

モデル計算による都市熱環境の歴史的変化の検討：福岡市の例
A NUMERICAL MODEL STUDY OF THE URBAN CLIMATE CHANGE IN THE PAST
: A CASE STUDY OF FUKUOKA CITY AREA

柴田学* 三浦孝浩** 上野賢仁*** 井村秀文*
Manabu SHIBATA*, Takahiro MIURA**, Takahito UENO*** and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; The urban climate changes which took place in the Fukuoka City area between 1925 and 1988 due to the land use change was studied by numerical calculation. The three-dimensional turbulence closure model was applied for the simulation. The calculation procedures were similar to those adopted in the authors' previous study. The land surface parameters were obtained by using LANDSAT TM data for 1988, while those for 1925 were determined from the old maps of the Geographical Survey Institute with the aid of GIS techniques. Model calculations were carried out for the two years using these land use and other physical parameters. The calculated temperature and wind distribution maps for the two years were compared to detect the quantitative and topographical changes in temperature distribution which were caused by the land cover changes between the two years.

KEYWORDS; urban climate, heat island, urbanization, land use change, numerical simulation, remote sensing, GIS

1. はじめに

都市域の拡大に伴う土地利用の改変の結果、田畑や緑地は住宅地や市街地へ姿を変えている。地表面は都心部から郊外に至るまでコンクリートやアスファルト等の人工物に覆われ、ヒートアイランド現象の一因となっている。過去から現在までの都市域の拡大による土地被覆状態の変化が都市気象にどのような影響を及ぼしてきたかを明らかにすることは、現在の都市熱環境の構造的な問題を解明し、今後の都市熱環境政策を策定する上で重要な意味を持つ。その第一段階として、ヒートアイランド等の都市気象変化が、いつの時代から、どの程度生じていたかについて検証することが重要である。

本研究では、福岡市周辺を対象として、1925年と1988年の土地被覆分類図を作成し、それらから得られる地表面状態パラメータと Mellor and Yamada 大気乱流モデル（レベル2）¹⁾をもとに大濱ら²⁾が開発した計算プログラムを用いて両年の夏の日の気温分布と風系を計算する。これから、計算気温と観測気温とを比較し、モデルの再現性について検討し、両年の土地被覆の違いが福岡市及びその周辺の気温と風系に与えた影響について考察する。

1988年の土地被覆分類図作成には LANDSAT データを用いた。LANDSAT1 号が打ち上げられた1972年以前の LANDSAT データは存在しないため³⁾、1972年以前の土地被覆分類図は当時の地形図を利用して作成しなければならない。本研究では、都市の熱環境をなるべく長期的過去にさかのぼって解析することを目的とし、解析対象範囲を覆うことのできる国土地理院発行の地形図のうち、最古の1925年のものを用いた。1925年の土地被覆図作成に当たっては、GISを利用して LANDSAT データと同じ30mメッシュで当時の解析対象範囲を精密に再現した。

過去の都市熱環境を再現した研究例はあるが⁴⁾、それらと本研究とで異なる点は、土地被覆分類図の精密さである。年代間のスパンを70年とした長期的な解析例はほとんど無いと考えられる。

現時点では数値モデルの再現精度は十分とは言えず、このために、比較的観測データの充実した最近の熱

¹⁾九州大学工学部環境システム科学研究センター Institute of Environmental Sysyems, Faculty of Engineering, Kyushu University, ²⁾大林組 Obayashi Corporation, ³⁾熊本工業大学土木工学科 Department of Civil Engineering, Kumamoto Institute of Technology

環境について多くの研究努力がなされている^{5,6,7)}。数値モデルを用いて過去と現在を比較し、その変化の過程について考察することは意味があるが、このためにはモデルの精度向上を待たなければならない。さらに、過去の熱環境を解析するためには、当時の地表面の物理的なパラメータをどう与えるかといった課題もある。本研究ではこの点について、任意の年代の熱環境を定量的に解析するための技術的提案も含んでいる。

2. 解析内容

2.1 解析対象

解析対象地域として、福岡市およびその周辺 40km 四方の範囲を選定する。水平格子は 1km × 1km である。北西端の始点は東経 130 度 10 分、北緯 33 度 45 分である。図 1 は解析範囲と等高線図を示したものである。標高データは国土数値情報⁸⁾を用いる。

解析対象年は 1925 年と 1988 年である。都市の発展による被覆変化を見る場合、まず長期的な変化を見るのが妥当である。このため、国土地理院が発行している経年地形図のうち最も古い 1925 年を選ぶ。1988 年については、入手できた LANDSAT データのうち最も新しいものを採用した。

2.2 土地被覆分類図の作成とパラメータ化

大濱らの計算では 1988 年の LANDSAT データをもとに土地被覆状態を求めている。しかし、本研究のように過去の土地被覆を解析対象とした場合、LANDSAT 等の衛星データは使用できないため、地形図からこの情報を得る必要がある。本研究では、このために GIS の手法を用いた。具体的な方法を以下に示す。なお、1988 年の土地被覆には大濱らが以前分類したデータを用いたが、地表面パラメータに関しては、地中温度の再設定の必要などもあり、今回新たに作成した。

(1) GIS を利用した過去の土地被覆分類図の作成

図 2 に土地被覆分布図を作成する方法を示す。1988 年の場合、LANDSAT データを利用できるため、これを 16 種類に被覆分類する。1925 年の場合は、地図を判読可能な 7 種類の土地被覆ごとに色分けし、スキャニングによりラスターデータ化する。次にそのデータを ARC/INFO に取り込みグリッド変換を行い、さらに修正を加える。図 3 と図 4 に 1925 年と 1988 年の土地被覆分布図を示す。

(2) 地表面パラメータ

作成した 1925 年と 1988 年の土地被覆分類図に、大濱らが用いた都市地表面のパラメータを対応させる。表 1 は地表面パラメータの文献値をまとめたものである。なお、1988 年は 16 種類、1925 年は 7 種類である。計算ではこれらの値を計算格子 (1km × 1km) で平均した値を用いる。なお、3. の計算では観測結果との対応関係を見てさらにパラメータを調整した。

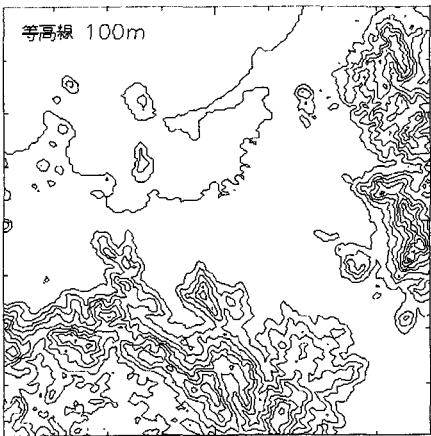


図 1 解析範囲 (等高線図)

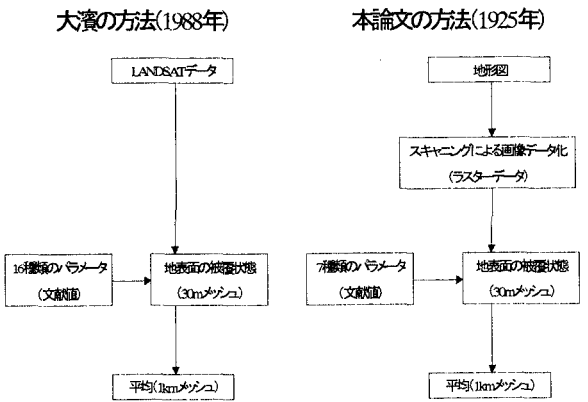


図 2 土地被覆分布図の作成とパラメータ化の方法

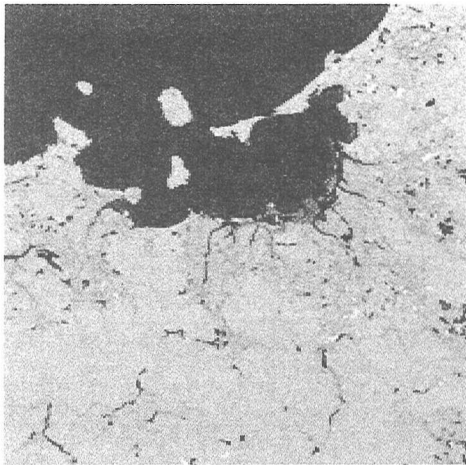


図3 土地被覆分布図（1925年）

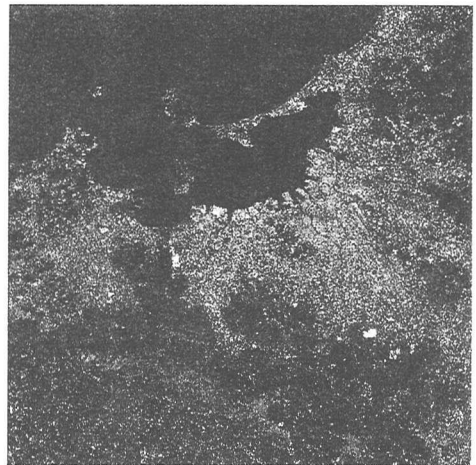


図4 土地被覆分布図（1988年）

2.3 計算手法

（1）数値モデルの概要

本モデルは、前述の通り Mellor and Yamada による3次元の数値モデルをもとに開発されたものである。このモデルを用いることによって、都市域の空間的な温度分布や風系を議論することが可能である。

モデルでは、鉛直方向を境界層、地表面付近、地中の3つの空間に分ける。境界層における基礎方程式は2次の乱流クロージャーモデルである。地表面では、上空第一層と地中第一層で熱収支式を解き、地表面温度と比湿を求める。地中については熱伝導方程式を用いる。また、計算上次の前提条件を仮定する。①地中および上空の境界条件は日変化しないものとする。②雲や空中の汚染物質等の影響は考慮しない。③乱流エネルギーの生成と消滅は局所平衡にある。④静力学平衡が成立するものとする。

シミュレーションは開始時刻を午前10時とし、30秒の積分時間間隔で38時間について繰り返し計算を行い、初期条件の影響が少ない後半の24時間を計算結果としている。

（2）境界条件

1925年と1988年では気象条件が異なるが、今回の目的である被覆状態が与える影響を解析するため同じ境界条件を設定する。対象日は、大濱らの解析では春分の日を設定したのに対して、本解析ではヒートアイランドの影響が顕著に現れる8月上旬の晴天日に設定する。また、初期風速は計算領域全域で無風とした。地中境界（25cm）における温度は、地表面の被覆状態によって異なると予想されるため、被覆ごとに与える。この値を表1に示す。海面の温度は26℃とする。上空境界（3500m）の値は理科年表から決定した。風向・風速の境界値については、一日を通して一定値を与える都合上、地衡風は無いものとする。上空の境界条

表1 地表面パラメータ

計算ケース	カテゴリー	アルベド _{ref}	粗度長 _{z₀} (m)	熱容量 $C(10^3 J/m^2 K)$	蒸発能 β	熱拡散係数 $K_g(10^{-6} m^2/s)$	地中温度 $T_d(K)$
1925年	水域	0.100	0.0001	4.20	1.0	0.14	299
	緑地	0.275	0.5000	3.20	0.7	1.34	305
	市街地	0.310	1.1500	3.10	0.3	0.70	305
	住宅地	0.320	1.0000	3.05	0.3	0.68	305
	水田	0.250	0.0100	3.82	0.9	0.43	305
	畑	0.200	0.1000	3.35	0.5	0.56	305
	裸地	0.300	0.0100	3.10	0.4	0.74	305
1988年	水域	0.10	0.0001	4.20	1.0	0.14	299
	裸地	0.30	0.0100	3.10	0.4	0.74	305
	森林1	0.25	1.0000	3.24	0.9	1.74	305
	森林2	0.30	0.1000	3.15	0.5	0.94	305
	砂浜	0.35	0.0003	3.10	0.4	0.74	305
	芝生	0.30	0.0050	3.10	0.6	0.74	305
	競技場	0.30	0.0500	3.10	0.5	0.74	305
	ゴルフ場	0.30	0.0500	3.10	0.5	0.74	305
	水田	0.25	0.0100	3.82	0.9	0.43	305
	団地	0.30	1.5000	2.51	0.3	0.57	305
	住宅地	0.35	1.0000	2.88	0.2	0.61	305
	ビル	0.30	3.0000	2.11	0.0	0.53	310
	金属構造物	0.20	1.0000	2.90	0.0	1.36	310
	コンクリート	0.30	0.0300	2.11	0.0	0.53	310
	アスファルト	0.20	0.0300	2.18	0.0	0.07	310
	線路	0.10	0.0100	2.35	0.0	0.72	310

なお、海域の熱拡散係数は、乱流拡散が発生するとし、 $0.6 \times 10^{-3} m^2/s$

表2 境界条件（上空）

東向きの風速 U	0 m/s
北向きの風速 V	0 m/s
比湿 q	$7.944 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$
温位 θ	308.025 K
気圧 p	65321 Pa

件を表2に示す。

3. 計算結果と考察

(1) モデルの再現性：計算結果と地上気象観測データとの比較

モデルによる計算気温の再現性を検証するためには、観測気温と時間的、空間的に比較することが望ましい。大濱らの計算ではLANDSATの輝度温度分布が得られたため、モデルの再現性の検証を空間的に行うことができた。しかし、解析の対象とする年代が長期的過去にさかのぼる場合、モデルの現実性を検証するためのデータは不足しがちである。本研究においても、解析の対象とする年代、範囲の中で得られたデータは、福岡管区気象台における地上観測気温のみであった。したがって、この一点の観測気温の時間変化と、対応する格子の計算気温の時間変化を比較せざるを得なかった。なお、比較に用いたデータの観測日は、雲量が少なく日照時間が長いことなど、できるだけ計算条件に近い日を選定する必要がある。この点を考慮し、条件に適合する日として1925年7月29日、1988年8月9日を選んだ。図5に観測気温と計算気温の時間変化を示す。

図5を見ると計算結果は実測値と比較して大きな差が認められる。これは一日分の一点のみの実測値と比較せざるを得なかったことに加えて、人工排熱、大気汚染、植生の違い、地下水低下による土壌の乾燥化等、実際の都市気象に影響を与えらると思われるすべての要因がモデルに含まれているわけではないことが原因として考えられる。また、モデルの時間変化を見ると、夜間に1925年のほうが1988年より気温が高くなっているが、これについては以下のことが原因として考えられる。市街地、住宅地に関して1925年と1988年のパラメータをそれぞれ見てみると、熱容量が1925年のほうが1988年に比べて高く設定されている。このことが地表面に入射するエネルギーが減少する夜間に影響し、結果として夜間に1925年のほうが1988年より気温が高くなったものと考えられる。以上、本モデルの現実再現性については依然として課題が残っており、今後、精度向上のために地表付近の各フラックスをより正確に表現するなどの改良や緻密なパラメータ調整が必要と思われる。なお、再現性を検証する際、1988年については大気汚染常時監視測定局データやアメダスデータ等が利用できるため、それらを用いて検証をすることも今後必要である。

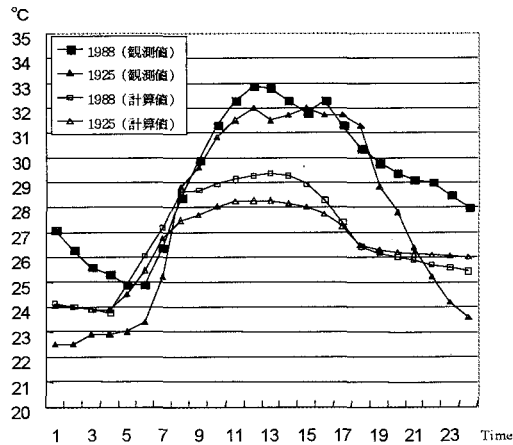


図5 観測気温と計算気温の比較（時間変化）

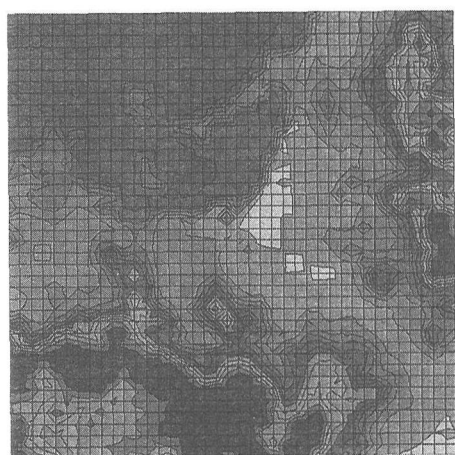
(2) 計算気温の時間変化

図6～図8に1925年と1988年の8時、10時、正午の計算結果を示す。なお、計算値を地上気象観測データと比較するため高さ1.5mの気温を示している。

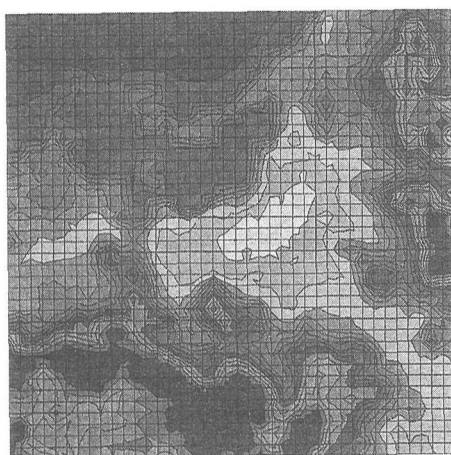
図6に示すように、1925年と1988年の8時の気温分布を比較すると、両年とも郊外に比較して市街地、都心部を中心に0.5～1.0℃高い高温域が形成されている。高温域の温度は1925年が27.5℃、1988年28.5℃である。図7から10時の気温分布を比較すると、両年とも高温域が等高線に沿う形で南東方向へ移動しており、範囲が拡大している。1988年では太宰府付近が30℃に達している。図8から正午の気温分布を比較してみると、1925年では南東部を中心に高温域が形成されているが、1988年では都心部から南東部にわたる広範囲で高温域が形成されている。

日中を通して見ると、1988年の方が1925年に比べて高温域の範囲が広く、最高温度も1～2℃程度高い。計算の前提条件から考えれば、1925年は緑地や水田の占める割合が高く、1988年は人工被覆の占める割合が高いためと考えられる。

1925年、1988年両方で南東部に高温域が形成される理由としては、市街地、都心部で暖められた空気が



(a) 1925 年



(b) 1988 年

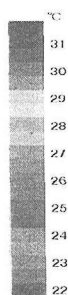
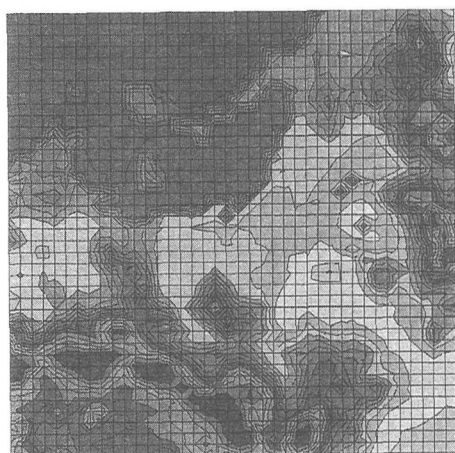
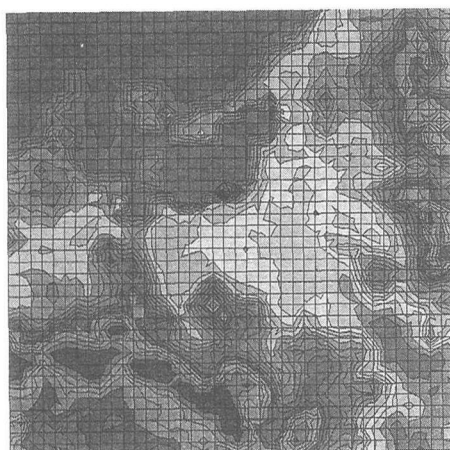


図 6 計算結果 (8 時)



(a) 1925 年



(b) 1988 年

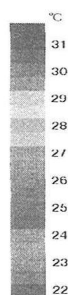
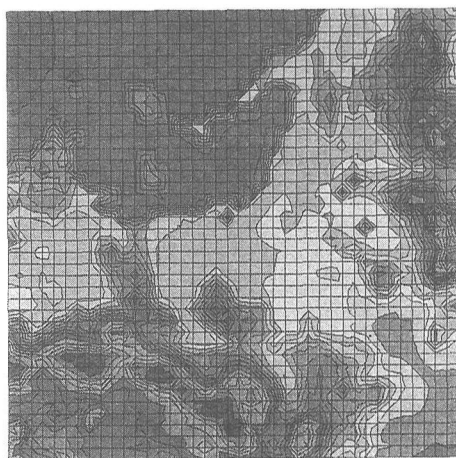
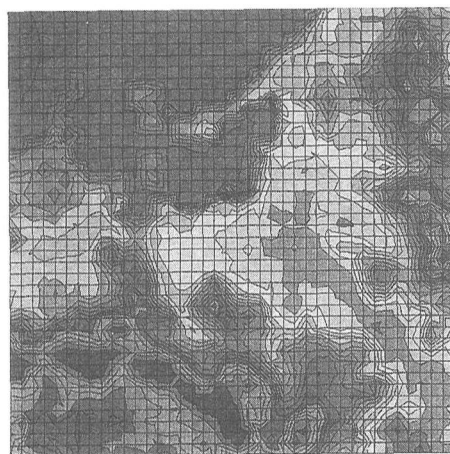


図 7 計算結果 (10 時)



(a) 1925 年



(b) 1988 年

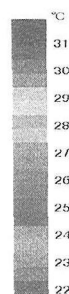


図 8 計算結果 (正午)

南東寄りの海風によって太宰府付近に移動するためと考えられる。

(3) 風向風速の時間変化

図9～図11に1925年と1988年の8時、10時、正午の風向風速を示す。風向風速は高度5.0mの分布を示している。

両年とも時間が経過するに従って海風が北西寄りの風から北寄りの風へと変化していることがわかる。1988年は、1925年と比較して10時と正午の時点で海風がより顕著に発達している。また、海風の発達は1925年に比べて1988年の方が早い、これは1988年の方が1925年よりも気温上昇が早いこと海面との

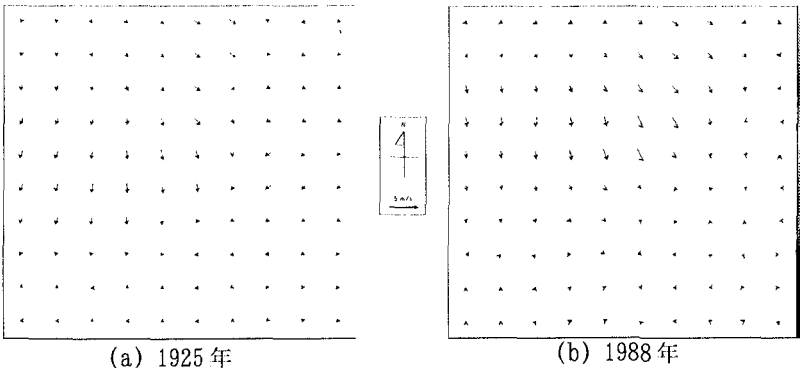


図9 計算結果（8時の風向風速）

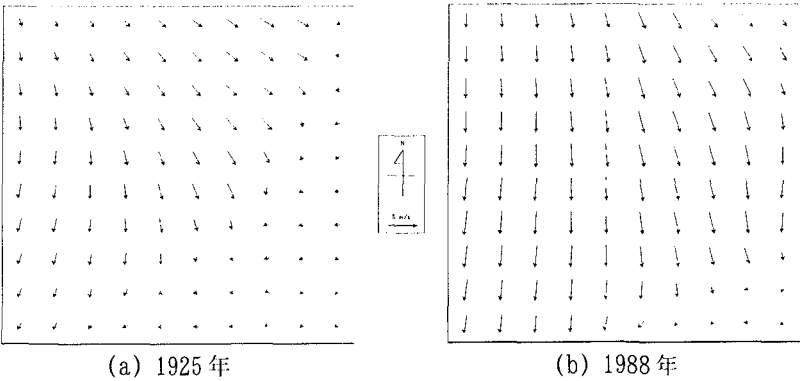


図10 計算結果（10時の風向風速）

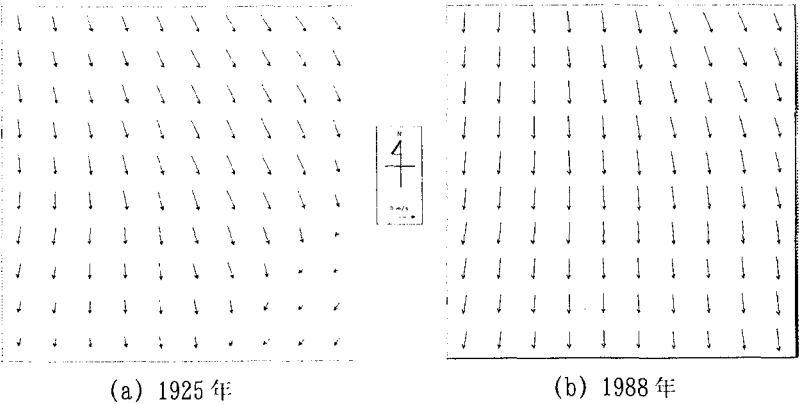


図11 計算結果（正午の風向風速）

温度差が早く大きくなるためと考えられる。

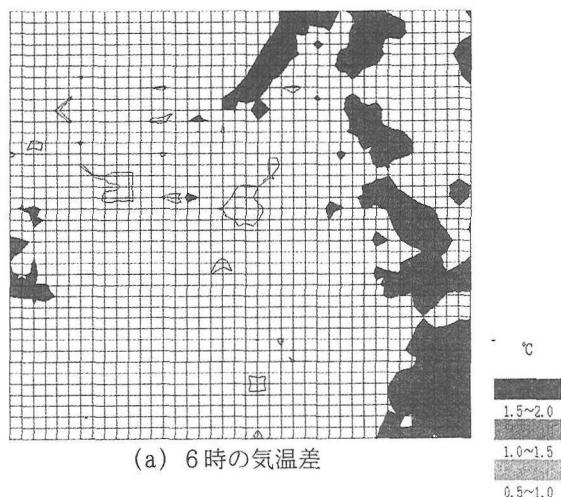
(4) 1925年と1988年の計算結果の特徴と比較

次に、両年の計算気温の差について見た。図12に6時、8時、正午の気温差(1988年の気温－1925年の気温)の分布を示す。

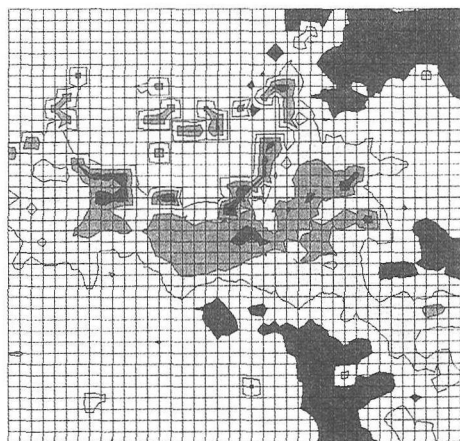
図12(a)に示すように6時の時点では両年に顕著な差は見られない。しかし8時になると、図12(b)からわかるように、福岡市域の平野部一帯で1988年の方が1925年よりも $0.5\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度高くなる。正午では都心部周辺で1988年の方が1925年よりも高くなる(図12(c))。1988年と1925年の分布を比較すると、気温の高い領域が、8時の時点で都心部から西方の郊外までより広い範囲に分布し、正午になると特に都心部を中心とした範囲に集中するようになっている。

また、海岸線付近を見ると、8時と正午で 1.5°C 以上の差が見られる。これは、埋め立てによって海岸線が前進したためと考えられる。

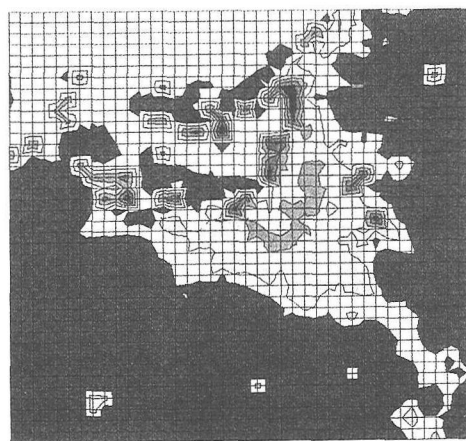
一方、山地一帯では、正午に1988年が1925年よりも約 1°C 低い値になっている。この原因として、今回の解析では1925年の緑地パラメータとして1988年の森林1と森林2の平均値を用いたことが考えられる。森林1は深い森林を、森林2は低緑地を想定しているが、1925年当時の緑地の被覆を考えれば、ほとんどを森林1と見なすべきかもしれない。実際には深い森林を計算では、低緑地と見なしていると考えれば、樹木の高さや葉の密度等が異なるパラメータを設定していることになり、このことが、地表面に到達する太陽放射のフラックス等を変化させ、山地一帯の気温上昇に結びついたと考えることもできる。この点を改善する方法としては、平均値ではなく1988年の森林1の値をそのまま使用することが考えられる。



(a) 6時の気温差



(b) 8時の気温差



(c) 正午の気温差

図12 1925年と1988年の計算結果の比較(1988年－1925年)

4. まとめ

本論文では、土地被覆状態の変化が都市気象に与える影響を検討するため、福岡市域を解析対象地域とし

て1925年はGIS、1988年はLANDSATデータを利用して土地被覆分類図を作成した。これをもとに地表面パラメータを求め、Mellor and Yamadaの3次元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適用して両年の都市熱環境の歴史的変化を検討した。計算結果は、地上気象観測データと比較することによってその再現性を検証した。

計算結果から、気温の時間変化を図示することでヒートアイランドの形状と発達の過程を視覚的に捕えることができた。また、計算による両年の気温分布と風系を比較することによって、土地被覆状態の変化が気温分布と風系等の都市熱環境に与える影響を半定量的ながらある程度評価することができた。

今後は、モデル計算で得られた1925年の都市熱環境と当時の観測気温や都市気象に関する報告等との比較や関連性などについての評価を行い、過去の都市の熱環境を多方面から考察していく予定である。同時に、人工排熱による影響や地表面付近の各種フラックスを数値モデルでより正確に扱えるように改良していくことも課題となる。また、本研究では地表面パラメータをLANDSATデータや地図情報から系統的に求めているが、現実再現性を高めるため、より精度を向上できるような改善が必要である。

1925年と1988年のデータを用いたモデル計算による結果を次にまとめる。①日中の気温は、1988年では1925年に比較して、都心部を中心に0.5～1℃上昇する。②1988年の方が1925年より午前中の海風の発達が著しい。③1988年の気温が1925年より高い領域は、8時には都心部から郊外に広範囲に及んでいるが、時間の経過とともに都心部付近の狭い範囲に縮小する。

《参考文献》

- 1) Mellor, G. L. and T. Yamada : J. Atmos. Sci., Vol.31, pp.1791-1806, 1974.
- 2) 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モデル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.
- 3) 秋山実：地理情報の処理、山海堂、1996.
- 4) 杉山寛克、持田灯、村上周三、尾島俊雄：沿岸部における都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響に関する解析、日本建築学会計画系論文集 第429号、83-90、pp.83-90、1997.
- 5) 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.
- 6) 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の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.
- 7) 水島雅文、田村英寿、丸山康樹：名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション、環境システム研究 Vol.22, pp.292-299, 1994.
- 8) 建設省国土地理院（（財）日本地図センター配布）：数値地図250mメッシュ（標高）。