

都市空間情報基盤不足地域における 熱環境評価の試み

一ノ瀬 俊明¹・白木 洋平²・松本 太³・盧 軍⁴・花木 啓祐⁵

¹正会員 独立行政法人国立環境研究所主任研究員 社会環境システム研究領域
(〒 305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:toshiaki@nies.go.jp

²千葉大学大学院博士課程 環境リモートセンシング研究センター
(〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:shiraki@graduate.chiba-u.jp

³独立行政法人国立環境研究所リサーチアシスタント 社会環境システム研究領域
(〒 305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:fprunus@hotmail.com

⁴重慶大学教授 城市建設と環境工程学院
(〒 400045 中国・重慶市沙坪坝区)

E-mail:lujun66@vip.sina.com

⁵正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科都市工学専攻
(〒 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:hanaki@env.t.u-tokyo.ac.jp

近年の成長が著しい中国の巨大都市である重慶において 2004 年 8 月の典型的暑熱問題日に観測された暑熱環境指標関連のデータを解析し、当該都市内の景観の異なる複数地点における体感温熱指標を計算し、その空間的時間的特徴について、周辺都市構造からの検討を行った。その過程において、都市計画 GIS データなどの電子空間情報基盤へのアクセスが不可能であったため、魚眼レンズを用いた天空写真および RayMan Model を用い、観測で求められた体感温熱指標の数値計算による検証を行い、計算値との良好な一致をみた。このことは、精緻な電子空間情報基盤が存在しないフィールドにあっても、簡便な手法によって一定の精度で体感温熱指標が算出できる可能性を示唆する。この手法は、都市空間情報基盤不足地域における熱環境評価にとって有益と考えられる。

Key Words : heat island, thermal environment, fish-eye lens, physiological indicator, GIS data

1. はじめに

一般に都市化が進むと都市の高温域が拡大するとともに、高温域に覆われる時間が長くなり、高温にさらされる時間・人口が増加する。こうした都市の高温化現象（最近ではヒートアイランドという言葉で表現されることが多い）は、都市の住民に著しい不快感をもたらしているのみならず、高温化が住民の健康や、都市の自然生態系にも影響を与えている。では現在、アジアの都市では実際どのような問題が起きているのであろうか。都市

が高温にさらされることによるリスクの最たるものは、熱中症などの健康被害である。例えば上海では熱波の襲来など、猛暑の日に死亡者数が増加している¹⁾。もちろんこのような高温への暴露は、ヒートアイランドだけでなく、熱波など、都市化の影響とは直接関係しない極端な気象現象によっても生じている。IPCC のレポートなどは、地球温暖化によってこのような猛暑の日が増加する可能性を指摘している。中国以外でも、ここ数年インドやパキスタンで熱波による死者が報告されており、2003 年には 1500 人以上に及んでいる。しかし、都市化自身もこうした高温への暴露を底上げする役

割を果たしている²⁾。

近年の成長が著しい重慶は中国の南西部に位置し、「中国3大火炉」の1つとされる夏の暑さで有名な都市である³⁾。また、盆地状の周辺地形と発生源の集中により、大気汚染も深刻となっている。本研究では、中国の巨大都市である重慶において2004年8月の典型的暑熱問題日に観測された暑熱環境指標関連のデータを解析し、当該都市内の景観の異なる複数地点における体感温熱指標を計算し、都市計画への提言を念頭に、その空間的・時間的特徴についての検討を行った。その過程で用いられたRayMan Model⁴⁾は任意の地点において、その地点における放射環境にかかわる範囲の周辺地物（建築物）の形状などを入力することにより、その地点の温熱環境を計算するツールである。一般に中国の都市では、都市計画GISデータなど高解像度の地図情報は保密（機密情報）とされ、アクセスすることが不可能である⁵⁾⁶⁾。つまり、都市内の建物分布に関する電子空間情報基盤へのアクセスが不可能であるため、放射環境を計算するためには、周辺地物（建築物）の形状を簡便な手法で取得する必要がある。

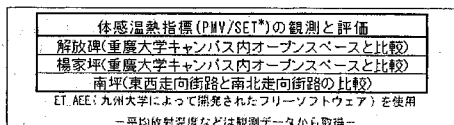
そこで本研究ではRayMan Modelの精度を検証するため、魚眼レンズを用いた天空写真をもとに必要な情報を作成し、RayMan Modelに入力することで得られる体感温熱指標を、観測で求められる体感温熱指標と比較した（図-1）。精緻な電子空間情報基盤が存在しないフィールドにあっても、簡便な手法により一定の精度で体感温熱指標の算出が可能となれば、この手法は都市空間情報基盤不足地域における熱環境評価にとって有益と考えられる。

2. 暑熱環境指標関連のデータ観測と評価

重慶市内に設けた複数の観測地点における観測の概要は以下のとおりである。

解放碑 2004年8月7日：天空率の小さな中心市街地
楊家坪 2004年8月8日：天空率の大きなオープンスペース
南坪 2004年8月9日：相互に近接する東西走向と南北走向のストリートキャニオン

これらの観測地点間の距離はおおよそ15km以内であり、都市スケールよりもひとまわり大きなスケールの気候学的なバックグラウンドは相互に共通しているものと仮定した。観測期間中は連日雲量が少なく降雨もなく、日射の多い晴天となり、典型的な暑熱問題日であったと考えられる。



インプットデータ		アウトプットデータ
気温	湿度	Ts(Surface temperature)
風速	代謝量	Ta(Air temperature)
衣服の熱抵抗	雲量	MRT(Mean Radiant Temperature)
地形	通日(day of year)	PMV(Predicted Mean Vote)
緯度・経度		PET(Physiologically Equivalent Temperature)
障害物の空間配置(建物・樹木)		SET*(Standard Effective Temperature)

RayMan Model (ドイツ・フライブルク大学気象学部の Mitzarakis らにより開発)
を用いた PMV, SET* の算出

図-1 本研究における作業工程

図中の MRT は平均放射温度のことである。

なお、解放碑と楊家坪における観測にあたっては、重慶大学キャンパス内のオープンスペース（緑地の中を通る人工地覆の歩道上）にリファレンスサイト（図-2）を設け、同期させた観測を行っている。



図-2 重慶大学A区(沙坪坝)におけるリファレンスサイト

各観測地点においては一日数回約 1 時間ほど、気温、湿度、風速、平均放射温度を 1 分間隔で計測・記録した。平均放射温度の計測に用いられたアメニティーター AM-101 (京都電子工業製) においては、当該機器内部で気温、黒球温度、風速より算出される平均放射温度が風速との間に正の相関関係を持つことが知られている。これは、黒球に対する対流熱伝達率を定義する結果生じるものである。しかし、後述する観測データの処理過程 (ET_AEE) においては風速をパラメータとして与えて体感温熱指標を算出するため、風速の効果込みの平均放射温度では風速の効果が二重に算出されてしまう。よってそのような風速の影響を除去する必要がある。今回観測されたデータについては、そのほとんどの事例において、風速と記録された平均放射温度との関係が一次回帰直線で近似できたため、風速 0 に対応する平均放射温度をグラフより読み取り、これを平均放射温度として以後の解析に用いている。こうして求められた平均放射温度は、各回の観測 (約 1 時間) の中央の時間帯 (観測自身が 8 時~9 時であれば 8 時半) の値として定義した。結果的に、以降の解析において与えられるすべての評価結果は、各回の観測の中央の時間帯におけるものとなる。また、各回の観測の中央の時間帯には、2 次元放射温度計による周辺地物表面温度の観測および魚眼レンズを接続したデジタルカメラによる天空写真の撮影を行った。

表-1 PMVの値と人体温熱感覚の関係

PMV	sensation	stress	PPD (予想不満率)
-0.5	comfortable	no	10
0.5			
1.5	slightly warm	slight	50
2.5	warm	moderate	90
3.5	hot	strong	100
	very hot	extreme	

体感温熱指標としては、PMV (予測温冷感申告) ⁷⁾ および SET* (標準新有効温度) ⁸⁾ を採用した。これらは従来多くの先行研究⁹⁾で採用されてきた指標であり、実際の人体の温熱感覚に対応しているといわれている (表-1)。気温、湿度、風速、平均放射温度といった物理的要素と、着衣量 (clo値)、活動量 (met値) を示す人間的要素の 6 つの複合効果を評価するものであり、PMV は 0 を中立とした数値で表される。また SET* は、人体の皮膚血流、発汗等の体温調節を考慮したモデルによって算出され、単位は℃である。PMV と SET* は、九州大学によって開発されたフリーソフトウェア ET_AEE を用い、各回の観測における平均値 (気温、湿度、風速)、上述の平均放射温

度、clo値、met値を入力して求められる。なお本研究では clo 値を 0.5 (夏服に相当)、met 値を 1.5 (屋外歩行時に相当) とした。

3. 解放碑：天空率の小さな中心市街地

重慶市内より、天空率の小さな中心市街地の代表として解放碑を選び、2004 年 8 月 7 日に観測を行った。解放碑の周辺は歩行者専用空間となっはいるが、市内で最も商業活動が集積した場所の 1 つであり、緑地が皆無に近く、地表面は人工舗装材料で覆われていて、その表面温度は日中 50℃を越える。また、周辺には高層建築物が密集しており、天空率は小さい。

午前中は天空率が小さく日射が十分に地表面に入射しない解放碑において、輻射温度 (平均放射温度)、体感温熱指標ともに小さくなっている。一方夕方は、天空率が大きく緑地の広がる重慶大学において体感温熱指標が解放碑を下回った。一日のデータの変遷をみると、PMV は輻射温度の影響を強く受け、SET* は輻射温度や風速の影響を受けているように思われる。

また両地点における SET* の傾向には、周辺の地表面構成物質の熱的性質が関係していることも示唆される。重慶大学は、そのほとんどがアスファルト面やコンクリート面で覆われている解放碑周辺とは異なり芝生面が多いため、夕方はさめやすく、表面温度が下がる。一方アスファルト面やコンクリート面が多い解放碑においては、夕方の表面温度は下がりにくい。

以上の考察は、相互の距離がおおよそ 15km 以内であり、1 時間のオーダーでは日照条件 (雲のかかり方など) が両地点の間で共通とみなして行っているが、同時観測における天空写真を比較することでもこのことを可能な限り確認している。

4. 楊家坪：天空率の大きなオープンスペース

重慶市内より、天空率の大きなオープンスペースの代表として楊家坪を選び、2004 年 8 月 8 日に観測を行った。楊家坪の周辺は歩行者専用空間となっはいるが、樹木がわずかに植えられているのみであり、地表面は人工舗装材料で覆われていて、その表面温度は日中 50℃を越える。

気温は重慶大学のほうが若干低めに出てはいるものの、輻射温度 (平均放射温度)、体感温熱指標ともに小さくなっている。一日のデータの変遷をみると、天空率が

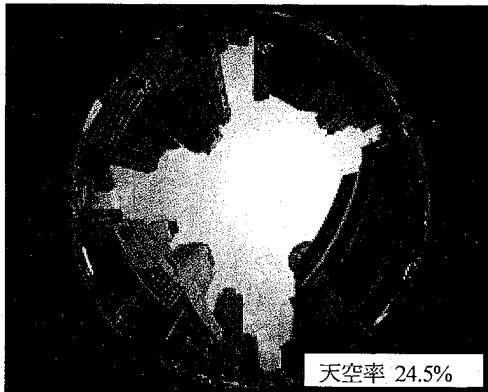


図-3 解放碑における観測地点



図-5 楊家坪における観測地点

日中	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
解放碑	28.2	70.1	0.89	29	1.08	26.2
重慶大学	29.1	68.7	1.29	38	1.96	28.3

17:00-18:02	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
解放碑	34.5	46.9	0.51	34.5	2.92	32.2
重慶大学	34.8	49.3	0.9	33	2.92	30.7

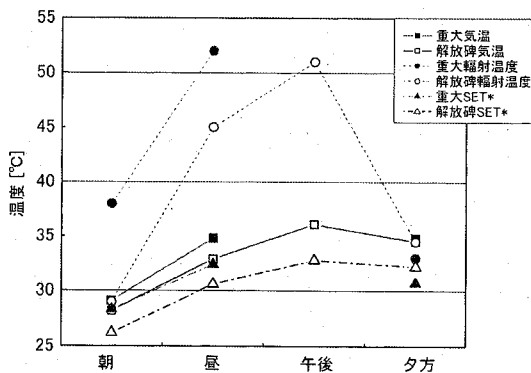


図-4 (表-2) 解放碑における観測値の概要
(2004年8月7日)

図中「午後」は14:00-15:00である。

朝	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
楊家坪	31.7	50.6	1.45	38	2.5	28.4
重慶大学	30.6	58	1.19	41	2.57	29.6

午前	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
楊家坪	35.1	46.6	1.69	40	3.59	30.6
重慶大学	34.7	51	1.72	54	4.71	33.5

午後	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
楊家坪	38.4	36.4	2.21	50	5.27	32.7
重慶大学	38.7	39.5	1.91	58	6.1	35

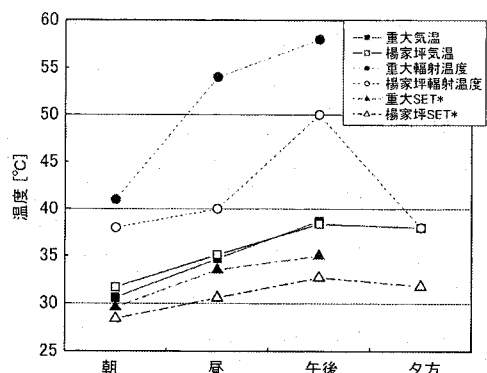


図-6 (表-3) 楊家坪における観測値の概要
(2004年8月8日)

図中「夕方」は17:00-18:00である。

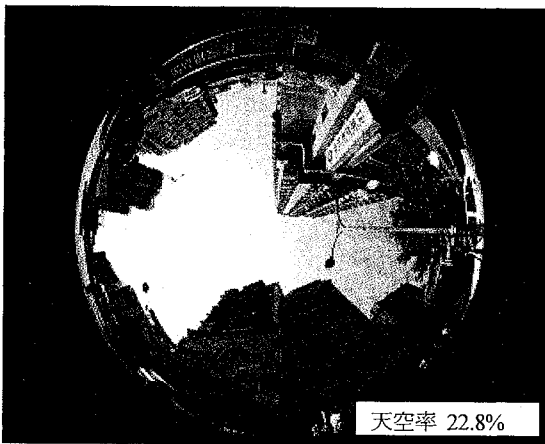
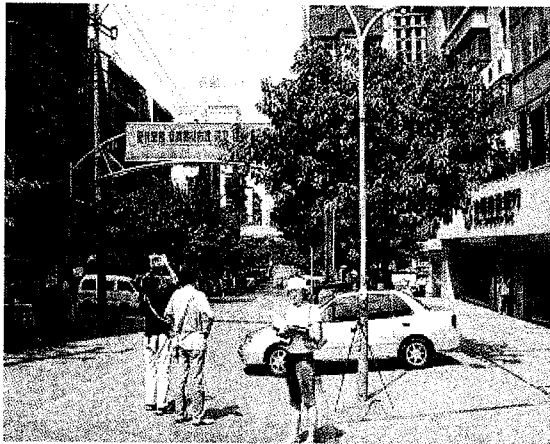


図-7 南坪（江北）における東西走向街路観測地点

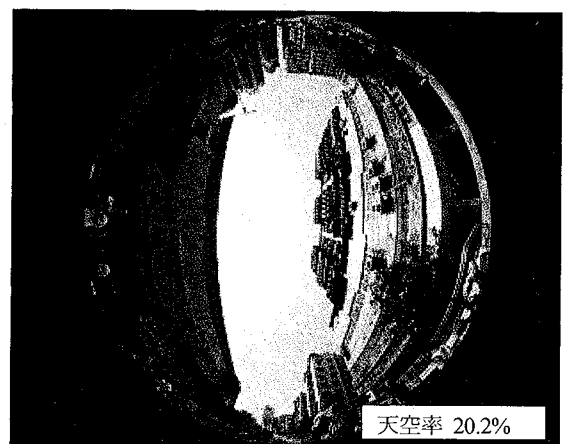


図-8 南坪（江北）における南北走向街路観測地点

ほとんど変わらない両地点ではあるが、PMV は輻射温度の影響を強く受け、SET*は輻射温度や風速の影響を受けているように思われる。

また、午前中には両地点における PMV の値が類似している。この結果は解放碑の事例とは異なっている。このことから天空率の違いが日射量の違いを通じて PMV の値に影響を与えているものと考えられる。

5. 南坪：走向の異なるストリートキャニオンの比較

重慶市内より、相互に近接する東西走向と南北走向のストリートキャニオンの代表として南坪を選び、2004年8月9日に観測を行った。この日は2セットの測器をそれぞれ東西走向と南北走向のストリートキャニオンの中央に設置した。南坪の周辺は歩行者専用空間もしくは極めて交通量の少ない車道となっている。地表面は人工舗装材料で覆われているが、街路樹も植えられている。

9:30-10:49	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
東西	34.3	46.1	2.03	42	3.49	29.8
南北	33.4	53	1.1	35	2.77	30

10:50-12:00	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
東西	36.8	40.6	1.86	42	4.18	31.2
南北	36.4	45.9	1.75	48	4.62	32.9

14:00-15:40	気温(°C)	湿度(%)	風速(m/s)	輻射温度(°C)	PMV	SET*(°C)
東西	40.1	32.9	1.57	43	5.09	32.8
南北	38.5	40.3	0.9	41	4.46	34

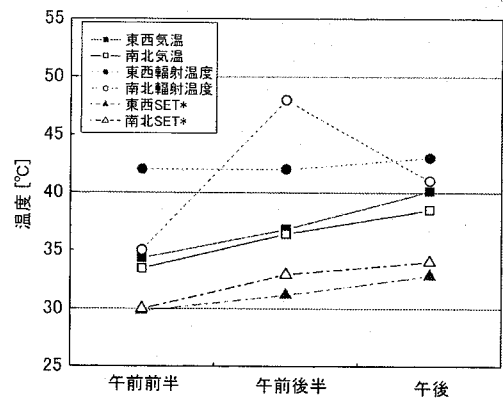


図-9（表-4） 南坪（江北）における観測値の概要

南北走向街路における日射の入射時間帯は正午前後の数時間に限られており、東西走向街路にくらべて気温は終日若干低めに出てはいるものの、日射の入射する時間帯には、輻射温度（平均放射温度）、体感温熱指標ともに大きくなり、大小関係が逆転している。これは、南北走向街路に日射が入射している時間帯において、東西走向街路は建物の影になることが原因であると推測される。

一日のデータの変遷をみると、PMV は輻射温度の影響を強く受け、SET*は輻射温度や風速の影響を受けているように思われる。このためか午前前半と午後には、PMV と SET*との間で大小関係が逆になっている。

6. RayMan Model による体感温熱指標の計算

ドイツ・フライブルク大学気象学科のMatzarakisらにより開発されたRayMan Modelは、都市の地表面形状を構成する建物や樹木といった放射にとっての障害物の空間配置、あるいは雲の影響といった放射環境を評価するものであり、任意の地点において、その地点における放射環境にかかわる範囲の周辺地物（建築物）の形状などを入力することにより、その地点の温熱環境を計算するツールである。つまり、局地レベルの都市計画などを評価することに適しているモデルである。このモデルの主たるアウトプットは、人間のエネルギーバランスモデルを評価することにおいて必須である平均放射温度などである。また、PMV、PET、SET*のような様々な体感温熱指標も計算されるため、都市空間の生気象学的な評価についても可能である⁹⁾。このRayMan Modelは、ドイツ・フライブルクにおけるモデルと実測との比較研究により、日中には誤差が出やすいものの、MRTについては比較的良好に整合することが確認されている¹⁰⁾。しかしSET*やPMVについては未確認のままであった。

よって本研究では、SET*やPMV についても RayMan Model と実測との整合性を評価することとした。まず、現地で撮影された魚眼レンズによる天空写真の画像データについて、建物のあるなしで2値化したものを天空率の情報として使用し、評価対象地点における周辺地物の分布情報については、現地調査（レーザーレンジファインダーによる評価対象地点から周辺の各建物壁面までの距離の測定）および写真判読から作成した。また、気温、湿度、風速については今回の実測により得られたデータを使用し、clo 値、met 値についても今回の解析で仮定した値を用いた。さらに、雲量は魚眼レンズを用いた天空写真より判読して与えた。実測値より計算された体感温熱指標と RayMan Model によって計算された体感温熱指標を比較した結果を図-11 に示す。

これによると、SET*あるいはPMV において実測値と

の間に良好な相関関係が見られる。特に PMV との間には決定係数で0.87 という高い相関が見られ、簡便な手法（RayMan Model への入力情報を簡便な手法で作成すること）により一定の精度で体感温熱指標の算出を行うという本研究の目的において良好な結果が得られたものと考えられる。ただし、重慶大学、解放碑、楊家坪、南坪の観測値を用いたET_AEEによる体感温熱指標の時間変化の地点ごとの差異（定性的な傾向）を RayMan Model でも再現できたかどうかを見極めるためには、今回はデータの絶対数が不足しているものと思われる、この目的のためには、さらに数日分のデータ取得が必要と思われる。

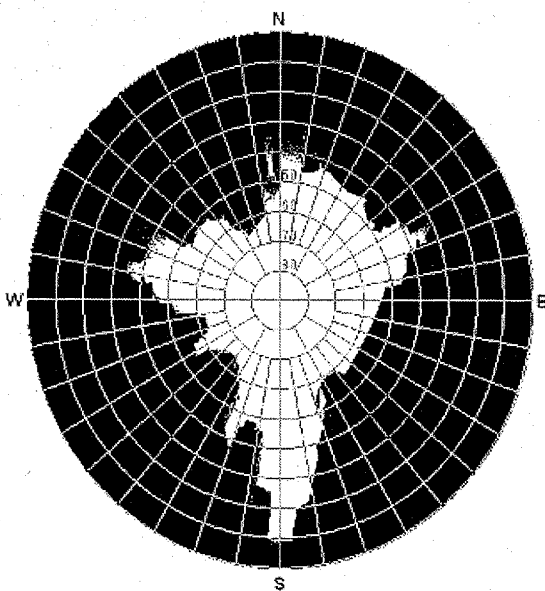


図-10 RayMan Modelに入力する周辺建物情報を作成するための魚眼レンズを用いた天空写真の例（上）と天空率を算出するためのウルフネットへのオーバーレイ（下）

7. 結論

近年の成長が著しい中国の巨大都市である重慶において2004年8月の典型的暑熱問題日に観測された暑熱環境指標関連のデータを解析し、当該都市内の景観の異なる複数地点における体感温熱指標を計算し、その空間的・時間的特徴について、周辺都市構造からの検討を行った。その過程において、都市計画 GIS データなどの電子空間情報基盤へのアクセスが不可能であったため、魚眼レンズを用いた天空写真および RayMan Model を用い、観測で求められた体感温熱指標の数値計算による検証を行い、計算値との良好な一致をみた。このことは、精緻な電子空間情報基盤が存在しないフィールドにあっても、簡便な手法によって一定の精度で体感温熱指標が算出できる可能性を示唆する。この手法は、都市空間情報基盤不足地域における熱環境評価にとって有益と考えられる。

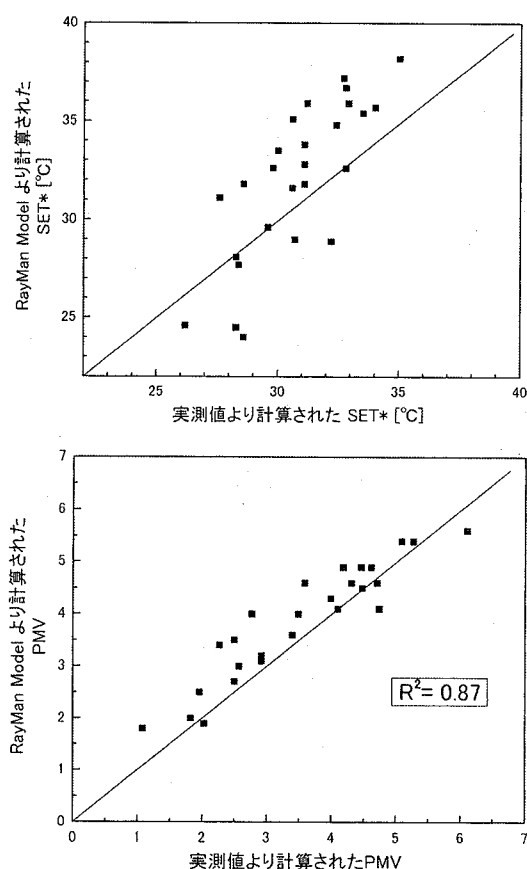


図-11 実測値より計算された体感温熱指標（横軸）と RayMan Model によって計算された体感温熱指標（縦軸）との比較

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A（一般）「建物・街区・都市・地域の各規模にまたがる熱環境解析とアジアの巨大都市への適用」（代表・花木啓祐）の一部である。現地観測にご協力いただいた首都大学東京・泉岳樹博士、独立行政法人建築研究所・張洪賓博士（当時東京大学大学院博士課程）ほか、重慶大学の学生の皆様に感謝いたします。本論文を、中国側カウンターパートとして我々の活動を全面的にサポートして下さるも、プロジェクト終了間近に惜しくも逝去された重慶大学の黄光宇教授に捧げます。

引用文献

- 1) Tan, J., Kalkstein, L.S., Huang, J., Lin, S., Yin, H., and Shao, D.: An operational heat/health warning system in Shanghai, *Int. J. Biometeorol.*, 48, pp.157-162, 2004.
- 2) 一ノ瀬俊明：都市部におけるヒートアイランド，「アジア環境白書 2006/07」，東洋経済新報社，東京，pp.280-283，2006.
- 3) 張洪賓・荒巻俊也・泉岳樹・花木啓祐：高性能気象モデルによる重慶市の熱環境のシミュレーション，環境システム研究論文発表会講演集，30，pp.211-216，2002.
- 4) Matzarakis, A., Rutz F., and Mayer H.: Modeling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan model, *Proc. of PLEA2006*, II-449-II-453, 2006.
- 5) 一ノ瀬俊明・大坪國順・王勤学・張祖陸：中国・済南市における高解像度水資源需要マップ作成の試み，地球環境シンポジウム講演論文集，13，pp.329-334，2005.
- 6) 一ノ瀬俊明・大坪國順・王勤学・張祖陸・衣笠聡史：黄河流域における地下水利用の現状把握と将来予測手法の開発，環境システム研究論文発表会講演集，32，pp.551-556，2004.
- 7) Fanger, P.O.: *Thermal comfort*, New York, McGraw-Hill, 1972.
- 8) Gagge, A.P. et al.: A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, 92-2B, pp.709-731, 1986.
- 9) 久保田孝幸・花木啓祐・一ノ瀬俊明・小宮英孝・神島奈央子：微気候からみた街区計画の評価に関する研究，環境システム研究，24，pp.141-148，1996.
- 10) Matzarakis, A., and Mayer H.: Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas, *11th Seminar on Environmental Protection "Environment and Health"*, pp.155-166, 2000.

ATTEMPT TO EVALUATE THERMAL ENVIRONMENT IN THE AREA WITH A LACK OF URBAN SPATIAL INFORMATION DATABASE

Toshiaki ICHINOSE, Yohei SHIRAKI, Futoshi MATSUMOTO, Jun LU
and Keisuke HANAKI

In this study, the authors analyzed the data of thermal environmental indicators observed in typical thermal stress days in Chongqing City, an outstandingly growing megalopolis in China. And they calculated the physiological thermal indicators at several observation points with various landscapes in the city, and discussed on these temporal and spatial features from the viewpoint of urban structure around them. In the process, because it was impossible to access to electronic spatial information database such as urban planning GIS data and so on, the physiological thermal indicators calculated using observation results were compared to results of numerical simulation using the sky view photograph by fish-eye lens and RayMan Model. Then the both results agreed well. This indicates the physiological thermal indicators have some provability to be calculated with some accuracy by simple method, even if in the field without detail electronic spatial information database. It is considered that this method is useful for evaluation of thermal environment in the area with a lack of urban spatial information database.