

長崎市域における熱環境の動態調査とその解析

松尾俊志*・古本勝弘**
薦田廣章**・赤城誠***Observations of Thermal Environment
in Nagasaki Municipal Area and its Analysis

by

Satoshi MATSUO*, Katsuhiko FURUMOTO**
Hiroaki KOMODA**, Makoto AKAGI***

In urban area, a peculiar climate is formed reflecting the characteristic of the city and a human being activity. A heat-island phenomenon is conspicuous in climate changes by the urbanization.

In this paper, the observations of temperature through a year at numerous points in Nagasaki municipal area and its analytical results are described. Moreover, the numerical simulation is conducted to be clear on a heat-island in this area.

1. はじめに

都市では人口集中や都市機能集約などの人間活動の高密度化に伴い、立地条件や規模を反映しながら、その都市固有の気候（都市気候）が発生しているとの報告が世界各地でなされ、これにまつわる問題が惹起されている。この人間の意志によらない都市化による気候変化の中で、都市域における気温が郊外と比して著しく高くなる現象をヒートアイランド現象という。このヒートアイランドの成因として、冷暖房や自動車からの排熱など、エネルギー消費が郊外に比して都市域の方が際立って大きいこと、人工構造物や舗装道路による太陽熱の蓄熱、緑被率の減少による水分蒸発量の低減、大気汚染物質等による温室効果などが考えられる。複雑な都市の熱環境を把握するのは非常に困難ではあるが、調査研究を進めてゆくことは、施設や住宅地の配置など快適な都市空間の形成に際して必要である。

長崎市はリアス式湾入の長崎湾を抱くようにして、

山腹の急傾斜にまで市街地が発達しており、周縁部は金比羅山、稲佐山などの標高400m前後の小高い山々に囲繞されている。このような地形特性を有する長崎市域において、年間を通して気温の同時多点観測を行った。本報文は、その解析結果と考察および地形を考慮した風と気温の3次元数値シミュレーションにより、長崎市域の熱環境を明らかにしたものである。

2. 観測概要

本観測は図1に示す全20地点において、自記温度計（MDL：株式会社IBC製）を用いて気温の同時観測を行った。一部の測定点または期間を除き、1995年10月から一年を通して、10分間隔で連続的に記録した。

気温測定するにあたっては、放射の影響を小さくするように発泡スチロールの容器を加工し、センサー一部の通風をよくしたものを、電柱や樹幹の地上2.5m程度に設置した。また、MDLは標準温度計との検定を行っている。

平成10年4月24日

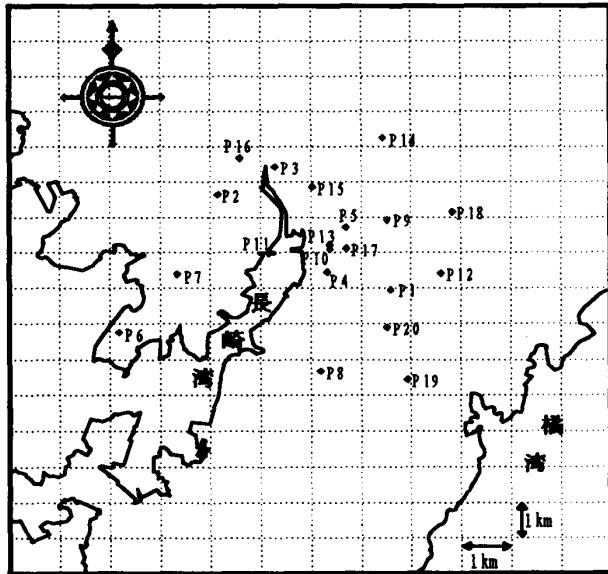
*国際水道コンサルタント(株) (KOKUSAI SUIDOU Consultant. LTD)

**社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

***大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Students, Department of Civil Engineering)

測定した気温データは、気温減率 $6.5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ を用いて標高補正し、さらにスムージングを施した。

市街化された都市中心部は、測点P4, P10, P13, P17地点が配置されている辺りである。



- P 1: 愛宕 P 6: 神の島 P 11: 長崎港 P 16: 春木
- P 2: 稲佐山 P 7: 木鉢 P 12: 中の谷 P 17: 古川
- P 3: 浦上駅 P 8: 小ヶ倉 P 13: 賑町 P 18: 本河内
- P 4: 籠町 P 9: 桜馬場 P 14: 西山 P 19: 茂木
- P 5: 勝山 P 10: 中央橋 P 15: 浜平 P 20: 療養所

図1 長崎市域における測定点

3. 観測結果と考察

図2は横軸に日平均雲量10分比（長崎海洋気象台）、縦軸に気温日較差をとり、都市域（籠町）と郊外（春木）とで1年間にわたってプロットしたものである。

これによると、雲量が小さくなるほど気温日較差が大きく、都市域よりも郊外の方がその較差が顕著であるといった相関関係が認められる。これは上下方向の

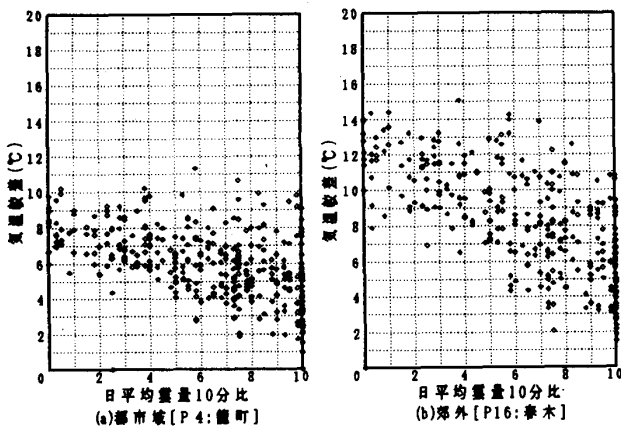


図2 雲量と気温日較差の関係

放射を遮る雲が少ないときほど放射冷却が顕著に、また夜間人工排熱の少ない郊外ほど気温較差が大きくなったためと思われる。よって、雲量はヒートアイランド現象の指標に適していると考え、晴天日曇天日の選出には雲量を採用することにした。

図3, 4は、それぞれ晴天日と曇天日における都市域（籠町・古川）と郊外（春木・療養所）の気温変化である。どちらも秋期におけるものである。両図より、昼間日照のあるときは、夜間都市域と郊外で $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 程の差があり、都市域が高温状態にある。日照のない曇天日では、都市域郊外で形状にそれほど違いは見受けられないが、一日中、都市域の方が $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 程高温状態にある。太陽放射のない曇天日においては、地覆物の違いによる地表付近の気温に対する影響はないと考え、都市域と郊外の人工的な放熱量の差が表れたものと思われる。

表1は都市域と郊外における月別平均日最低气温である。これより、年間を通じて都市域（籠町・古川）の方が郊外（中の谷・療養所）に比べ高くなっているのがわかる。表2では年間を通して曇天日（雲量 > 9 ）

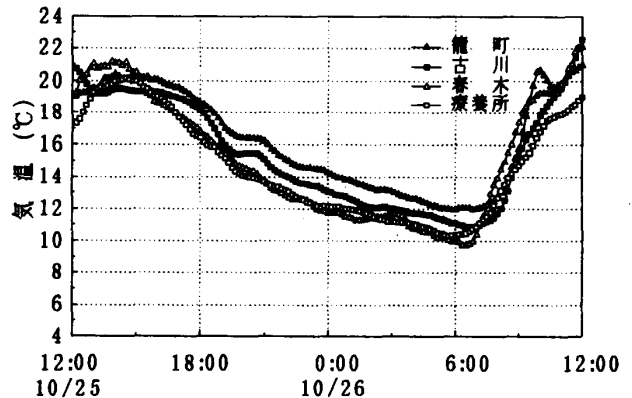


図3 晴天日における気温変化

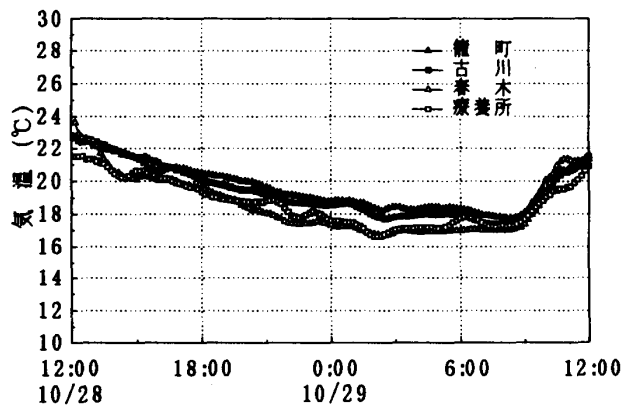


図4 曇天日における気温変化

のみを取り出し、日最低気温を平均した。表1と同じく、都市域が郊外よりも高温となっていたが、その差は表1より小さい。図4と同様に、太陽エネルギーの地表面への直接供給のない曇天日には、気温への地覆の影響は小さい筈であるから、この表からも人工的放熱量が都市の高温化の一要因であるといえる。

表1 都市域と郊外における
月別平均日最低気温 (単位: °C)

		龍町	古川	中の谷	療養所
春	3月	8.22	7.68	6.86	7.08
	4月	10.27	9.62	8.85	8.93
	5月	16.93	16.33	15.88	15.58
夏	6月	21.56	21.32	20.99	20.80
	7月	25.06	24.80	24.13	23.82
	8月	25.82	25.38	24.75	24.54
秋	9月	22.11	21.51	20.94	20.54
	10月	17.14	16.53	16.14	15.84
	11月	10.26	9.85	9.08	9.26
冬	12月	5.76	5.14	4.93	4.88
	1月	4.92	4.33	3.96	4.02
	2月	4.90	4.29	3.52	3.68

■:1番大きな値 □:2番目に大きな値

表2 都市域と郊外における年間
曇天日のみの平均日最低気温
(単位: °C)

日数	龍町	古川	中の谷	療養所
92	16.03	15.65	15.14	15.06

図5, 6は、中央橋と賑町における48時間気温変化である。この2地点は都市域に位置し、数十m程度の距離しか離れていない。但し、中央橋は交通量の多い大通り沿いの街路樹の中にMDLを設置しており、通りの先には川があって日射を遮るものがなく陽当たりが良い。一方、賑町はビルに囲まれた電柱に設置しており、日照の少ない地点である。

図5より、日没後は2地点の変動にそれほど違いはないが、日の出とともに中央橋の方が急激に気温上昇しているのがわかる。これは陽当たりの良い中央橋の方が先に陽が射し始めるためであろう。つぎに、両地点ともに日照のある日最高気温の出現する時間帯では、賑町の方が高温になっている。これは中央橋の方のMDLを街路樹に設置したために、植生の蒸散作用

による気温上昇抑制効果が生じたものと考えられる。

図6から曇天日における2地点の違いはほとんどないことがわかる。曇天日には植物の蒸散は起こりにくい筈であるから、図5のところで述べた植生効果が、都市の高温化抑制に効果的であるといえる。

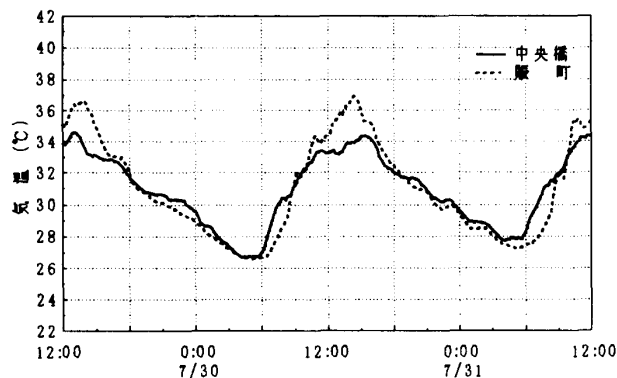


図5 晴天日の中央橋(P10)と賑町(P13)の気温変化

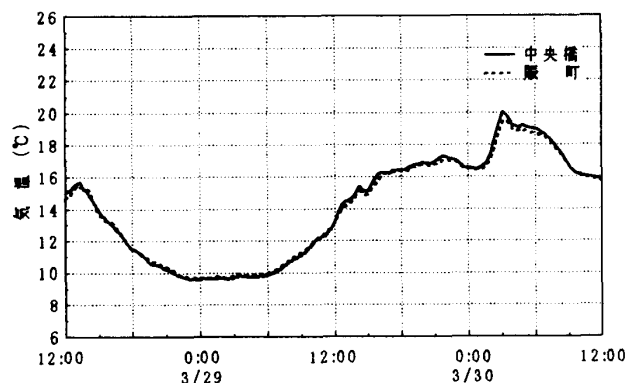


図6 曇天日の中央橋(P10)と賑町(P13)の気温変化

以上の図表から、都市の熱環境を改善する手段として、人工排熱の削減、つまり省エネルギーの推進と街路樹や公園などで植生地を増やし、且つ上手く配置させることなどが考えられる。

従業者分布図の凡例

- 30000 (人)
- 20000
- 10000
- 5000
- 2000
- 1000

※ 以後この凡例は省略する

図7~図11は、実測値に基づいて描いた等温線である。同図の背景に従業者分布図を描いているが、従業者数の多い所を都市化された地域と考えてよい。

従業者分布図の凡例を左に示す。

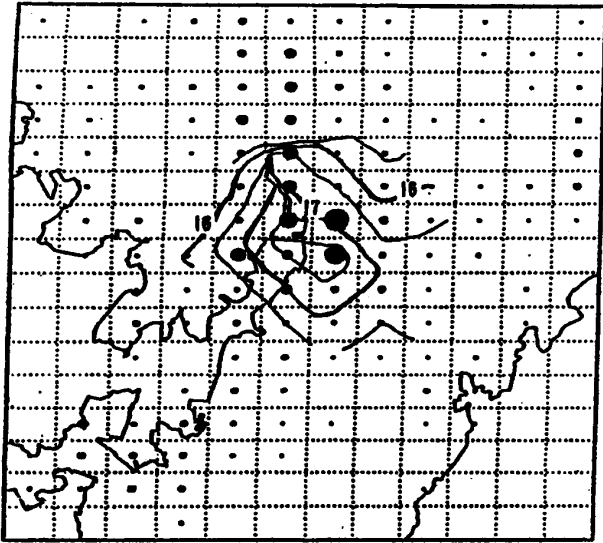


図7 従業者分布と等温線 [単位: °C]
晴天日 ('95.10.20 2:00)

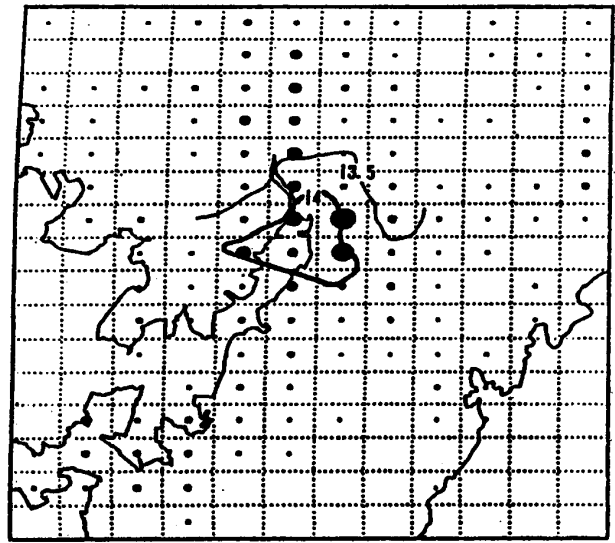


図9 従業者分布と等温線 [単位: °C]
曇天日 ('96.1.15 0:00)

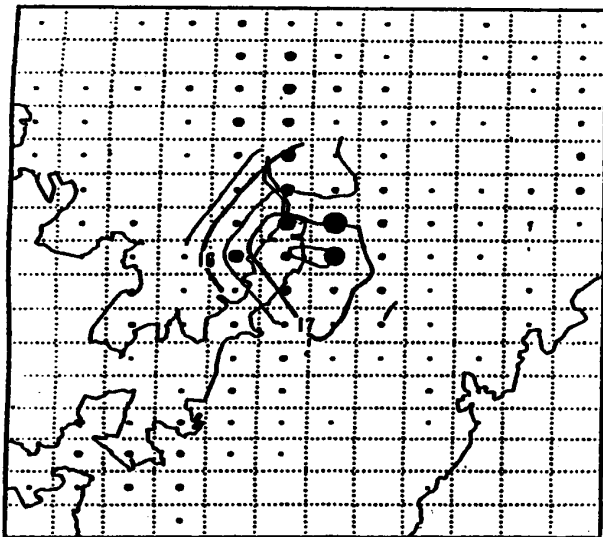


図8 従業者分布と等温線 [単位: °C]
晴天日 ('95.10.20 5:00)

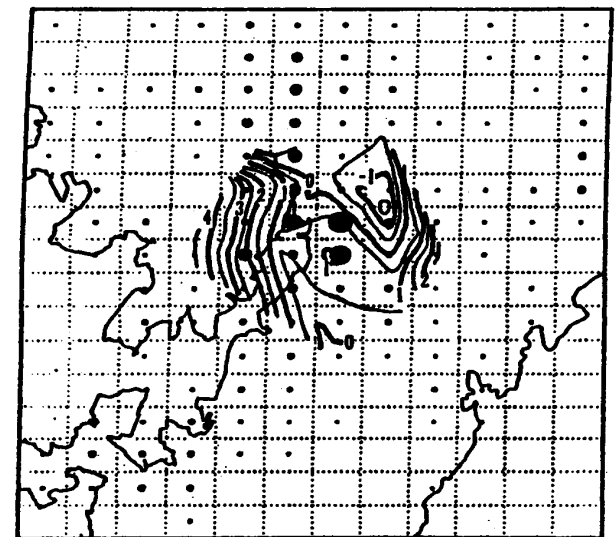


図10 従業者分布と等温線 [単位: °C]
晴天日 ('95.12.27 5:00)

図7は秋期晴天日の夜間、図8はその3時間後の等温線である。両図ともヒートアイランドが出ている。図7の段階で既にヒートアイランドが形成されており、その後全領域が形状と強度をほぼ維持しながら、緩やかに気温を低下させたものと思われる。

図9は冬期曇天日の夜間における等温線で、昼間日照がなかったにもかかわらず、都市域が多少高温化している。これは、先にも述べたように、人工的な要因が考えられる。

図10は冬期晴天日の夜間日出前の等温線である。左側に高温域がある。稲佐山付近で逆転層の報告¹⁾

がされていることを考えると納得できる。但し、逆転層は鉛直方向で比較しなければならないので、標高補正済みのこの図に表現された逆転層の規模ほど、実際はそこまで大きなものではない。それでも、逆転層が発生すると大気汚染に繋がる恐れがあるので十分注意が必要である。

図11は夏期晴天日の日出前の等温線である。これより、夏期にもヒートアイランドは形成されることがわかる。しかし、雲量の面からみても、快晴日といえる日は秋冬期が多く、一般的にいわれるように、ヒートアイランドは秋冬期に顕著になる。

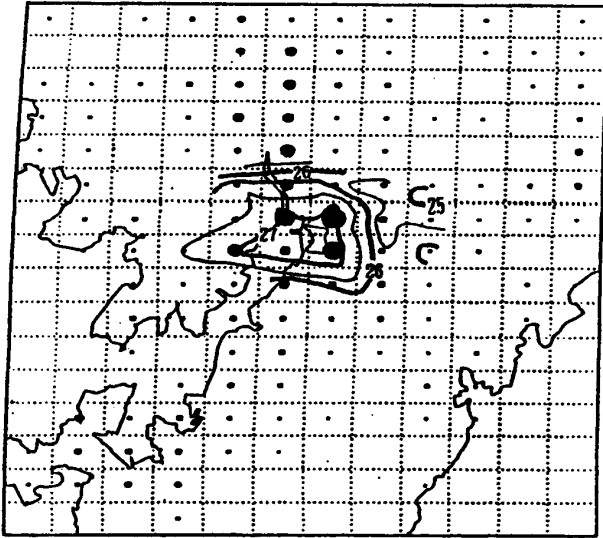


図11 従業者分布と等温線 [単位: °C]
晴天日 ('96. 7. 31 5:00)

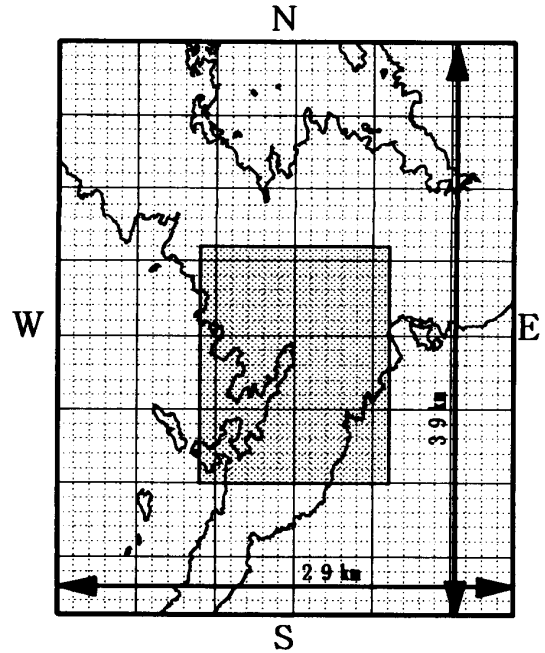


図12 計算対象領域

4. 数値モデルの概要

都市の熱環境が注目される中、その特性を分析・評価するためには、都市の気温分布を把握することがまず必要となる。しかし、実際には、観測点の数や頻度などに限界があり、気温の面的分布を作成するに足る数の観測点を設け気温分布を得るのは、多大な労力と時間を要する。そこで、地形の起伏の効果が反映されるような鉛直座標 z^* を導入した3次元モデルを用いて数値シミュレーションを行った。

基礎方程式は、Navier-Stokesの運動方程式、連続式および熱の輸送方程式である。空間的には staggered grid を用いて離散化した(中間差分)。計算対象領域は、北緯 $32^{\circ}55'00''$ 、東経 $129^{\circ}41'15''$ の点と北緯 $32^{\circ}35'30''$ 、東経 $130^{\circ}03'00''$ の点を対角にもつ $39\text{km} \times 29\text{km}$ の矩形領域である。水平方向の各格子間隔は、それぞれ一様に 1km とし、 39×29 の格子を有する格子網を配した。但し地表面標高に関しては、 500m メッシュ間隔で入力する。鉛直方向の大気層については、接地境界層の厚さを 50m とし、その上部に30メッシュのエクマン層を配した。エクマン層は最下層のメッシュの厚さのみ 100m 、それより上部のメッシュ厚さは一様に 150m とする。したがって、鉛直方向の計算領域の上限は 4500m となり、計算対象領域の大気層の格子点総数は地表面を含めて $40 \times 30 \times 32$ である。一方、地中の鉛直格子は、 5cm 、 15cm 、 35cm の位置に置き、 75cm の深さでは地温の変動はないものとみなす。また初期条件としては、快晴で無風状態の静止成層大気を考え、海面温度は秋季(10月下旬)を想定して昼夜を問わず一定(22°C)と仮定する。地表面温度は以下に示す

熱収支式によって決定する。

$$R_S + R_L \downarrow - R_L \uparrow - H - \epsilon E - G + Q_A = 0$$

ここに、 R_S は太陽からの短波放射量、 $R_L \downarrow$ は大気からの長波放射量、 $R_L \uparrow$ は地表面から上空への長波放射量、 H は顕熱輸送量、 ϵE は潜熱輸送量、 G は地中への熱輸送量、 Q_A は人工排熱により地表面へ加わる熱量である。接地境界層では熱の鉛直方向の輸送量が高度によらず一定とみなし、その層内における風速と温度の鉛直分布に Monin-Obukhov の相似則を適用させる。平均風速および平均温度の鉛直勾配は、普遍関数 ϕ を用い、仮の安定度スケール L を決定する。これらの値をもとに、上式を Newton-Raphson 法で収束計算を行い、地表面温度 T_S を補正する。

境界条件は、地表面で $u, v, w^* = 0$ とし、計算領域での上限では、水平運動はないものとみなし、 $u, v, \partial w^* / \partial z^*, \theta', \pi' = 0$ とする。また、対象領域の外側境界では法線方向に各物理量の変化はないものとする。 u, v, w^* はそれぞれの風速成分、 θ', π' はそれぞれ温位および Exner 関数の平均値からの変動量である。

短波放射量の計算に必要な太陽の天頂角は、10月下旬の視赤緯、長崎市の緯度を用いて計算した。

時間積分に関しては3段階の leap-frog 法を採用し、時間差分間隔は6秒とした。

人工排熱については、正確に把握することが困難なので、人口が多い都市域または住宅地域ほどエネル

ギー消費量が大きいであろうということを考慮して、以下のようにして与えた。

1 kmメッシュ内の消費エネルギーを、そのメッシュ内の居住者数と従業者数の和(P：最大で約45,000人)と仮の消費量係数 ($C_c=0.0005 \text{ W/m}^2/\text{人}$) の積で与えた。よって、時間変動は考慮されていない。

土地利用状況を人口 (P) 分布より推定して3区分し、潜熱・顕熱の割合 (Bowen比) で差をつけた。

5. 計算結果と考察

06:00LST を計算開始時刻とし、48時間の計算を行った。最後の24時間の値をもって計算結果とした。出力された気温値から、図12の着色範囲 (図1と同じ範囲) を取り出し、観測データと同様標高補正を施して評価する。一例として、00:00LST と05:00LST の等温線をそれぞれ図13, 14に示す。また、同時刻の土地利用状況を考慮しない場合の等温線を図15, 16に、さらに、土地利用状況・人工排熱を考慮しない場合の等温線を図17, 18に示す。但し、土地利用状況を考慮しないというのは、一様に植生地であることを示す。

図13, 14より、夜間における気温の分布状況は、形状の面ではおおよそ表現できているように思われる。値に関しては、人工排熱の与え方、土地利用状況の分け方および潜熱顕熱の割合の決定方法を細かく設定することができれば、再現精度は向上するであろう。

図15, 16を図13, 14と比較すると、郊外ではそれほど違いはみられないが、都市域では約1℃ほど気温が下がっている。

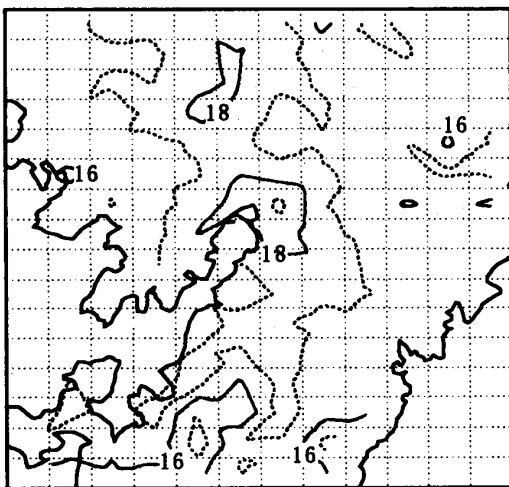


図13 00:00LSTにおける等温線 [単位：℃]

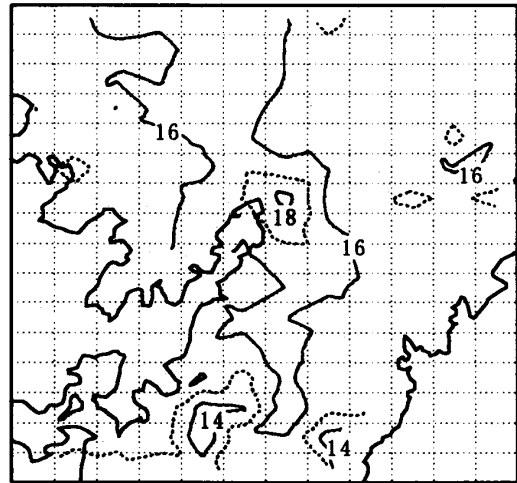


図14 05:00LSTにおける等温線 [単位：℃]

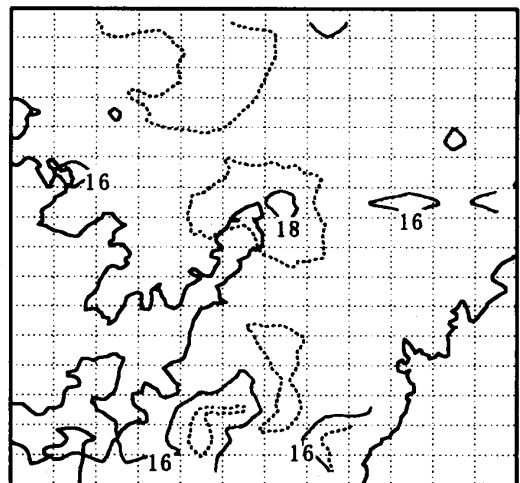


図15 00:00LSTにおける等温線 [単位：℃]

※土地利用区分けなし

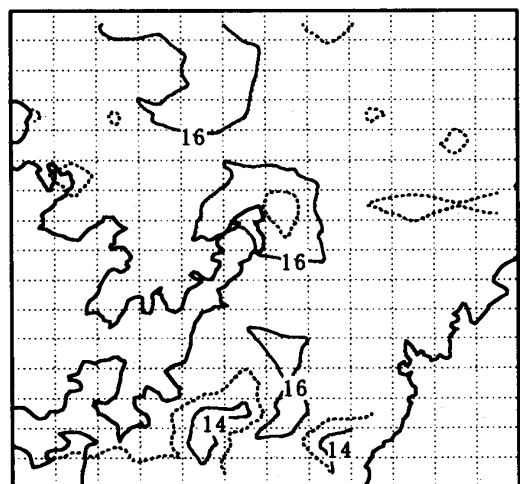


図16 05:00LSTにおける等温線 [単位：℃]

※土地利用区分けなし

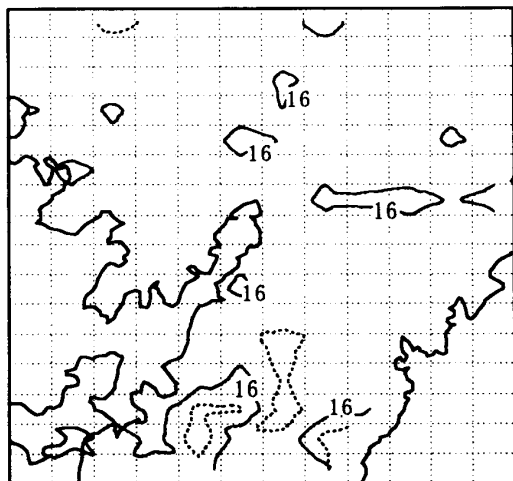


図17 00:00LSTにおける等温線 [単位: °C]
※土地利用区分け・人工排熱なし

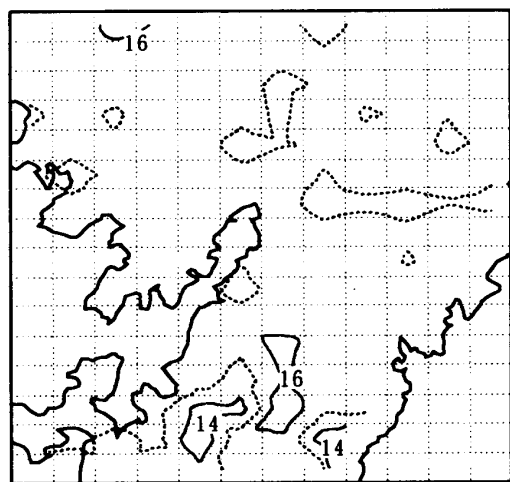


図18 05:00LSTにおける等温線 [単位: °C]
※土地利用区分け・人工排熱なし

図17, 18では、都市域の高温化はなくなっている。

実際の現象でも、このように省エネルギー・緑地の増大を推進すれば、都市域高温化を抑制できるであろう。ただ、人工排熱と緑地の減少のどちらが都市の高温化により寄与しているかは明言しかねるものの、どちらとも都市の熱環境において重要な要素といえる。

6. まとめ

今回の観測から、都市域では郊外に比べ日最低気温が高くなる傾向が明らかになった。これは、ヒートアイ

ランド現象の特徴の一つであり、等温線より確認することができた。但し、条件が揃えばの話である。逆転層の発生などを考えると、鉛直方向の観測も必要であろう。規模に関しては、対象領域が狭いため判断は難しいが、大都市に比べれば小さいものである。

現在まだ開発中ではあるが、秋期の長崎市域における気温のシミュレーション計算を試み、大雑把ではあるが気温の分布状況を再現した。複雑な都市の気温に対する影響を把握するのは非常に困難ではあるが、それを計算上にどう表現し反映させてゆくかが今後の課題といえる。

一般的にもいわれていることであるが、今回の観測およびシミュレーション結果からも、都市の熱環境改善策として、街路樹や公園など緑地を上手く配置することや省エネルギーの推進などが有効な手段であると考える。

参考文献

- 1) 荒生公雄・西永 優・横山秀敏：長崎における接地逆転層の気象学的特性，長崎大学教育学部自然科学研究報告 第31号（1980）別冊，pp.33～47
- 2) 荒生公雄・松崎秀信・近藤 功・松田真人：長崎市の気温逆転層とその解消過程，長崎大学教育学部自然科学研究報告 第33号（1982）別冊，pp.57～64
- 3) 平成二年国勢調査に関する地域メッシュ統計地図－世帯総数・人口総数－（西日本編），総務庁統計局，p.31
- 4) 平成三年事業所統計調査に関する地域メッシュ統計地図－全産業事業所数・従業者数－（西日本編），総務庁統計局，p.31
- 5) 薦田廣章・古本勝弘・武政剛弘・吉永哲典：長崎県南西地域における風の日変化特性，第14回風工学シンポジウム論文集，pp.37～42，1996
- 6) 薦田廣章・古本勝弘・武政剛弘・吉永哲典：長崎県南部地域における夏季の地表風の特性，水工学論文集 第41巻，土木学会・水理委員会，pp.329～336，1997
- 7) 榊原保志：越谷市に見られるヒートアイランド強度－郊外が水田の場合－，天気 41.9，日本気象学会，pp.13～20，1994