

緑地が都市熱環境に及ぼす影響

本 條 綴

①

# 緑地が都市熱環境に及ぼす影響

本條 毅

## 目次

1	はじめに	1
1. 1	研究の目的	1
1. 2	本研究で用いた手法と既往の研究	2
	引用文献	7
2	都市緑地内外の微気象観測	9
2. 1	はじめに	9
2. 2	同時観測	9
2. 2. 1	観測方法	11
(1)	観測日時及び場所	11
(2)	観測項目	11
2. 2. 2	結果および考察	16
(1)	温度、湿度	16
(2)	熱収支	19
(3)	快適性	21
(4)	気温の平面分布	25
2. 3	移動観測	25
2. 3. 1	観測方法	27
(1)	測定場所、日時	27
(2)	観測項目	27
2. 3. 2	結果および考察	29
2. 4	長期観測	32
2. 4. 1	観測方法	33
2. 4. 2	結果および考察	33
2. 5	まとめ	39
	引用文献	40
3	リモートセンシングによる解析	42
3. 1	はじめに	42
3. 1. 1	ランドサットTMデータ	43
3. 2	大規模緑地の解析	43
3. 2. 1	使用データと調査地域	46
3. 2. 2	緑地の抽出	46
3. 2. 3	表面温度の算出	50
3. 2. 4	結果及び考察	50
(1)	緑地と温度分布	50
(2)	緑地間の差	57
3. 3	小規模緑地の解析	57
3. 3. 1	緑地の抽出方法	60
(1)	従来の方法とその問題点	60
(2)	ファジークラスタリングによる混在ピクセルの分類	60
(3)	植生指数の利用	66
3. 3. 2	緑地の抽出	67
(1)	使用データ	67
(2)	位置補正	69
(3)	緑地の抽出結果	69
(a)	グラントトルス	69
(b)	ファジークラスタリング	69
(c)	植生指数	71



3. 3. 3	植生指数を用いた緑被率の推定	71
(1)	使用データ	73
(2)	植生指数と緑被率の関係	75
(3)	結果	75
(4)	植生指数を用いた緑地分布図の作成法について	80
3. 3. 4	緑被率と表面温度の関係	83
3. 4	まとめ	87
引用文献		88
4	シミュレーションによる解析	90
4. 1	はじめに	90
4. 2	モデル	90
4. 2. 1	モデルの概要	90
4. 2. 2	基礎方程式	94
4. 2. 3	境界条件	95
(1)	上面、風下面	95
(2)	風上面	95
(3)	地表面	99
4. 3	風洞実験と計算値の比較	99
4. 3. 1	地表面粗度長を変化させた場合	100
(1)	風洞実験	100
(2)	結果	100
4. 3. 2	地表面温度を変化させた場合	104
(1)	風洞実験	104
(2)	結果	107
4. 4	観測例との比較	107
4. 5	ステップ状の変化	111
4. 5. 1	都市から緑地への変化	111
4. 5. 2	緑地から都市への変化	115
4. 6	パルス状の変化	123
4. 6. 1	緑地の規模が変化した場合	123
4. 6. 2	緑地の間隔が変化した場合	130
4. 7	まとめ	142
引用文献		145
5	都市緑地の微気象設計	148
5. 1	はじめに	148
5. 2	緑地の規模、配置と影響の範囲	148
5. 3	緑地の素材	151
5. 4	季節差	151
引用文献		152
6	総括	153
6. 1	要約	153
6. 2	今後の課題	155
6. 3	まとめ	157
引用文献		158
謝辞		159
本研究に関連する著者発表論文および資料など		160



## 1 はじめに

### 1. 1 研究の目的

都市化が進むにつれ、熱収支、水収支、大気組成、風系などが改変され、都市気候が形成されることは多くの研究者により指摘されている（尾島、1975、河村、1977a、1977b、西沢、1977、Landsberg、1981）。特に、都市の高温乾燥化（ヒートアイランド現象）により住環境が悪化する事態は現在どの都市でも見ることができる。

周囲がコンクリート等の物質で覆われエネルギー消費も多い都市の中で、都市緑地は透水性の土壤で覆われ蒸発散の行なえる数少ない面である。樹木の蒸発散による潜熱移動が大きいため、夏期に公園内が涼しいことは日常よく経験することであり、リモートセンシングデータの熱画像を見たとき、市街地の高温と都市緑地の低温の差は非常にはっきりとしている。都市全体からみても、緑地には、全く緑地がない場合に比べ、湿度を上昇させ蒸発冷却により都市全体の温度を下げる機能もあると考えられる。このように都市緑地は、冷熱源として、また乾燥を防ぐ意味からも都市気候を緩和する重要な役割があり、今後一層その役割は重要性を増すと考えられる。

このような都市緑地の重要性は、福井（1956）、大後（1977）、丸田（1983）などの研究者により指摘されているが、定性的な推測の域を出ていない。また、「緑地からの冷気のにじみだし現象」という言葉もよく用いられるが、緑地によってどの程度の範囲の気温が下がるのかについては不明な点が多い。緑地の規模とその周辺の気温低下の関係についての従来の研究は、丸田（1972）が東京都内の公園での微気象観測の結果から、推定を行った例があるに過ぎない。都市公園や都市水面の環境的な効果については近年、さまざまな分野で関心が高まっており、造園（丸田、1983、近藤ら、1983、1984）、建築（片山ら、1987、成田、1987、村川ら、1988）などの分野でも研究が行われている。しかし、どの程度の規模の公園があれば、どの程度の範囲までその公園が影響を及ぼすかといった定量化までは行いうに至っていない。そこで、本研究では緑地の都市熱環境に及ぼす影響について、定量的な検討を行うことを目的とする。

緑地の効果には、気象的な緩衝効果をはじめさまざまなものがある。品田（

1980) は、人間の本能的な要求として、緑地の必要性を示唆している。緑地の持つ機能には、例えば表1-1に示すようなものがある(丸田、1983、井手、1986)。これらの機能は、緑地が存在するため周囲に及ぼす効果である存在機能(効果)と、緑地を実際に利用することによる効果である利用機能(効果)に大きく分けることができる。従来の緑地計画では、利用機能に重点が置かれているが、都市環境を考えた場合、今後存在機能をより重視すべきであることがたびたび指摘されている(渡辺、1974、丸田、1983)。しかし、評価の難しさなどから、存在機能は緑地計画に反映され難いのが現状である。本研究の目的は、緑地の気象的な緩衝効果という存在機能を明かにすることであり、緑地計画を立案するための基礎資料という面でも本研究は寄与できるものと考えられる。

## 1. 2 本研究で用いた手法と既往の研究

地表面被覆が周囲と異なるために、特異な気象の状態が見いだされるのは、ヒートアイランド現象と都市緑地周囲の微気象との共通点である。ヒートアイランド化とともに緑地の熱的な重要性が増すという面からも密接な関係がある。ヒートアイランドに関する研究は、大きく分けて、測定とシミュレーションに分けられるが、本研究の都市緑地の影響の研究についても、測定とシミュレーションという枠組みをとった。しかし、ヒートアイランドと比較して、都市緑地の場合、周囲の温度の高低の差の関係が逆であり、スケールの差も相当小さく、従来用いられている手法をそのまま用いることはできない。

緑地の熱的な影響は、都市内の大部分の緑地の大きさが数m四方から数km四方であり、その影響の及ぶ範囲も同程度あるいはそれ以下であることを考えれば、スケールの的には小規模な気象現象であり、微気象の研究の一つとして位置づけられる。対象が小規模でも、現象解明のための解析を行う場合、解析のスケールも同様に小さくとる必要があるため必ずしも測定、シミュレーションが容易になるわけではない。

本研究の手法には、表1-2に示すように大きく分けて三つのものがある。すなわち、現状の把握を行うための微気象観測、リモートセンシングデータの利用、予測のための数値モデルによるシミュレーションである。それぞれの手法の特

表 1 - 1 緑地の機能

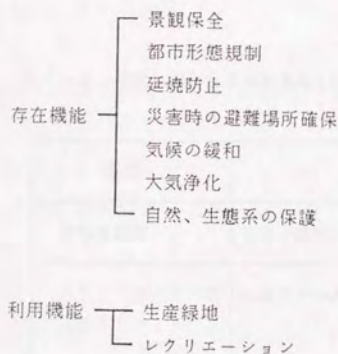


表 1 - 2 研究の構成

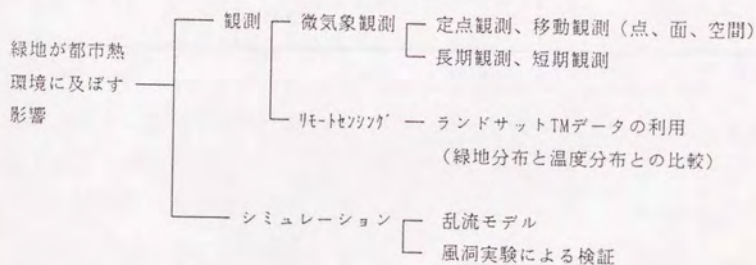




表1-3 研究に用いた手法の長所と短所

手法	長所	短所
微気象観測	実状が詳細にわかる	測定箇所、点数に制限がある
リモートセンシング (ランドサット)	広域のデータが一度に得られる	温度情報は、表面温度のみ 良質データが少ない 解像度がやや粗い
シミュレーション	さまざまなケースを想定し、予測 を行える 観測データの空間、時間的な補間 が行える	実測データによる検証が必要 完全な予測は難しい

徴を、表1-3に示す。現在の技術水準では、どのような手法を用いても得られる情報はかなり限定されているが、近年の測定技術の向上や、予測モデルの進歩の成果をできるだけ取り入れ、リモートセンシングデータ、シミュレーションモデルの利用など行ったのが本研究の特徴といえる。以下に、従来の主な研究や本研究の特徴について述べる。

都市緑地の気象測定については、ヒートアイランドの観測の中で低温域であることが観測されていたが、都市緑地の環境に着目した研究は少ない。丸田(1973)が東京都内数か所の公園緑地で気温、湿度の測定を行い、植栽の構成の差により異なる気温、湿度分布が形成されることを示したのが先駆的な例である。都市緑地の熱収支の測定例も少なく、Oke(1979)の例がある程度である。どの測定の結果も、緑地が周囲より低温であることや都市の湿度低下防止に貢献していることを示唆しているが、その程度については不明確な点が多い。そこで本研究では、現象の把握や、従来の測定に加えより多くのデータの蓄積のために微気象観測を行った。また、これまで余り行われた例のない移動観測や長期にわたる観測なども行った。

緑地の熱的な影響を評価するためには、緑地内外における任意の位置の温度、湿度、フラックスなどが、時間的、空間的にも高密度かつ長期の測定のできる必要がある。しかし、従来の微気象観測法では、測定点は同時に数点程度とるか、移動観測である範囲をカバーすることしかできず、特に空間的な分布の測定とそのスケールや、時間的な密度、期間に限界がある。したがって、一般的な緑地の影響を導き出すのは、リモートセンシングやシミュレーションへ期待せざるを得ない。

微気象観測から得られるのは、ある一つの公園とその周囲のデータの例が多く、広域に分布する緑地の温度分布などの把握は労力的に難しい。またシミュレーションも現在では広域にわたる計算は難しく、一つの緑地あるいは数個の緑地の周囲のみのモデル化しか行えない。より広域の熱的なデータを得るためには、リモートセンシングデータの利用が現実的な唯一の方法といえる。衛星リモートセンシングによる緑地環境の解析は、ランドサット5号のTMデータにより初めて可能になったため、比較的新しい分野であり研究例も少ない。本研究では、緑地分布と表面温度分布の関係の解析を行った。また、その前処理

である緑地分布の抽出についても研究例が少ないため、本研究ではいくつかの手法の開発を行った。

緑地の影響の評価は、測定の難しさからシミュレーションに頼らざるを得ない部分が多い。流体力学や伝熱の理論に基づくシミュレーションモデルは、天気予報に用いられる数値モデルや、建築での室内外の気流シミュレーションなど多くの分野で応用されているが、各分野とも適用にあたっては、その分野の特色に合ったモデルの細部の構築が必要である。都市緑地の影響の特徴は、スケールが小さいことや、温度分布の影響が大きいことなどである。

都市緑地の影響に着目したシミュレーションは、非常に例が少ない。本條(1982)、Moriyama and Fukumoto(1989)などにより、計算が行われた例があるが、モデルの定式化、モデルの検証などについて検討すべき点が多い。本研究では、対象のスケールから乱流モデルの適用を試み、温度分布なども予測できるようにした。風洞実験などによる検証を行い、緑地が存在した場合の影響を、緑地の規模や植栽の違いよりどの程度の差があるかなどについて、観測などの結果を参考にしつつ、乱流モデルにより推定した。



引用文献

- 大後美保, 1977: 微気象の探究, 日本放送協会, 253pp.
- 福井英一郎, 1956: 都市における気温分布と緑地, 都市問題, 47, 11-17.
- 本條毅, 1982: 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響, 東京大学修士論文.
- 井手久登, 1986: 造園学 (1. 総論 造園学の対象), 朝倉出版, 23.
- 片山忠久, 石井昭夫, 西田勝, 堤純一郎, 森川明夫, 橋田光明, 1987: 水面を有する市街地の熱環境に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 372, 21-29.
- 河村 武, 1977a: 都市気候の分布の実態, 気象研究ノート, 133, 26-47.
- 河村 武, 1977b: 都市の大気環境, 東大出版会
- 近藤三雄, 間仁田和行, 横山容三, 小沢知雄, 1983: 樹木, 芝生の微気象調節効果に関する実証的研究, 造園雑誌, 46(3), 161-175.
- 近藤三雄, 鈴木誠孝, 1984: 表面温度から見た都市植生の存在効果に関する実証的研究, 造園雑誌, 47(1), 1-15.
- Landsberg, H. E., 1981: Urban Climate, Academic Press, 275pp.
- 丸田頼一, 1972: 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響, 都市計画, 69・70 合併号, 49-77.
- 丸田頼一, 1973: 公園緑地内の気象, 造園雑誌, 37, 33-55.
- 丸田頼一, 1983: 都市緑地計画論, 丸善, 344pp.
- Moriyama, M. and Fukumoto K., 1989: Effect of Green Area to Urban Air Temperature by Numerical Solution, Proc. of 2nd Int. Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, to be published.
- 村川三郎, 関根毅, 成田健一, 西名大作, 1988: 都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 393, 25-34.
- 成田健一, 1987: 市街地における地表面蒸発量の評価に関する基礎的研究, 広島大学博士論文.
- 西沢利栄, 1977: 熱汚染, 三省堂
- 尾島俊男, 1975: 熱くなる大都市, 日本放送協会,

Oke, T. R., 1979: Advectively-assisted evapo-transpiration from  
irrigated urban vegetation, *Boundary-Layer Meteor.*, 17, 167-173.

品田 譲, 1980: ヒトと緑の空間, 東海大学出版会, 209pp.

渡辺 達三, 1974: 緑被の気温緩衝効果と緑度, *造園雑誌*, 38, 25-28.

## 2 都市緑地内外の微気象観測

### 2. 1 はじめに

本章では、緑地の影響の程度について実態を把握するために、緑地と周囲の環境要素の測定を行った結果を示す。

従来の都市緑地の微気象に着目した測定例としては、まず土屋(1972)が夏期晴天日に赤外線放射温度計をヘリコプターに積み、上空から都内の地表面温度の測定を行なっている。その結果公園内での地表面温度が著しく低く、これによる風下側での冷却効果があることを示唆している。また、丸田(1973)は都内数か所の公園緑地で気温、湿度の測定を行い、植栽の構成の差により異なる気温、湿度分布が形成されることを示している。オアシス効果については、Okada(1979)がヴァンクーバー市内の住宅地にある芝生上での熱収支測定で、移流の影響により純放射量よりも蒸発散による潜熱輸送量の方が大きい場合があるとしており、このような緑地の存在が都市の乾燥化を防いでいると結論づけている。その他、緑地内外での気象測定を行った渡辺(1974)、片山ら(1989)などの測定結果も、緑地の低温性や湿度低下防止の効果を示唆している。

本研究で行った観測は、都市公園とその付近の都市部での熱収支などの同時観測、気温分布の観測、地表面温度の測定、気温および湿度の移動観測、緑地微気象の長期観測などである。それぞれの観測を行った日時、場所を表2-1に示す。同時測定を行なった都市部と公園間の距離も同表に示す。

このような実スケールでの微気象観測では、様々な制約がある。例えば、労力などの制約から測定点数が限られ現象の把握が十分には行えないこと、観測の実施回数も限られること、評価を行うのに十分な長期の観測ができないことなどがあげられる。したがって、観測の結果のみから緑地の影響の定量的な評価を行うのは難しい。本章では得られた結果から、緑地の影響の程度の概要を把握し、現象についての定性的な分析を行う。

### 2. 2 同時観測

緑地の環境改善効果の程度を知るためには、緑地自体の環境と共に緑地の周囲の環境も知る必要がある。そこで、東京都内のいくつかの公園とその周囲の



表2-1 観測場所および日時

	観測場所	日時	緑地面積	測定点間の距離
同 時 観 測	赤塚公園（板橋区） 高島平団地	1980年11月28日～28日 1981年9月21日～23日	9ha	800m
	小石川植物園（文京区） 東大農学部	1980年12月3日～6日	16ha	1400m
	代々木公園内部（渋谷区） 代々木公園外部	1981年9月15日～17日	124ha （明治神宮含む）	300m
長 期	東大農学部付属多摩農場 （東京都田無市）	1986年8月～1987年1月	33ha （演習林含む）	
移 動	東大農学部付属多摩農場 （東京都田無市）	1987年1月18日～1月23日 1987年8月11日～8月17日	33ha （演習林含む）	

おもにコンクリートなどで覆われ建物に囲まれた市街地（以下、都市部とよぶ）で、熱収支を中心に各種環境要素の同時比較測定を行ないそれぞれの熱的特性を明らかにしようと試みた。

## 2. 2. 1 観測方法

### （1）観測日時及び場所

観測箇所のうち、高島平団地（図2-1）と東大農学部構内（図2-2）はそれぞれコンクリートとアスファルトで覆われている。また、周囲はコンクリート造りの建物で囲まれている。一方赤塚公園（図2-1）と小石川植物園（図2-2）は、周囲に大きな建物の無い比較的大きな公園である。赤塚公園は面積約8.5ha、園内に種々のレクリエーション施設があり平坦で樹木は少なく主に芝生に覆われている。小石川植物園は面積約16.1ha、変化に富んだ植生で樹木も多く自然緑地に近い状態といえる。園内の南西側は、北東側よりも約10m低くなっており池なども点在している。

代々木公園は、都内最大の緑地であり広大な芝生、多くの樹木が存在する。隣接する明治神宮も含めた面積は約124haである。図2-3に示すように代々木公園内部の観測点と、外部の観測点を設けた。

以上の観測箇所内で、周囲が開けており建物、樹木などの影響が少ないと思われる場所を一箇所選び主観測点とした。

### （2）観測項目

主観測点では、熱収支測定や種々の環境要素の測定を行った。主な観測項目および使用した装置を表2-2に示す。主観測点での測定と共に、赤塚公園、高島平団地、小石川植物園、東大農学部構内の冬期観測では、地上1.5mの気温及び湿度の水平分布も測定した。各観測箇所とも20箇所程度の測定点を数十m間隔で設け、数時間毎に測定を行なった。

また、ふく射の影響も含めた温度指標を測定するため、黒く塗ったビンボン玉の中に熱電対を入れた自作のグローブ温度計を用いた。この値は、擬似グローブ温度と呼ぶことにする。

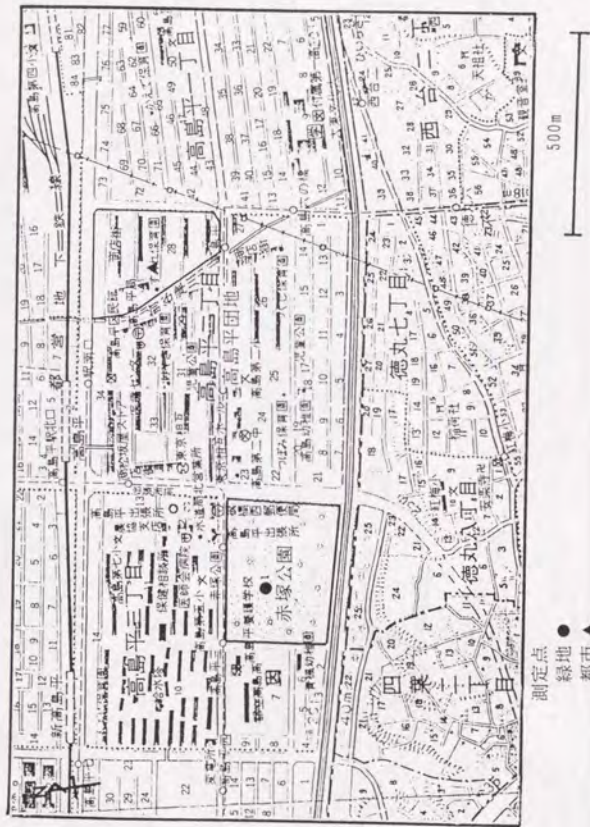


図2-1 高島平団地および赤塚公園の測定点



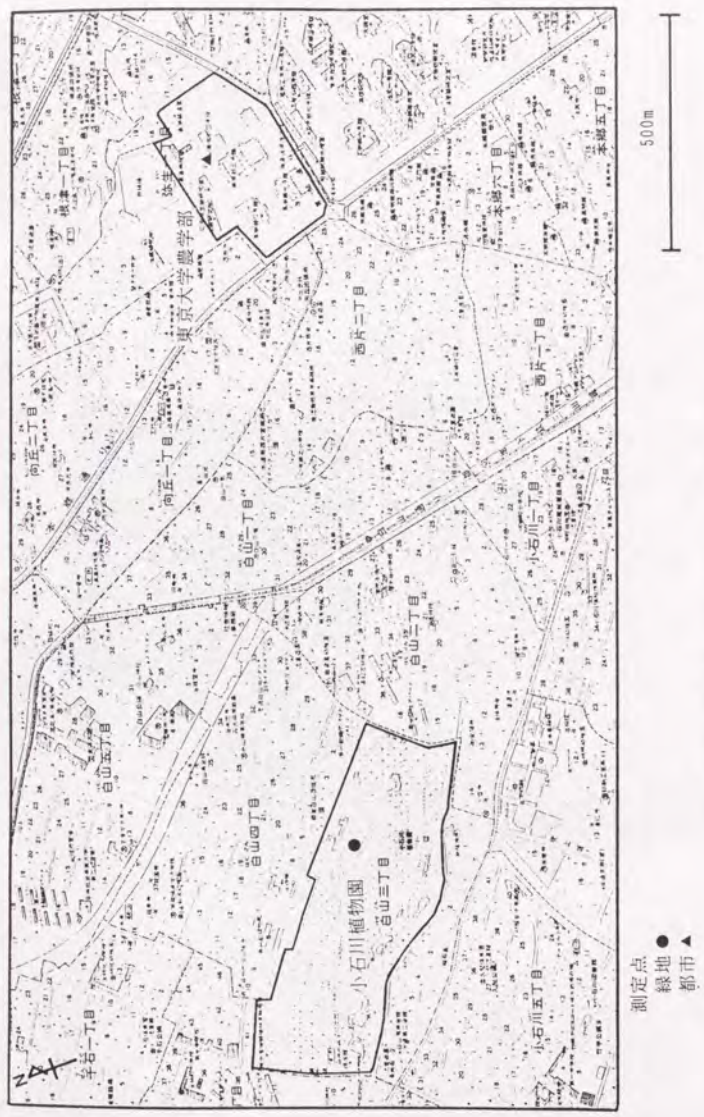


図2-2 東京大学および小石川植物園の測定点

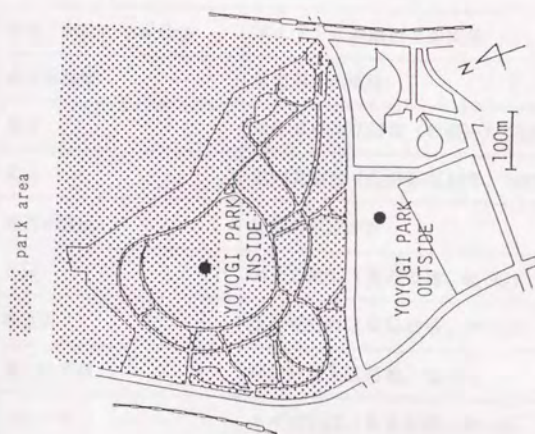


図2-3 代々木公園内外の測定点

表2-2 観測項目および使用した機器

観測項目	測定器（メーカー、型式）
気温、湿度の垂直分布 （高さ0.5m, 1.5m, 3.5m）	アスマン式通風型乾湿度計 熱電対式乾湿度計
気温、湿度の平面分布	アスマン式通風型乾湿度計
地表面温度	熱電対式温度計
風速	三杯式風速発信器（牧野応用測器、AG750）
風向	風向発信器（牧野応用測器、VR036）
地表面温度	熱電対式温度計
日射	ネオ日射計（英弘精機、MS-42）
純放射	放射収支計（英弘精機、CN-11）
地中伝熱量	熱流板（英弘精機、CN-9L）
アルベド	ネオ日射計（英弘精機、MS-42）
天空率	魚眼レンズ付カメラ （日本光学工業、OPFisheye-Nikkor10mm f/5.6）



## 2. 2. 2. 結果および考察

### (1) 温度、湿度

郊外に比べて都市部での気温の上昇は都市気候の大きな特徴である。両者の気温差は、河村(1977)による東京での観測例では夜間最高 $10^{\circ}\text{C}$ (1976年3月7日午前3時の例)にも達している。原因としては、エネルギー消費量の差や蒸発散量の差、風系の違いなどがあげられている。またヒートアイランドの強度と、天空比とは負の相関、非透水性面積比とは正の相関があることが、朴(1987)により指摘されている。都市緑地の規模は郊外の緑地などに比べればきわめて小さなもので、ヒートアイランド現象とはスケールがかなり異なるが、都市と郊外間に見られるような差が、都市緑地と周囲の都市部の同時観測の結果からも十分に見ることができた。

図2-4は、小石川植物園と東大農学部構内の1980年12月3日16時から5日16時までの地上1.5mの気温と湿度の経時変化である。両者の観測点間の距離は約1.4kmあり、地上レベルでは小石川植物園が東大農学部構内に及ぼす影響はほぼ無いと考えられる。図2-4よりわかるように一日目の夜には両観測点の気温差はほとんど無いが、対照的に小石川植物園で二日目には夕方から翌日の明け方まで急激な気温の低下が見られる。両日の夜間の純放射量はほぼ等しく放射冷却の程度は同程度である。この差は、一日目の風速が $2\text{m/s}$ 前後だったのに対し、二日目はほぼ無風状態であるためできたものと考えられ、一日目の夜間は、無風ならば冷却され安定状態にある緑地上の冷気が、風により緑地外にもちだされ気温差がほとんど無くなったと推察される。二日目の夜間にも、小石川植物園でところどころ気温上昇が見られるのは(丸で囲んだ部分)、この時刻に風速がかなり大きくなったためである。

図2-5は、図2-4の夜間における小石川植物園と東大農学部構内の気温差と、同時刻の小石川植物園内の風速との関係を示したものである。無風状態では、両者の気温差は $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 程度であることが多いが、風速が $1\text{m/s}$ 以上になるとその差は小さい。逆に、小石川植物園の周辺では $1\text{m/s}$ 程度の風速があれば、公園内の冷気の影響を受けるとも考えられる。

都市緑地での気温低下は、今回観測を行ったすべての公園で夏冬を問わず見られたが、風速の影響のほかには公園の規模が大きい程気温の低下も大きい傾向

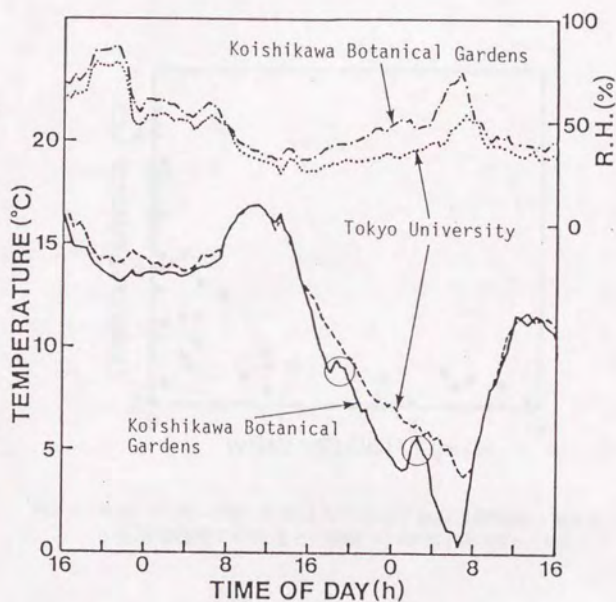


図2-4 東京大学構内および小石川植物園の気温、湿度の経時変化  
(1980年12月3日16時～5日16時)

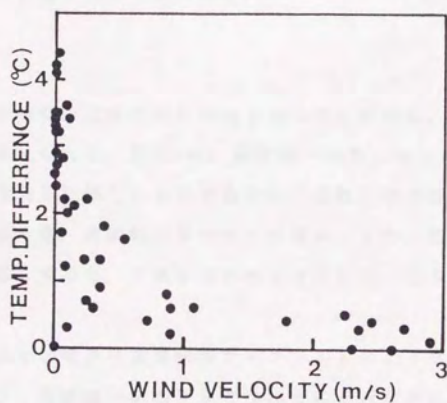


図2-5 夜間（17時～7時）の東京大学構内と小石川植物園の気温差と小石川植物園での風速との関係（1980年12月3日～6日）



が見られた。また裸地、芝生の占める割合の大きい公園よりも、蒸発散の活発な樹木の多い公園の方が気温の低下は大きいようである。

相対湿度についても気温と同様の差を、図2-5に見ることができる。他の観測箇所でも公園内の相対湿度は常に都市部を上回っている。しかし、絶対湿度で比較した場合には両者の差は極めて小さくなる。コンクリートなどの不透水面上にある都市部の観測点でも、緑地と同程度の絶対湿度が維持される理由としては、都市部の観測点付近にも樹木が存在することや、観測を行なう数日前に降雨があり大気が乾燥していなかったこと、またより大きなスケールで郊外から都市への移流の影響などが考えられる。

## (2) 熱収支

緑地と都市部の気温、湿度の差が形成されるのと同様に、各観測点での熱収支にも大きな差が見られる。図2-6は、昼夜各一時刻における都市部と公園での熱収支各項の瞬時値を比較したものであるが、公園と都市部のもつ特徴がよく出ている。地中伝熱量、純放射はセンサーの値を、また、顕熱、潜熱はボーエン比法により分離し求めた。計測箇所が水平方向に均一でなく、ボーエン比はかなり変動した。

都市部の観測点では地表の被覆面がアスファルトのような不透水性で含水率の低い物質であり、潜熱輸送が地表面ではほとんど行なわれないはずである。したがって、日中地表に入る日射は顕熱輸送によるか地中伝熱として放出されるものが主で、都市部の地表面温度はきわめて高くなっている。成田ら(1984)の測定によると、アスファルトの温度伝導率は土壌よりも高い。そのため、都市部での地中伝熱量は土壌で被覆された緑地よりも非常に大きな値となっている。

夜間は、都市部、公園とも日中に地中に蓄積された熱が放出されるため地中伝熱量は、負の値となる。都市部では日中の地中への蓄熱量が大きいため、夜間の地中から放熱される量が大きく、日中同様潜熱輸送があまり行われなため地表面温度は高くなる。一方、公園内の観測点は芝生であり湿潤面なので、潜熱輸送である程度熱が奪われ地表面温度は比較的低くなっている。以上のような熱収支の特性は、Landsberg(1979)が、市街地と郊外での熱収支を比較した

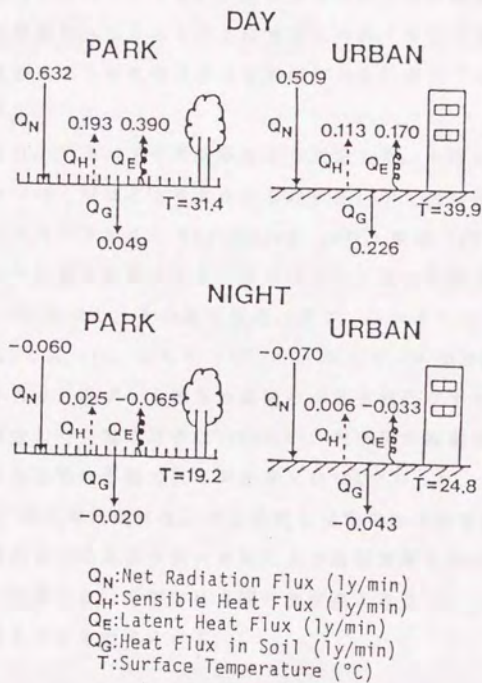


図2-6 都市（高島平団地）と緑地（赤塚公園）の昼夜の熱収支  
 (DAY: 1981年9月23日13時、NIGHT: 1981年9月23日0時30分)

結果でも同様に見られるものである。

水分の蒸発は少ないはずの都市部の地表面だが、前述のように地表付近でも緑地と同程度の絶対湿度となり、図2-6のように接地境界層内では潜熱輸送が都市部においても行なわれているという結果となった。その理由として都市部でも樹木などの蒸発源がかなりあることが考えられる。また、上空では郊外、海からの水分の移動により地表面ほどは低湿度ではないので、その影響があることも考えられる。

今回の観測では、アルベドや天空率なども測定した。一般には都市を構成する物質のアルベドは土壌などより大きいものが多いが、飛行機等を使用した測定例では都市のアルベドが低い(Landsberg, 1981, 尾島, 1980)。今回の測定結果では日中の平均値を比較すると、アスファルト面だけがやや黒っぽいためか小さな値(約15%)を示し、その他の裸地、芝生、コンクリート面等では同程度の値(約25%前後)であった。したがって、小さなスケールでは、アルベドの影響は様々な場合があり、必ずしも緑地の温度を下げる傾向があるとは言えない。天空率は今回測定した公園ではほぼ100%近い。都市部の観測点は比較的広々とした場所であるが建物の影響のため天空率は約70%であった。したがって建物が約30%を占める。晴天の夜間には、天空温度と建物の表面温度の差は数十℃にも達するので、建物からの長波放射の有無により放射環境はかなり異なってくる。都市部のビルの谷間では、天空率は今回の測定点より低くなり、気温や体感温度を上げる要因となると考えられる。

### (3) 快適性

公園が特に周囲の環境に比べて快適であると思われる夏期の公園と都市部の同時比較観測の結果より、快適性の見地からみた両者の差を検討した。

暑寒感には、気温、湿度、ふく射、風速などの環境要素が関係するが、屋外環境での快適性についての研究は、屋外では放射や風速の影響が室内に比べて非常に大きく、また人の代謝量もまちまちであるなどの問題があるため、きわめて少ない。一方、室内環境での快適性に関しては、Yaglouの有効温度や修正有効温度、Gaggeの新有効温度、標準有効温度、標準新有効温度など数多くの温熱環境指標が提案されている。これらの指標については、新田ら(1981)にくわ



しい。

丸田(1972)は、気温、湿度のみの関数である不快指数を快適感の指標として用いた。気温が $30^{\circ}\text{C}$ を越す夏季には、緑地内の低温は不快指数を下げる方向に、高温は不快指数を上げる方向に作用するが、不快指数分布は公園内の方が低い値となることを示した。石井ら(1988)の研究は、屋外での快適感に関する数少ない実験的研究の一つであるが、人体の温熱感覚の申告実験をした結果では、快適感と標準新有効温度(Gagge et al., 1976)の相関が高く、湿球グローブ温度、不快指数などの指標は相関が低く、屋外の快適感の指標として適当でないと報告されている。

本研究では、室内用の指標であるが、気温、湿度、ふく射、風速などを考慮し標準新有効温度と似た指標である標準有効温度(Nishi and Gagge, 1977)を屋外にも適用した。

解析に用いたデータは、代々木公園内外で九月中旬の観測で得たものであり、七、八月の日最高気温が $30^{\circ}\text{C}$ を越え公園内でさえ暑く感じる時期よりも、むしろこの時期の方が公園内外の快適感の差が明らかになると考えられる。測定期間中の天気は、ほぼ晴れであった。

図2-7に公園内外での気温及び擬似グローブ温度の変化のパターンを示す。擬似グローブ温度は日中は日射の影響を受け気温よりも高い値をとり、夜間は夏期の場合放射の影響は比較的小さいため気温とほぼ同程度の値となる。公園内外の擬似グローブ温度差は気温差にくらべ大きくなっている。

このような差の原因は、主に長波放射量の差によるものと考えられる。日射量は公園内外とも大差ないが、測定日の地表面温度は都市部が公園に比べ $5^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$ 高く、都市部の地表面からの長波放射は公園内より大きな値をとり、建物からの長波放射の影響もある。したがって、人間にとって公園と都市との温度差は、気温差以上に大きく感じられるであろう。

図2-8は、図2-7の代々木公園内部での測定結果に、放射、湿度、風速を考慮して算出した標準有効温度を示したものである。必ずしも最快適とは言えないが、日中は公園内の日なた、日陰ともに都市部に比べて快適域に近い状態であると言える。

公園などの場合、そこに居住するわけではないので、必ずしも緑地内が快適

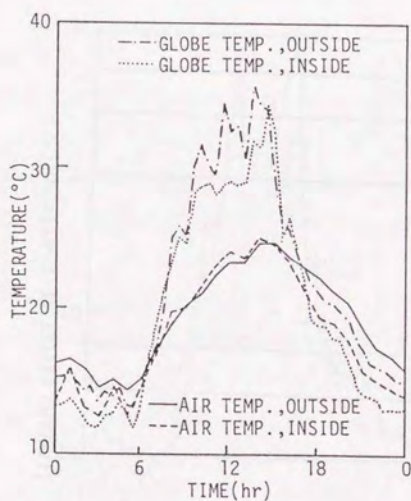


図2-7 代々木公園内外での気温、グローブ温度の経時変化  
(1981年9月16日)

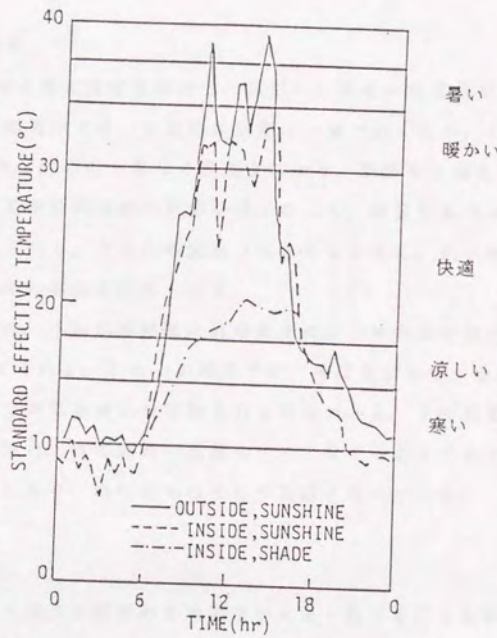


図2-8 代々木公園内外での標準有効温度の経時変化  
 (1981年9月16日)



域かどうかはあまり重要ではないと考えられる。むしろ、入園したときの涼感のような一過性の快適感が、室内に比べ重要であると言えるだろう。図2-8のような差があるとき都市部から緑地に入った人は、かなりの標準有効温度の変化を経験することになる。不快域から快適域への変化なので、一過性の快適感が期待でき、このような見地からここに示したような環境の公園は有効な空間であると言えるだろう。

#### (4) 気温の平面分布

図2-9は小石川植物園と東大農学部構内での典型的な昼夜の気温分布を示したものである。東大農学部構内では、全般的に気温は一様であったが、A点の気温に特徴が見られる。A点は他の点と異なり芝生上にあり、周囲を三階建の建物に囲まれている。従って風や放射冷却の影響を受けにくく、蒸発散もアスファルトよりも大きいと考えられる。そのため図から明らかなように、他の観測点と比べて日中の低温、夜間の高温が認められる。

これとよく似た傾向は、小石川植物園の植栽密度の高い林の中の測点であるB、C、D点等でも見うけられる。これらの測点では、熱収支が急変する位置が樹冠部であるため、林内での気温変化が緩和される傾向がある。また夜間には林内の暖かい空気が外に流れ、林の周囲の気温もやや上昇するようである。植物園の南西側は低い位置にあり、池などもあるため低温となっている。

#### 2. 3 移動観測

同時観測では、緑地と周囲の都市部の熱環境が大きく異なることが明らかとなったが、緑地が低温である影響がどの程度の範囲まで及ぶかについては明かではなかった。緑地の影響は、ある程度は気温の平面分布などから推定することができる。気温の平面分布を求めるためには、一定間隔毎に測定点を配置し、測定値を補間して求める方法や、自動車などに測器を載り移動観測を行なう方法がある。移動観測は、ヒートアイランドの観測など広範囲の気温分布などの計測に有効な手段でありよく用いられる(佐橋、1983)。

本研究では、観測が容易であることや、測定コース上の気温、湿度などの連続的な変化を計測できることなどから、オートバイや自転車にデータレコーダ

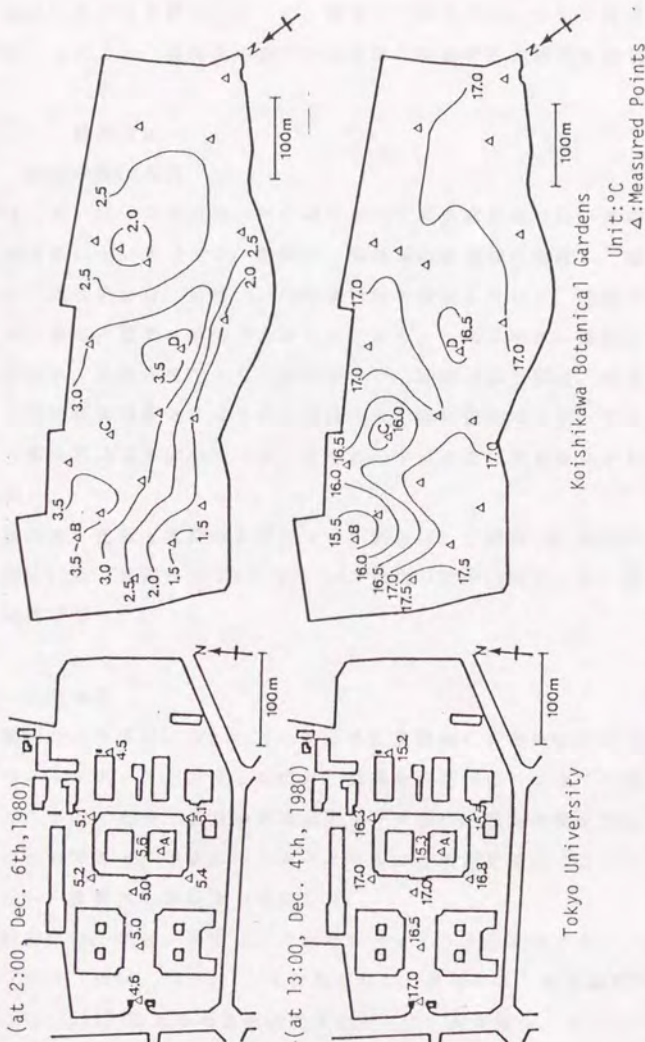


図2-9 東京大学構内および小石川植物園の昼夜の典型的な気温分布

および測器を積み移動観測を行った。緑地から都市部にかけての温湿度分布を測定することにより、温湿度の変化から緑地の影響が及ぶ範囲を推定した。

### 2. 3. 1 観測方法

#### (1) 測定場所、日時

観測は、図2-10に示す田無市内の東京大学付属多摩農場（以下農場）とその周辺の都市部について行った。農場は、田無市の北東部に位置し、総面積23.5 haであり、北西側には、面積9.1haの演習林と隣接している。農場内は、大部分は畑地、水田、裸地、草地で占められており、一部に樹木、道路、建物がある。演習林は、常緑樹を主とした高木が多い。周囲の都市部は、南側が交通量の非常に多い新青梅街道をはさんで田無市街、他は住宅地となっている。農場の南側の都市部は樹木は少ないが、住宅地の中にはまだ畑も散見され、樹木も比較的多い。

移動観測は、冬期と夏期の2回行った。測定は、冬期が1987年1月18日～1月23日の間に22回、夏期が同年8月12日～8月15日の間に16回行った。測定間隔は、3～6時間毎であった。

#### (2) 観測項目

移動観測のコースは、図2-10に示すように農場内から田無駅前までの間である。このようにコースを設定したのは、農場から都市部へかけての連続的な変化がよくわかることや、過去の気象測定データから、風向が南北方向である場合が多いためである。冬期には、オートバイに計測器を積んでこのコースを低速で走行し、夏期には自転車を使用した。

移動観測では、気温、湿度は、それぞれサーミスタ温度センサー、高分子膜湿度センサー（神栄、THT-A）により測定した。夏期には、放射温度計（松下通信工業、ER-2007）により地表面温度も測定した。測定値は、データレコーダー（SONY、FC-14）で記録した。観測では温湿度計のセンサー部を、高さが地上1.5mになるように、前部ハンドルに取り付けた。



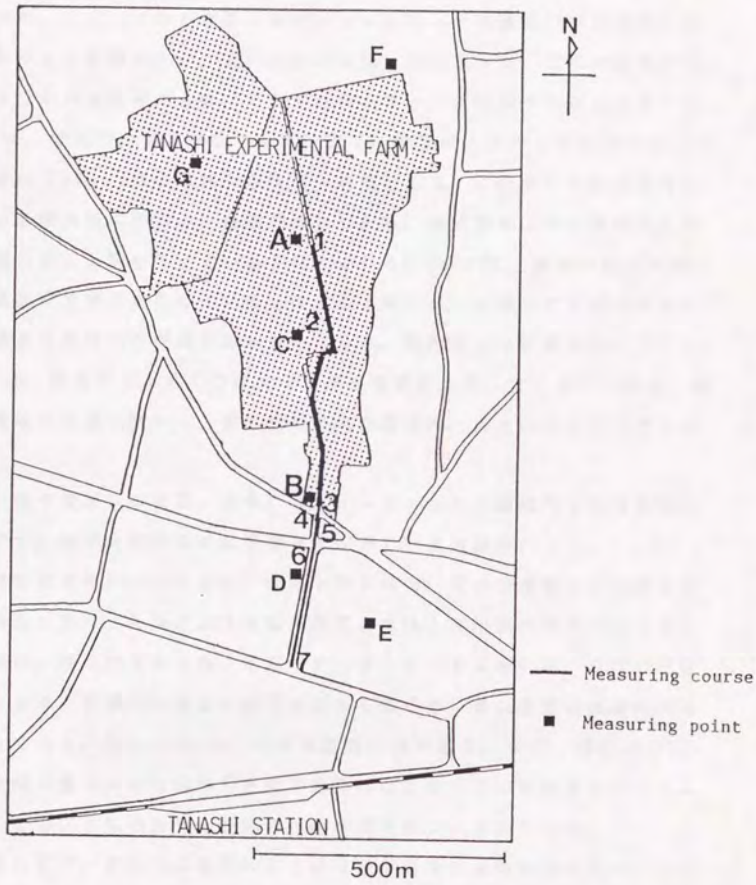


図2-10 田無農場の測定点および測定コース

## 2. 3. 2 結果および考察

冬期の移動観測の結果では、主に晴天日の夜間で風速 $2\text{m/s}$ 以下の微風または無風状態の時に、図2-11のように農場内の低温高湿と都市部の高温低湿ははっきりと現れた。このようなときの、測定コースに沿った気温及び相対湿度の変化は、風向などの影響により、図2-11の模式図に示すような、三つの典型的なパターンに分かれると考えられ、それぞれのパターンに相当する測定結果を示す。(a)では、農場内の気温は低くほぼ一定で、農場の入口から都市部の間で気温が漸時変化し5点、6点の道路からはほぼ一定値となる。このデータの測定時には、農場から都市部に向かって微風が吹いており、模式図のように農場内の冷気が南の都市部に影響を与えていると考えられる。(b)では、農場の門の内側と外側で、温度が急激に変化している。ほとんど風のない状態のため放射冷却によりこの場合が農場内の気温が最も低くなるが、都市部には影響を与えていない。(c)では、農場中心から入口に近づくほど気温が上昇している。これは、都市部から農場への風が吹いて、都市部の暖気が農場内へ入り込むためと考えられる。

風の強い日や曇天日の夜間、日中には、はっきりとした農場内と都市部間の差は見られず、農場と都市部の温湿度はほぼ等しい場合が多かった。

夏期の観測結果を図2-12に示す。観測中の天候は、日中は薄曇りで夜間は曇りという場合が多く、冬期のような晴天夜間に農場と都市部の差が大きく見られる観測例は、得られなかった。冬期のデータとの大きな違いは、日中の日射量の多いときに、農場内の気温が都市部よりも低くなりまた湿度も農場内が高かったことである。図2-12(a)は、その典型的な例である。また、図2-12(b)のように、夜間の曇天時には農場内と都市部間には日中ほどの気温差はみられなかったが、このような場合でも農場の湿度は都市部よりも高かった。

夏期においては、農場内の植物による蒸発散が活発で潜熱輸送が大きいため、日中でも農場の気温が都市部より低く、湿度が高いと考えられる。一方、冬期においては植物の蒸発散量は比較的小さい。農場、都市部間の差は、農場の土壌、都市部のコンクリートといった地表を被覆する素材の物理特性の差により地中伝熱量が都市部で大きく農場で小さいことの影響が大きいと考えられる。

緑地の影響を及ぼす範囲は、緑地の形状、風向、風速などさまざまな要素の

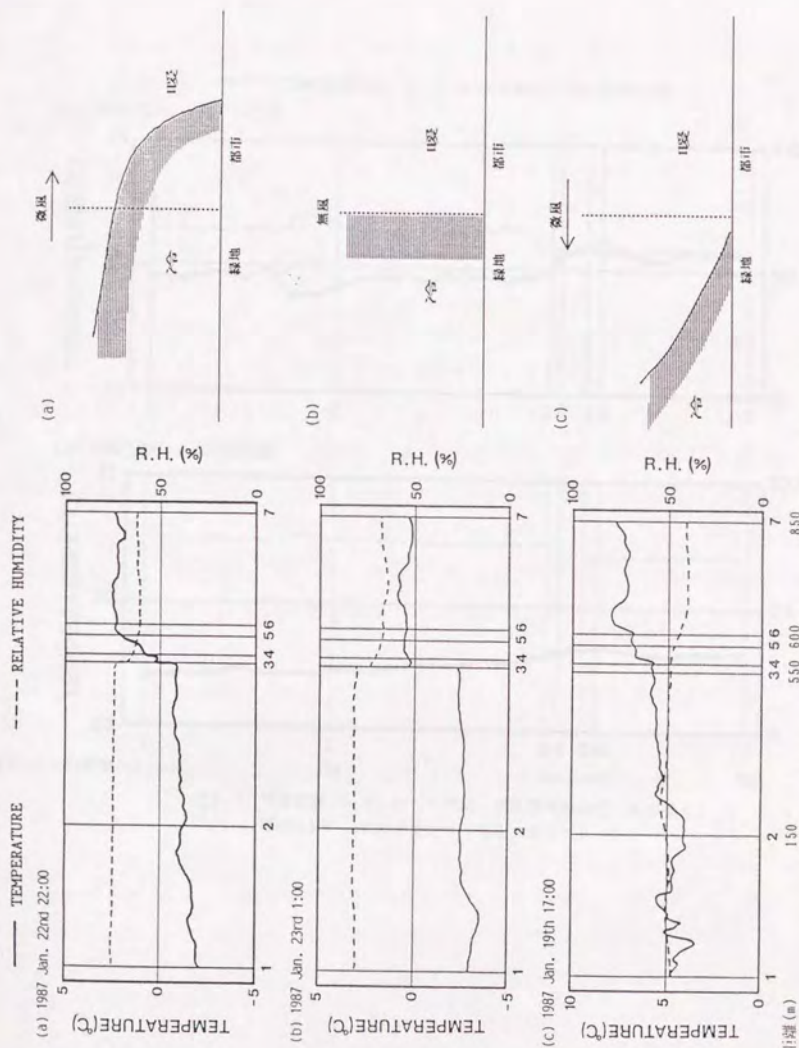


図2-11 移動観測コースに沿った気温、相対湿度の変化(冬の場合)  
横軸は図2-10に示す測定コース上の番号

測点1からの距離(m)



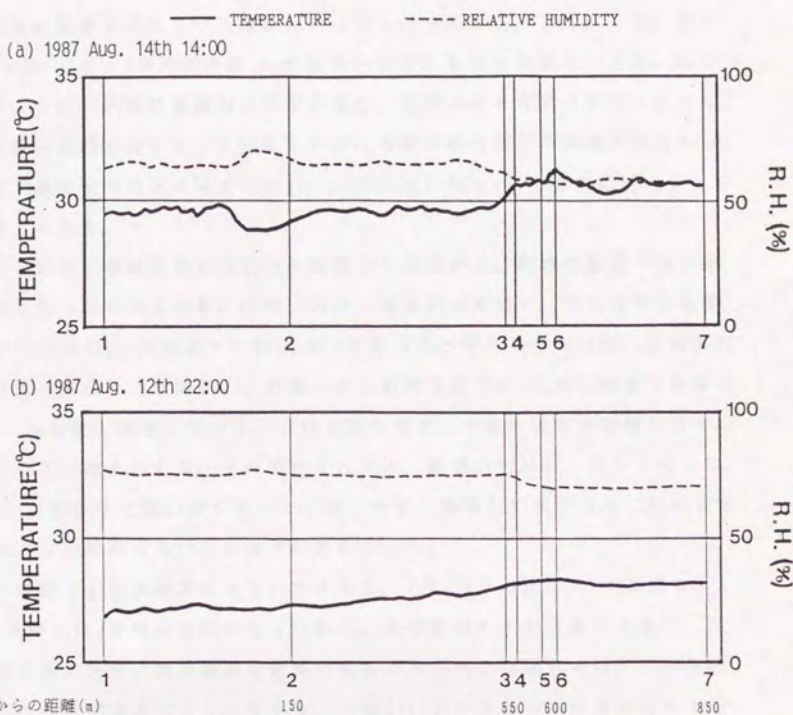


図2-12 移動観測コースに沿った気温、相対湿度の変化（夏の場合）  
横軸は図2-10に示す測定コース上の番号

影響を受けるため、単純に表すのは難しい。今回の測定結果からは、図2-12(a)のような場合に、影響の範囲を推定することができるであろう。農場内の気温はほぼ一定で、十分風下の都市部でもほぼ一定気温とみなせるところがあり、農場の端から気温一定の都市部までの間の都市部では気温が上昇しているところが、緑地の影響を受けている範囲といってよいであろう。したがって、図2-12(a)からは、3点と5点の間の数十mが農場が影響を及ぼす範囲といえる。図2-12、13のように、気温を連続的に測定すると、場所による変動が非常に大きく、かなり影響の範囲を決めることは難しいが、冬期の他の結果や夏期の結果からも、風速、風向が同程度の場合には3点と5点の間の数十mが影響の範囲といって良いと考えられる。

丸田(1972)は、新宿御苑と小石川植物園での測定から、緑地の影響の及ぶ範囲と緑地と都市部の気温差を、時刻、天候、風速別に見積り、概ね緑地の影響の範囲は100~300m、気温差は0.5~2.3°Cであった。村川ら(1988)は、広島市内の河川付近の気温分布を測定し、影響の及ぶ範囲を数百m、ただし顕著な影響は水面から10m程度と推定している。これら比べると、今回の測定の影響の及ぶ範囲はやや小さい値といえる。その理由としては、農場の形状が、北から南の出口(3点)に向かうに従い狭くなっていることや、農場内では上にあげた両公園と比べ樹木が比較的少ないことなどが考えられる。

また、道路の影響も非常に大きいであろう。3点と4点の間には、2車線の、5点と6点の間には4車線の道路が走っており、昼夜を問わず交通量が大きい。交通量の特に多い時や、測定器が自動車の排気ガスをあびた場合には、この道路のところで急に気温が大きく上昇する。佐橋(1983)が信号のある道路沿いで気温を計測した例では、道路から10m程度離れば影響は小さいが、道路のすぐ近くでは車が信号待ちで停車し、信号が赤から青に変わり発信するとき非常に大きな気温上昇がある。したがって交通量の多い道路は発熱源とみなせ周囲に及ぼす影響も大きく、エアカーテンのような役割をして緑地の影響を弱めている可能性もあり、道路の交通量によっても影響の及ぶ範囲は変化するであろう。

## 2. 4 長期観測

固定点での緑地内外の温湿度の測定は、従来の例では短期間に行われたもの

が多く、長期にわたるものは少ない。今回は、田無農場とその周囲の気象特性を把握するため、風向と風速と温度分布との関係の調査のため農場内外に測定点を設置し数カ月の観測（以下、長期観測とよぶ）を行った。

#### 2. 4. 1 観測方法

長期観測の期間は、1986年8月～12月である。長期観測では、図2-10のように、農場内2点、農場外4点の温湿度観測点を設けた。農場中心付近（A点）と、南側の入口（B点）の観測点での観測項目は、地上1.5m、3m、6mの気温、地上1.5mの湿度および地表面、地中3cm、10cm、40cmの温度である。気温、湿度の測定は、熱電対を使用したアスマン式温湿度計を用い、地温の測定にも熱電対を用いた。また、農場本館屋上（C点、地上13m）では、風向・風速を測定した。風速は3杯式発電微風速計（牧野応用測器研究所、AG750）、風向はポテンシオ式風向計（牧野応用測器研究所、VR036）を用いた。その他の測定点（D、E、F、G点）では、自記式温湿度計（神栄、THR2、センサー部分には無通風）を地上1.5mに設置した。D点、E点は農場の南側、F点は北側に設置し、G点は農場に隣接する演習林の林内の樹木に囲まれたところに設けた。

ただし、自記式温湿度計のセンサー部分は無通風のため、厳密には気温とはいえない。また、読み取り誤差も $0.2^{\circ}\text{C}$ 程度あるため、A、B点とD～G点との比較は、厳密に行うのは難しい。

#### 2. 4. 2 結果および考察

図2-13に、A、B、G点での気温（高さ1.5m）の8～10月の日平均値の変化の様子を示す。記録計のトラブルなどにより、データ欠損の期間がかなり長くなっているが、図より、農場中心部のA点の気温は、外縁部のB点の方よりもやや低い場合もあるがほとんどが同程度である。その他の月についても、同様であった。これは、B点が農場の外縁部の草地上にあるため農場から離れた都市部に比べて差が出にくいこと、および細かく見ると明け方頃A点の気温が低いこともあるが、時間的には短いため平均化すると差がでにくいためであろう。農場外のD、E、F各点の日平均気温も、傾向としてはほぼA点と同じような変化を示したので、図に示すのは省略した。各時刻においては、おもに直射日光が当たるか



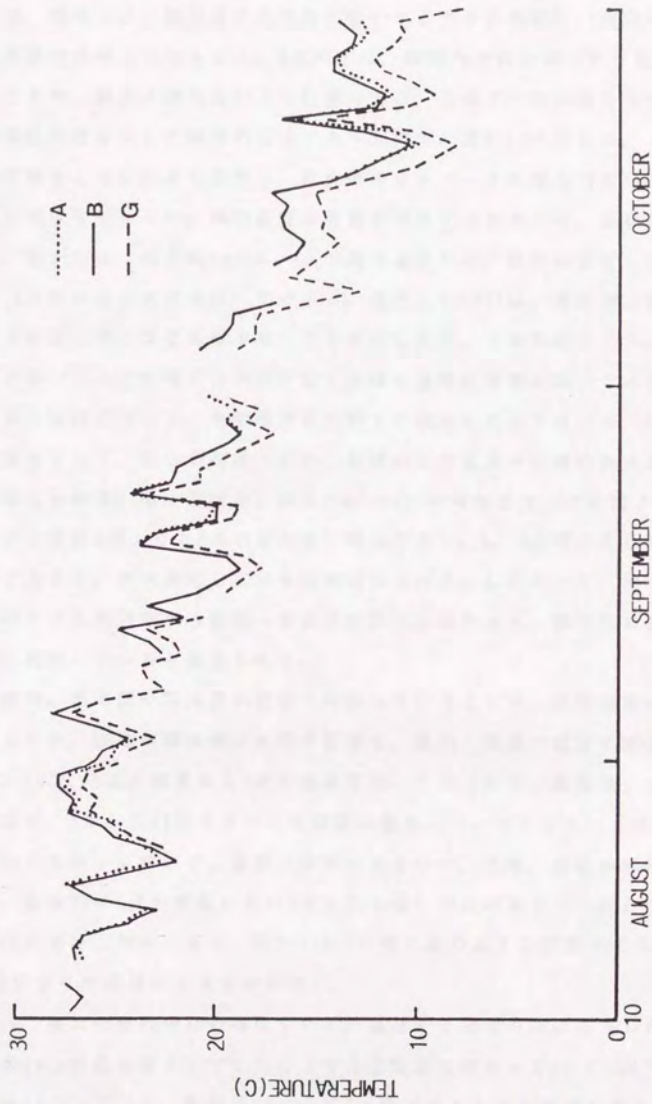


図2-13 田無農場内外の測定点での気温日平均値の変化

どうかで各点間のばらつきがあるが、日平均値にすると3点間の気温の順位は日によってまちまちであり、その差も誤差の範囲程度であることが多い。これらの測定点で、農場に近い観測点ほど気温が低いかどうかの判定は、今回用いた測定器の精度では難しいであろう。G点だけは、農場内の林の中にあり日照時間が少ないことや、樹木の蒸発散などの影響のため、ほぼすべての場合すべての観測点中最低の値を示した特徴的な点であったので、図2-13に示した。

気温は天候とともに大きく変動し、地点間の差もデータのばらつきが大きい。ため明らかににはなりにくい。地中温度は変動が平滑化されるため、差がよく現れている。図2-14は、深さ40cmのA、B点の地中温度だが、比較的安定した値をとり、A、B点間の温度差はほぼ一定である。西沢ら(1979)は、東京都心部において地温を測定し都心ほど地温が高いことを示したが、その原因として、都心部の気温が高いことと土壌の含水率が低く土壌の温度伝導率が高いことをあげている。都市緑地において、地中温度を分析した例はこれまでにないが、A点の地温が低い理由として、都心の高温と逆に、農場内部の低温や土壌の含水率が高いことが考えられる。地中温度は、深さ3cm、10cmの場合では、この図よりも変動は大きくなるがA点よりもB点の方が高い場合が多い。A、B点間の差は地中深くなるほど大きく、かつ安定している傾向がみられる。したがって、地上だけでなく、地中でも都市部から農場への水平な熱の移動があり、都市部の温度を下げるのに貢献していると考えられる。

風速と緑地、都市間の温度差が密接に関係していることは、同時観測の結果でも示されたが、緑地が都市部に及ぼす影響も、風向、風速に密接に関係している。図2-15は、B点の気温からA点の気温を引いた差(以下、温度差)と、風向との関係を、8月から12月までの一時間毎の結果についてまとめたものである。数カ月わたるデータなので、変動が非常に大きい。北風、南風の頻度が高いことや、全体的にA点の気温の方がB点よりも低い傾向があることがわかる。特に、風向が南から西のときは、図2-11(c)の模式図のような状態であると考えられ、A点のほうが低温になる傾向が強い。

図2-16は、晴天の夜の場合のみについて、温度差と風速の関係を表した図である。風速2m/s程度を境としてそれ以上では温度差はほとんど0~1°C以内であるが、風速2m/s以下では、温度差が-1~4°Cと幅が大きくなる傾向があることが

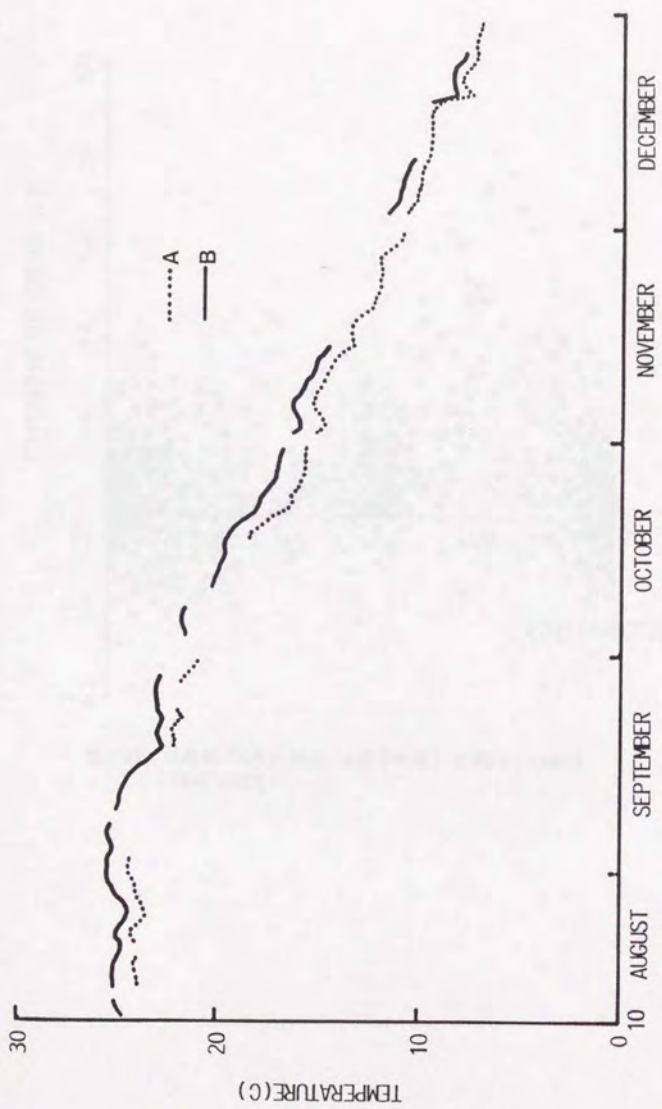


図2-14 A, B点での地中温度の変化



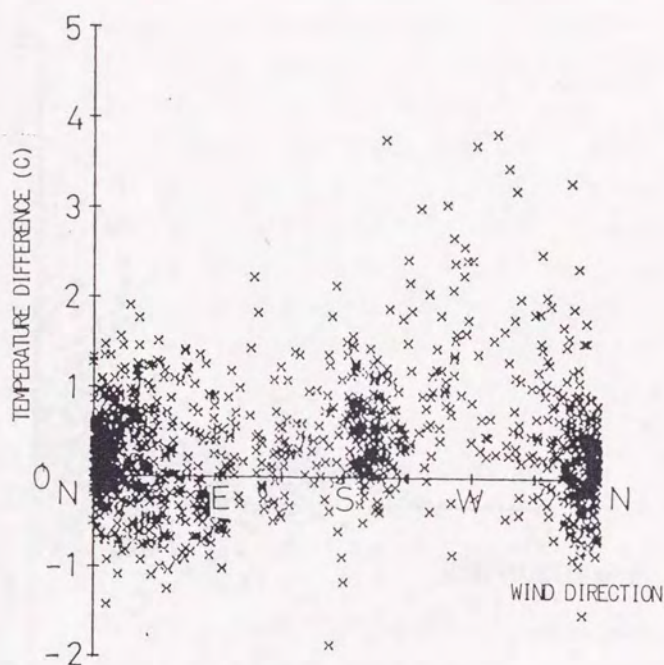


図2-15 気温差 (B点の気温 - A点の気温) と風向との関係  
(8月~12月)

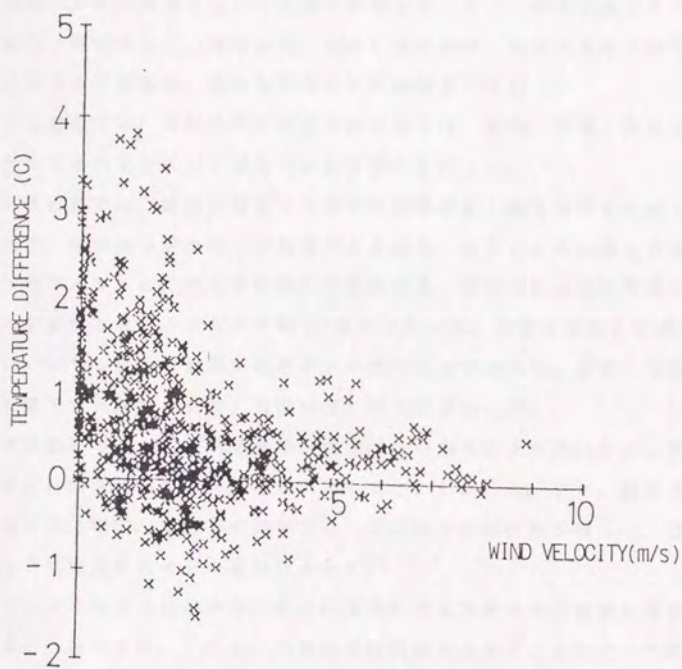


図2-16 気温差 (B点の気温-A点の気温) と風速との関係  
(8月~12月、晴天夜間)

わかる。

## 2. 5 まとめ

緑地の影響の程度について実態を把握するために、都市公園とその付近の都市部での熱収支などの同時観測、気温分布の観測、地表面温度の測定、気温および湿度の移動観測、緑地微気象の長期観測などを行った。

同時観測では、緑地とその周囲の都市部では、気温、湿度、放射環境、熱収支などの微気象が大きく異なることが明かとなった。

移動観測では、緑地と隣接する都市部間の気温、湿度分布を連続して計測した結果、緑地から都市部への影響のある場合、あるいはその逆の場合の気温分布が明かとなった。緑地の影響の及ぶ範囲は、測定対象の田無農場の場合、道路の影響が大きいこともあり数十m程度であった。冬期は晴れた風速の小さい夜間に、おもに緑地の気温が都市部より低下したのに対し、夏期には昼夜ともにまた曇天でも緑地の気温、湿度が低い場合が多かった。。

長期観測では、日平均気温では緑地内外の差があまり無いこと、むしろ地中温度に緑地の影響がはっきりと現れることがわかった。また、緑地中心と外縁の温度差と風向、風速との関係から、風向により温度差が異なり、風速が小さいとき温度差が大きいことが示された。

これらの観測の結果から、都市緑地内外の微気象やその周囲に及ぼす影響の概要は把握できた。しかし、測定結果は変動が大きく、またデータ数も十分でないため、より一般的な評価や予測は、観測結果を踏まえた上でシミュレーションなどに頼らざるを得ないであろう。



引用文献

- Gagge, A. P., Nishi, Y. and Nevins R. D., 1976: The role of clothing in meeting FEA energy conservation guidelines, ASHRAE Transactions, No. 2417, 234-247.
- 石井昭夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉水久雅, 安部嘉孝, 1988: 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 372, 21-29.
- 片山忠久ら, 1989: 公園緑地の暑熱緩和効果に関する実測調査, 日本建築学会九州支部研究報告, 31, 109-112.
- 河村 武, 1977: 都市気候の分布の実態, 気象研究ノート, 133, 26-47.
- Landsberg, H. E., 1981: Urban Climate, Academic Press, 275pp.
- Landsberg, H. E., 1979: Atmospheric changes in a growing community (The Columbia, Maryland Experience), Urban Ecology, 4, 53-81.
- 丸田頼一, 1972: 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響, 都市計画, 69・70合併号, 49-77.
- 丸田頼一, 1973: 公園緑地内の気象, 造園雑誌, 37, 33-55.
- 村川三郎, 関根毅, 成田健一, 西名大作, 1988: 都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 393, 25-34.
- 成田健一, 関根毅, 徳岡利一, 1984: 都市地表面物質の熱特性—アスファルト舗装面における熱収支の研究—, 地理学評論, 57, 639-651.
- Nishi, Y. and Gagge, A. P., 1977: Effective temperature scale useful for hypo- and hyperbaric environments, Aviation, Space and Environmental Medicine, 48, 97-107.
- 西沢利栄, 山下孔二, 鈴木守人, 1979: 東京都心部における地温分布, 地理学評論, 52, 283-292.
- 新田 伸三, 東 集成, 石井 昭夫, 1981: 環境緑化における微気象の設計, 鹿島出版会, 267PP.
- 尾島俊雄編, 1980: 都市, 朝倉書店, 235pp.
- Oke, T. R., 1979: Advectively-assisted evapotranspiration from

irrigated urban vegetaion, Boundary- Layer Meteor., 17, 167-173.

朴惠淑, 1987: 日本と韓国の諸都市における都市規模とヒートアイランド強度, 地理学評論, 60, 238-250.

佐橋謙, 1983: 自動車による気温の移動観測における観測誤差 - 特に自動車の影響を中心に -, 天気, 30, 21-26.

土屋 巖, 1972: 緑地と都市気候 - 都市における自然緑地, 人工緑地, 河川等の熱的特性 -, 水利科学, 16, 29-56.

渡辺達三, 1974: 緑被の気象緩衝効果と緑度, 造園雑誌, 38, 25-28.

### 3 リモートセンシングによる解析

#### 3. 1 はじめに

都市における緑地の熱的な影響を解析するためには、広域にわたる温度の観測データが得られることが望ましい。2章で述べたような微気象観測では、測定空間的な広がりや期間が限定される。現状では、広域にわたる温度データは、航空機や人工衛星から熱赤外波長のリモートセンシングにより地表面温度のデータを得るのが唯一の手段であろう。地表面温度は、気温との相関も高いと考えられ緑地環境の分析には有用な情報である。

1984年に打ち上げられたランドサット5号のデータは、熱赤外バンドを持ち、従来の衛星データに比べ解像度が大幅に改善されたため、緑地環境の解析に新たな可能性を開いた。本章では、このランドサット5号のデータを使用した解析について述べる。

リモートセンシングによる熱映像から得られる情報としては、緑地の表面温度が周囲よりどの程度低いか、緑地内外の表面温度パターンの季節的な変化、緑地の規模と表面温度との関係などがある。これらは、緑地分布と表面温度分布を対比することにより得られるものである。したがって、正確な緑地分布の把握が、熱的な環境の解析のためには不可欠である。しかし、緑地分布をリモートセンシングデータを利用して求める場合、大規模な緑地は比較的抽出も容易であるが、小規模な緑地も含めた緑地分布は、混在ピクセル(mixel、道路、屋根、緑地など複数の土地被覆形態を含むピクセル)の問題がネックとなり分布を精度の良く求めることは難しい。そのため比較的大きなスケールの緑地環境の分析にはリモートセンシングデータは使用されるが、精度のよい緑地分布を求めた例は少ない(村井ら、1976、尾島ら、1982)。また、リモートセンシングデータに頼らず、現地調査、航空写真からの緑地分布図作成は、正確な反面、頻繁にはおこなえず既存の資料も非常に少ない。

解像度よりも小規模な緑地も日本の都市には多く存在し、その役割も重要であると考えられる。小規模な緑地の熱的な影響の解析のためには、混在ピクセル内にどの程度の割合で緑地が含まれるかを推定する必要がある。そこで、本研究では混在ピクセル内の緑地の割合の推定法を新たに考案し、その精度など



を検討した。

以下では、スケールがピクセル単位ではっきりと抽出できる緑地を大規模緑地、スケールが1ピクセル程度あるいはそれ以下の緑地を小規模緑地と便宜的に呼び、それぞれの場合に分けて緑地分布の抽出、緑地分布と表面温度分布の関係について述べる。

### 3. 1. 1 ランドサットTMデータ

リモートセンシング技術は近年著しく進歩し、一般に入手可能な衛星データも表3-1に示すようにさまざまなものがある。しかし、熱映像を入手できるものの中でも気象衛星等からのデータでは日本の都市環境の解析に使用するにはメッシュが粗いという難点があり、熱環境、緑地分布解析用のデータをある程度の解像度で得られるのはランドサットTMデータのみと言って良いであろう。

ランドサット5号のTMセンサーには、図3-1に示すようなバンドおよび性能を持ち、従来のMSSセンサーと比較して、解像度が向上し新たに熱赤外波長のバンド6が加わった(Salomonson et al, 1980)。バンド6の120m×120mという解像度は、十分とは言いがたいが民間の衛星データとしては最も細かいものであり、これにより従来明かでなかった都市内緑地の表面温度分布がはっきりと捉えられるようになった。この特徴を生かし、土屋(1985)のように中小都市の熱環境の解析や、力丸ら(1989)のように緑地の表面温度の解析に応用されている。

ランドサット5号は、16日毎に地球上の同一地域上を通過するよう軌道が設定されており、関東地方上空を通過するのは毎回午前10時頃である。したがって、これ以外の時刻のデータは得ることができないという制約がある。また曇っている場合には、雲に遮られて地表のデータをとることができないので、良質のデータの数に限られている。

### 3. 2 大規模緑地の解析

ランドサットTMセンサーのデータから、ピクセル単位に緑地を抽出して、比較的スケールの大きな都内の緑地を調査対象とし、緑地と表面温度の関係や緑地間の植生の差や季節によってそれがどう異なるかなどについて考察を加えた。

表3-1 主な衛星リモートセンシングデータの概要

衛星 センサ	波長帯( $\mu\text{m}$ )	分解能 (m)
ランドサット MSS	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 0.5~0.6	80
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}5$ 0.6~0.7	80
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}6$ 0.7~0.8	80
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}7$ 0.8~1.1	80
ランドサット TM	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}1$ 0.45~0.52	30
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}2$ 0.52~0.60	30
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}3$ 0.63~0.69	30
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 0.76~0.90	30
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}5$ 1.55~1.75	30
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}6$ 10.4~12.5	120
SPOT HRV	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}1$ 0.50~0.59	20
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}2$ 0.61~0.68	20
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}3$ 0.79~0.89	20
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 0.51~0.73	10
MOS-1 MESSR	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}1$ 0.51~0.59	50
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}2$ 0.61~0.69	50
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}3$ 0.72~0.80	50
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 0.80~1.10	50

衛星 センサ	波長帯( $\mu\text{m}$ )	分解能 (km)
MOS-1 VTIR	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}1$ 0.5~0.7	0.9
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}2$ 6.0~7.0	2.7
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}3$ 10.5~11.5	2.7
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 11.5~12.5	2.7
MOS-1 MSR	23GHz	31
	32GHz	21
NOAA	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}1$ 0.58~0.68	1.1
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}2$ 0.725~1.1	1.1
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}3$ 3.55~3.93	1.1
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}4$ 10.5~11.5	1.1
	$\lambda^{\circ}\gamma^{\circ}\delta^{\circ}5$ 11.5~12.5	1.1

バンド	波長(μm)	主な内容とその応用
1	0.45-0.52	土壌と植生の判別、広葉樹と針葉樹の判別
2	0.52-0.60	健康な植生からの反射
3	0.63-0.69	葉緑素の吸収による植物の種類判別
4	0.76-0.90	バイオマスの調査、水域の判別
5	1.55-1.75	植生の含水率測定、雪と雲の判別
6	10.4-12.5	植物の熱ストレス管理、温度分布図
7	2.08-2.35	鉱物中のOHイオン量

解像度 30m×30m (バンド1-5, 7)

120m×120m (バンド6)

信号量子化数 256レベル

図3-1 ランドサット5号TMセンサの性能および特性



### 3. 2. 1 使用データと調査地域

今回使用したデータは、季節の差が明らかになるように1984年8月16日(夏期)、同年11月4日(秋期)、1985年1月23日(冬期)に関東地方を撮影した3種類のものとした。これらの日の午前9時の気象庁での気象条件を、参考のために表3-2に示す。

ランドサットの1シーンは、185km四方の広範囲にわたるが、解析の対象とした地区は各データで雲に隠れない鮮明な画像が得られることや、さまざまな規模の都市公園、新宿副都心、住宅地などの都市の代表的環境を含むことなどから、図3-2のような東京都西部の一辺約7.7kmの正方形の地区とした。

### 3. 2. 2 緑地の抽出

リモートセンシングデータから緑地等を抽出する分類方法は、大きく分けて教師(Supervisor)あり分類と教師なし分類に分かれる。前者の代表的な方法としては、最尤法があり、後者の代表的なものとしては、クラスター分析がある(日本リモートセンシング研究会、1981)。

また緑地の抽出に関しては、他の土地被覆と比較してバンド4(波長0.76-0.90 $\mu$ m、この波長域で植生の反射が大)、バンド3(波長0.63-0.69 $\mu$ m、植生の反射が小)が特徴的であるため、抽出に有効である。バンド4をバンド3で除すなどの比演算を行うことによりこの特性が強調され、値の大きいものを緑地とみなすことができる。このような演算を行った値を植生指数、植生指標(Vegetation Index)と呼び、緑地の指標として用いる。植生指数は、統計的方法に比べ計算処理が容易であるのが大きな利点であり、緑地のみの抽出にはよく用いられる。

図3-2の調査地域内での、緑地の抽出には、バンド3及びバンド4のデータを使用した簡易法を用いた。バンド4は、植生の存在によって高い値を示し、バンド3では樹木が草地よりも低い値を示す。したがって、図3-3のように、両バンドのとり値から樹木が比較的多い「樹林」と、芝生や裸地等樹木の少ない「草地」の2種類に識別決定領域を大別した。国土地理院発行の1/25000土地利用図や航空写真を参考に、実態に合うように樹木と草地についての各バンドの閾値を決め緑地の抽出を行なった。

表3-2 気象庁での気象条件

日時	気温(°C)	相対湿度(%)	風向	風速(m/s)
1984年 8月16日9時	31.2	59	南西	2.6
1984年11月 4日9時	12.2	55	北北西	4.1
1985年 1月23日9時	4.7	51	北北西	3.7

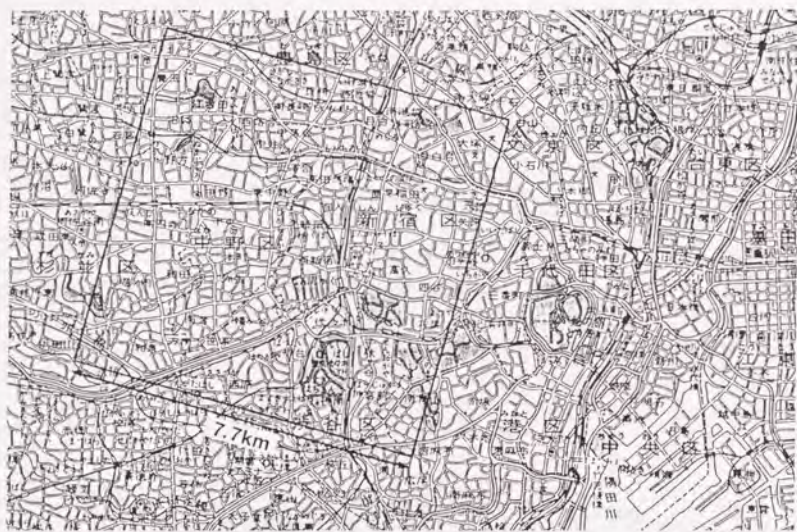


图3-2 解析地域



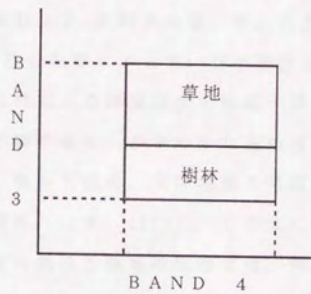


図3-3 樹林、草地とバンド3、4との関係

### 3. 2. 3 表面温度の算出

地表面付近の物体が黒体放射をしており、大気による吸収、散乱がないと仮定した場合、放射量から換算できる表面温度を輝度温度という。輝度温度とランドサットのカウント値の間には次のような関係がある（リモートセンシング技術センター、1986）。

$$V_c = (9.299 \times 10^{-3} \times T - 3.2) \times T + 268.05$$

$V_c$ : カウント値

$T$ : 輝度温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

実際には、地表面を覆う物質の射出率、反射率の違いや、大気に含まれる水蒸気、 $\text{CO}_2$ 、ダストによる減衰、散乱の影響によって、真の表面温度（以下、真温度）とランドサットのデータから得られる輝度温度とは若干異なってくる。特に影響が大きいのは、水蒸気の影響であり、ひまわりなどの衛星データの補正に使用される式では、輝度温度に衛星天頂角、可降水量を考慮した補正量を加え補正温度が算出されている（阿部、山本、1979）。この式によれば、ランドサットの衛星天頂角で、一般的な大気の水蒸気の状態では、補正量は5K以下である。

また、一般に実測（真）温度と輝度温度とは一致しないが高い正の相関を有する（藤村、花泉、1982）。真温度との比較から、1シーンのデータであれば真温度は輝度温度の一次関数で近似可能である。したがって、輝度温度を用いても温度の大小関係は逆転しない。

本研究では都市内緑地とその周囲の温度の相対的な差や温度分布のパターンに関心があり、真の表面温度とは異なるが上式から求めた輝度温度の値を表面温度としてそのまま用いた。

### 3. 2. 4 結果及び考察

#### （1）緑地と温度分布

図3-4は夏期のデータから求めた緑地分布である。山手線の外側よりも、むし

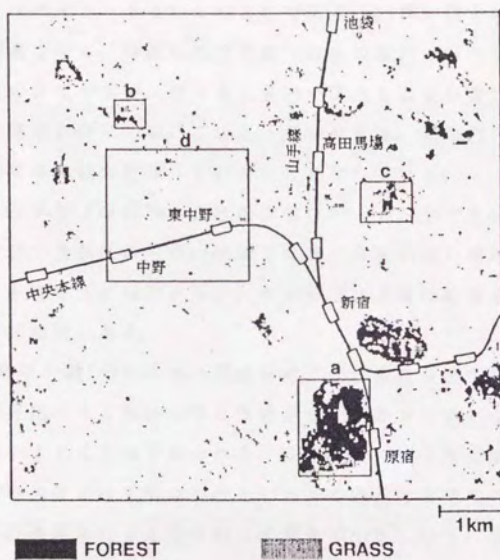


図3-4 緑地分布



る都心に近い方が代々木公園、明治神宮などの大規模な緑地があること、妙正寺川、神田川に沿って緑地が多く残っていることなどがわかる。ここで緑地と見なされたのは、公園の他にも学校、寺社、病院などの施設もかなり多い。

緑地分布とそれに対応する夏期の温度分布を図3-5に示す。温度分布は都市の多様な土地利用分布を反映して、一見複雑であるが、図3-5では緑地と低温域がきわめてよく一致している。都市の温度が郊外より高くなる現象は、ヒートアイランド現象としてよく知られているが、図をみると、都市内の緑地は熱い都市内でのクールアイランドといってよいであろう。特に代々木公園、明治神宮の森は最も低温を示し、周囲に比べて数°C以上の差がついている。また中心部の社殿の周辺の温度が高く、代々木公園内の芝生も温度が高い等、地表の被覆の差の影響が顕著にでている。このような温度差は、都市内において緑地、特に樹木が活発な蒸発散を行なっていることを示している。

調査地域の左半分では緑地が比較的少ないが、その中でも緑地がほとんど存在しない中野区、豊島区の一部の地域では特に温度が高い傾向がみられる。従って、点在する緑地も広域的にみて、温度を下げる等の影響をかなり広い範囲に与えている可能性もある。

図3-6は秋期の、図3-7は冬期の緑地分布と表面温度分布を示したものである。これらの図を見比べると夏から冬に季節が変化するのに伴い温度分布と植生の相関が次第に小さくなる様子がわかる。秋期には、代々木公園、明治神宮をはじめ、周囲との温度差は夏期より小さいがまだ低温部と緑地の一部の一致がかなりみられる。冬期になると全体的に温度差が小さくなり、表面温度分布から一部の緑地は識別できるものの、必ずしも緑地が低温ではなくなる。

図3-8は、代々木公園、明治神宮付近の緑地の分布と夏期及び冬期の温度分布を詳細に表したものである。1メッシュの一边は30mであり、ランドサットの解像度と同じである。夏期には、緑地内の温度が周囲より低いため盆地状の分布を呈する。一方、冬期には多少の起伏はあるが周囲との差がほとんど無くなっており、周囲への影響も小さいと思われる。周囲との差が大きい夏期の温度分布を緑地分布に重ね合せてみると、緑地の東側の境界では緑地内になると同時に急激な温度低下がある。対照的に西側の境界では緑地の外部から内部にかけて、緩やかに温度が下がっている。このような差の理由として、風向が東側か

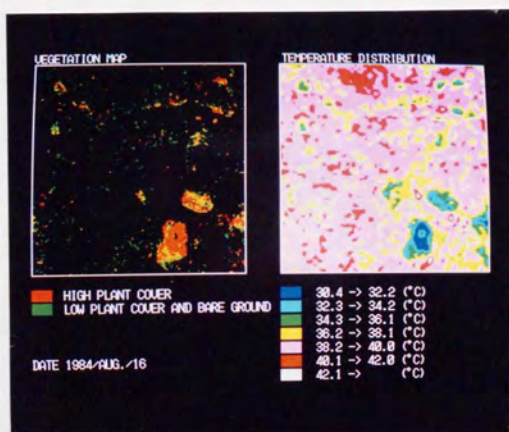


図3-5 夏の緑地分布および表面温度分布

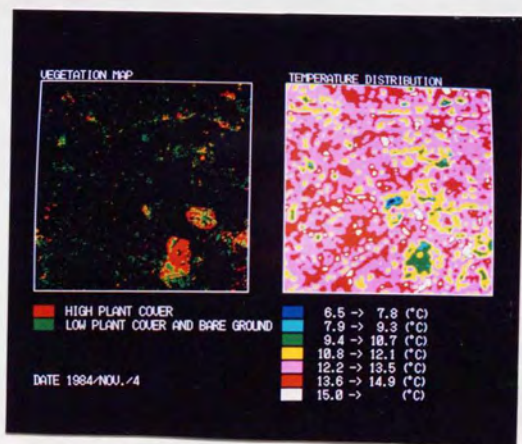


図3-6 秋期の緑地分布および表面温度分布



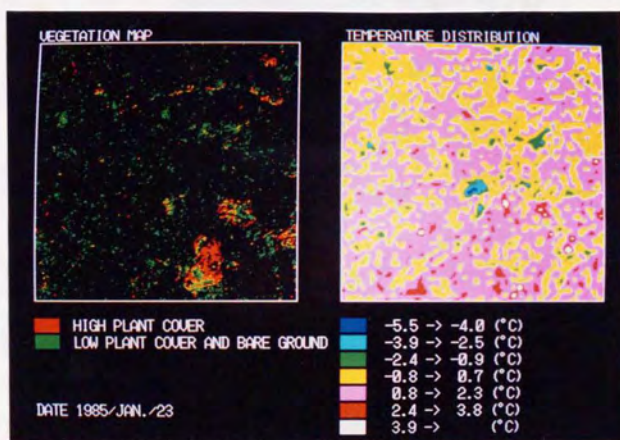


図3-7 冬期の緑地分布および表面温度分布

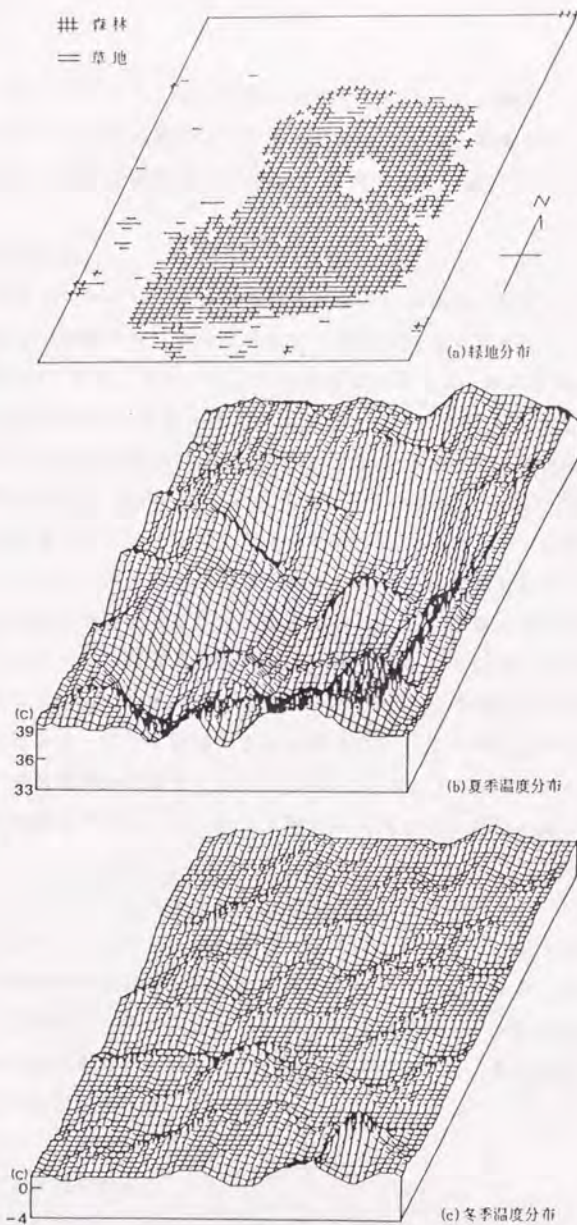


図3-8 代々木公園、明治神宮付近の表面温度分布

ら西側方向へ吹いていたことや、西側の標高が低いことの影響などが考えられる。緑地の端から緑地外の温度低下の無くなる点までを、影響を受ける距離とすると、公園度の西側、北側では百m前後、東側では数十m以下である。

## (2) 緑地間の差

調査地域の緑地の中には、樹林や草地がさまざまな割合で存在しているが、その違いによって樹林や草地の温度分布にも差が生じると考えられる。これを、示したのが図3-9である。データは、緑地間の差が最もよく顕れる夏期のものを使用した。図3-9ではさまざまな緑地の樹林とみなされる部分、草地とみなされる部分において、何°Cの部分は何パーセントの割合を占めるかを示している。例えば図3-9(a)では32°Cの樹林が15%あり最も多くの面積を占めている。図の面積は、図3-4で緑地として抽出された部分の面積であり地図上での面積ではない。

図3-9(a)の代々木公園、明治神宮は、他の緑地の例に比べきわめて面積が大きい。緑地内の最低温度もまた最も低くなっている。草地の温度分布が左右対称であるのに比べて、樹林は低温側に偏った分布をしている。これは、他の比較的広い緑地についても言えることである。これとは対照的に、図3-9(c)は東中野周辺に散らばっている面積の小さな緑地についての集計だが、全体的に高温で最高、最低温度の差も小さい。(b)および(d)は、(a)と(c)の中間の規模の緑地で草地の割合が大きい。やはり樹林に分類された部分の温度が低くなっている。

以上のような例を図3-10にまとめた。図では、調査地域内のいくつかの緑地について平均温度、緑地中の樹林の割合、面積等を求めてその関係をプロットしている。樹林の割合が同程度の場合、面積が大きい程温度は低い傾向が見られる。また、面積が同じ場合、地形の影響、緑地の配置、細かい植生の差などによって温度分布は影響をうけるため一概には言えないが、樹林の割合が大きい程温度が下がる傾向がある。

## 3. 3 小規模緑地の解析

以上のようなピクセル毎の緑地の抽出を行った解析の場合、緑地の大きさが少なくとも数十m四方なければ、緑地が抽出されない。街路樹、児童公園、寺社



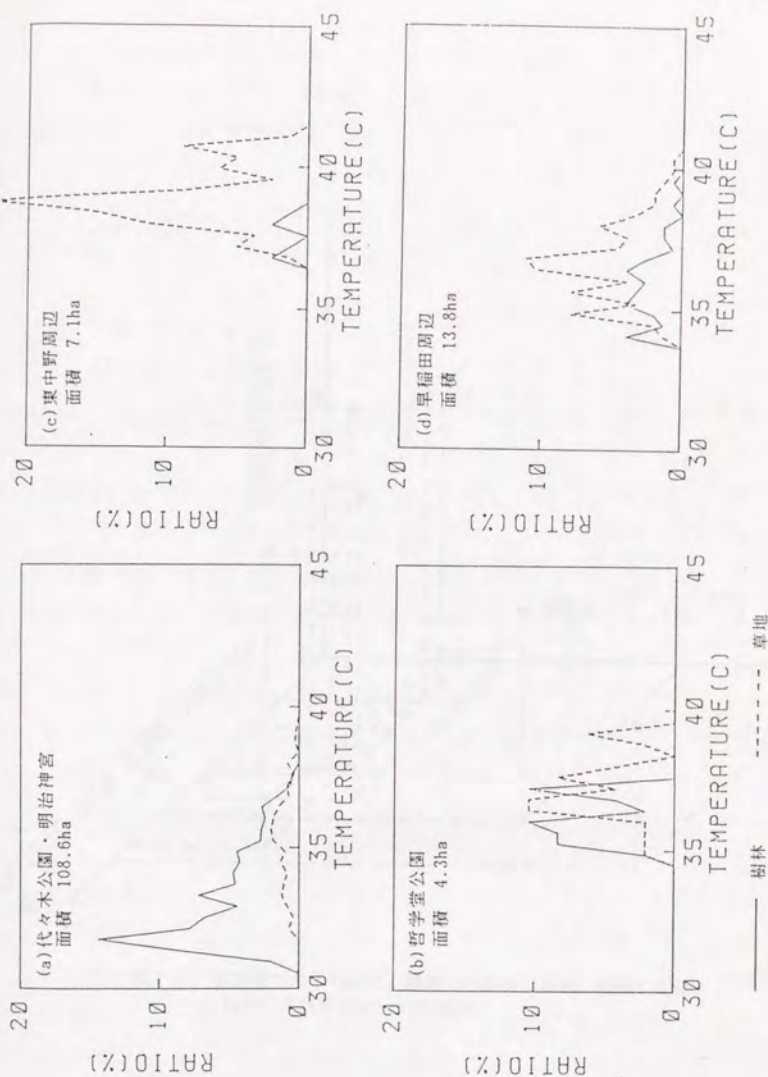


図3-9 各緑地での樹林と草地が示す表面温度の頻度分布  
 RATIOは各緑地中の、ある表面温度を示す樹林と草地の割合を示す  
 (1984年8月14日のデータを使用)



等の1ピクセル以下の小規模緑地は、都市内には多数存在しておりこれらの緑地の温度の低下や周囲の環境への影響も重要であると考えられる。

図3-11に混在ピクセルの模式図を示すが、小規模緑地を抽出するためには、混在ピクセル内にどの程度の割合で緑地が含まれるかを推定する必要がある。混在ピクセル内の緑被率を推定する方法としては、ファジークラスタリングによる分類や植生指数を使用する方法を試みた。

### 3. 3. 1 緑地の抽出方法

#### (1) 従来の方法とその問題点

従来一般に用いられている分類法では、各ピクセルの属すクラス(土地利用形態)を明確にし、あいまいさを無くすことに主眼があるため、各ピクセルは必ず何等かのクラスに分類される(Schowengerdt, 1983)。このような分類法では、他のクラスには属さない排他的(Exclusive)なカテゴリーへの分類を行なうことが多い。排他的なカテゴリーへの分類では、混在ピクセルも何等かのクラスに一応分類されるものの、正しい分類とは言いがたい。

#### (2) ファジークラスタリングによる混在ピクセルの分類

ファジークラスタリングと従来の分類法との違いを図3-12に示す。ファジークラスタリングでは、各ピクセルがどのクラスに属するかは、例えば、A点が田を表すクラスに0.5、畑を表すクラスに0.4、森を表すクラスに0.1の割合で所属するというように表現される。この各クラスに所属する割合をメンバーシップという。これはあるピクセルにおける各土地利用形態の面積比率に似た概念と言える。本研究では、緑地を表すクラスのメンバーシップを緑被率とし、混在ピクセル内の緑地の割合を表す指標であるとして解析に使用した。本條、高倉(1986)が、海と埋立地を含む混在ピクセルを分類した例では、両者のメンバーシップと面積比は、非常によく一致している。

混在ピクセル内の土地利用の割合を推定する試みとしては、稲村ら(1984)のカテゴリー分解がある。この方法は教師付き分類であるため各クラスの反射スペクトル特性のランドトルスを必要とする。ランドトルスの代表性が良くない時は、大きな誤差の原因となるため改良法も藤村、伊藤(1985)により開発



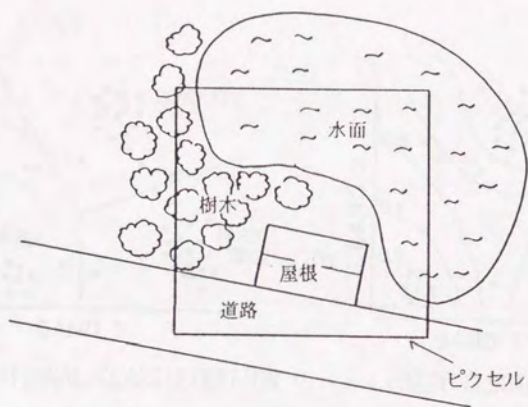


図3-11 混在ピクセルの模式図

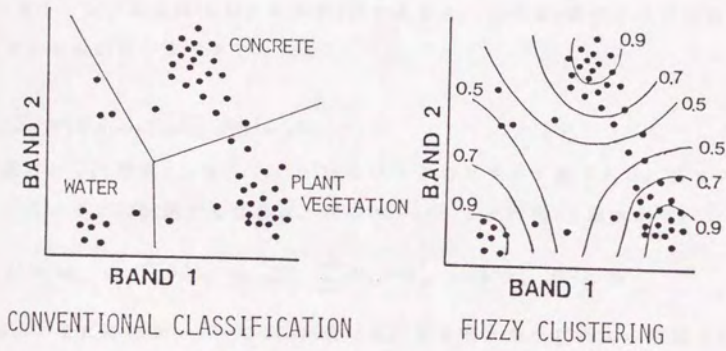


図3-12 ファジークラスタリングと従来の分類手法の比較

されている。しかし、分類の精度は、グランフトルスに依存しており、また、都市の構成要素は、雑多でかつ小面積のものが多く、代表性のあるグランフトルスを得ることが難しいであろう。一方、ファジークラスタリングは、教師なし分類でありグランフトルスを必ずしも必要としないため、都市緑地の抽出には向いていると思われる。

ファジークラスタリングの手法にはいくつかの方法があり大隅(1979)等により概説されているが、今回用いた手法は、Bezdek(1974)によるファジーC-MEANS法である。以下に、その概要を述べる。

$p$ 個のバンドから成るピクセルが $n$ 個あるとき、これを $c$ 個のクラスに分類する。各ピクセルのデータベクトル $X_j$ は、

$$X_j = (x_{j1}, \dots, x_{jp}), \quad j=1, \dots, n$$

で表される。要素 $x_{jb}$  ( $b=1, \dots, p$ )は各バンドのカウント値である。各ピクセルが、各クラスに所属する度合は、次のメンバシップ行列 $U$ で表される。

$$U = \left\{ u_{ij} \mid u_{ij} \in [0, 1], \quad u_{ij} \geq 0, \quad \sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \quad i=1 \sim c, \quad j=1 \sim n \right\}$$

$U$ を求めるためにファジーC-MEANS法では、重みつき最小自乗法の問題として、次のような関数 $J_m$ の最小化を考える。

$$J_m = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ij})^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

但し、 $d_{ij}$ は、各クラスの平均ベクトルと各データベクトルの間の距離であり、次のように表される。 $V_i$ は、クラス $i$ の平均ベクトルであり、 $M$ は各バンドの分散 $\sigma_b$  ( $b=1, \dots, p$ )を対角成分にもつ行列を用いた。マハラノビスの距離を距離の概念として用いる場合には、 $M$ は分散共分散行列となる。

$$d_{ij}^2 = (X_j - V_i)^t M (X_j - V_i)$$

$$V_i = (v_{i1}, \dots, v_{ic})$$

$$M = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \sigma_p \end{pmatrix}$$



(1)式の $J_m$ を最小化する $U$ の局所最適解は、以下のFUZZY ISODATAアルゴリズムにより求められる事が、知られている。

①  $c$ の値、 $U$ の初期条件を与える。

② 次式の計算をおこなう。

$$V_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m X_j / \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m \quad (2)$$

$$u_{ij} = 1 / \left( \sum_{k=1}^c (d_{ij} / d_{kj})^{2/(m-1)} \right) \quad (3)$$

③ 収束条件を満足すれば計算終了。しない場合 $U$ を更新した後②へ戻る。

計算にあたり、 $c$ と $m$ の値は前もって決定しておく必要がある。カテゴリー数 $c$ については、次で議論する。

$m$ の値は、従来の研究例では、様々な値が用いられているが、大体1ないし3程度の例が多い。図3-13は、カテゴリーが二つ( $c=2$ )のとき、 $m$ の値の変化によるメンバーシップと片方のカテゴリーからの相対距離との関係の変化を示している。図より明らかなように、 $m$ が1に近いほど、排他的な分類となっている。(  $m=1$ のときは、クラスター分析のK-MEANS法となる。) 逆に、 $m$ の値が大きいときには、分類のあいまいさが増すことになる。 $m=3$ のとき、メンバーシップと距離とは比例関係にある。これは、(3)式に $m=3$ を代入した場合、直線の内分式となることから理解できる。

混在ピクセルの示す値が、それを構成する各カテゴリーの値に占有面積比を乗じた和に等しいという関係が成立すれば、(3)式より明らかなように $c$ の値にかかわらず、 $m=3$ のときには各カテゴリーのメンバーシップと占有面積比は等しくなるはずである。

クラスター分析を行う場合、分類するカテゴリー数 $c$ も問題となる。分類すべき地域の土地利用形態が既知であれば、そのカテゴリー数を採用するのも妥当と考えられるが、客観的な指標として評価関数等を使用することもできる。

Roubens (1982) は、 $c$ の決定のため幾つかの評価関数を比較検討し、次のような関数 $F$ 、 $H$ が適していると結論している。

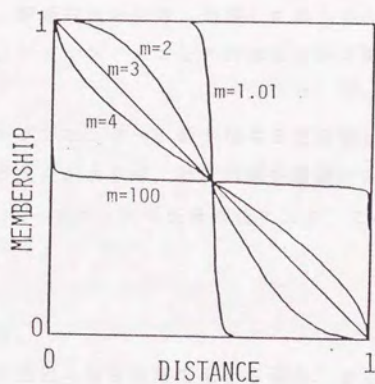


図3-13 あいまいさのパラメータ $m$ とメンバーシップ関数の関係。  
カテゴリーが二つの場合の片方のカテゴリーからの距離と  
メンバーシップの関係を示す。

$$F=1-(cF'-1)/(F'-1), F'=\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^2/n \quad (4)$$

$$H=\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij} \log_a u_{ij} / n / \log_a c, 1 < a < \infty \quad (5)$$

上記の関数は、値が低いほど分離性が良い、すなわち似通ったカテゴリーが少ないことを表している。評価関数を参考に分類した各々のカテゴリーが、何を表しているかの判断は、ランドトリスとの対応などから総合的に行う必要がある。

ファジークラスタリングでは、データ数が増えると分類に要する計算時間が飛躍的に増大するという欠点があるが、計算時間を短縮するアルゴリズムの開発(Cannon, 1986)や、ハードウェアの低価格化により、この欠点は補われつつある。

### (3) 植生指数の利用

ピクセル単位の植生の抽出に植生指数を用いる場合、ある域値以上の植生指数を示すピクセルを植生であるとみなす。混在ピクセルにおいても、植生を多く含むピクセルの植生指数は、少なく含むピクセルの植生指数よりも大きいと考えられる。

解析には、以下のような定義の植生指数を使用した。式の左辺は、各植生指数の略号を表し、以下ではこの略号を用いる。

Bi-band Ratio:	BR=バンド4/バンド3
Difference:	DVI=バンド4-バンド3
Normalized Difference:	ND=DVI/(バンド4+バンド3)
Transformed Index:	TVI=(ND+0.5) <sup>1/2</sup>

BRは、バンド4とバンド3の比、DVIは差である。NDは、大気の影響などによる誤差の場所による違いを除去するため、DVIをバンド3と4の和で正規化したものである。TVIは、負とにならないようにNDに変換を施したものである。



### 3. 3. 2 緑地の抽出

#### (1) 使用データ

解析には、1985年8月3日午前9時30分頃に関東地方（バス107ロウ35）を撮影したランドサットTMデータを使用した。この日の午前9時の東京（気象庁）の気温は29.9度、湿度は72%で、天候は快晴であった。夏期にしては、良質な画像が得られている。

このデータの中から、32X32ピクセル（約1キロ四方）の地域を東京都港区内から数カ所選んで切り出し、解析に使用した。各地域とも、ほぼ同じ結果を示したので、図3-14に示すような地域についての結果について述べる。この地域内には、青山霊園、乃木神社やその他小さな緑地が散在している。

緑地の状態のグランドトルスとしては、1985年に行われた第3次「港区みどりの実態調査」（1986）の結果の一つである、港区の緑の分布図を用いた。この分布図は、高度790mより撮影した1/5000の航空写真をもとに作成されたもので、25㎡以上の樹木地、草地、水面部、裸地が記入されている。これらの区分のうち今回の解析では、緑地の定義を狭義に樹木地のみとした。航空写真の撮影月日は1985年7月29日および10月2日であるので、今回使用したランドサットデータの撮影日とも近く、両者の緑地分布に大きな差は無いものと考えられる。この緑地分布図を、イメージスキャナを用いてマイクロコンピュータにデジタルデータとして取り込み、ランドサットと同じスケールのメッシュをかけて各ピクセルの緑被率の計算を行った。

ランドサットの撮影した画像には、衛星の傾き等の影響により幾何的歪みが生じるため、幾何補正、平滑化処理を含むリサンプリングを施したデータを使用することが多いが、これらの処理により原画像の情報の一部は失われてしまう。今回は、1ピクセル内の緑被率という微妙な問題を扱っているため、できるだけ原画像の情報を失わないよう未補正のデータを使用した。

ファジークラスタリングによる分類に際しては、同じフォーカルプレーン上にあるバンド1から4のデータを使用した。緑地は、これらのバンドの波長域で抽出が可能であること、および、同じフォーカルプレーン上のバンド間では、位置のズレが小さく分類精度が向上する（Wrigley et al., 1985）ことが、これ

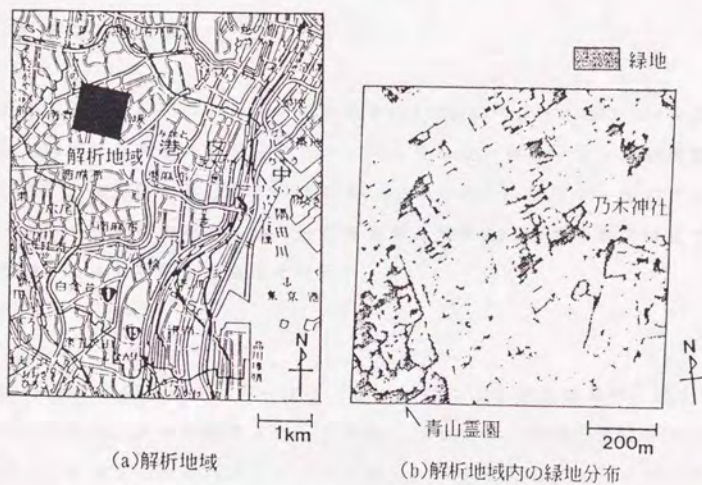


図3-14 解析地域と緑地分布

らのバンドを使用した理由である。バンド数 $p$ 、ピクセル数 $n$ の数値は、 $p=4$ 、 $n=1024$ となる。またクラス数 $g$ は2～6の範囲で計算した。

## (2) 位置補正

グラントルスとした緑地分布図とランドサットデータとの位置を合わせるため位置補正を行った。解析地域を含む256X256ピクセルの画像上で6ヶ所のGCP(地上基準点)をとり、最小自乗法によりアフィン変換による変換式を求め行った。

## (3) 緑地の抽出結果

### (a) グラントルス

解析地域の緑地分布のグラントルスを図3-15(a)に示す。図3-15(a)は、解析地域を縦横にそれぞれ32等分するメッシュをかけ、各メッシュ内の緑被率を計算して、三次元的に示したものである。この分布が、TMデータにファジークラスタリングや植生指数による分類を適用したとき、どの程度の精度で緑地の抽出が行えるかの評価の基準となる。

### (b) ファジークラスタリング

図3-15(a)に対応するファジークラスタリングによる分類結果が、図3-15(b)である。これは、クラス数を4として分類したときの、緑地と見なされるクラスのメンバシップの分布を示したものである。各クラスのスペクトルパターンは、大きく分けて緑地と市街地の2種に分かれるが、評価関数では、(4)式、(5)式ともにクラス数が4の時が最適であったので、その結果によった。

図3-15(a)と(b)を見比べると、両者の凹凸のパターンが良く似通っているのが明らかである。緑地の位置は、かなり正確に抽出されており、緑被率の値の分布も似ている。解析地域内に、緑被率が1のピクセルは少なく、ほとんどが混在ピクセルだが、緑被率の比較的低い緑地についても良く抽出されている。

青山霊園の部分は、緑地、非緑地がモザイク状に入り混じっているため図3-15(a)では凸凹しているが、図3-15(b)では比較的平坦である。地上700kmのランドサットと地表間の大気による散乱、減衰の影響で画像が不鮮明になるのが、



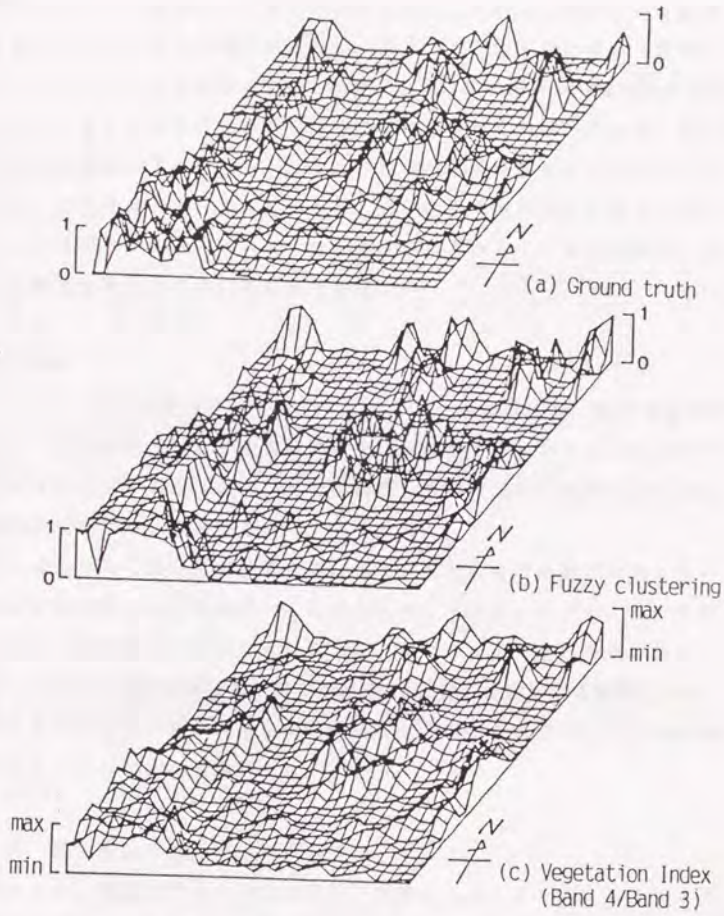


図3-15 緑被率の分布 (グランドトルスと分類の結果)

この差の原因であろう。

次に、各ピクセル毎に、グラントルスと分類結果の間の緑被率の対応をみた。人間の目では、両図はよく一致して見えるが、上記のような誤差や位置補正等の誤差のため、ピクセル毎の緑被率は、必ずしも1対1に正確には対応していない。そこで、あるピクセルを中心とする、3X3のピクセルの値の平均値をそのピクセルの値とする平滑化処理を行った後に、両者の比較を行った。図3-16は、平滑化処理後のグラントルスと分類結果の対応関係を示したものである。全体的には両者はよく一致しているが、分類結果で緑被率を実際より大きく見積っている部分がある。これは、青山霊園内に点在している非緑地が、分類結果では緑地とみなされているためである。

#### (c) 植生指数

図3-15(c)に、植生指数BRの分布を示す。ここで、縦軸の値は、解析地域内の最大値を1、最小値を0とした相対値である。かなりグラントルスに近いパターンを得ることができた。2バンド分の情報しか使用しない簡易な方法であるが、緑地の抽出法として良い方法といえるだろう。

ただし、緑地でない部分においての値は必ずしも最低値の水準とは限らないため、やや凹凸が多くノイズが混入したようなデータとなっている。このため、いくつ以上が、緑地を含むかの判断が難しく、特に緑被率が低い緑地の抽出が難しくなっており、図3-15(c)での値を緑被率として使用するには無理がある。緑被率が0および1に対応する植生指数の値を、何等かの方法で求める必要があるが、これについては次に分析する。

#### 3. 3. 3 植生指数を用いた緑被率の推定

以上のように、混在ピクセル内の緑被率を推定を、ファジークラスタリングによる分類や植生指数を使用する方法により試み、ある程度可能であることを示した。

植生指数を使用する方法は、比較的計算量も少なく、簡易に広域の緑地分布図を作成するのに適している。ここでは、植生指数を使用する方法について、より詳細な分析を行った。

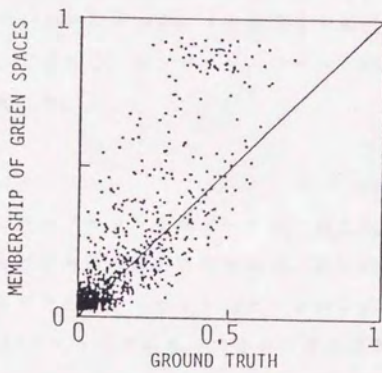


図3-16 グラントルスとファジークラスタリングによる分類結果との対応



従来の研究例では、尾島、今泉(1984)がランドサットMSSデータを用いて緑被率が推定できることを示した。竹内(1987)は、航空機MSSデータとランドサットMSSデータを用いて、同様な分析を行っている。また、横張、福原(1988)は、樹林地率の推定に植生指数を用いている。これらの例では、衛星リモートセンシングデータを用いた解析結果と、グランドトルスとを比較して手法の妥当性を評価しているが、尾島、今泉(1984)と横張、福原(1988)の例では、比較したデータ数が少なく、竹内(1987)ではグランドトルスの質に問題があり、検討が十分とはいえない。

そこで本研究では、解析地域を東京都港区のほぼ全域の、比較的広い地域とし、港区の緑地環境調査による詳細な緑地分布図をグランドトルスとして使用した。そして、ランドサットTMデータを使用して算出した植生指数と実際の緑被率の関係について分析し、ランドサットTMデータから、緑地分布を推定する手法について考察した。

#### (1) 使用データ

解析に使用したランドサットTMデータは、前と同様に1985年8月3日に関東地方を撮影したものである。解析対象地域は、図3-17に示すような港区周辺の部分であり、この部分をランドサットTMデータから切り出した。解析地域の大きさは、約250X250ピクセルである。できるだけ原画像の情報を失わないため、未補正のデータを使用し、16ライン毎のズレは手作業で補正した。

グランドトルスには、「港区みどりの実態調査」の分布図を用いた。分布図には、樹林地、草地、裸地および水域が記載されているが、植生指数のみにより樹林地と草地などを分離するのは難しいことや、緑地の大部分を樹林地が占めているため樹林地のみの分布を解析に用いた。

この緑地分布図を、イメージスキャナを用いてデジタル化し、ランドサットの画像と対応させるため10ヶ所の基準点を取りアフィン変換による位置補正を行った。次に、ランドサットのピクセルのスケールに相当するメッシュをかけ、各ピクセル内の緑地の割合、すなわち緑被率を計算し、解析に使用するグランドトルスデータを作成した。グランドトルスの範囲は、緑地分布図が港区内のみのものであるため、同様の範囲とした。

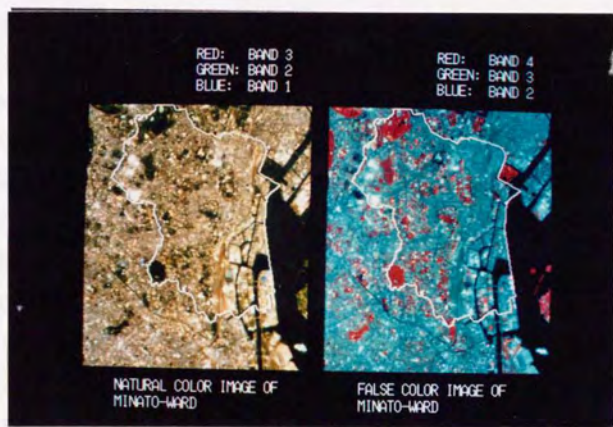


図3-17 解析地域のランドサットデータ

## (2) 植生指数と緑被率の関係

グラントルスの分布図において緑被率が2%以上のピクセルに関して、回帰分析により植生指数と緑被率の関係式を求めた。

その際、緑被率のグラントルスと対応するランドサットのピクセルが、1ピクセルでもズレていると、植生指数と緑被率の相関係数は大幅に低下する。しかし、両者のすべてのピクセルが完全に一致するような位置補正を、今回の解析地域に行うことは非常に難しい。そこで、両者の分布に3x3ピクセルの範囲で移動平均による平滑化を施してピクセルのズレの影響を緩和したデータに関しても、上記と同様の回帰分析を行った。

## (3) 結果

図3-18に、緑被率のグラントルスと植生指数BRの分布を比較して示す。また、回帰分析の結果である回帰式と相関係数を表3-3に示す。図3-18のBRの分布は、表3-3の回帰式により変換して、緑被率分布に近いものとしている。植生指数分布の方が、やや色が薄くなっているが、両者を見比べると大規模な樹林地からかなり小規模なものまで、全体的によく一致していることが明かである。

図3-19にはBR、図3-20にはNDについて、緑被率のグラントルスと表3-3の回帰式を用いて植生指数から計算した緑被率の推定値との関係を示す。DVI、TVIについては、ここでは示さないが図3-20のNDとほぼ同様の分布が得られた。平滑化前のデータは、非常にばらつきが大きく見えるが、データが推定線付近に集中しているため、相関係数は0.7以上であり、見かけほどのばらつきではない。

どの植生指数についても平滑化後の相関係数が、平滑化前よりも0.1以上向上している。これは、緑被率のグラントルスとランドサットデータの位置のズレに起因するものと考えられる。したがって、推定式や相関係数についても平滑化後のものの方が、むしろ実態をよく表しているであろう。

竹内(1987)、横張、福原(1988)の解析例では、NDがグラントルスと最も良い相関を与えているが、今回の解析では最も相関の高かったのはBRで、相関係数は0.9を越えている。また、他の植生指数でも0.8以上の相関係数が得られた。推定誤差の絶対値も、ほぼすべての範囲で0.2以下である。誤差の原因としては、



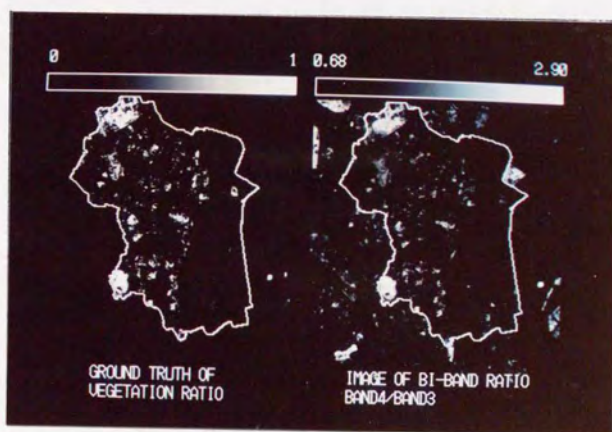


図3-18 緑被率（グラントルス）と植生指数（BR）の分布

表3-3 植生指数から緑被率を求めるための回帰式と各式の相関係数

植生 指数	平滑化前		平滑化後	
	回帰式	相関係数	回帰式	相関係数
BR	$0.452 \cdot BR - 0.307$	0.763	$0.508 \cdot BR - 0.396$	0.904
DVI	$0.0139 \cdot DVI + 0.154$	0.726	$0.0160 \cdot DVI + 0.121$	0.873
ND	$1.24 \cdot ND + 0.156$	0.740	$1.40 \cdot ND + 0.125$	0.876
TVI	$1.86 \cdot TVI - 1.15$	0.722	$2.093 \cdot TVI - 1.35$	0.857

植生指数の定義

Bi-band Ratio:  $BR = \text{BAND 4} / \text{BAND 3}$

Difference:  $DVI = \text{BAND 4} - \text{BAND 3}$

Normalized Difference:  $ND = DVI / (\text{BAND 4} + \text{BAND 3})$

Transformed Index:  $TVI = \sqrt{ND + 0.5}$

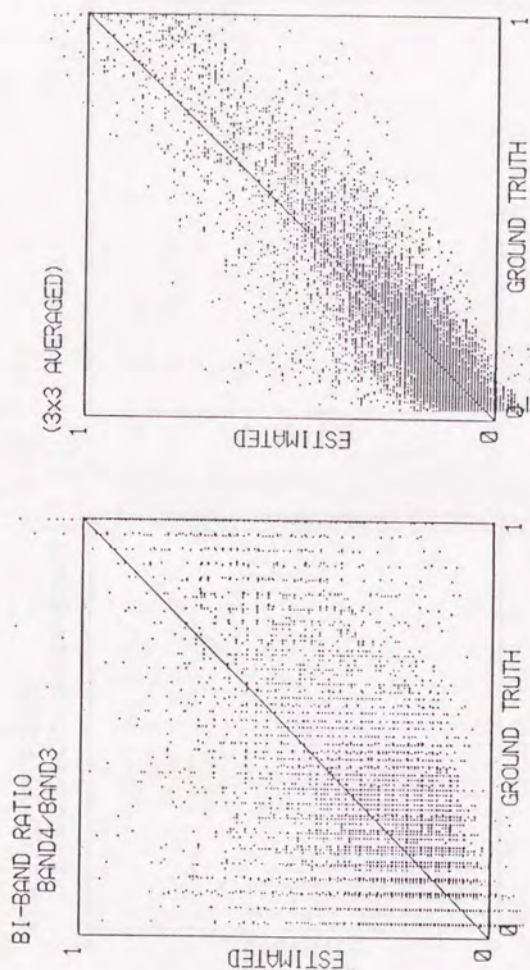


図3-19 回帰式による緑被率の推定値とグラントルス値の比較 (BR)



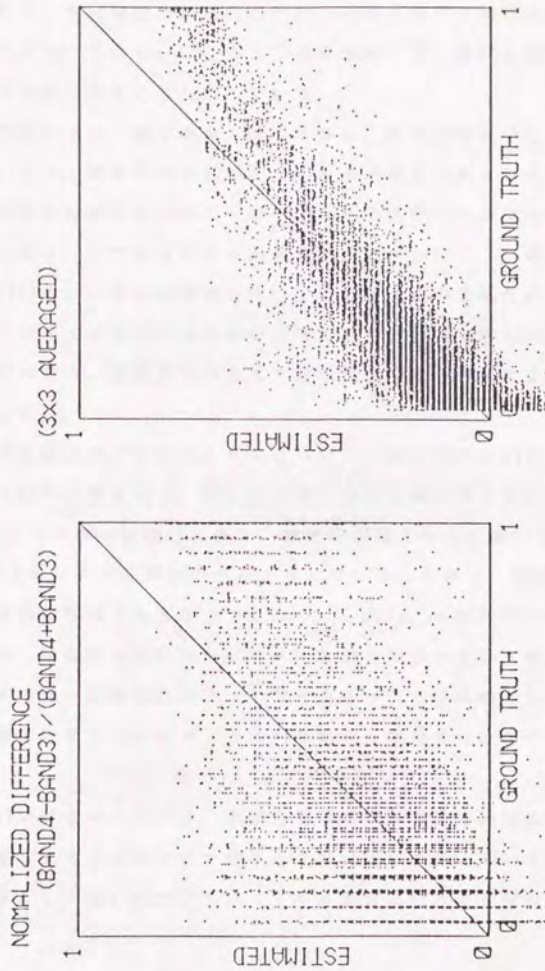


図3-20 回帰式による緑被率の推定値とグラントルス値の比較 (ND)

測定時の誤差などデータにもともと含まれているもの、位置合わせが不十分であるためのもの、また植生指数は植生の活性を示すため、同じ緑被率でも差があることなどが考えられる。以上のような結果は、良い精度で植生指数から緑被率の推定が可能であることを示している。

図3-19、図3-20では、緑被率が1近くなると、緑被率を過小評価する傾向がみられる。これは、緑被率の今回用いた回帰式が線形であるのに対し、植生指数と緑被率の関係が非線形であるためや、今回の解析データでは緑被率の低いものが非常に多く、その分布により回帰式が決定されたことが理由と考えられる。竹内(1987)は、非線形回帰式を用いているが、この方法だと相関係数は向上するが、パラメータを求める手順が煩雑であり実用性に乏しい。図3-19、図3-20を見る限りでは、非線形性はあまり強くないので一次式による推定も十分可能と考えられる。

図3-21には緑被率のグランドトルスについて、図3-22にはBRについて、その値とピクセル数の分布を示す。図3-21では、解析地域が都市域であるため緑被率0.1以下のピクセルが圧倒的に多く、緑被率が高くなるに従いピクセル数が減少し、0.9以上のピクセル数はやや多くなっている。これは、港区が都内では比較的緑に恵まれた地域であるからであろう。しかし、一般的に、都市域での緑被率の分布は、緑被率の低いほどピクセルの割合が多いという傾向であると思われる。従来のように緑被率がほぼ1のピクセルのみを緑地として抽出していたのでは、非常に多くの混在ピクセル内の緑地を無視することになるのが明かである。

図3-22のBRの分布については、水面と都市域の非緑地の部分にそれぞれピークがあり、値が大きくなるに従いピクセル数が少なくなっている。水面に相当する部分を除くと、図3-21のグランドトルスの分布型とよく似た形となっている。

#### (4) 植生指数を用いた緑地分布図の作成法について

ランドサットなどの衛星データから都市内の緑地分布図を作成しようとする場合、比較対照できるグランドトルスはない場合が多いと考えられる。したがって、回帰式による推定は行えない。しかし、緑被率は植生指数のほぼ一次関

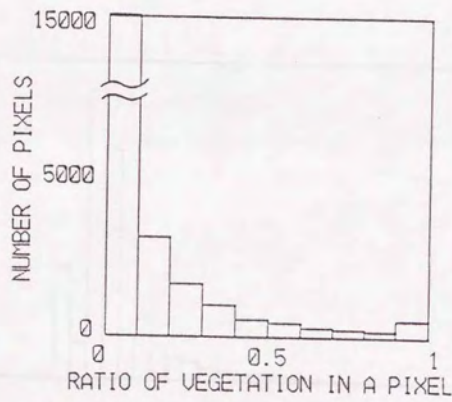


図3-21 緑被率のグラントルスのピクセルの分布



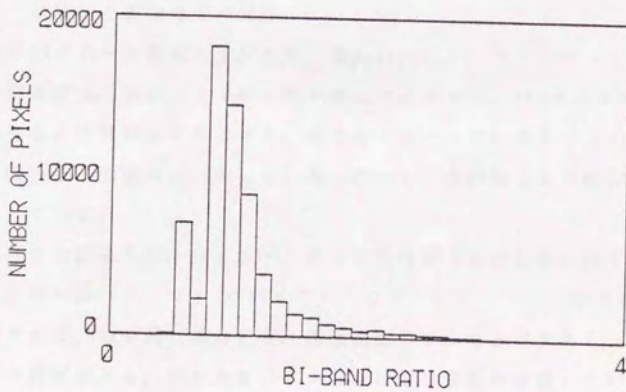


図3-22 BRのピクセルの分布

数で近似されると考えられるので、緑被率が0及び1に対応する植生指数の値を決めれば緑被率の推定を行うことができる。

グランドトリスが無い場合でも緑被率が1である緑地は、フォールスカラー画像などから視認することが可能であろう。したがって、規模の大きな緑地の植生指数を平均することなどにより、緑被率が1の場合の植生指数は推定できる。

緑被率が0の場合については、図3-21と図3-22を比較すると、都市域の非緑地のピークが緑被率0にほぼ相当している。したがって、グランドトリスが無い場合には、図3-22のような植生指数の値の分布を作成し、都市域の非緑地のピークの植生指数が緑被率0に相当するとしても大きな誤差はないと考えられる。

### 3. 3. 4 緑被率と表面温度の関係

解析地域のBRの分布と表面温度分布を、図3-23に示す。ランドサットの熱赤外バンドの解像度は、他のバンドの4倍の粗さであるので、4X4ピクセル毎に平均しBRの分布もこの解像度に合わせた。両者のパターンを比較すると、概ねBRの値が高い部分と、低温域は一致している。ただし、各緑地により温度低下の度合は異なっている。

BRと表面温度の関係を図3-24に示す。図は解析地域の海の影響を除くため、解析地域の左側の横40ピクセルX縦64ピクセルのデータについて、両者の関係を示したものである。BRが同じ値のとき、表面温度のばらつきが大きく、両者には、弱い負の相関がある。BRが大きいピクセルほど表面温度が低いという傾向は、各BRの最高温度については見られるが、最低温度についてはなかった。

小規模な緑地の効果は、より小さな範囲の地域で現れると考え、隣合うピクセル間でのBRと表面温度の差がどのような関係になっているかを示したのが図3-25である。3X3ピクセルの中心のピクセルと隣接する8ピクセルの表面温度とBRを比較し、表面温度差とBRの差の商が負の場合Giを1とし、隣接する8ピクセルの中でこのようなピクセルが何個あるかは、 $\sum Gi$ で表される。図3-25では、図3-24と同じ領域について、 $\sum Gi$ の頻度分布を示している。すなわち、BRが大きいピクセルほど表面温度が低いという関係が、隣接するピクセル中で幾つの

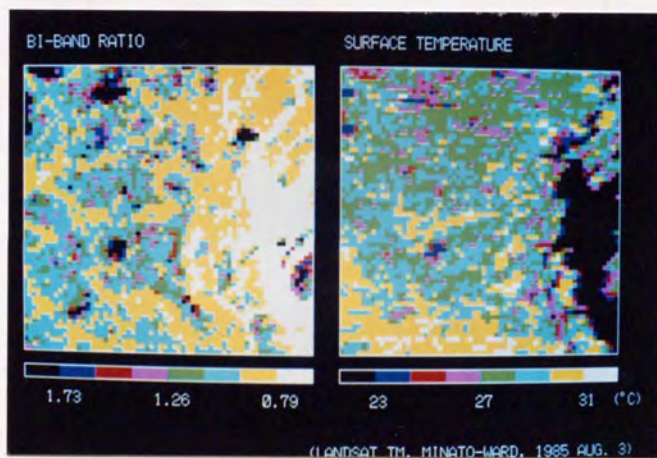


図3-23 植生指数(BR)と表面温度分布



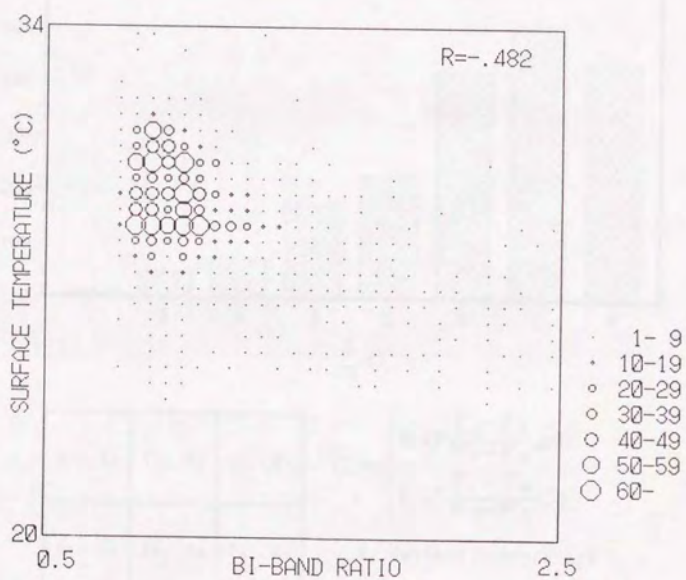
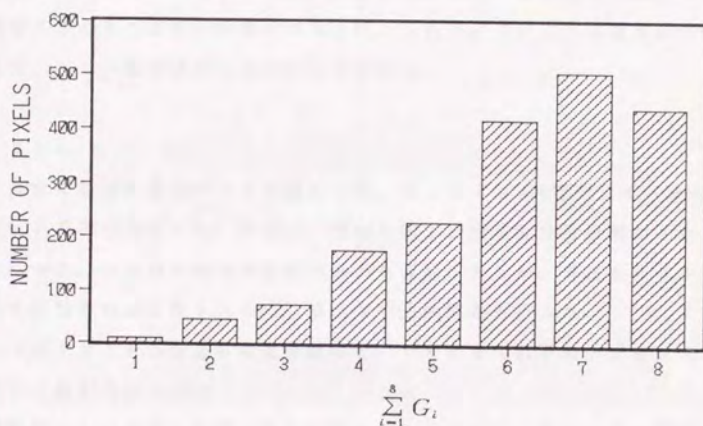


図3-24 植生指数(BR)と表面温度分布の関係



$T_1, V_1$	$T_2, V_2$	$T_3, V_3$
$T_8, V_8$	$T_9, V_9$	$T_4, V_4$
$T_7, V_7$	$T_6, V_6$	$T_5, V_5$

$$G_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{T_i - T_0}{V_i - V_0} \geq 0 \\ 1 & \text{if } \frac{T_i - T_0}{V_i - V_0} < 0 \end{cases}$$

$T_i$ : Surface Temperature

$V_i$ : Vegetation Index

図3-25 隣合うピクセル間の植生指数の差と表面温度分布の差の  
関係の頻度分布

ピクセルで成り立つかを示したものである。図3-25では $\Sigma Gi$ が5以上の過半数の隣接するピクセルで上述の関係が成り立つ頻度が、非常に高いことがわかる。したがって、小規模な緑地についても表面温度の低下に寄与していることが考えられる。

表面温度の形成には、緑被率の外にも、各緑地の樹種、緑地以外の部分の被覆の種類等さまざまな要素の影響があると考えられる。このような要素についても、今後、より一層の検討を重ねる必要がある。

### 3. 4 まとめ

広域にわたる温度の観測データが得るため、ランドサット5号のリモートセンシングデータの利用を行った。解析は、緑地分布と表面温度分布を対比することにより行った。大規模な緑地は比較的抽出も容易であるが、混在ピクセル内の小規模な緑地の抽出は難しいため、抽出の手法の開発も行った。

スケールが1ピクセル以上の大規模緑地と、1ピクセル以下の小規模緑地について分けて解析を行った。

大規模緑地では、夏期の温度が植生のあるところで低く、夏から冬に季節が変化するのに伴い温度分布と植生の相関が次第に小さくなることがわかった。最も差が見られた夏期のデータでは、緑地の面積が大きいほど温度が低く、また樹林の割合が大きい程温度が低い傾向があることを示した。

混在ピクセル内の緑被率を推定する方法としては、ファジークラスタリングによる分類や植生指数を使用する方法を試み、どちらも良い精度で推定が可能であることを示した。特に植生指数は、計算も単純で、実用性が高いため詳しく解析した。その結果、バイバンド比(BR)が特に緑被率と高い相関性を示した。BRと表面温度には弱い負の相関があり、BRが同じ値のとき表面温度のばらつきが大きく、緑被率が大きいピクセルほど表面温度が低いという傾向は、各BRの場合の最高温度についてのみはっきりと見られた。隣合うピクセル間でのBRと表面温度の差の関係からは、相対的にBRが大きいとき表面温度が低いという頻度が高く、小規模な緑地も表面温度の低下に寄与していることが示唆された。



引用文献

- 阿部勝弘, 山本孝二, 1979: 静止気象衛星”ひまわり”の赤外放射データによる海面水温の算出, 天気, 26, 493-507.
- Bezdek, J. C., 1974: Numerical taxonomy with fuzzy sets, Journal of Mathematical Biology, 1, 57-71.
- Cannon, R. L., Dave, J. V. and Bezdek, J. C., 1986: Efficient implementation of the fuzzy c-means clustering algorithms, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8, 248-255.
- 本條毅, 高倉直, 1986: ファジークラスティングのリモートセンシングへの応用, 第12回リモートセンシングシンポジウム資料, 41-44.
- 稲村 実, 豊田弘道, 藤村貞夫, 1984: リモートセンシング画像のカテゴリー分解とその応用, 日本リモートセンシング学会第4回学術講演会論文集, 57-60.
- 藤村貞夫, 花泉弘, 1982: 熱赤外リモートセンシングによる温度推定, 計測と制御, 21, 1020-1025.
- 藤村貞夫, 伊藤直史, 1985: 画素のカテゴリー分解における散乱反射特性の影響, 第11回リモートセンシングシンポジウム資料, 119-122.
- 港区, 1986: みどりの実態調査<第3次>
- 村井俊治, 他, 1976: 地球資源衛星を用いた緑地環境分析: 写真測量とリモートセンシング 15, 36-44
- 日本リモートセンシング研究会編, 1981: 画像の処理と解析: 共立出版, 208-211
- 尾島俊雄, 他, 1982: ランドサットデータによる市街地・緑地分布の調査研究, IBM東京サイエンティフィックセンターレポート, N:G 318-1569
- 尾島俊雄, 今泉恭一, 1984: ランドサットデータによる東京の緑地環境調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 597-598.
- 大隅 昇, 1979: ファジィ・クラスティング, 数理科学, No.191, 34-41.
- 力丸厚, 大嶋太市, 浦谷敏男, 桜井茂, 竹内章司, 1989: 都市域の熱分布に及ぼす緑被特性の影響(4)-緑地効果の地域特性抽出-, 日本写真測量学会平成

- 元年度年次学術講演会発表論文集, 65-68.
- リモートセンシング技術センター, 1986: 地球観測データ利用ハンドブッカー  
ランドサット編・改訂版, リモートセンシング技術センター.
- Roubens, M., 1982: Fuzzy clustering algorithms and their cluster  
validity, *European Journal of Operational Research*, 10, 294-301.
- Salomonson, V. V., Smith, P. L. and Park, A. B., 1980: An overview of  
progress in the design and implementation of Landsat-D systems, *IEEE  
Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-18, 137-146.
- Schowengerdt, R. A., 1983: Techniques for image processing and  
classification in remote sensing. Academic Press, 141.
- 竹内章司, 1987: 衛星画像の植生指標による画素内緑被率の推定: 写真測量と  
リモートセンシング, 26, 4-12.
- 土屋 巖, 1985: 中小都市の熱環境, 天気, 32, 631-634.
- Wrigley, R. C., Hlavka, C. A., Card, D. H. and Buis, 1985: Evaluation  
of Thematic Mapper interband registration and noise characteristics,  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1417-1425.
- 横張真, 福原道一, 1988: ランドサット TM データによる都市近郊での土地利  
用混在の把握: 造園雑誌, 50(5), 335-340.

## 4 シミュレーションによる解析

### 4. 1 はじめに

微気象観測などから得られるデータは、時間的にも空間的にも限界がある。様々な緑地のスケール、植栽の種類、気象条件などを想定して緑地の影響を定量的に予測するため、本章では、シミュレーションモデルを用いた分析の結果について述べる。都市緑地上の風速、温度分布などのような比較的スケールの小さいモデルでは、拡散係数の予測を細かく行う必要があるため、乱流モデルの一つである  $k-\varepsilon$  2 方程式モデルを使用した。

流体モデルは、天気予報に用いられる数値予報モデルや、建築での室内外の気流シミュレーションなど非常に多くの分野で用いられている。比較的小規模な気象現象のモデルとしては、海陸風、湖陸風のシミュレーション (Estoque, 1961, Estoque and Bhumralkar, 1969, Bill, 1979)、ヒートアイランドのシミュレーション (McElroy, 1973, Lee and Olfe, 1974, Bornstein, 1975, Gutman and Torrance, 1975, Yu and Wagner, 1975) などについての研究例が多い。また、より基礎的なものとしては、地表面の粗度などが急激に変化した場合の気流を研究する「step change problem」なども研究例が多い。中立状態を扱ったものには、Peterson (1969), Taylor (1969), Shir (1972), Rao et al. (1974), Wood (1978)、非中立状態を扱ったものには、Taylor (1970), Taylor (1971) などがある。これらの応用分野では、類似点も多いが、細かい点ではモデルの手法が異なっている。

都市緑地による気温低下のシミュレーションモデルは、本條 (1982)、Moriyama and Fukumoto (1988) などにより研究されているが、計算のみによる予測でありモデルの適用についての検証が十分でない。そこで、本研究では検証のため風洞実験を行い、その結果との比較を行った。その上で、モデルを適用してさまざまな場合を想定した計算を行った。

### 4. 2 モデル

#### 4. 2. 1 モデルの概要

モデルは、図4-1の模式図のような緑地を含む都市平面上を風が吹くとき、ス



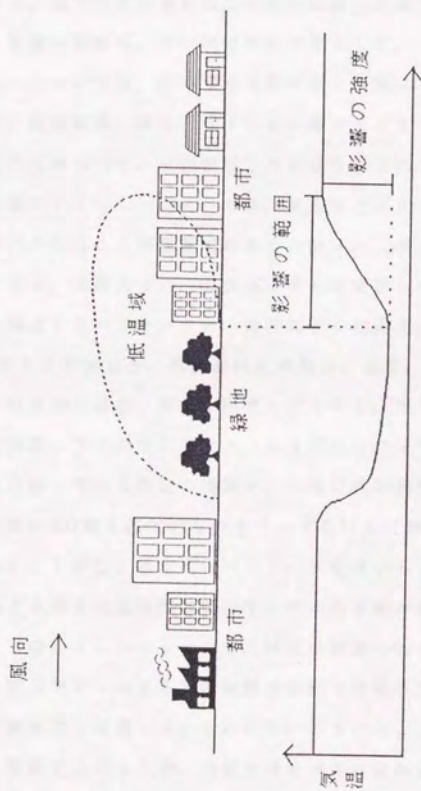


図4-1 都市緑地の熱的影響の模式図

テップ状に変化する地表面温度、湿度、粗度上での風速、温度、湿度などの分布を二次元で予測するものである。また、図4-1には、気温について本研究で用いた影響の範囲や影響の強度の定義を示している。緑地の影響の範囲や影響の強度の定義は、様々なものが考えられるが、本研究では、影響の範囲は、緑地の風下端から、風下の都市部の気温が緑地の風上の都市部の気温に回復する点までとし、影響の強度は、その間の気温の差とした。

シミュレーションでは、応用する分野や個々の例により、次元数、境界条件、基礎方程式、数値解法、扱うパラメーター等さまざまなバリエーションが考えられる。これらについて、今回使用した手法を以下に述べる。

緑地の影響のシミュレーションでは、都市などに比べスケールが小さく、水平方向の変化を知ることが重要であることから、二次元あるいは三次元のモデルが必要である。本研究では、二次元モデルを使用した。

熱収支に関連するパラメータと、地表面近くの風速、温度、湿度分布の関係は図4-2のように表される。地表面付近の風速、温度、湿度に直接的に影響を及ぼすのは、地表面の温度、湿度、粗度などである。そしてこれらは、その地域の熱収支の状態、空気力学的パラメータなどにより決定される。各パラメータの値が詳細に解っている特定の地域や、土壌の熱的特性などの影響を解析する場合には、図4-2の最も基本的なパラメータを与えて計算を行うモデルが現象の把握には良い。しかし、基本的なパラメータを用いると、特に二次元以上のモデルの場合さまざまな変数間の関係やモデルの挙動が非常に複雑になる。ヒートアイランドのシミュレーションで、研究の初期のMyrup(1969)、Atwater(1972)などの一次元モデルによる昇温機構の解析では熱収支を考慮し、二次元以上のモデルで熱収支を考慮しないものが多いのもこのような理由からであろう。本研究でも困難を避けるため、熱収支はモデルに組み込まず、緑地の特徴は、地表面の温度、湿度、粗度などで境界条件を与えて設定した。

緑地の内外では、急激に地表面が変化するため大気の運動量、熱、物質の拡散係数も大きく変化するものと考えられる。このような、拡散係数のモデル化は、さまざまな乱流モデルにより行うことができる。乱流現象の解析に用いられるモデルは、用いられる基礎方程式の種類によって、0方程式モデル、1方程式モデル、2方程式モデル、応力方程式モデル、LESモデルなどに分ける

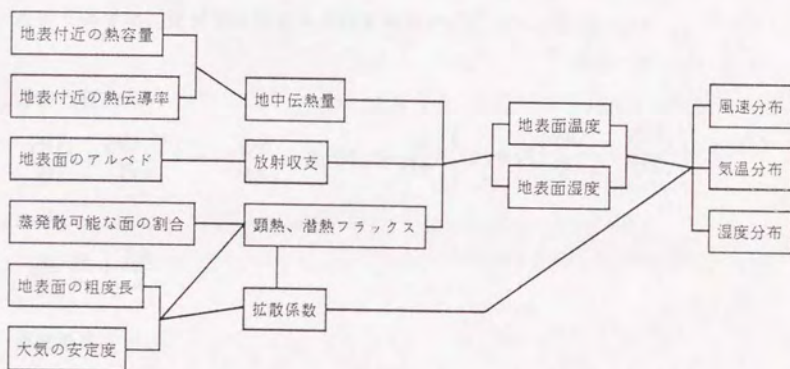


図4-2 熱収支に関連するパラメータと風速、気温、湿度分布間の関係



れる。

これらのモデルのうち、乱流現象のモデル化能力が比較的高く、計算にかかる時間が比較的短いのが2方程式モデルであり応用例も多い（日本機械学会、1986）。そこで、本研究でも $k-\varepsilon$ 2方程式モデルに、温度、湿度などの拡散方程式を加えたものをモデルとして使用した。

#### 4. 2. 2 基礎方程式

基礎方程式は以下に示すようなものである。 $k-\varepsilon$ 2方程式モデルの式の導出については、野村ら(1975)などにくわしい。

運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_j} - \beta g \theta \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu_t + \nu) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (1)$$

ただし

$$\pi = \frac{p}{\rho_0} + \frac{2k}{3} \quad (2)$$

連続の式

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} + \nu_\theta \right) \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

水蒸気などの拡散方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_H} + \nu_H \right) \frac{\partial H}{\partial x_j} \right\} \quad (5)$$

乱流エネルギー方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + \nu_t S - \varepsilon + \frac{\beta g}{\sigma_\theta} \nu_t \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \quad (6)$$

ただし

$$S = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

粘性消散率方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \nu_t S - \frac{c_2 k \varepsilon}{\nu_t} \quad (8)$$

渦動粘性係数

$$\nu_t = \frac{c_D k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中の変数の意味は、表4-1に示す。

コントロールボリューム法を用いたため、メッシュは風速とその他の変数が、図4-3に示すように交互に位置するスタガートメッシュを採用した。運動方程式の解法にはMAC法を用いた。移流項の空間差分の解法は、風速については中心差分を、その他の変数については風上差分を用いた。時間差分には、二次精度のアダムスバッシュフォース法を用いた。以上のような、数値解法の詳細については、Patankar(1974)、Roache(1978)などにくわしい。

実際のモデルは二次元であるので、以下では上記の式中の水平方向の座標をX、垂直方向をZ、水平方向の風速をU、垂直方向をWと表記することにする。

#### 4. 2. 3 境界条件

境界条件は、上面、地表面、風上面、風下面にわけて以下のように設定した。境界面には仮想セルを設け、設定した境界条件を満たす値をとるようにした。境界での変数などを、地表面とそれ以外に分け図4-4に示す。

##### (1) 上面、風下面

境界での変化が無いものとした。すなわち

$$U_a = U_b, \quad W_a = W_b, \quad k_a = k_b, \quad \nu_{ta} = \nu_{tb}, \quad \varepsilon_a = \varepsilon_b, \quad \theta_a = \theta_b, \quad H_a = H_b$$

##### (2) 風上面

風速、温度、湿度については、垂直分布を与え、時間的な変化は無いものとした。すなわち、

表4-1 記号の説明

## 変数

$t$	時間
$x_i$	座標ベクトル
$U_i$	速度
$k$	乱流エネルギー
$\varepsilon$	粘性逸散率
$p$	気圧
$\theta$	温度
$H$	水蒸気圧
$\rho_0$	静止大気密度

$$\beta \quad \text{空気の体積膨張率} \quad \beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \pi}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T_0}$$

$g$	重力加速度
$\nu$	分子動粘性係数 (空気)
$\nu_\theta$	温度拡散係数 (空気)
$\nu_H$	分子動粘性係数 (水蒸気)
$\nu_t$	渦動粘性係数 (空気)

## 定数

$C_1$	1.44
$C_2$	0.18
$C_D$	0.09
$\sigma_\theta$	1
$\sigma_H$	1
$\sigma_k$	1
$\sigma_\varepsilon$	1.3



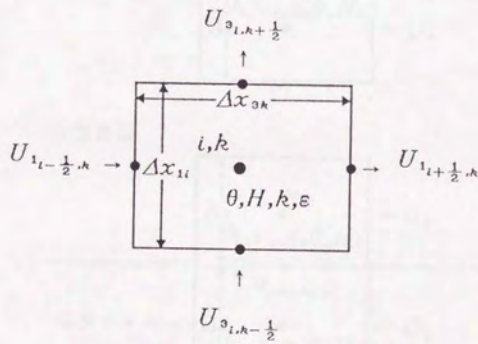


図4-3 モデルに用いたメッシュ

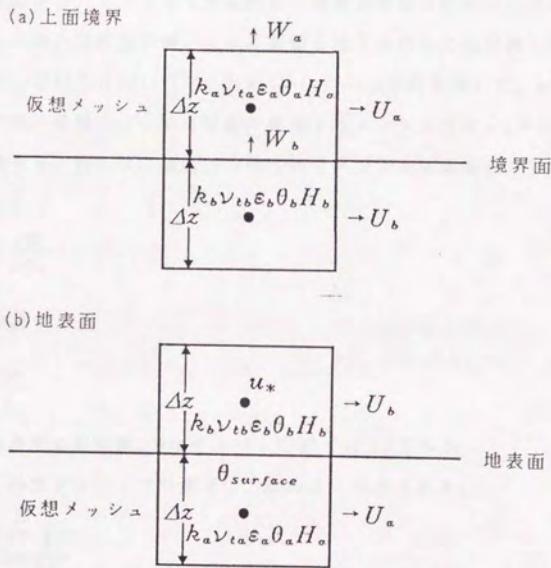


図4-4 境界付近でのメッシュと変数

$$U_a = U(z), W_a = 0, \theta_a = \theta(z), H_a = H(z)$$

その他は、(1)同様、境界での変化が無いとした。

### (3) 地表面

地表での境界条件は、ノンスリップ条件などが最も単純な条件としてよく用いられるが、その場合粗度長の違いによる影響を取り入れることが難しい。そこで本研究では、野村ら(1977)の用いたwall-boundary条件を用いた。wall-boundary条件では、仮想メッシュと地面に隣接するメッシュでは $v_t$ や $u$ などを一定値と仮定する。例えば、風速については以下のような式が成り立つものとする。

$$U_b = \frac{u_*}{k} \ln \frac{\Delta z}{2z_0} \quad (10)$$

$$v_{tb} \frac{\partial U}{\partial z} = u_*^2 \quad (11)$$

$$v_{tb} = k u_* \frac{\Delta z}{2} \quad (12)$$

ただし、 $z_0$ は地表面の粗度長、 $k$ はカルマン定数(=0.4)である。

以上の式より、仮想メッシュでの風速は、次のように表される。

$$U_a = U_b - \frac{2U_b}{\ln \frac{\Delta z}{2z_0}} \quad (13)$$

また、同様に温度については、仮想メッシュでの値は次のように表される。湿度についても、同様の形式で表される。

$$\theta_a = \theta_b - 2\sigma_\theta \frac{\theta_b - \theta_{surface}}{\ln \frac{\Delta z}{2z_0}} \quad (14)$$

$$H_a = H_b - 2\sigma_H \frac{H_b - H_{surface}}{\ln \frac{\Delta z}{2z_0}} \quad (15)$$

### 4. 3 風洞実験と計算値の比較

モデル適用が妥当かどうかを調べるため、風洞実験の測定結果とモデルの計算結果との比較を行った。風洞実験は、地表面粗度、地表面温度を変化させた場合について行った。



このような地表面の条件を変化についての風洞実験は、Antonia and Luxton (1971, 1972)が粗度がステップ状に変化する場合、Andreopoulos(1982)が粗度がパルス状に変化する場合を行っているが、地表面温度を変化させた場合については研究例が少ない。

実験に使用した風洞は、農業工学研究所内にあり、計測洞の長さが20m、断面が横4m、高さ3mである。計測センサーを取り付けるトラバースは、遠隔操作により任意の位置に移動できる。また、風の吹き出し口には整流板があり、ある程度垂直方向の風速分布を微調整できるようになっている。

#### 4. 3. 1 地表面粗度長を変化させた場合

##### (1) 風洞実験

地表面粗度長を変化させた場合の風洞実験の模式図を図4-5に示す。また、図4-6に実験の様子を示す。

実験では、風速が、高さ0.6mで6m/s、風上境界の垂直分布が対数分布となるように整流板を調整した。風速の計測には、熱線風速計(カノマックス)を用いた。X型プローブを用い、主風向と垂直方向の風速を測定した。記録は、データレコーダで行い、A/D変換をしてコンピュータに取り込み解析を行った。

地表面の滑らかな面としては毛の短い絨毯を用いた。粗い面としては、粗度要素を主風向方向に角材を幅1.6mにわたって置き、粗度が、smooth-rough-smoothとなるようにした。このときの粗度は、滑らかな面で0.24mm、粗い面で10mmで、この値を、シミュレーションにも使用した。その他のシミュレーションに用いたパラメーター値は、図4-5に示すとおりである。

風洞実験中の気温は、約30度前後であり地表面との差もほとんど無く、中立状態の気流といえる。

##### (2) 結果

風洞実験の測定とモデルの計算との比較を、図4-7に示す。

実験と計算の結果を比較すると、(a)の水平方向の平均風速は非常によく一致した。粗い面により、地表面付近の風速が落ち、再び滑らかな面になり地表面付近の風速から徐々に元の垂直分布に回復する様子がよくわかる。より単純なモ



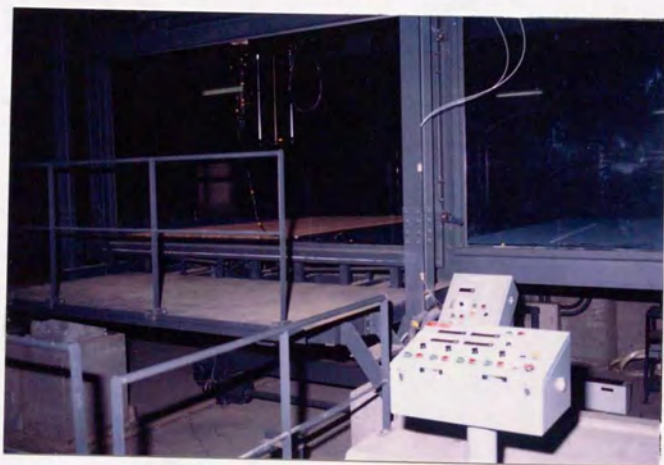


図4-6 風洞実験の様子  
(地表面粗度長を変化させた場合)



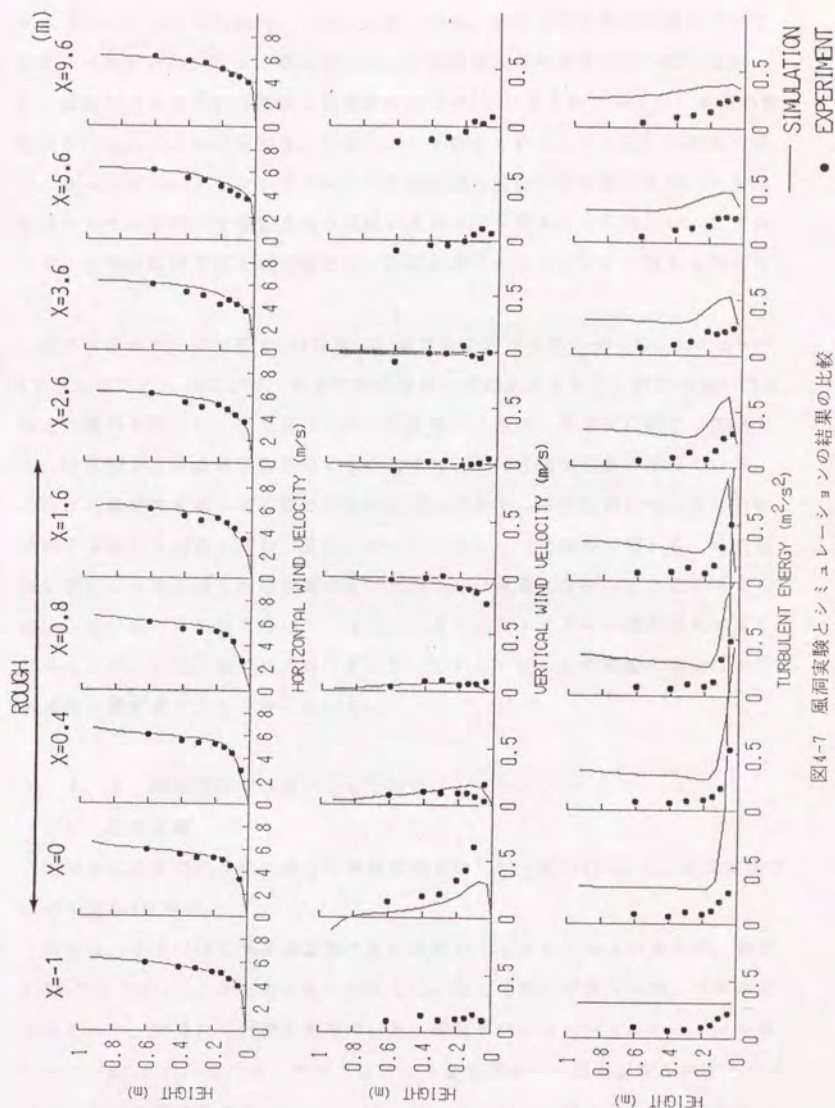


図4-7 風洞実験とシミュレーションの結果の比較  
(地表面粗度長を変化させた場合)

デル (Honjo and Takakura, 1986) によっても、水平方向の平均風速についてはよい一致がみられたが、垂直方向については単純なモデルでは一致しなかった。垂直方向の風速の計算値と測定値の比較は(b)に示されているが、風速の絶対値が10cm/s以上の箇所では、両者はよく一致している。これ以下の風速の場合、キャリブレーションやプローブの設置位置に起因する誤差のため、X形の熱線センサーを用いて垂直方向の風速の正確な値を得ることが難しい。したがって、全体的に計算値と測定値とは、非常によく一致していると言えるであろう。

乱流エネルギーの比較を(c)に示す。測定値の乱流エネルギーは、 $1/2(u^2 + w^2)$ で代用した。 $u$ 、 $w$ は水平、垂直方向の風速の変動成分である。計算においては、風上の境界条件として、垂直方向に一定値を与えたが、風上での測定した値では、地表面ではほぼ同じ値を示すものの上に行くほど値が小さくなっている。これは、風洞吹き出しでの風の乱れが非常に小さく、平均風速については対数分布となるよう調整したが、乱流エネルギーについては調整が難しく、地表面の影響による境界層も助走距離が短いため十分に発達しなかったためと考えられる。粗い面での影響を受けて、地表面付近の乱流エネルギー値が非常に高くなることや、その下流の滑らかな面に移ってからの粗い面の影響の傾向などは、計算値と測定値でよく一致している。

#### 4. 3. 2 地表面温度を変化させた場合

##### (1) 風洞実験

地表面温度を変化させた場合の風洞実験の模式図を図4-8に示す。風洞実験の様子を図4-9に示す。

風速は、小さいほど地表面温度の差の影響がはっきりとみられるため、高さ0.25mで0.24m/sと、かなり小さく設定した。風上境界の垂直分布は、ほぼ対数分布であり、計算にも対数分布を用いた。高温部分には、パネルヒーターを幅0.3m×2.7mにわたってひき、その上にアルミ板を置きその表面温度が80度となるようにon/off制御によりコントロールした。ヒーター以外の低温部分は温度のコントロールは行わなかったが、ヒーターの付近以外はほぼ定常状態で約10度であった。

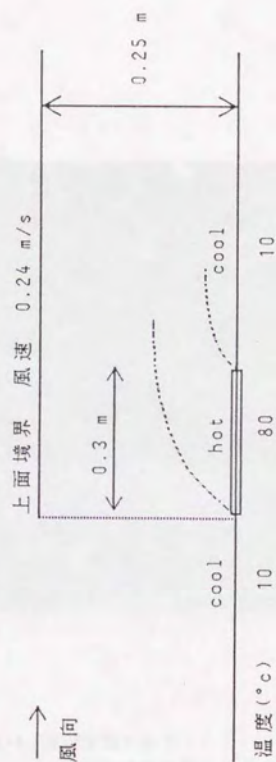


図4-8 風洞実験の模式図とシミュレーションに使用したパラメーター  
(地表面温度を変化させた場合)



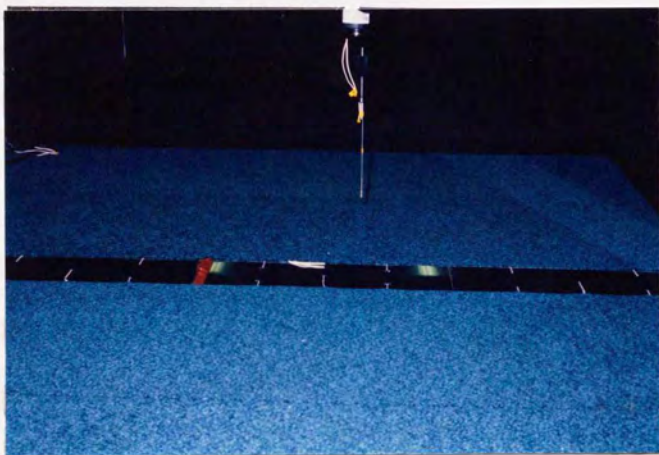


図4-9 風洞実験の様子  
(地表面温度を変化させた場合)

## (2) 結果

図4-10に風速と、温度分布の測定値および計算値を示す。

(a)の風速分布は、絶対値が小さいこともあり、計測が非常に難しかったが、測定値と計算値は、ほぼよい一致を示した。

(b)温度分布は、低温部から高温部へ移る場合の温度分布などは一致したが、高温部から低温部にうつるところで、温度の高い部分の発達計算結果ではやや不十分である。これは、特にヒーターの風下側の端と絨毯の間に少し段差があり、そこで流れの乱れがあった影響のためと思われる。

以上のような、風洞実験とモデルの比較から、このモデルを使用して緑地の影響を分析することができると考えられる。

## 4. 4 観測例との比較

実スケールでの観測値と計算値を比較できるような例は、理想的なデータが得られる地形が少ないこと、垂直方向の気温、風速の測定は、気球や飛行機が必要で労力がかかることなどからきわめて少ない。片山ら(1987)は、福岡市大濠公園付近で風速、気温、湿度などの測定を行っており、シミュレーションモデルによる計算結果との比較を行える数少ない測定例の一つであるのでこの例を用いた。観測の対象となった地域を模式図的に図4-11に示すが、観測地域では海、市街地、大濠公園の池、市街地があり、日中には海から市街地の方向に、安定した海風が吹く。測定では、三カ所で係留気球を上下し風速、気温、湿度の垂直分布を計測しており、中間点では、地表面温度なども計測している。比較するデータには1985年8月27日14時のものを用いた。計算に使用した上面境界での風速、温度、湿度、地表面境界での粗度長、温度、湿度の値やスケールは図4-11に示すとおりである。また、風上境界の風速、温度、湿度の垂直分布は対数分布とした。

図4-12は、水平方向の風速分布、温度分布について観測値、計算値を示したものである。垂直分布の測定のため係留気球を下から上にあげるのに1時間を用意するため、測定結果の変動は非常に大きくなっている。

(a)の風速分布では、風上境界での風速も計算で仮定した対数法則とはかなり異なっている。したがって、その他の地点でも、計算結果と測定値が異なり、

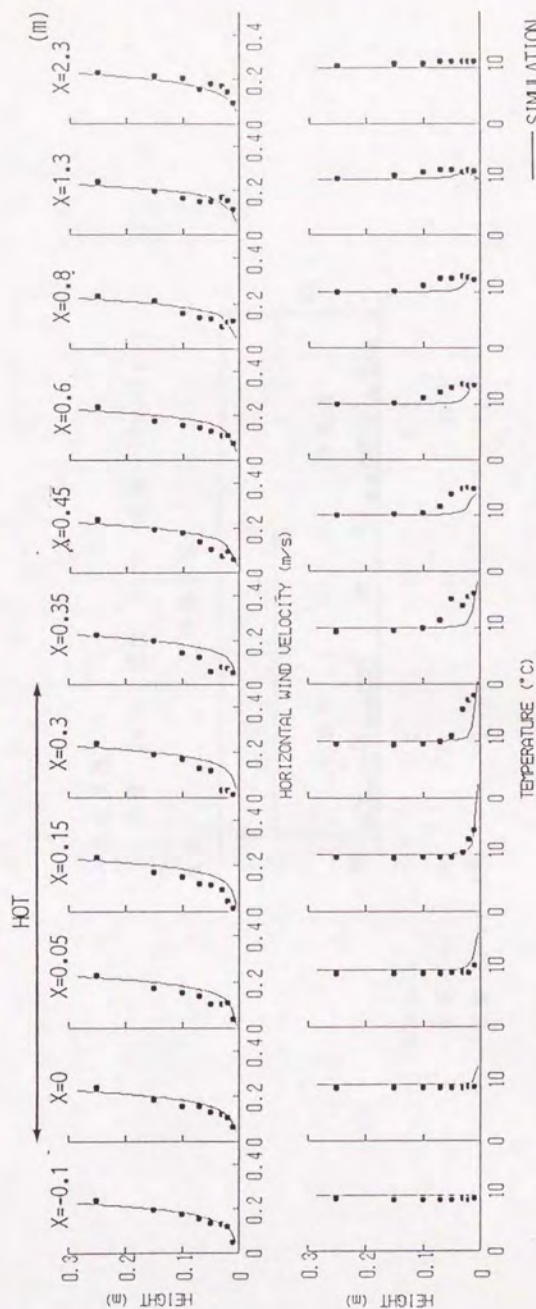


図4-10 風洞実験とシミュレーションの結果の比較  
(地表面温度を変化させた場合)



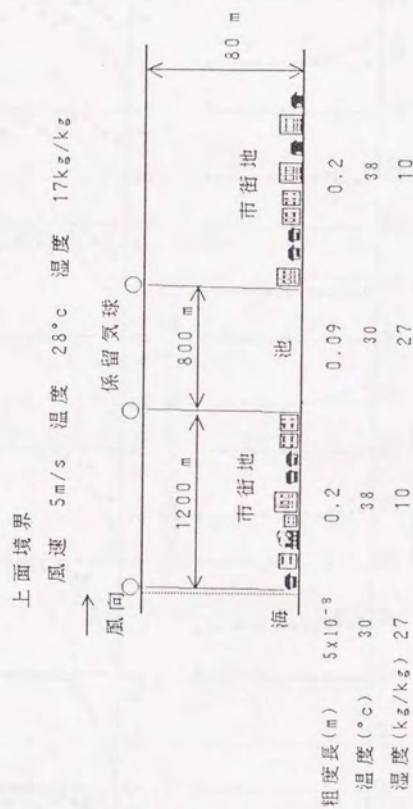


図4-11 片山ら(1987)の観測の模式図とシミュレーションに使用したパラメーター

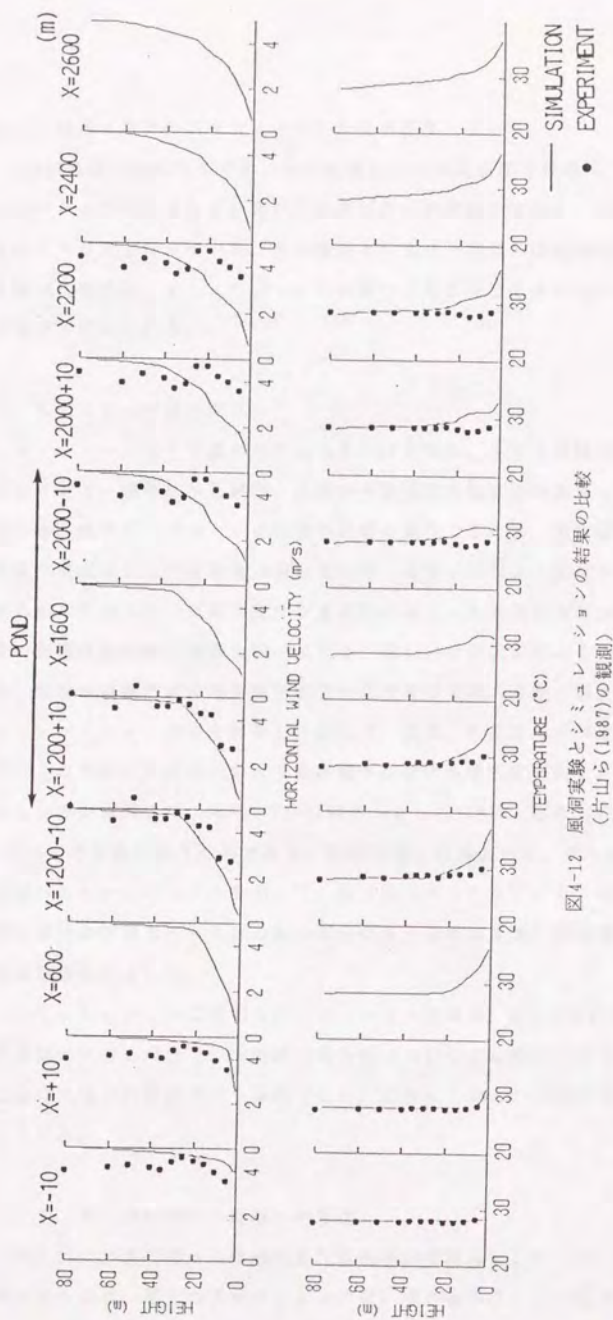


図4-12 風洞実験とシミュレーションの結果の比較  
(片山ら(1987)の観測)

特に池の風下端でのプロファイルはかなり異なっている。

(b)の気温分布についても、池の影響による気温の低下現象については、シミュレーションでも表れているが、地表付近の気温の測定値は、計算値よりもかなり小さな値となっている。その理由としては、実際の市街地の平均的な表面温度の代表値は、シミュレーションに用いた地表面温度よりもかなり小さいことなどが考えられる。

#### 4. 5 ステップ状の変化

コンクリートなどで覆われた面の多い市街地を、2章と同様に都市部とよぶことにする。都市部から緑地、緑地から都市部に地表面がステップ状に変化するとき、地表面のパラメータの値が急激に変化するため、地表面付近の風速、気温、湿度なども影響を受ける。都市部-緑地-都市部と変化する地表面上の流れも、このステップ状の変化が連続的に起こった場合と考えられる。都市緑地の影響の基本的な特徴を調べるため、図4-13の模式図のように都市部から緑地、緑地から都市部に地表面が変化する時の風速、温度、湿度分布の変化をシミュレーションにより計算し、温度差、風速、粗度長などが異なった場合、これらの分布の形成にどのような影響を及ぼすかを感度解析した。シミュレーションの対象領域は、水平方向に150メッシュ(1500m)、垂直方向に50メッシュ(200m)の実線の長方形内である。対象領域の計算の前に、均一な地表面をもつ同様のスケールのモデルを用いて、風上境界条件を設定するために点線の長方形の部分の計算を行った。点線の部分の風上境界の風速、温湿度などの垂直分布は対数分布とした。

シミュレーションに使用したパラメーターの値を、表4-2に示す。想定したのは夏期の日中の場合で、市街地の地表面は日射により高温となるが、緑地の地表面は気温と同程度という条件であり、実際にこのような状況は多いものと考えられる。

##### 4. 5. 1 都市部から緑地への変化

図4-14に、都市部から緑地の変化の基本的な場合としたCASE3の温度および湿度分布を示す。風上のプロファイルでは、地表面に近いほど温度が高いが、緑



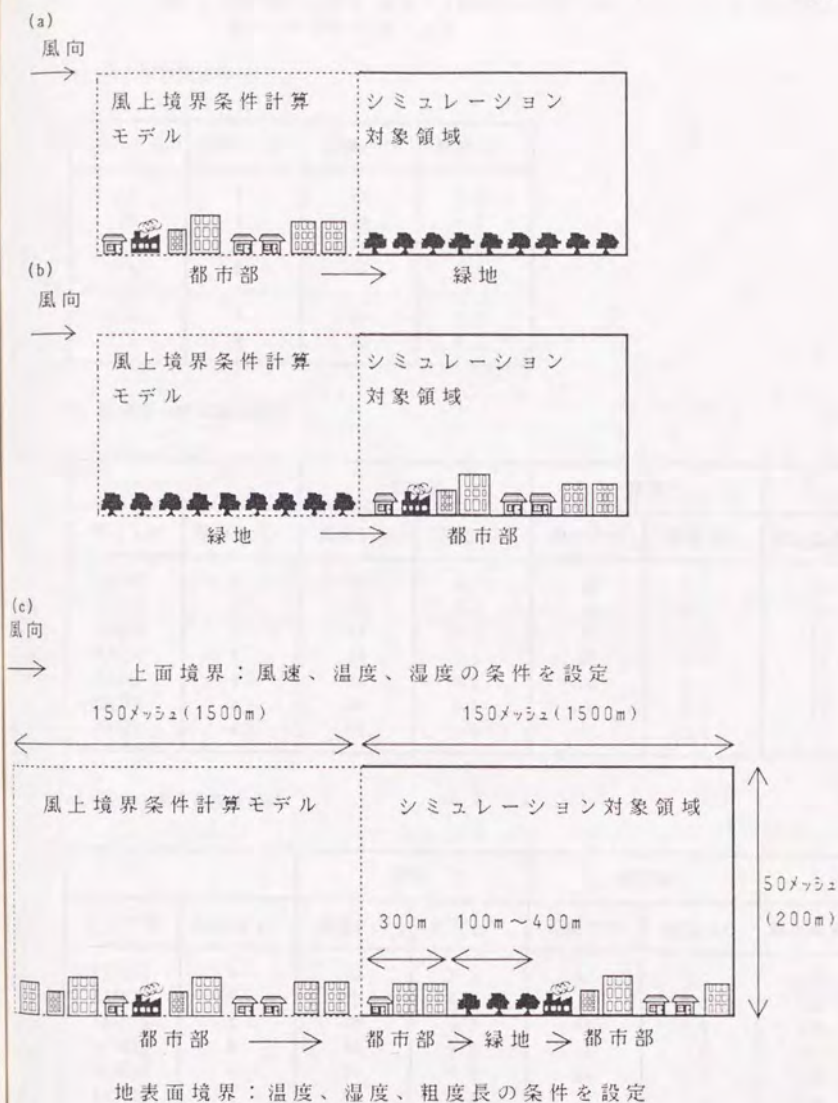


図4-13 都市緑地のシミュレーション模式図

表4-2 都市部から緑地、緑地から都市部への変化のシミュレーションに使用した  
各ケースでのパラメーター -113-

(a) 風上境界設定条件

データ名	風速(m/s)	温度(°C)	粗度(m)
11	4	31	0.2
12	4	32	0.2
13	4	34	0.2
14	8	34	0.2
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>			
110	4	30	0.2
111	8	30	0.2

(b) 都市部→緑地設定条件

		都市部		緑地		
データ名	風速(m/s)	温度(°C)	粗度(m)	温度(°C)	粗度(m)	風上条件名
CASE1	4	31	0.2	30	0.2	11
CASE2	4	32	0.2	30	0.2	12
CASE3	4	34	0.2	30	0.2	13
CASE4	8	34	0.2	30	0.2	14
CASE5	4	34	0.2	30	0.1	13
CASE6	4	34	0.2	30	0.4	13
CASE7	4	34	0.2	30	0.8	13

(c) 緑地→都市部設定条件

		緑地		都市部		
データ名	風速(m/s)	温度(°C)	粗度(m)	温度(°C)	粗度(m)	風上条件名
CASE11	4	30	0.2	31	0.2	110
CASE12	4	30	0.2	32	0.2	110
CASE13	4	30	0.2	34	0.2	110
CASE14	8	30	0.2	34	0.2	111
CASE15	4	30	0.2	34	0.1	110
CASE16	4	30	0.2	34	0.4	110
CASE17	4	30	0.2	34	0.8	110

全ての場合、地表面湿度は、都市部では0、緑地では1。

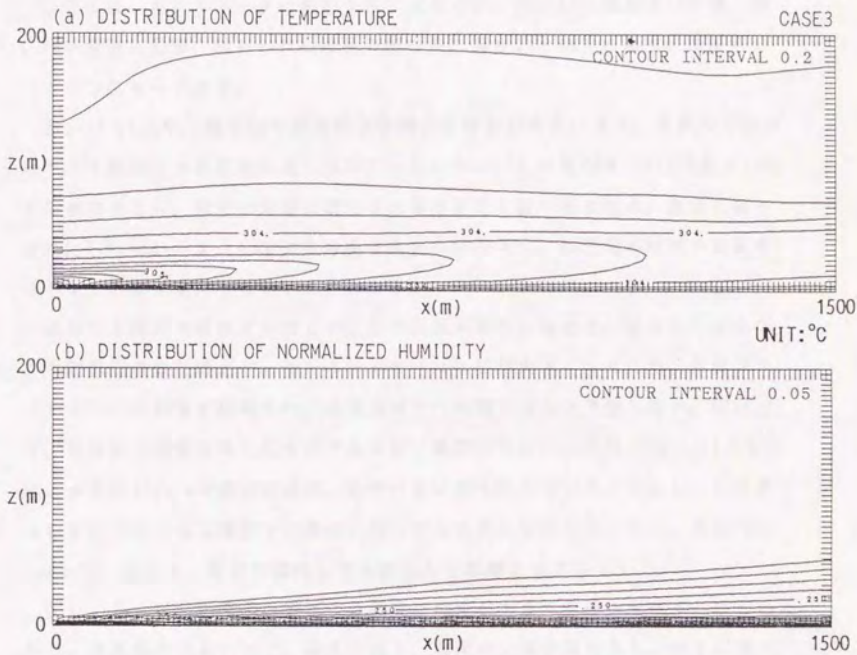


図4-14 都市部から緑地への変化の場合(CASE3)の緑地上の温度分布および湿度分布  
Xは風上境界、Zは地表面境界からの距離



地に移り地表面温度が急に下がるため、地表面よりやや上から地上数十m程度までに高温の部分が形成されている。また、風下ほど最高気温となる高度が高く、値は低くなっている。一方、湿度は、地表面に近い程高い値をとり、風下ほど影響の及ぶ高度が高くなっている。

以下には、各パラメータの影響を示す図を示す。図4-15は温度差の影響、図4-16は風速の影響、図4-17は粗度長の影響を、高さ2mと6mでの温度、湿度について示したものである。

図4-15(a)より、高さ2mで都市部と緑地の温度差が大きいほど、温度の下降が急であり緑地上での気温は高くなることがわかる。この傾向は、(c)の高さ6mでも同様であるが、地表の影響が緩和され温度変化は緩やかである。湿度に関しては、(b)、(d)のようにすべての場合あまり差が無く、都市部と緑地の温度差はあまり影響を及ぼさないことがわかる。

都市部と緑地の温度差が同じで上空の風速が異なる場合は、風速が大きくなると顕熱伝達量が増え、モーニン・オブコフ長が大きくなるため、温度プロファイルへの影響が相殺され、風速差がどう影響するかは予想し難い。図4-16は、風速差の影響を示したものであるが、温度分布については、(a)、(c)ともに風速が大きい8m/sの場合の方が、やや小さい値を示している。しかし、その差はわずかであり風上境界での差が、風下でもあまり変化していない。また(b)、(d)より、湿度は、風速が変化してもほとんど影響されていない。

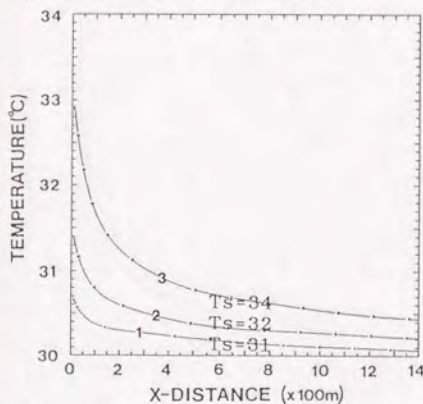
図4-17からは、粗度長の差により温度、湿度が大きく影響を受けることがわかる。粗度長が大きいほど、温度の低下、湿度の上昇が急であり、例えば最大の0.8mの場合、高さ2mでは地表面変化の100m風下までの間に8割程度の変化が起きている。

#### 4. 5. 2 緑地から都市部への変化

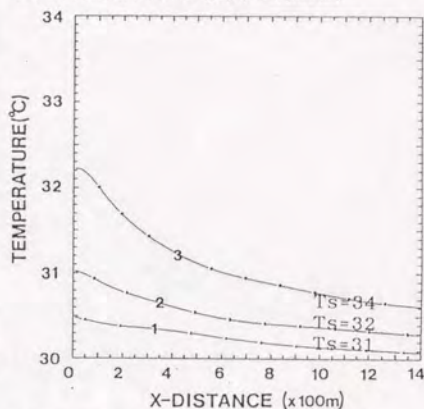
図4-18に、緑地から都市部への変化の基本的な場合としたCASE13の温度および湿度分布を示す。図4-14に示した温度分布と湿度分布を入れ換えたような分布となっている。

前章と同様、以下に各パラメータの影響を示す図を示す。高さ2mと6mでの温度、高さ2mでの湿度について、図4-19は温度差の影響、図4-20は風速の影響、

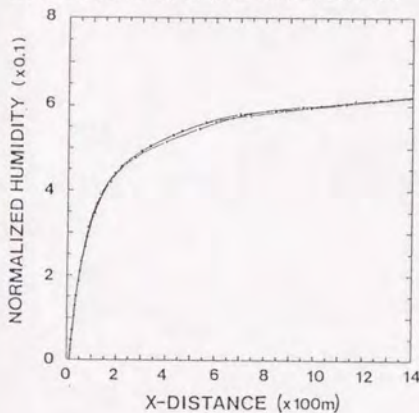
(a) Temperature (CASE 1,2,3, height:2m)



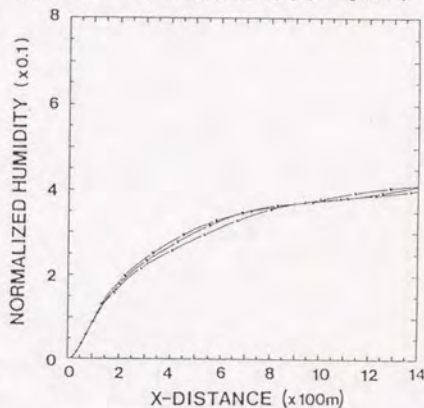
(c) Temperature (CASE 1,2,3, height:6m)



(b) Normalized humidity (CASE 1,2,3, height:2m)



(d) Normalized humidity (CASE 1,2,3, height:6m)

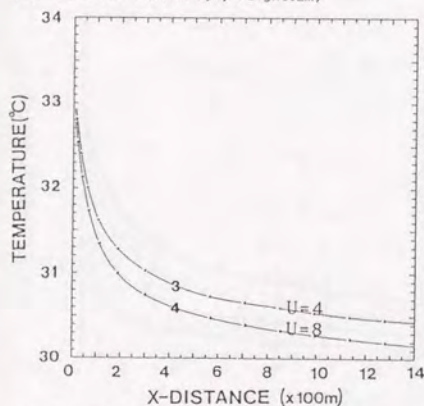


Ts: Surface Temperature (°C)

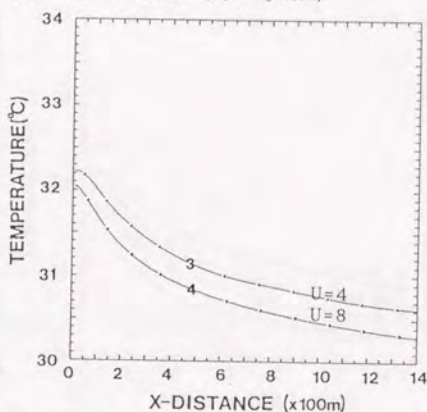
図4-15 都市部から緑地への変化で両者の温度差が緑地上の温度、湿度分布に及ぼす影響

X-DISTANCEは、地表面が緑地に変化した点からの距離、線上の数字はデータ名、Tsは都市部の表面温度を表す。緑地の表面温度は30°C。

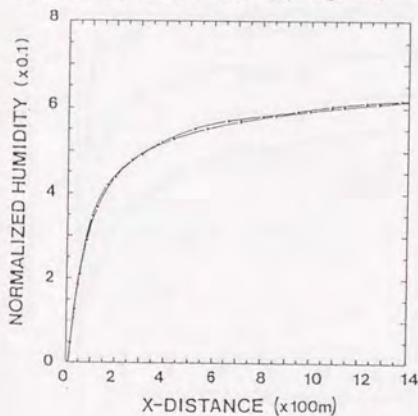
(a) Temperature (CASE 3,4, height:2m)



(c) Temperature (CASE 3,4, height:6m)



(b) Normalized humidity (CASE 3,4, height:2m)



(d) Normalized humidity (CASE 3,4, height:6m)

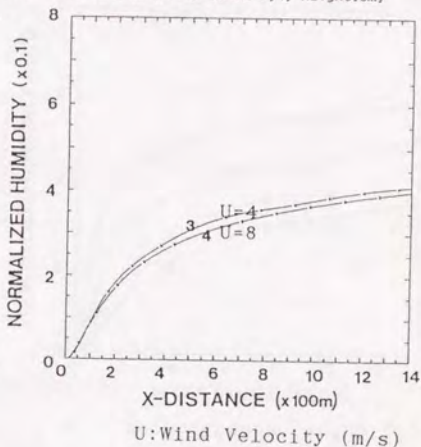
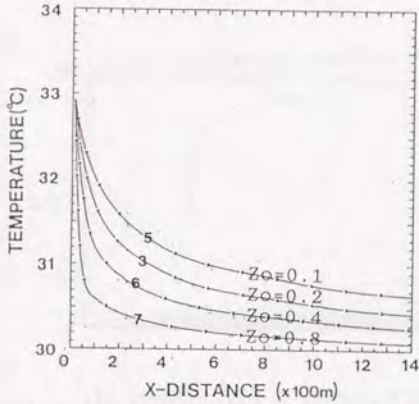


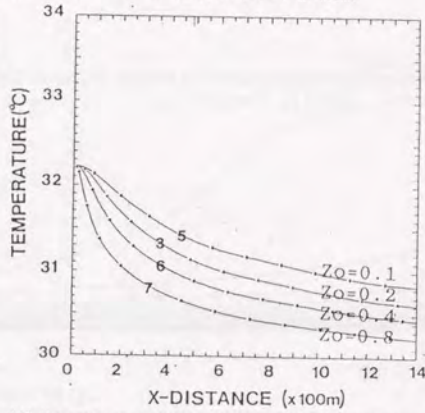
図4-16 都市部から緑地への変化で上空の風速が緑地上の温度、湿度分布に及ぼす影響  
X-DISTANCEは、地表面が緑地に変化した点からの距離、線上の数字はデータ名、Uは上面境界での設定風速を表す。



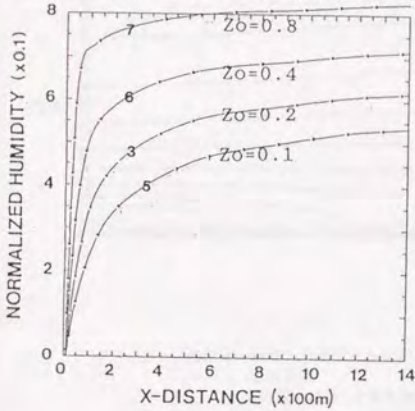
(a) Temperature (CASE 3,5,6,7, height:2m)



(c) Temperature (CASE 3,5,6,7, height:6m)



(b) Normalized humidity (CASE 3,5,6,7, height:2m)



(d) Normalized humidity (CASE 3,5,6,7, height:6m)

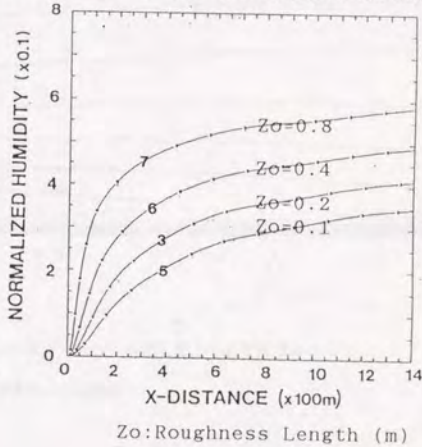


図4-17 都市部から緑地への変化で地表面の粗度長が緑地上の温度、湿度分布に及ぼす影響

X-DISTANCEは、地表面が緑地に変化した点からの距離、線上の数字はデータ名、 $Z_0$ は緑地の粗度長を表す。都市部の粗度長は $0.2m_0$

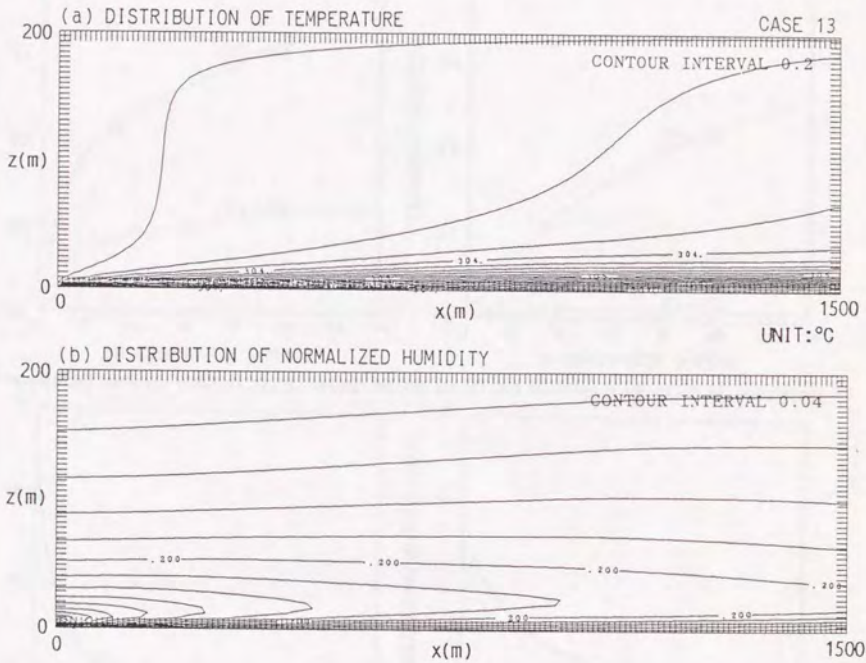


図4-18 緑地から都市部への変化の場合(CASE13)の都市部上の温度分布および湿度分布  
 $x$ は風上境界、 $z$ は地表面境界からの距離

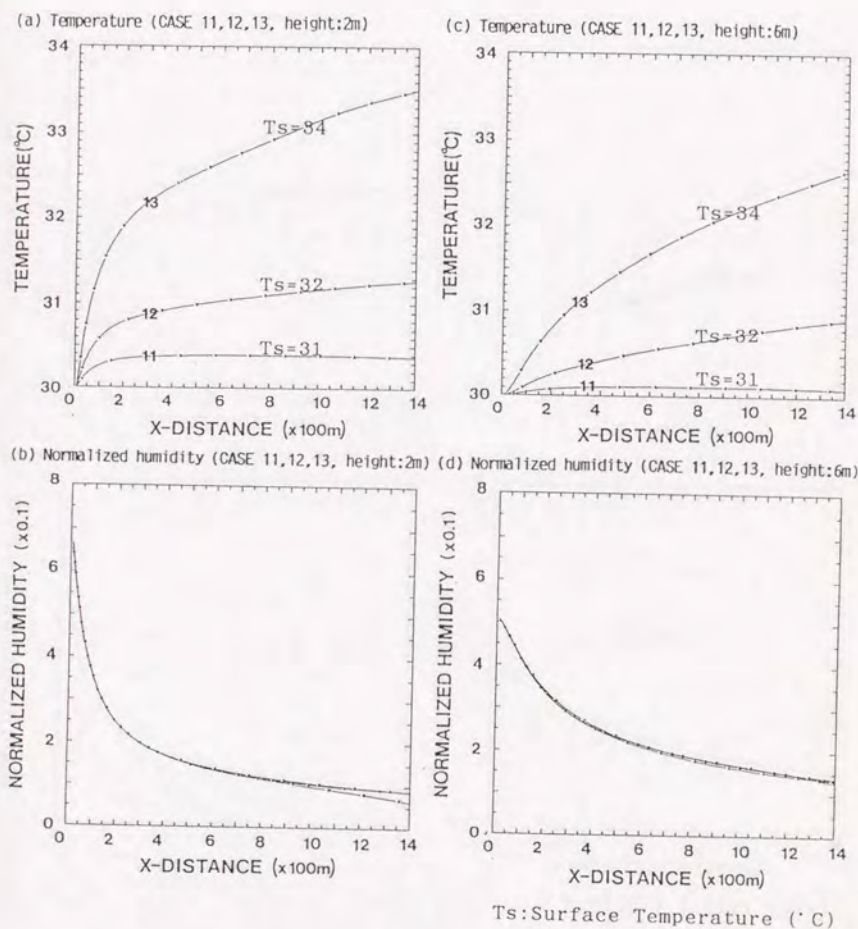
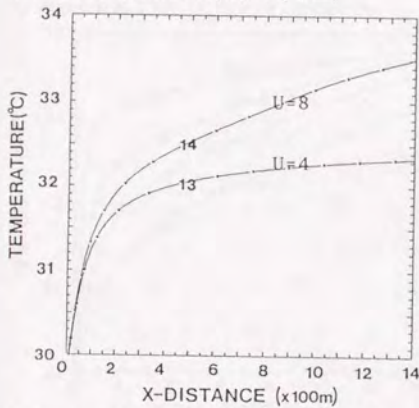


図4-19 緑地から都市部への変化で両者の温度差が都市部上の温度、湿度分布に及ぼす影響

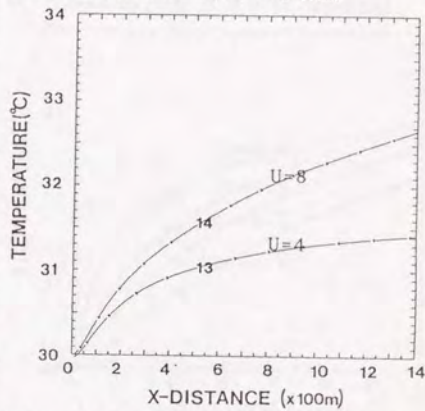
X-DISTANCEは、地表面が都市部に変化した点からの距離、線上の数字はデータ名、Tsは都市部の表面温度を表す。緑地の表面温度は30°C。



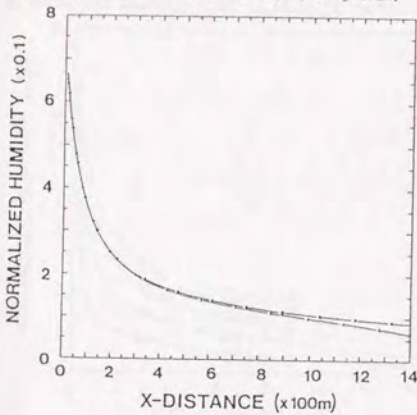
(a) Temperature (CASE 13,14, height:2m)



(c) Temperature (CASE 13,14, height:6m)



(b) Normalized humidity (CASE 13,14, height:2m)



(d) Normalized humidity (CASE 13,14, height:6m)

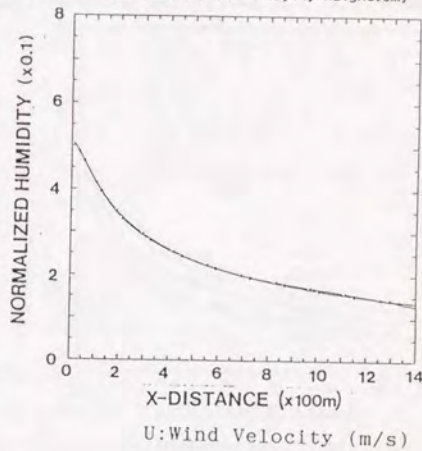
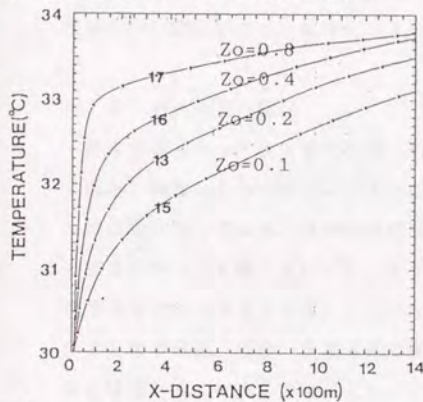


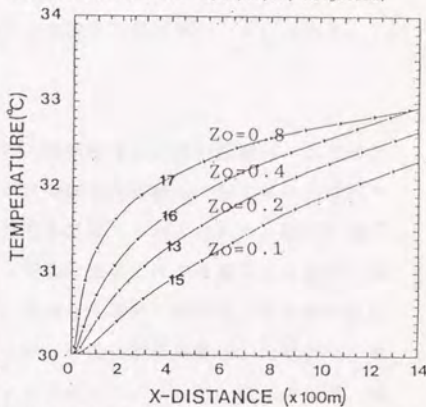
図4-20 緑地から都市部への変化で上空の風速が都市部上の温度、湿度分布に及ぼす影響

X-DISTANCEは、地表面が都市部に変化した点からの距離、線上の数字はデータ名、Uは上面境界での設定風速を表す。

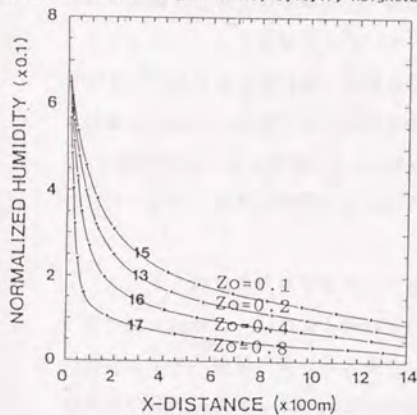
(a) Temperature (CASE 13,15,16,17, height:2m)



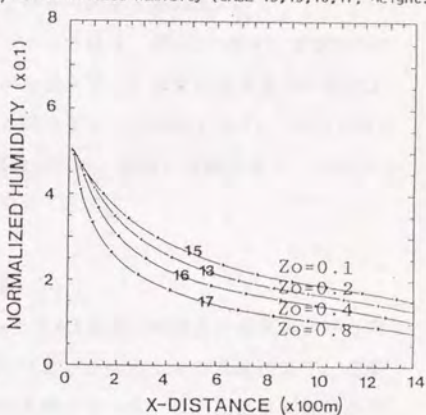
(c) Temperature (CASE 13,15,16,17, height:6m)



(b) Normalized humidity (CASE 13,15,16,17, height:2m)



(d) Normalized humidity (CASE 13,15,16,17, height:6m)



Zo: Roughness Length (m)

図4-21 緑地から都市部への変化で地表面の粗度長が都市部上の温度、湿度分布に及ぼす影響  
X-DISTANCEは、地表面が都市部に变化した点からの距離、線上の数字はデータ名、Zoは都市部の粗度長を表す。緑地の粗度長は0.2m。

図4-21は粗度長の影響を示したものである。都市部から緑地への変化の場合と、各パラメータの与える影響はほぼ同じである。つまり、図4-19では、温度差が大きいほど風下の温度は大きくなるが、湿度は温度差には影響を受けない。図4-20では、風速が大きい方が、温度が下がり、また湿度は風速の差には影響を受けない。図4-21では、粗度が大きいほど温度の上昇が早いことがわかる。

#### 4. 6 パルス状の変化

前章ではステップ状の変化を扱ったが、都市緑地の実際の配置は、都市部から緑地、緑地から都市部というステップ状の変化が連続して起こるいわばパルス状の変化をしている。緑地の規模は都市部に比べて小さいため、緑地の風下の都市部からの影響などにより、ステップ状の変化とはやや異なった温度、湿度分布をすると考えられる。ここでは、都市部-緑地-都市部と地表面が変化するときの風速、温度、湿度分布の変化を、緑地の規模が変化した場合や、複数の緑地があった場合のシミュレーションを行った。そして、緑地の規模、緑地間の間隔と、風下の温度低下、湿度上昇との関係を求めた。

シミュレーションに使用したパラメーターの値を、表4-3に示す。想定したのはステップ状の変化と同様、夏期の日中の場合で、市街地の地表面は日射により高温となるが、緑地の地表面は気温と同程度という状況であり、CASE3とCASE13を組み合わせたものといえる。CASE21~24は、緑地の規模が変化した場合、CASE25~26は、緑地の間隔が変化した場合である。

##### 4. 6. 1 緑地の規模が変化した場合

図4-22にCASE21~24の高さ2mから18mまでの5高度での温度、湿度の水平方向の変化を示す。緑地の規模が大きくなるに従い、緑地上での温度の低下、湿度の上昇の程度は大きくなり、上空の温度も低くなっている。上空ほど緑地上での温度低下の度合は小さいが、都市部上の移ったときの温度の上昇もゆるやかである。

図4-23には、CASE23の温度、湿度の分布を等値線図により示す。温度分布からは緑地上や風下に低温部分が形成される様子や、湿度分布からは緑地の影響がどの程度の強度や範囲で及ぶかがよく推測できる。このような分布を拡大し



表4-3 都市部-緑地-都市部の変化のシミュレーションの各ケースでの緑地の位置

データ名	緑地のメッシュ位置	緑地の規模(m)
CASE21	31-40	100
CASE22	31-50	200
CASE23	31-60	300
CASE24	31-70	400
CASE25	31-40, 51-60	100 x2
CASE26	31-40, 61-70	100 x2

都市部、緑地のパラメータは、CASE3を使用。

		都市部		緑地		
データ名	風速(m/s)	温度(°C)	粗度(m)	温度(°C)	粗度(m)	風上条件名
CASE3	4	34	0.2	30	0.2	13

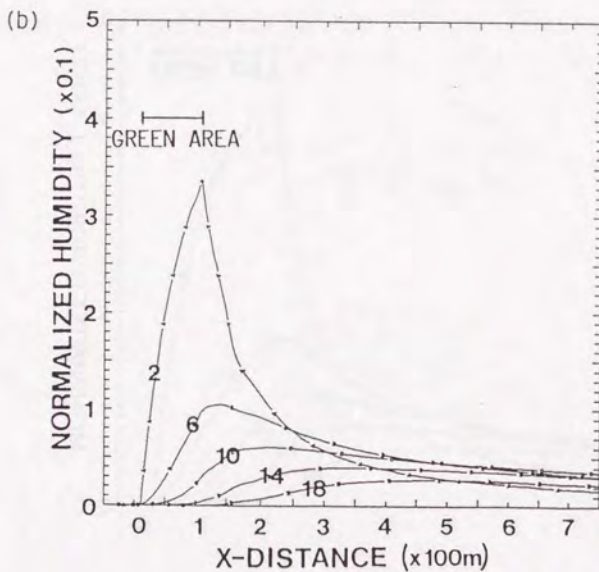
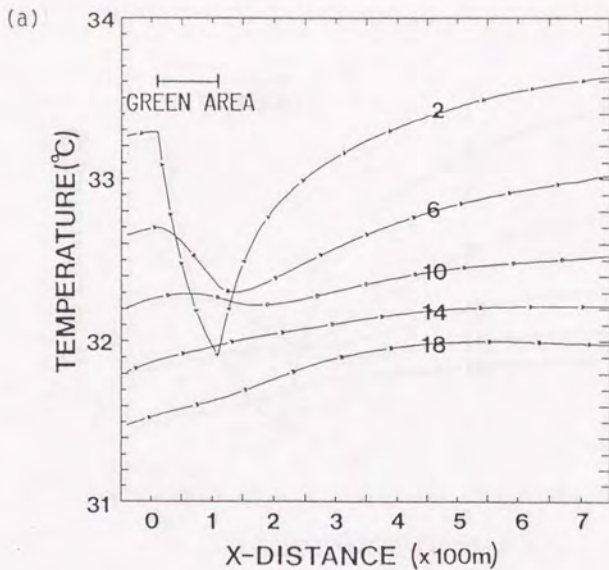


図4-22 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(1)CASE21  
 X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
 変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す

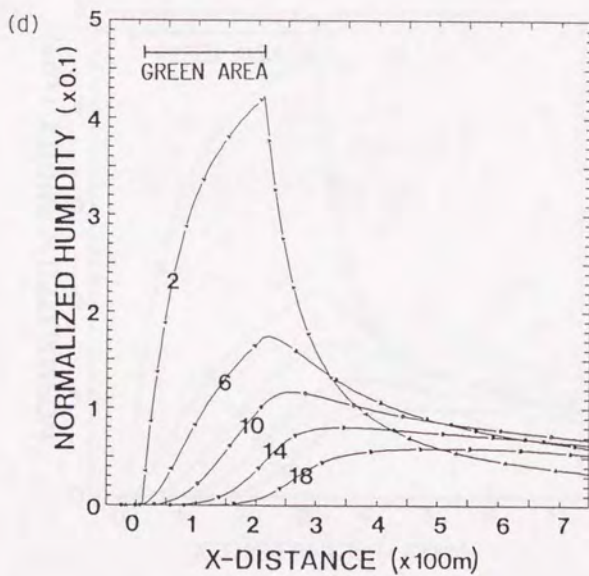
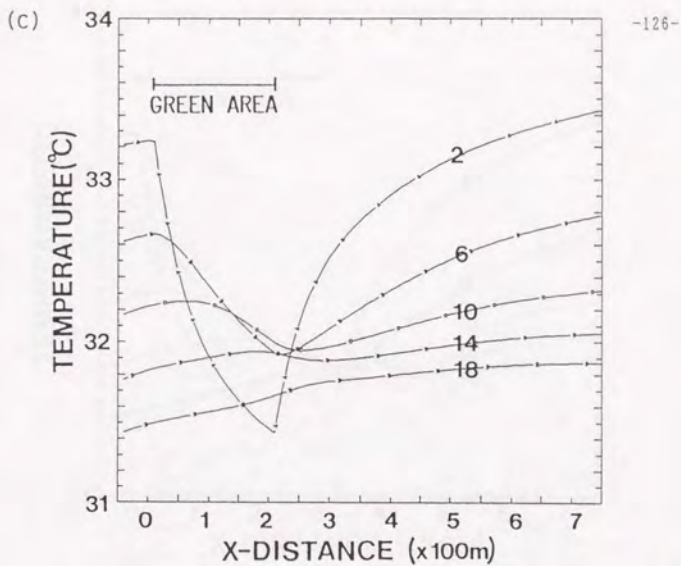


図4-22 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(2)CASE22  
 X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
 変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す



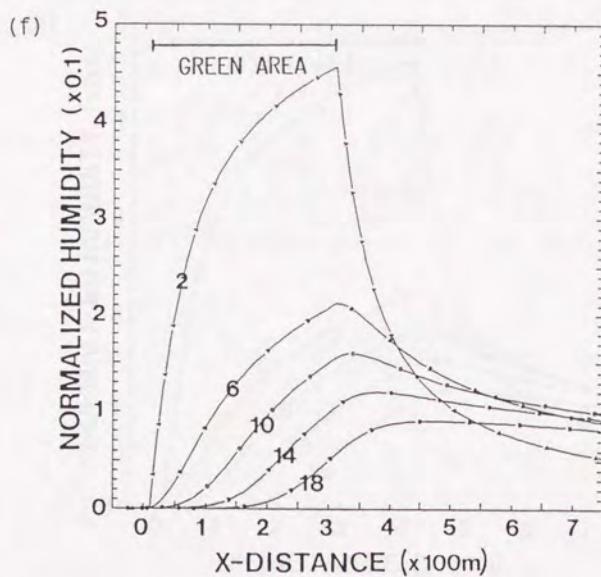
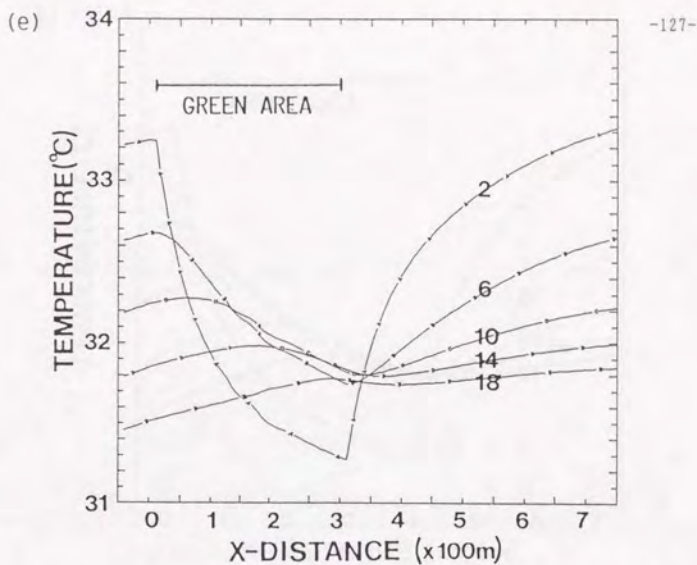


図4-22 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(3)CASE23  
X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す

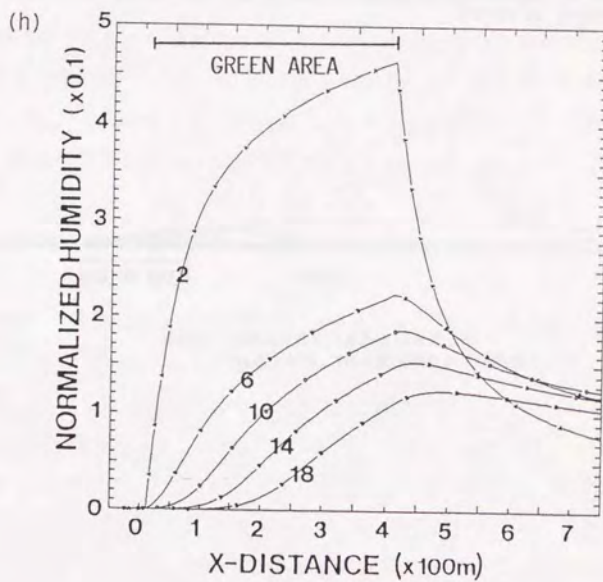
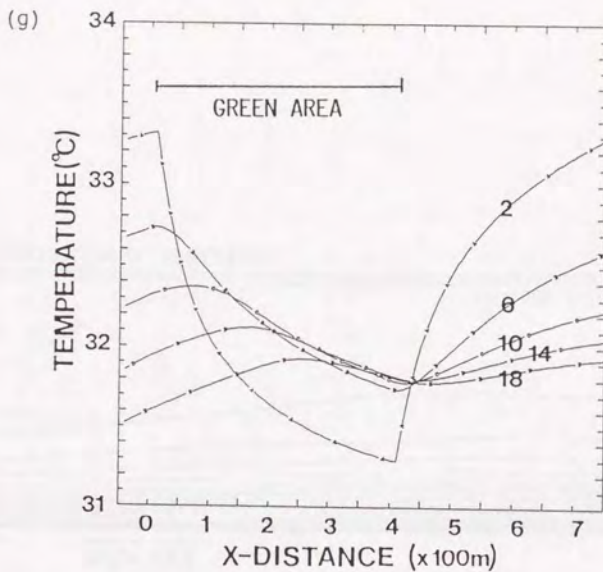


図4-22 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(4) CASE24  
 X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
 変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す

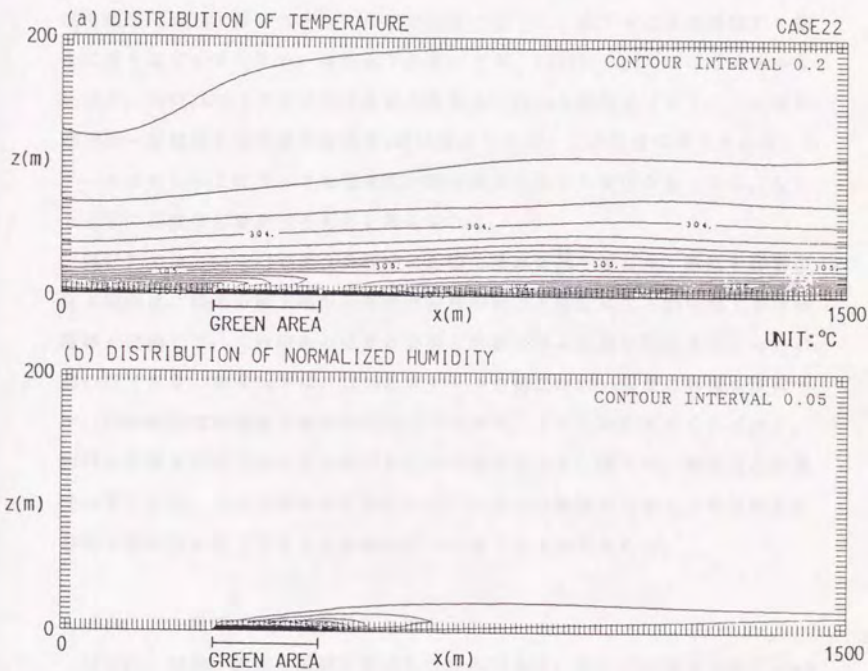


図4-23 CASE22の温度分布および湿度分布  
 $x$ は風上境界、 $z$ は地表面境界からの距離



たものを図4-24に示す。温度、湿度に加え拡散係数の分布を示したが、緑地から都市部へと移るところで拡散係数が大きな値をとる領域が形成されることがわかる。

図4-25は、図4-22のCASE21～24の高さ2mの温度、湿度をまとめたものである。都市部から緑地に移ったときに温度は急激に低下し、低下する率は緑地での風上に行くほど小さくなる。温度低下のカーブは、CASE21～23ではほぼ重なっているが、CASE24ではややずれて最低の温度もCASE23と同程度である。この場合、都市部-緑地間の地表面温度差を4度に設定したが、この程度の差であれば、スケールが300m以上になっても地表面付近の温度はあまり変化がなくなり、むしろ上空の温度に影響が出るものと考えられる。

図4-25では、CASE21の場合の緑地の影響の及ぶ範囲を示した。緑地の影響の及ぶ範囲は、緑地の風下端から温度が緑地の風上と同じになる都市部上までの距離と定義した。この場合の緑地の規模と影響の及ぶ範囲の関係を示したのが、図4-26である。高さ2mでは、100mのスケールの緑地が300m程度の影響を及ぼすが、400mの緑地の影響の範囲は400m以下である。スケールが大きくなるほど、緑地の影響は垂直方向に及ぶ範囲が広がる傾向がある。従って、地表付近の温度に関しては、小さな緑地ほど単位スケール当りの影響が大きく、相対的には温度を効果的に低下をさせる機能を持つと言ってよいであろう。

#### 4. 6. 2 緑地の間隔が変化した場合

CASE25、26が、緑地の間隔が変化した場合である。図4-27に高さ2mから18mまでの5高度での温度、湿度の水平方向の変化を示す。緑地の規模は100mなので、緑地での温度低下は非常に急である。(a)では緑地の間隔が100mであり、緑地間での温度上昇は非常に急であるが、(c)では間隔が200mでありやや緩やかになっている。高さ18mでは、(a)と(c)の差はほとんど無い。

図4-28には、CASE25の温度、湿度の分布を、また拡大したものを図4-29に示す。緑地間にも低温域が形成される様子や、緑地の影響がどの程度の強度や範囲で及ぶかがよくわかる。また、図4-24同様、緑地が複数でも緑地から都市部へと移るところで拡散係数が大きな値をとる領域が形成されることがわかる。

CASE25、26のように複数の緑地があるとき、緑地間の都市部も影響を受ける

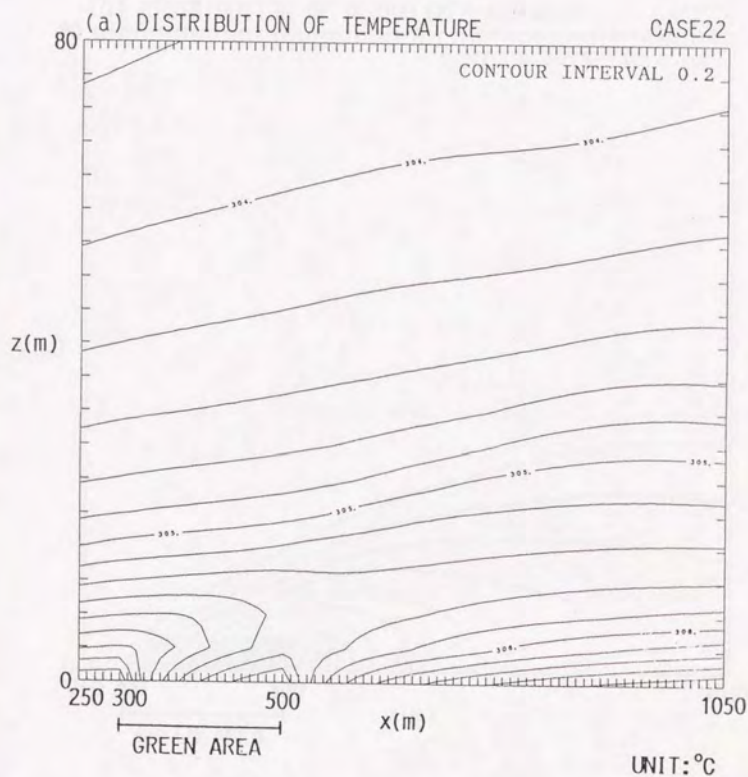


図4-24 緑地付近でのCASE22の温度、湿度、拡散係数の分布(1)  
Xは風上境界、Zは地表面境界からの距離

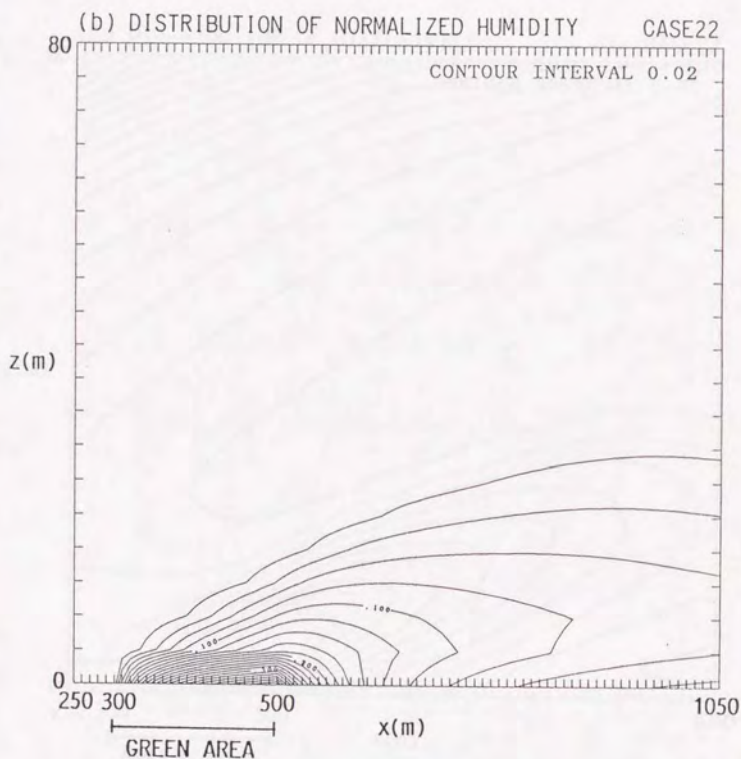


図4-24 緑地付近でのCASE22の温度、湿度、拡散係数の分布(2)  
 $x$ は風上境界、 $z$ は地表面境界からの距離



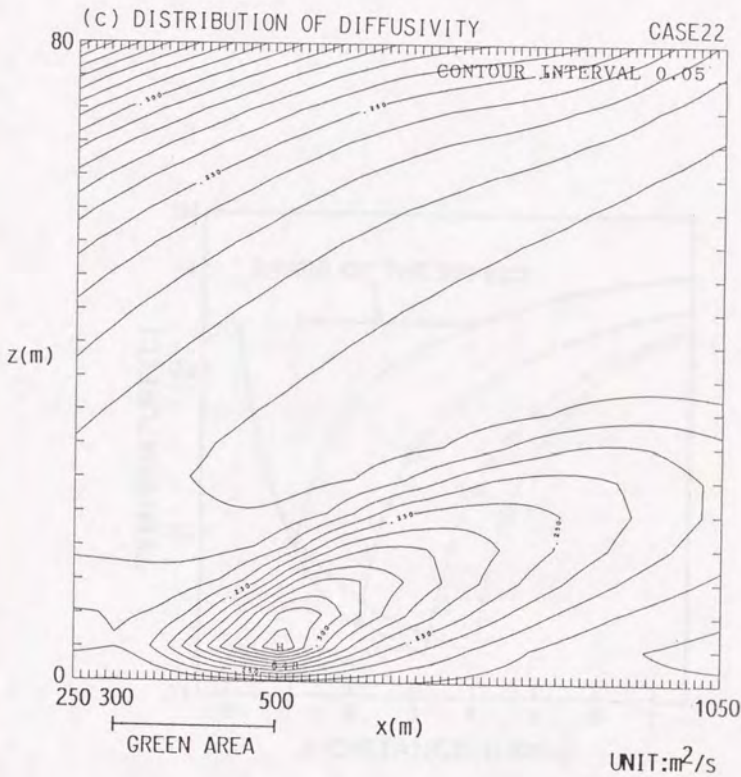


図4-24 緑地付近でのCASE22の温度、湿度、拡散係数の分布(3)  
 Xは風上境界、Zは地表面境界からの距離

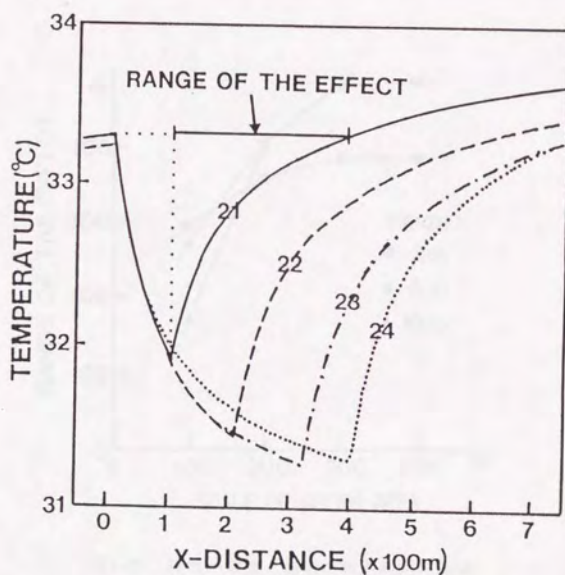


図4-25 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化  
(CASE21~CASE24、高さ2m)

X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
変化した点からの距離、線上の数字はデータ名を表す

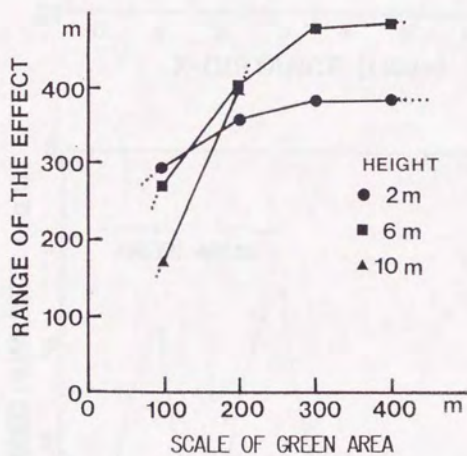


図4-26 緑地の規模と影響の及ぶ範囲の関係



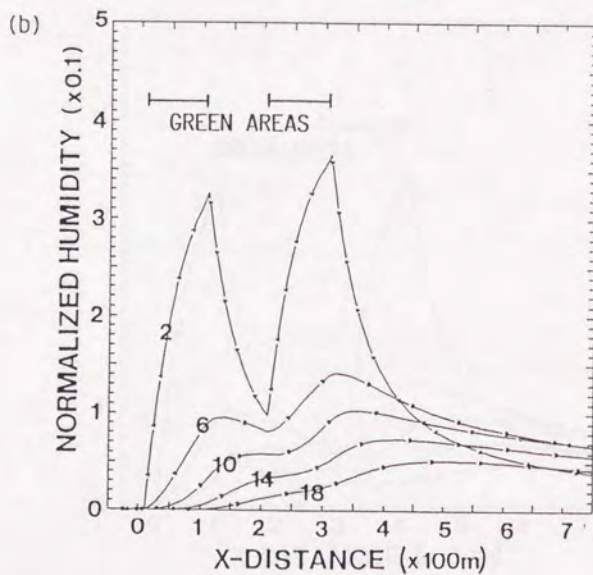
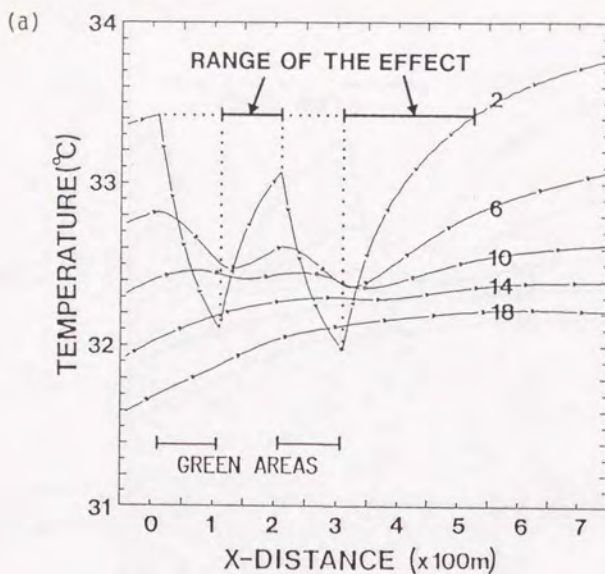
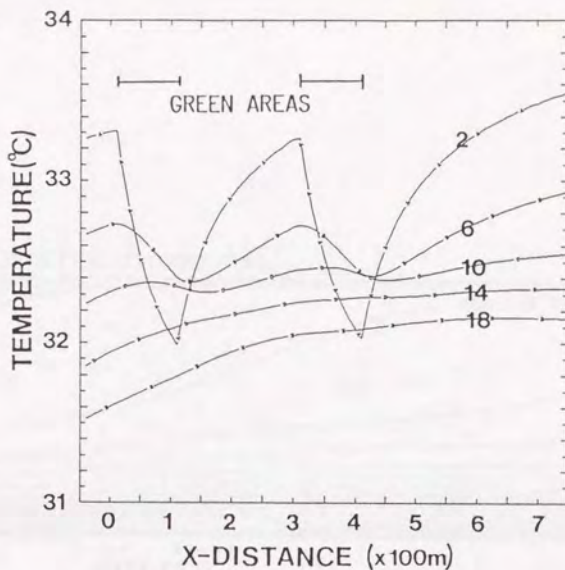


図4-27 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(1)CASE25  
 X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
 変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す

(c)



-137-

(d)

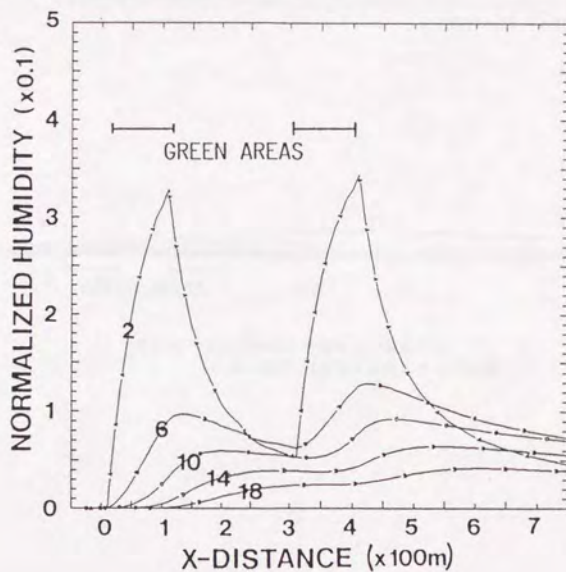


図4-27 緑地付近での温度、湿度の水平方向の変化(2) CASE26  
 X-DISTANCEは、地表面が風上で最初に都市部から緑地へ  
 変化した点からの距離、線上の数字は高さ(m)を表す

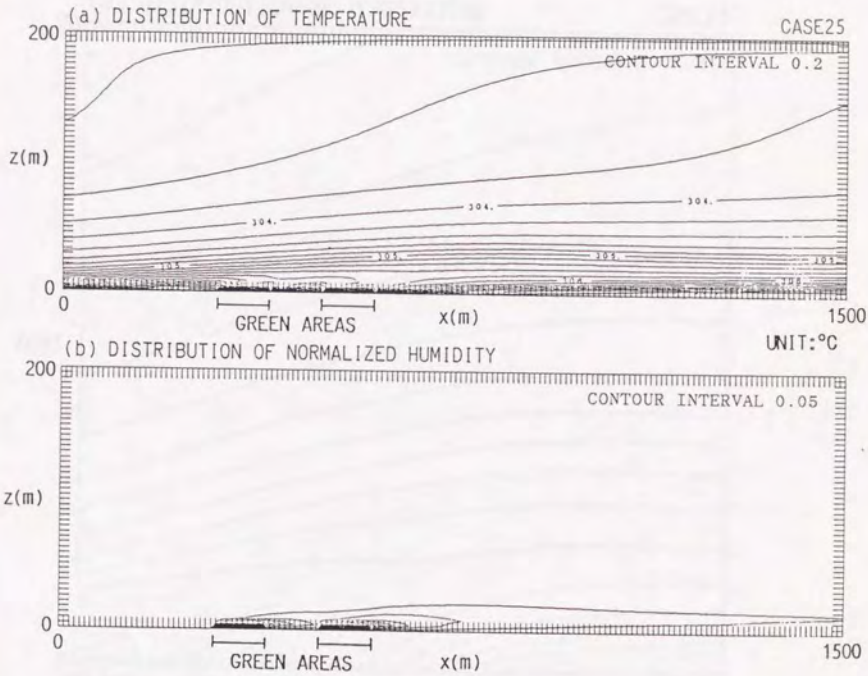


図4-28 CASE25の温度分布および湿度分布  
Xは風上境界、Zは地表面境界からの距離



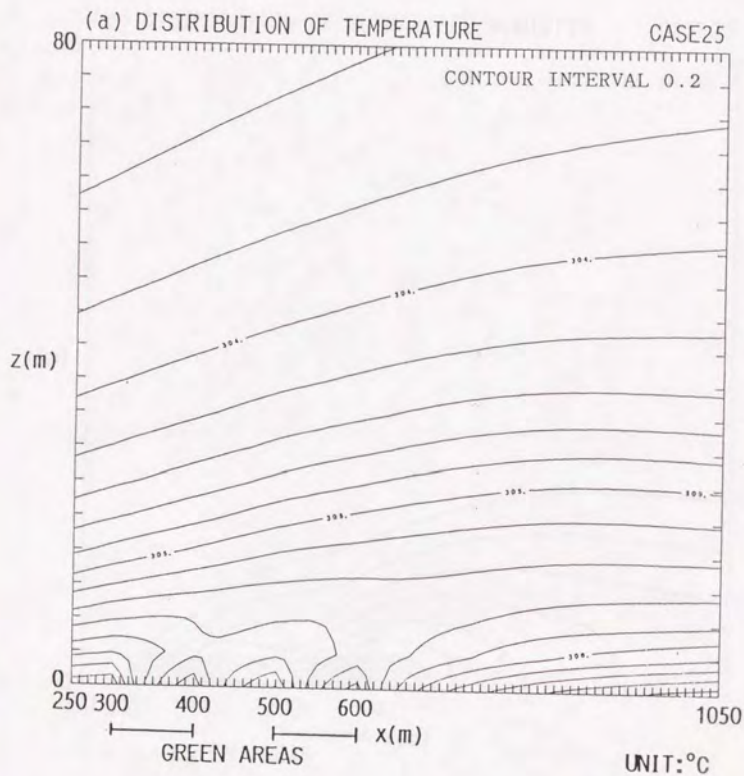


図4-29 緑地付近でのCASE25の温度、湿度、拡散係数の分布(1)  
Xは風上境界、Zは地表面境界からの距離

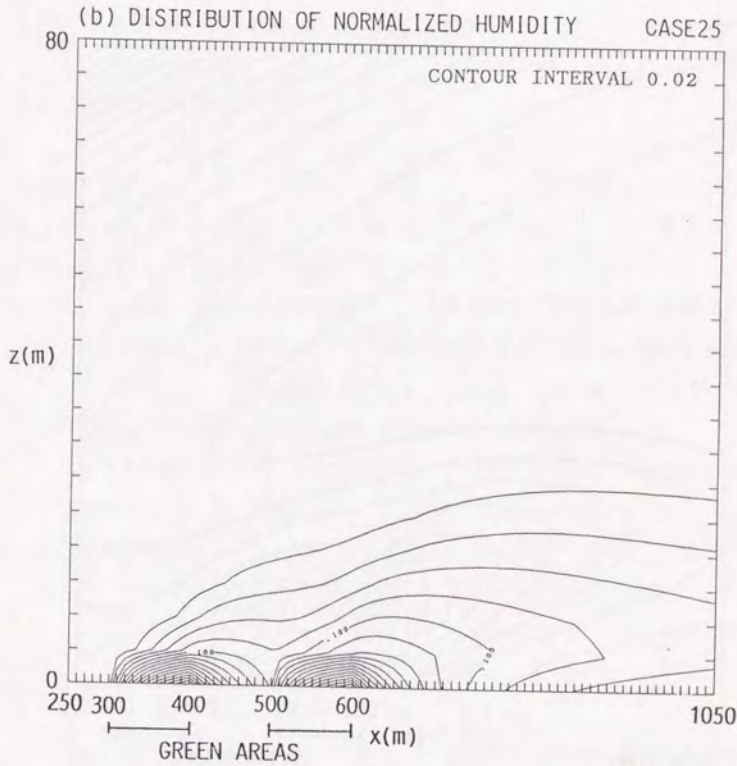


図4-29 緑地付近でのCASE25の温度、湿度、拡散係数の分布(2)  
 $x$ は風上境界、 $z$ は地表面境界からの距離

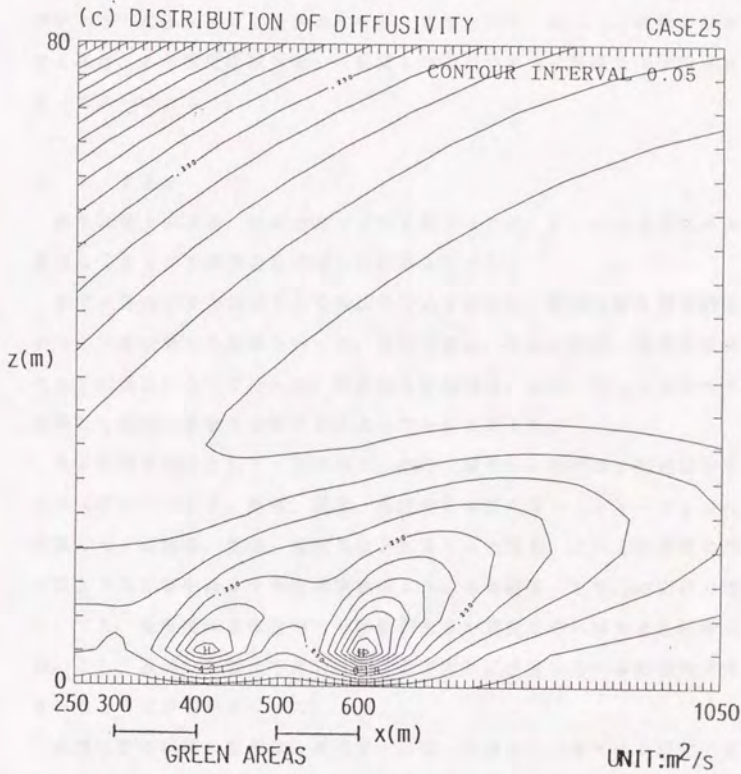


図4-29 緑地付近でのCASE25の温度、湿度、拡散係数の分布(3)  
 $x$ は風上境界、 $z$ は地表面境界からの距離



範囲とみなし、CASE25の高さ2mのときの影響の範囲を図4-27のように定義した場合、緑地間の間隔と影響の及ぶ範囲の関係を図4-30に示した。間隔0mはCASE22を使用し、右端のデータは、CASE21の緑地とその影響が及ぶ範囲を二つ続けたものを使用した。緑地の間隔が大きくなるに従い、最初はやや影響の及ぶ範囲が小さくなるが、その後大きくなり一定値となる。従って、複数の緑地を設ける場合、ある程度距離をおいて配置した方が効果的に気温を低下させると言えてよいであろう。

#### 4. 7 まとめ

都市緑地上の風速、温度分布などを予測するため、 $k-\epsilon$  2 方程式モデルを使用してさまざまな場合を想定した計算を行った。

モデル適用が妥当かどうかを検証のためするため、風洞実験の測定結果とモデルの計算結果との比較を行った。風洞実験は、地表面粗度、地表面温度を変化させた場合について行った。計算値と計測値は、ほぼ一致したためモデルを使用して緑地の影響を分析することができると考えた。

まず単純な場合として、都市部から緑地、緑地から都市部に地表面がステップ状に変化するとき、風速、温度、湿度分布の変化をシミュレーションにより計算した。温度差、風速、粗度長などが異なった場合、これらの分布の形成にどのような影響を及ぼすかを感度解析した。その結果、どちらの変化の場合についても、温度差は温度分布への影響があるが湿度分布にはあまり影響を与えないこと、風速の影響は小さいこと、温湿度共に粗度の与える影響が非常に大きいことなどが明かとなった。

実際の都市緑地の配置は、都市部-緑地-都市部とパルス状の変化であるので、この場合の風速、温度、湿度分布の変化の計算も行った。そして、緑地の規模、緑地間の間隔と、風下の温度低下、湿度上昇との関係を求めた。その結果、地表付近の温度に関しては、小さな緑地ほど単位スケール当りの影響が大きく、相対的には効果的に温度を低下をさせる機能を持ち、スケールが大きくなるほど、緑地の影響は垂直方向に及ぶ範囲が広がる傾向があることがわかった。また、緑地の間隔については、間隔がゼロから大きくなるに従い、最初はやや影響の及ぶ範囲が小さくなるが、その後大きくなり一定値となることがわ

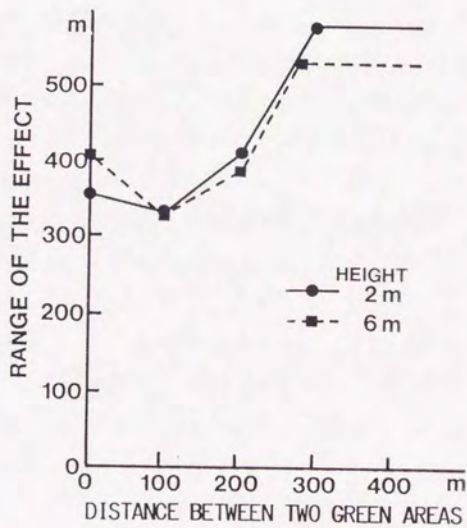


図4-30 緑地の間隔と影響の及ぶ範囲の関係

かった。従って、複数の緑地を設ける場合、ある程度距離をおいて配置した方が効果的に気温を低下をさせるであろう。



引用文献

- Andreopoulos, J. and Wood D.H., 1982:The response of a turbulent boundary layer to a short length of surface roughness. J. Fluid Mech., 118, 143-164.
- Antonia, R.A. and Luxton R.E., 1971:The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness. Part 1. Smooth to rough. J. Fluid Mech., 48, 721- 761.
- Antonia R.A. and Luxton R.E., 1972:The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness. Part 2. Rough-to-smooth. J. Fluid Mech., 53, 737- 757.
- Atwater, M. A., 1972:Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: a numerical study. Bound.-Layer Meteor., 3, 229-245.
- Bill, R. G., Chen, E., Sutherland, R. A. and Bartholic, 1979: Simulating the moderating effect of a lake on downwind temperature. Bound.-Layer Meteor., 16, 23-33.
- Bornstein, R. D., 1975:The two-dimensional URBMET urban boundary layer model. J. Appl. Meteor., 14, 1459-1477.
- Estoque, M. A., 1961:Theoretical investigation of the sea breeze, Quart. J. R. Met. Soc., 87, 136-146.
- Estoque, M. A. and Bhumralkar, C. M., 1969:A method for solving the planetary boundary equations, Bound.-Layer Meteor., 1, 169-194.
- Gutman, D. P. and Torrance, K. E., 1975:Response of the urban boundary layer to heat addition and surface roughness, Bound.-Layer Meteor., 9, 217-233.
- 本條毅, 1982: 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響, 東京大学修士論文.
- Honjo, T. and Takakura, T., 1986:The Flow Over Inhomogeneous Surfaces (1)A Pulse Change in Surface Roughness Under Neutrally Stratified Conditions, J. Agr. Met., 42, 137-143.

- 片山忠久, 石井昭夫, 西田勝, 堤純一郎, 森川明夫, 橋田光明, 1987: 水面を有する市街地の熱環境に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 372, 21-29.
- Lee, R. L. and Olfe D. B., 1974: Numerical calculations of temperature profiles over an urban heat island, *Bound.-Layer Meteor.*, 7, 39-52.
- McElroy, J. L., 1973: A numerical study of the nocturnal heat island over a medium-sized mid-latitude city, *Bound.-Layer Meteor.*, 3, 442-453.
- Moriyama, M. and Fukumoto K., 1989: Effect of Green Area to Urban Air Temperature by Numerical Solution, *Proc. of 2nd Int. Conference on SAAQ*, to be published.
- Myrup, L. O., 1969: A numerical model of the urban heat island, *J. Appl. Meteor.*, 8, 908-918.
- 日本機械学会編, 1986: 熱と流れのコンピュータアナリシス, コロナ社, 229pp.
- 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 坂本雄三, 遠藤清尊, 1975: 室内空気分布の数値解法に関する研究 3 - 2 方程式モデルによる 3 次元解析 -, 日本建築学会計画系論文報告集, 238, 125-126.
- 野村豪, 松尾陽, 貝塚正光, 鎌田元康, 坂本雄三, 遠藤清尊, 竹倉雅夫, 1977: 乱流の数値解析と風洞実験 - 建物周辺の気流分布と汚染物拡散 -, 日本建築学会計画系論文報告集, 252, 57-63.
- Patankar, S. V. 1980: Numerical heat transfer and fluid flow. McGraw-Hill.
- Peterson, E. W., 1969: Modification of mean flow and turbulent energy by a change in surface roughness under conditions of neutral stability, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 95, 561-575.
- Rao, K.S., Wyngaard J.C. and Cote O.R., 1974: The structure of the two-dimensional internal boundary layer over a sudden change of Surface Roughness, *J. Atmos. Sci.*, 31, 738-746.
- Roache, P. J., 1976: Computational fluid mechanics, Hermosa Publishers

Inc.

Shir C.C., 1972: A numerical computation of air flow over a sudden change of surface roughness. *J. Atmos. Sci.*, 29, 304-310.

竹内清秀, 近藤純正, 1981: 地表に近い大気, 東京大学出版会, pp.226.

Taylor, P. A., 1969: On wind and shear stress profiles above a change in surface roughness. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 95, 77-91.

Taylor, P. A., 1970: A model of airflow above changes in surface heat flux, temperature and roughness for neutral and unstable conditions. *Bound.-Layer Meteor.*, 1, 18-39.

Taylor P.A., 1971: Airflow above changes in surface heat flux, temperature and roughness; an extension to include the stable case. *Boundary-layer Meteor.*, 1, 474-497.

Wood D.H., 1978: Calculation of the neutral wind profile following a large step change in surface roughness. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 104, 383-392.

Yaglom, A. M., 1977: Comments on wind and temperature flux-profile relationship. *Boundary-Layer Meteor.*, 11, 89-102.

Yu, T. W. and Wagner, N. K., 1975: Numerical study of the nocturnal urban boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 9, 143-162.



## 5 都市緑地の設計

### 5. 1 はじめに

従来、緑地により微気象を改善しようという意識は、古くから造園の分野ではあったと考えられる。これらは、微気象の改善といっても、造園の材料として用いられる樹木や構造物などの構成要素と、それらの材料が作り出す微気象状態についての知見が主なもので、非常に小規模な現象であるため測定も比較的容易である。これらは、定量的な観測結果もある程度含めてロビネッティ(1978)、新田(1981)などにまとめられている。本研究で対象としている緑地全体の影響といった少し大きなスケールの緑地による微気象の改善については非常に研究が少なく、緑地の気温への影響については現在でも丸田(1972)による観測から推定した例がよく用いられている。しかし、そこで示された緑地規模と影響の範囲の関係は、3箇所緑地での数回の測定からの推定であり、緑地の表面温度との関連などの物理的な根拠はあまり示されていない。

前章でのシミュレーションによる解析では基本的な例について、表面温度、粗度、風速などの影響や、緑地のスケール、間隔の影響について考察を加えたが、本章では、微気象観測、リモートセンシングなどの解析の結果なども考慮して、微気象に留意した都市緑地の設計について述べる。

### 5. 2 緑地の規模、配置と影響の範囲

前章でのシミュレーションは、2次元モデルであり3次元的にみると奥行き方向が同一状態を仮定していることになる。したがって、緑地帯の影響とみることができ、緑地のスケールも広さではなく長さで表された。図4-26に示したような緑地の規模と影響の範囲の関係では、地表面温度、粗度などの条件が同じ緑地であれば、長さが100mの緑地では300m風下まで影響を及ぼすのに対し、長さ300m以上の緑地では400m弱風下まで影響を及ぼす。緑地の影響をできるだけ風下側に大きくとりたい場合は、300mの長さの緑地が良く、単位長さの緑地当りの影響を大きくしたい場合は、100mあるいはそれ以下の緑地が効率的であると言える。

これらの値は、地表面でのパラメータや緑地の影響の範囲の定義が異なれば、

当然異なるので、緑地の設計時には具体的事例毎に同様な計算を行う必要がある。奥行き方向が有限である一般の緑地の影響についても、奥行き方向の流れの影響により二次元の場合より風下方向の温度低下の程度は弱まるであろうが、単位面積あたりの影響という観点からは、狭い緑地ほど効率的であり広い緑地では効果が一定に近づくという傾向はほぼ同じであると考えられる。

2章の観測の中では、移動観測により最もはっきりとした緑地の影響を知ることができた。最も影響の大きい場合では、50m程度まで影響が及んでいることがわかる。このときの、緑地の主風向に沿った長さは800m程度であるが、緑地の形状が風向方向に細長い場合、緑地帯に比べ三次元的な効果の影響が大きいと考えられる。測定を行う場合の緑地や市街地上の風向は、同じ時期でもきわめて多様であり、道路やビルの形状により風速、温度分布が影響を受けるため、観測結果のみから影響の範囲は特定が難しいが、緑地の効果がはっきりと検知できるのは、主風向方向に数百m規模の緑地でも数m～数十m程度の範囲であり、小規模な緑地については観測では検知が難しい場合が多いであろう。しかし、シミュレーションの結果からは、同面積であれば水平方向への影響は、大緑地が一つあるよりも小緑地が多数存在するほうが大きいことが予想される。

シミュレーションからは緑地内の気温は風下ほど低くなっており、表面温度についても同様と考えられる。リモートセンシングによる熱映像では地表の被覆が芝か樹木かで温度が大きく異なり、緑地の中心部ほど温度が低い傾向がある。風下の表面温度が下がるのは、図3-8や土屋(1972)、力丸ら(1988)の研究でも示唆されている。しかし、解析例が少なく断定はできないため、今後のより多くのデータの蓄積や熱収支を考慮したモデルでの解析により明らかになるであろう。

都市全体のスケールで見た緑地の配置については、熱的影響以外のさまざまな要素が勘案すべきである。緑地による熱的影響のみを考えた場合、特に、夏の微気象緩和のためには、以上のような結果から、図5-1の模式図に示すように、緑地の総面積が同じであれば緑地を分散して配置するのがよいと言えるであろう。

また、より小さなスケールの緑地の配置、広さについても同様であり、住宅地などでは、同じ程度の緑地の総面積であれば、小規模な緑地が多数、適度な



図5-1 熱的影響を考慮した都市緑地の配置



間隔で配置されるのが、緑地の熱的影響を最大限に活用できるであろう。

### 5. 3 緑地の素材

シミュレーションによる感度解析では、粗度が大きい程緑地の影響が大きいことも予測された。一般に粗度は樹木の高さが高い程大きくなるため、芝生などの素材よりも、樹木などの粗度の高い素材の方が周囲に及ぼす影響は大きくなるであろう。また、リモートセンシングデータから、樹木の方が芝地などより表面温度は低いことが明かである。樹木の方がLAIも高く、単位面積あたりの蒸発散量も大きいことから、樹木の方が影響が大きくなるのに寄与するといえる。

### 5. 4 季節差

微気象観測の結果から、全般的に、冬期には、風速の小さな夜間に気温が緑地内で低くなるが、夏期には、日中、夜間ともに、また風速が大きい場合でも緑地の気温の方が都市部よりも低い場合がある。冬期の場合、緑地では日中の地中への蓄熱量が都市部よりも少ないため、夜間に放射冷却の影響を大きく受け緑地の気温が低下すると考えられるが、夏期には、それに加え、植物の蒸発散が盛んであるため、日中でも緑地の気温が低下するものと考えられる。

ランドサットのデータからも、撮影時刻は午前10時頃だが、夏期には緑地の低温が非常に顕著であるのに対し、冬期にはこの時刻には緑地は必ずしも低温域を形成せず表面温度分布から緑地の有無の判別は難しいという結果が獲られている。このような季節差は、おもに植物の蒸発散量の差が原因であると考えられる。

以上のようなことから、緑地の熱的影響がもっとも必要とされる夏期において緑地の影響が大きく、冬期においては、緑地の影響は比較的小さい。したがって、緑地は夏期において冷熱源として機能し、冬期には緑地の影響を受ける周囲の都市部での暖房負荷の増大などはあまりないであろう。

引用文献

- 丸田頼一, 1972: 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響, 都市計画, 69・70  
合併号, 49-77.
- 新田 伸三, 東 集成, 石井 昭夫, 1981: 環境緑化における微気象の設計,  
鹿島出版会, 267PP.
- 土屋 巖, 1972: 緑地と都市気候—都市における自然緑地, 人工緑地, 河川等  
の熱的特性—, 水利科学, 16, 2 9-56.
- ロビネッティ, G. O. 1978: 生活環境と緑の機能, 産業技術センター, 141pp.
- 力丸厚, 岩井隆典, 木内勝也, 大嶋太市, 竹内章司, 1988: 都市域の熱分布に  
及ぼす緑被特性の影響(3), 日本写真測量学会昭和63年度年次学術講演会発表  
論文集, 79-80.

## 6 総括

### 6. 1 要約

ヒートアイランド現象により住環境が悪化する都市の中で、都市緑地は透水性の土壌で被覆され蒸発散の行なえる数少ない面である。冷熱源として都市の高温化を緩和し植物などの蒸発散により乾燥を防ぐ意味からも、都市気候を改善する重要な役割がある。しかし、どの程度の規模の緑地によってどの程度の範囲の気温が下がるのかといった緑地の都市熱環境に及ぼす影響の評価は、従来の研究では定性的な推測の域を出ていなかった。そこで、本研究では、緑地が都市熱環境に及ぼす影響について、定量的な検討を行うことを目的として、微気象観測、リモートセンシングデータの利用、数値モデルによるシミュレーションを行った。

2章では緑地の影響の実態を把握するため、都市公園とその付近の市街地での熱収支などの同時観測、気温および湿度の移動観測、緑地微気象の長期観測などの微気象観測を行った結果について述べた。

同時観測では、緑地内とその周囲の都市部での観測点で、気温、湿度、放射環境、熱収支などの測定を行ったが、これらの微気象が両者で大きく異なることが明かとなった。特に晴天夜間は、夏冬とも公園内の気温が低く、湿度が高いことが観測された。また、熱収支の特性としては、公園内での地中伝熱量が都市部に比べ非常に小さく、潜熱移動は大きいことがわかった。公園内では、天空率が高く、建物からの長波放射が小さいことも示された。

移動観測では、オートバイ、自転車をプラットフォームとして、緑地と隣接する市街地間の気温、湿度分布を連続して計測した。その結果、風速は比較的小さい場合には、緑地と市街地の差が大きく、風向により緑地から市街地への影響のある場合、あるいはその逆の場合の気温、湿度分布が明かとなった。緑地の影響の及ぶ範囲は、測定対象の田無農場の場合、道路の影響が大きいこともあり数十m程度であった。また、気温差の原因としては、冬期が主に地表面の材質の差によるものであるのに対し、夏期では植物の蒸発散による潜熱移動の影響が大きいことが示唆された。

長期観測では、日平均気温では緑地内外の差が検出しにくいことや、地中温



度に緑地の影響がはっきりと現れることがわかった。また、緑地中心と外縁の温度差と風向、風速との関係から、風向により温度差が異なり、風速が小さいとき温度差が大きい傾向があることが示された。

3章では広域にわたる温度の観測データを得るため、ランドサット5号のリモートセンシングデータの利用を行った結果について述べた。解析は、緑地分布と表面温度分布を対比することにより行ったが、混在ピクセル内の小規模な緑地の抽出が従来は困難であったためその手法の開発も行った。したがって、解析は、スケールが1ピクセル以上の中規模の緑地と、1ピクセル以下の小規模緑地について分けた。

大規模の緑地では、ランドサットTMデータのバンド3, 4から抽出した緑地分布とバンド6の表面温度分布を比較し、夏期の温度が植生のあるところで非常に低く、夏から冬に季節が変化するのに伴い温度分布と植生の相関が次第に小さくなることがわかった。最も差が見られた夏期のデータでは、樹林の割合が同程度の場合、面積が大きい程温度は低い傾向が見られ、また、樹林の割合が大きい程温度が下がる傾向があることを示した(図2)。

混在ピクセル内の緑被率を推定する方法としては、ファジークラスタリングによる分類や植生指数を使用する方法を試み、どちらも良い精度で推定が可能であることを示した。特に植生指数は、計算も単純であり実用性が高いため詳しく解析した結果を示した。植生指数にはいくつかの種類があるが、パイバンド比が、特に緑被率と高い相関を示した。

小規模緑地の解析は、このようにして求めた緑地率の分布と表面温度を比較し行ったが、緑被率が同じ値でも、表面温度のばらつきが大きく、両者の相関係数も小さく、緑被率が大きいピクセルほど表面温度が低いという傾向は、全体的には必ずしも見られなかった。

4章では都市緑地上の風速、温度分布などを予測するため、主風速方向および垂直方向の二次元 $k-\epsilon$ 2方程式モデルを使用してさまざまな場合を想定した計算を行った結果について述べた。

モデル適用が妥当かどうかを検証するため、風洞実験の測定結果とモデルの計算結果との比較を行った。風洞実験は、地表面粗度、地表面温度を変化させた場合について行った。計算値と計測値は、ほぼ一致したためモデルを使用し

て緑地の影響を分析することができると考えた。

このモデルの応用の単純な場合として、都市から緑地、緑地から都市に地表面がステップ状に変化するとき、風速、温度、湿度分布の変化をシミュレーションにより計算した。温度差、風速、粗度長などが異なった場合、これらの分布の形成にどのような影響を及ぼすかを感度解析した。その結果、どちらの変化の場合についても、温度差は温度分布への影響があるが湿度分布にはあまり影響を与えないこと、風速の影響は小さいこと、温湿度共に粗度の与える影響が非常に大きいことなどが明らかとなった。

実際の都市緑地の配置は、都市から緑地そして都市に地表面が連続的に変化するいわばパルス状の変化であるので、この場合の風速、温度、湿度分布の変化の計算も行った。そして、緑地の規模、緑地間の間隔と、風下の温度低下、湿度上昇との関係を求めた。その結果、地表付近の温度に関しては、スケールが小さな緑地ほど、単位長さ当り風下の水平方向への影響の範囲は大きく、緑地のスケールが大きくなるほど、緑地の影響は垂直方向に及ぶ範囲が広がるが、単位長さ当りの水平方向への影響の範囲は小さくなることがわかった。したがって、規模の小さな緑地ほど、相対的には効率的に風下の地表面付近の温度を下げるといえる。また、スケールの等しい二つの緑地の影響を及ぼす範囲と緑地間の間隔の関係については、間隔がゼロから大きくなるに従い、最初はやや水平方向の影響の及ぶ範囲は小さくなるが、その後大きくなり一定値となった。従って、複数の緑地を設ける場合、ある程度距離をおいて配置した方が効果的に気温を低下をさせることが予測できた。

5章では以上のような結果をもとに、微気象に留意した都市緑地の設計について、夏期における周囲への影響を最大にするためには、小規模な緑地を分散させた方がよいなどの提言を行った。

## 6. 2 今後の課題

本研究を構成する微気象観測、リモートセンシングデータの利用、数値モデルによるシミュレーションなどについて、今後の課題について以下に述べる。

都市緑地の微気象観測については、三次元的に長期間の風速、気温、湿度、熱収支などのデータが、さまざまな規模、植被、形状の都市緑地およびその周



辺で得られることが理想である。しかし、現実には技術的、労力的な制約により、本研究のように、部分的な要求を満足する観測を行わざるを得ず、今後もさまざまな観測によりデータが蓄積されることが望まれる。これまでの研究で比較的データが少ないのは、風速、温度などの環境要素の垂直方向の分布データである。気球を利用した測定や、ドップラーレーダーの利用は、現在のところ精度に問題があるが、今後の成果が期待される。また、シミュレーションとの比較を行うためにも、このような垂直方向を含めた2次元以上の分布の測定結果が必要である。

リモートセンシングデータを利用する場合、得られる情報は衛星に搭載されたセンサの性能により制限を受ける。したがって、より解像度が高くデータの採取頻度の高いセンサを持つ衛星の打ち上げに期待せざるを得ない。特に本研究で使用したランドサットTMセンサでは、熱赤外バンドの解像度、データの採取頻度に問題があるためその改善が望まれる。解析手法については、緑地分布の抽出は本研究で行ったものでは十分である。表面温度については、より正確な絶対値を得るという面ではLOWTRANのような補正モデルの使用が考えられるが(Kneizys et al., 1983)、基本的にはセンサの性能向上に待たないであろう。ただし、われわれの生活により密接な関係があるのは気温であり、衛星データから気温の推定が行えることが望ましい。気温の推定については、統計的な手法では非常に精度が悪く(谷ら, 1984)、熱収支モデルを含めた手法の開発が必要であろう。リモートセンシングデータを使用した熱収支モデルの利用は、土壌の熱特性(Price, 1977, Ho, 1987)、蒸発散量(Price, 1980, Abdulmumin, 1987)などの推定の例があるが実際の測定例と比較したものは少ない。また、気温の推定は、今後の研究が待たれる分野である。

研究で行ったシミュレーションは、二次元、定常モデルという基本的なものであり、今後さまざまなモデルの精緻化が考えられる。本研究で使用したモデルの改良としては、まず三次元化、熱収支モデルなどを組み込んだ非定常化がある。また、実際の緑地や都市の立体構造を考えた場合には、本研究で用いた粗度で特徴づけられる平面を扱うモデルより、群落モデルを利用することが望ましい。乱流モデルとしても、多方程式モデル、LESといった $k-\epsilon$ 2方程式モデルより複雑なものをを用いることも考えられる。また、シミュレーション



の検証も重要であり、実スケールの観測データとの比較を行うことも今後の課題である。

### 6. 3 まとめ

本章では、これまでの各章での成果の内容をまとめ、今後の課題についても述べた。

本研究は、緑地の都市熱環境への影響、特に、都市緑地の低温、高湿がどの程度の範囲に、どの程度の強度で影響を及ぼすかという問題について、これまで比較的例の少なかった解析を行ったものである。リモートセンシング、シミュレーションというこの分野では新しい手法を用いることにより、今後の課題も多数あるが、緑地の影響の定量化を従来より一歩進めた点で一応の成果を得たものとする。

引用文献

- Abdulummin, A., Myrup, L. O. and Hatfield J. L., 1987: An energy balance approach to determine regional evapotranspiration based on planetary boundary layer similarity theory and regularly recorded data, *Water Resource Research*, 23, 2050-2058.
- Ho, D., 1987: A soil thermal model for remote sensing, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25, 221-229.
- Kneizys, F. X. et al., 1983: Atmospheric transmittance/radiance: Computer code LOWTRAN 6, AFGL-TR-83-0187, 200pp.
- Price, J. C., 1977: Thermal inertia mapping: A new view of the earth, *J. Geophysic. Res.*, 82, 2582-2590.
- Price, J. C., 1980: The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation, *Water Resource Research*, 16, 787-795.
- 谷宏, 堀口郁夫, 元木敏博, 1984: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究 - GMS (ひまわり) 赤外データによる地表面温度と AMeDAS 気温との関係, *農業気象*, 40, 111-117.

## 謝 辞

本研究を進めるに当り、懇切な御指導を賜った東京大学農学部高倉直教授に深謝の意を表する。さまざまな面で協力していただいた、蔵田憲次助教授、後藤英司助手に謝意を表する。観測などで多大なご援助を頂いた環境調節工学研究室の皆様、特に卒論生として本研究にご協力いただいた、山本祐司氏、森山信弘氏、土屋寿一氏、水谷敦司氏に心より感謝の意を表する。

論文の審査にあたり、懇切なる教示と助言を賜った東京大学農学部小出進教授、同志村博康教授、同井手久登教授に厚く御礼申し上げる。

また、本研究では非常に多くの方にお世話になった。観測では住宅都市整備公団玉川鵬心氏、東京大学付属多摩農場坂井助教授、米川智司助手、小泉技官、小石川植物園、代々木公園、赤塚公園の管理事務所の方々にさまざまな便宜を計って頂いた。シミュレーションモデルの作成にあたり、東京大学生産技術研究所小林敏雄教授、神戸大学工学部森山正和講師に、御指導を賜った。風洞実験では、農業工学研究所奈良誠氏、佐瀬勘紀氏に非常にお世話になった。心より御礼申し上げる。



本研究に関連する著者発表論文、資料など

(論文)

本條 毅, 高倉 直, 1984: 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響(1)実測に基づく熱収支の解析, 農業気象, 40, 257-261.

Honjo, T. and Takakura, T., 1986: The Flow Over Inhomogeneous Surfaces (1) A Pulse Change in Surface Roughness Under Neutrally Stratified Conditions, J. Agr. Met., 42, 137-143.

本條 毅, 高倉 直, 1986: リモートセンシングによる都市内緑地の温度分布の解析, 造園雑誌, 49(5), 299-304.

本條 毅, 高倉 直, 1987: ランドサットTMデータによる都市内緑地の抽出, 造園雑誌, 50(5), 305-309.

本條 毅, 高倉 直, 1987: 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響(2)リモートセンシングによる緑地の抽出と表面温度の解析, 農業気象, 43, 31-36.

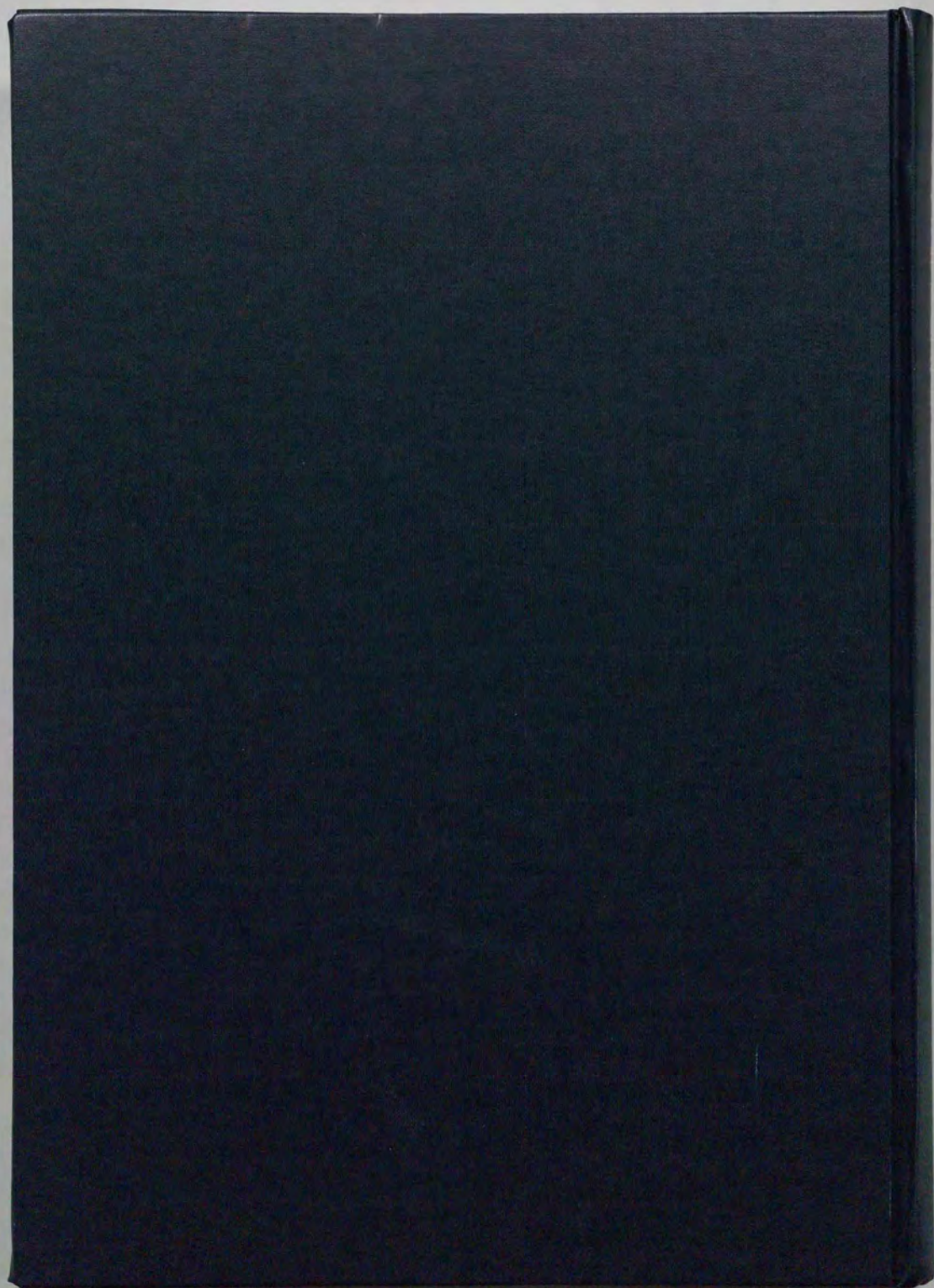
本條 毅, 高倉 直, 1989: 植生指数(Vegetation Index)を用いた都市における緑被率の推定, 造園雑誌, 52(5), 283-287.

Honjo, T. and Takakura, T.: Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas, Proceedings of IFHP/CIB/WMO/IGU International Conference on Urban Climate Planning and Building, to be published.

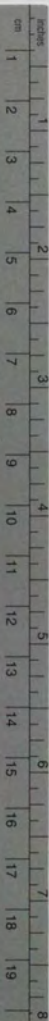
(資料等)

本條 毅, 高倉 直, 1986: ファジークラスタリングのリモートセンシングへの応用, 第12回リモートセンシングシンポジウム講演集, 41-44.

本條 毅, 1988: FUZZY C-MEANS法によるファジークラスタリング, 東京大学大型計算機センターセンターニュース, 20(SUPPLEMENT1), 119-123.







# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TMA Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black

## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TMA Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

