

都市内緑地の環境調節効果に関する実測研究

Micro-climatic Survey of Green Canopy as Urban Cool-spot

成田健一*・清田誠良**

Ken-ichi NARITA and Nobuyoshi KIYOTA

要旨: 夏季における緑の環境調節効果を解明するため、広島市の中央公園を対象に緑地内外の微気象観測を実施した。公園の北東部分に位置する緑地を中心に、日中の海風方向にあたる南西～北東方向に裸地から緑地を貫く約 125m の測線を設定した。裸地では正味放射量の 63%が地中蓄熱 37%が顕熱流束に配分され、裸地の気温は日中林内より 1℃高く、早朝は逆に 0.5℃低かった。裸地に接する林縁では約 20m の範囲で気温に風上側の裸地の影響が認められた。一方、日中風下となる市街地に接する林縁部分では最大 2℃程度の昇温が認められた。この林縁部において渦相関法で水平方向の顕熱流束を求めた結果、平均流に逆らって市街地から 100W/m² を超えるフラックスが算定された。市街地に接する緑地の縁辺部は、風向にかかわらず終日市街地の影響を受けていると思われ、その範囲は境界からおよそ 50m と推測された。

キーワード: 都市気候・緑地・渦相関法・移流

Abstract: This paper describes the results of field observations on the micro-climate in and around the green space in an urban area. To get a horizontal air temperature distributions, the measured line was set along the sea-breeze direction from the bare ground to the tree stand. The heat balance and the correlation of instantaneous fluctuations of air temperature and wind were also measured with the ultra sonic anemometer both in the bare ground and under the forest canopy. The peripheral part of forest, which is adjacent to the asphalt pavement road, was strongly affected by surrounding built-up area regardless of the wind direction.

Key words: urban climate, green space, eddy correlation method, advection

はじめに

環境共生型の都市づくりにおいて、緑地はその中心的な存在として多方面から注目されている。緑地のもつ機能は多岐にわたるが、周辺の温熱環境に及ぼす微気象の影響も期待される効果の一つである。緑地の熱的効果を検討した研究は、丸田(1972)、本條・高倉(1984)、山田・丸田(1989)、浜田・三上(1994)、藤崎・半田(1994)など数多く存在するが、心理的な効果に比べて評価がしやすいとはいえ、実際の環境設計の資料とするには、緑地の規模の違いによる差異や年間を通しての効果の把握など、まだまだ多くの課題が残されている。本研究では、設計データとしての緑地効果の定量的な把握を目的に、広島市の中央公園において夏季の短期集中観測を実施した。

一方、緑地効果の定量的評価手法として、 $k-\epsilon$ などの二次元乱流モデルがしばしば用いられる(例えば Honjo and Takakura (1990/91))。しかしながら、その検証を

具体的に行った例はほとんどない。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、裸地から緑地を貫く側線を日中の海風方向に設定し、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。

1. 測定場所および測定方法

観測地点の周辺状況を図 1 に示す。中央公園は広島市の繁華街の北約 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

* : 日本工業大学・工学部・建築学科

** : 広島工業大学・環境学部・環境デザイン学科

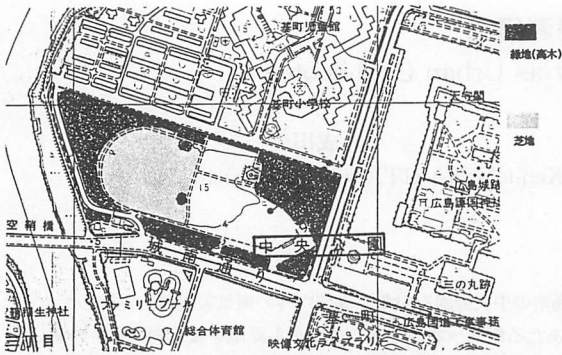


図1. 公園内の土地被覆と測線の位置(図中のメッシュは500m)



写真1. 熱画像測定点からみた観測サイトの俯瞰

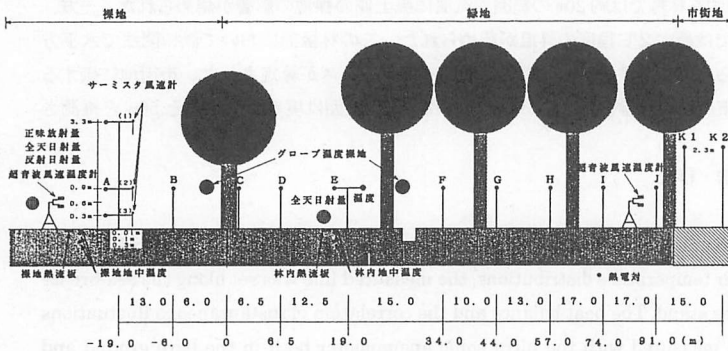


図2. 測器の配置状況



図3. 熱画像の測定地点(基町クレド屋上)

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。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。公園の北東部分に位置する緑地を中心に、日中の海風方向にあたる南西~北東方向に裸地から緑地を貫く約125mの測線を設定した。測器の配置状況を図2に示す。気温については、アルミの二重筒(40mmと50mmφ)および300×400mmの日射遮蔽板からなる自作の通風シェルター(通風速度は約6m/s)に温度センサーを装着し測定している。また、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(写真1・図3参照)。測定項目・測定機器および記録方法については表1にまとめた。観測期間は、晴天日が約1週間続いた後の1994年8月2日~3日の2日間である。

表1. 測定項目・測定機器ならびに記録方法

- (1) 全天&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
- (2) 正味放射量 : 正味放射計(EKO CN-40) [0.3~30μm以上]
 - * 林外or 林内基準点・測定高さ地上60cm
- (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1cm深
- (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(1)~(4) : データロガ(日電三栄 7V14) (0.1Hzでsampling)
- (5) 表面温度(地上) : 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)
 - (熱画像) : サーマトレーサ(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(鉛直分布) : サーマスタ風速計(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(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(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(0.32mmφ)
 - * 合計33点(図2参照)
 - 記録 : データロガ(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)
 - 記録 : データロガ(TEAC DR-F1) (10Hzでsampling)
 - (気温移動観測) : サーマスタ温度計(テクノベン D611)
 - * 測定高さ地上90cm(測線に沿って12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(KADEC-US) (1分毎でsampling)

2. 熱画像による表面温度測定

図4は、熱画像の温度値を放射温度計によるグラウンド・トゥールズ(放射率=1と仮定)の値と比較したもので、

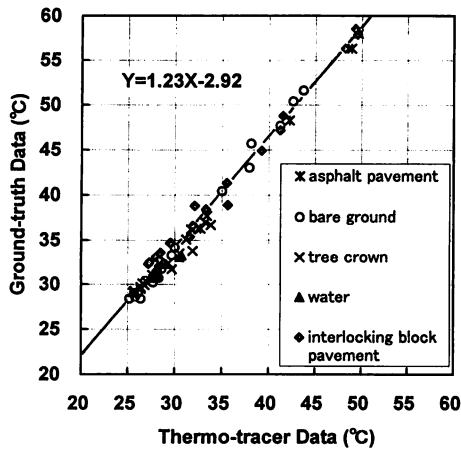


図4. 熱画像データと地上観測の比較

熱画像の値はグラウンド・トゥルースの値に比べ全体に低く、その差は高温な物体ほど大きくなっている。なお、対象物体による明確な差異は認められない。図5は、図4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ぞれ3℃程度低い結果となっている。

3. 裸地面の熱収支と温度変化

図6に、裸地および風下側の林縁で測定した超音波風速計の風向・風速の変化を示す。観測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。二地点の風速を比較すると、日中の海風時には、林内は裸地の半分程度となっているが、早朝の北風時には林内地点の方が風が強くなっている。なお、裸地面における風速の鉛直分布に関しては、3.3m高の平均風速に対する風速比で、0.9m高が0.85、0.3m高が0.74となっており、べき法則にあてはめると、べき指数=0.137(約1/7.3)となる。また、0.6m高の超音波風速計による乱れの強さは、平均で約40%であった。

図7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ある。裸地面のアルベドは平均して約0.31(図8)、また林内の日射量は林外の13%程度となっている(図9)。

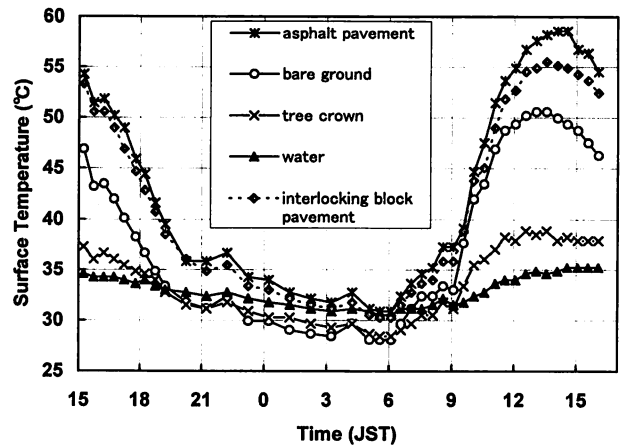


図5. 各種表面温度の時間変化

図10に、裸地面における熱収支成分の変化を示す。深さ1cmに埋設した熱流板の値は隙間が原因と思われる異常に小さな値(最大でも100W/m²程度)となったため、ここでは熱画像から算定した表面温度と深さ1cmの地温から求めた温度傾度と、一般に用いられる乾燥土壌の熱伝導率(0.3W/m·deg)から見積もられる値を地中伝導熱流(G)とみなした。夜間のRnの変化とも整合しており、ほぼ妥当な算定がなされていると判断できる。なお、算定されたGの値は、日中Rnの約63%程度となっている(図11)。

図12は、10分毎のデータから渦相関法で算出した顕熱流束(H)の値を、Rn-Gの値と比較したものである。Hの値はわずかにRn-Gより小さいものの、両者はよく一致している。渦相関の値がわずかながら過小評価された原因は、限られた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の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13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℃程度高い。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10)。

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

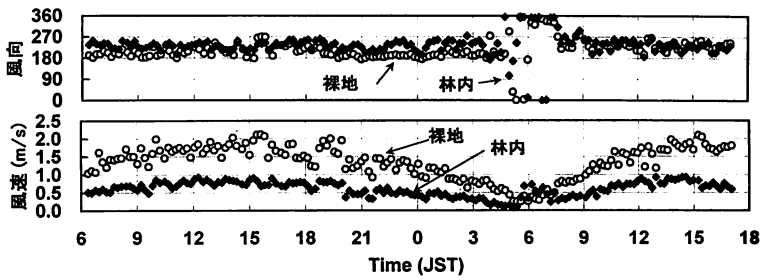


図6. 裸地および林内における風向・風速の時間変化

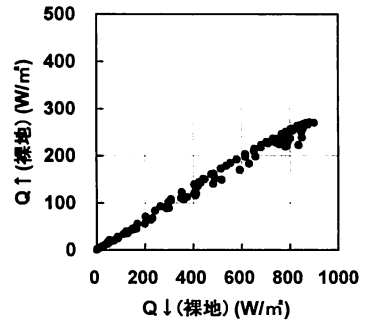


図8. 全天日射量と反射日射量の関係

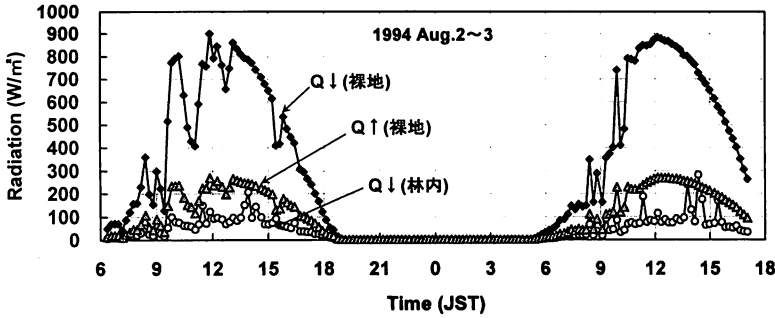


図7. 裸地および林内における日射量の変化

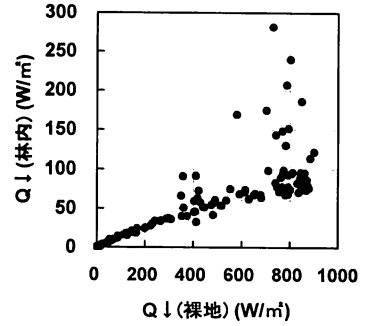


図9. 裸地と林内の全天日射量の比較

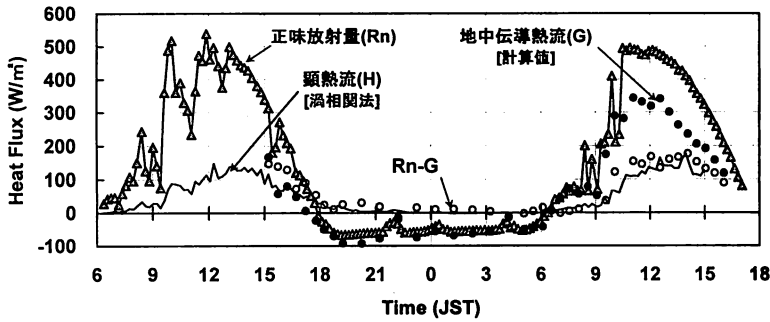


図10. 裸地における熱収支成分の時間変化

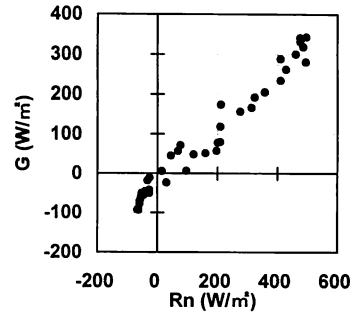


図11. 地中伝導熱流と正味放射量の関係

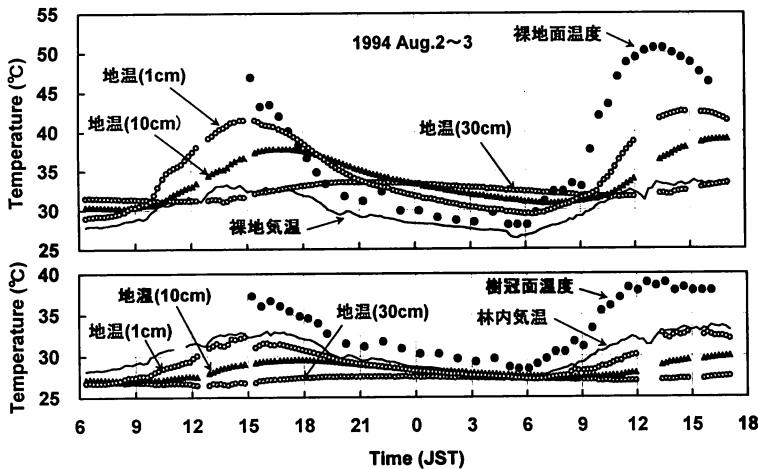


図13. 裸地および林内における気温・地温・表面温度の時間変化

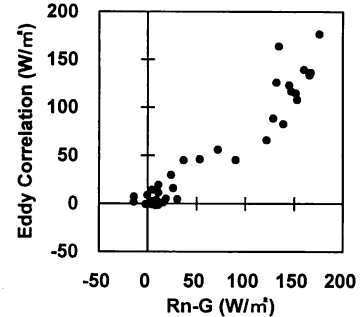


図12. 渦相関による顕熱流束の検討

度しかないため、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示している。

4. 測線に沿った気温分布

つぎに、測線に沿った気温分布について述べる。なお、以下の分布はすべて 10 分平均の値で、表示している時刻はその開始時刻を意味している。

図 14 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。

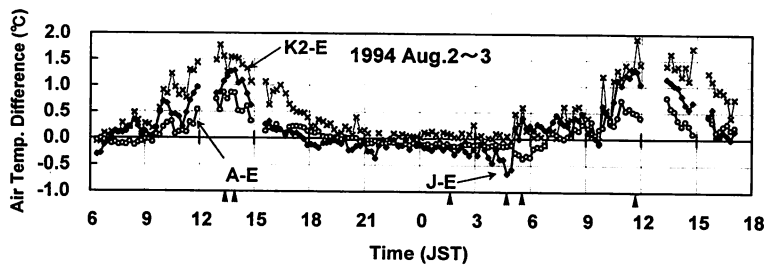


図14. 林内基準点(E)に対する各地点の気温差の時間変化

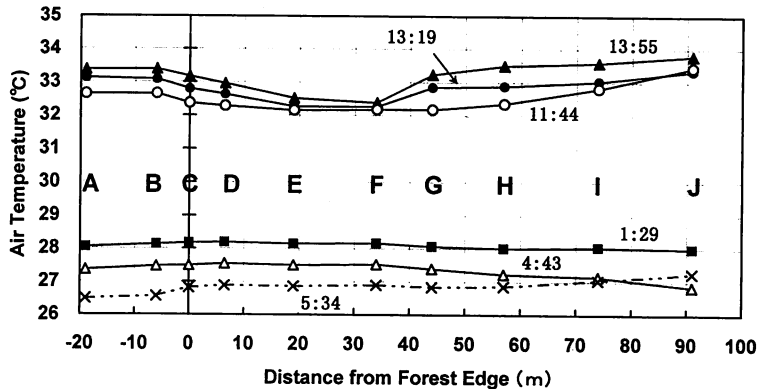


図15. 測線における気温の水平分布の例

また図 15 には、典型的な時間帯の気温分布を示した。深夜(1:29)の気温分布はほぼ一様であり、また早朝(5:34)には林内より裸地面の方が低温となる。一方、日中の南風時には裸地面の方が約 1°C 高温となっている。風上側の林端であるポイント(C)からポイント(E)までの約 20m の範囲で、気温分布に風上の裸地の影響が認められる。

以上のような風上域の分布に対し、ポイント(G)ないし(H)より風下側の市街地に近い部分でも、日中、顕著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およそ 50m である。

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。昇温量はいずれも日中に大きく、夜間はほぼゼロとなる。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さらに高温となっていることがわかる。ただし図6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が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。

5. 風下境界における気温と風速の相関

このように緑地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三種の風向(NW・N・NE)の成分風速を、超音波風速計の水平二成分より算出した(図 16)。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、早朝の 2 時間程度(5:30 頃~7:30 頃)のみである。

次に、これら三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 17 である。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、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 18 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 $100\text{W}/\text{m}^2$ 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。林床では鉛直方向の顕熱流束が終日ほぼゼロであることを考慮すると、この水平流は緑地の気温形成に有意な影響を与えているものと思われる。

おわりに

今回の測定では、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顕熱流束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。

なお、今回の測定では、流入風速が 3.3m 高さで 3m/s 程度と比較的弱かった。また、緑地の形状についても必ずしも完全な二次元性を仮定できない面もある。今後、種々の気象条件下や規模の異なる緑地において、さらなる検討が必要である。

謝辞

本研究は、平成 6 年度文部省科学研究費補助金(一般研究 C : 課題番号 06650656、代表者: 成田健一)によるものである。観測の実施に際しては、広島市役所緑政課に格段の配慮を頂いた。また、広島大学総合科学部(現・立正大学)の福岡義隆先生より測器の一部をお借りした。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 藤崎健一郎・半田真理子(1994): 公園、街路等の植栽が微気象に及ぼす影響, 造園雑誌, 57(5), 151~156

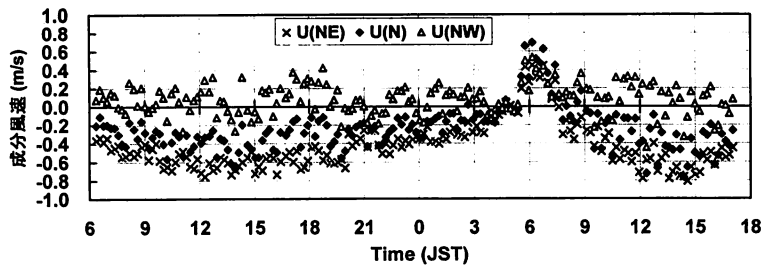


図16. 三種類の風速成分の時間変化

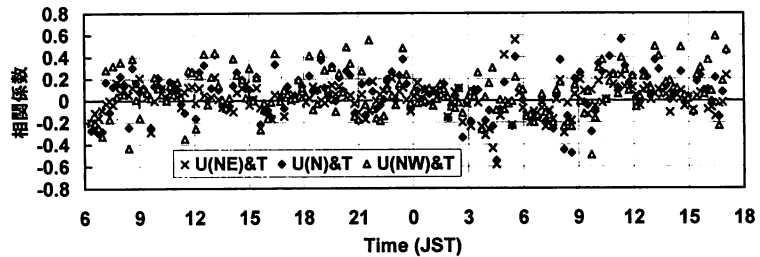


図17. 三種類の風速成分と気温変動との相関係数の変化

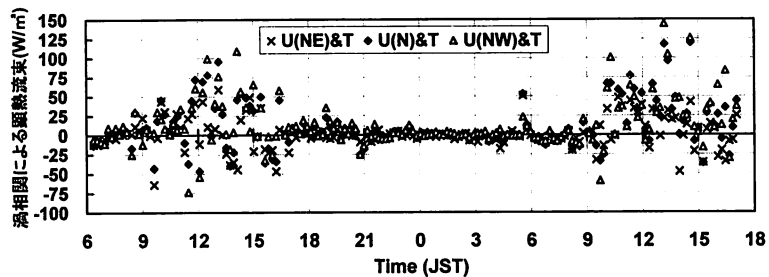


図18. 渦相関による三種類の風向成分の水平顕熱流束

- 2) 浜田 崇・三上岳彦(1994): 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
- 3) T. Honjo and T. Takakura (1990/91): Simulation of Thermal Effects of Urban Green Area on their Surrounding Areas, *Energy and Buildings*, 15-16 443~446
- 4) 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的解析, 農業気象, 40(3), 257~261
- 5) 丸田頼一(1972): 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
- 6) 山田宏之・丸田頼一(1989): 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