
都市内緑地の環境調節効果 に関する実測研究

(研究課題番号 06650656)

平成6・7年度科学研究費補助金（一般研究（C））

研究成果報告書

平成10年3月

研究組織

研究代表者 成田 健一 (広島大学工学部・助教授)

研究協力者 清田 誠良 (広島工業大学環境学部・助教授)

西川 朋志 (広島大学大学院生)

吉原 俊朗 (広島大学大学院生)

研究経費

平成6年度 1,700千円

平成7年度 300千円

計 2,000千円

研究発表

口頭発表

- 1) 成田健一 他3名：都市内緑地の環境調節効果に関する実測研究（その2），日本建築学会中国支部研究報告集，第19巻，pp.325-328，平成7年3月。
- 2) 西川朋志・成田健一 他2名：緑のアトリウムによるクールスポットの形成手法に関する研究—その5，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.619-620，平成7年8月。
- 3) 成田健一・清田誠良：都市内緑地の環境調節効果に関する一考察，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，平成7年10月。
- 4) 成田健一 他4名：街路空間における風通しと熱環境に関する実測—その5．長期観測データを用いた都市の熱環境解析，日本建築学会中国・九州支部研究報告，第10号，pp.157-160，平成8年3月。
- 5) 成田健一：都市内河川の熱的効果に関する長期観測，日本気象学会関西支部，平成8年11月。
- 6) 成田健一：都市の熱環境と緑地の効果に関する長期観測，CUTE10-UCN24 発表論文集，pp.6-9，平成9年1月。
- 7) 成田健一・吉原俊朗：広島市の都市気温に関する長期観測，日本建築学会中国支部研究報告集，第20巻，pp.273-276，平成9年3月。
- 8) Ken-ichi NARITA：Annual Observation on the Temperature Field in Hiroshima City. “Klimaanalyse fuer die Stadtplanung” Second Japanese-German Meeting, Kobe, pp.169-172, 1997.9.

目 次

第1章 序論	1
1. 研究目的	
2. 研究計画	
第2章 夏季を中心とした短期集中観測	3
1. はじめに	
2. 測定場所および期間	
3. 測定方法	
4. 熱画像による表面温度分布測定	
5. 裸地面と林内における熱収支	
6. 裸地面における対流熱伝達率	
7. 気温分布と風向・風速の関係	
8. 緑地の風下境界における気温と風速の相関	
9. まとめ	
第3章 年間を通しての長期観測	23
1. はじめに	
2. 観測地と観測方法	
3. センサの経時変化の検討	
4. 日射量の年変化と天候区分	
5. 気象台の気温データとの比較	
6. 繁華街と市街地平均気温との差	
7. 都市内緑地の熱的效果	
8. 街路の方向による気温差	
9. 都市内外気温差の年変化	
10. まとめ	
第4章 総括	57
付録	



写真-1. 裸地における熱収支・風速鉛直分布観測点（ポイントA）



写真-2. 測器の配置状況（ポイントA）



写真-3. 緑地境界部分（ポイントB～C）



写真-4. 裸地側から緑地境界部分（ポイントB～C）を望む

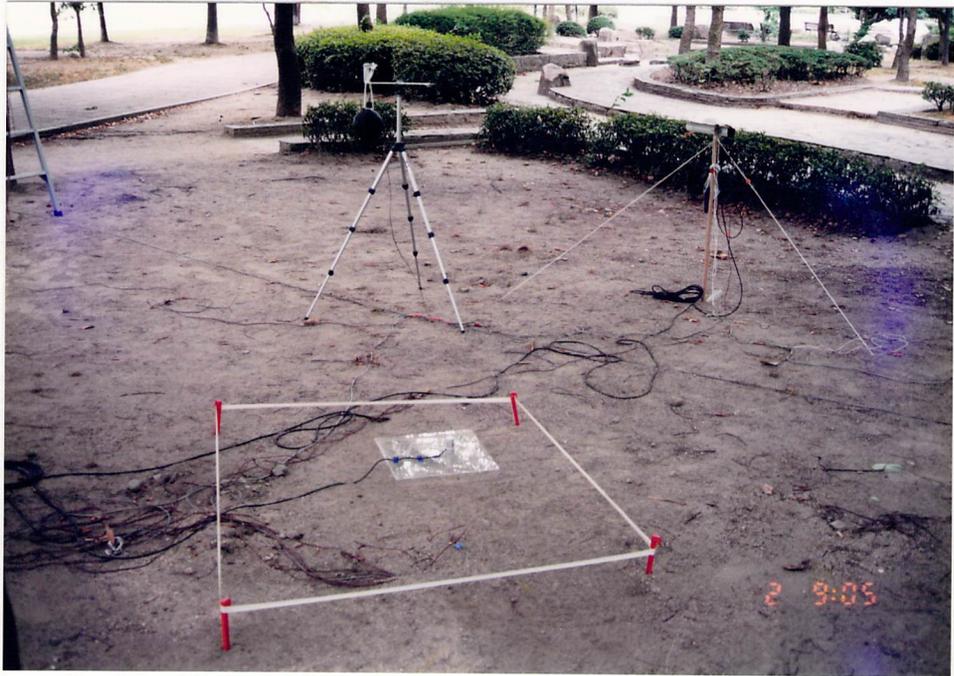


写真-5. 林内の熱収支観測点（ポイントE）



写真-6. ポイントEより側線の南西方向を望む



写真-7. ポイントEより側線の北東方向を望む



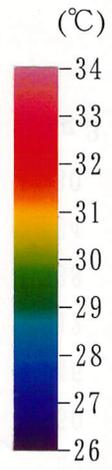
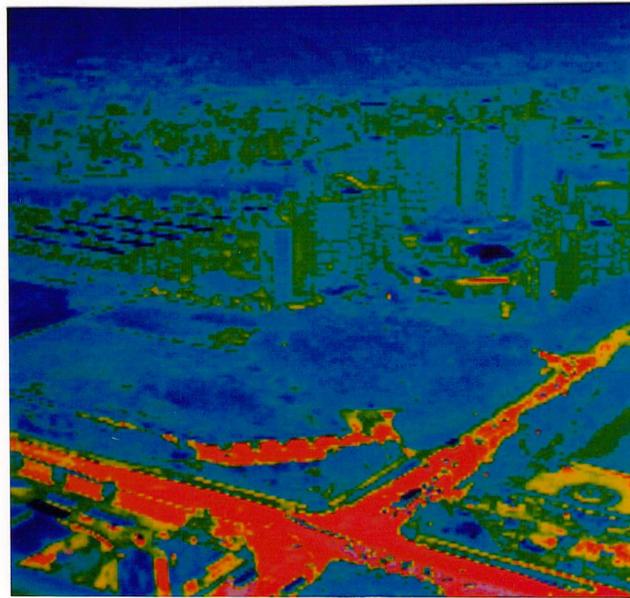
写真-8. 北東側市街地境界（ポイントJ）と林内超音波測定点



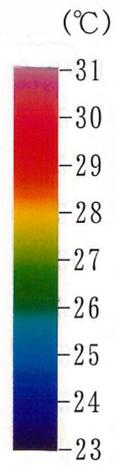
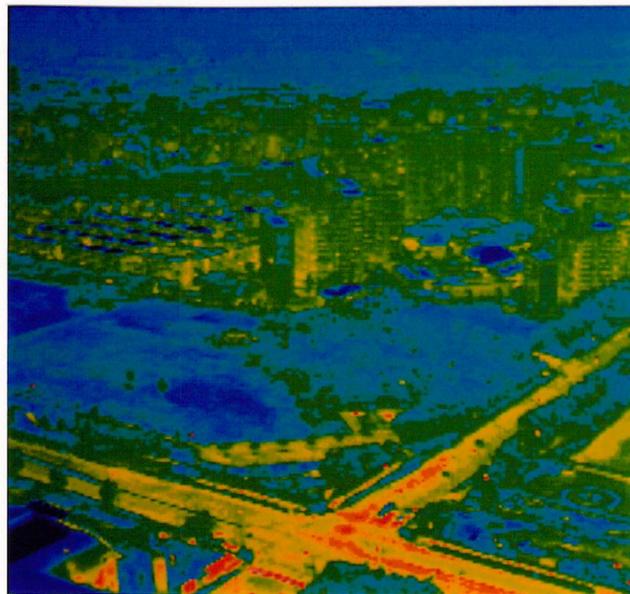
写真-9. 緑地境界部分（側線の南東側から北西方向を望む）



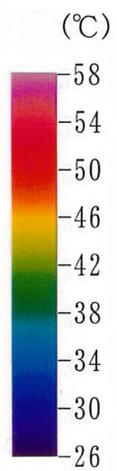
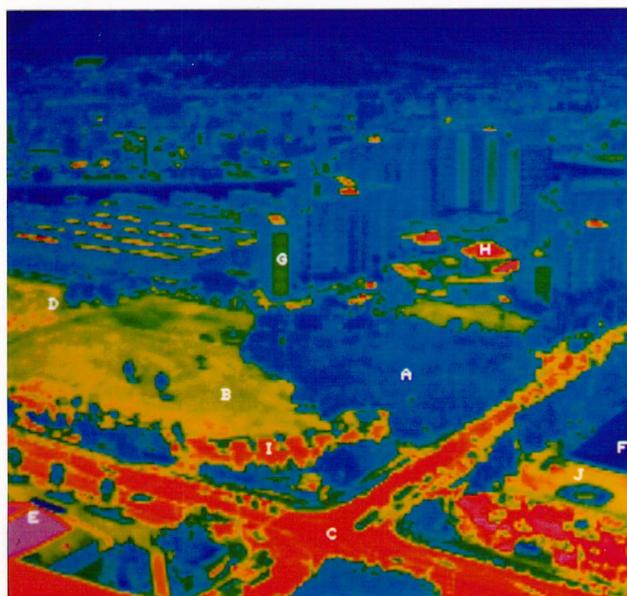
写真-10. 熱画像測定点から見た観測サイトの俯瞰



Aug.2 20:15



Aug.3 5:04



Aug.3 13:04

写真-11. 夜間・早朝・日中の熱画像の例（温度スケールは未補正）



写真-12. 風向・風速・日射量の測定ポイント（中央公園）



写真-13. 測定ポイントの状況 (**GRP**)



写真-14. 測定ポイントの状況 (**GRC**)



写真-15. 測定ポイントの状況 (EWP)



写真-16. 測定ポイントの状況 (NSM)



写真-17. 測定ポイントの状況 (EWM)



写真-18. 測定ポイントの状況 (RS1)



写真-19. 測定ポイントの状況 (RIV)



写真-20. 測定ポイントの状況 (RS2)



写真-21. 測定ポイントの状況 (SUB)



写真-22. 測定ポイントの状況 (RS3)

第1章 序 論

1. 研究目的

近年、特にブラジルでの環境サミット以降、日本においてもエコシティ、エコポリスなど自然と調和した省エネルギー的な街づくりが緊急課題として取り上げられ、現在建設省・環境庁など多方面でそのための研究が活発に行われている。当研究室ではこれまで、都市域における河川の微気候的作用に関する基礎的研究を実測調査や風洞実験などを中心に行い、エコシティ、とりわけ「風通しの良い街づくり」のためのいくつかの具体的なプランニング案を提案してきた。一方、水面とともに大きな環境調節効果が期待される空間として、都市内の緑地が現在注目されている。ここ数年、総合設計制度に伴う公開空地や屋上緑化など敷地内に"みどり"を多く取り入れた建築も増えてきてはいるが、"みどり"が単にプランナーの個性の演出素材として用いられているに過ぎない場合が多く、真にエコロジカルなプランニングと呼べるものには至っていない。このような状況にとどまっている大きな要因のひとつは、"みどり"による環境調節効果に関する具体的な設計手法が確立されていないという点にあり、それゆえ"みどり"の効果の定量的な把握が緊要な課題である。

屋外環境の設計手法として"みどり"を考えた場合、最も問題となるのが緑地のスケールによる効果の違いである。これは、ある地域の緑地面積率の目標を設定した場合、その緑地の配置計画において必ず議論される点であり、大面積緑地を一つ計画するか小面積緑地を分散して多数計画するかが常に問題となる。この点については、同じ微気候的效果を対象としながら、目的により評価が微妙に異なる可能性がある。すなわち、1) 都市内のオアシスとして緑地内の樹冠下を快適空間として設計するというミクロスケール・プランニングの立場、2) ヒートアイランドに代表される劣悪な都市熱環境を緑地により少しでも改善しようというアーバンスケール・プランニングの立場の2つである。いずれにせよ、緑地の規模による緑地内外の気候環境の差異を実測の積み重ねから明らかにする必要がある。この種の測定は、すでにいくつか報告されている2次元モデルによる緑地効果のシミュレーションの検証という意味からも重要である。さらに、これらの異なる気候環境の形成要因として、緑地内外の熱収支特性の把握も不可欠である。また、ミクロスケールの立場からは体感気候を考慮した緑地内における微細な気流性状の解析ならびに気温と風速の相関解析も必要となる。そして、これらの短期集中的な測定による成果を具体的な設計手法として確立するためには、年間を通しての長期的な効果の把握も併せて実施することが肝要である。

この種の測定はこれまでも数多く行なわれているが、緑地の効果の存在を単に示すという結果に終わっているものが大半で、実質的な設計資料としての意味をもつものは

ほとんど存在しない。また既存の報告例には、気温測定における日射遮蔽など測定方法に問題があるものも多く、緑地内の気温分布を正確に捕らえた例は皆無と云っていい。また、年間の変化を気象要素と関連づけて解析した例もまったく見あたらない。

2. 研究計画

本研究では、緑地のスケールによる環境調節効果の違いの把握を主目的に、以下の観測を実施する。

[A]夏季を中心とした短期間の集中観測

広島市の中央公園を対象に、緑地内の詳細な気温分布、並びにそれらと気象要素との関連把握を目的に、数日間の集中観測を行う。主な測定項目は以下の通りである。

- (1)緑地内外の風環境
- (2)緑地内外の熱収支および表面温度分布
- (3)緑地内および周辺市街地における詳細気温分布
- (4)緑地内における気流と気温変動の相関分析

[B]年間を通しての長期観測

上記の短期間の集中観測結果を補い、さらに設計資料としての緑地効果の把握を目的に、集中観測と同じ広島市の中央公園とその周辺部を対象に、年間を通しての長期観測を実施する。測定項目は以下の通りである。

- (1)緑地内外の気温分布
- (2)緑地周辺の風速および日射量

第2章 夏季を中心とした短期集中観測

1. はじめに

夏季日中における緑によるクールスポット形成のメカニズムを解明するため、広島市の中央公園を対象に、緑地内外の詳細な微気象観測を実施した。ここでは、2次元数値モデルによる考察を念頭に、そのための基礎資料を得ることを主目的とした。広島市の中央公園は、中央部に広い裸地状のグラウンドがあるため、日中の海風時には対象とした公園北側の緑地に対し十分なフェッチが得られ、境界条件が把握しやすい。今回は、裸地から緑地内へ日中の海風方向に約125mの測線を設定し、測線に沿った気温分布を測定するとともに、裸地および緑地内における熱収支観測を実施した。また、超音波風速温度計により緑地内における気温と気流の瞬時変動についても測定を行った。

以上の測定から、①緑地規模や気象条件による緑地内外気温差の変化、②緑地における熱収支特性、③緑地内の気温の瞬時変動と気流との関連、等を検討した。

2. 測定場所および期間

測定場所：広島市中区基町の中央公園

* 広島市の繁華街(紙屋町)の北約600mに位置し、長辺約500m・短辺約200mの広さをもつ。東側は広島城に隣接しており、西側は太田川に接している。北側には14Fの基町高層アパート群が林立するが、観測地点である東寄りの部分は道路を隔てて基町小学校のグラウンドに接している。東側の道路は市北部への幹線道路(片側2車線)で、交通量も非常に多い。(図-1)

公園内の西半分は芝地、東半分は裸地となっており、それを取り囲むように高木の緑地が存在する。樹種は落葉広葉樹のケヤキが中心で、一部に常緑のクスノキが混っている。樹高は8~12m程である。測線は公園の北東部分の緑地を中心にほぼ南西~北東方向に設定した。(図-2)

測定期間：1994年8月1日現地設営・準備

8月2日6:00~3日17:0035時間連続観測

* 発電機の給油の関係から、原則として3時間を1Setとした。その間は10分間を1Runとし、2分の間隔をおいて15回のRunを繰り返すかたちでデータを収録した。

図-3に測定期間を含む5日間の気象概況として、広島地方気象台における毎時の観測値を示した。なお、2日の3時過ぎから6時にかけて、および9時前後に計1mm程度の降雨があった。

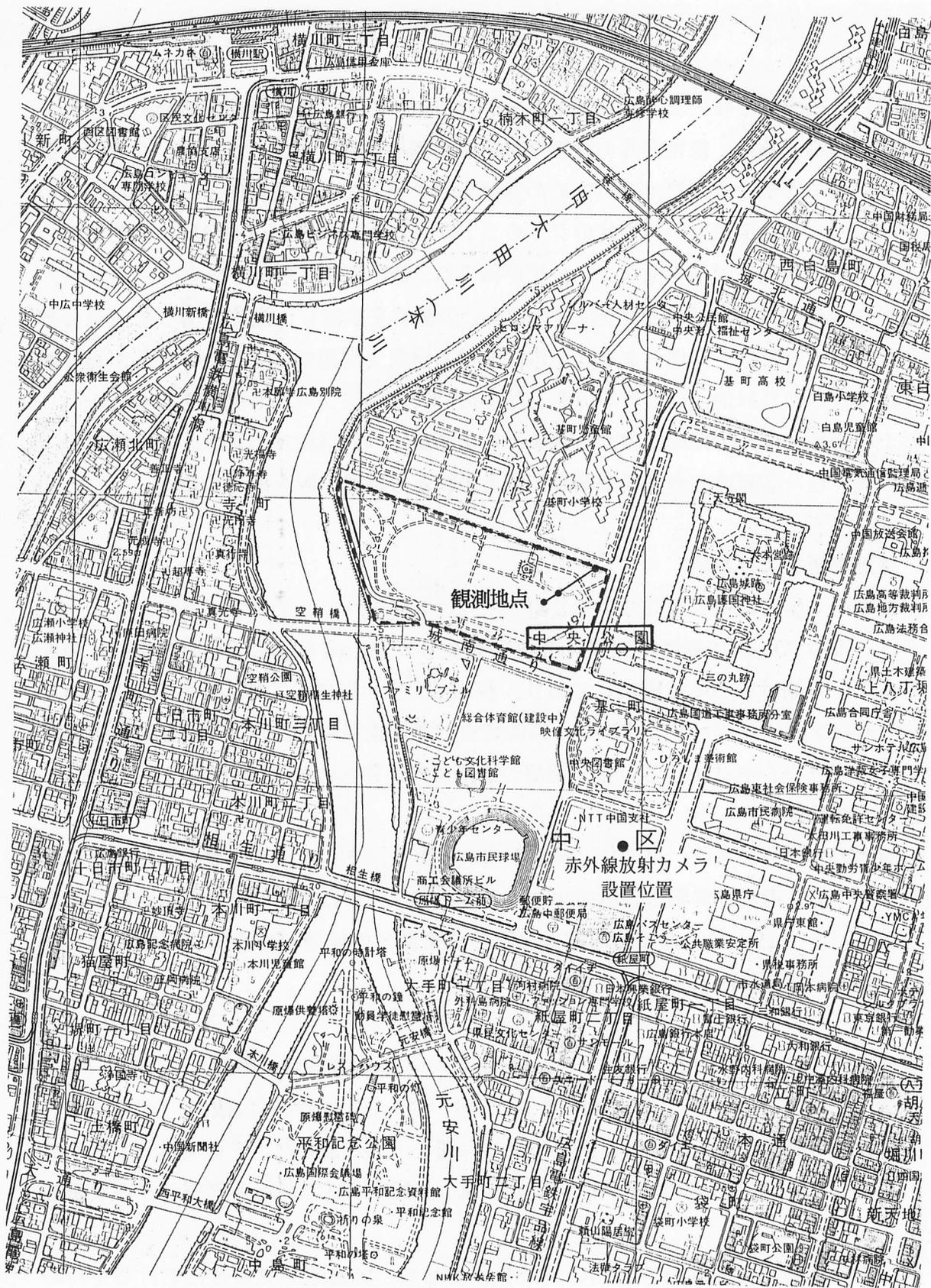


図-1. 広島中央公園の位置と周辺状況 (図中のメッシュは500m)

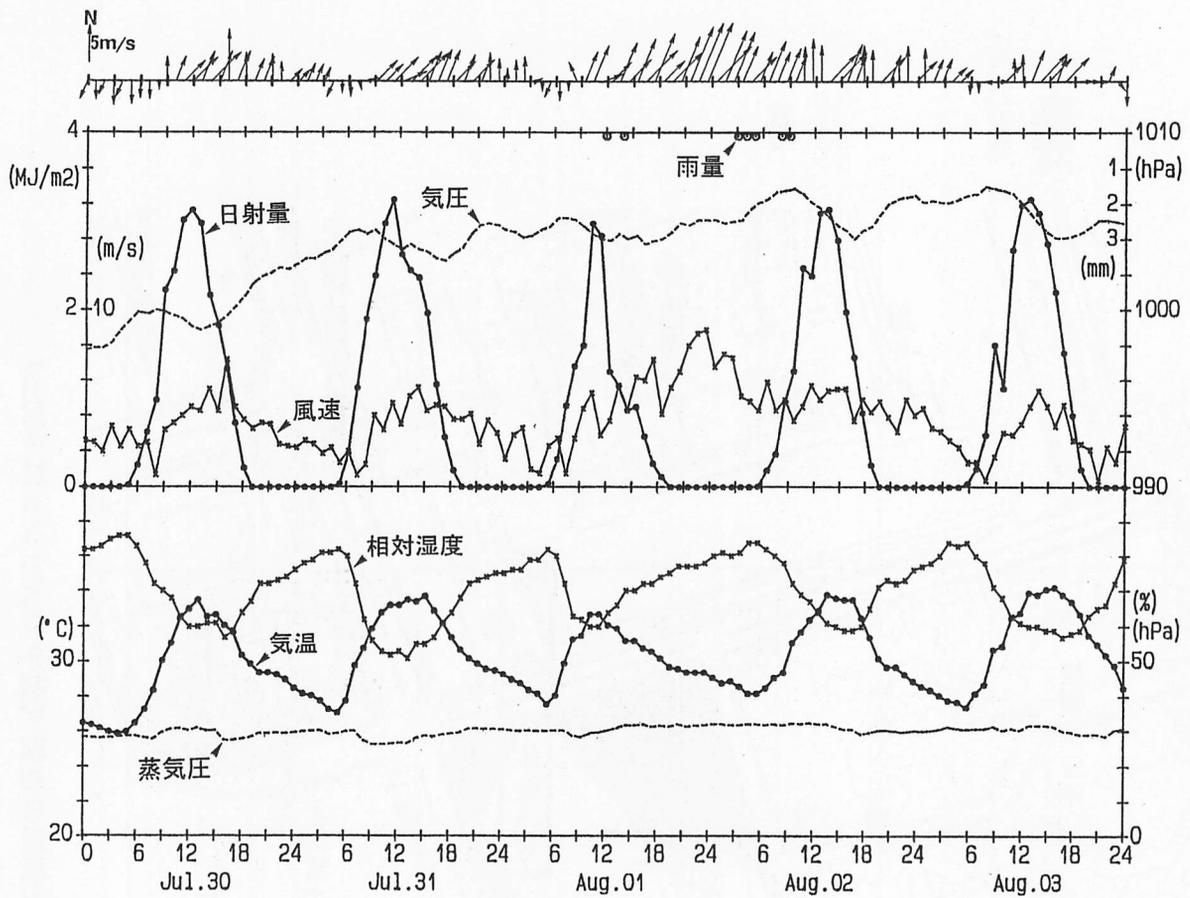


図-3. 測定期間前後の気象概要 (広島地方気象台)

3. 測定方法

緑地境界から約 19m離れた裸地上の地点 (ポイントA) を林外の基準点とし、そこから北東方向に測線を設定した。同じく緑地境界から緑地側約 19mの地点 (ポイントE) を林内の基準点とした。北側道路までの測線の全長は約 125m である。(図-4 参照) なお、測線の南南東 440m に位置する基町クレド屋上(地上 143m)において、赤外線放射カメラによる公園およびその周辺部の熱画像を収録した。測定項目・測定測器および記録方法を以下にまとめて示す。

<測定項目・測定機器および記録方法>

(1)全天日射量&反射日射量：アルベドメータ(EKO MR-21) [305~2800nm]

* 林外基準点・測定高さ地上 60cm

記録：データログ(日電三栄 7V14) (0.1Hz で sampling)

(2)正味放射量：正味放射計(EKO CN-40) [0.3~30 μ m 以上]

* 林外 or 林内基準点・測定高さ地上 60cm

記録：データログ(日電三栄 7V14) (0.1Hz で sampling)

(3)地中熱流量：熱流板(EKO CN-140B) [75×75×0.7mm]

* 林外&林内基準点・地中 1 cm 深

記録：データログ(日電三栄 7V14) (0.1Hz で sampling)

(4)湿度：容量型湿度計(SHINYEI TRH-3A)

* 林内基準点・測定高さ地上 90cm

記録：データログ(日電三栄 7V14) (0.1Hz で sampling)

(5)表面温度(地上ポイント)：放射温度計(National ER2008)

* 測線周辺の各種表面(裸地面・葉面・アスファルト舗装面 etc)

記録：直読記録 (約 2 時間毎)

(熱画像)：サーモトレーサ(日本電気三栄 TH-1101)

* 基町クレド屋上より・日中 30 分毎・夜間 1 時間毎

(6)風速(鉛直プロファイル)：サーミスタ風速計(アイ電子技研 MV-01m)

* 林外基準点・測定高さ地上 30・90・330cm の 3 高度

記録：データロガー(TEAC DR-F1) (10Hz で sampling)

(3 成分瞬時値)：超音波風速温度計(KAIJO DENKI WA(T)-395)

* 林外基準点・林内市街地近傍)・測定高さ地上 60cm

記録：データロガー(TEAC DR-F1) (10Hz で sampling)

(7)温度(気温・地温・葉温・樹幹温・グローブ温)：T 熱電対(0.32mm φ)

* 合計 3 3 点 (図-4 参照)

記録：データログ(日電三栄 7V14) (0.1Hz で sampling)

(気温瞬時値)：超音波風速温度計(KAIJO DENKI WA(T)-395)

* <同上>

(気温移動観測)：サーミスタ温度計(テカセブン D611)

* 測定高さ地上 90cm (測線に沿って 1 2 ポイント)

記録：直読記録 (各ポイント 3 秒毎 10 回読み・2 時間毎)

(市街地側気温)：白金抵抗温度計(KADEC KDC-S-SP)

* 測定高さ地上 230cm (市街地側林端・林端より 18m 地点)

記録：データロガー(KADEC-US) (1 分毎で sampling)

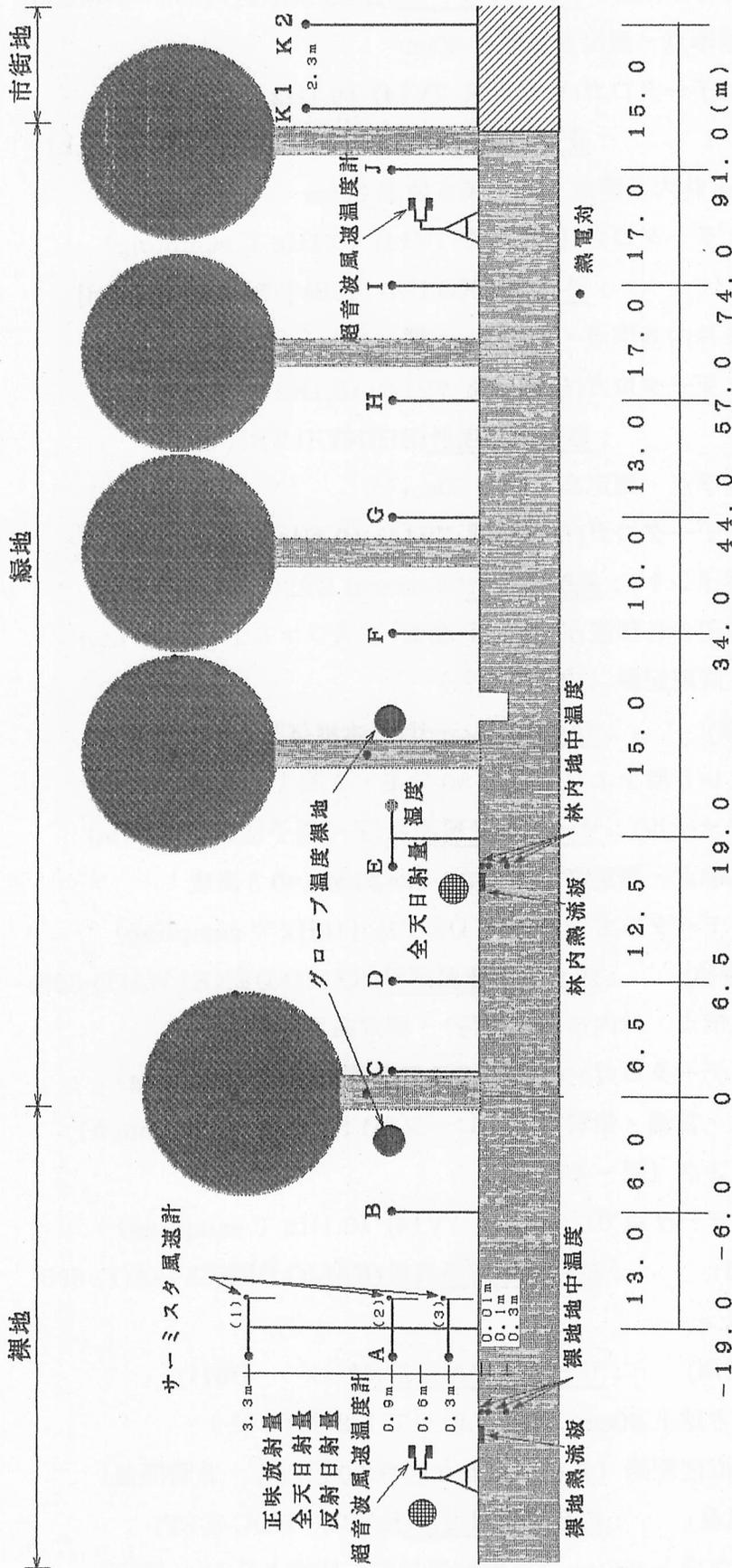


図-4. 測器の配置状況

以上の気温測定においては、図-5に示す自作の通風シェルターに温度センサーを装着し測定している。シェルターはアルミの二重筒（40mm と 50mmφ）および 300×400mm の日射遮蔽板からなり、ファンモーターにより常時強制吸引している。通風速度は約 6m/s で、これにより日射による影響は 0.1℃以下に抑えられる。現地での設置状況を写真-1～9に示す。

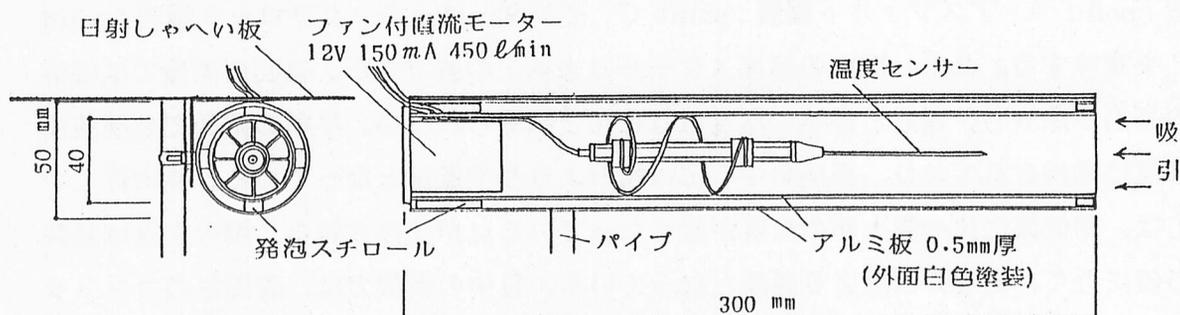


図-5. 気温測定に用いた日射遮蔽通風シェルター

4. 熱画像による表面温度分布測定

緑地内に設けた測線から南南東 440m に位置する基町クレドビルの屋上(地上 143m)から、赤外線放射カメラによる公園およびその周辺部の熱画像を収録した(図-6参照)。写真-10に熱画像測定地点から見た観測サイトの俯瞰を示す。

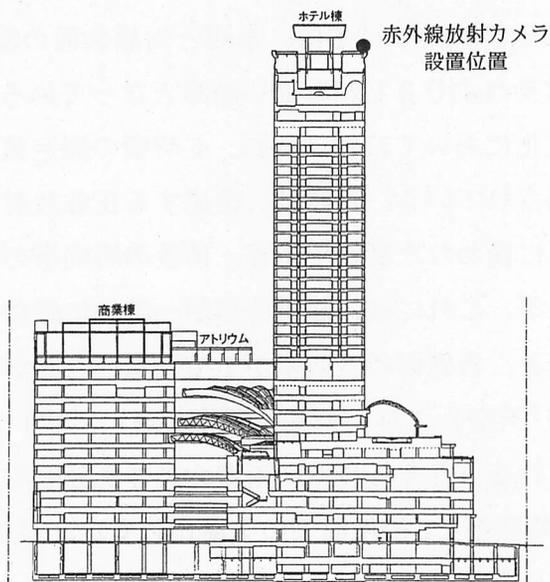


図-6. 熱画像の測定地点(基町クレド屋上)

図-7は、熱画像の温度値を放射温度計によるグランド・トゥルス($\epsilon=1$ と仮定)の値と比較したもので、熱画像の値はグランド・トゥルスの値に比べ全体に低い。その差は高温な物体ほど大きくなっており、30℃の物体で約3℃、60℃の物体では約8℃程度低く観測されている。なお、対象物体としては、裸地・水面・樹冠・アスファルト舗装・インターロッキングブロック舗装の5種類について測定を行ったが、低温度域でインターロッキングブロック舗装がやや誤差が大きくなる傾向があるが、全体としては対象物による明確な差異は認められない。写真-11に、夜間・早朝・日中の熱画像の例を示す。上記の5つの対象物は、各々図中の、裸地：point B、水面：point F、樹冠：point A、アスファルト舗装：point C、インターロッキングブロック舗装：point I、を意味する。なお、図中の温度スケールは未補正の値である。夜間の画像では舗装面の高温が際立ち、樹冠と裸地の温度はほとんど認められない。早朝の画像でも舗装面の高温は維持されており、裸地の中心部は樹冠よりやや低温となっている。建物群については、側壁面に比べ屋上面の温度が低くなっている点が注目される。堀の水温は舗装面の値に近く、裸地や樹冠より高温となっている。日中の画像では、表面毎のコントラストが明確で、アスファルト舗装>インターロッキングブロック舗装>裸地>樹冠>水面の順となる。建物群については屋上面の高温が際立っており、側壁面の温度は裸地面よりも低く樹冠面の温度に近い。夏季日中は、水平面である舗装した地表面や建物の屋上面が主な熱源となっている。ちなみに、最も高温となっているのは、図左下の体育館の金属屋根(図中のpoint E)である。

図-8は、図-7で求めた回帰式に従って補正を施した各種表面の表面温度の時間変化を示したものである。アスファルト舗装面の最高温度は約59℃、インターロッキングブロック舗装も日中55℃を超える。裸地面についても、50℃を超える結果となっている。樹冠面の最高温度は約39℃、水面(広島城の堀)の最高温度は約35℃となっている。一方、早朝の最低気温時については、水面と両舗装面の温度がほぼ等しく31~32℃、樹冠面と裸地面はそれより3℃程度低い結果となっている。

なお、夜間の表面温度変化において、22時頃と4時頃の測定値が前後の時間の測定値に比べ、全体に高く観測されている。これは、後述する正味放射量の変化からもわかるように、この時間帯に雲に覆われた影響である。前後の時間帯の値を結んだ値に比べた温度差は1~2℃であるが、これには、放射冷却が一時的に緩和され表面温度が実際に上昇したことによる変化と、各表面の放射率が1ではないことから生じる天空の映り込み効果に起因する変化(「天空」より相対的に温度が高い「雲」が映り込むことによる温度上昇)の両方が含まれると考えられる。両者の寄与を分離することは難しいが、後述するように、これらの時間帯に、裸地面上の気温がわずかながら上昇していること、渦相関法で求めた裸地面上の顕熱フラックスもわずかに増大していることから、実際の表面温度上昇があったことはほぼ間違いない。

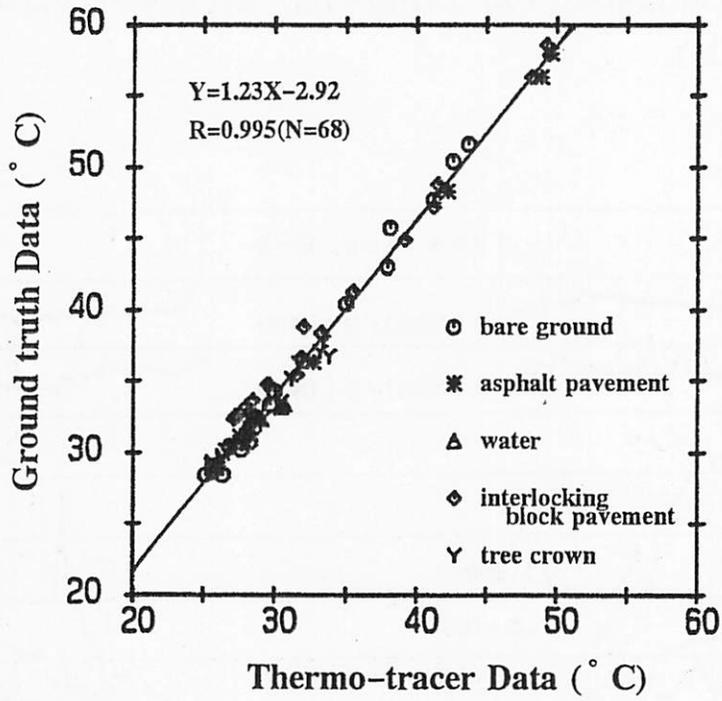


図-7. 熱画像とランド・トゥルスデータとの比較

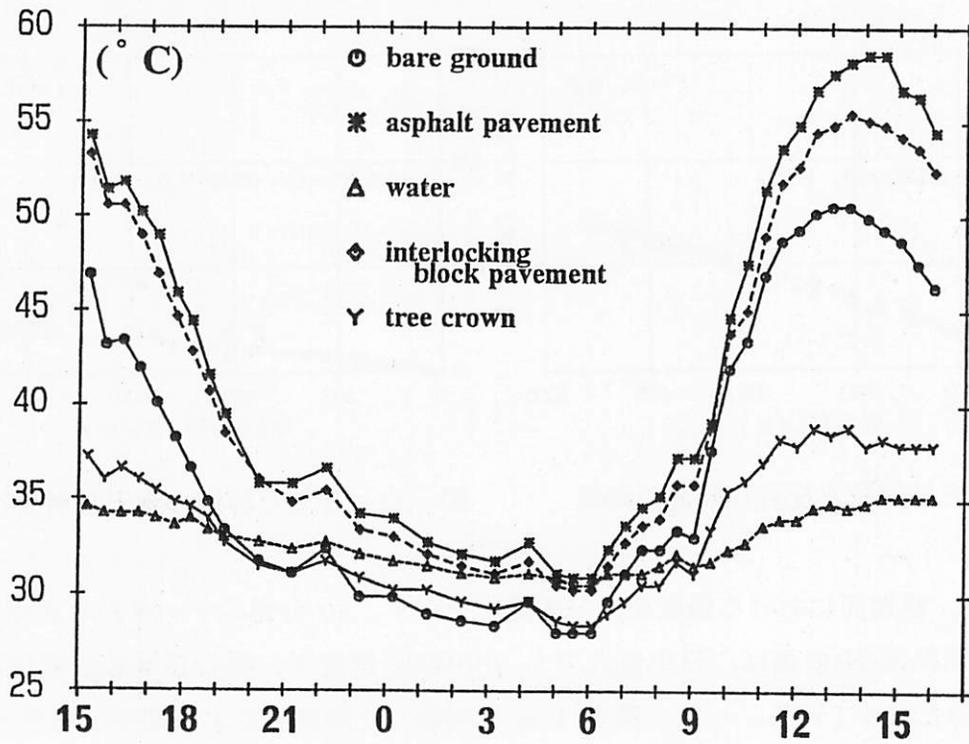


図-8. 代表的な地表面被覆の表面温度変化

5. 裸地面と林内における熱収支

図-9は、裸地における全天日射と反射日射および林内の日射の変化を示したもので、裸地面のアルベドは平均して約0.31(図-10)、また林内の日射は林外の13%程度となっている(図-11)。

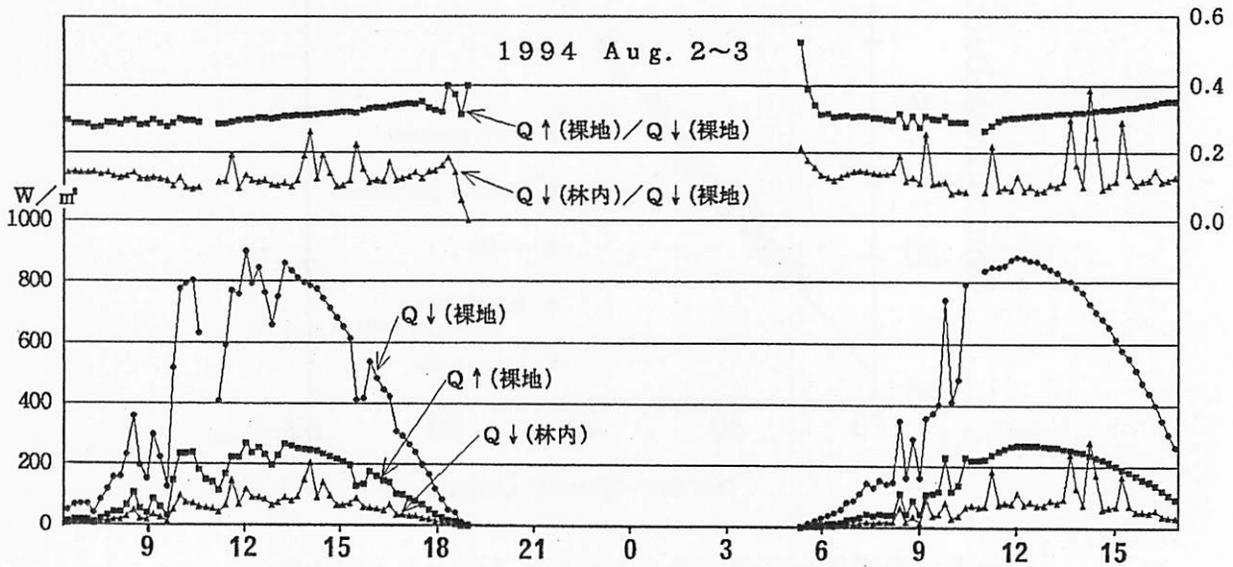


図-9. 裸地および林内における日射量の時間変化

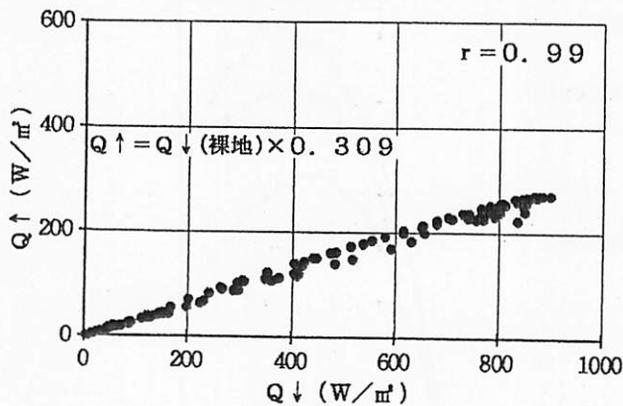


図-10. 全天日射量と反射日射量の関係

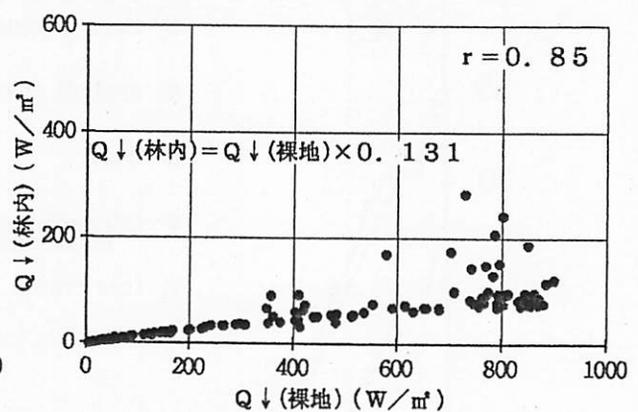


図-11. 裸地と林内の全天日射量比較

図-12に、裸地面における熱収支成分の変化を示す。10分毎のデータから渦相関法で算出した顕熱流(H)の値は、日中最大でも 180W/m^2 程度で、概ね正味放射量(Rn)の30%(図-13)となっている。一方、深さ1cmに埋設した熱流板による地中伝導熱流(G)は、日中Rnの約25%程度(図-14)である。2日の早朝に降雨が観測されたもののその雨量はごく僅かであり、記録的な猛暑となった観測日までの天候経過を考慮すると、熱収支の残差(Rn-H-G : Rnの約45%)がすべて蒸発潜熱であるとは考えられない。

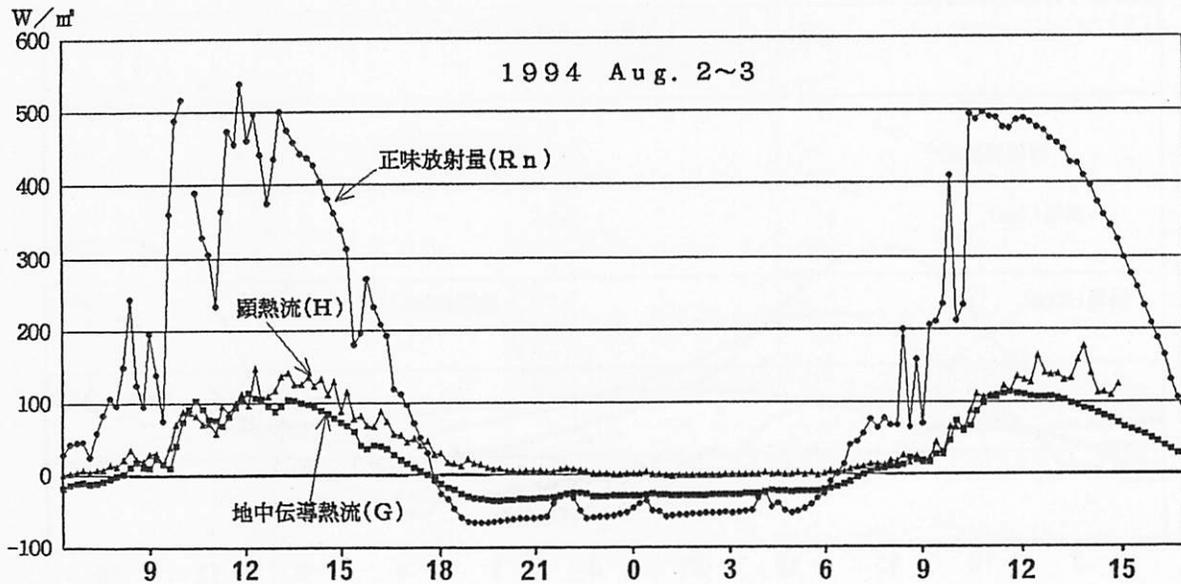


図-12. 裸地における熱収支成分の時間変化

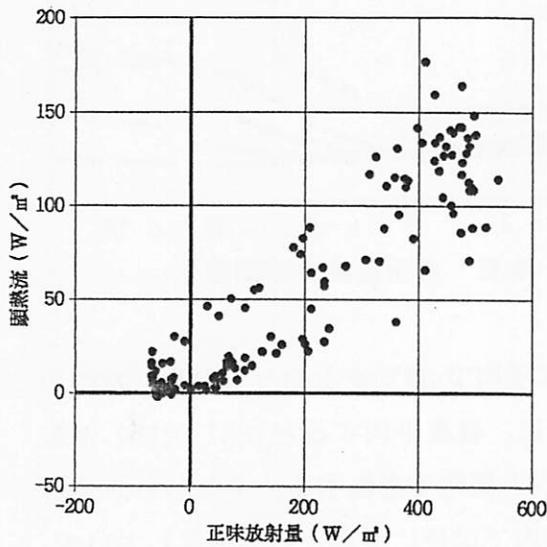


図-13. 顕熱流と正味放射量の関係

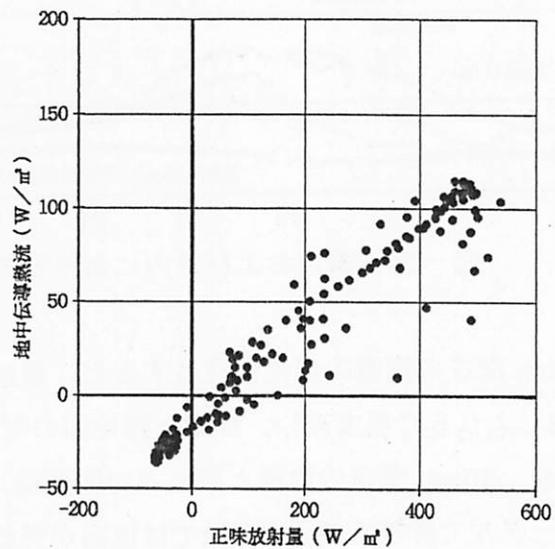


図-14. 地中伝導熱流と正味放射量の関係

図-15 に裸地および林内における気温・地温・表面温度の時間変化を示す。前述の熱画像による樹冠面温度は、日中、林内の気温に比べ5℃程度高くなっている。夜間についても樹冠面は林内の気温より高く保たれている。裸地面の表面温度についても、夜間を通して気温よりわずかながら高く保たれており、それに対応して渦相関法による顕熱フラックスも、少なくとも午前0時頃までは、わずかではあるが正の値を示している。

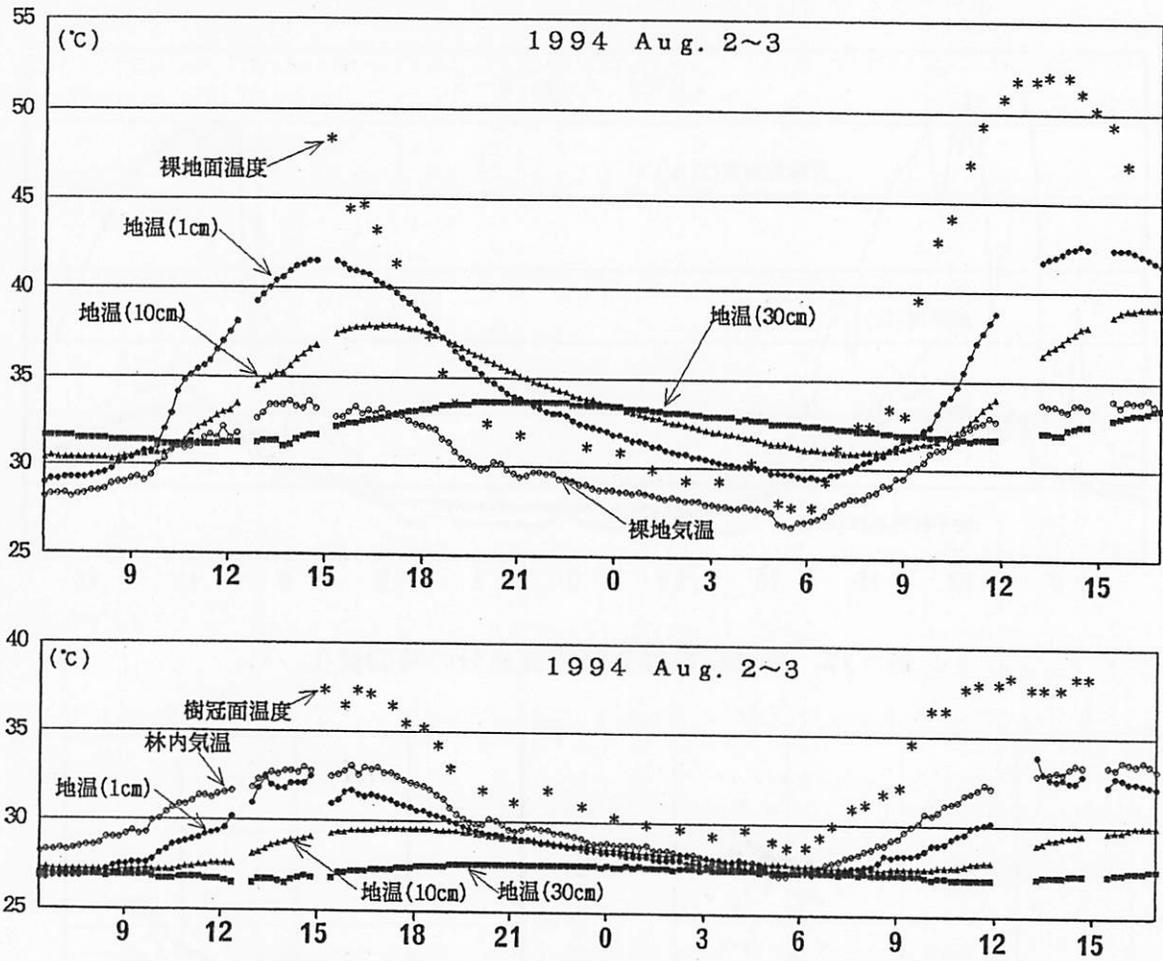


図-15. 裸地および林内における気温・地温・表面温度の時間変化

30cm 深さの地温の変化に注目すると、裸地では平均で 32℃を上回っており、林内の約 27℃より 5℃程度高い。緑地と裸地面の気温差は、昼夜平均すると 0.5℃程度しかないので、30cm 深さの地温と気温との関係は、林内と裸地で逆転する。すなわち、1 日のトータルで評価すると、裸地では地面が熱源、林内では逆に冷源として作用している。緑地の鉛直温度分布は、ほぼ終日、樹冠面温度 > 林内気温 > 地温(1cm 深) > 地温(10cm 深) > 地温(30cm 深) という構造が維持されており、林内の気温形成に林床地盤面の冷源としての効果が大きいことを裏付けている。

また、この図よれば G がピークを示す 11 時前後には、熱画像による裸地表面温度と 1 cm 深さの地温との間に 10℃程度の温度差がある。この温度傾度と一般に用いられる乾燥土壌の熱伝導率(0.3W/m·deg)から見積もられる熱流は 300W/m²となる。一方、表層 1cm 層の蓄熱は、乾燥土壌の熱容量(1.28×10⁶J/m³·deg)を用い、層の平均昇温量をやはり図-15 から 30 分で 2℃程度と見積もると、約 15W/m²となる。熱流板による 1cm 深の熱流のピーク 104W/m²に表層 1 cm の蓄熱を加えても、表層 1 cm の温度傾度から見積もられる 300W/m²には一致しない。この原因としては、熱画像による表面温度が高めに測定されているか、もしくは熱流板の埋設において土壌が乾燥していたため隙間

が生じた等の可能性が考えられる。日没後の夜間に注目すると、顕熱フラックスがわずかに正の値であるにもかかわらず、上向きの地中伝導熱流Gが負の正味放射量より絶対値が小さく、正味放射の変化を説明できない。このことから、1 cm 深さに埋設した熱流板の出力が30~40%ほど過小評価されていると推測される。

一方、上記のような熱流板の過小評価を考慮しても、日中 $R_n - G > H$ という関係となることから、渦相関法による顕熱フラックスについても、過小評価されている可能性が指摘できる。この原因は、フェッチを考慮して測定高度を60cmと通常よりやや低く設定したため、この高度では小さな渦径の高周波成分がフラックスに寄与しており、10Hz というサンプリングではこのような高周波成分が十分に捕えられなかったものと考えられる。

図-16は、渦相関法による顕熱流フラックスと、気温の変動(R.M.S)の変化を林内と裸地について比較したものである。林内の顕熱フラックスは、日中 15W/m^2 程度の正の値を示すが、終日ほぼゼロに近い。上述の林床が冷源として作用しているという記述と、わずかではあるが顕熱フラックスが正の値をとることとは一見矛盾するように思えるが、これは風上側の木漏れ日や一部樹冠の切れている地表面からの顕熱を捕らえているものと考えられる。

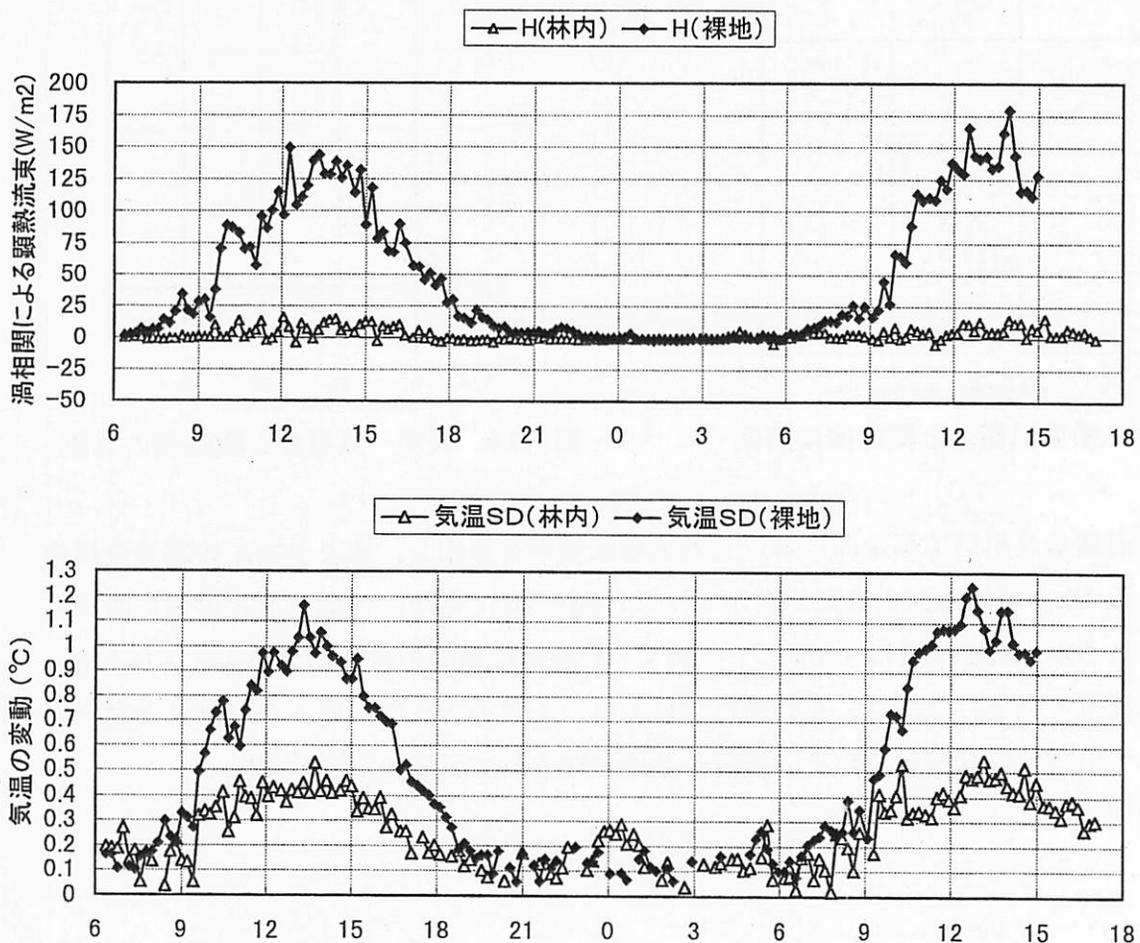


図-16. 渦相関法による顕熱フラックスと気温の変動(R.M.S)の変化

6. 裸地面における対流熱伝達率

図-17 は、裸地面上で測定した鉛直方向の気温差(地上 0.3m と 3.3m の差)の時間変化を示したものであり、その値は裸地面における顕熱フラックスとよく対応している(図-18)。図-19 は、同じく裸地表面温度と地上 90cm の気温との温度差に対して顕熱流をプロットしたもので、図-18 よりさらに良い相関が見られる。

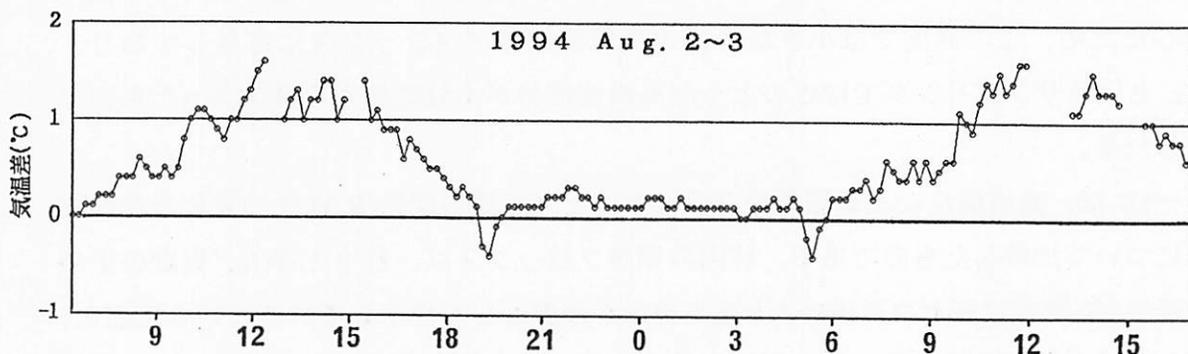


図-17. 裸地における鉛直気温差(0.3m-3.3m)の時間変化

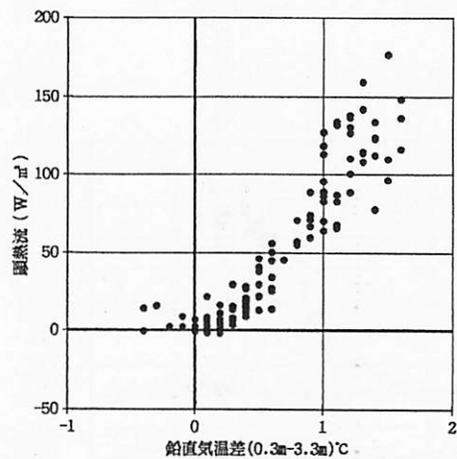


図-18. 鉛直気温差と顕熱流の関係

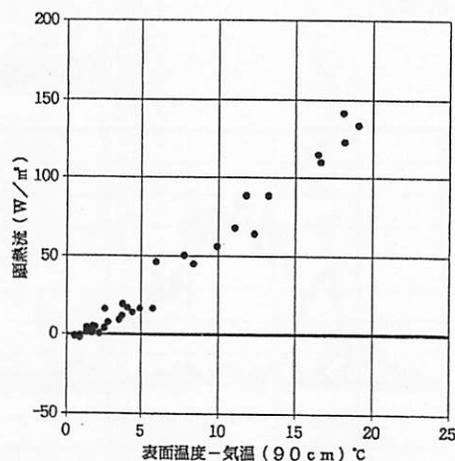


図-19. 表面-気温差と顕熱流の関係

この温度差を用いて裸地面における対流熱伝達率を算出し、地上 60cm の超音波風速計による 10 分平均風速との関係を示したのが図-20 である。一応風速との対応関係は認められるが、風速は概ね 2m/s 以下と弱く、対流熱伝達率の値は最大でも $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{deg}$ 程度となっている。ただし、この値については、上述のように顕熱フラックスが過小評価されている可能性があるため、検討の余地が残されている。

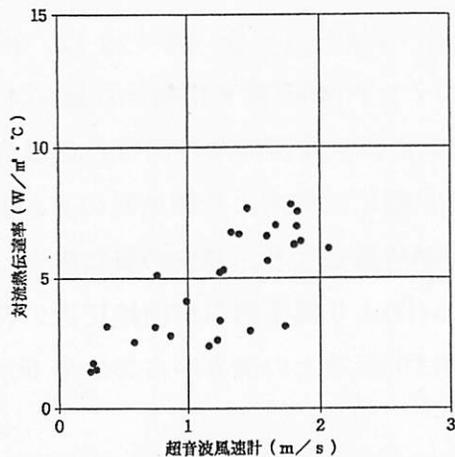


図-20. 対流熱伝達率と風速の関係

7. 気温分布と風向・風速の関係

まず、観測期間中の風向・風速の10分平均の変化を図-21に示す。ここに示す風向は、0.1秒毎の3成分合成風速が0.2m/s以上の場合を、16方位別に10分間積算した積算風速が最も大きかった方位である。期間中はほとんど南よりの風が卓越しており、北風が吹いたのは3日の早朝の約2時間のみであった。裸地と林内(市街地近傍)における超音波風速計による風速を比較すると、林内は裸地の約半分となっている(図-22)が、北風時は風上となる林内地点の方が風は強い。

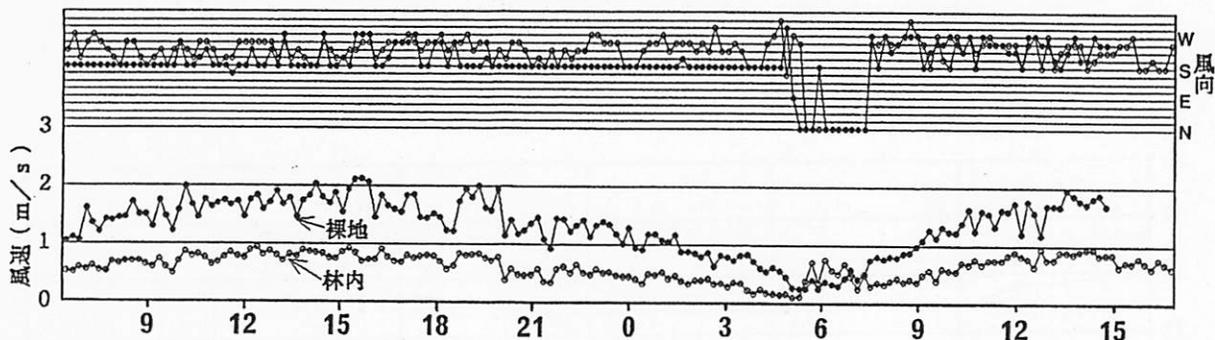


図-21. 裸地および林内における風向・風速の時間変化(超音波風速計による測定)

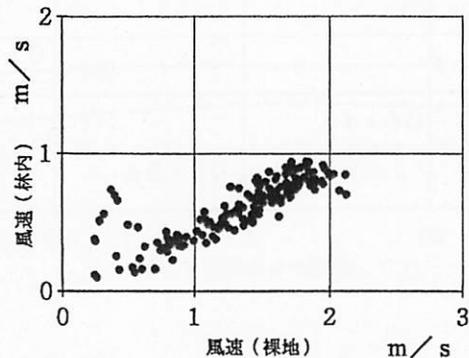


図-22. 裸地と林内の風速比較

次に、測線に沿った気温分布について述べる。図-23は、林内の基準点(E)に対する気温差の時間変化を裸地面のポイント(A)と最も市街地に近いポイント(J)について示したものである。あわせて図-24には、典型的な時間帯の気温分布を示した。深夜の気温分布はほぼ一様であり、また早朝には林内より裸地面の方が低温となる。一方、日中の南風時には、風上側の裸地面が高温となり、林内の奥に向かって気温が低下する。しかしながら、ポイント(G)ないし(H)より風下側の市街地に近い林内部分でも、明確な昇温傾向が認められる。その範囲は市街地との境界からおよそ50mである。

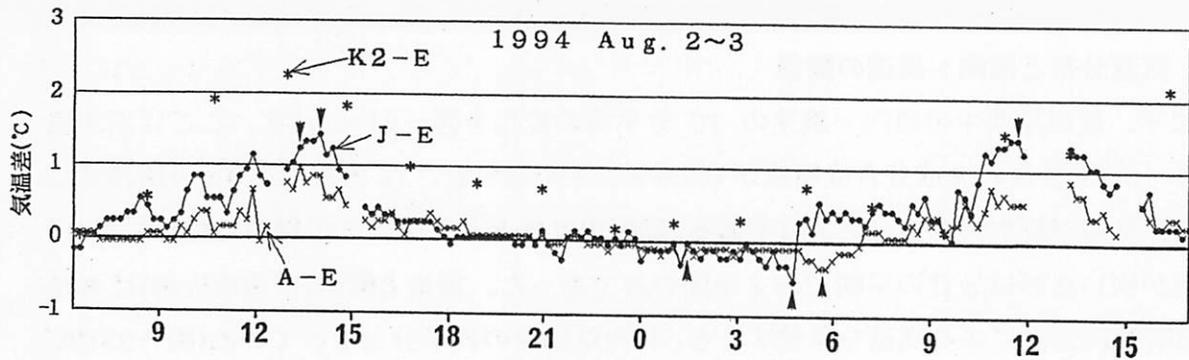


図-23. 林内基準点(E)に対する各地点の気温差の時間変化

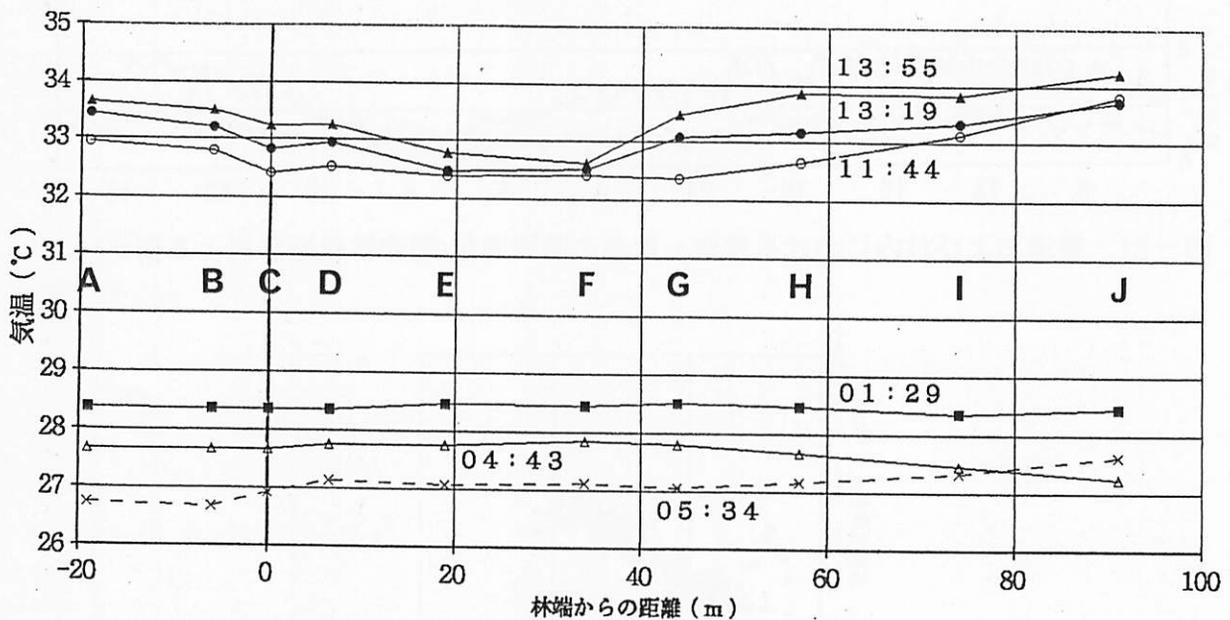


図-24. 測線における気温の水平分布の例

図-23によれば、緑地の風下部分での昇温(J-E)は、裸地面上における昇温(A-E)よりも大きくなっている。昇温量はいつでも日中に大きく、夜間はほぼ零となる。しかしながら、早朝の北風時には市街地からの暖気の流入で、明らかに(J-E)の値が大きくなっている。図中には外部条件としての市街地との気温差(K2-E)も併示したが、隣接する市街地では裸地よりもはるかに高温となっていることがわかる。ただし図-21によれば、日中の南風時にはポイント(J)付近でもやや西向きに風向は振れるものの南よりの風が吹いており、北風時のような直接的な市街地からの暖気の流入は認められない。

8. 緑地の風下境界における気温と風速の相関

上述のように、緑地の北側の風下域で認められた昇温現象は、気流の平均流成分では説明が付きにくい。そこで、ここでは風下境界近くに設置した超音波風速温度計の瞬時値を用いて、気流の水平成分と気温変動の相関について検討する。まず、北側市街地から緑地内への流入成分となる、4種の風向(NW・N・NE・E)の成分風速を、超音波風速計の水平2成分より算出した。図-25は、これら4成分の時間変化を示したものである。NW・N・NE成分については日中、風速が負の値となっており、平均流は逆向き、すなわち緑地から北側市街地へ流出する気流となっている。市街地からの流入となっているのは、前述のように早朝の2時間程度(5:30頃~7:30頃)のみである。

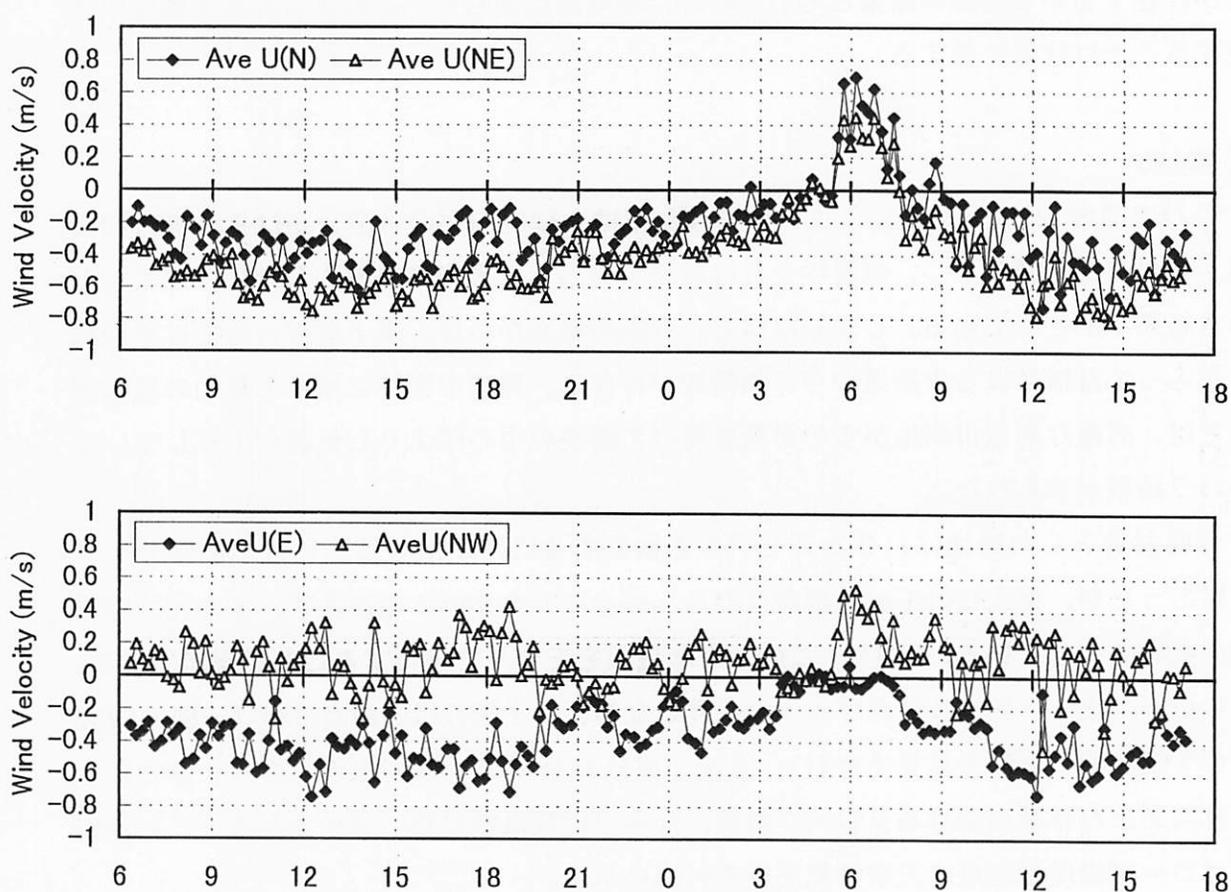


図-25. 4種の風速成分の時間変化

次に、これら4種の風速成分と気温変動との相関を計算し、相関係数の時間変化を示したのが図-26である。ここでは、気温についての評価時間内のトレンドを考慮し、トレンド除去を施した場合としない場合の2通りについて示している。正の相関は、その方向からの気流に伴って気温が上昇した（あるいは、逆方向の気流に伴って気温が低下した）ことを意味している。相関の値はばらつきが大きい、NW・N・NE成分については日中、明確な正の相関が認められ、平均流に逆らった市街地側からの乱流による熱輸送の存在を示唆している。一方、平均流が北風となる早朝の時間帯は、逆に負の相関を示している。

図-27は、同様の気温変動との相関を風速の鉛直成分に対して求めた結果である。ここでは、上向きを正としているので、正の相関は上向きの気流に伴って気温上昇が生じていることを意味する。ここでは、日中に正の相関、夕方から夜間にかけては負の相関となる傾向が認められる。そして、陸風が本格的に吹き始める少し前から正の相関に転じている。顕熱フラックスの項ですでに述べたように、日中はわずかながら上向きのフラックスが観測されており、その時間帯は当然ながら正の相関となっている。

図-28は、水平方向の各風速成分に対して、鉛直方向成分と同様に渦相関による水平顕熱フラックスを算出した結果である。特にNW・N方向からは、日中 100W/m^2 を超える水平乱流輸送が市街地から緑地に向かって存在する。これは、水平方向に気温勾配が存在するから当然の結果ともいえるが、平均流に逆らってこのような乱流輸送が存在することは注目に値する。

9. まとめ

これまでの2次元数値シミュレーションでは、緑地内部の気温分布は平均流方向に風下境界まで単調低下し、気温の上昇は緑地を通過して市街地に流入した後に始まるという結果が示されている。しかしながら、今回の結果からは、風下境界付近では平均流に逆らって乱流による市街地からの熱輸送が存在し、周辺市街地に接する緑地の縁辺部分では、高温な周辺市街地からの影響を受けて緑地の中心部よりも気温が上昇しているという結果が示された。

今回対象とした緑地は、2次元モデルを検証するにはかなり理想に近い観測サイトではあったが、捉えられている現象はむしろ完全に2次元的とは言えず、3次元的な気流の動きを伴っている。今後は、このような現象をモデルで再現することが課題である。この点を考慮し、モデルにおける入力条件となる、風上側の風速鉛直分布（一部、1992年の予備実測における結果を含む）、風速3成分のR.M.S.、相対湿度、さらに参考として林内および林縁におけるグローブ温度、ならびに気温測定点（ポイントA～J）およびグローブ温度測定点の天空写真を巻末付録に示す。

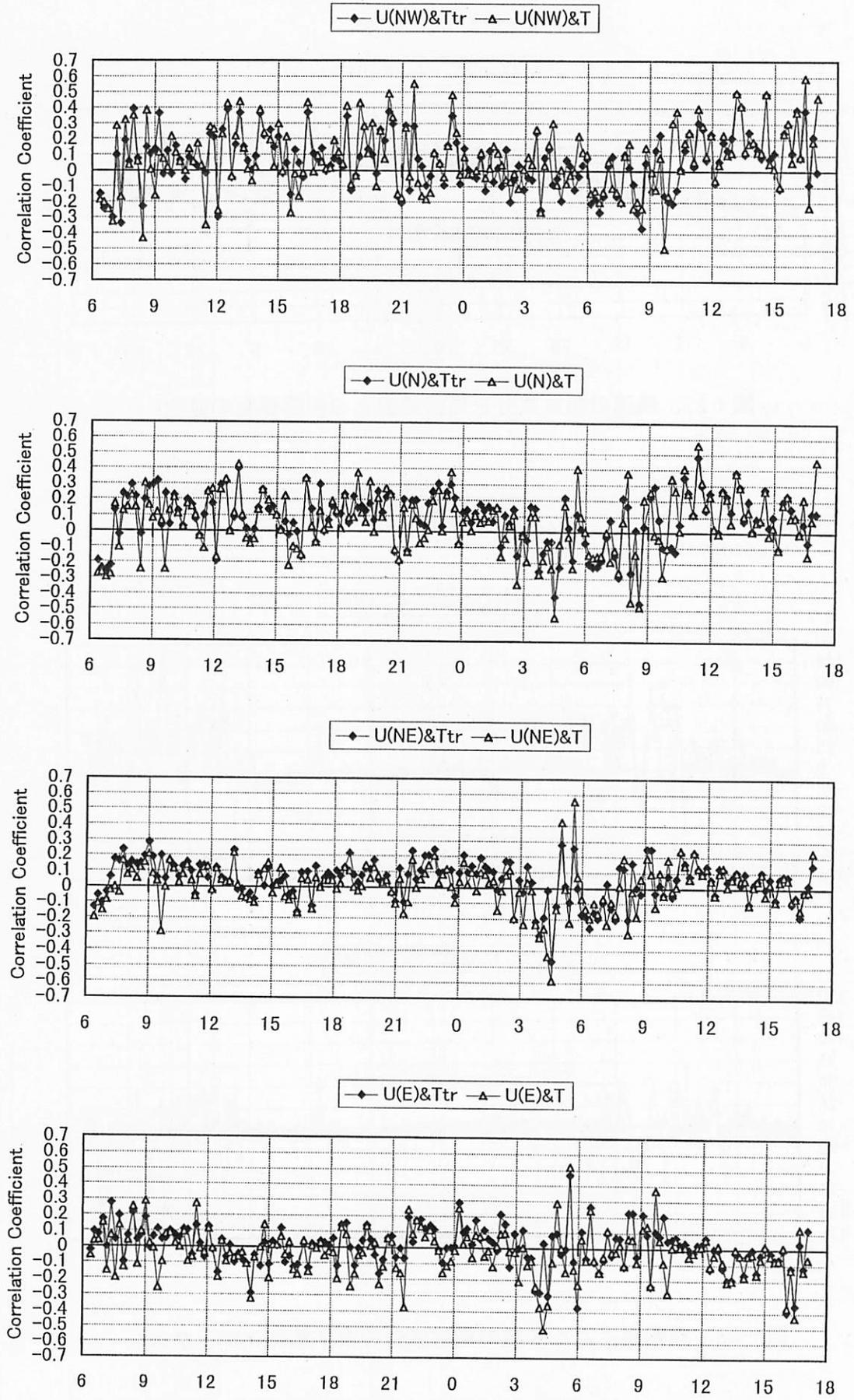


図-26. 4種の風速成分と気温変動との相関係数の変化

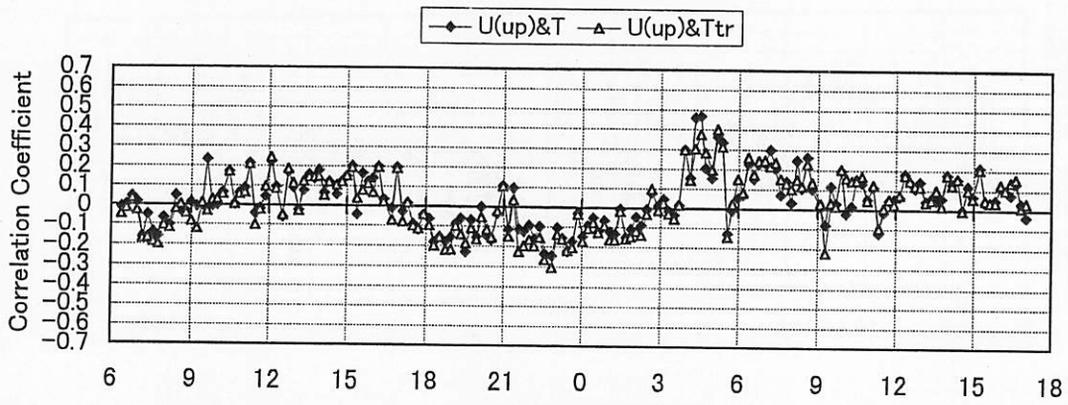


図-27. 風速の鉛直成分と気温変動との相関係数の変化

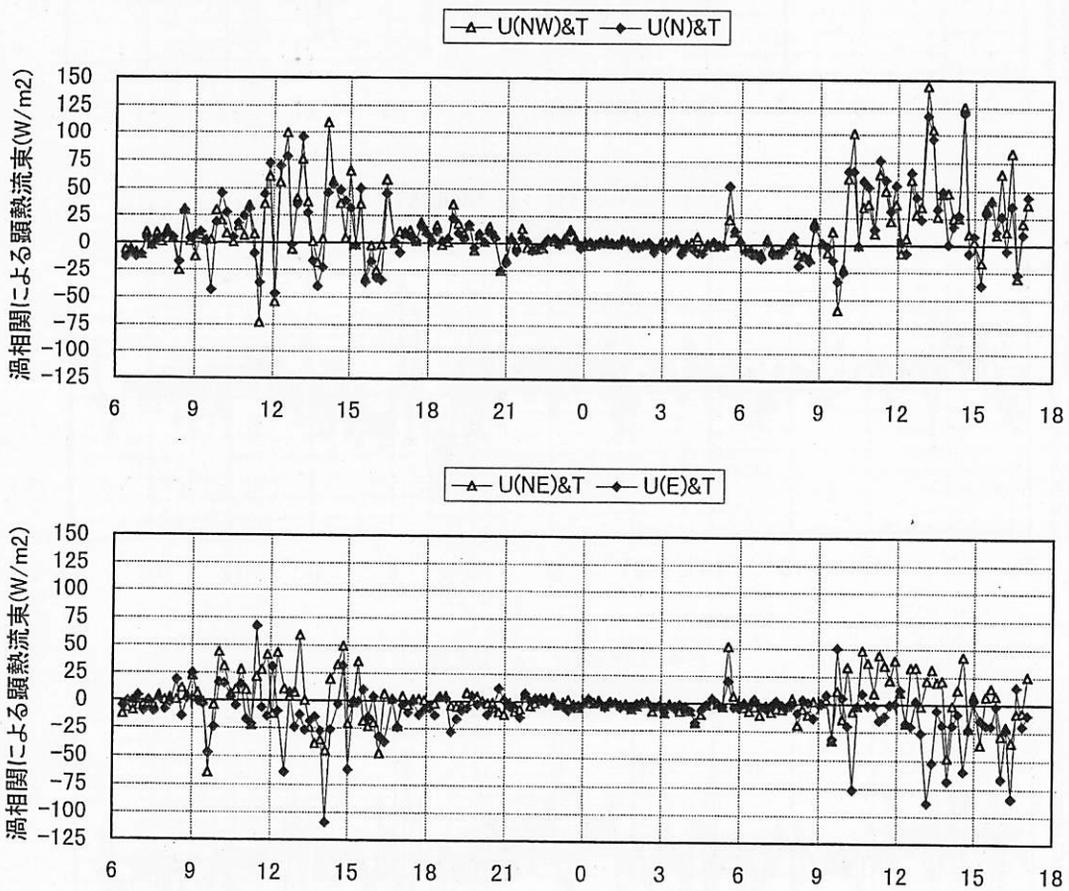


図-28. 渦相関による4種の風速成分の水平顕熱フラックス

第3章 年間を通しての長期観測

1. はじめに

前章においては、夏季集中観測の解析から緑地とその周辺域の詳細な気温分布等について考察した。しかしながら、エコロジカルプランニングという今日的な社会的要請に答えるためには、設計データとして年間を通しての把握と緑地の位置づけが不可欠である。これまで、緑地に関する研究は、暑熱緩和に注目した夏季についての検討がほとんどで、他の季節に関する考察はほとんど見当たらない。そこで、本章では先の集中観測を実施した中央公園を対象に、1年間の長期観測を実施した結果について報告する。

先の集中観測においては、緑地の中心部と縁辺部で気温差が生じていること、その温度差は風向によって左右されることが明らかになった。この点をふまえ、長期観測では緑地の内部に2点の測定点を設け、緑地の中心と縁辺部の気温差の年間変動を把握することとした。同時に、これらと気象要素との関連についても考察するため、公園内で風向・風速および日射量の観測を独自に行うこととした。対象とした公園は、広島气象台からそれほど遠くないところに位置するが、先の集中観測で風向の微妙な変動が気温分布に影響していることが伺えたこと、また公園の北側には高層の市営住宅団地が存在し局所的な風系が形成されている可能性があることから、あえて現場での気象要素の実測を行うこととした。

なお、ここでは対象緑地の内外の他、周辺市街地や繁華街、河岸や郊外にも観測点を設け、緑地の熱的効果が多角的・総合的に捉えられるように計画した。

2. 観測地と観測方法

図-29に、観測地点の位置を示す。各ポイントは、緑地の効果のほか、街路形態の影響、都市内における河川の熱的効果、ならびに都市内外気温差を把握するという観点から選定されており、各々の位置づけは以下の通りである。

GRC：緑地（広島中央公園・落葉広葉樹林）中心部

GRP：緑地（同上）縁辺部（周辺道路より約20m）

RIV：河川上地点（太田川工事事務所水位観測所）

RS1・RS2・RS3：河川からの距離が異なる河沿地）

EWM：広い東西街路（幅員約40m・路面電車電停）

NSM：広い南北街路（同上）

EWP：狭い東西街路（幅員約6m）

SUB：郊外地点

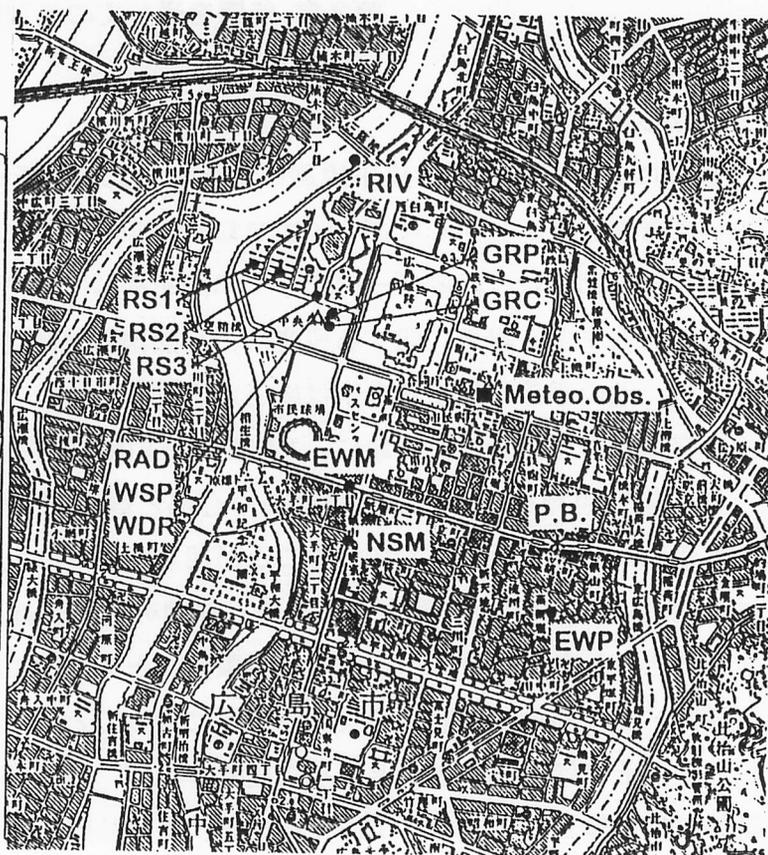
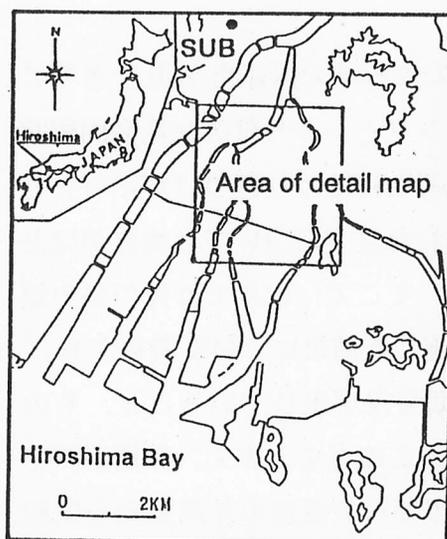
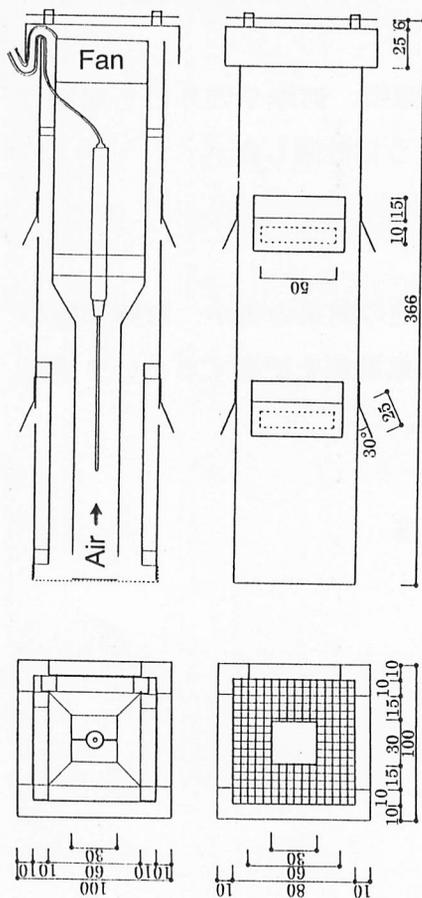


図-29. 長期観測の測定地点の位置



測定高さは地上約 4 m (RIV を除く)で、白金抵抗の温度センサは自作の日射遮蔽シェルタ (アルミ製) に入れ、GRC 以外は全て AC 電源を確保して通風を行った。

通風シェルタの概要を図-30 に示す。構造は、基本的に 2 重筒で、センサ部分にはさらにもう 1 枚のアルミ遮熱板を挿入してある。またセンサ部の内筒は、通風速度を確保するため断面積を $9/64$ (約 14%) に絞り込んでいいる。筒内に挿入した熱線風速計で確認したセンサ部の通風速度は 3.6m/s である。なお、外筒の外表面は白色塗装、内筒の内表面は黒色つや消し塗装、その他の向かい合う表面は地金の金属光沢面とした。底面には、地面からの放射を防ぐ内筒サイズの遮蔽板が設けられている。

図-30. 気温観測用通風シェルター

測定域は気象台(Meteo.Obs.)と比較的隣接しているが、日射(RAD)・風速(WSP)・風向(WDR)については、中央公園内(△)で独自に測定している。サンプリングは全ての要素について1分毎に行っている。温度センサは設置前に実験室で更正を行い、設置後は通風シェルタに装着した基準温度計により現地検定を実施した。データは、全天候型のデータロガー(コーナシステム社製:KADEC-US,UP)に収録し、約20日毎にノート・パソコンに回収した。各測定地点の状況を写真-12~22に示す。

3. センサの経時変化の検討

図-31は、日射計の経時変化を検討するため、実測された日積算日射量と気象台における日積算日射量を比較した結果である。相対誤差が大となる曇天日を除けば、実測値は6月頃まで僅かに出力が低下し、それ以後は安定している。

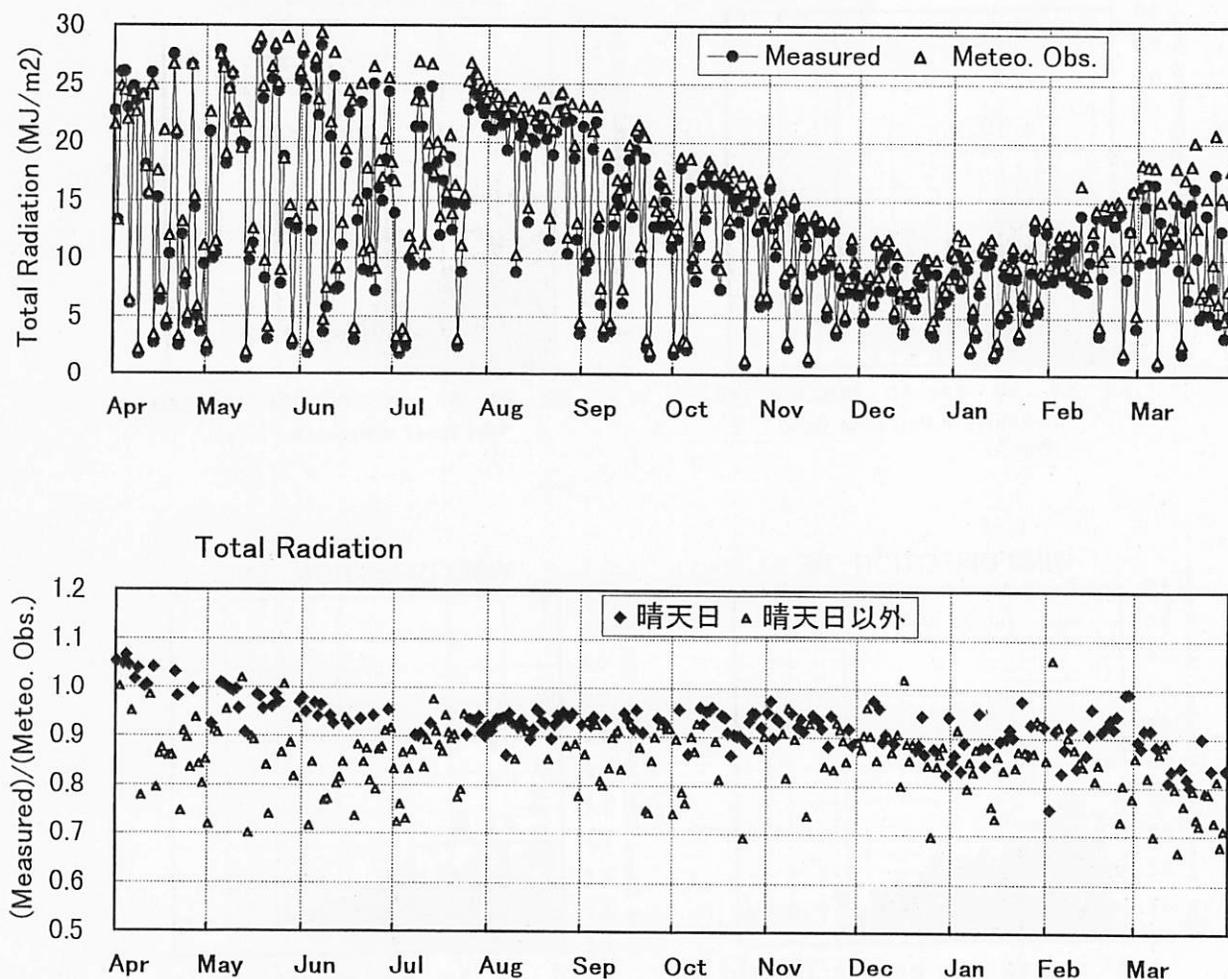


図-31. 日射計の経時変化の検討-気象台日射量との比較

風速計については設置前に風洞実験により更正しているが、日射量とは異なり風速は局所性が強いため設置後の検定はなかなか困難である。ここでは、まず風向別に観測風速と気象台風速とを比較した。両者の比較を行うため、1分毎の風速観測データのうち毎正時を含む前10個のデータを平均し、1時間毎の10分平均風速を算出した。風向は、この10個のデータのうち最大風速を示した時刻の風向を、その10分間の風向とみなした。なお、ここで記録されている1分毎の風向・風速データは、風速は1分間の風程から算出した1分間の平均風速、風向は1分毎の瞬時風向である。

図-32は、観測風速と気象台風速との風速比を気象台の風速に対してプロットしたもので、1時間毎1年間、計8784個のデータを16風向別に分けて示している。

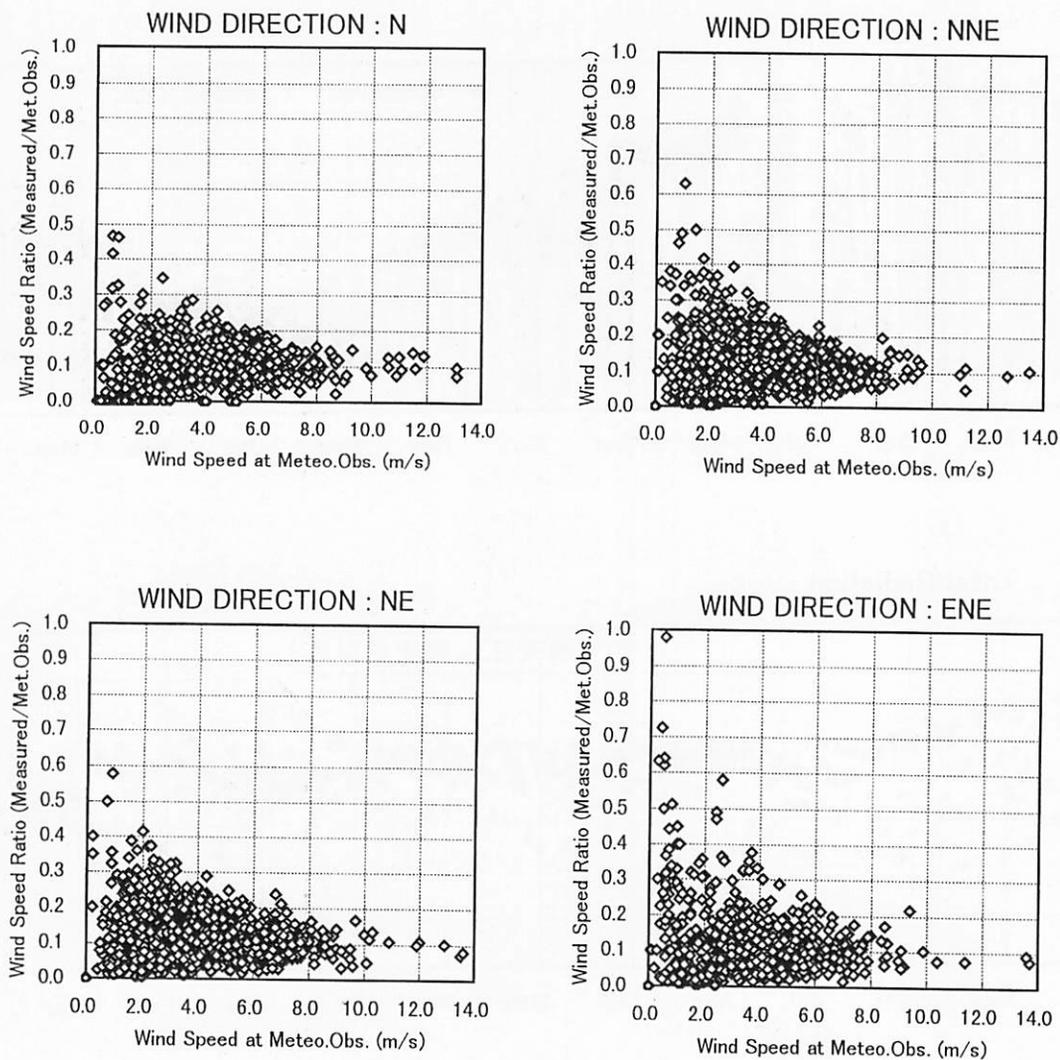


図-32. 風向別にみた観測風速と気象台風速の風速比

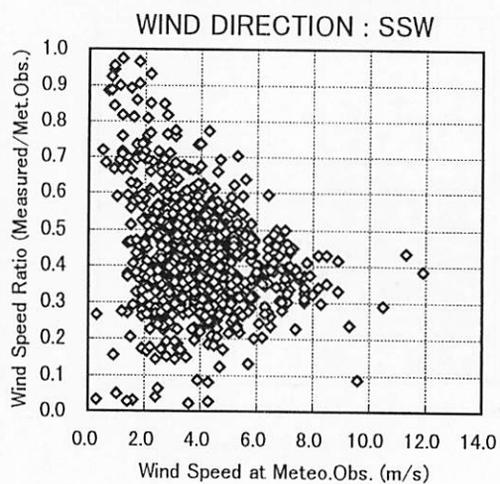
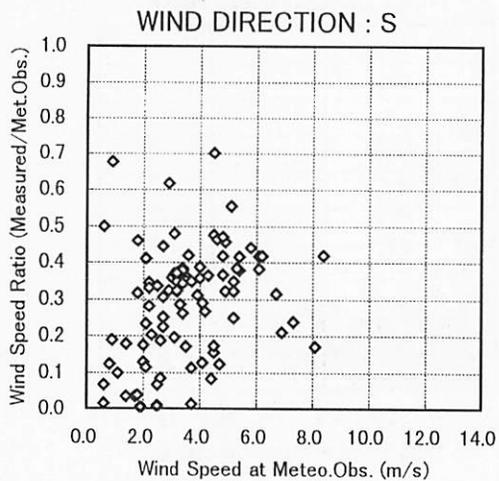
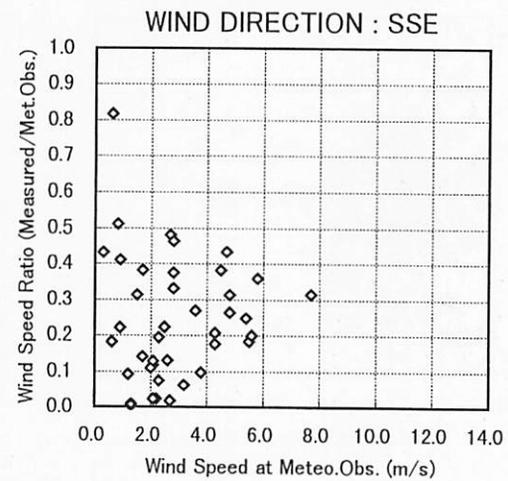
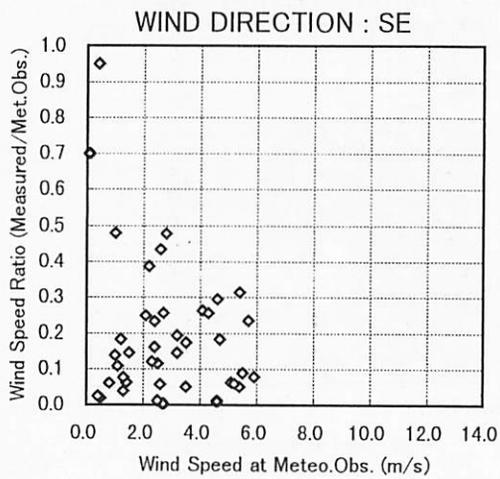
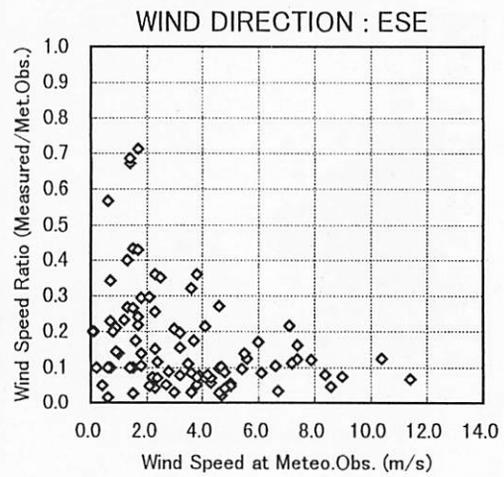
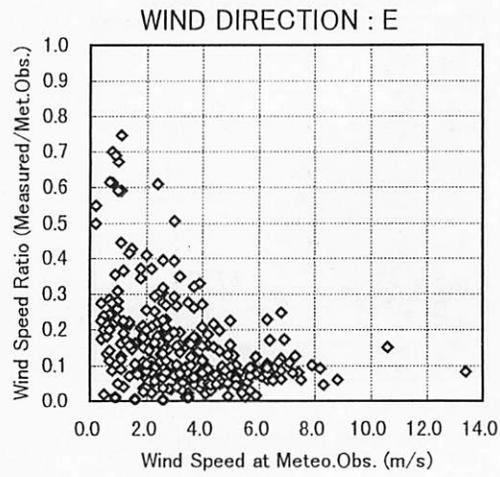


図-32. 風向別にみた観測風速と気象台風速の風速比 (つづき)

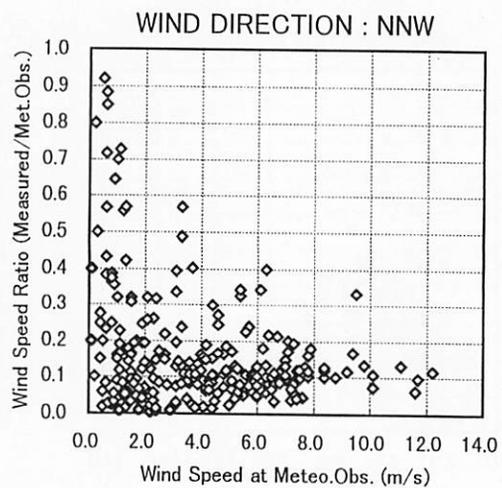
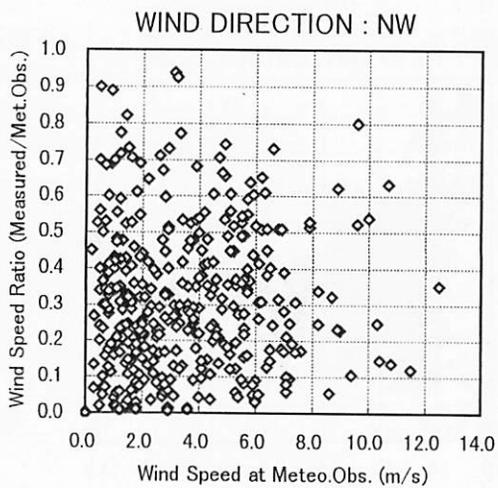
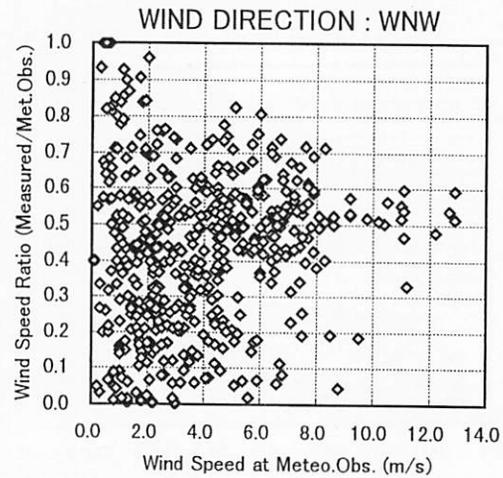
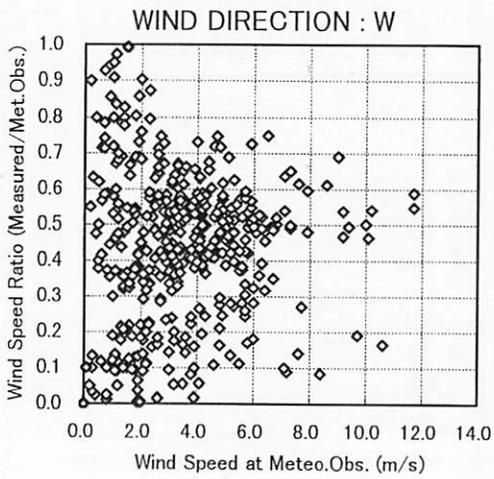
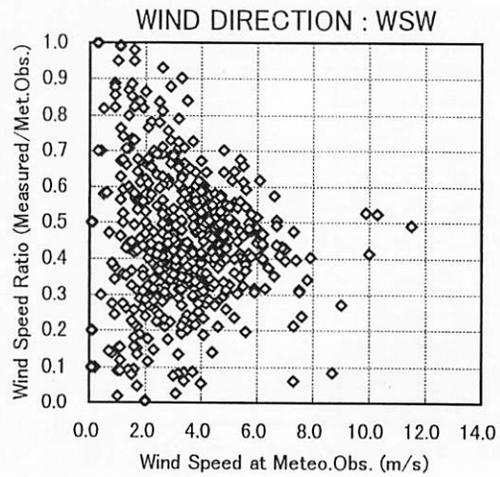
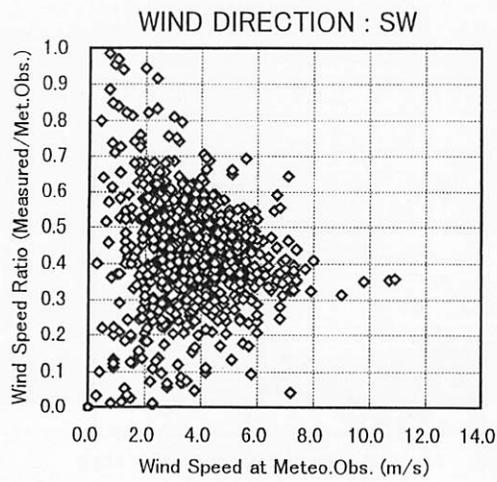


図-32. 風向別にみた観測風速と気象台風速の風速比 (つづき)

頻度(5m/s以上)

頻度(全体)

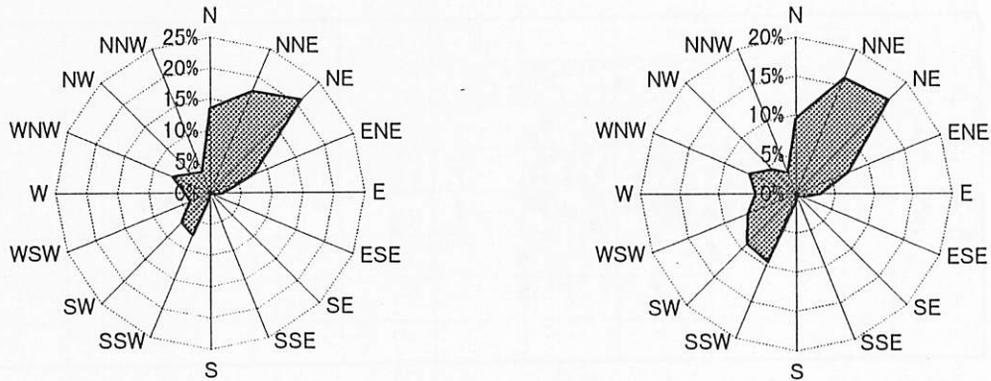


図-33. 観測地点の年間の風配図

図-33 には、観測地点の年間の風配図を、気象台風速が 5m/s 以上の場合と、全データを用いた場合について示した。観測地点は、集中観測で設けた側線に沿った北東風と南西風が予想通り卓越している。図-32 では、このようにプロットの数にも風向によるばらつきがあるが、風速比についても風向による差異が大きい。図-34 は、気象台風速が 5m/s 以上のデータについて各風向の風速比の平均値を算出し、風配図に表したものである。NNW~NE~E~SEについては風速比が 0.1 程度と小さく、反対にS~SW~W~WNWについては風速比が 0.35~0.48 と大きくなっている。これは、この方向に広いグラウンドが存在すること、逆にN~E 方向には樹林と高層住宅団地が存在するためであると考えられる。

風速比(5m/s以上)

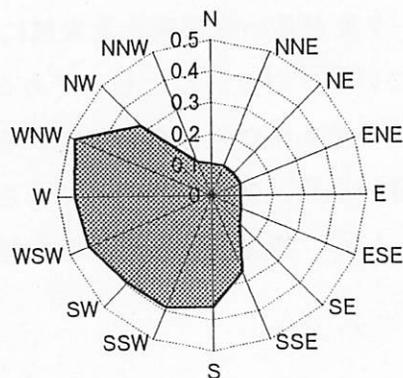


図-34. 観測風速と気象台風速との風速比の風配

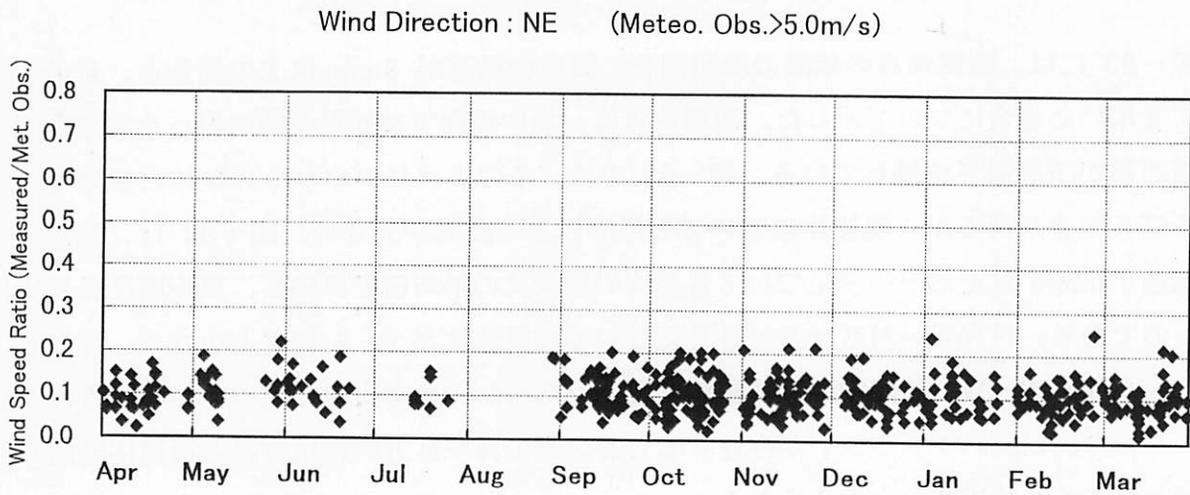
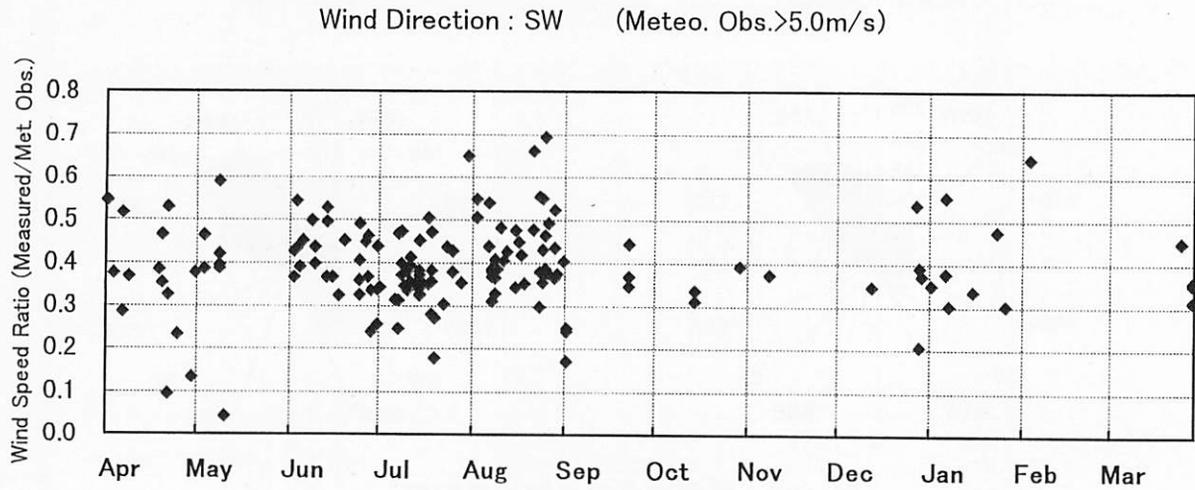


図-35. 風速計の経時変化の検討の一例

図-35 は、以上の考察をまえ、気象台の測定値をもとに風速計出力の経時変化を検討した一例である。これは、データ数が多い南西風と北東風について、気象台風速 5m/s 以上の場合の風速比を 1 年間についてプロットしたものである。南西風は、秋季～冬季にかけてデータが少なく、風速比の値もかなりばらついている。北東風はデータ数は多いが、風速比が 0.1 程度と小さいため、変動が相対的に小さくなっているように見える。日射の場合に比べ判断は難しいが、風速計出力の大きな経時変化はないものと思われる。

4. 日射量の年変化と天候区分

以下の考察で、天候による気温差の違いを検討するため、ここでは天候の区分を考える。天候区分の方法としては、日照率を用いるなど様々な手法が考えられるが、本研究では大気外日積算日射量を基準とした判定を行った。図-36 は、気象台の日積算日射量と大気外日射量の 50%のラインを示したもので、ここではこの値を基準に晴天日とそれ以外の日を区分した。50%という値に特に根拠はないが、1 年間でほぼ半数づつに区分される値として採用した。結果として、晴天日は 181 日、晴天日以外は 185 日となった。

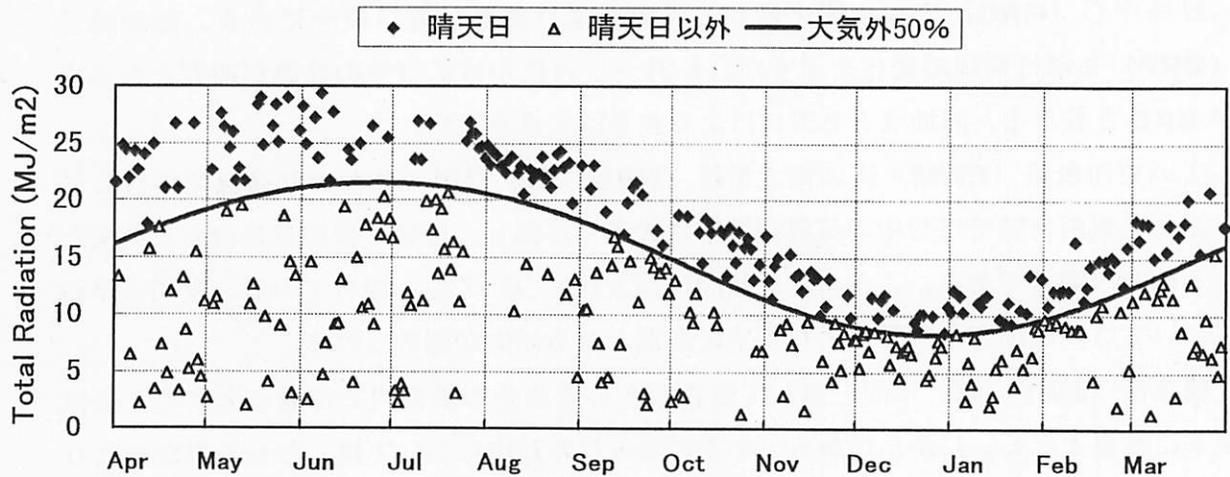


図-36. 大気外日積算日射量を用いた天候区分

図-37 は、参考までに、1 分毎の日射データから、日出と日没の時刻を自動的に推定した結果である。これは、 5 W/m^2 以下のデータが 6 個以上連続した場合を夜とみなし、日出時刻はその条件を満たす最後の時刻、日没時刻は逆にその条件を満たす最初の時刻として、自動抽出したものである。一部多少のばらつきが見られるが、ほぼ年間の両時刻の推移を表している。

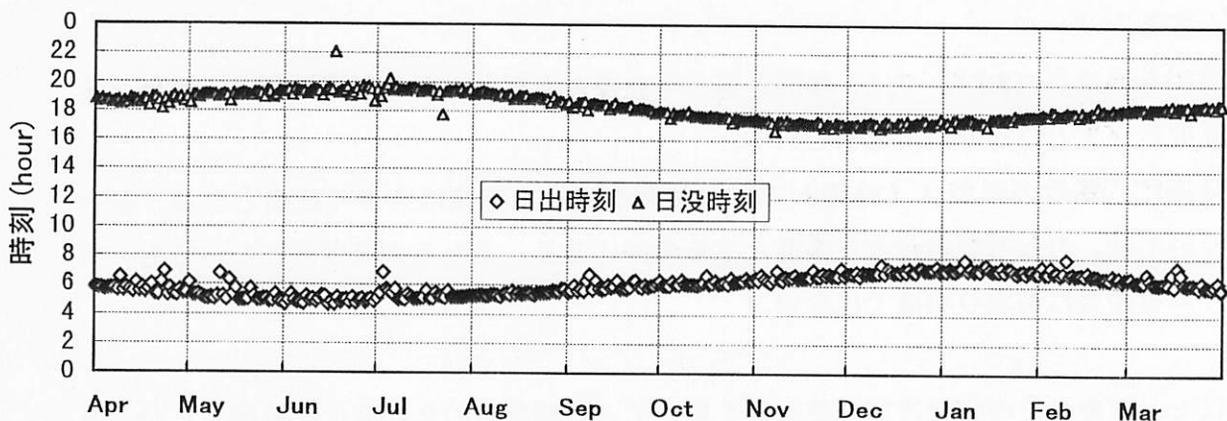


図-37. 日射データから自動推定した日出・日没時刻

ここでは、各観測地点の位置づけを明確にするため、気象台気温との温度差について考察する。各地点の観測データについて毎正時前後5分、10個のデータを平均し、気象台の1時間毎の気温データと比較した。天候については、上述の天候区分に従い晴天日とそれ以外に2分した。また、1日のうちの時間帯による差異を検討するため、日中（10:00～15:00）・夜間（19:00～24:00）・早朝（0:00～5:00）の各5時間の平均についてプロットした。結果を図-38に示す。なお、全ての地点で5月中旬から2週間程度の欠測があるが、これはデータロガーの電池切れによるもので、5月28日に全ての地点を外部電源化する工事を施して復活させた。

緑地中心（**GRC**）では年間を通して気象台より気温が低い傾向にある。緑地縁辺（**GRP**）もほぼ同様の变化を示すが、1月～3月にかけて日中の昇温が顕著となる点が**GRC**と異なる。両地点とも天候による差異は大きくない。

広い東西街路（**EWM**）広い南北街路（**NSM**）は、ほぼ気象台より高温で推移しているが、東西街路では日中の気温が夏季に大きく昇温し、逆に冬季は気象台より低温となる傾向が顕著である。このような傾向は晴天日についてのみ現れている。夜間と早朝については、両地点とも夏季より冬季に高温となる傾向が認められる。

繁華街（**EWP**）は、年間を通して気象台との温度差が都市内では最も大きく、特に夏季に高温となる。しかしながら、冬季の晴天日の日中については、むしろ気象台よりも低温となる傾向がみられる。夜間と早朝は、年間を通して高温で推移している。

河川からの距離が異なる河岸の地点（**RS1**）（**RS2**）（**RS3**）では、日中の気温が夏季は気象台より高く、冬季は逆に気象台より低くなる傾向にある。夜間・早朝の気温差は年間を通して小さい。ただし、**RS3**だけは日中の気温が9月以降急激に上昇している。これは、回収時に判明したことだが、通風シェルターの天井部分が押しつぶされ、ファンは回っていたが、ほとんど通気していなかった。日変化を詳細に検討すると、9月1日から急に隣接する地点との日中の温度差が大きくなっており、この日に破損が生じたものと思われる。従って**RS3**については、9月以降のデータは参考にとどめることとする。

河川上の地点（**RIV**）では、年間を通して昼夜とも気象台より低温である。特に冬季に温度差が大となる傾向が認められる。

最後に、郊外の観測点（**SUB**）では、年間を通して夜間に大きく低温となる。日中については、むしろ気象台より高温となる傾向にある。どちらの温度差についても、季節による差異はあまり明確ではない。

以上、気象台との時間帯別の気温差を用いて、各観測点の年間変化を概観したが、通風阻害を起こしていた**RS3**以外は、解析対象となりうるデータと判断される。

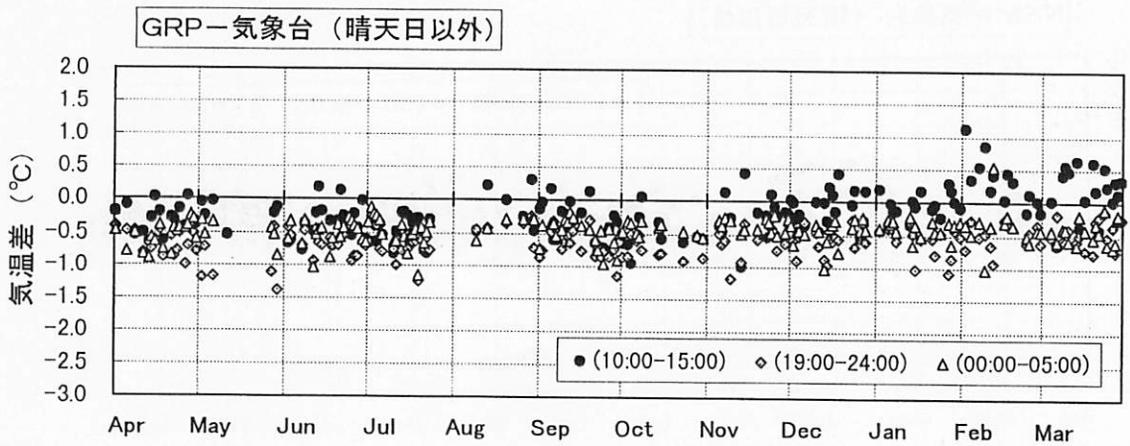
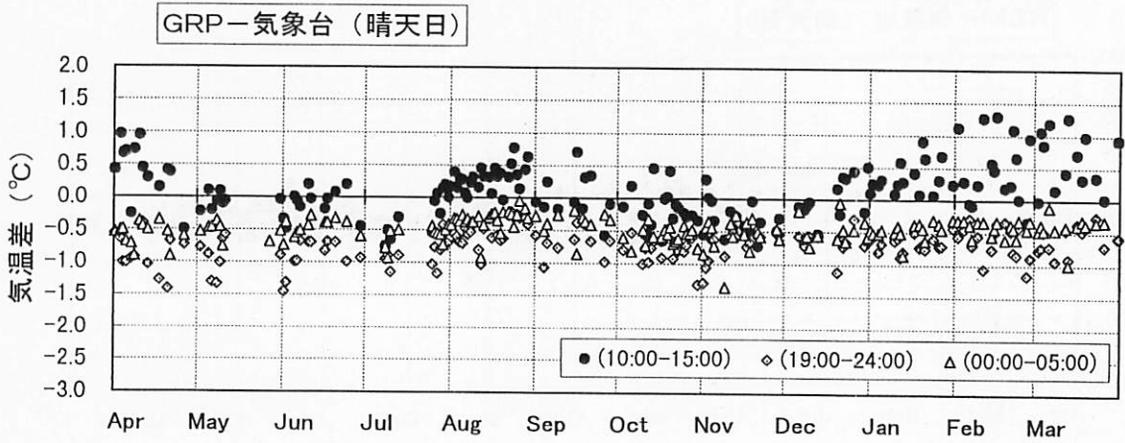
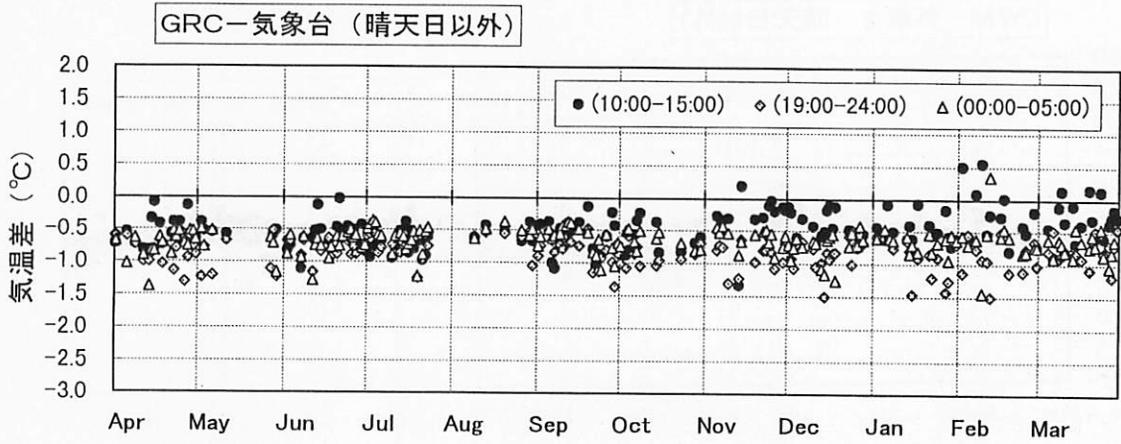
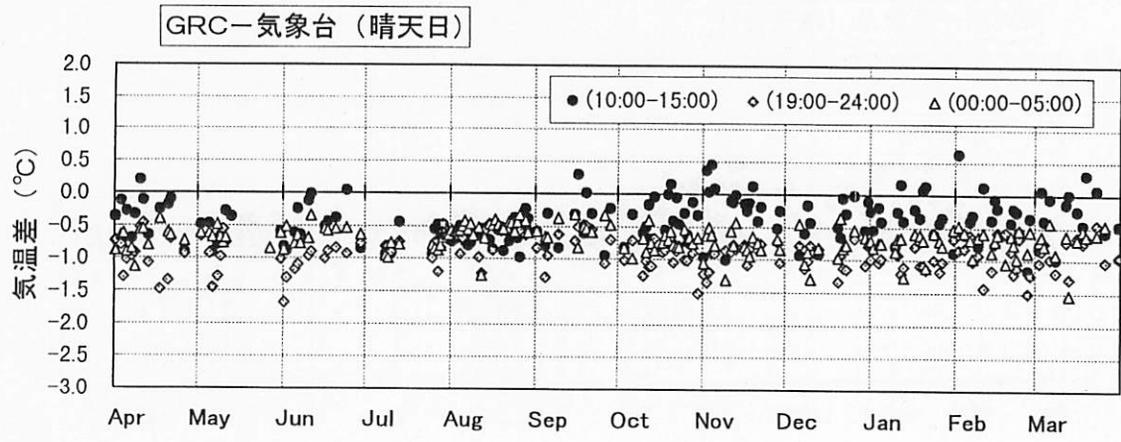


図-38. 時間帯別の各観測点と气象台との気温差

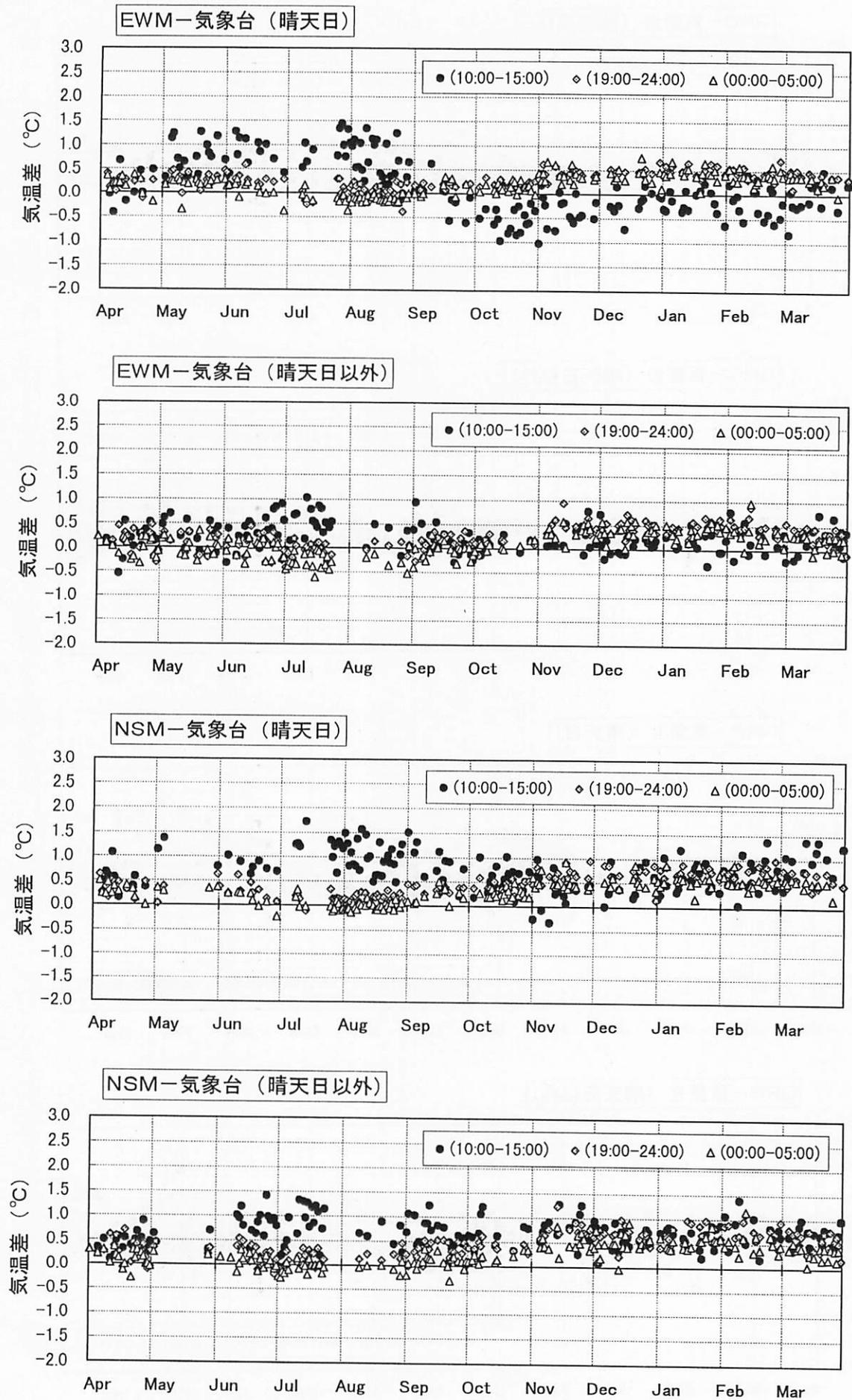


図-38. 時間帯別の各観測点と气象台との気温差 (つづき)

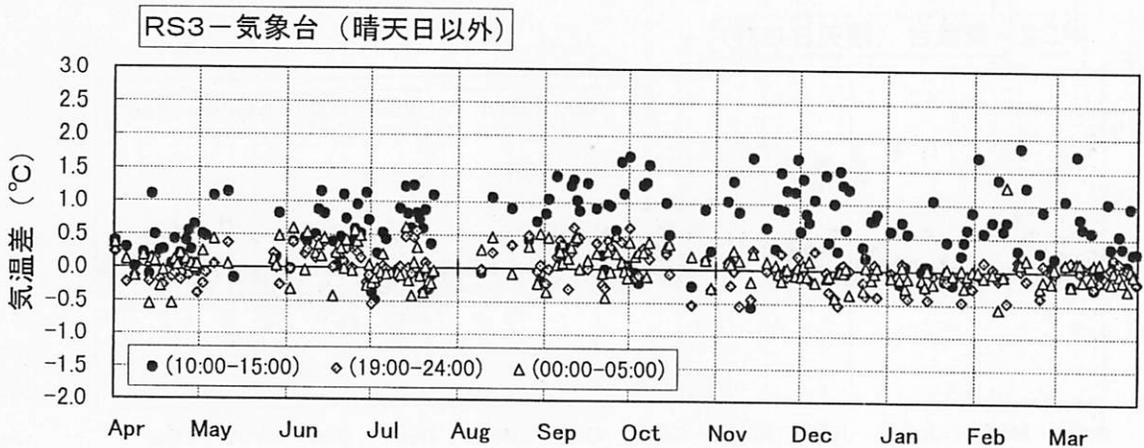
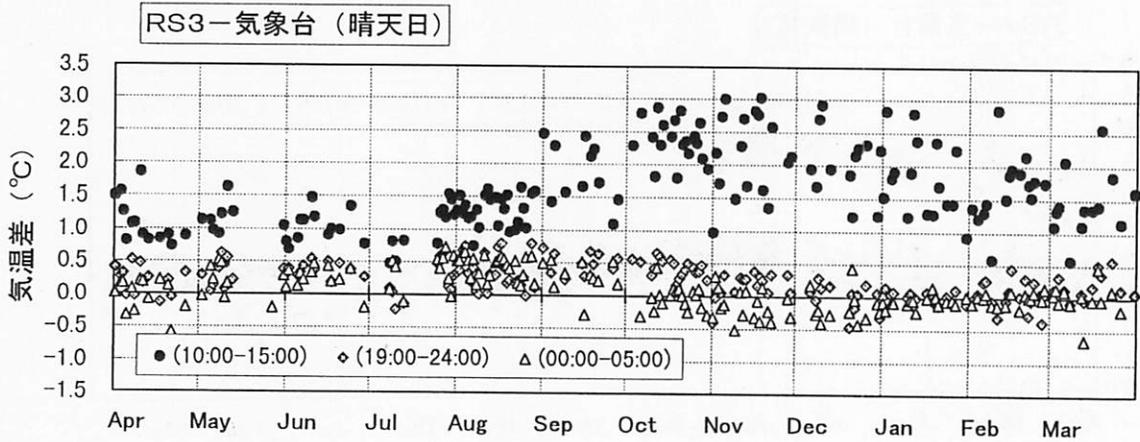
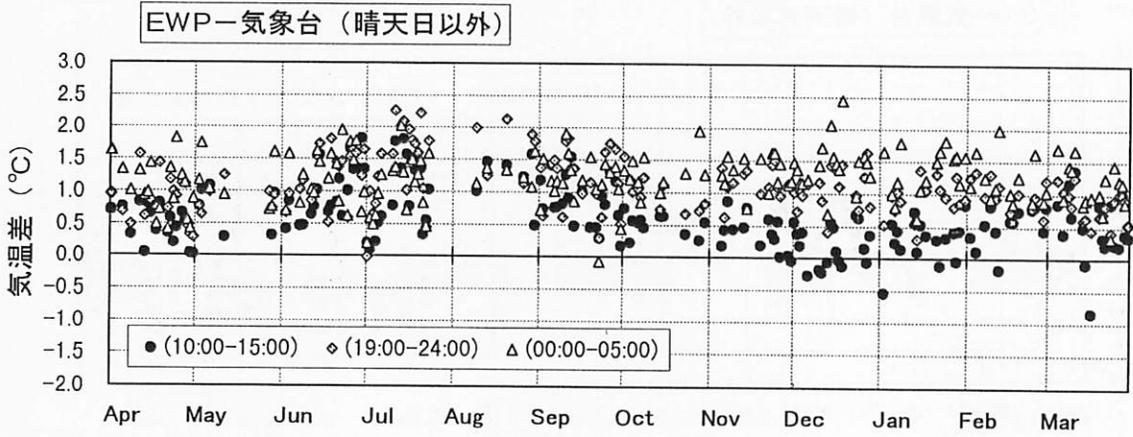
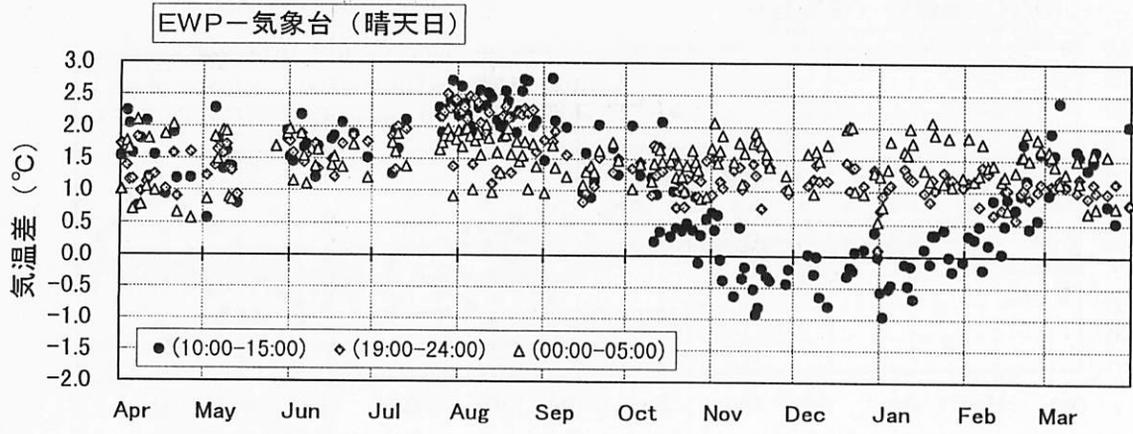


図-38. 時間帯別の各観測点と气象台との気温差 (つづき)

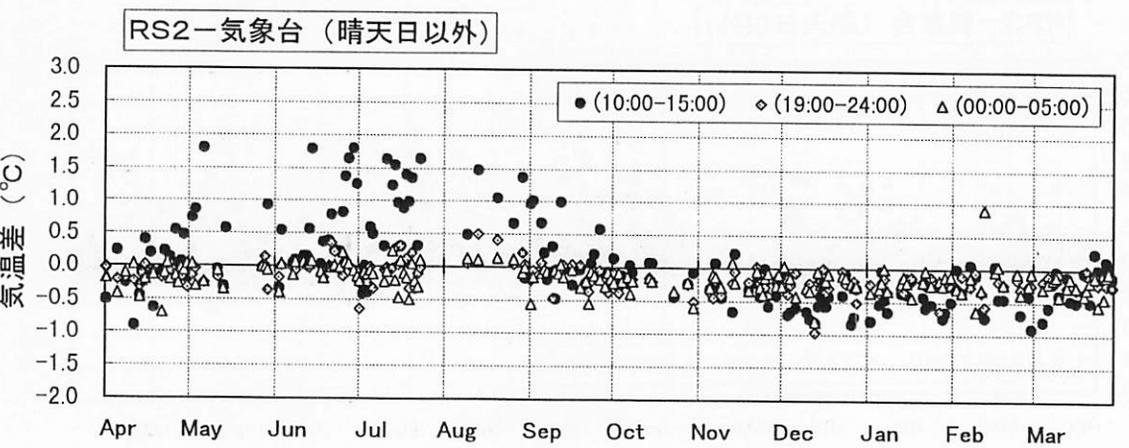
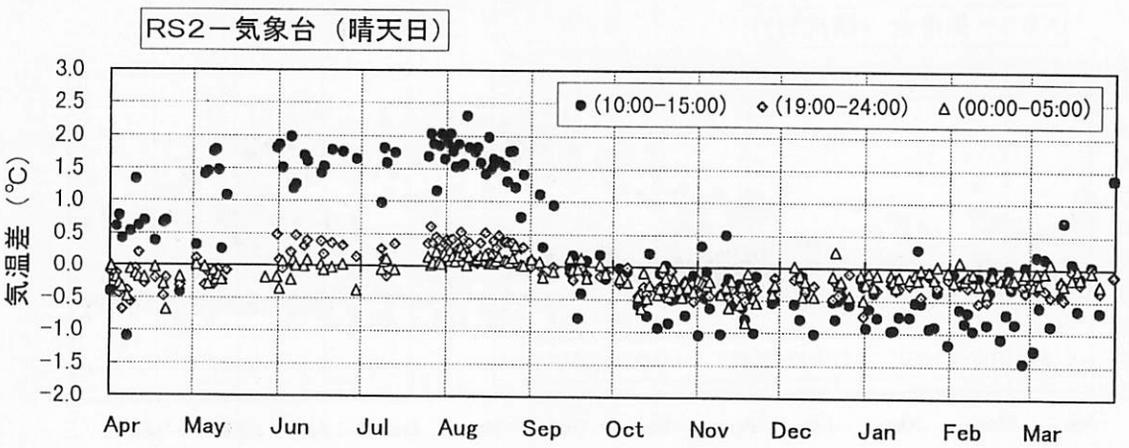
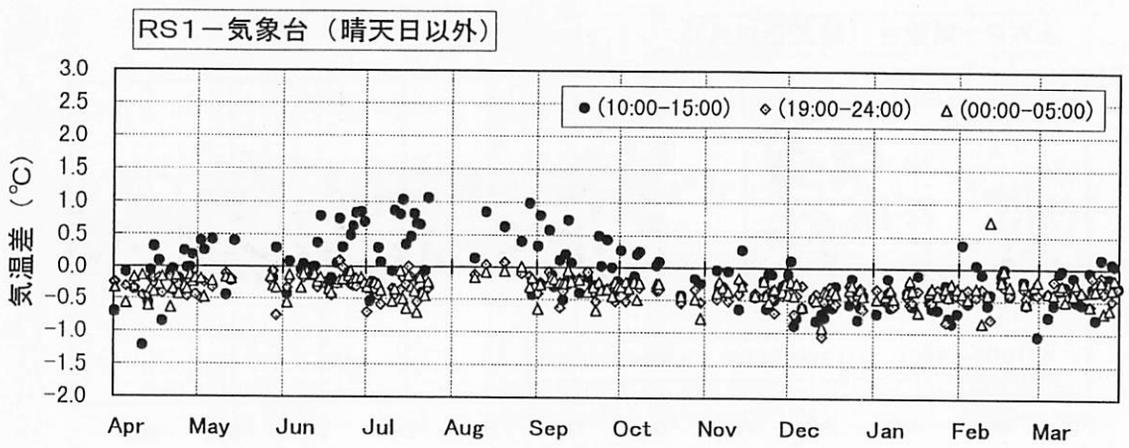
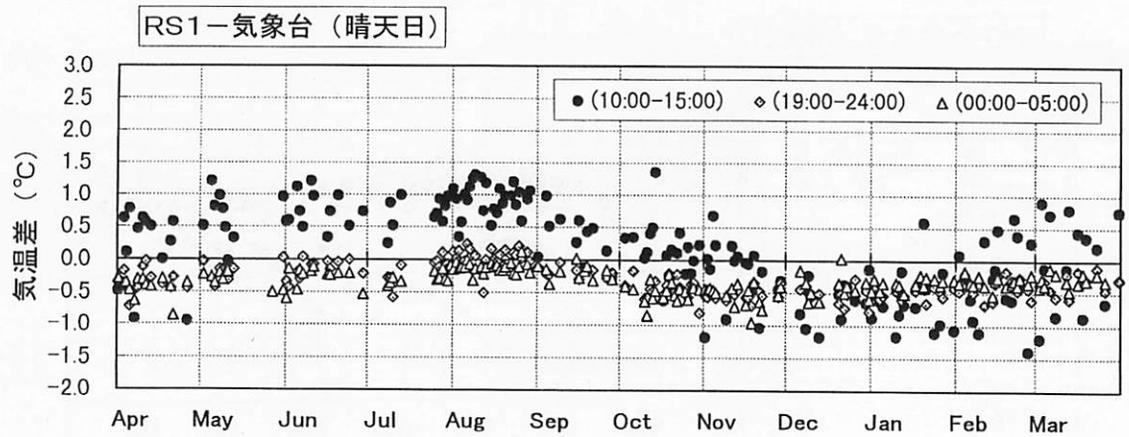


図-38. 時間帯別の各観測点と気象台との気温差 (つづき)

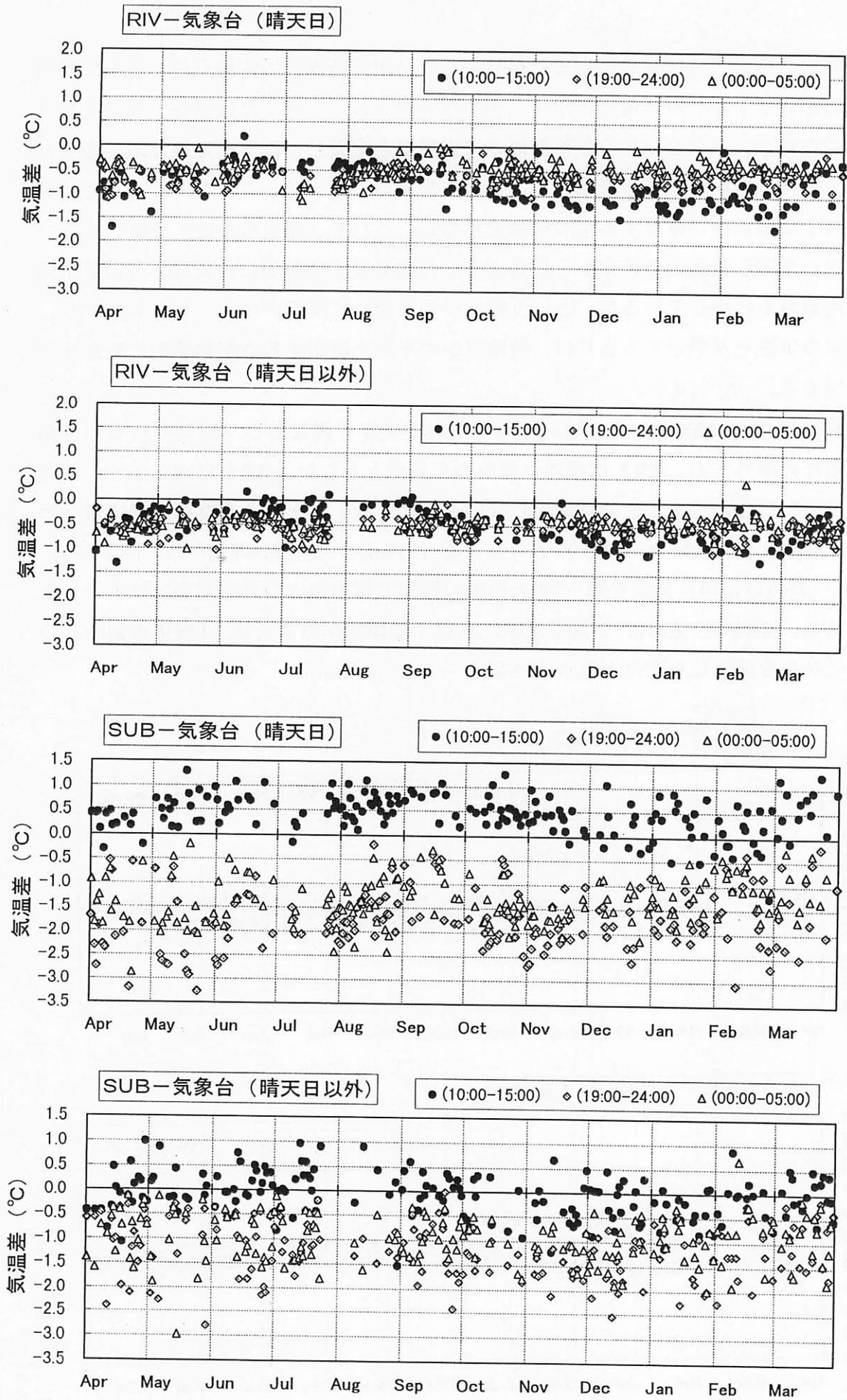


図-38. 時間帯別の各観測点と気象台との気温差 (つづき)

気象台と各地点との気温差からもわかるように、市街地内部の各地点は、各々特徴的な気温変化を示す。1時間毎ではなく、より短いタイムスケールで気温差の解析を行うため、ここでは、気象台に代わる市街地の代表気温を定義し、以下の考察で用いることとする。緑地や河川の影響を考察することが本観測の主眼であることから、これらの地点に隣接する市街地に位置する地点の値を平均し、これを「周辺市街地」気温とする。今回測定した限られた地点の中からこのような代表気温を求めることには、その値が真の市街地気温を代表しているか、という観点からは確かに問題がある。しかしながら、単独地点の気温を基準とするよりは、何地点かの平均を採用する方が物理的にも意味があるといえる。

繁華街の観測点（EWP）は、他の地点と気温が大きく異なるし、空間的にもやや距離があるため除外する。RS3は前述の理由から対象としない。RS1は河川からの距離が極端に近いことから、ここでは採用しないこととする。以上のような消去法で残った3地点、NSM・EWM・RS2の平均を「周辺市街地」気温と本研究では定義する。図-39、「周辺市街地」気温を図-38と同様の操作で気象台との気温差をプロットしたものである。RS2とEWMが夏季日中に昇温する傾向があるため、「周辺市街地」の変化もそれらを反映した変化となっている。

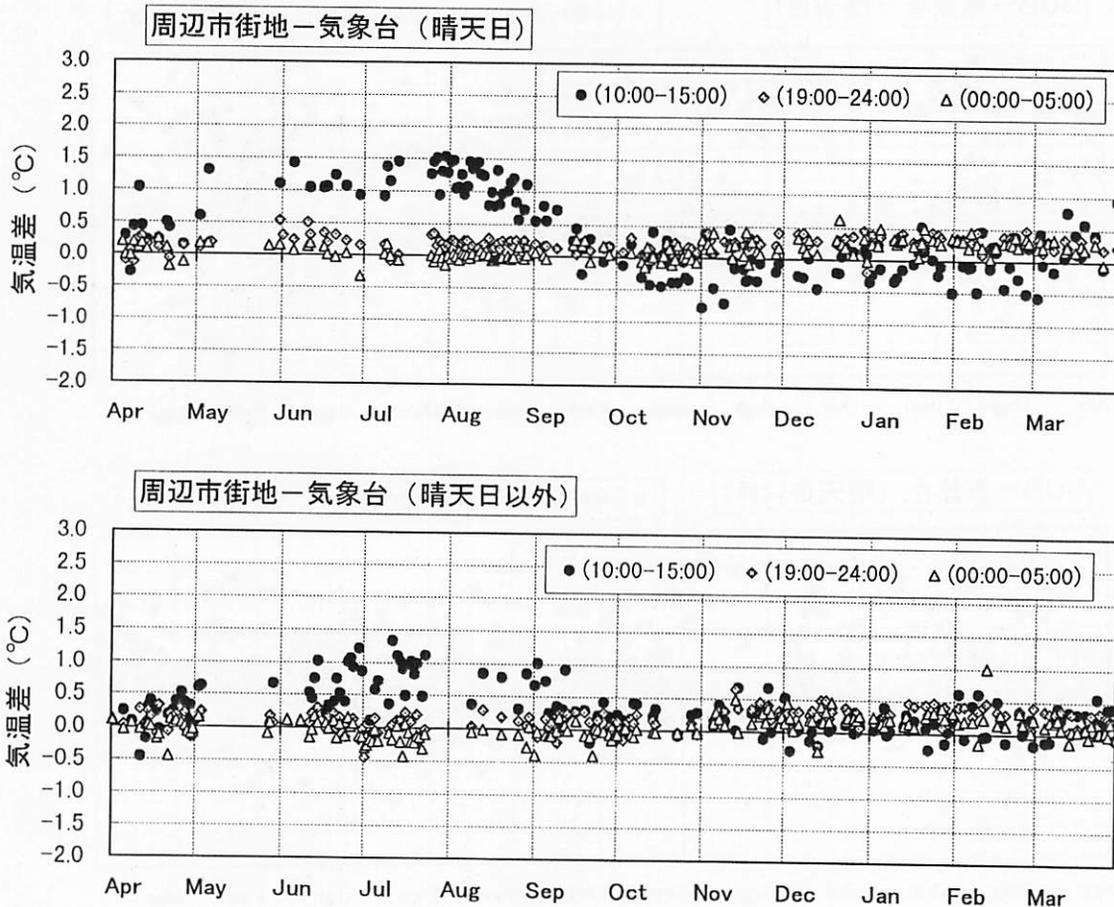


図-39. 時間帯別の周辺市街地(平均)と気象台との気温差

6. 繁華街と市街地平均気温との差

図-40 に、日中と夜間における繁華街（EWP）と周辺市街地との気温差を天候別に示す。繁華街は、周辺市街地と比較しても各5時間平均で2℃以上高温となっている。全体として、日中よりも夜間の方が昇温量が大である。冬季の日中に関しては、周辺市街地よりもむしろ低温となる傾向が見られる。このような、日中の気温差にみられる季節変化は、特に晴天日に顕著である。夜間は年間を通して周辺市街地よりも高温で、夏季に温度差が大きくなる傾向が認められる。

EWP は、写真-15 に示すように、飲食店が立ち並ぶ路地で、自動車の交通量は少ないが、各店舗からの空調排熱は各戸単位で直接個別の室外機から街路空間に放熱されている。また、厨房からの排気も何箇所か対象街路内に確認できる。これらの店舗は、日中はほとんど閉店しており、夕方から深夜にかけての営業が多い。特に夜間に周辺市街地よりも高温となるのは、これら店舗からの人工排熱の影響が大きいと考えられる。そこで、大半の店舗が休業する祝祭日の夜とそれ以外の平日の夜の気温差を比較してみた（図-41）。ここでは、夜間と早朝の時間帯について示したが、ここでいう祝祭日の早朝とは、祝祭日の翌日の早朝を意味している。周辺市街地との気温差は、祝祭日には明らかに小さくなる傾向が見られ、人工排熱が繁華街の熱環境形成に大きく寄与していることが示唆される。

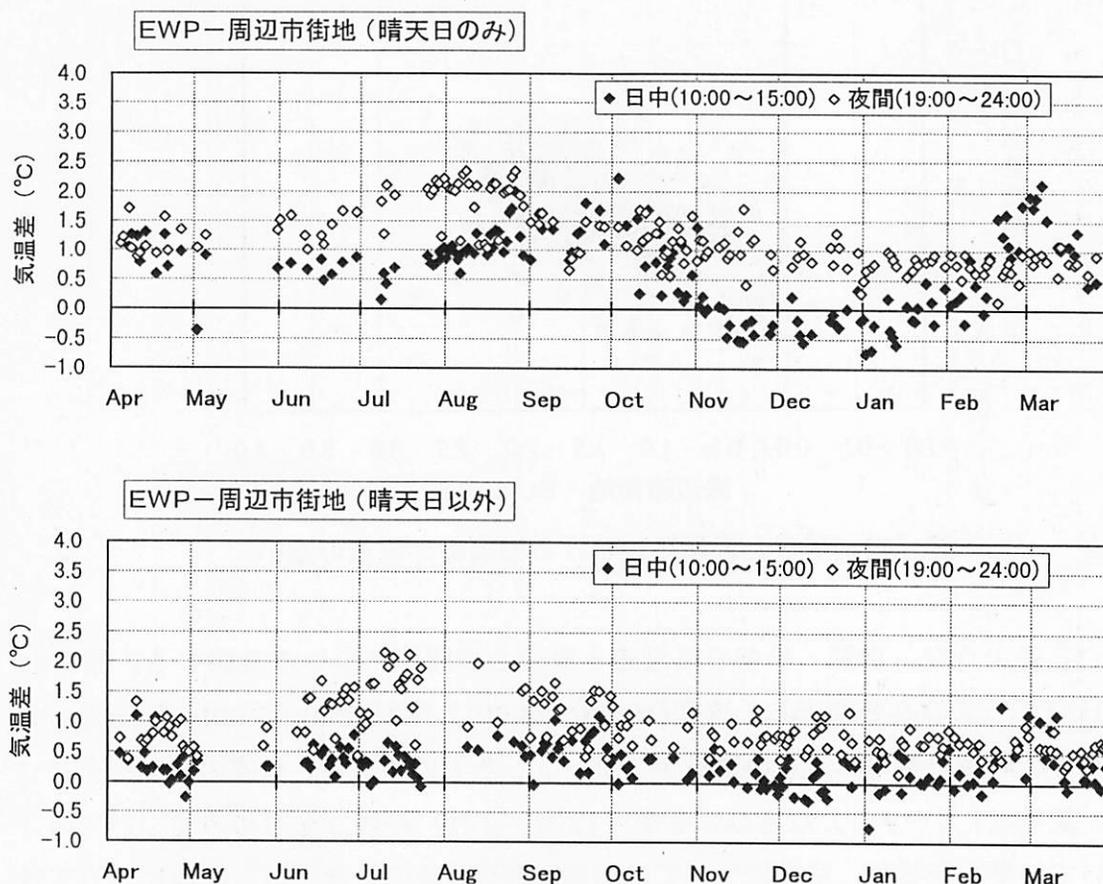


図-40. 繁華街（EWP）と周辺市街地との気温差年変化

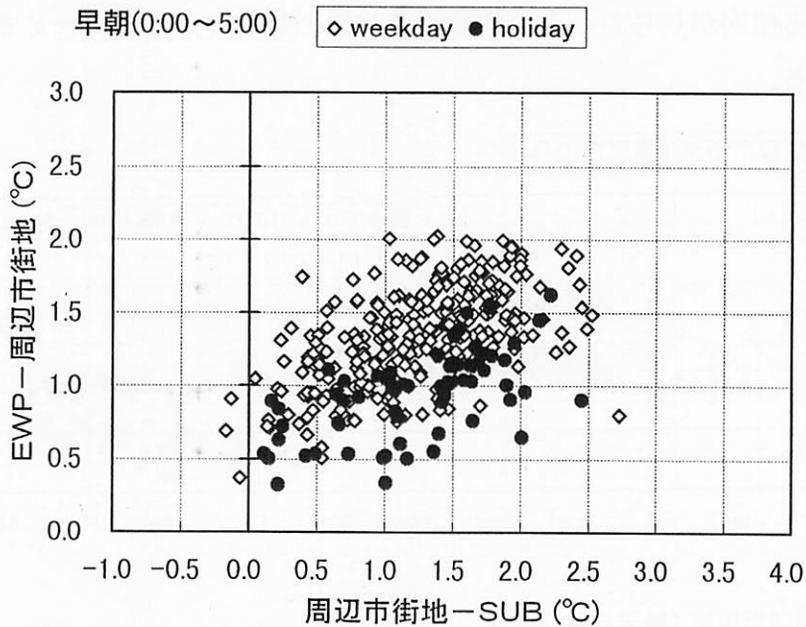
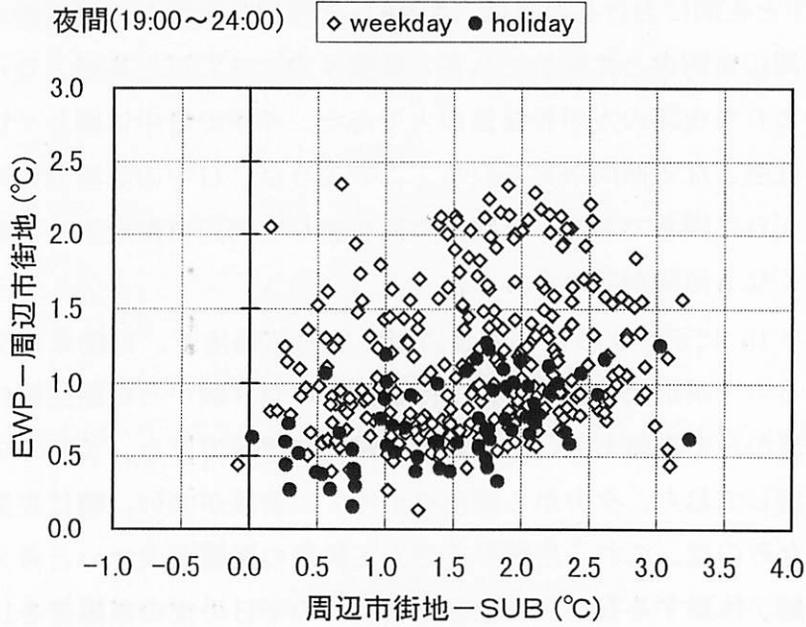


図-41. 平日と祝祭日における繁華街昇温量の違い

次に、このような、夜間・早朝の気温差と風速との関係について考察する。図-42は、平日のデータのみを抽出し、夜間(19:00~24:00)と早朝(0:00~5:00)の時間帯の気温差とその時間帯の平均風速との関係をプロットしたものである。年間の全データについてと、夏季(7月~9月)ならびに冬季(12月~2月)の各3ヶ月のみについての3つについて結果を示した。早朝については明確な関係はみられないが、夜間については夏季に限って弱風時よりも強風時に気温差が大きくなる傾向がある。

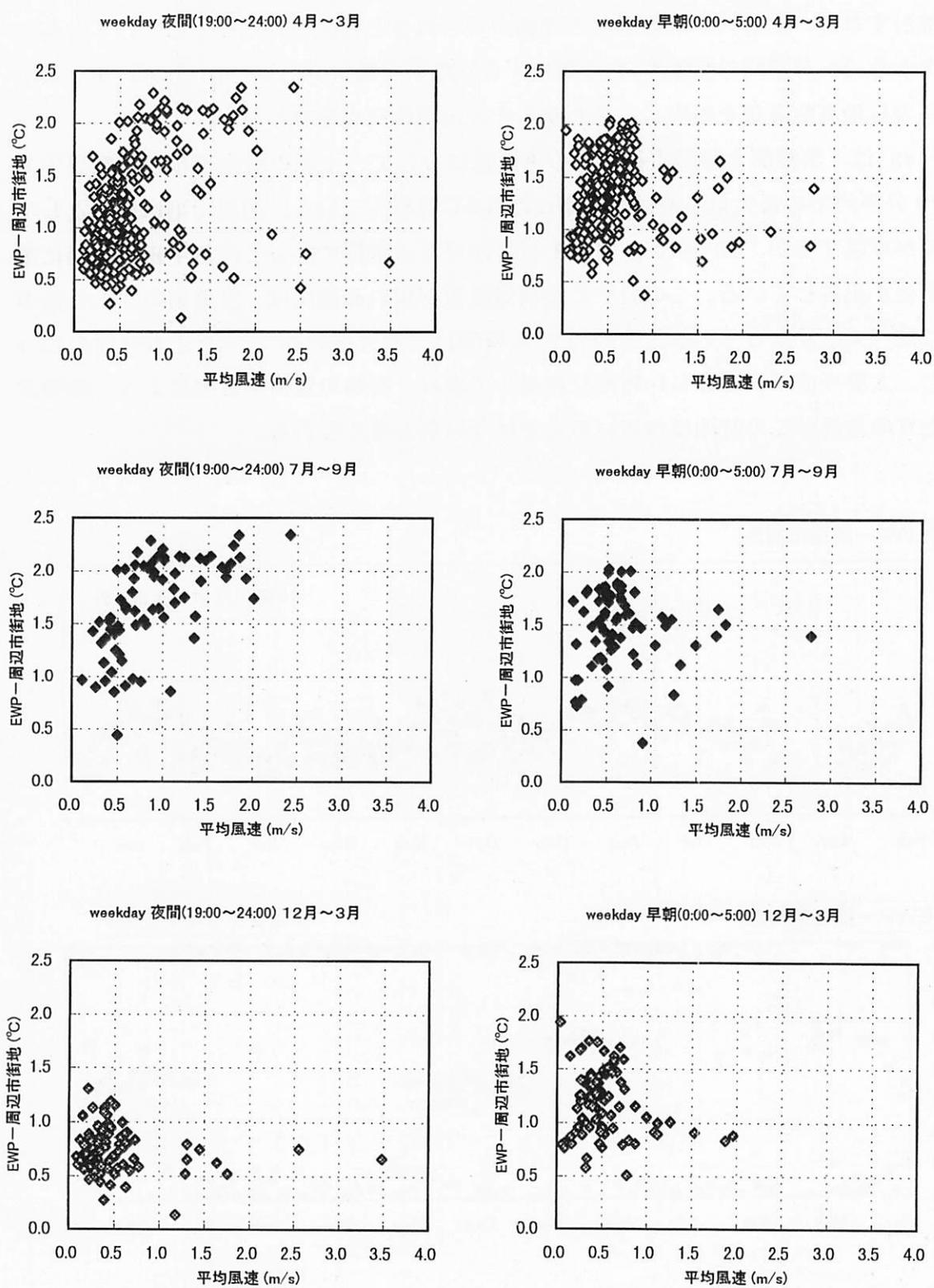


図-42. 繁華街の昇温量と風速との関係

ここまでは、年間変動を概観する意味で、日中・夜間・早朝の3つに時間帯について、それぞれ5時間平均の気温差を考察してきた。しかしながら、もっと短い平均時間について検討すれば、より大きな気温差と変動が現われると考えられる。そこで、1分毎のデータから10分平均の気温を1分毎にずらしながら順次算出し、10分平均値としての毎日の日最高気温差を抽出し、あわせてその出現時刻を考察した。

図-43は、繁華街と周辺市街地との気温差について、上記の操作を行った結果である。10分平均での最大気温差は、夏季には3.5℃を超えている。出現時刻は全体としては深夜が卓越するが、10月と2月～3月にかけての時期に限って、日中正午前後に最高気温差が出現している。この日中に最高気温差が現れる期間は、日最高気温差も他の時期に比べ大きくなっている。この2つの時期は、秋分後の約1ヶ月と春分前の約1ヶ月と、太陽高度がほぼ等しい時期に相当しており、街路の幾何学形態による一時的な日当たりの差異がこの時期現れているのではないかと考えられる。

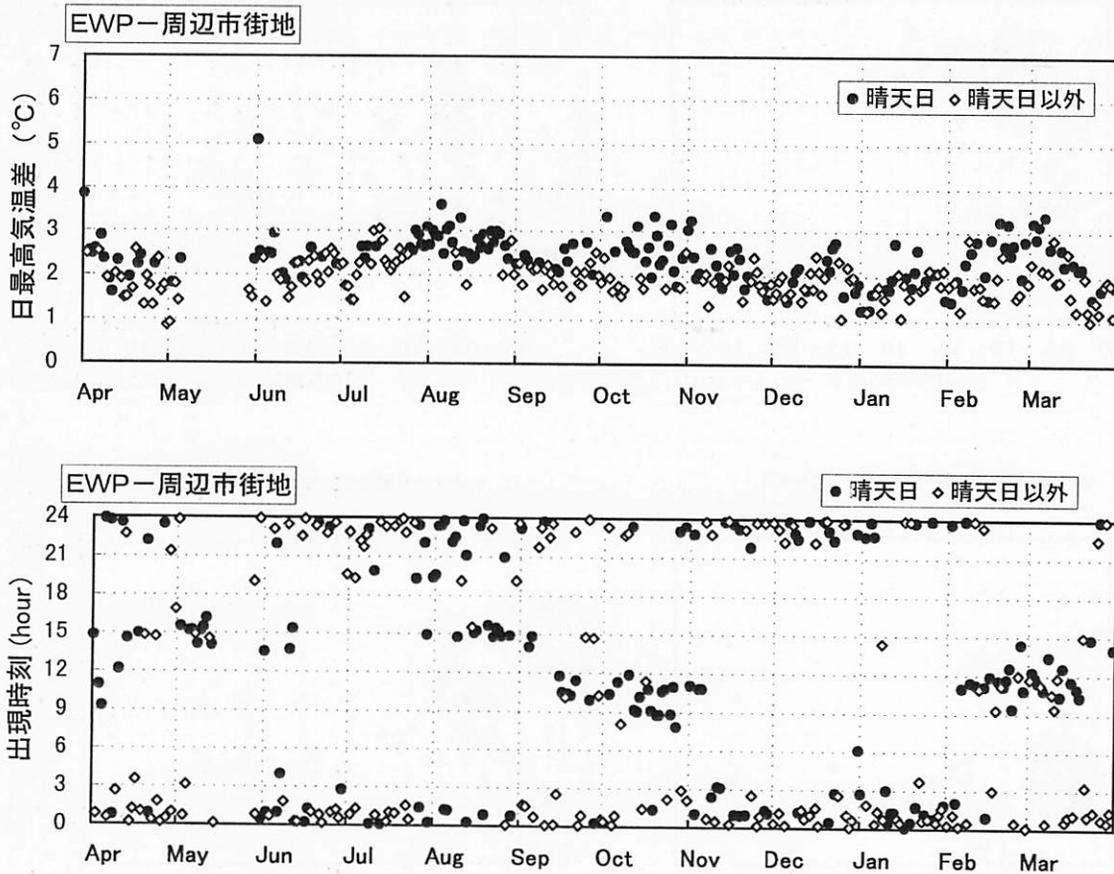


図-43. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化（繁華街-周辺市街地）

7. 都市内緑地の熱的効果

ここでは、本研究の主眼である緑地の環境調節効果の年間変化について考察する。まず図-44に緑地中心（**GRC**）と周辺市街地ならびに繁華街（**EWP**）との気温差年変化を日中と夜間について天候別に示す。**EWP**との気温差は夏季3.5℃以上に達している。周辺市街地との気温差では2℃程度である。日中の気温差は10月頃から減少し、11月にはほぼ消滅する。冬季の間については、日中の気温差は認められない。対象とした緑地はケヤキを中心とした落葉樹が優先するため、11月にはほとんど葉を落とし、緑がない状態となる。日中の気温差の季節変化は、このような落葉樹の変化に明確に対応している。一方、夜間についてはそのような大きな季節変化は見られず、年間を通して**EWP**からは2～3℃、周辺市街地に対しては1～1.5℃程度低温となっている。

図-45は、緑地内部にもう1点設けた緑地縁辺（**GRP**）と周辺市街地との気温差を、先の**GRC**の気温差と比較したものである。**GRP**の変化も**GRC**とほぼ平行しているが、気温差は**GRC**よりも小さく、全体として**GRC**と周辺市街地の中間的な気温を示している。**GRP**の日中の気温差が減少し始める時期は、**GRC**に比べるとやや早い。さらに冬季に日中の気温が周辺市街地よりも高温となる傾向がみられる点が**GRC**とは異なる。夜間については、両地点間の気温差はあまり明確ではない。なお、**GRC**は位置的には先の夏季集中観測の林内基準点（ポイントE）に近く、また**GRP**はポイントHとポイントIの中間にほぼ相当する。

図-46は緑地内の位置による気温差を検討するため、**GRP**と**GRC**の気温差を日中と夜間について示したものである。日中の気温差は8月に大きくなり、秋季は一旦小さくなるが、冬季に再び増大する。夜間の気温差はおおむね小さい値で年間推移しているが、夏季よりも冬季にやや大きくなる傾向が認められる。

図-47は、以上のような日中の緑地内気温差と風速との関係を、夏季と冬季について示したものである。夏季については、風速が増加するほど気温差が大きくなる傾向が明確に現れている。一方、冬季については傾向にばらつきがある。夏季日中の風向は南西でほぼ安定しているが、冬季については南よりの風（南西～西南西）の場合と北よりの風（西北西～北西）の場合があり、風向で分類するときれいに関係が分離する。北よりの風の場合には、風が強まっても緑地内の気温差がそれほど大きくなるしない。

図-48, 49には、緑地中心（**GRC**）と周辺市街地および繁華街（**EWP**）との気温差と風速の関係を日中と夜間について各々示した。年間を通しての場合、夏季3ヶ月のみの場合、冬季3ヶ月のみの場合、の3種類について示したが、日中については季節を通して風速が強くなるほど温度差が大きくなる傾向が明白である。一方、夜間については**EWP**との気温差には明確な傾向が認められないが、周辺市街地との気温差に関しては、風が強くなるほど気温差が小さくなる傾向が明らかである。

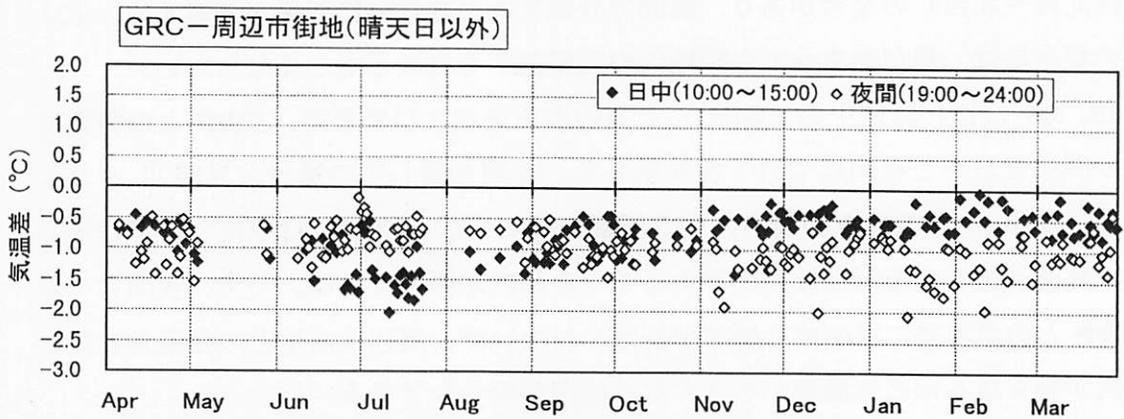
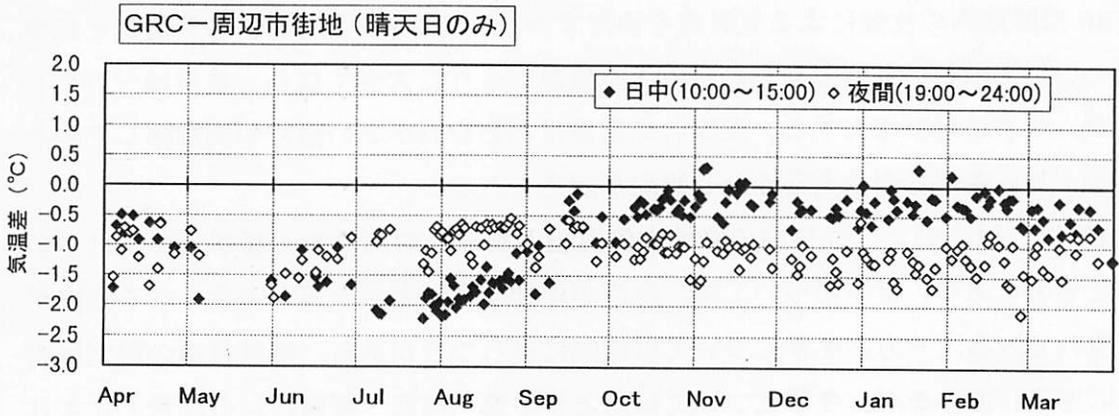
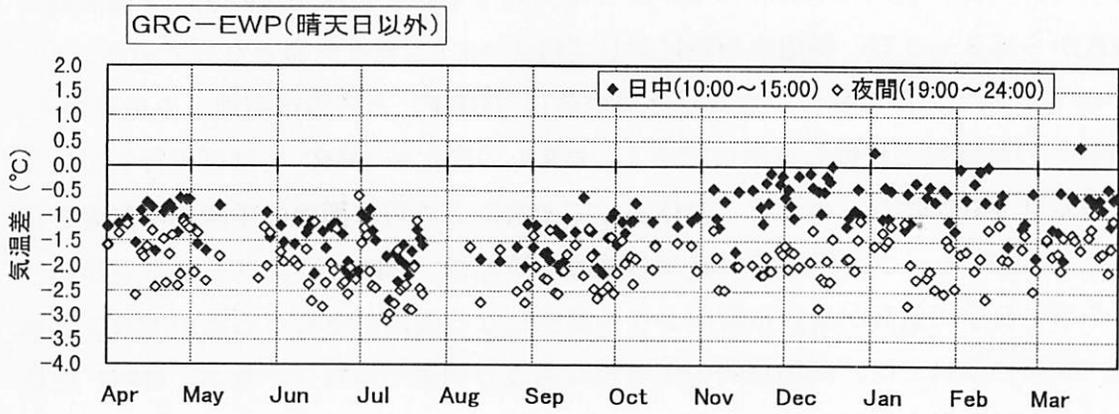
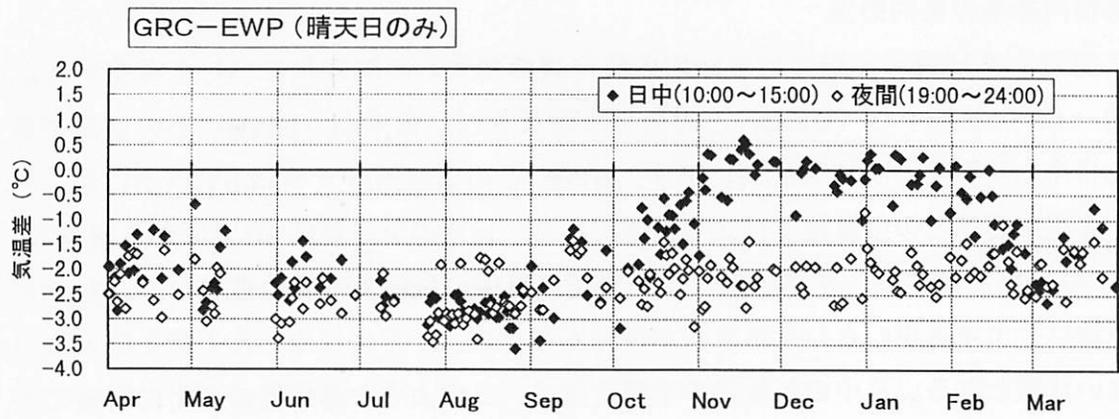


図-44. 緑地中心 (GRC) と周辺市街地ならびに繁華街 (EWP) との気温差年変化

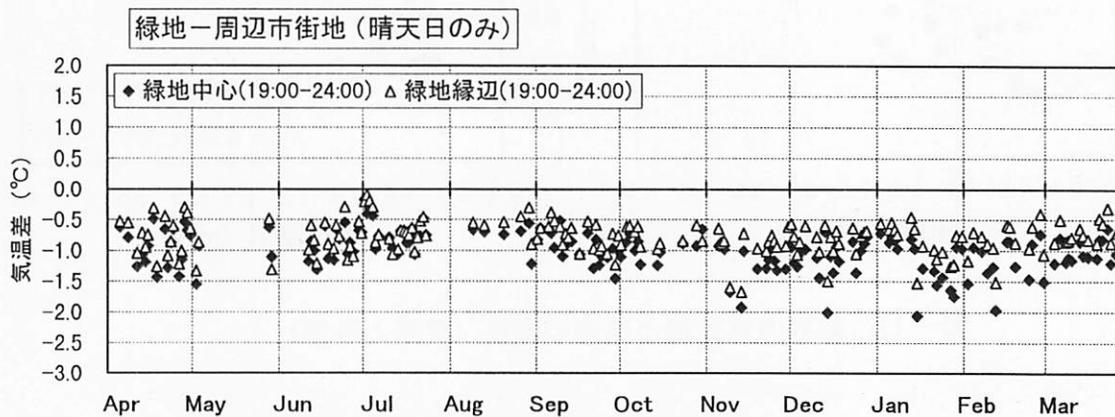
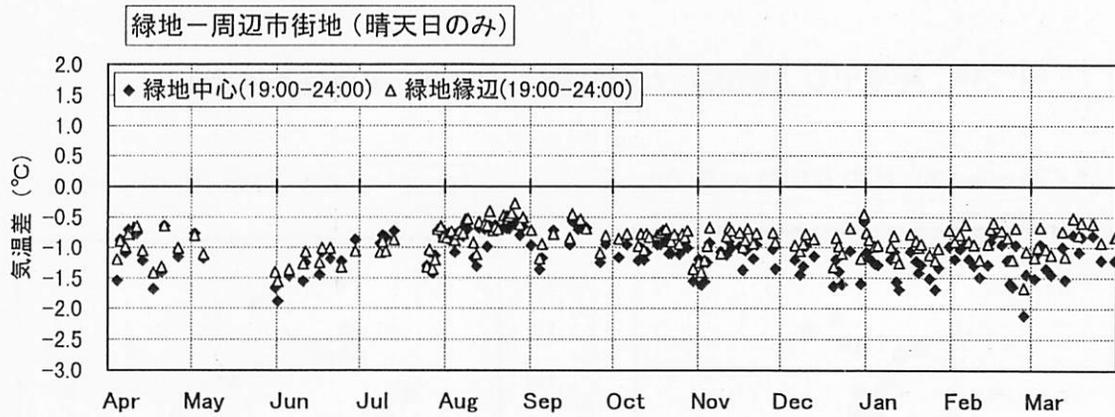
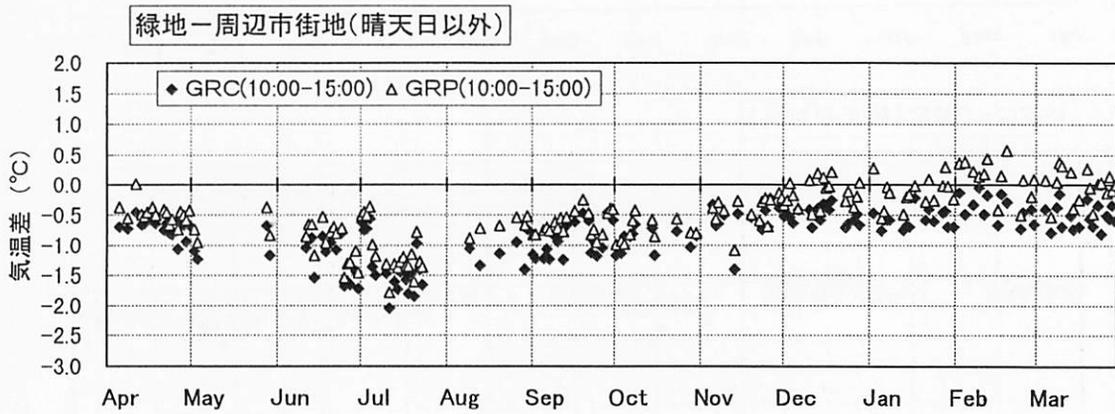
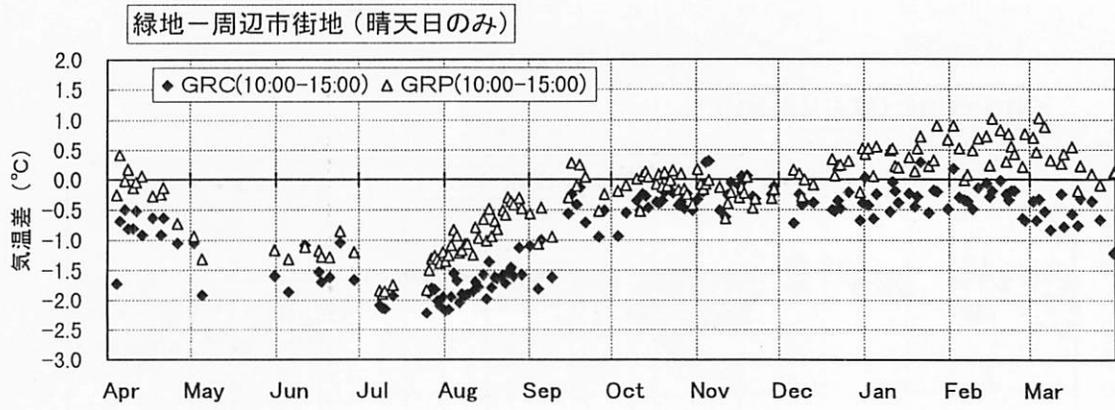


図-45. 緑地中心 (GRC) 緑地縁辺 (GRP) と周辺市街地との気温差年変化

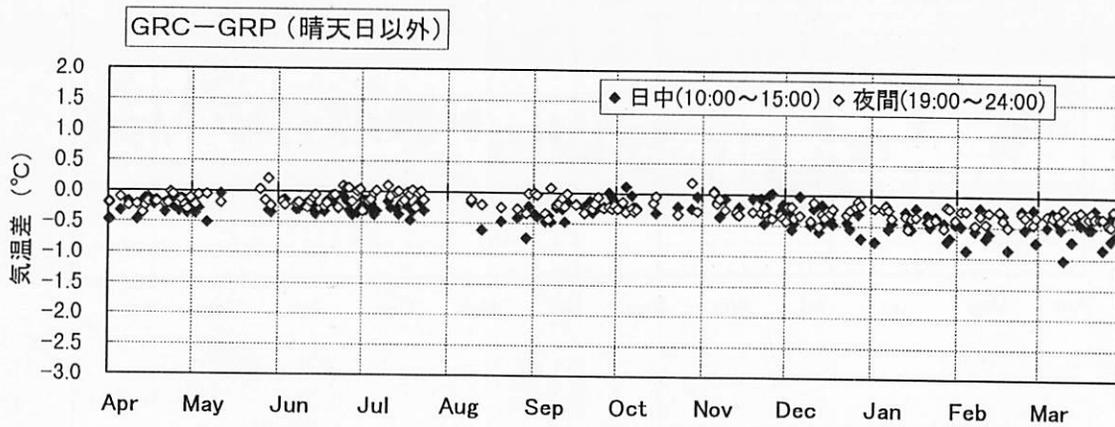
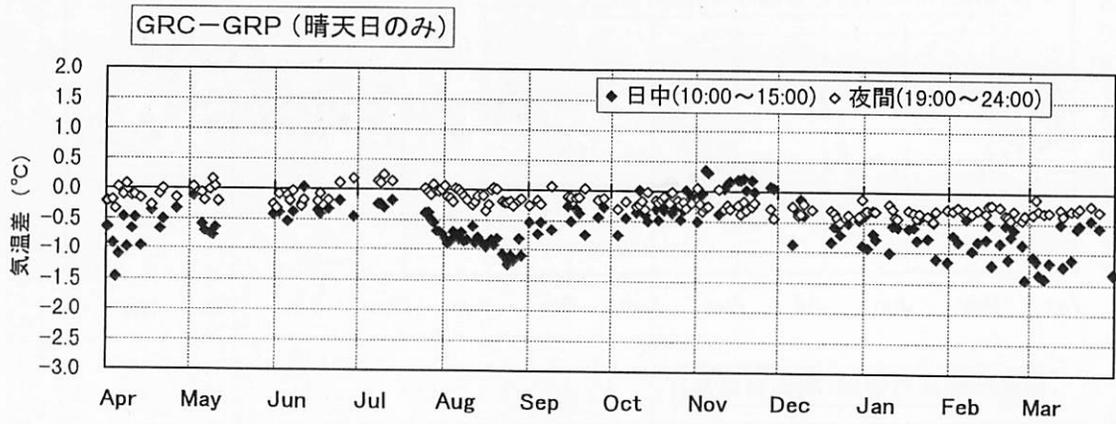


図-46. 緑地中心 (GRC) と緑地縁辺 (GRP) の気温差年変化

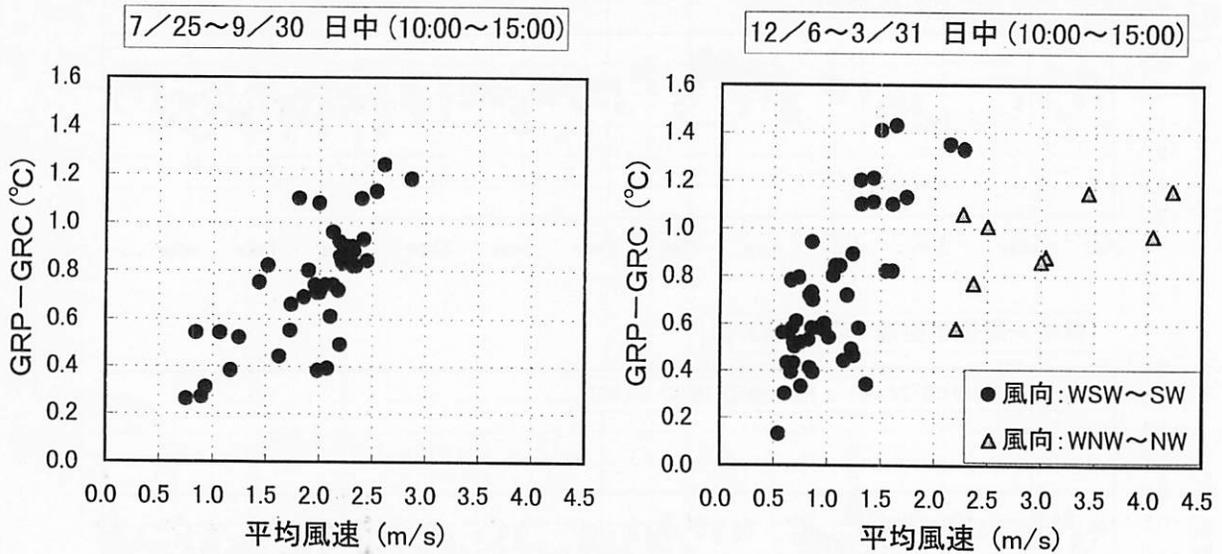


図-47. 緑地内気温差と風速の関係 (夏季と冬季)

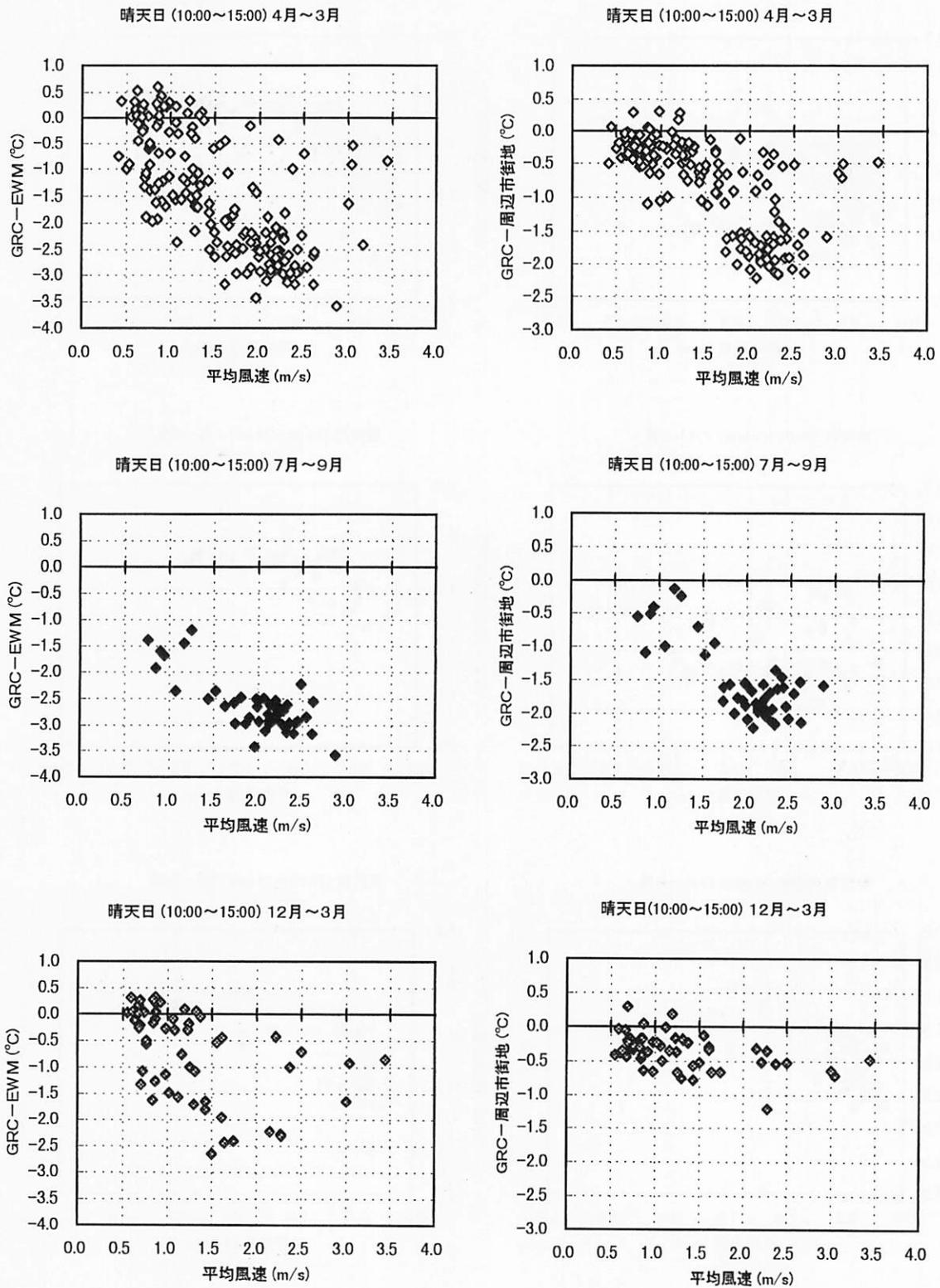


図-48. 緑地中心 (GRC) と周辺市街地との気温差と風速の関係 (日中)

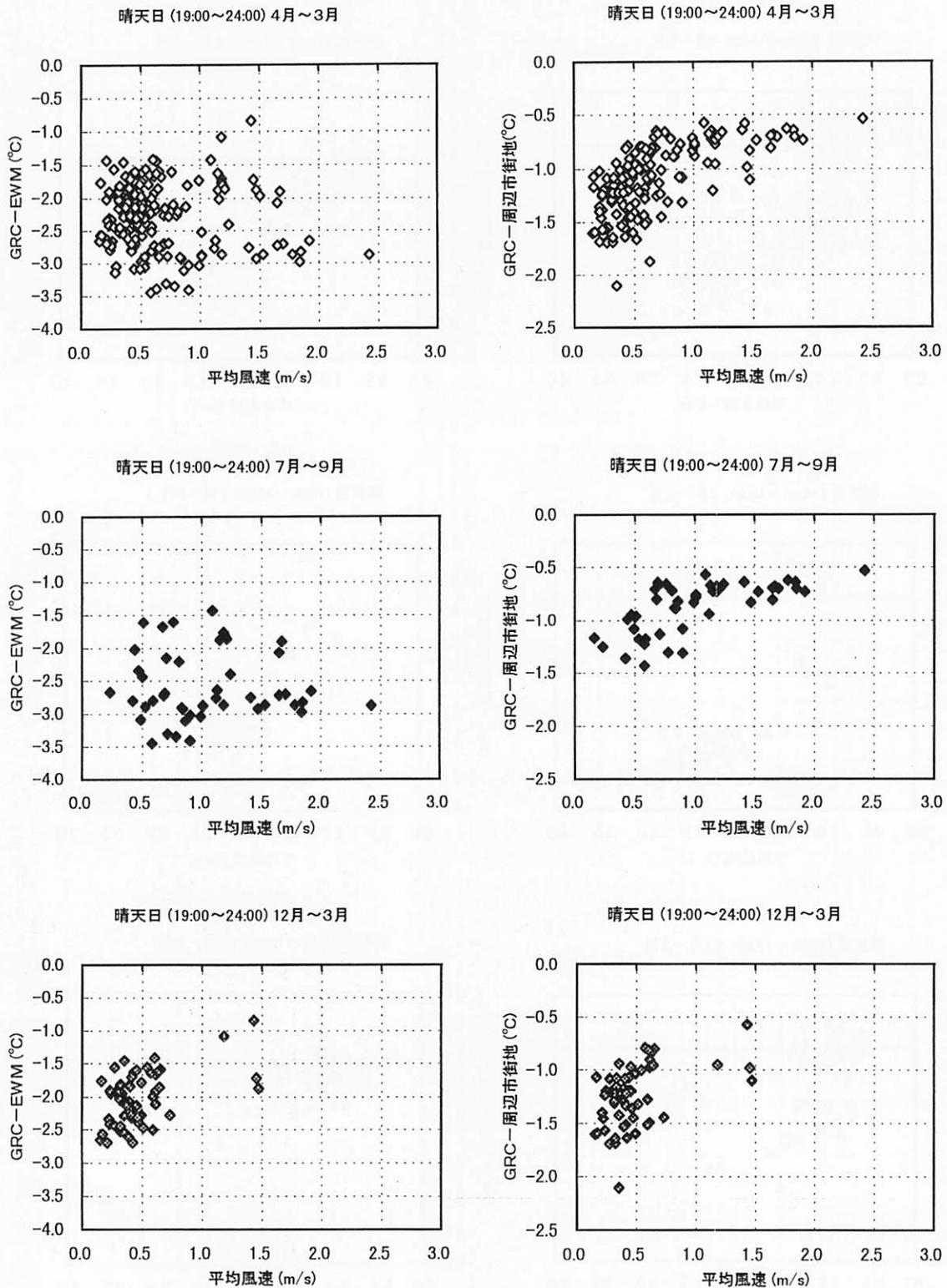


図-49. 緑地中心 (GRC) と周辺市街地との気温差と風速の関係 (夜間)

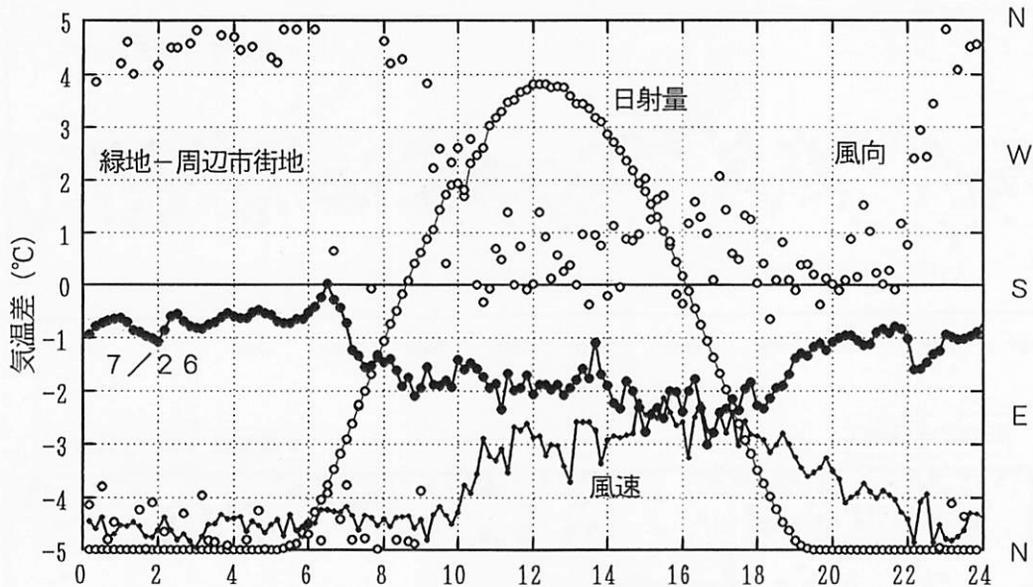


図-50. 夏季の典型的な日変化の例（緑地中心-周辺市街地）

図-50 に、緑地中心（**GRC**）と周辺市街地との気温差日変化の例を示す。各プロットは10分平均の値を示している。この日は典型的な海陸風循環が発達したが、16時過ぎに3℃を超える気温差を記録している。気温差は、午前中の比較的早い時間から拡大し、9時頃には2℃に達している。早朝には、一時的に気温差が消滅している。

図-51～53 は、前述の繁華街の場合と同様に、10分平均の気温差の日最高値とその出現時刻を検討したものである。

GRC と周辺市街地との気温差（図-51）は、10分平均では3℃を超える。特に7月末から8月にかけての盛夏には、連日3℃程度の気温差を生じている。出現時刻は正午から15時にかけての最高気温時に集中している。2月から3月にかけても気温差が大きくなっているが、このときの出現時刻は盛夏のように安定しておらず、一応日没後から夜間の出現頻度が高いが、昼夜を問わず色々な時刻に出現している。**EWM** との気温差では、盛夏に5℃近くに達する。この場合の出現時刻も日中の最高気温時に集中している。**EWM** との気温差は冬季も大きい、冬季の最大気温差はもっぱら深夜に出現する。これは、繁華街の昇温が寄与しているものと考えられる。

GRP との気温差（図-52）では、**GRC** で見られたような盛夏の日中に集中する傾向はそれほど明確ではない。8月末以降は夕方頃に最高気温差が多く現れている。

GRP と **GRC** の気温差（図-53）は夏季と2月～3月にかけて最大2℃を超える。最高気温差の出現時刻は、年間を通して圧倒的に日中の時間帯に多くなっている。

以上、総じて緑地の気温低下は、盛夏には日中の最高気温時、秋以降は日没直後の夕方から夜間にかけて出現頻度が高い。

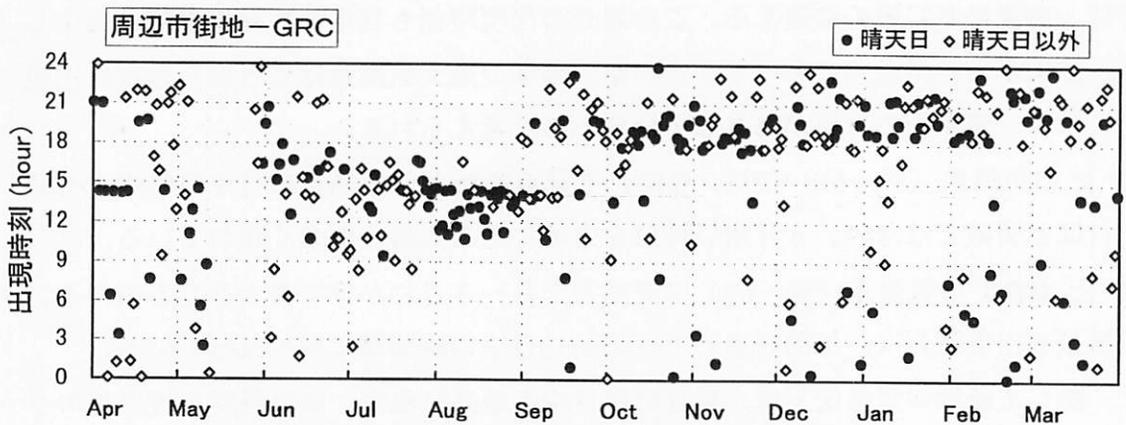
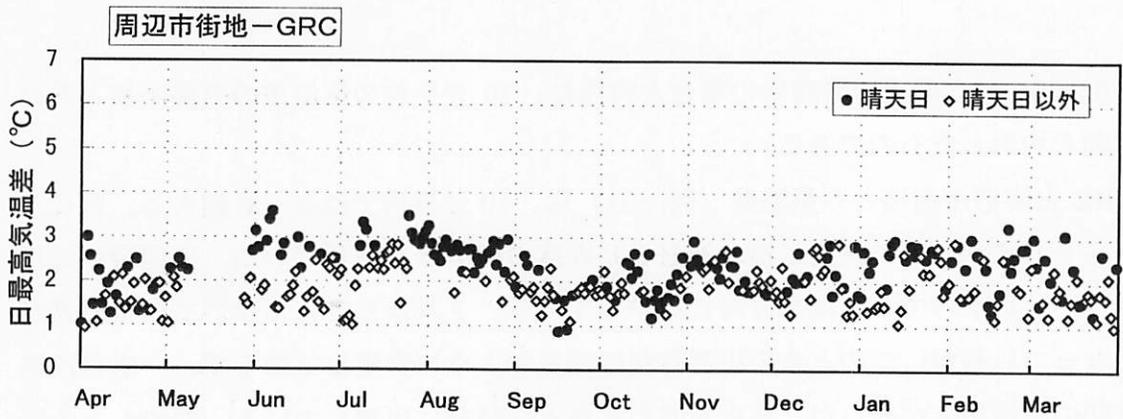
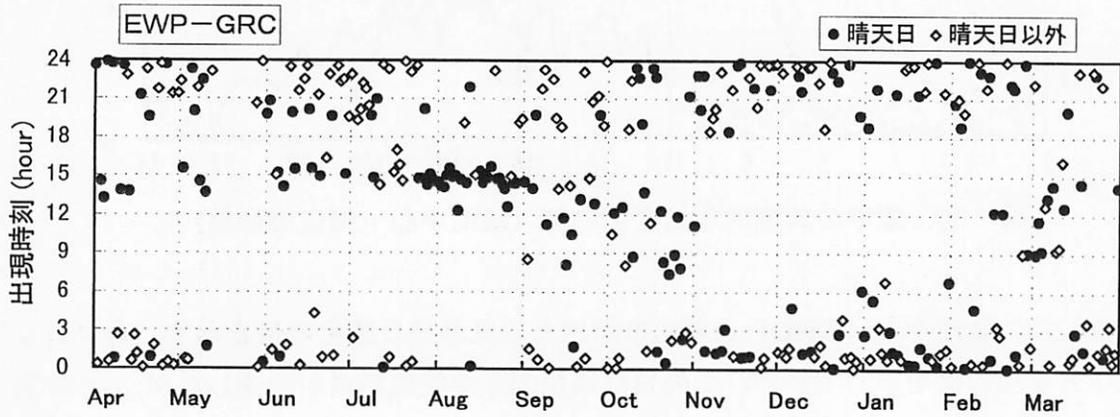
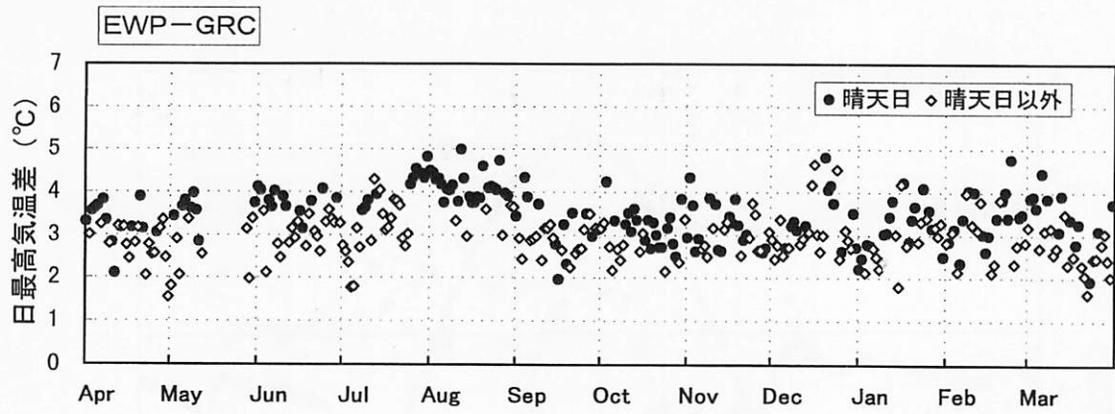


図-51. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化 (緑地中心)

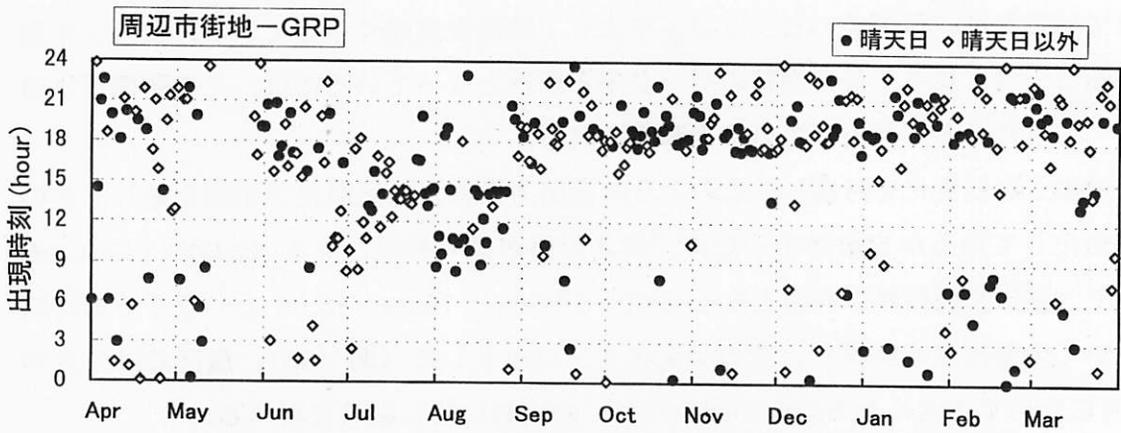
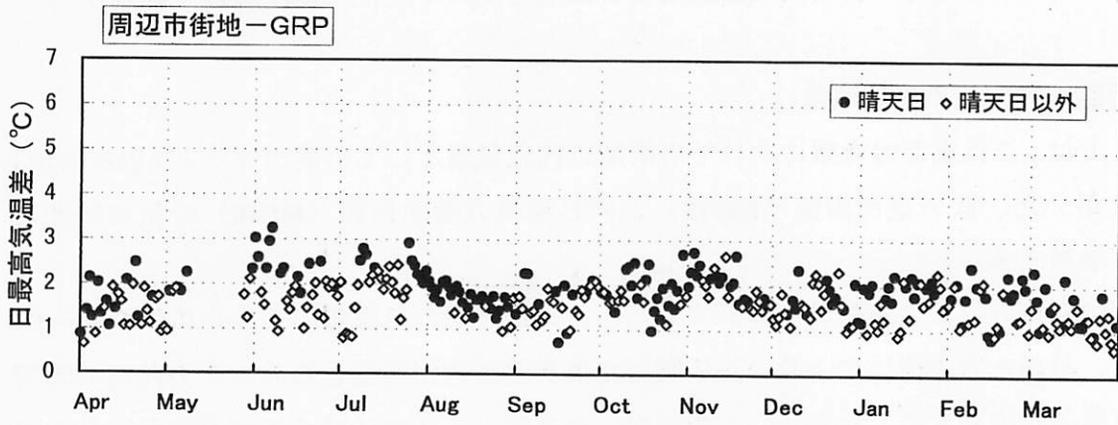
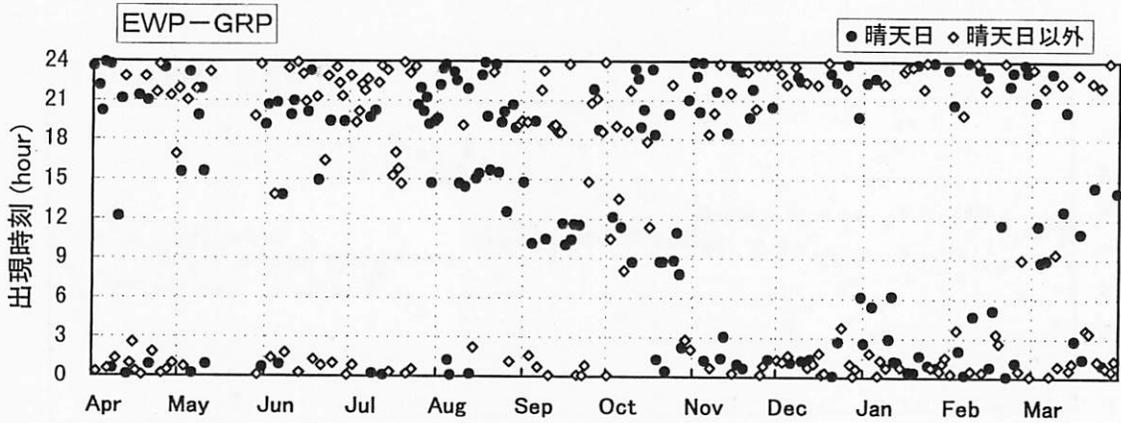
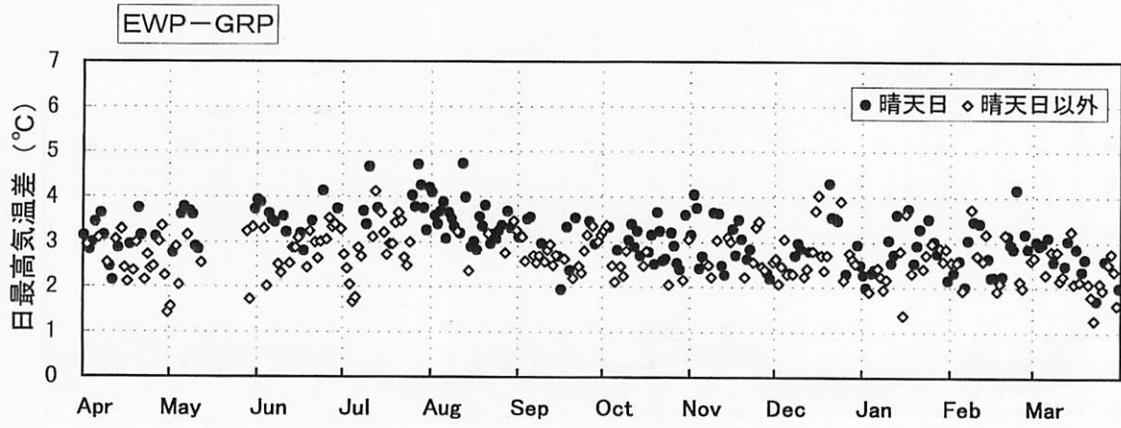


図-52. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化(緑地縁辺)

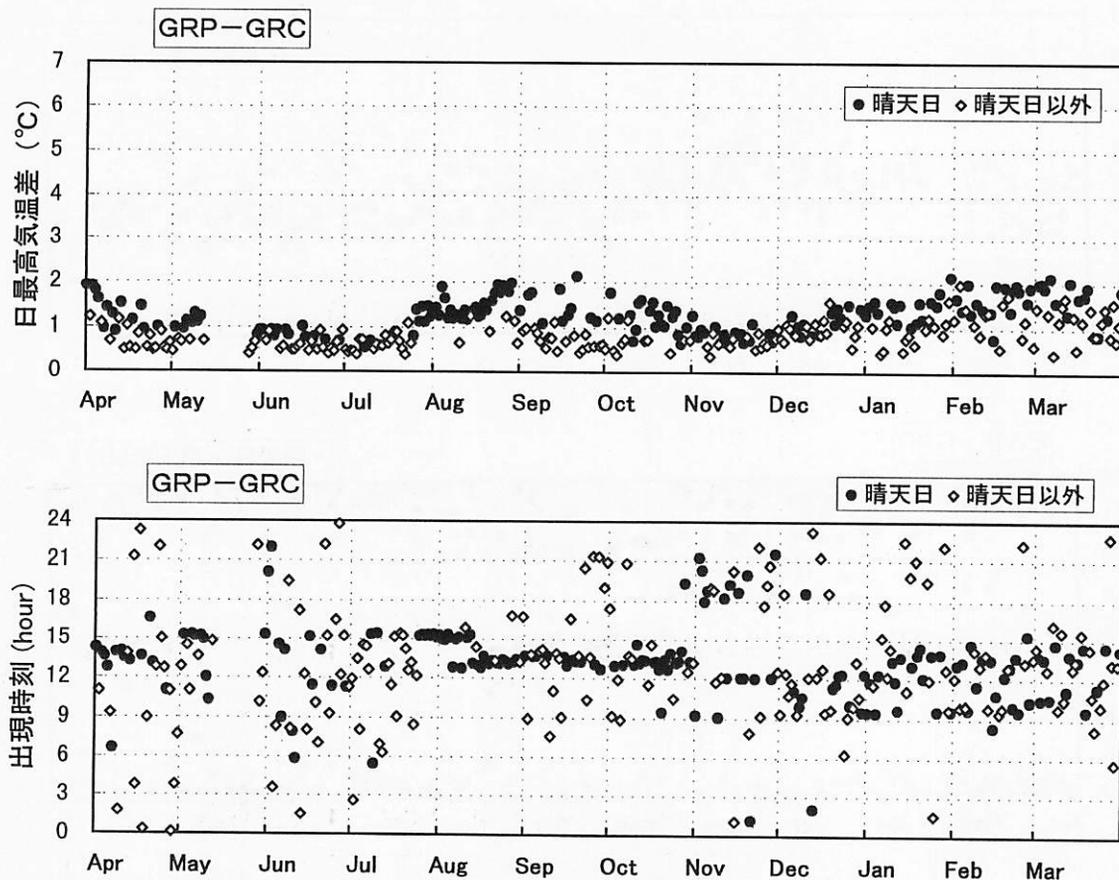


図-53. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化（緑地縁辺-緑地中心）

8. 街路の方向による気温差

ここでは、これまでの考察において市街地の代表気温として位置づけた「周辺市街地」気温に用いた、広い東西街路（EWM）と同じ幅員の南北街路（NSM）の気温特性について検討する。

まず、街路方位による差異を検討するため、両地点間の気温差の日変化の例を図-54に示す。日当たりの違いにより、正午頃は南北街路の方が高温となり、その前後の時間帯は気温差が逆転する。対象とした街路が、南北軸から正確には6度ほど時計回り方向にずれているため、気温差のピークは正午より1時間程度遅く生じている。また、午前中の逆転ピークに比べ午後の逆転のピークが不明確となっているのは、この時間帯に海風が強くなったことが原因していると考えられる。

以上のような日変化を考慮し、このような街路方向による気温差が年間を通してどのように変化しているかを検討するため、南北街路が最も高温となる12:00~14:00、その前後で、逆に東西街路が高温となる8:00~10:00と16:00~18:00という3つの時間帯についての温度差を計算し、その年変化をプロットした（図-55）。温度差は8月から10月にかけて大きくなる傾向が認められ、晴天日に特に顕著に現れる。

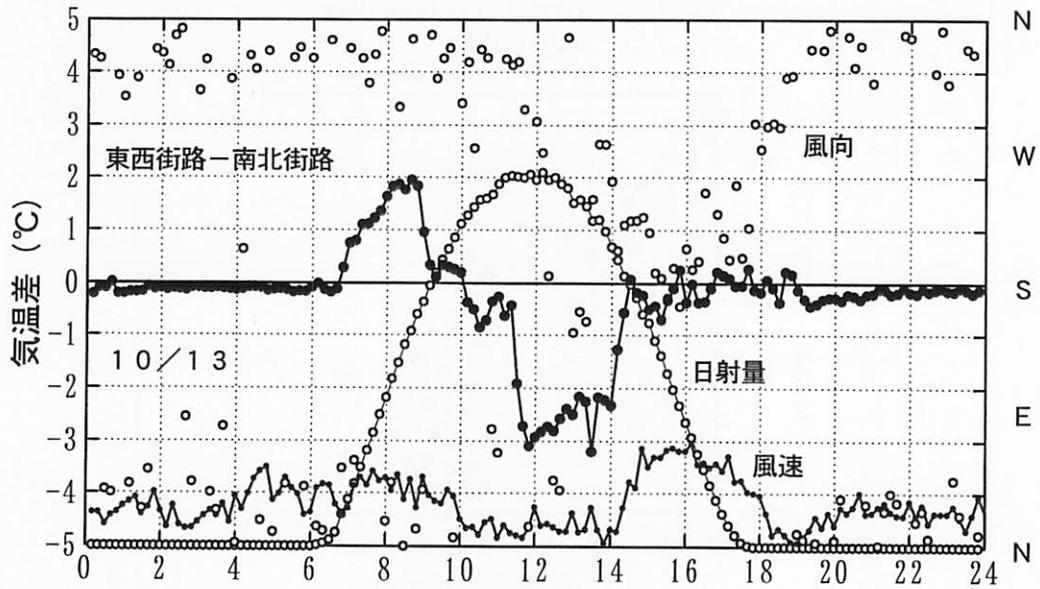


図-54. 街路方向による気温差日変化の一例（東西街路-南北街路）

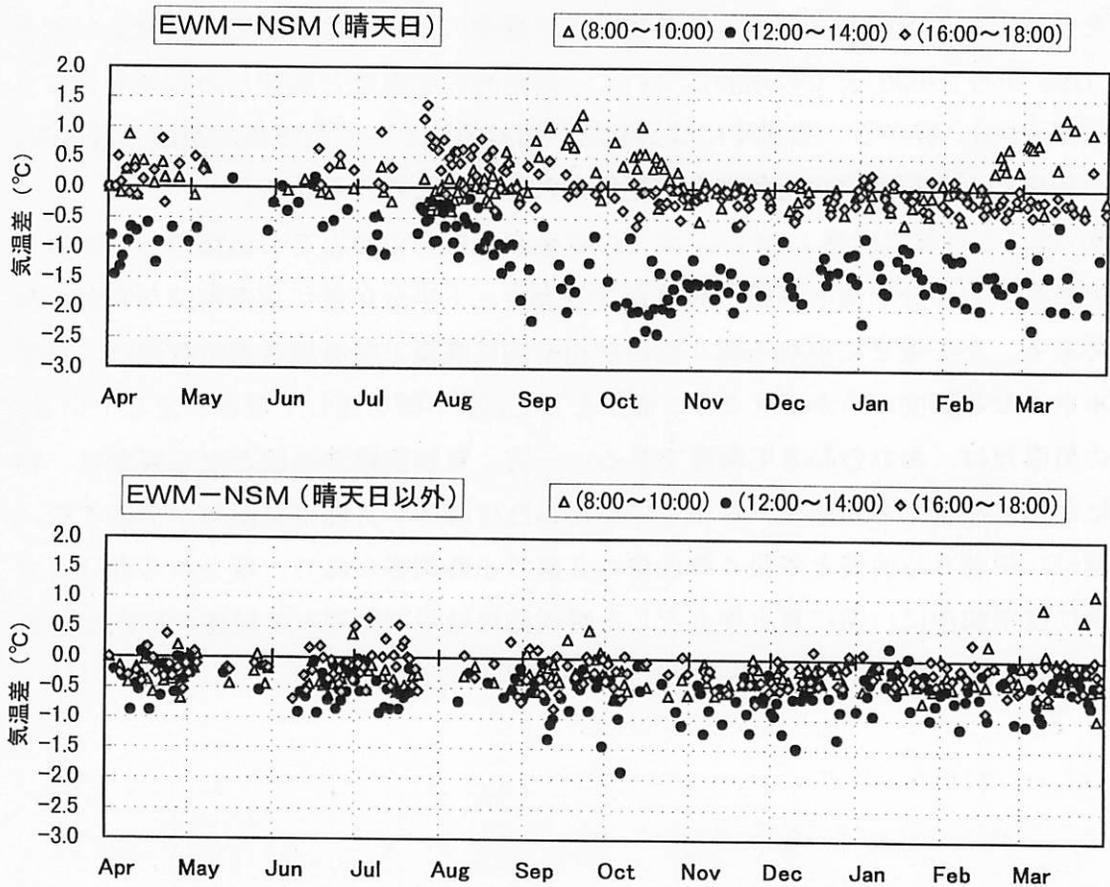


図-55. 街路方向による気温差の年変化

7/25~10/30 (12:00~14:00)
晴天日のみ

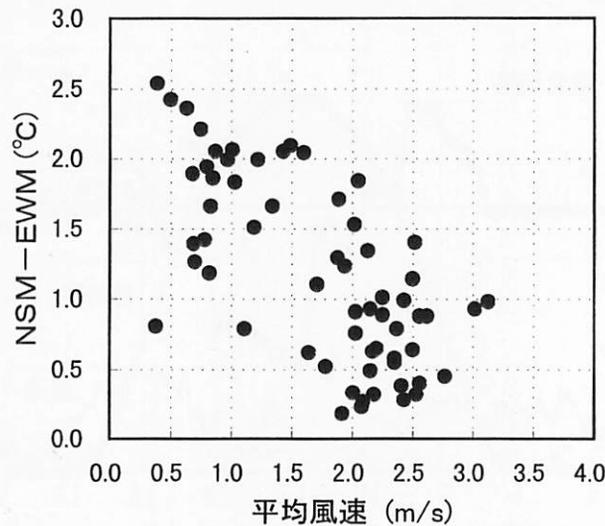


図-56. 街路方向による気温差と風速の関係

図-54 の日変化にも見られたように、以上のような街路方向による気温差は、風速の影響を受けていると推測される。そこで、正午過ぎのピークについて、温度差が大きくなる 7/25 から 10/30 までの期間について、街路間の気温差と風速との関係をプロットした (図-56)。図から、強風時には気温差が相対的に小さくなる傾向が読み取れる。これは、強風により街路内の空気混合が促進されるためと考えられる。

図-57 は、これまで同様、10 分平均での日最高気温差の値とその出現時刻を検討した結果である。上半分が南北街路が高温となる場合、下半分が逆に東西街路が高温となる場合である。正午過ぎに現れる南北街路が相対的に高温となる場合の気温差は、夏至の頃に小さくなる傾向がうかがえるが、全体としては、年間を通してほぼ一定している。ピークの気温差は、おおむね 3℃程度である。一方、東西街路が高温となる現象は、春から秋にかけて顕著で 2℃前後、冬至を中心としたほぼ 3ヶ月間は気温差が消滅する。出現時刻は、午前 9 時前後と午後 4 時前後の 2 通りの時間帯があり、秋分から春分までの寒候期には午前中に、逆に夏を中心とした暖候期には午後に現れる明確な傾向が認められる。

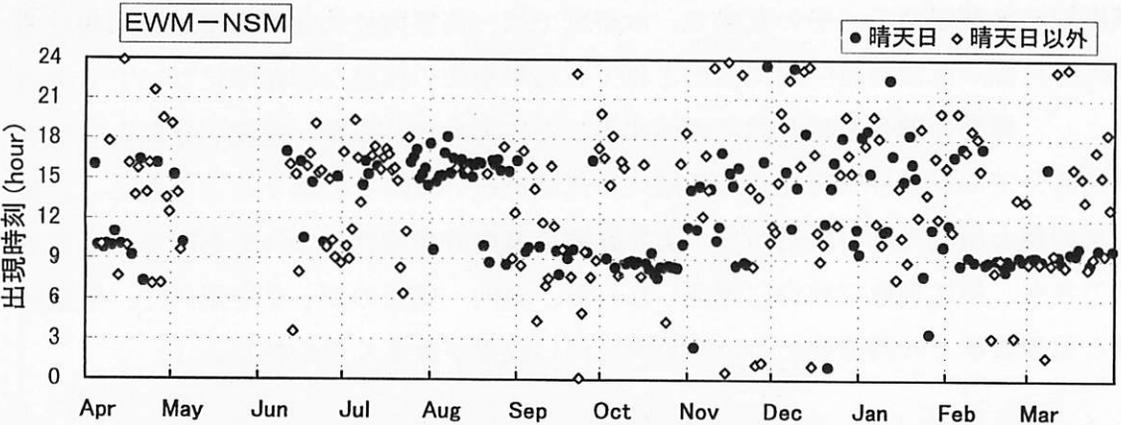
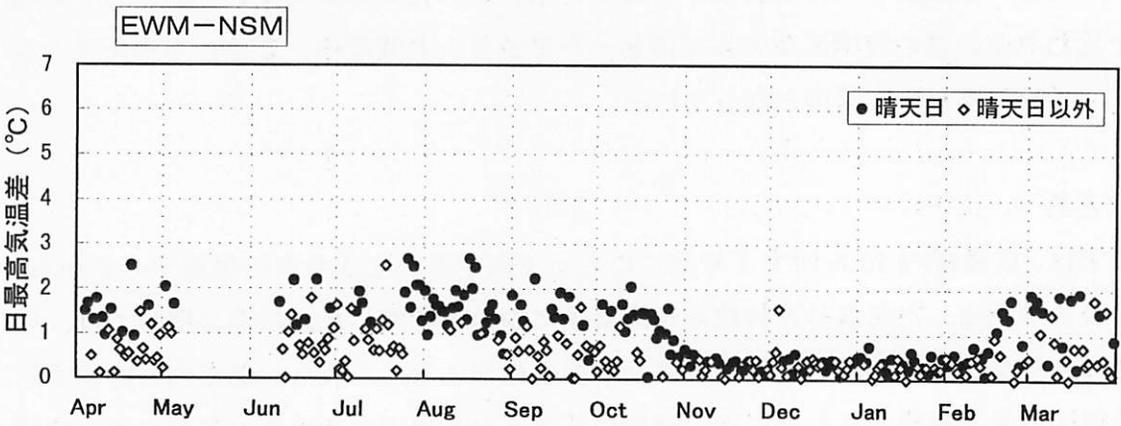
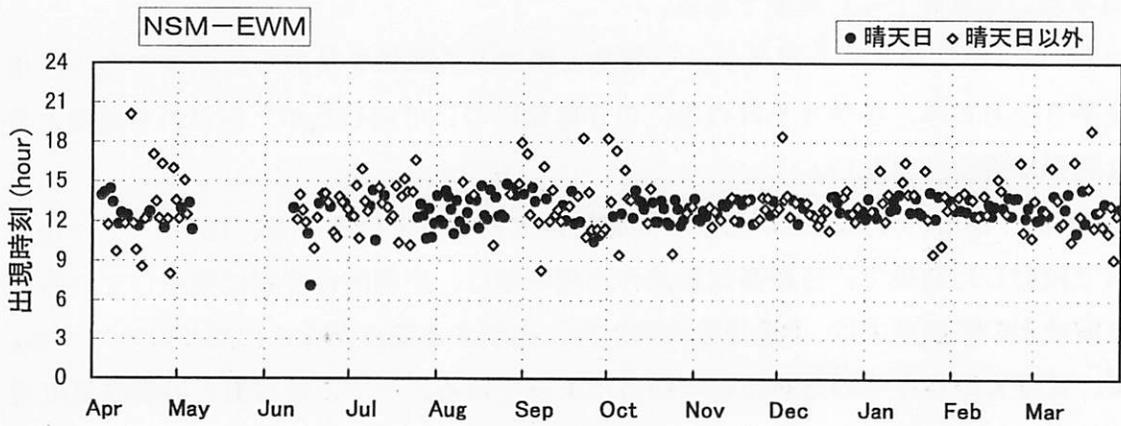
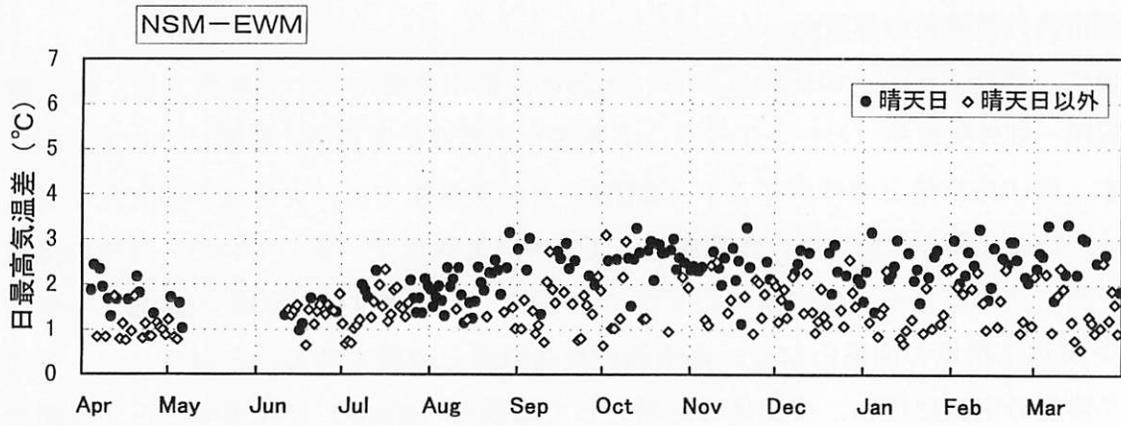


図-57. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化 (東西/南北街路間)

9. 都市内外気温差の年変化

最後に、郊外ポイントのデータから、広島市の都市気温について考察する。図-58に市街地-郊外気温差（ヒートアイランド強度）の年変化を日中・夜間について天候別に示す。周辺市街地と郊外ポイント（**SUB**）との気温差では、大きな季節変化は見られない。特に夜間の気温差は、年間を通して2～3℃程度で一定している。日中の気温差は夜間に比べ小さく、温度差はわずかであるが、夏季は周辺市街地>**SUB**、冬季は**SUB**>周辺市街地の関係となる。都市内の最高気温との差を採る、というヒートアイランド強度の定義に従い、市街地の気温として繁華街（**EWP**）を採用すると、夜間の5時間平均の気温差で4℃程度である。

図-59は、夜間のヒートアイランド強度と風速との関係を検討した結果である。年間、夏季3ヶ月のみ、冬季3ヶ月のみ、の3種類について示したが、いずれも風速との明確な関係は認められない。

図-60は、都市内外気温差がどの時間帯に最大となっているかを、10分スケールの平均値で検討した結果で、日最高気温差の出現時刻は、圧倒的に夜間に集中している。周辺市街地との気温差では、日没後数時間以内に出現する頻度が非常に高くなっている。従って、夏季よりも冬季の方が出現時間は早まっている。一方、繁華街との最高気温差は、それよりも数時間遅く出現することが多く、午前0時頃に集中する傾向がある。これについても、繁華街における夜間から深夜にかけての人工排熱が大きく寄与しているものと思われる。この時間スケールでのヒートアイランド強度は、夏季にやや大きく5～6℃、冬季は4～5℃程度となっている。

10. まとめ

本章では、広島市内10ヶ所で1年間にわたって測定された1分毎の気温データから、緑地効果を中心とした気温分布特性の年間変動について考察した。緑地に関しては、樹木の落葉と展葉に呼応した気温差の明確な季節変化がとらえられた。都市内に存在する緑地の熱的効果を議論するためには、評価の基準となる周辺市街地側の気温の分布特性にも気を配る必要がある。その意味で、本研究では、街路方位による気温の時間的な差異や、人工排熱が直接街路空間に放出されている繁華街の狭隘な街路等についても考察の対象とし、緑地の効果を総合的に評価することに努めた。日中・夜間・早朝という大きな時間区分での気温分布特性から各地点の気温形成の概略を把握するとともに、日最高気温差の値と出現時刻の解析から、より詳細な温度分布特性についても明らかにすることができた。特に現地で独自に測定した日射、風向・風速のデータを用いて、気温差の形成と気象要素との関連性についても興味深い成果が数多く得られた。

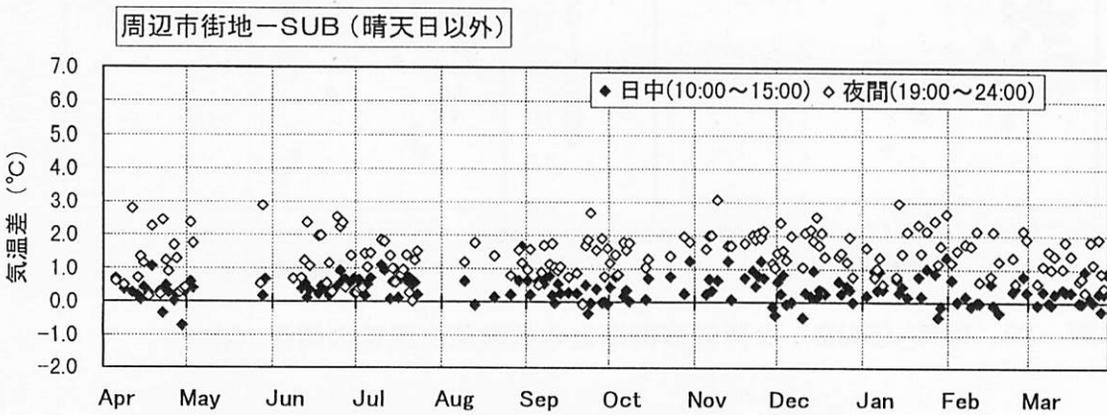
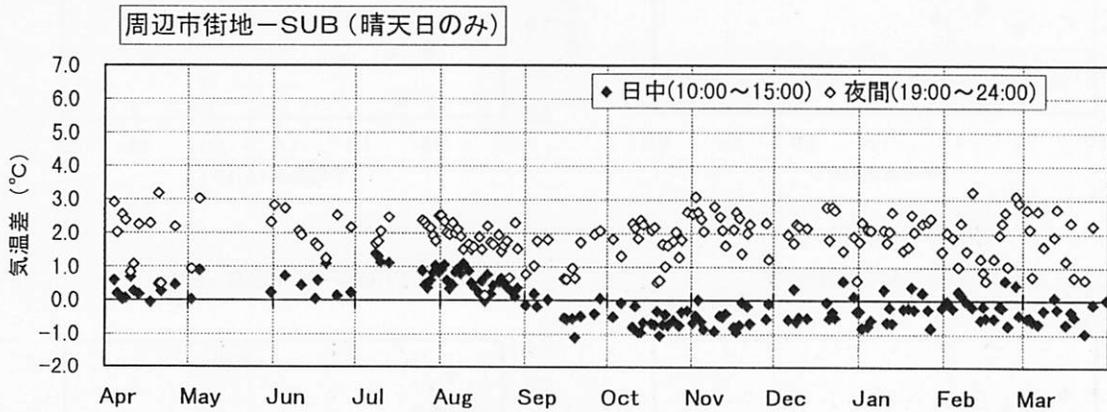
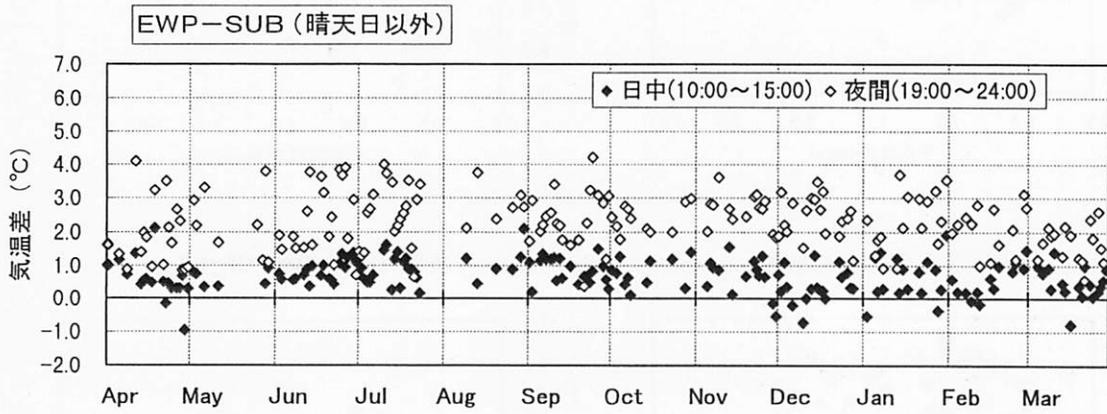
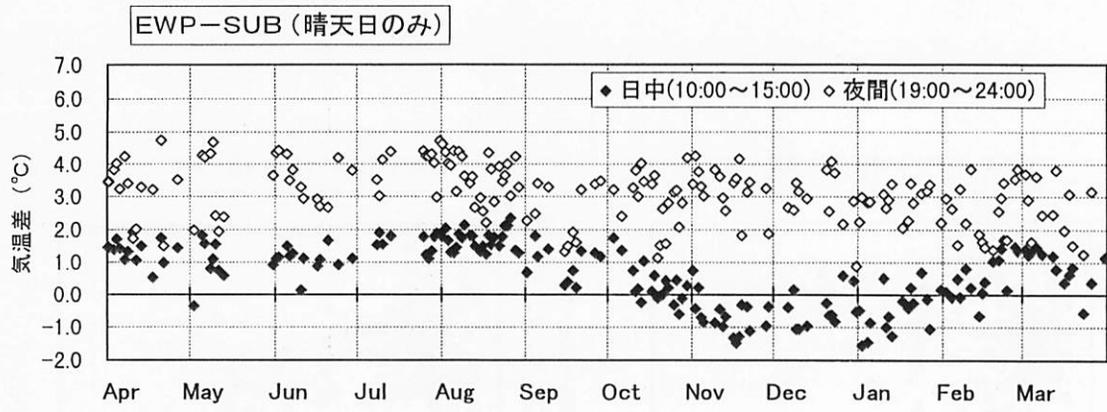


図-58. 市街地-郊外気温差 (ヒートアイランド強度) の年変化

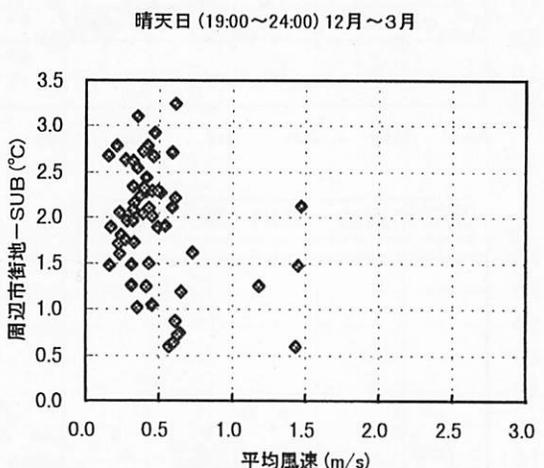
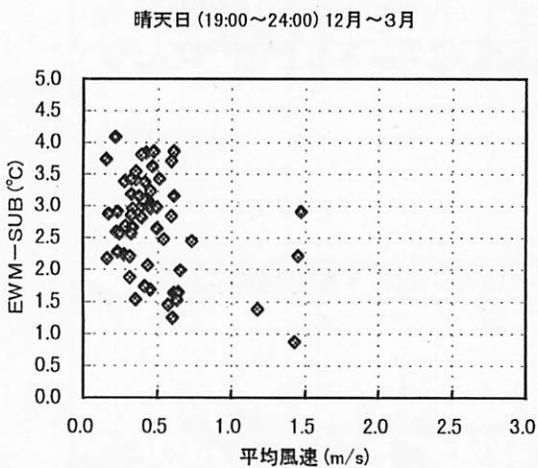
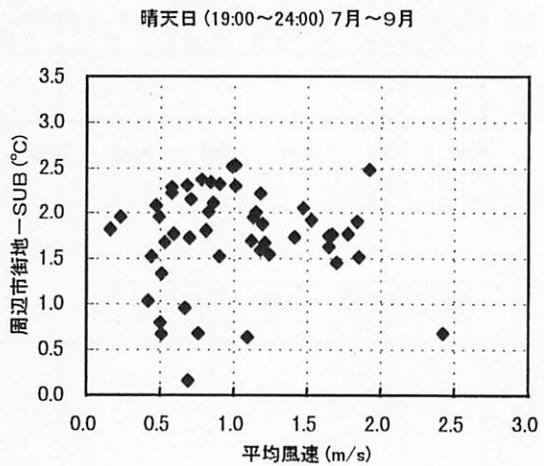
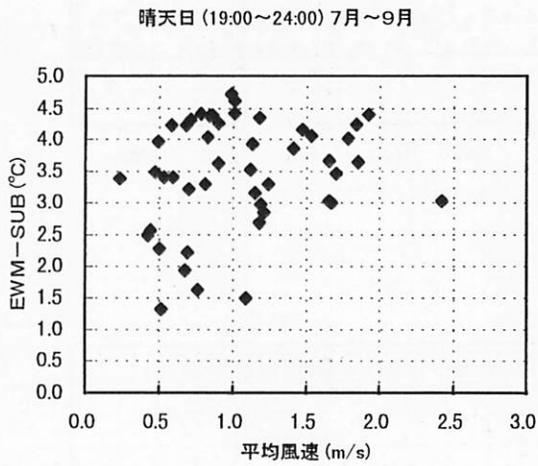
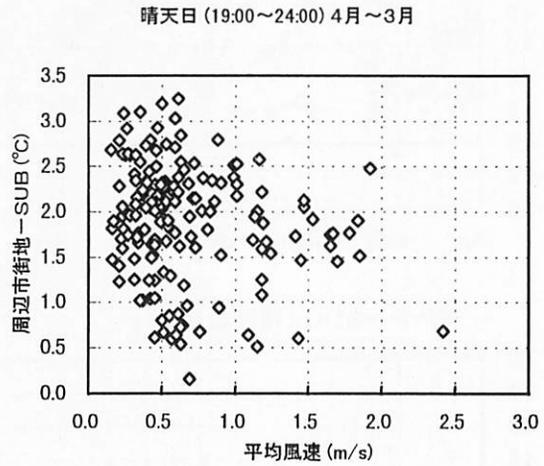
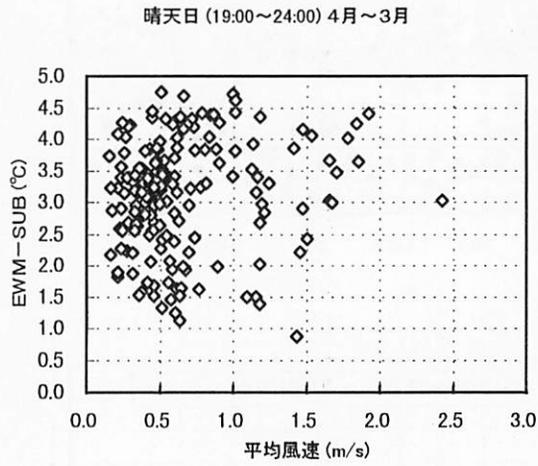


図-59. 郊外 (SUB) と周辺市街地との気温差と風速の関係 (夜間)

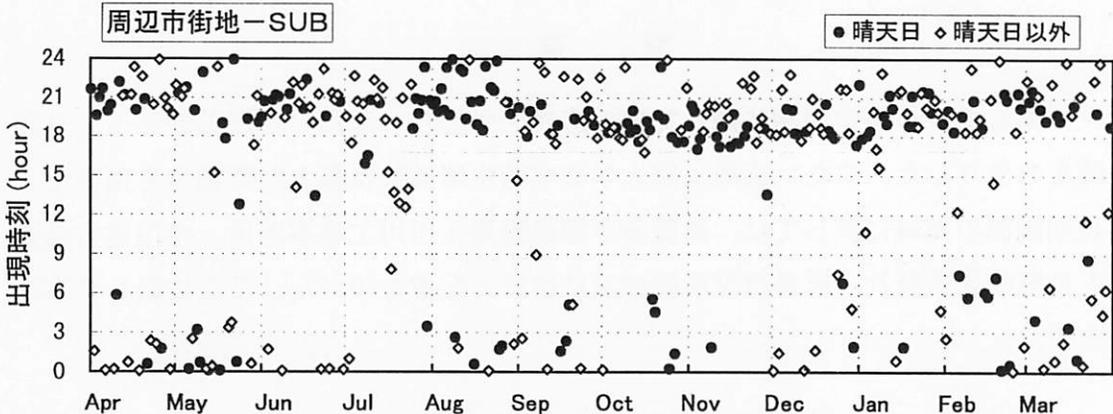
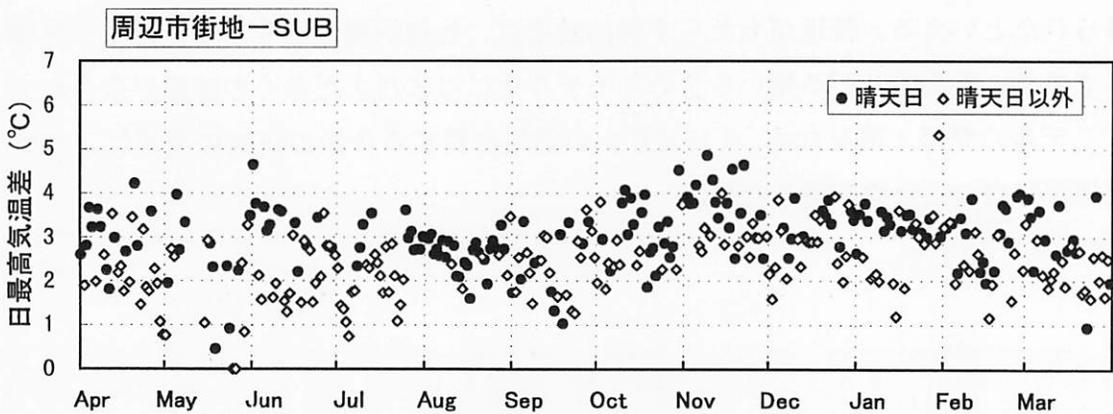
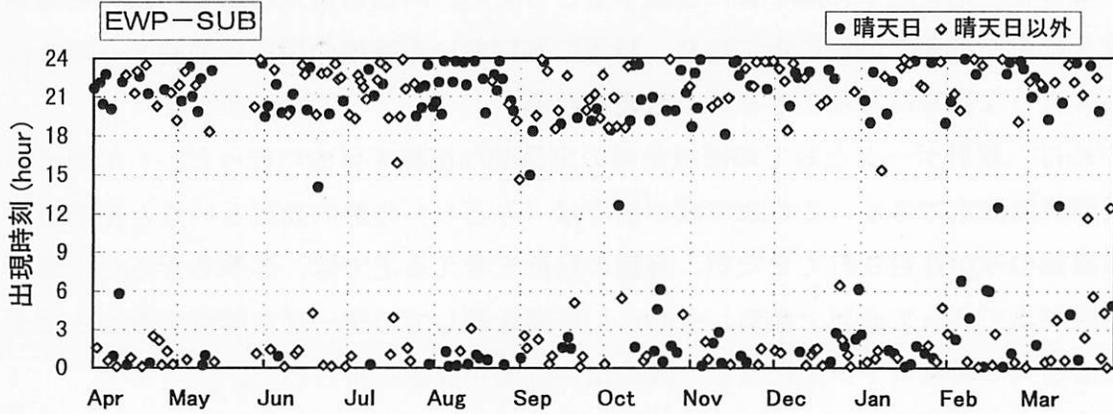
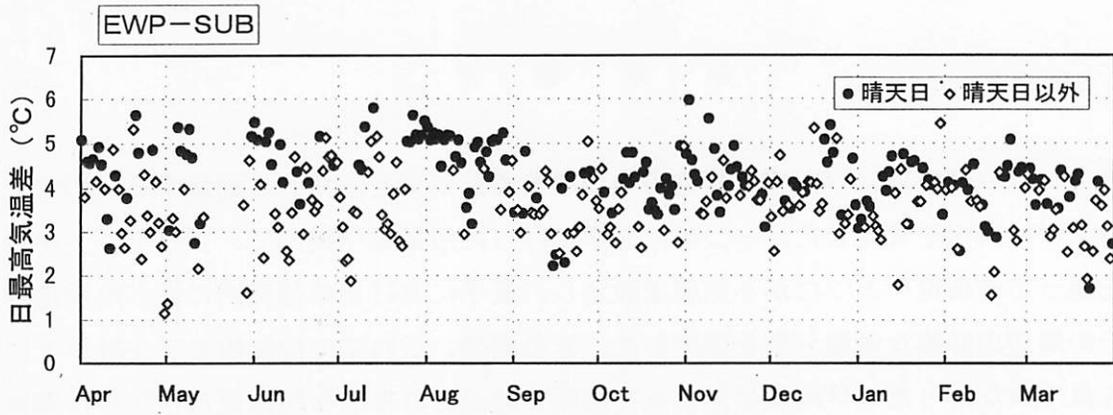


図-60. 10分平均での日最高気温差とその出現時刻の年変化 (郊外)

第 4 章 総 括

本研究では、都市内に存在する緑地のもつ環境調節効果を多角的に把握する目的で、以下の二つの測定を実施した。一つは、夏季に行った短期集中観測で、グラウンドから樹林を通して市街地へとつながる側線を設定し、夏季における卓越風向に沿った緑地内部とその周辺の詳細な気温分布を測定した。その結果、これまでの数値モデル計算では表現されていなかった、平均流に逆らって乱流で輸送される水平熱輸送の存在が指摘された。このことは、たとえ風下側に位置するとしても、周辺市街地は緑地内部の熱環境に大きく影響を与えていることになり、緑地計画において緑地の規模を議論する場合にも、このような現象は無視できないと考えられる。

二つめは、設計データとしての緑地効果の定量的な把握を目的に行った、1年間にわたる長期気温測定である。これまで我が国では「みどり」の熱的效果という夏季の暑熱緩和機能のみが注目されてきたが、実際の設計を考える上では、冬季も含めた年間の環境把握がまずもって必要である。今回、1年間を通してのデータを解析することにより、緑地効果の明確な季節変化など、興味深い成果が数多く得られた。

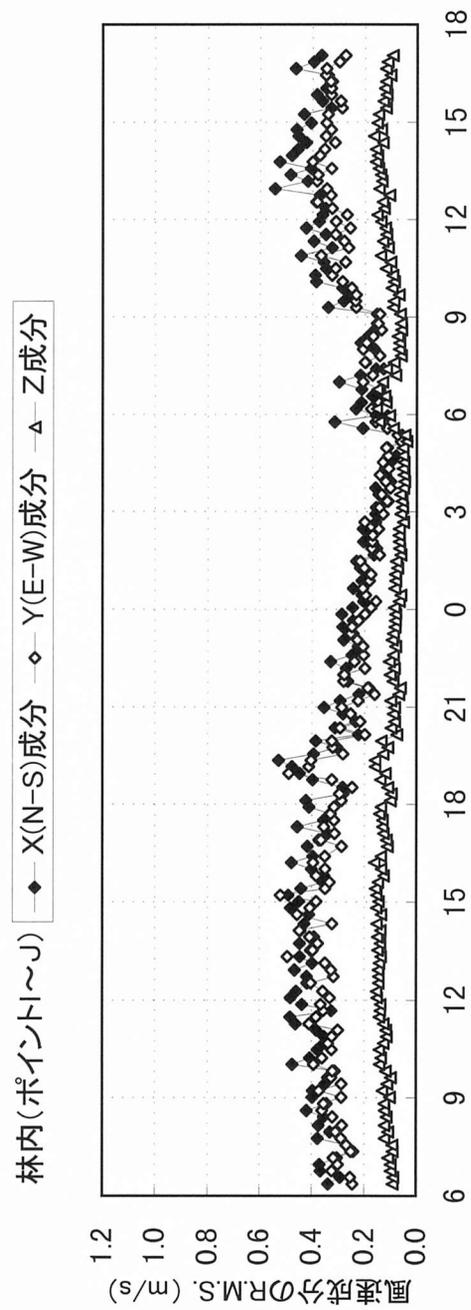
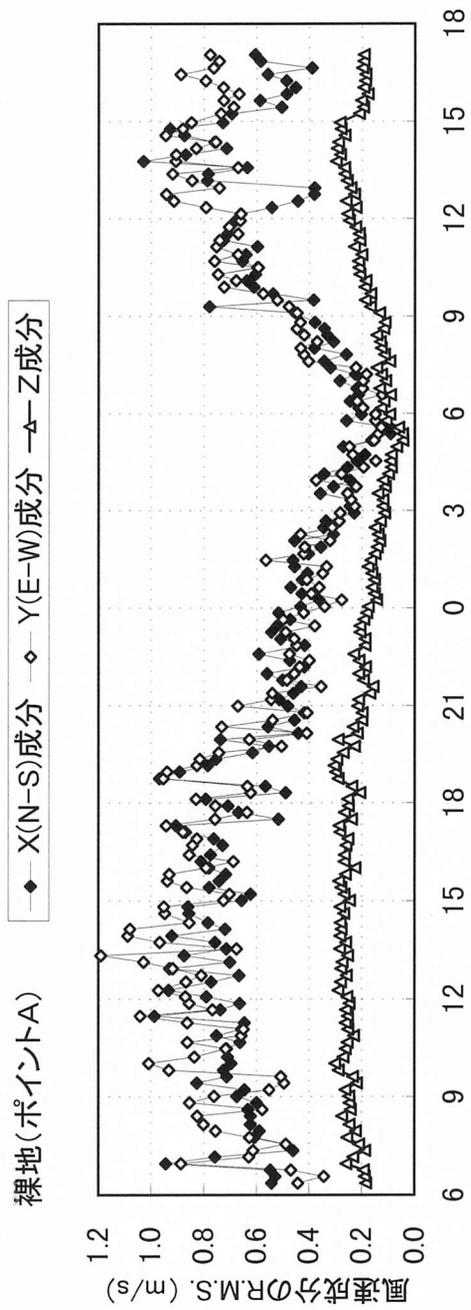
このような緑地の効果は、緑地の規模・構造・構成樹種等、多くの要因で変化するため、より多くのデータの蓄積が必要ではあるが、今回の実測からいくつかの有益な知見が得られたといえる。緑地がもたらす熱的效果は、物理的現象に限ってもかなり複雑なものであり、生物的な振る舞いを含めたモデル化にはまだまだ多くの課題が残されている。モデルの発展・検証など、「みどり」の効果に関する今後の研究の発展に、本研究の成果が役立つことを期待したい。

謝 辞

広島中央公園における集中観測に際しては、広島大学総合科学部の福岡義隆先生より測器の一部をお借りした。また、広島工業大学の卒論生諸氏には多大な御協力を頂いた。また、長期観測の実施に際しては、建設省中国建設局太田川工事事務所、中国電力株式会社、広島電鉄株式会社、広島市役所緑政課に格段の配慮を頂いた。ここに記して謝意を表します。

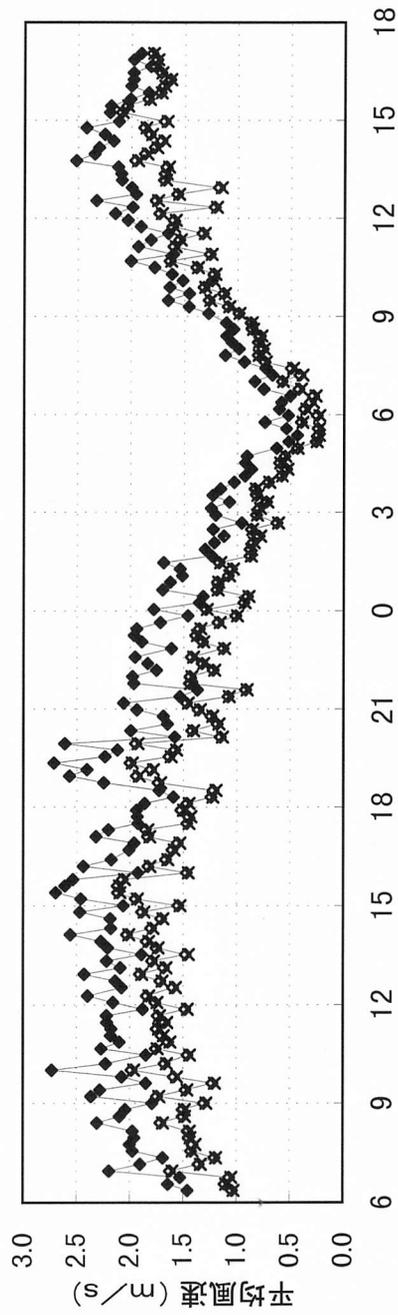
参考文献

- 1) T. Honjo and T. Takakura : Simulation of Thermal Effects of Urban Green Area on their Surrounding Areas, *Energy and Buildings*, 15-16 (1990/91), 443-446
- 2) M. Moriyama and K. Fukumoto : Effects of green areas on urban air temperature by numerical solution, *Proc. 2nd Int. Conference on Atmospheric Sciences and Application to Air Quality*, Tokyo, October, 1988
- 3) 山田宏之・丸田頼一：都市における緑地の気象緩和作用についての実証的研究，*造園雑誌* 52(5), 127-132, 1989
- 4) 山田宏之・丸田頼一：小規模樹林内における夏季の気温の提言について，*造園雑誌* 53(5), 163-168, 1990
- 5) 本條 毅・高倉 直：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的解析，*農業気象* 40(3), 257-261, 1984
- 6) 丸田頼一：公園緑地の都市自然環境に及ぼす影響，*都市計画* 69・70, 49-77, 1972
- 7) 藤崎健一郎・半田真理子：公園、街路等の植栽が日気象に及ぼす影響，*造園雑誌* 57(5), 151-156, 1994
- 8) 清田 信・平野高司・相賀一郎：植物による都市の熱環境緩和，*環境情報科学* 22-2, 96-100, 1993
- 9) 浜田 崇・三上岳彦：都市内緑地のクールアイランド現象—明治神宮・代々木公園を事例として—，*地理学評論* 67(8), 518-529, 1994
- 10) Oke.T.R : Advectively-assisted evapotranspiration from irrigated urban vegetation. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 167-173, 1979
- 11) 神田 学・ほか：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年夏期集中観測，*天気* 44(10), 713-722, 1997
- 12) 神田 学・ほか：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(2)森林環境気象モデルによるシミュレーション，*天気* 44(10), 723-731, 1997
- 13) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，1994
- 14) 藤野 毅：森林キャノピーモデルによる熱収支評価に関する感度解析，*環境システム研究* 25, 1-6, 1997



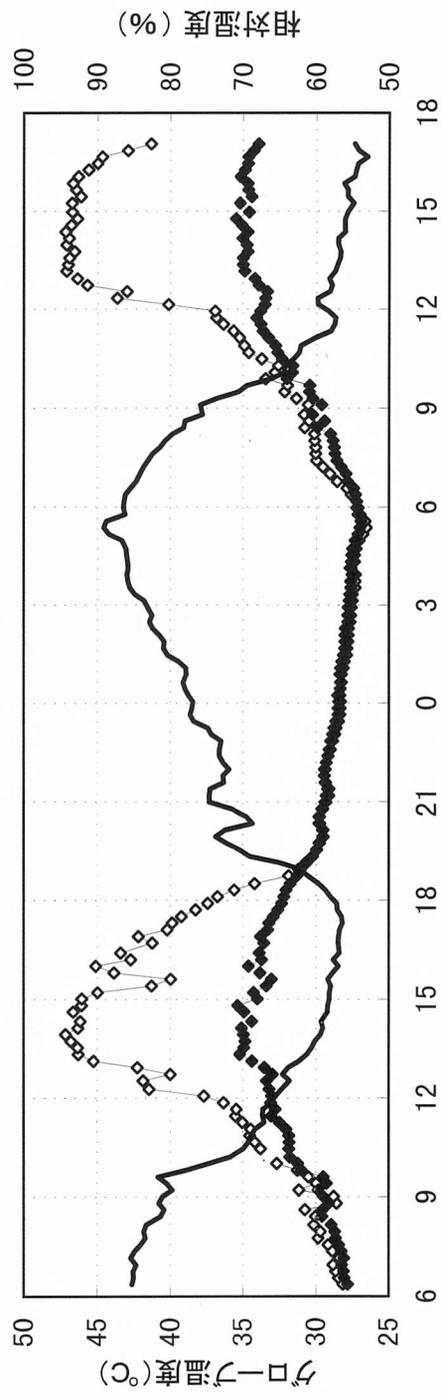
付図-1. 超音波風速計による風速3成分のR.M.S.

裸地 (ポイントA) ◆ 3.3m高さ ◇ 0.9m高さ × 0.3m高さ



付図-2. 裸地における3高度の平均風速

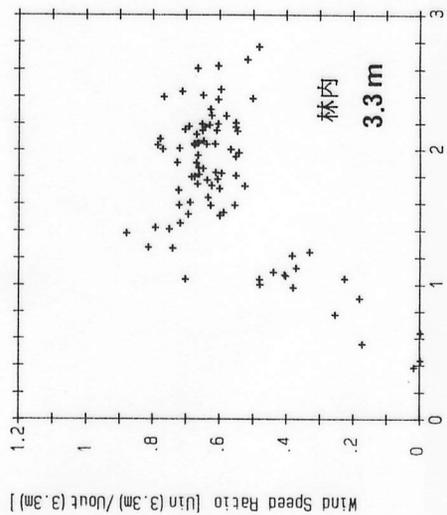
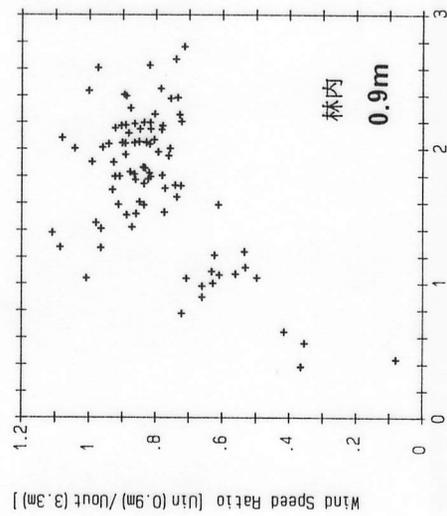
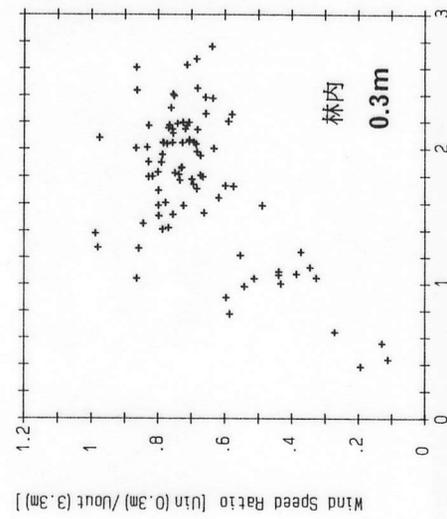
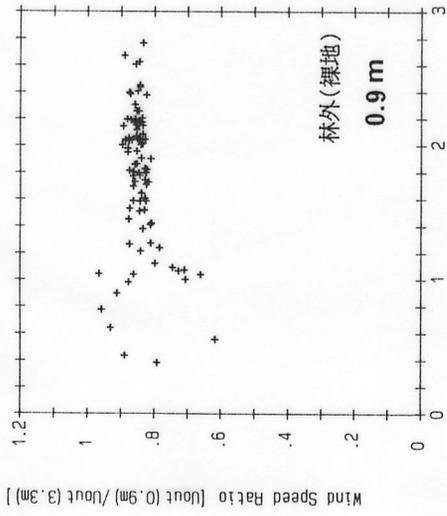
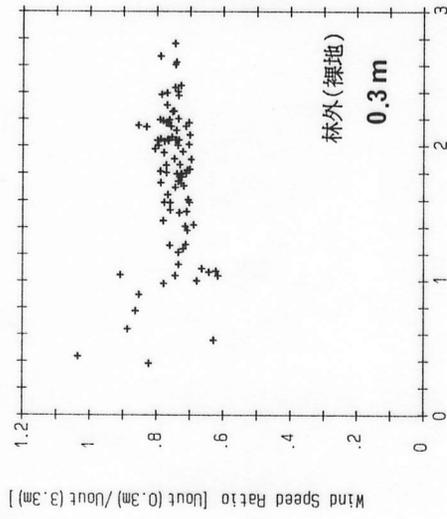
◇ グローブ温度(林縁:ポイントC付近) ◆ グローブ温度(林内:ポイントE) — 相対湿度(ポイントE)



付図-3. 相対湿度とグローブ温度の変化

林内と林外の風速比の比較

(林外3.3m高さを基準として)



付図-4. 林内 (ポイントE) と裸地 (ポイントA) との高さ別風速比
(1992年8月の予備実測における結果)



付録写真－ 1. 天空状態（ポイントA）



付録写真－ 2. 天空状態（ポイントB）



付録写真－ 3. 天空状態（ポイントC）



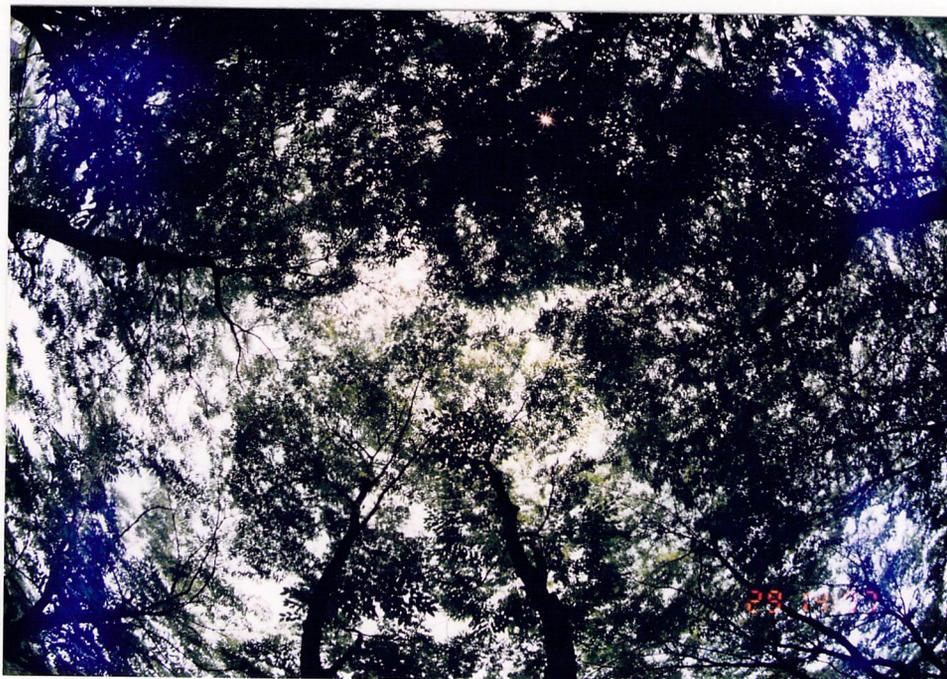
付録写真－ 4. 天空状態（ポイントD）



付録写真－ 5. 天空状態（ポイントE）



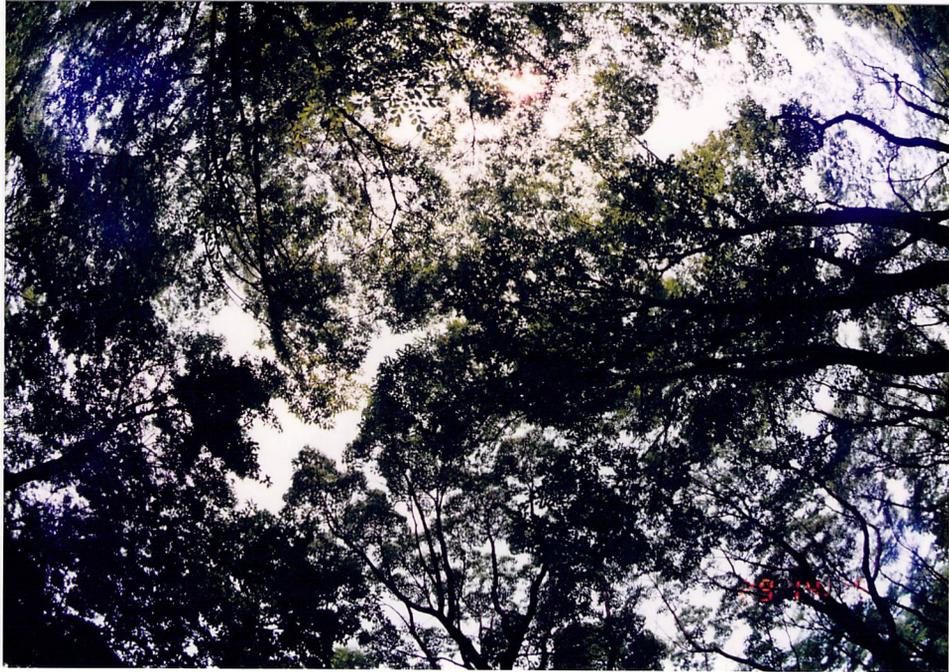
付録写真－ 6. 天空状態（ポイントF）



付録写真－ 7. 天空状態（ポイントG）



付録写真－ 8. 天空状態（ポイントH）



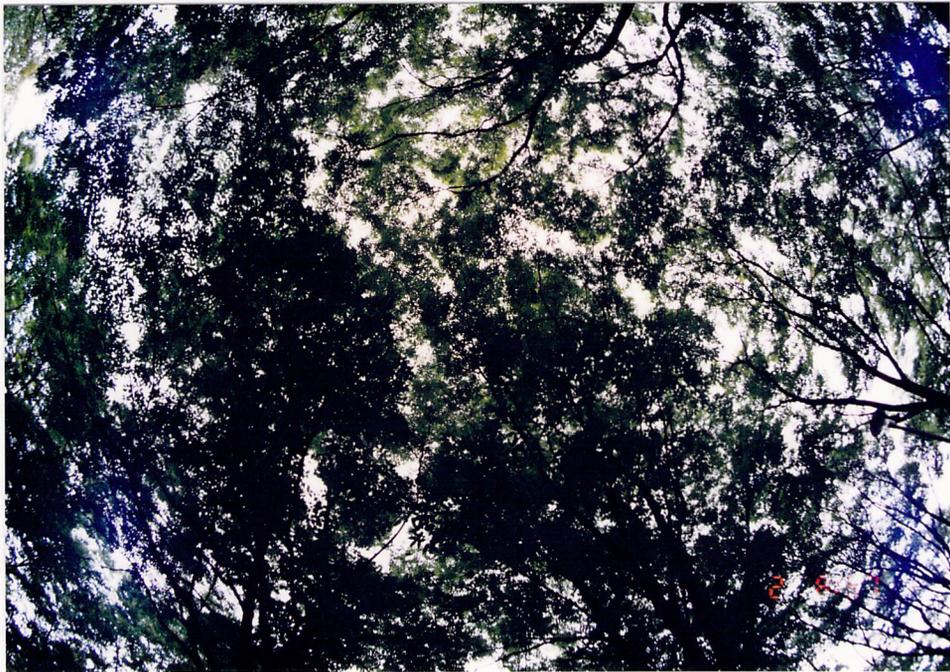
付録写真－9. 天空状態（ポイントI）



付録写真－10. 天空状態（ポイントJ）



付録写真-11. 天空状態（林縁グローブ温度測定点：ポイントC付近）



付録写真-12. 天空状態（林内グローブ温度測定点：ポイントE）