

数値モデルによる熊本市の熱環境解析

A NUMERICAL MODEL ANALYSIS OF THE URBAN CLIMATE : A CASE OF KUMAMOTO CITY

上野賢仁 *

井村秀文 **

Takahito UENO* and Hudefumi IMURA**

ABSTRACT ; The urban climate in Kumamoto City was analyzed by numerical simulation. The three-dimensional turbulence closure model by Mellor and Yamada was applied together with the calculation procedures used in the previous study of the authors (Ohama et al, 1995) . Model calculations were carried out for the spatial temperature distribution and the results were compared with the residents' perception about their thermal environmental conditions which were studied by questionnaire surveys (Ueno et al, 1997) . The effect of hypothetical removal of Mt. Kinpo which is located between the sea and the center of Kumamoto City is analyzed to evaluate the role of land topography in Kumamoto City. The effects of changes in surface parameters such as moisture availability were also analyzed to examine the possible increase of evaporation due to the heightening green-covered area ratio. The simulation results suggest that the role of Mt. Kinpo is not significant while the greenery is an important determining factor of the urban climate in Kumamoto City.

KEYWORDS ; urban climate, heat island, numerical simulation, remote sensing, land use pattern

1. はじめに

都市熱環境を解析・評価するとき、対象とする都市域の温度や湿度の空間・時間的变化は非常に重要な情報である。こうした情報を得るには、気象観測等による基礎データの収集を積み重ねていく必要がある。しかし、十分な観測点数を確保するにはコストや労力の面で限界もある。一方、数値モデルによる計算結果は、都市域の物理的なパラメータの設定や再現精度の問題はあるが、都市域の熱環境特性を空間・時間的に解析する上で非常に有用な情報に成り得ると考えられる。

3次元数値モデルを用いた都市熱環境解析としては、例えば、藤野ら¹⁾や下堂園ら²⁾などによる関東地方の解析や岡村ら³⁾による中部地方の解析等がある。また、九州地方の解析例としては福岡市を対象とした大濱ら⁴⁾による解析がある。本研究では、熊本市をケーススタディー対象として取り上げ、大濱らの解析手法により同市の熱環境について考察した。熊本市は内陸に位置しており特に夏季は非常に暑い。また、湿度も高く蒸し暑い。こうした特徴について、現実の地形・被覆状態をもとに計算した結果と、仮定した条件での計算結果をもとに考察した。筆者らは、昨年、熊本市の街区規模(300m×300m)の5つの領域を対象として熱環境に関する住民アンケート調査を実施し、同市の熱環境特性について考察している⁵⁾が、本研究ではこの調査結果と現状の計算結果とを比較・考察した。次に、仮定として海と市街地を隔てている山(金峰山)が無い場合と、緑地が増加した場合(地表面の蒸発能を変化させた)場合を取り上げ、現状の計算結果と比較・考察した。

2. 解析内容

解析対象範囲は、図1に示すように左上の始点が東経130°30'、北緯32°55'、横35km、縦25kmの範囲である。図中A～Eは昨年のアンケート調査対象地点である。この範囲についてLANDSATデータから被覆分類図を作成した。これを図2に示す。市北西部には金峰山が位置し緑地が広がっている。また、南東部の上益城

* 熊本工業大学土木工学科 Department of Civil Engineering, Kumamoto Institute of Technology

** 九州大学環境システム科学研究センター Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

郡に緑地がある。分類結果を見ると比較的低い緑地（森林 2）が多いことがわかる。また、市の南部と玉名市に水田が多く分布している。なお、北部の裸地はほとんどがビニールハウスと思われる。

計算は、LANDSAT データが得られた 1988 年 4 月 15 日を想定して行った。熊本の暑さを検討するためには夏の条件で計算するのが望ましいが、今回は春の条件で計算している。これは使用した衛星データの観測日に合わせるためと、季節的な気温などの違いは多少あると思われるが地形や被覆条件による気温分布パターンは春でもある程度検討できると判断したためである。地表面パラメータは、大濱ら⁴⁾が用いた値とほぼ同じであるが輝度温度との対応を見て若干調整した。

計算結果は、LANDSAT 輝度温度と比較・検証した後、昨年実施したアンケート調査結果と比較した。次に、熊本市の地形効果を見るために、海と市街地の間に位置する金峰山の標高を変更し、現状の計算結果と比較した。また、緑地（蒸発能）を増やした場合を想定し、現状と比較した。

3. 解析結果

3.1 熊本市域の熱環境の計算

表 1 は、LANDSAT データが得られた 1988 年 4 月 15 日の上空の境界条件である。熊本では高層気象観測データが無いので福岡のデータを用いている。地中境界の温度は被覆ごとに与えている。

表 2 は計算に用いた地表面パラメータである。前述の通り、大濱ら⁴⁾の値とほぼ同じであるが、特に水田については数回試行計算した後、計算結果と輝度温度の対応を見て設定している。また、本モデルでは地中境界を 25cm としているため地中温度が計算結果に大きな影響を与えると思われる。このため、地中温度についても同様に数回試行計算し、調整した。

なお、今回の解析では、再現精度を評価するために計算地表面温度と LANDSAT 輝度温度の対応のみを見た。しかし、10 時の時点で対応が良いとしても 1 日を通した精度が保証されるわけではないため、今後の課題として、数点の観測データとの対応を見る等の改善が必要である。

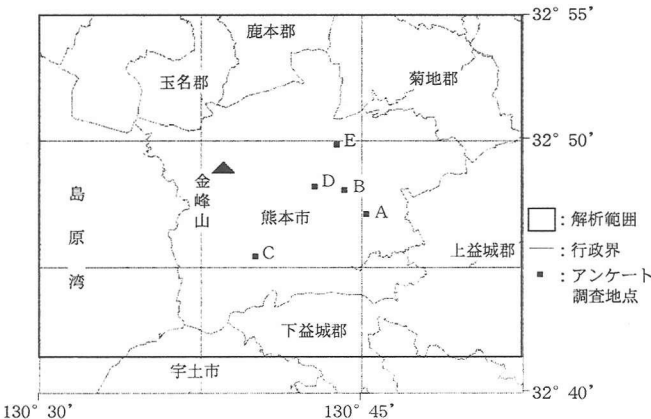


図 1 解析対象範囲

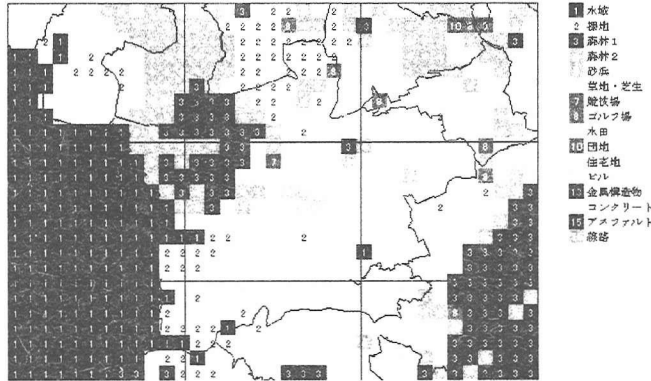


図 2 被覆分類図 (1km×1km 格子内で最も多い被覆カテゴリを表示)

表 1 上空の境界条件 (1988 年 4 月 15 日)

東向きの風速 U	0m/s
北向きの風速 V	0m/s
比湿	$5.194 \times 10^{-4} \text{kg/kg}$
温位	301.460K
気圧	653.21hPa

表 2 地表面パラメータ

カテゴリー	アルベド (-)	粗度長 (m)	熱容量 ($10^3 \text{J/m}^2 \text{K}$)	蒸発能 (-)	熱伝導係数 ($10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$)	地中温度 (K)
1. 水域	0.1	0.001	4.2	1.0	0.14	282
2. 裸地	0.3	0.01	3.1	0.4	0.74	282
3. 森林 1	0.25	1.0	3.24	0.9	1.74	282
4. 森林 2	0.3	0.1	3.15	0.5	0.94	282
5. 砂浜	0.35	0.0003	3.1	0.4	0.74	282
6. 草地・芝生	0.3	0.006	3.1	0.6	0.74	282
7. 競技場	0.3	0.05	3.1	0.5	0.74	282
8. ゴルフ場	0.3	0.05	3.1	0.5	0.74	282
9. 水田	0.25	0.1	3.1	0.9	0.74	282
10. 閉地	0.3	1.5	2.51	0.3	0.57	282
11. 住宅地	0.35	1.0	2.88	0.2	0.61	282
12. ビル	0.3	3.0	2.11	0.0	0.53	287
13. 金属構造物	0.2	1.0	2.9	0.0	1.36	287
14. コンクリート	0.3	0.03	2.11	0.0	0.53	287
15. アスファルト	0.2	0.03	2.18	0.0	0.07	287
16. 線路	0.1	0.01	2.35	0.0	0.72	287

(海域の熱伝導係数は $0.0006 \text{m}^2/\text{s}$ とした。)

(1) LANDSAT 輝度温度との比較

図3は、1988年4月15日の計算結果とLANDSAT輝度温度を比較した結果を被覆ごとに示したものである。LANDSAT観測時の10時の時点で、全体的に計算結果のほうが2～4℃程度高い値になった。両者の対応を被覆ごとに見ると、住宅地で2℃程度、森林1および2で4℃程度の違いが生じた。特に水田についてはパラメータの調整を試みたにも関わらず大きな違いとなっている。計算結果と輝度温度の差を分布図で見ても、水田が広がっている市南部(下益城郡との境界)と解析範囲左上の地域(玉名市)で大きな差が認められた。全体的には比較的良好な計算結果が得られたと思われるが、水田については今後さらに検討・改善の必要がある。図4は、計算で得られた午前10時と正午の気温分布を示したものである。

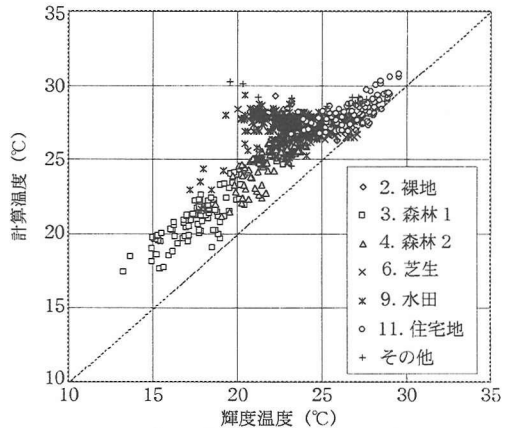
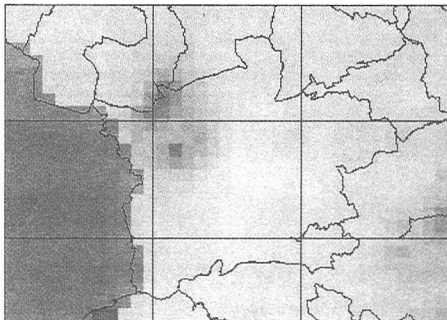
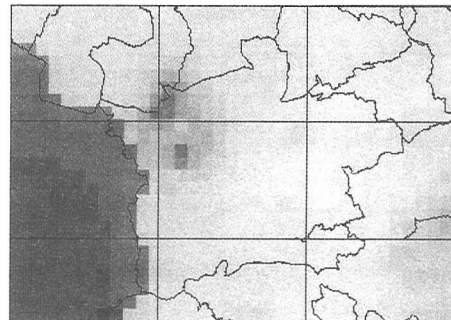


図3 計算温度とLANDSAT輝度温度の比較 (1988年4月15日)



(a) 午前10時



(b) 正午

図4 計算結果 (1988年4月15日)

(2) アンケート調査結果との比較

筆者らが昨年実施したアンケート調査結果では、地点によって夏と冬の快適さに随分違いが見られた。表3は、調査結果による市内5地点(領域A～E)の夏の快適さの5段階評価(快適5⇔不快1)の平均値を示したものである。図1に示したとおり、BとDが市街地、AとEが郊外、Cは海寄りの郊外である。この表から、郊外のCとEで高く(快適)、市街地のBとDは比較的ポイントが低いことがわかる。しかし、領域Aについては、郊外であるにも関わらず市街地のDよりも低い値となっている。

表3 領域A～Eの夏の快適さの5段階評価(昨年度調査)

領域	平均値(データ数)
A(郊外)	3.11 (9)
B(市街地)	2.97 (35)
C(海に近い郊外)	3.33 (12)
D(市街地)	3.14 (7)
E(郊外)	3.50 (22)

一方、図5はA～E各点における計算気温の日変化を示したものである。日中の気温は市街地のBとDで高く、郊外のCとEで低くなっている。また、郊外のAは市街地B、Dと同程度である。

図6は調査による夏の快適さと計算による日最高気温との関係を示したものである。アンケート調査結果にはデータ数の片寄りや値のばらつきはあるが、最高気温と夏の快適さとは比較的良く対応している。なお、夜間の温度についてはほとんど差が見られないため、この点についてはパラメータの設定や地中境界の問題等、モデルの改良が必要と思われる。

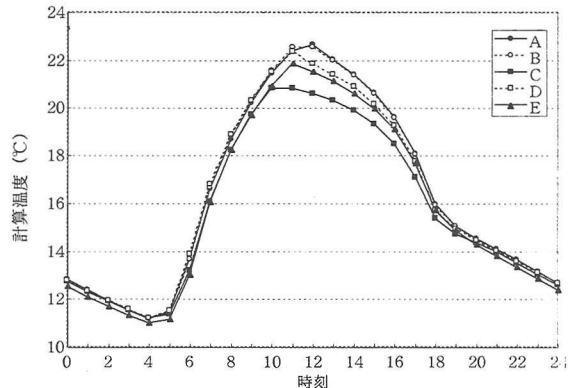


図5 領域A～Eの時間変化(計算結果)

3.2 仮定条件のもとでの計算

(1) 地形の効果の検討

熊本市の地形の特徴として、海と市街地の間に位置する金峰山(標高665m)の存在がある。これが熊本市域の熱環境に多少なりとも影響しているものと考えられる。そこで、金峰山の標高を100m以下に仮定した場合について計算した。この結果と現状の計算結果との差を図7に示す。この図ではわかりづらいが、午前10時に市の南東部で、正午に東部で若干気温が高くなっており、市域全体では若干気温が低くなっている。しかし、その値は0.01℃程度と小さく、計算結果から判断する限り、金峰山が必ずしも熊本市の熱環境に大きな影響を与えているとは言えない。これは、金峰山の標高がそれ程高くないこと、仮定した標高自体に大きな差がないこと、季節の条件等の理由が考えられる。

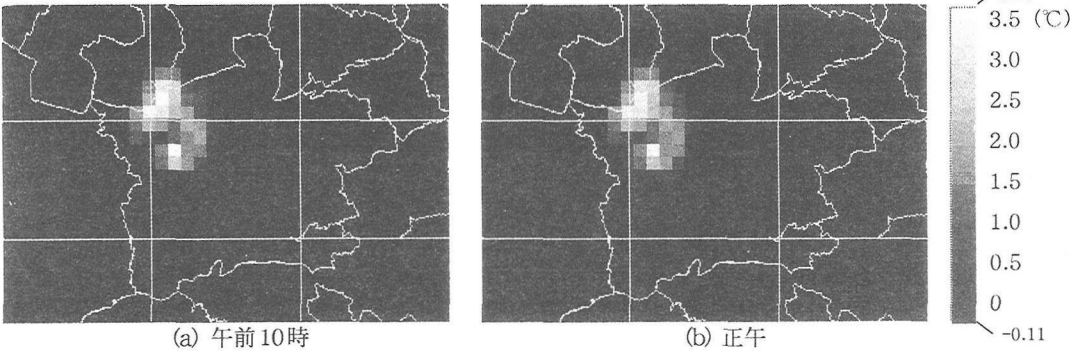


図7 金峰山の標高を100m以内に仮定した場合の計算結果と現状の計算結果との差(仮定-現状)

(2) 緑地の効果の検討

緑地の気象緩和効果を検討するため、表1で示した被覆カテゴリーのうち市街地に相当する団地、住宅地、ビル、金属構造物、コンクリート、アスファルト、線路の蒸発能を変化させて計算し、現状の計算結果と比較した。蒸発能は0.1増、0.2増の2ケースを仮定した。図8は両仮定による蒸発能の分布の変化である。蒸発能の分布は市街地で最大0.1増加している。蒸発能を0.2増やした場合も基本的に分布の変化は類似しており、市街地で最大0.2の増加となっている。

図9は、蒸発能を0.1増やした場合の計算結果と現状の計算結果との差を示したものである。この図から、午前10時で市街地で0.2~0.3℃の気温低下が見られる。また、その周辺から北部および北東の地域にかけて、0.1℃弱の気温低下が見られる。正午では、市街地で0.3~0.4℃の気温低下が見られ、その周辺から北東の地域で0.1℃程度の気温低下が見られる。図は示していないが、午後2時と3時の分布も同様に市街地から北東の地域

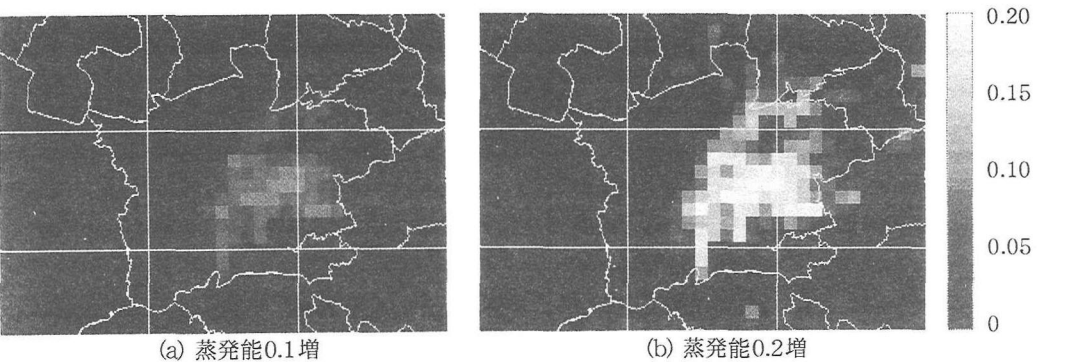


図8 市街地に相当するカテゴリーの蒸発能を増した場合の蒸発能の分布変化(仮定-現状)

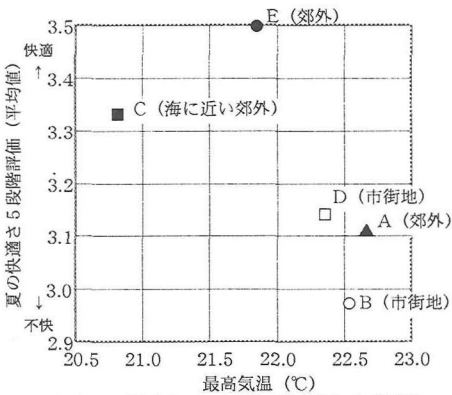


図6 調査による夏の快適さと計算による日最高気温差との関係

で気温低下が見られた。これらの気温低下の分布は蒸発能の変化と良く対応している。

同様に、図10は蒸発能を0.2増やした場合の計算結果と現状の計算結果の差を示したものである。気温低下の分布形状は0.1増やした場合と類似しているが、その値は、午前10時の市街地で0.4～0.6℃、正午の市街地で0.6～0.8℃であり、約2倍である。今回の計算結果から見ると、蒸発能の増加と気温低下の関係はほぼ線形の関係であることがわかる。また、その値は蒸発能0.1の増加に対して、午前10時の時点で0.2～0.3℃、正午の時点で0.3～0.4℃である。

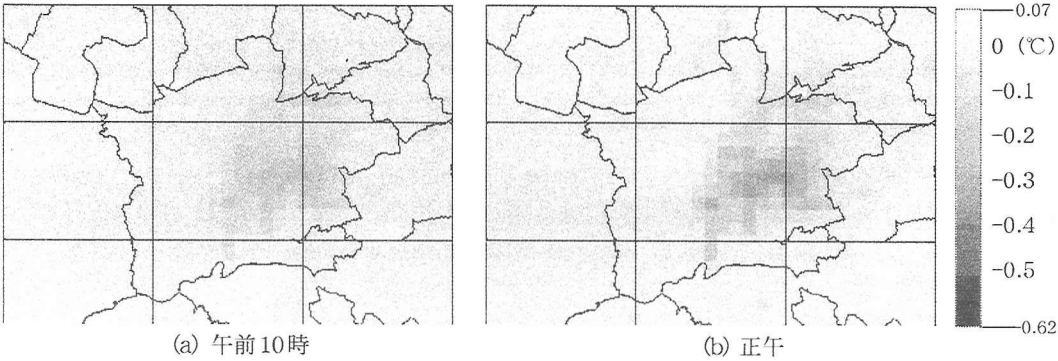


図9 市街地の蒸発能を0.1増やした場合の計算結果と現状の計算結果との差（仮定－現状）

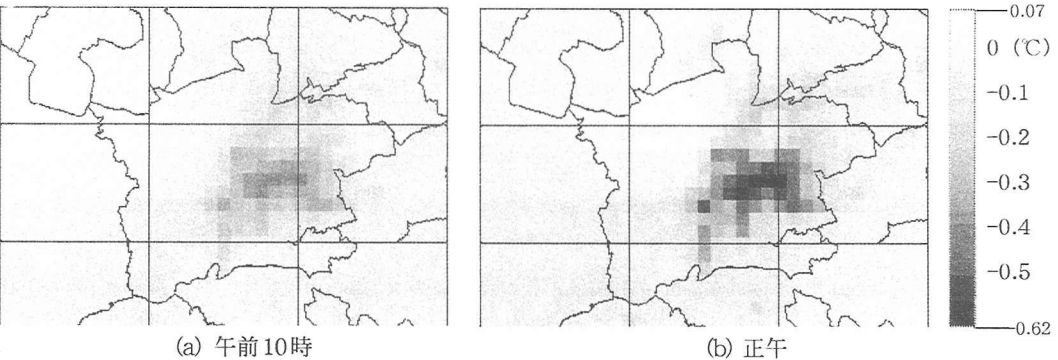


図10 市街地の蒸発能を0.2増やした場合の計算結果と現状の計算結果との差（仮定－現状）

（3）計算気温の時間変化

図11は、領域A～Eの各点について、以上3ケースの気温の日変化を見たものである。各図からわかるように、金峰山の標高を変化させたケースでは1日を通して現状とほとんど差がない。一方、蒸発能を変化させた場合は領域A、B、Dで気温の低下が見られ、郊外のCとEではほとんど変化がない。今回の解析では市街地に相当する被覆のみ蒸発能を変えているため、これらの被覆が多い地点ほど気温低下効果が大きくなると予想されたが、このことは計算でも確かめられた。現実の都市において、緑地を増やすことによって都市域の気候緩和を期待するとすれば、特に市街地の被覆状況を改善することになると思われる。そういう意味では、この計算結果は熊本市における緑地による気候緩和の効果と可能性を示しているものと考えることができる。

4. おわりに

本研究では、Mellor and Yamadaの3次元乱流クロージャーモデルをもとに大濱らが開発した計算プログラムを用いて熊本市の熱環境について検討した。具体的には、現状の条件のもとで計算し、昨年の住民アンケート調査結果と比較した。また、地形と蒸発能を仮定した条件で計算し、現状の計算結果と比較した。

今回の解析で得られた結果をまとめる。1) 現状の条件による計算気温（日最高気温）とアンケート調査結果による夏の快適さとは比較的良く対応している。2) 熊本市の北西（市街地と海の間）に位置する金峰山の標高を変化させて計算した結果、現状の計算結果とほとんど差がない。3) 市街地に相当する被覆の蒸発能を0.1増やした場合、市街地では午前10時で0.2～0.3℃程度、正午で0.3～0.4℃程度の気温低下が見られた。同様に、

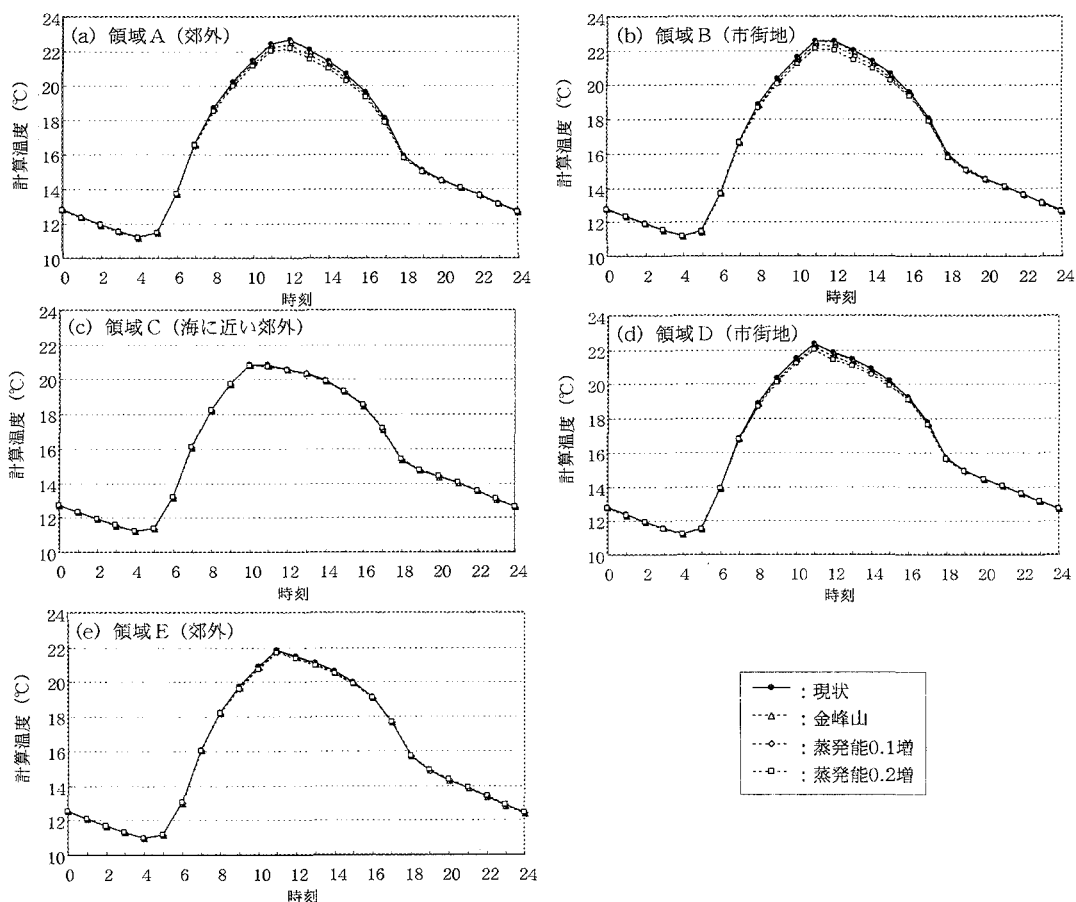


図 11 領域A～E各点における仮定した3ケースの計算気温日変化

蒸発能を0.2増やした場合、午前10時で0.4～0.6℃程度、正午で0.6～0.8℃程度の気温低下が見られた。

現時点では、モデルの再現精度等の問題はあるが、都市熱環境対策をより具体的に検討するためにも、こうした定量的な解析と住民意識等を関連付けた分析を少しずつ積み重ねていくことが重要と思われる。今後の課題として、今回十分に再現できなかった水田や夜間の気温の検討、モデルの改良やパラメータ設定の改善等が挙げられる。また、計算による日最高気温とアンケート調査結果とは比較的良好な相関が得られたが、計算した季節の問題や調査データ数の問題等もあり、今後、夏季や冬季の検討や都市域全体の住民意識の調査を試みたいと考えている。

《参考文献》

- 1) 藤野毅、浅枝隆、和気亜紀夫：首都圏の夏季のヒートアイランド形成と地衡風の関係について、環境システム研究Vol.22、pp.280～285、1994。
- 2) 下堂園和宏、一ノ瀬俊明、鶴野伊津志、花木啓祐：土地利用および人間活動の都市気候へのインパクト評価—東京23区を例として—、環境システム研究Vol.23、pp.347～351、1995。
- 3) 岡村聖、北田敏広、田中勢郁：濃尾平野の局地風に対する地形効果と都市化効果に関する数値解析、地球環境シンポジウム講演集、pp.83～86、1996。
- 4) 大濱隆司、金子慎治、上野賢仁、井村秀文：三次元クロージャーマodelによる都市熱環境構造の解析—福岡市周辺地域への適用—、環境システム研究Vol.23、pp.214～221、1995。
- 5) 上野賢仁、谷川寛樹、井村秀文：都市熱環境解析用地図の作成とその応用—街区規模での熱環境特性とエネルギー消費の解析—、環境システム研究Vol.25、pp.183～190、1997。