となった，また，表3

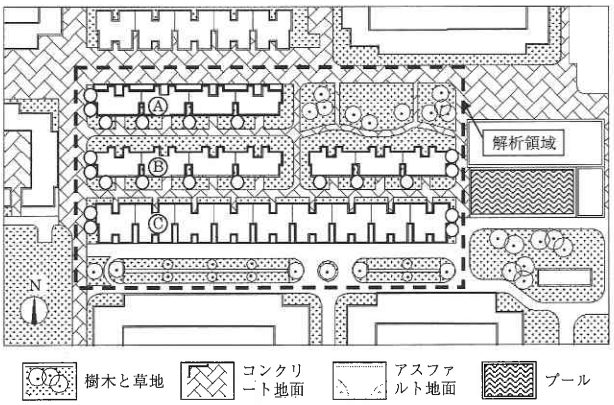


図6　土地利用データ（放射解析）

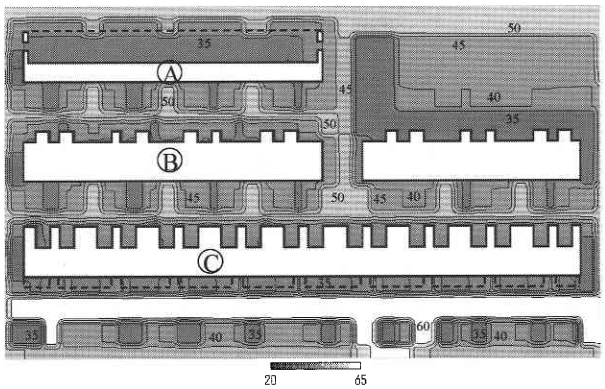


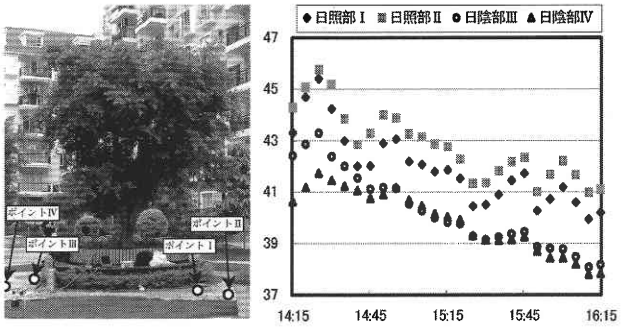
図7　領域A　地表面温度分布［°C］
（8月15日12時）

表2　被覆面の熱的パラメータ値

	アルベド	長波放射吸収率	蒸発効率
コンクリート	0.30	0.90	0.00
草地	0.20	0.90	0.30
アスファルト	0.10	0.95	0.00

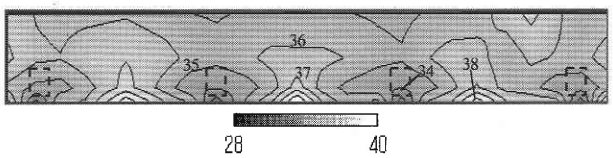
表3　地表面温度の計算値と実測値の比較

	草地		コンクリート		アスファルト	
	日照部	日陰部	日照部	日陰部	日照部	日陰部
計算結果	40.1	32.3	51.2	42.5	63.1	47.4
実測結果	37.4	30.2	48.1	38.2	58.2	49.1

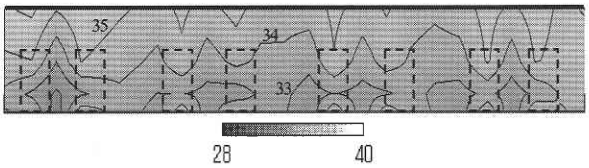


(1)測定点写真　　**(2)地表面温度の時間変化**

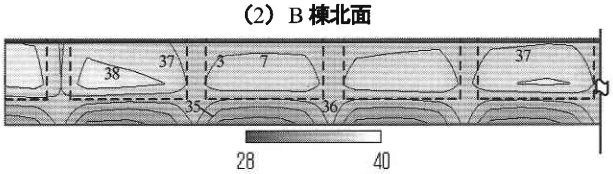
図8　地表面温度の時間変化（8月15日）



(1) A棟南面



(2) B棟北面



(3) C棟南面

図9　建物壁面温度分布［°C］

に草地，コンクリート面，アスファルト面の計算値と実測値の比較を示す．各ポイントにおいて計算結果は実測結果と良く対応した．また，図8に（1）に示す樹木周辺の地表日照部，日陰部で測定した地表面温度の時間変化を示す．日照部ポイントⅠ，Ⅱはそれぞれ木の西側に木から180 cm，270 cm離れ，日陰部ポイントⅢ，Ⅳはそれぞれ木の東側に木から180 cm，270 cm離れる測定点である．日照部と比べ，日陰部では地表温度4～5°C程度低下する．また，日照部ではポイントⅡはポイントⅠより0.5～1°C程度の地表面温度が高い．これはポイントⅡが樹木より遠いから，受けた日射量はポイントⅠより多いためと考えられる．一方，日陰部では最初から1～2°C程度の温度差があるものの，14時45分以後にほぼ同じ値となった．

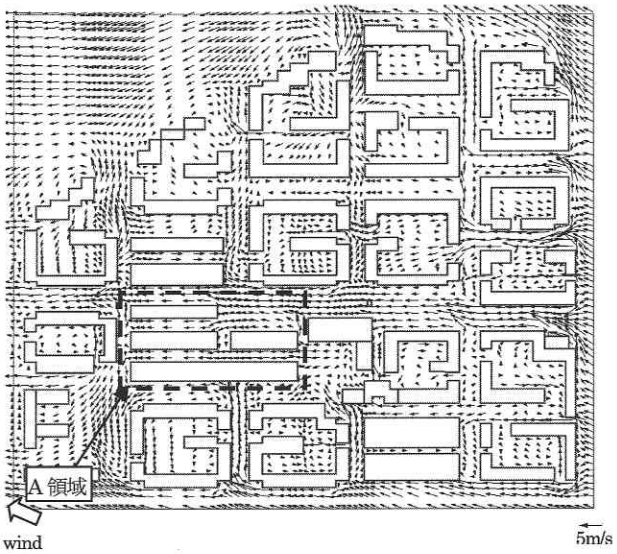


図10　領域B　風速ベクトルの水平分布（高さ1.5 m）（8月15日12時）

4.2　建物壁面温度分布（図9）

図9にA棟南面，B棟北面，及びC棟南面（図6，A,B,C棟）の壁面温度の分布を示す．A棟南面で約36～37°C程度，B棟北面で約33～35°C程度，C棟南面で約35～38°C程度の値を示す．一方，実測結果では南面で約35～38°C，北面で約32～34°Cの値となっており，よく対応している．図9(1) において点線で囲まれた部分は樹木が隣接した部分である．このため，その部分では日射の遮蔽により壁面温度が低くなる．また，A棟南面には地表付近に3箇所の高温域がある．これはその壁面近傍の地面が高温なコンクリート面であるため，地表面からの長波放射を多く受けているためと考えられる．図9(2) において点線で囲まれた部分は建物の凸部分を示す．くぼんだ部分では凸部の影ができるため1～2°C低い値となっている．図9(3) において点線より下部にはピロティーがあり，その影響で日射が遮蔽されて，1階の表面温度は上部の表面温度より3～4°C程度低下する．

4.3　風速分布（図10，11，12）

図10に広領域（領域B）の高さ1.5 mにおける風速ベクトルの水平分布を示す．集合住宅全領域の傾向として，建物で囲まれたの中庭において低風速領域が見られるが，団地の中央における東西方向の中央道路では風通しが良い「風の道」の効果が示された．また，図11に領域Aにおける高さ1.5 mの風速ベクトルの水平分布を示す．領域A全体の傾向として，東風となっており，図12に示された同じ領域の実測結果とよく一致している．風速のスカラー値については，解析結果はポイント①で1.6 m/s，ポイン

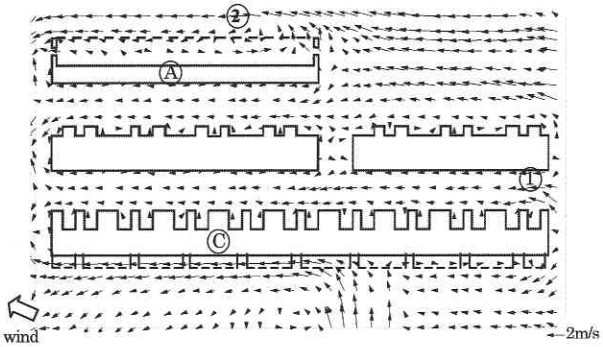


図11　領域A　風速ベクトルの水平分布（高さ1.5 m）
（8月15日12時）

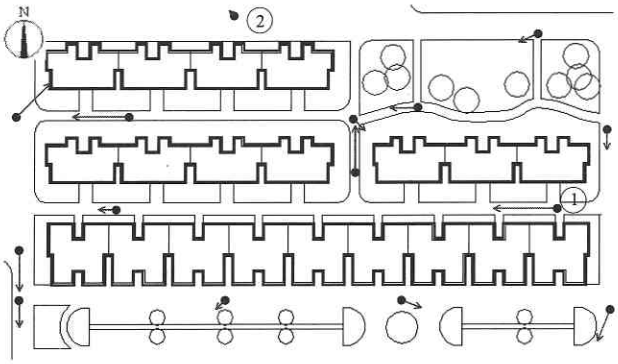


図12　実測結果　（8月15日12時）

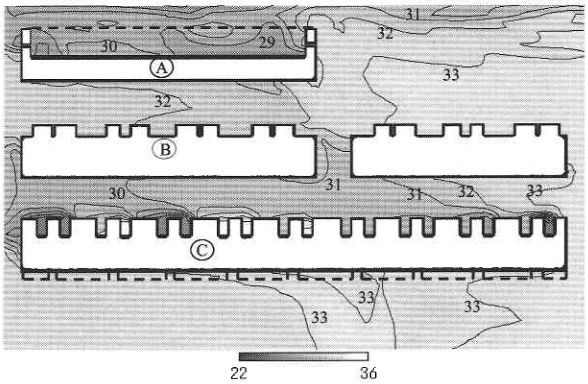


図13　領域A　気温の水平分布（高さ1.5 m）［°C］
（8月15日12時）

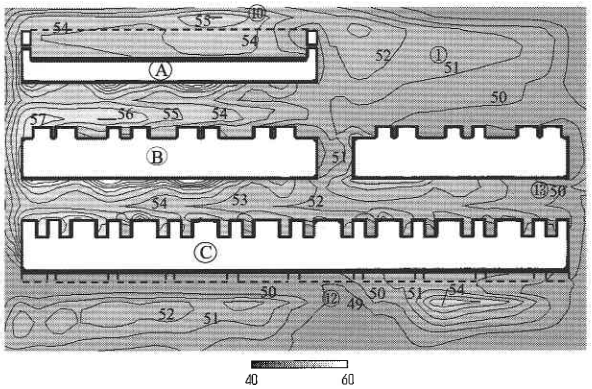


図14　領域A　相対湿度の水平分布（高さ1.5 m）［%］
（8月15日12時）

ト②で1.1 m/s，実測結果はポイント①で1.4 m/s，ポイント②で1.0 m/sとなっており，よく対応した結果となった．集合住宅の中庭と異なり，領域Aにおいては建物配列が風向と平行であるため風通しが良い．しかし，風下側では，風速が低下する傾向となった，これは建物の凸凹部分の風速低減効果，及び風下側で風向と垂直に配置されている9階建住宅の存在により風通しが悪くなるためと考えられる．一方，図11にA棟における点線で示されたピロティー（高さ2.5 m）の部分では，3面の壁により囲まれているため風速が低下するが，C棟におけるピロティー（高さ2.5 m）の部分では風通しが良いため，高風速となった．また，建物の凸凹部分の近傍では風速の低下も見られる．

4.4　気温分布（図13，15）

図13に領域Aにおける高さ1.5 mの気温の水平分布を示す．領域の傾向として，緑地部で29～31°C，コンクリート部で30～32°C，アスファルト部で32～33°Cの値となった．図15に同じ領域の4つ測定点（No. 1，10，12，13）の実測結果を示す．実測結果と比べ，解析結果はよくあった結果となった．建物キャノピーにおける緑地による潜熱の放散の影響で，気温の低下が見られる．なお，点線で示されたA棟のピロティー部分では29～30°Cとなり，比較的低い気温となった．

4.5　相対湿度分布（図14，15）

図14に領域Aにおける高さ1.5 mの相対湿度の水平分布を示す．計算結果では，緑地部で51～52 %，局所的には54～57 %，コンクリート部で50～51 %，アスファルト部で49～50 %程度の値となった．実測結果については，図15に同じ領域の4つ測定点（No. 1，10，12，13）の実測結果を示す．計算結果は実測結果より，3～10 %高い値を示すが，定性的な傾向はとらえている．また，A棟のピロティー部分ではコンクリート被覆にもかかわらず，気温が低いため，相対湿度が増大する．

4.6　MRT[6] 分布（図16，17）

図16に領域Aにおける高さ1.5 mのMRT[6]の水平分布を示す．領域全体の傾向として，草地部で40～45°C，コンクリート部で45～50°C，アスファルト部で47～50°C

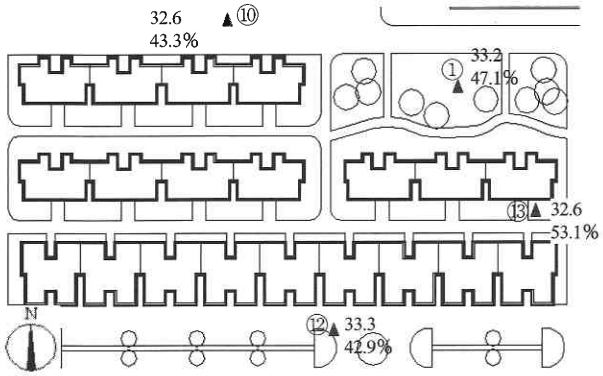


図15　気温と相対湿度の実測結果　（8月15日12時）

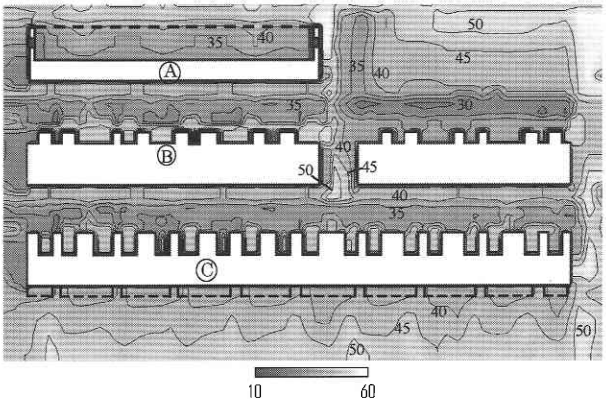


図16　領域A　MRTの水平分布（高さ1.5 m）［°C］
（8月15日12時）

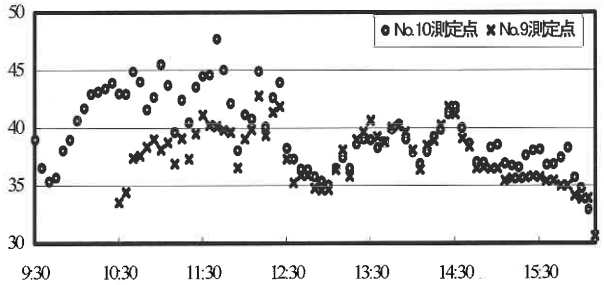


図17　MRTの時間変化（高さ1.5 m）
（8月15日12時）

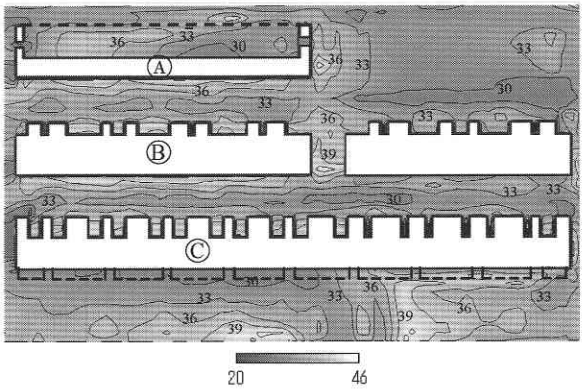


図18　領域A　SET*の水平分布（高さ1.5 m）［°C］
（8月15日12時）

の値となった．点線で囲んだA棟とC棟のピロティー部分では日射の遮蔽によりMRTが低い値となった．図17に測定点9，10におけるMRTの時間変化を示す．このMRTは図3に示す測定点9，10での風速，気温，グローブ温度（それぞれ5分ごとの平均値）を用いて算出した．午前に日陰部となった測定点9では日射の遮蔽により日照部の測定点10と比べ，4～5°C，最大で9°C程度MRTが低いが，12時～15時には測定点9は日照部になるため，MRTの値は測定点10とほぼ同じ値になる．また，15時以後，測定点9では再び日陰部になるため，日照部の測定点10より2°C，最大で3°C程度MRTが低くなった．15時以後日照部と日陰部でのMRTの差は午前より小さい．これはNo. 9測定点で12時～15時にわたり測定点周辺の日射を受けた土壌と壁面の蓄熱の効果が表れていると考えられる．A棟とC棟のピロティー部分では日射の遮蔽によりMRTが低下した．

4.7　SET*[6] 分布（図18）

図18に領域Aにおける高さ1.5 mのSET*[6] の水平分布を示す．領域全体の傾向として，草地部で30～33°C，コンクリート部で33～39°C，アスファルト部で36～39°Cの値となった．領域全般にわたり30°C以上の高いSET*の値となっており，夏季の劣悪な屋外温熱環境を示された．特に，アスファルト部では36～39°Cとなり，比較的高いSET*の値が示された．これはアスファルト面の表面温度が高いために気温とMRTが高くなったことと，樹木による風速の低減ためと考えられる．C棟のピロティー部分では強風域であることと，ピロティーの日射遮蔽によりMRTが低い値となることによりSET*が低くなった．これに対して，A棟のピロティー部分では風速低下，相対湿度増大により，高いSET*の値となった．また，草地部では，比較的低いSET*の値となっており，夏季の屋外温熱環境緩和効果を確認できた．

5. ま　と　め

(1) 深圳市に実在する集合住宅を対象として，夏季の屋外温熱環境の実測と数値解析を行った．

(2) 解析領域において気温が31～33°C，相対湿度が50～56 %，MRTが35～50°Cの値となっており，高温，

多湿，高MRTの屋外温熱環境が示された．

(3) SET*を算出して，夏季の劣悪な屋外温熱環境を示した．緑地の部分では比較的低い値となり，夏季の屋外温熱環境緩和に対して効果があることが確認された．

(4) 本報で示した計算結果は実測結果と全般的に良く対応している．本解析手法は日本だけでなく，中国においても予測評価ツールとしての利用が有効であるということが確認できた．

（2002年12月6日受理）

参　考　文　献

1) 顧，早川，李他，急激な都市化に伴う都市気候の変化，天気，Vol. 48，No. 8，523–534，2001. 8

2) 陳，大岡，原山，加藤，中国・深圳の屋外環境共生空間に関する研究（その1）CFD解析による建物形状・植栽配置の変化が屋外温熱環境改善効果に及ぼす検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，929–930，2002

3) 吉田，村上，持田，大岡，富永，金，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 第529号，77–84，2000. 3

4) 原山，吉田，大岡，村上，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評価手法の開発（第1報），日本建築学会計画系論文集，第556号，99–106，2002. 6

5) 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.

6) 吉田，大岡，持田他，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.