

地域気象モデルによる屋外体感温度予報

NUMERICAL PREDICTION OF OUTDOOR THERMAL INDEX USING MESO-SCALE METEOROLOGICAL MODEL

Pek Cheng Wee¹・神田学²・森脇亮³
Pek Cheng Wee, Manabu Kanda and Ryo Moriwaki

¹学生員 東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

This study demonstrates the numerical prediction of thermal sensation index for outdoor environment (SET*OUT) using Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). SET*OUT, one of the major thermal sensation index, requires data sets of wind velocity, absolute humidity, air temperature and each component of short wave and long wave radiation in both upward and downward directions. Temporal and spatial variation of SET*OUT over the Kanto Region on August 10 1998 has been presented and discussed. The thermal sensation index for indoor environment (SET*IN) is referred to as a comparison. It is found that the variation of SET*OUT is strongly influenced by mean radiation temperature and sea breeze penetration. The mean radiation temperature, and consequently SET*OUT, have distinctive double peaks in the morning and the afternoon due to the shape factor of cylindrical human body for direct solar radiation. The first peak of SET*OUT in the morning roughly corresponds to the arrival of sea breeze front, and the value is generally larger than that of the second peak in the afternoon. Such a behavior of SET*OUT can be accounted for by the fact that the sea breeze increases wind velocity and activate the heat transfer from human body. SET*IN is similar to but slightly ($0.5\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) larger than air temperature, which is due to the high humidity condition in Tokyo area.

Key Words : Thermal sensation index, SET*OUT, meso-scale model

1. はじめに

著者らは、地域気象モデル (RAMS) を用いて、気象庁が通常の業務範囲で行う気象予報よりも細かいスケール (数km~数百m) における生活環境情報の数値予測可能性について検討を行ってきた。その目的は、都市インフラ (河川・緑地・道路) がローカルな大気環境に及ぼす影響 (環八雲の数値シミュレーション¹⁾、都市河川の風道効果²⁾、神宮の大気保全機能³⁾、花粉の時空間動態⁴⁾) を明らかにすることであった。本研究では大都市に於ける重要な生活環境情報の一つである「屋外体感温度」情報を地域気象モデルに使う手法とその適用例について述べる。

屋内空間を前提とした体感温度情報は日本のマスコミでもお目にかかるようになってきたが、気象予報とカップリングした屋外環境用の体感温度予報は世界的にも実現していない。屋外に於ける体感温度指標の基礎原理については多くの研究例があり、それらはいずれも体感温度予報に応用可能である。問

題なのは、体感温度算出に必要な気象情報、とりわけ放射成分 (短波・長波の上向き下向き) が計測されている気象観測点が極めて少ない点にある。言うまでもなく、地域気象モデルを用いる利点は観測では得られないこれらの詳細な気象情報が得られることにある。

ドイツ気象局などでは、10年~20年の気象観測データのアンサンブル平均値とそれらの空間内挿値を基に、体感温度図なるものを作成し、公表している⁵⁾。その際、空間内挿は、標高・土地利用などの説明変数から経験式によって行われる。同様の試みは気象官署の実測データを基に九州においても試みられている⁶⁾。先述したとおり放射データなどは空間的に疎らなため、定量的にはかなり疑問が残る。一方、建築分野では、建物周りの気流の詳細な計算結果より、シノプティックな場の影響を考慮しない極めて局所的な屋外体感温度予報を行う試みもなされている⁷⁾。本研究では、メソスケールレベルを対象に数値予報気象値を用いて屋外体感温度予報を行う手法について述べる。

表—1 人体熱収支に基づく各種屋外体感温度指標 (Kanda et al, 2000 より改変引用⁸⁾)

指標	提案者	物理次元	特徴
SET*	Gagge and Nishi, 1976 ¹⁰⁾	℃	放射の影響やや過小評価するも概ね良、アメリカ標準
PET	Hoppe et al., 1993 ¹¹⁾	℃	湿度の影響をかなり過小評価、ドイツ標準
VTL	Kanda et al., 1996 ⁹⁾	W/m ²	実際の体感温度と適合性良いが、温度次元でない

2. 地域気象モデルによる屋外体感温度の算出

屋外体感温度指標はいくつか提案されている(表—1)⁸⁾。人工気象室における実験結果によれば、SET*およびVTLが実際の体感温度との適合性が良い⁹⁾。いずれの指標も人体の熱収支に基礎を置いている点では原理的に同じである。以下、地域気象モデルによる人体熱収支解析手法について述べる。

表—2 人体に関する物理パラメーター

円柱高さ (身長)	1.65 (m)
円柱半径 (胴半径)	0.117 (m)
代謝率	1.5 (met)
衣服のクロー値	0.43 (clo)
衣服の射出率	1.0
衣服のアルベド	0.3

(1) 人体形状と放射交換過程の扱い

大気と人体の放射交換過程を考える上で人体形状は円柱形で精度良く近似できることが指摘されている。そこで人体形状を表—2のような円柱と仮定し、体は衣服で全て覆われて(露出部なし)いるものとする。また、人体はメソスケールモデルの1格子の地表面上に佇んでいるものとする。建物・樹木などによるローカルな影響は考えない。この時、人体が周辺から受け取る単位表面積当たりの放射量(R)は以下の式(1)で表せる。右辺第一項から順に、天空からの直達短波($S_{dir} \downarrow$)の寄与、天空からの散乱短波($S_{diff} \downarrow$)の寄与、地面での反射日射($S \uparrow$)の寄与、天空からの長波($L \downarrow$)、地面からの長波($L \uparrow$)の寄与、をそれぞれ表す。

$$R = \gamma_{dir}(1 - \alpha_{clt})S_{dir} \downarrow + \gamma_{diff}(1 - \alpha_{clt})S_{diff} \downarrow + \gamma_{ref}S \uparrow + \varepsilon_{clt}\gamma_{sky}L \downarrow + \varepsilon_{clt}\gamma_{grd}L \uparrow \quad (1)$$

ここで、 α_{clt} 、 ε_{clt} は衣服面におけるアルベドと射出率、 γ はそれぞれの放射成分の人体に対する形態係数を表す。天空からの直達短波放射だけは指向性があるので、人体に対する形態係数は、人体形状(身長 h と胴回り半径 r 、いずれも円柱形で近似)と太陽高度(δ)に依存し、理論的に式(2)のように表せる。他の放射成分は無指向性なので、0.5で一定となる。

$$\gamma_{dir} = \frac{2(h/r)\cot\delta/\pi + 1}{2(h/r) + 2} \quad (2)$$

$$\gamma_{diff} = \gamma_{ref} = \gamma_{sky} = \gamma_{grd} = 0.5 \quad (3)$$

いくつかの放射成分の影響をまとめて温度の次元で表すと考察上便利である。そこで、人体が受け取る放射量(1)左辺)と同じ放射量を与える一様な放射温度空間を仮定する。この温度を平均放射温度(T_{mrt})と呼び以下のように定義される。

$$T_{mrt} = (R / \varepsilon_{clt}\sigma)^{1/4} \quad (4)$$

ここで σ はステファンボルツマン定数を表す。

さて、メソスケールモデルでは式(1)の各放射成分の内、直達短波光と散乱短波光を分離して計算することが出来ず、それらの和である短波放射($S \downarrow$)のみを予報する。そこで $S \downarrow$ の予報値から散乱比を求めるために、ここでは宇田川・木村の診断式(1978)¹²⁾を用いた。

$$S_{dir} \downarrow = S \downarrow - S_{diff} \downarrow$$

$$S_{diff} \downarrow = -C_1 S_0 \sin \delta + C_2 S \downarrow$$

$$(S \downarrow > S_{cr} \downarrow)$$

$$S_{diff} \downarrow = (C_3 + C_4 \sin \delta^{-1} + C_5 \sin \delta^{-2}) S \downarrow^3 S_0^{-2}$$

$$(S \downarrow < S_{cr} \downarrow)$$

$$S_{cr} = (C_6 \sin \delta + C_7 \sin \delta^2 + C_8 \sin \delta^3) S_0$$

ここで、 $C_1 \sim C_8$ は定数で、それぞれ -0.43, 1.43, 0.24, -1.26, 2.28, 0.516, 0.3, 0.008。 S_0 は太陽定数を表す。

(2) 人体の熱収支

皮膚表面から衣服を介しての大気への顕熱(H)・潜熱(LE)の輸送は、地表面熱収支と同様に以下のように与えられる。

$$H = C_p \rho U C_h (T_s - T_a) \quad (6)$$

$$LE = i \rho U C_h \beta (q_s - q_a) \quad (7)$$

C_p は定圧比熱、 ρ は空気密度、 i は水蒸気潜熱、 U は風速、 C_h は皮膚-衣服-大気の合成熱輸送バルク係数、 T_s は皮膚温度、 T_a は空気温度、 q_s は皮膚温度での飽和比湿、 q_a は大気比湿、 β は皮膚の湿り度を、それぞれ表す。 C_h は風速と衣服抵抗を表すクロー値(I_c)を用いて以下のように表せる⁹⁾。

$$C_h = \frac{1}{C_1 U^{0.469} + C_2 I_c C_p \rho U} \quad (8)$$

C_1 C_2 は定数でそれぞれ13.8, 0.015

表-3 計算条件

	水平格子数	水平解像度	鉛直格子数	時間解像度
Grid 1	110 x 90	10 km	27	60 sec
Grid 2	82 x 82	2.5 km	32	30 sec

発汗を左右する皮膚湿り度 (β) を決定する生理モデルは、SET*, VTLなどモデルによりその取り扱いがやや異なるが、熱収支式と皮膚温度から決定されるので、実質的な未知変数は皮膚温度と考えて差し支えない。最終的に人体の熱収支式(6)より皮膚表面温度 (T_s) が与えられる。

$$R + M = H + LE - \varepsilon_{clt} \sigma T_{clt}^4 \quad (9)$$

ここで、 T_{clt} は衣服面温度を表し、顕熱の連続式⁹⁾ (式略) と皮膚温度より求められる。 M は代謝量。なお、呼吸に伴う熱・水蒸気交換など熱収支の微小項については割愛した (計算では考慮されている)。

(3) 屋外体感温度と屋内体感温度

本研究では、屋外体感温度指標として温度の次元を持ち、実際の体感温度と適合性の良いSET*を用いることにする。SET*は以下のように計算される。まず、屋外気象条件下で式(9)の人体熱収支を計算し人体の皮膚温度と皮膚の湿り度を求める。次にその2つの生理変数を固定し、標準状態 (相対湿度50%、風速0.15(m/s)、衣服=0.6clo、代謝率=100 W/m²、平均放射温度=気温) に置き換えた場合いくら気温に相当するか、改めて人体熱収支式(9)から気温を再計算する。この標準状態に置き換えられた気温がSET*である。以下慣例にならって¹³⁾ 屋外環境用のSET*をSET*OUT、屋内用のSET*をSET*INと呼ぶことにする。両者の算出原理は上述したとおり全く同じだが、SET*OUTでは屋外の気象要素が使われるのに対し、SET*INの算出においては風速が0.15(m/s)、平均放射温度が屋外気温と同じと仮定される。その他の条件は全て同じである。

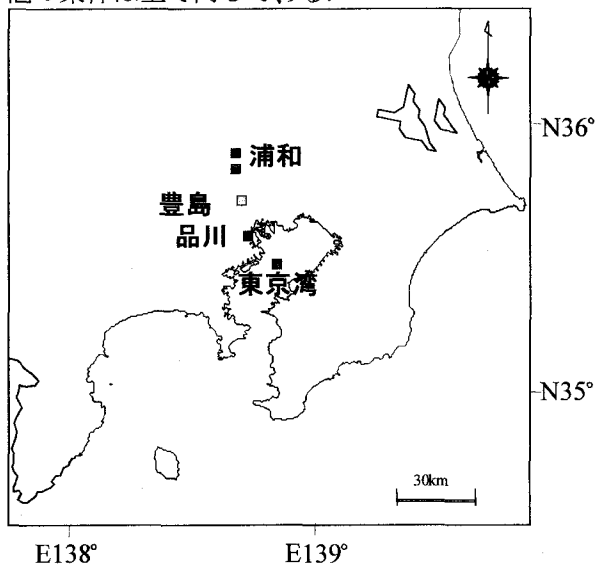


図1 解析領域 (Grid2)

表-4 計算モデルの概要

基礎方程式	非静水圧・圧縮
座標系	σ 座標
雲水	過飽和分のみ雲粒
地表面過程	神田ほか (2000) ¹⁾ 土地利用15種分類
人工排熱	神田ほか(2000) ¹⁾ 1km解像度、時間変化有り
境界条件	6時間毎にECMWF客観解析値の4次元データ同化
乱流モデル	Mellor and Yamada 2.5

3. 関東地域への適用と考察

(1) 計算概要

ここでは、1999年8月10日におけるメソスケール気象シミュレーションを例に屋外体感温度予報の適用例を紹介することにする。この日は、著者らが東京湾上空での大気環境計測を行い、風の場の特徴を詳細に把握している^{14), 15)}、ことより選定した。

モデルはPeilke et al. (1992)によるRAMS (Regional Atmospheric Modeling System) の地表面過程に改良を加えてのものであり、計算手法は環八雲のシミュレーションを行った場合¹⁾ とほぼ同じである。モデルの概要を表-3に示す。非静水圧・圧縮の基礎方程式が解かれる。計算領域(Grid 2)を図-1に示す。また、それらの計算条件を表-4に示す。Grid 1の境界条件としてECMWF (ヨーロッパ中期気候予報センター) の全球客観解析データが6時間毎にデータ同化されている。Grid 2はGrid 1と双方向にネスティングされている。

なお、メソスケールモデルから計算される気象値はモニン-オブコフ相似則を用いて全て地上1.5mの値に変換され、屋外体感温度の算出に用いられる。

(2) 気象場の時空間特性

まず、海陸風循環に伴う気象場の特徴を整理しておこう。図-2には、異なる2時刻に於ける風速場を観測とモデル計算の両方について示した。モデル計算結果には積雲の生成された領域も示している。太平洋からの南よりの一般風に東京湾からの小規模海風が重なり合う夏期晴天日の風系パターンの典型的特徴^{14), 15)}を示している。東京湾海風は発散風系となり、時間と共に内陸へと進入していき、その前線にはリングクラウドと呼ばれる特徴的な積雲列が形成される。リングクラウドは南風があるしきい値を越えると環八雲と房総積雲列を形成することがわかっているが¹⁾、この日は一般風が弱く午後までリング

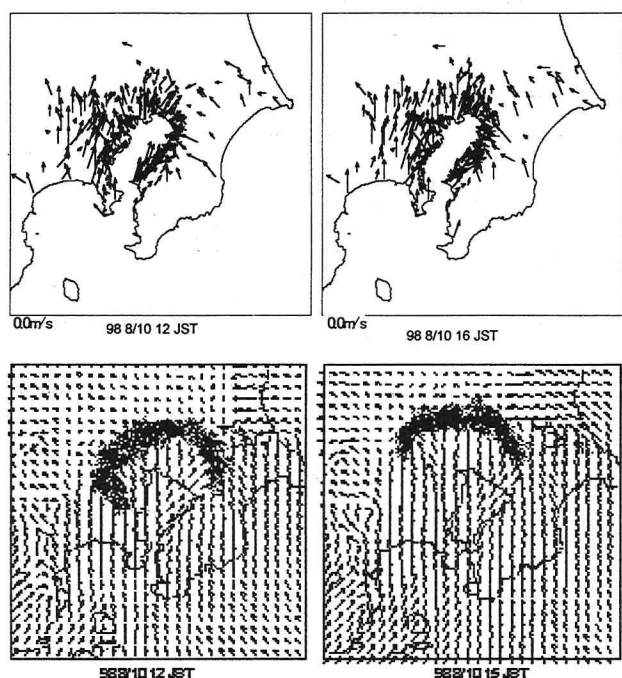


図 2 12:00, 15:00における風速場計算:ハッチングは雲領域を表す(上図がAMEDAS, 下図が計算結果)

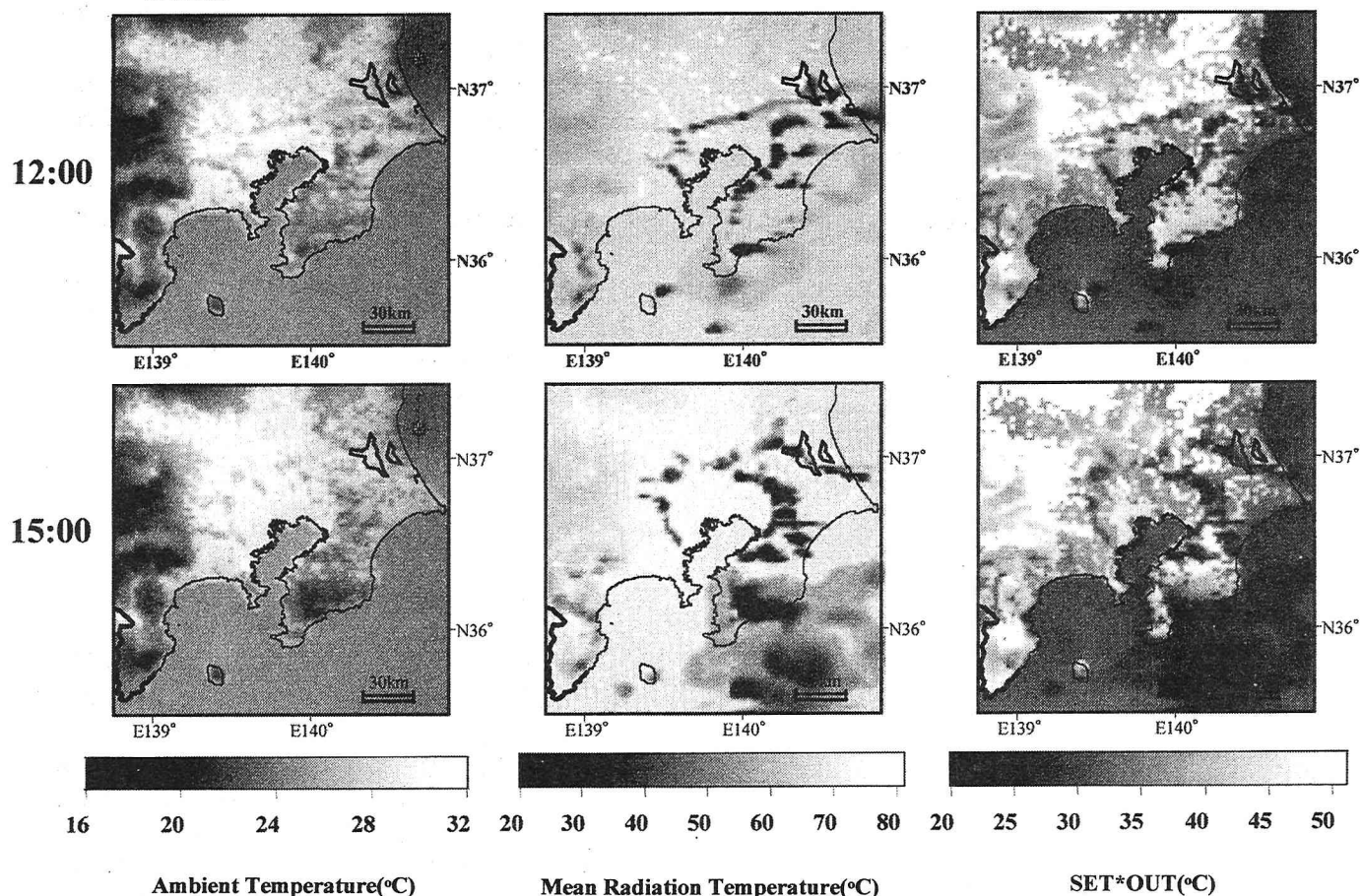


図 3 屋外体感温度(右図)・平均放射温度(中央図)・気温の時空間(左図)分布, 12:00(上図), 15:00(下図)

クラウドが維持されている。計算結果は、観測の風系パターンを良く再現し、また、リングクラウドの存在も著者らの観測^{14), 15)}によって確認されている。

(3) 屋外体感温度の時空間特性

屋外体感温度・平均放射温度・気温の空間分布を12:00, 15:00について図-3に示す。屋外体感温度は、東京湾を取り囲むように海風の進入域内で低く、未進入域であるその外側で高くなっていることが明確である。その境界となる海風前線部では、リングクラウドによる日射遮蔽効果によって屋外体感温度が最も低下している。気温にも海風進入前後で同様の傾向が見られるが、そのコントラストは屋外体感温度ほど明確ではない。平均放射温度については、海風前線部で日射遮蔽による温度低下が見られるが、海風進入部と未進入部で顕著な違いは見られない。これらの結果より、屋外体感温度が海風の進入と積雲の存在に大きく影響されていることがわかる。

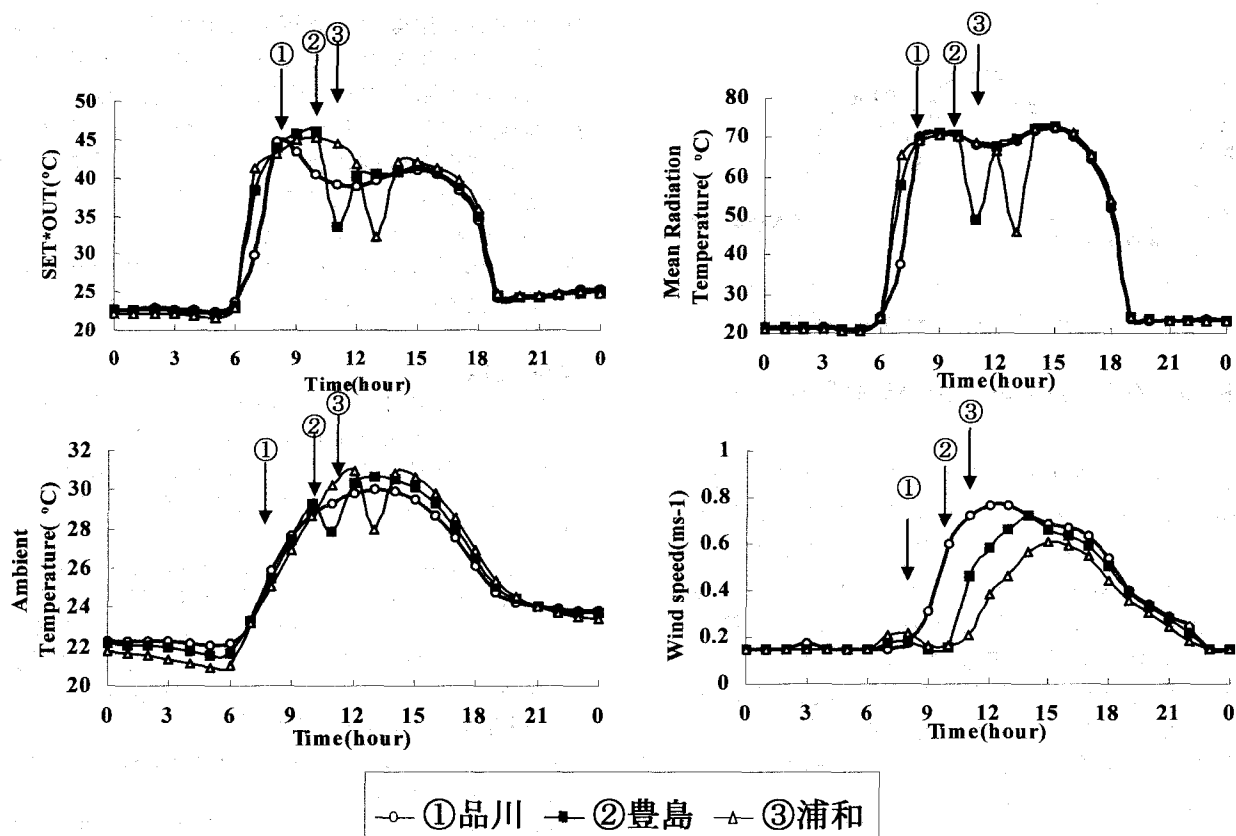


図 4 屋外体感温度(左上図)・平均放射温度(右上図)・気温(左下図)・風速(右下図)の時系列
①、②、③はそれぞれ海風の到達時間を表す

(4) 海風進入の影響

海風の進入が屋外体感温度に及ぼす影響をより詳しく調べるため、海岸からの距離が異なる3都市(図-1参照)を取り上げて、屋外体感温度、平均放射温度、気温、風速、の時系列を比較してみたのが図-4である。図中には神田ほか(1998)の方法¹⁶⁾で風向・風速・気温データから判定された海風進入時刻が矢印で示されている。屋外体感温度の時間変化の特徴として以下の点が上げられる。(a) 日の出と共に急激に立ち上がり、午前中9:00~12:00にピークを示す、(b) ピークの時間は海風の進入時間に対応しており、海岸からの距離に依存して遅くなる、(c) 午後3:00頃前後に再び緩やかなセカンドピークを示すが午前中のピークよりも小さく、また体感温度の時間的変化そのものも小さい。他の気象情報からこの屋外体感温度の挙動を説明してみよう。

平均放射温度は海岸の距離にほとんど依存せず、9:00と15:00頃に特徴的な二つのピークを示している。ダブルピークは太陽放射に対する人体形態に強く依存したもので、縦長な人体に対して南中時よりもその前後の時間帯に直達光の入射が最大となることに対応している。また、海風フロントの通過時に積雲の影響により平均放射温度のスパイク状の低下が見られる。体感温度が午前と午後2つのピークを持つこと、および海風フロントの通過時に局所的に体感温度が低下すること、の2つの特徴は上

述した平均放射場を反映していると考えられる。

気温場の特徴として従来から指摘されているように、海風進入により気温の上昇率が下がるため、内陸ほど午後の最高気温が高くなる傾向にある。このことは、午後の体感温度が内陸ほど高いことに対応している。しかしながら、これだけでは体感温度の午前午後の違いを説明できない。

海風進入の影響は風速場により顕著に現れている。海岸からの距離に応じて海風が順次到達すると、それと共に風速が次第に強まる傾向が明確に示されている。午後は海風の影響で3地点いずれも午前と比べて風速が強い。これらのことは体感温度の挙動と良く一致している。以上より、海風進入後、体感温度が低減を始め、かつ午後は午前よりも体感温度が低いという事実は、海風に伴う地表近傍風速の増加、それにより人体からの顕熱・潜熱交換が促進された結果を強く反映していると言える。

(5) 土地利用の影響

隣近するメッシュポイントで土地利用が異なる2地点(図-1の浦和)の屋外体感温度の時系列データを図-5に比較した。都市と畑では体感温度に1~2度の差があるものの、それほど大きな差ではない。メソスケールモデルで予報される地表面温度や気温・風速はいわゆる空気力学的に定義される物理量であり、日向・日陰・地物の形状など粗度内におけ

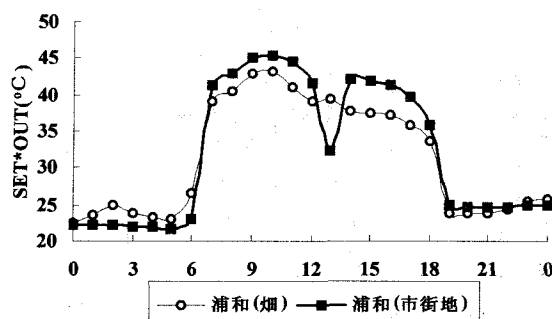


図 5 都市と畑における体感温度の時系列

る諸々のローカルな影響を均した代表温度である。実際の日向のアスファルト面では50～60度の高温になり、その熱輻射($L \uparrow$)は体感温度に支配的であることが緑地・都市河川敷などにおける実測で指摘されている¹⁷⁾。日陰に入れば、数mしか離れていなくても数10度体感温度は変わり得る¹⁷⁾。メソスケールモデルで与えられる屋外体感温度はあくまで地域平均的な値であり、粗度内のポイント計測と直接対比できるようなローカルな情報を有していないことに注意しなくてはならない。

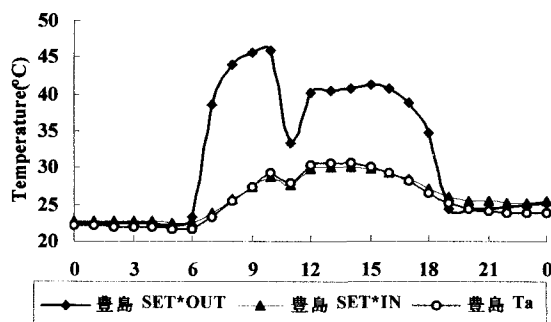


図 6 豊島の屋外・内体感温度・気温の時系列

(6) 屋内体感温度との違い

屋内体感温度は、放射と風速の影響を含んでいないため、その挙動は屋外体感温度と大きく異なったものとなる。図-6には図-2点に於ける屋外体感温度、屋内体感温度、気温の時系列を比較して示した。屋内体感温度は気温と非常に近いものとなっている。図では判別しにくい、屋内体感温度は昼夜とも気温より0.5～1℃程度高くなっている。これは湿度の影響を反映していると考えられるが、屋外体感温度と比べて著しく低いことを考えれば、放射や風速の影響に比べると、湿度の影響はそれほど大きくないと言える。

4 結論

メソスケールモデルを用いた屋外体感温度予報を夏の関東域へ適用し、以下の結論が得られた。

(1) 屋外体感温度は、海風の進入と平均放射場の影響を強くうけている。

- (2) 平均放射温度は、直達光に対する人体の形態係数により午前と午後に2つのピークを持つ。この傾向は屋外体感温度にも反映される。
- (3) 海風の進入により地上風速が増加し、人体からの熱交換が促進されることにより、屋外体感温度は午前中に最大値を示し、午後のピークは午前のそれよりも低くなる。
- (4) 屋内体感温度との比較より、湿度の影響は風速・放射に比べて小さいことが示された。

参考文献

- 1) 神田学, 井上裕史, 鶴野伊津志: 環八雲の数値シミュレーション、天気, Vol.47, No.2, 83-96, 2000.
- 2) 福田忠弘, 鹿島正彦, 鈴木謙, 神田学: 海風前線マップの作成による都市河川の海風効果の検証; 水工学論文集, Vol.42, 49-54, 1998.
- 3) 神田学, 森脇亮, 横山仁: 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(2) 森林環境気象モデルによるシミュレーション; 天気, Vol.44, 723-733, 1997.
- 4) 張翔云, 神田学, 川島茂人, 高橋裕一: 花粉の空間動態の数値シミュレーション; 水文・水資源学会1999年研究発表会要旨集134-135, 1999.
- 5) Jendritzky, G.: Human biometeorology, Experientia Vol.49, 733-740, 1993.
- 6) Akasaka, H. and Miki, M.: A study on drawing climatic maps related to human thermal sensation, Energy and Buildings, Vol.15-16, 1011-1023, 1991.
- 7) 例えば、中村泰人, 平岡久司: 2次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.369, 12-21, 1985.
- 8) Kanda, M. et al.: Sensitivity analysis of outdoor thermal sensation indices, 3rd Japanese-German urban climate meeting, 2000 (in Print).
- 9) 神田学, 柳本記一, 宇梶正明: 新しい屋外用温熱感指標の提案; 土木学会論文集No.545/II-36, 1-10, 1996.
- 10) Gagge, A.P., et al.: The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, ASHRAE, Transaction, 234-247, 1976.
- 11) Hoppe, P.R.: Heat balance modeling, Experientia, 49, 1993.
- 12) 宇田川光弘・木村健一: 水平面全日射観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 83-90, 1983.
- 13) Dear, R.D. and Pickup, J.: An outdoor thermal environment index (OUT-SET*), Proc. 15th Int. Congress of Biometeorology, ICB10.2, 1999.
- 14) 森脇亮・石井宏明・神田学: 東京湾上の大気構造に関する集中観測, 水工学文集 第44巻 [2000] 79-84.
- 15) 森脇亮・石井宏明・神田学: 東京湾上空大気の現地観測と数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2000, 221-222.
- 16) 神田学, 西村修, 福田忠弘, 竹内邦良, 清水源二: 河道に沿った海陸風の侵入挙動; 水工学論文集, 第40巻, 243-248 (1996)
- 17) 神田学, 木内豪, 小林裕明: 新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価; 水工学論文集, 第40巻, 237-242 (1996)

(2000. 9. 30)

(2000. 10. 2受付)