

新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測

Observations of evaporation efficiency and thermal environment in Shinjyuku-Gyoen Park

成田健一*・三上岳彦**・菅原広史***・本條 毅****

Ken-ichi NARITA, Takehiko MIKAMI, Hirofumi SUGAWARA and Tsuyoshi HONJO

要旨：新宿御苑を対象に、夏季の熱収支と温熱環境の実測を行った。中央部の芝生広場において、放射収支ならびに渦相関法による顕熱および潜熱フラックスの測定を行い、これらのデータからヒートアイランド対策効果の評価で重要となる熱収支パラメータ「蒸発効率」を算定した。潜熱フラックスの値は正味放射量の約2/3に達しており、蒸発効率の値はおおむね0.4程度となった。また、自作の移動観測カートを用い、緑陰内外の温熱環境を比較した。日射影響を除くことで純粋な気温差を評価すると、日中でも1℃にみたなかった。日中の緑陰において体感される涼しさは、気温差によるものではなく、放射環境による差異であることを定量的に示した。

キーワード：ヒートアイランド、都市内緑地、クールアイランド、熱収支、温熱快適性

Abstract : In this paper, we show the results of micro-climatological observations performed in large park "Shinjyuku Gyoen" during summer. According to the eddy correlation measurement, latent heat flux at the lawn surface was about 2/3 of net radiation in mid-day, and evaporation efficiency was estimated about 0.4 through the observation period. The air temperature difference between under tree crown and outside sunny place is less than 1 degree even in mid-day. Therefore, the thermal comfort under the tree is mainly due to the difference of radiation environment.

Key Words : heat-island, urban green, cool-island, heat budget, thermal comfort

はじめに

新宿御苑は、新宿駅東側の繁華街近くに位置し、芝生地、樹林地などからなる周囲約 3.5 kmの緑地である。ここでは、都市内の大規模緑地が造り出すクールアイランドや冷気のにじみ出し現象の存在が報告されている（本條ほか2000、菅原・成田2003、成田ほか2004）。また、クールアイランド現象の考察において問題となる、周辺市街地の代表温度についても検討されている（高野ほか2003）。本報では、これら緑地の熱的効果の解釈に重要な熱収支観測を、御苑の中央芝生広場で実施した結果について報告する。

これまでも緑地での熱収支観測は報告されているが、信頼できる精度で実測が行われている例は、本條・高倉1984、神田ほか1997など非常に少ない。新宿御苑においても、成田ほか2004で一部報告されているが、顕熱フラックスの大きさを評価したのみにとどまっている。特にヒートアイランド対策としての緑地効果の評価を念頭に置

くと、数値シミュレーションで用いられる各種の熱収支パラメータを、観測において精度良く求めておくことが不可欠である。そこで今回は、熱収支の全体像と日中の緑地効果の評価を大きく左右するパラメータである「蒸発効率」の把握に焦点をあて観測を行った。

一方、夜間の冷気生成に関しては樹林地よりも芝生面が寄与していることが報告されている（成田ほか2004）が、日中の緑地の効果としては緑陰で体感される涼しさが大きい。しかし、日中における緑陰内外の気温差の測定は、日向と日影の気温を比較することになるため、気温測定における日射影響を完全に防がないと、真の気温差は評価できない。既存の報告では、その意味で測定手法に問題のある例が少なくない。そこで、今回は御苑内の樹冠下の緑陰空間と日向の芝生面やアスファルト面の気温差を注意深く測定し、また放射環境に関しては短波放射と長波放射を個別に評価することで、緑陰の涼しさの物理的メカニズムを明らかにすることを併せて試みた。

*日本工業大学工学部、**東京都立大学理学研究科、***防衛大学校地球海洋学科、****千葉大学園芸学部

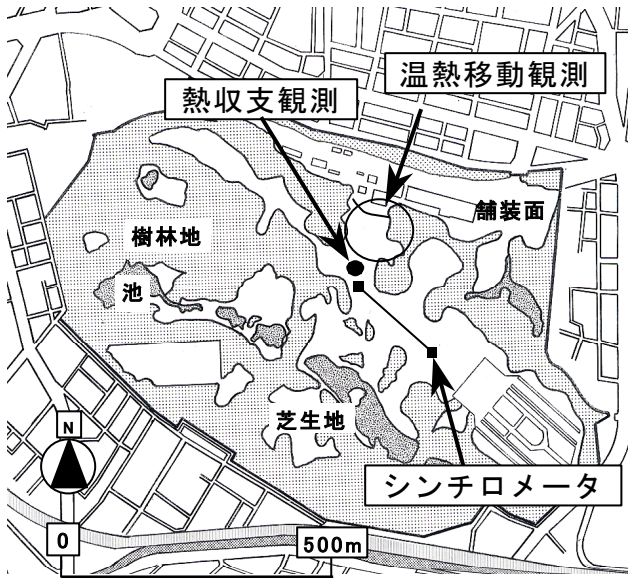


図1 観測エリアと測器の配置

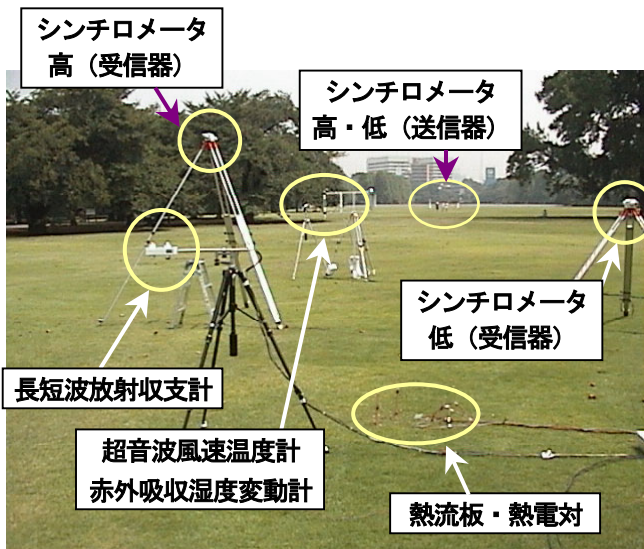


図2 熱収支観測における測器の配置状況

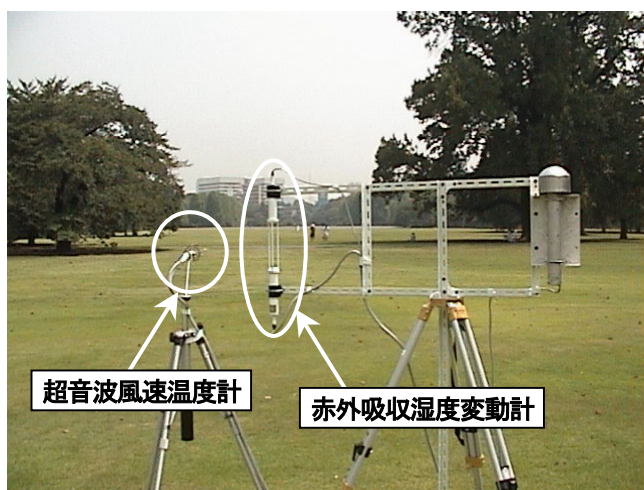


図3 乱流フラックス関連の測器配置

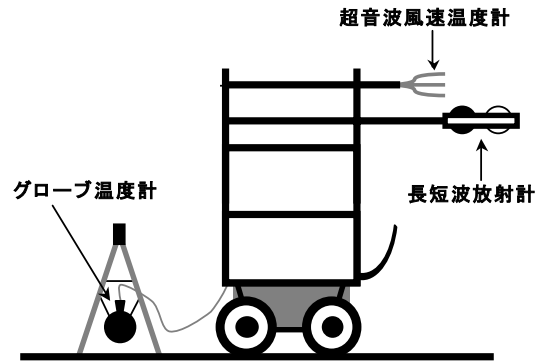


図4 温熱観測用の移動カート

1. 観測方法

今回の熱収支観測で対象としたのは、新宿御苑の中心付近に広がる芝生広場である(図1)。まず、放射4成分を長短波放射収支計(EKO MR-40)で計測し、熱流板と地温測定用の熱電対を深さ1cmに埋設した。さらに5cmスパンの3次元超音波風速温度計(KAIJO DA-600)と赤外吸収湿度変動計(カイジョー、AH-300)を用いて、顕熱フラックスと潜熱フラックスを渦相関法により求めた。測定高度は1.52m、サンプリング間隔は放射各成分と地中熱流量・地温は1分毎、乱流成分は10Hzとした。また、渦相関法の評価時間は30分とした。また、シンチロメータ(Scintec SLS20とSLS40)をパスが平行になるよう2高度(1.5mと2.4m)に設置し、シンチレーション法による顕熱測定も併せて実施した。パス長さは200mとした。測器の配置状況を図2・図3に示す。観測期間は、2001年8月1日~6日である。

これらの熱収支観測に加え、樹冠下の緑陰と日向となる芝生面・アスファルト面の温熱環境の比較観測を、自作カート(図4)を用いて行った。カートには、長短波放射収支計(EKO MR-40)と、日射の影響を受けない気温評価のため3次元超音波風速温度計(KAIJO DA-600)を乗せ、図1の円内において樹林地・芝生地・アスファルト面の3箇所で、各地点15分間、日中の温熱環境の移動測定を行った。

2. 芝生面の熱収支

2.1 芝生面の熱収支とパラメータの同定

図5(a)に、短波放射(S)と長波放射(L)の下向き・上向きの各成分とアルベドの時間変化を示す。芝地面のアルベドは平均0.22であった。上記の放射4成分から求めた正味放射量(R_n)、ならびに渦相関法(e.c.)による顕熱フラックス(H)と潜熱フラックス(LE)の変化を図5(b)に示す。なお、渦相関法では乱流フラックスが過少評価されている(神田ほか2002)が、ここでは地中への伝導熱流束(G)は残差($R_n - H - LE$)として評価した。

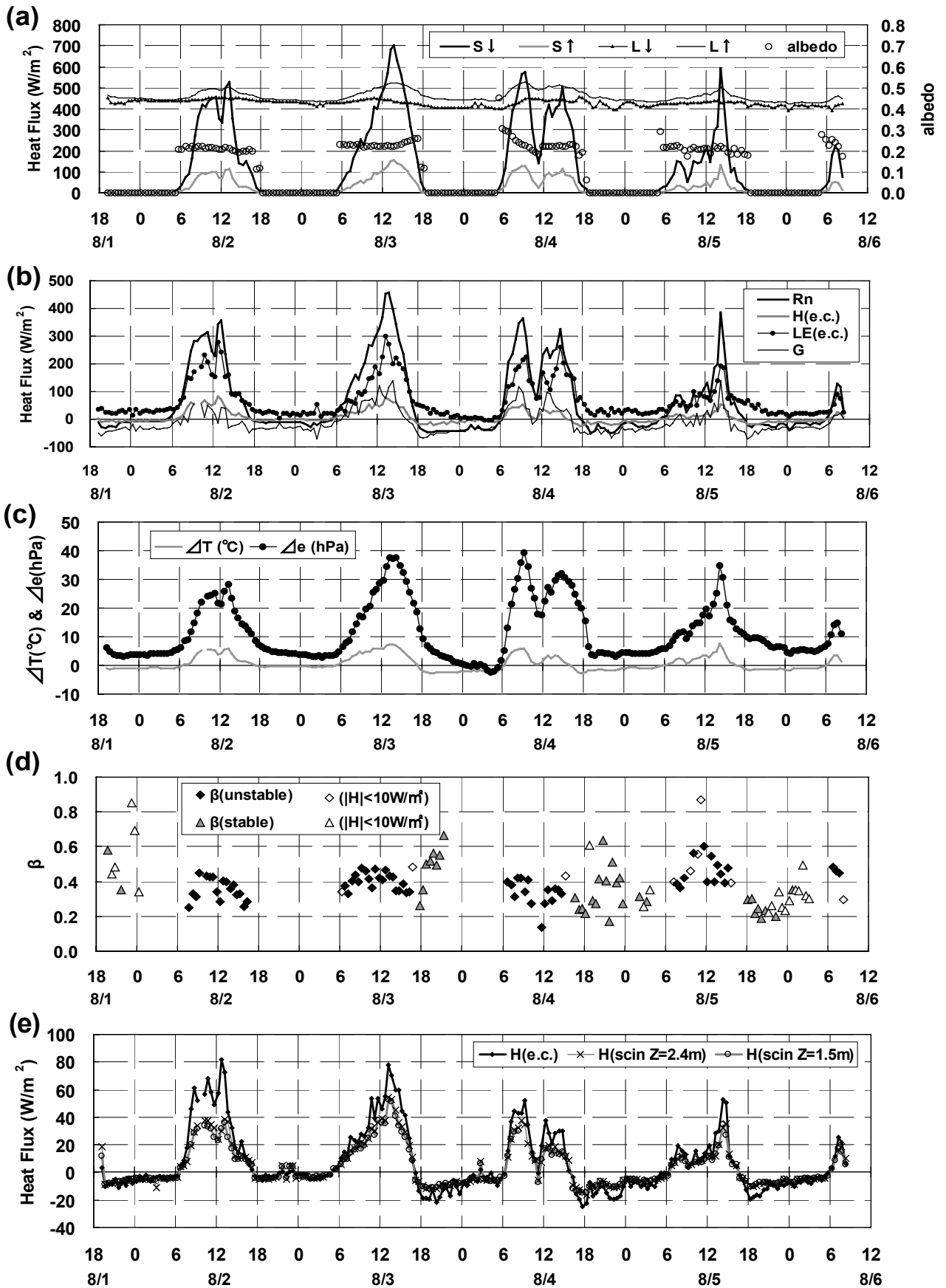


図5 芝生面における熱収支測定結果—(a)放射4成分とアルベドの時間変化、(b)熱収支の各項の時間変化、(c)表面と空気層との温度差と水蒸気圧差、(d)蒸発効率 (β) の時間変化、(e)顕熱フラックス比較

図6には、顕熱および潜熱フラックスと正味放射量の関係を示したが、正味放射量の約 2/3 が潜熱に変換されており、顕熱はその 1/4 すなわち正味放射量の約 1/6 となっている。なお、顕熱フラックスは夜間マイナスとなるが、潜熱フラックスはほぼ終日プラスで推移している。

図5(c)は芝生表面と空気層(高さ1.52m)との温度差 ΔT と蒸気圧差 Δe の変化を示したもので、表面温度(T_s)は放射率 $\epsilon=0.97$ を仮定し、次式から求めた。

$$L \uparrow = \epsilon \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon)L \downarrow \quad (1)$$

次に、(2)式により芝生面の表面温度(T_s)と気温(T_a)との温度差で渦相関法による顕熱フラックス(H)を除いて対流熱伝達率(α_c)を求めた。

$$H = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (2)$$

一方、同じように渦相関法による潜熱フラックス(LE)と蒸気圧差($\Delta e = e_s - e_a$)から(3)式により物質伝達率(k)と蒸発効率(β)の積(βk)を求めた。

$$E = \beta k (e_s - e_a) \quad (3)$$

ただし、 E :蒸発フラックス($g/m^2 \cdot h$)、 e_s :表面温度に対する飽和水蒸気圧(hPa)、 e_a :空気の水蒸気圧(hPa)、 k : (蒸気圧基準の)物質伝達率($g/m^2 \cdot h \cdot hPa$)を表す。

ここで、(4)式による熱伝達と物質伝達のアナロジー(レイス則)を仮定すると、顕熱フラックスに基づく対流熱伝達率から物質伝達率(k)を求めることができ、これと潜熱フラックスから求めた βk との比を取ることで、蒸発効率(β)を求めた。

$$k \times (Le)^n = (\alpha_c / C_p) \quad (4)$$

ただし C_p は湿り空気の比熱、 Le はレイス数($= Sc / Pr$ 、 Sc :シュミット数、 Pr :プラントル数)で、ここでは $(Le)^n = 0.83$ としている。

図7に顕熱フラックスからアナロジーを仮定して求めた k と、潜熱フラックスから求めた βk の各々と風速との関係を示した。最終的に、これらの比から求めた β の時間変化を示したのが図5(d)である。なお、 β は大気安定度で変化するものではないが、計算に用いている対流熱伝達率に安定度依存性が見られたことから、ここでは安定時と不安定時に分けて表現している。蒸発効率は、ややばらつきが大きいものの0.4前後の値で推移している。これまで、ヒートアイランドの数値計算では緑地に

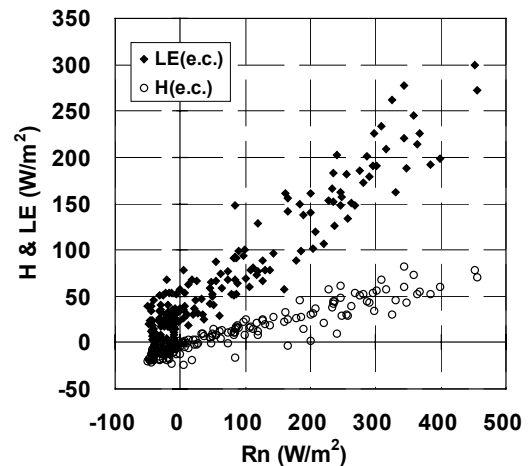


図6 顕熱・潜熱フラックスと正味放射量の関係

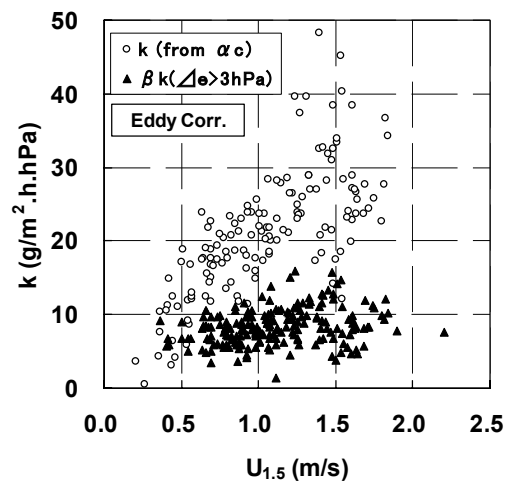


図7 物質伝達率と風速の関係

に対する値として0.3が用いられてきたが、その根拠となっているのは、近藤1994などで紹介されている牧草地の0.2~0.4という値である。芝生面に対する値として比較しうるデータはないが、ほぼ妥当な結果と思われる。

2.2 渦相関法とシンチレーション法の顕熱比較

2高度で測定したシンチレーション法による顕熱フラックスと渦相関法による顕熱フラックスの比較を図5(e)に示す。2つの異なる高さにおけるシンチレーション法の結果は非常に良く一致しているが、それらの値は、渦相関法による顕熱よりもかなり小さく、平均すると概ね2/3程度の値となっている。図8は、顕熱フラックスとして渦相関法の値を用いた場合とシンチレーション法を用いた場合の対流熱伝達率 α_c を比較したものである。顕熱の差を反映して α_c も約2/3の値となるが、バラツキはシンチレーション法の方がはるかに小さく、渦相関法よりも安定したフラックスが得られていることを示唆している。これはパス平均の値を測定するシンチレーション法の空間代表性における優位性が現れた結果と思われる。一方、潜熱フラックスが卓越する条件下では、シンチレーション法の精度が

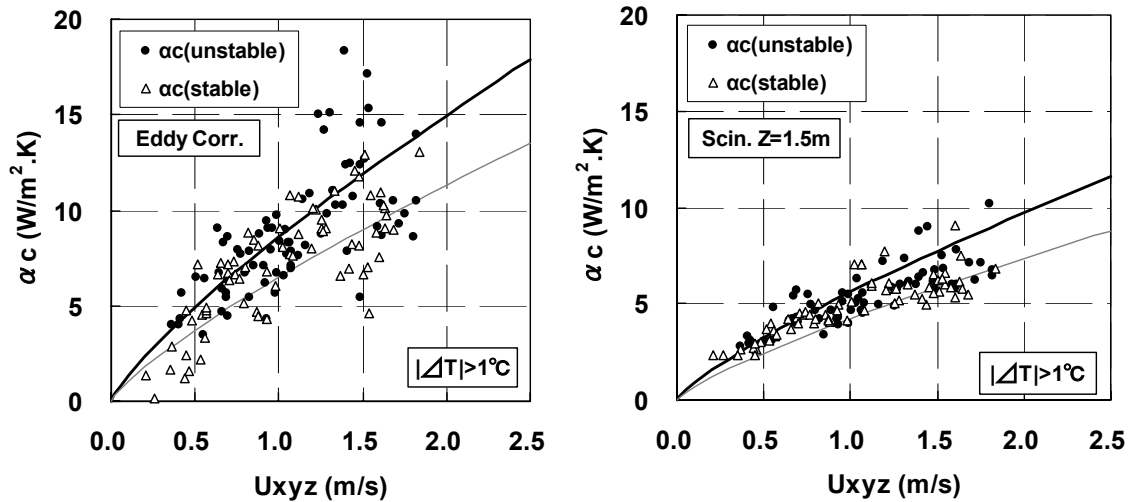


図8 渦相関法（左）とシンチレーション法（右）による対流熱伝達率の比較

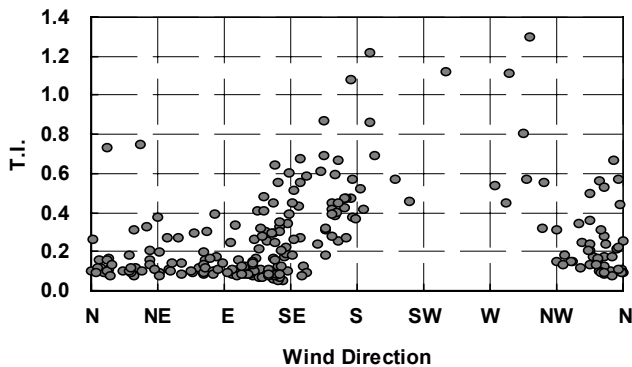


図9 乱れの強さ (T.I.) と風向の関係

一般に悪くなることが知られている。既存の草地における対流熱伝達率の結果（例えば、萩島ほか 2000）と比較しても、シンチレーション法による熱伝達率の値は小さいことから、顕熱フラックスの絶対値としては、渦相関法の方が信頼できると判断した。

また図5(e)によれば、両者の比率は8月2日の日中と8月3日の日中ではやや異なっている。これは風向の変化と対応させると、両日の風向の違いに起因していると思われる。図9は渦相関法を適用した超音波風速計の乱れの強さ (T.I.) と風向の関係で、十分な芝地のフェッチが確保されるNW~NE~SEではおおむね0.2以下であるのに対し、それ以外の樹林地からの風向では乱れの強さが格段に大きくなっている。このような局所的な乱流性状の変化が渦相関法によるフラックスに影響したものと考えられる。なお、両日で図5(d)の β に大きな差異が現れなかったのは、潜熱・顕熱の両方に上記の影響が同様に作用したためと思われる。

なお、2高度でのシンチレーション法から地面修正量の推定を試みたが、草丈がわずか3cm程度であったため、満足な結果は得られなかった。

3. 芝生地と樹林地の温熱環境比較

次に、観測カートを用いた温熱環境の移動観測結果について述べる。わずかな気温差を正確に把握するため、器差による影響を避け、ここでは同一測器による移動観測という手法をとった。観測カートに加え、グローブ温度計を用いて平均放射温度(MRT)の測定も併せて行った。測定時間帯は、日中の10時から16時までとした。日射影響下のグローブ温度の解釈には議論があるが、ここでは特に補正等を行っていない。体感に対する長波放射と短波放射の感度の取り扱いも含め、検討の余地が残されている点である。

図10は、超音波風速温度計による各地点間の気温差で、合わせて熱収支観測点(GRS)における日射量の変化を示した。なお、対象とした緑陰地点の日射量は、日向面の5~7%であった。これを見ると、緑陰内外の気温差(芝生地-樹林地、アスファルト面-樹林地)は、日射量が約800W/m²に達する時間帯でも1°Cに達していない。超音波風速温度計による気温は音波の到達時間から算出されるため、原理的に日射の影響を受けない。この音速から求める気温は、他の温度計に比べ絶対値の精度は劣るが、日射影響を防いで温度差を評価するという意味では確実な手法の一つである。

一方、図11は各地点での平均放射温度(MRT)を示している。芝生地、アスファルト面では気温よりもはるかに高くなっているが、樹林地ではほぼ気温に等しい。樹林地での地表面温度が低いことが大きな要因であり、そのことは上向き長波(L↑)からも分かる(図13)。このため、樹林地の緑陰では放射熱の授受が小さくなり、体感的にすこしやすくなっている。図12は各地点の反射日射量(S↑)を示している。アスファルト面はアルベドが小さいため、最大で芝生地の約1/3となっている。こ

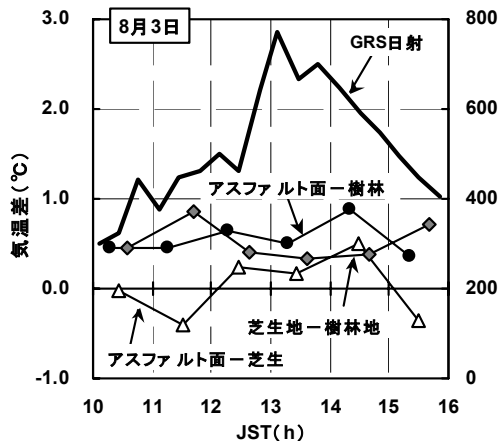


図10 緑陰内外の気温差と日射量

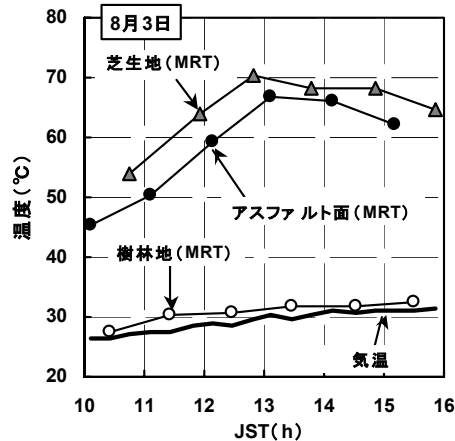


図11 各地点のMRTと気温の比較

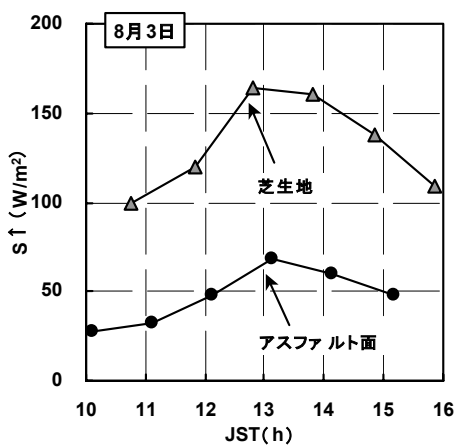


図12 芝生面と舗装面の反射日射量

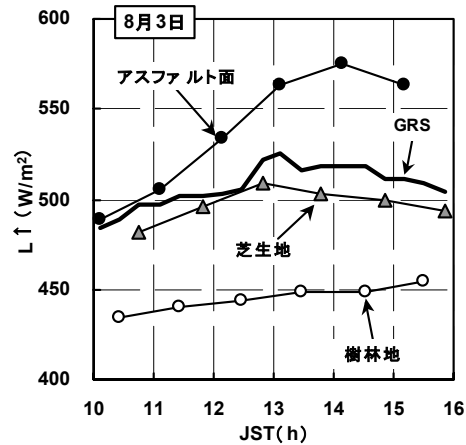


図13 各地点の上向き長波放射量

の効果が表面温度差に起因する長波放射の差異を上回るため、結果としてアスファルト面よりも芝生地の MRT がわずかに高くなるという結果になっている。

以上のことから、日常的に体感される緑陰での涼しさは、気温差によるのではなく、放射環境の違いに起因しているといえる。

おわりに

芝生面の熱収支パラメータとして、アルベドは 0.22、蒸発効率は 0.4 程度という結果が得られた。潜熱フラックスの値は正味放射量の約 2/3 に達しており、一方大気を加熱する顕熱フラックスは最大でも 100W/m² に達していない。日中の緑陰において体感される涼しさは、気温差によるものではなく、放射環境による差異であることを定量的に明らかにした。

謝辞

本観測の実施にあたり、新宿御苑管理事務所の方々に便宜をはかっていただいた。また、高野武将ほか多くの学生諸氏に御協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

引用文献

- 萩島 理・谷本 潤・片山忠久・西山貴志 (2000) 草地における対流熱伝達率と熱収支に関する長期実測, 日本建築学会技術報告集 No.11, 155-160
- 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, 257-261
- 本條 毅・菅原広史・三上岳彦・成田健一・桑田直也 (2000) 新宿御苑のクールアイランド効果の実測, 環境情報科学論文集, 14, 273-278
- 神田 学・森脇 亮・高柳百合子・横山 仁・浜田 崇 (1997) 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
- 神田 学, 渡辺 力, マルコス オリバー レッツェル, ジークフリード ラッシュ (2002) LESによるインバランス問題に対する検討 (第1報) 大気境界層スケールの対流構造の影響, 水文・水資源学会誌, 15, 243-252
- 近藤純正 (1994) 水環境の気象学. 朝倉書店, 東京, 348pp.
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅・木村圭二・桑田直也 (2004) 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象, 地理学評論, 77-6, 403-420&口絵
- 菅原広史・成田健一 (2003) クールアイランドの形成, 日本風工学会誌, 97, 23-27
- 高野武将・成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅 (2003) 街路空間における放射量と温度の空間平均と変動-新宿御苑周辺市街地を例として, 環境情報科学論文集, 17, 47-52