

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

神田 学*¹・森 脇 亮*¹・高 柳 百合子*¹
横山 仁*²・浜田 崇*³

要 旨

明治神宮の気候緩和機能・大気浄化機能を熱収支・汚染物質吸収量の観点から定量的に把握することを目的として1996年8月に集中観測を行い、以下の成果が得られた。1) 神宮の森の放射収支・熱収支が算定された。正味放射量の約7割は蒸発潜熱に変換されており、日中に神宮の森が放出する水分量は、1秒あたり約150kg(ペットボトル100本分)に達する。また都市域の熱収支(神田ほか, 1997)と比較することにより、神宮の森の気候緩和機能が定量的に把握された。2) ポロメーターにより計測される1枚の葉の蒸散・気孔コンダクタンスは、計測地点の局所的な気象条件の影響を大きく受けるため、そのままでは群落全体の蒸散量に換算できないことが示された。3) 晴天日の夕方的一般風が弱まる時間帯において、 0.5ms^{-1} 以下の弱い森林吹き出し風の存在が示された。4) 林冠上における汚染物質の鉛直下向きフラックスを傾度法を用いて算定したところ、日中の平均値として、 O_3 は約 0.30ppb ms^{-1} 、 NO_2 は約 0.11ppb ms^{-1} となり、神宮の森による汚染物質吸収量が定量的に把握された。5) 神宮の森で測定した汚染物質の濃度変動特性を検討した結果、物質によりその挙動が異なった。特にSPM濃度の日変化は夜間にピークをもち、近接市街地とは逆の傾向を示す。これは夜間森林上に形成される安定層の影響であることが推察された。

1. はじめに

都市の温暖化(ヒートアイランド)・大気汚染などの環境気象学的問題に対して、緑地の有する気候緩和機能・大気浄化機能を有効に利用することが期待され、多くの研究が行われている(例えば、戸塚・三宅, 1991; 神田, 1992のレビューが詳しい)。植生の気候緩和機能・大気浄化機能の把握とは、その蒸散量(熱収支)・汚染物質吸収量を定量的に把握することに他ならない。既存の研究は、チャンバー実験・ポロメーター観測などに基づく「一枚の葉」に着目した植物生理学的アプローチと、接地境界層の理論を駆使し「植物群落の平均像」の抽出に焦点を絞った微気象学的アプローチに大別され、体系化されている。

しかしながら、工学的視点より、これらの知見を都

市内大規模緑地の環境気象学的影響の定量的評価に応用しようとした場合、以下のような重要な問題点が残されている。1) 山岳・演習林・実験室と異なり、実際の都市内大規模緑地(森林)において計測された熱収支・汚染物質収支の定量的データがないこと。このことは、モデル予測の信頼性のチェックなどが行えないことを意味する。2) 上述した植物生理データと微気象データを兼ね備えた現地観測データがないこと。特にモデル予測の際、植物生理特性は結果を支配する重要な入力パラメータとなるため、植物生理データは気象データと同様重要である。1)については、都心の大規模な森林緑地の場合、安全性の面で測定の許可・制約が厳しいことが原因として上げられよう。実際、人工衛星の熱画像解析(例えば、本條・高倉, 1986; 梅干野, 1995)や、地上レベル(1.5m)での気温・汚染物質の水平分布(例えば、井上・蜂屋, 1986; 浜田・三上, 1994)などの、比較的測定が容易な項目については研究事例があるものの、森林上に計器の設置を要する熱収支や蒸散量の気象学的計測例は著者の知る限

*¹ 東京工業大学工学部. *² 東京都農業試験場.

*³ 長野県自然保護研究所.

—1997年2月6日受領—

—1997年7月9日受理—

りない。一方、2)について、SiB(Sellers *et al.*, 1986) や BATS (Dickinson *et al.*, 1993) などのモデルで標準的な植物生理特性が準備されているものの、同じ樹種でも立地条件が異なればその生理特性が大きく異なることは林学の分野で広く認められている。とすれば、植物生理特性の定量的評価にあたっては、現地での観測に基づくモデルのキャリブレーションが不可欠ということになる。植物生理データと気象データを同化させるための手法が非常に重要となってくるが、それらの議論は十分になされているとは言えない。

今回、都心の代表的大規模緑地である明治神宮の森(以下、神宮の森)において、短期間ながら前例のない集中観測が特例的に許可された。本来、表題のような議論は長期観測に基づき一般性を持たせることが好ましいことは言うまでもないが、上述したように都市内の大規模緑地における植物生理および微気象の同時観測データの希少性・重要性を鑑み、報告することにした。本論は2編から成るうちの前編であり、集中観測結果を述べる。後編では我々が提案している森林環境気象モデルによるシミュレーション結果が述べられる。

2. 観測場所

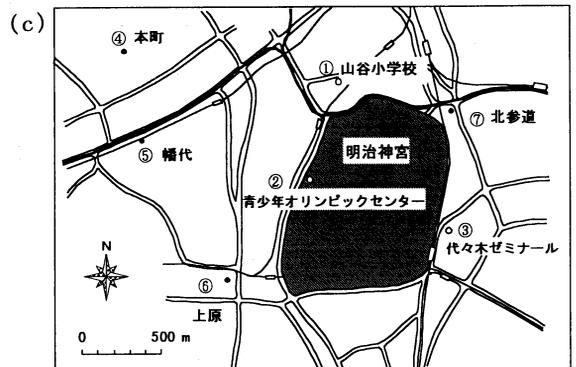
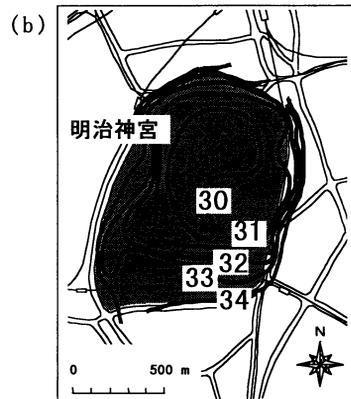
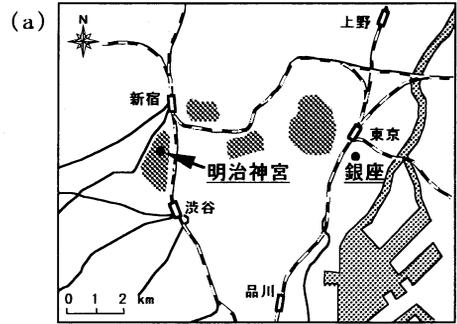
2.1 熱収支観測に必要な立地条件

都市内森林の蒸散・熱収支データが乏しいことにはいくつかの理由があるが、最大のネックは樹高と水平スケールである。気象学的熱収支計測手法のほとんどが、接地境界層の仮定を用いており、これを満たすには、1) 森林全体がほぼ平坦であること、2) 森林直上の遷移層(樹高の1.2倍程度)より上空に計器を設置すること、3) 森林上の内部境界層内(フェッチの1/50~1/100の厚さ)に計器を設置すること、の3条件を充足する必要がある。仮に20mの樹高の森林に対して、2), 3)の条件を同時に満たすには、緑地の水平直径が1km程度でなくてはならないが、このような場所は、都内では「皇居」「神宮の森」「新宿御苑」などに限られる。

2.2 神宮の森での観測の意義

郊外の森林や演習林での観測に対して、神宮の森での観測は以下の点で特別な意味を持つものと考えられる。

1) 北は新宿副都心、南は渋谷の繁華街といった、世界を代表する超過密商業地帯の中心に位置しており(第1図a)、「都市内の大規模緑地」の特徴を議論するのに極めて適していること。



第1図 測定場所。(a) 神宮の森位置図 (b) 神宮の森内の観測ステーション(矢印)と水平気温分布の計測例 (c) 神宮の森周辺の風向・風速測定場所(①~③)と渋谷区大気汚染等常時測定局(④~⑦)の位置図。

2) 水平約2km直径の敷地内がほぼ平坦で、芝地や宅地が少なく、ほとんどが樹高20m程度の樹木で覆われており、上述した気象学的観測条件を満たしている、また、そのため解析が行いやすいこと。

3) 神宮の森は、80年前(1915~1919年)に造成された人工林である。従って、その水文・気象学的効用

を定量的に把握することは、今後の都市内の大規模緑化計画を評価する際に、重要な実績資料を与えることになる。

2.3 神宮の森における観測点

第1図bは、1995年8月10日に行った水平気温分布の計測結果である。測定は地上高1.5m、66地点で行い、4台の温湿度計を用いて移動測定した。時差についてはデータ処理時に補正した。神宮の森内部では気温が周囲の街区より最大で約4℃以上低くなっており、神宮の森自体が局所的なクールアイランドを形成している。今回報告する現地計測は、図中矢印で示した明治神宮本殿の北側にある参道沿いの砂利置き場で行った。樹種は、クスノキ、スダジイなどの常緑広葉樹と、イチョウ、イヌシデなどの落葉広葉樹を含んだ雑木林となっている(宮脇ほか, 1980)。観測点近傍は、イチョウが優占種であったため、植物生理の計測はイチョウについて行った。森林物性値をまとめて第1表に示した。なお、葉面積指数は直接計測が行えないためLi-Cor.社製のプラントキャノピーアナライザー(LAI-2000)を用いた。

2.4 周辺市街地における気象観測点

神宮の森からの吹き出し風の有無などを調べるべ

く、神宮の森周辺数地点のビルの屋上で風向・風速観測を行った。これらの測定点はいずれも神宮の森に隣接し、周辺の建築物や神宮の森より明らかに高く、吹き出し風の観測に適切な場所である。また、神宮の森と周辺域の汚染物質濃度の比較を行うため、渋谷区の大気汚染等常時測定局(以下、常時測定局)の測定データも併用した。これらを併せて、第1図cに示す。さらに、本観測と同時期に銀座(第1図a参照)において熱収支測定を行っており(詳しくは、神田ほか, 1997)、大気安定度の比較を行った。

3. 観測日概要

観測は1996年8月6日より準備・予備観測を含め8月10までの5日間にわたって行われたが、ここでは欠測の少なかった1996年8月9日~10日の2日間のデータを中心に議論を進める。当日の天気は9日は晴れ時々曇り、10日は晴れ一時曇りであった。当日の天気図を第2図a、bに示す。両日ともベーリング海に中心を持つ高気圧が日本に張り出しており、典型的な夏型の気圧配置とは言えず、観測期間を通して北東気流が卓越していた。なお周辺域での比較観測は、8月2日より8月13日まで行われている。

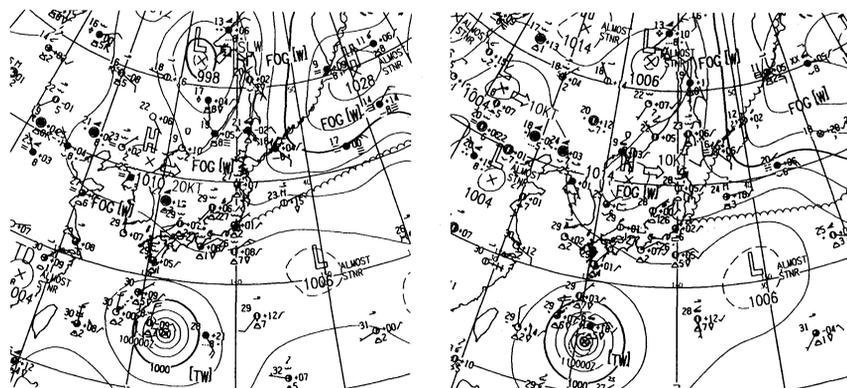
4. 観測手法概要

4.1 観測ステーション

本研究では、植物生理学的手法と気象学的手法の併用を観測の柱としているが、葉の蒸散測定(手動)も、熱収支測定(自動)も、林冠付近での計測・作業が中

第1表 森林物性値.

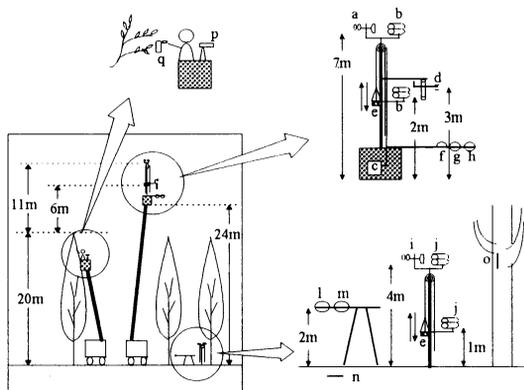
項目	値	測定原理
平均樹高	20(m)	高所作業車撮影
葉面積指数	5.7(m ² m ⁻²)	Li-Cor. LAI-2000計測
樹木密度	0.12(本 m ⁻²)	サンプリング計測



第2図 当日の天気図(気象庁提供) (a) 8月9日 (b) 8月10日.

第2表 測定項目及び測定機器.

項目	測定機器	測定間隔及び解析手法	設置場所
気温・湿度	熱電対湿度計* 超音波風速計(KAIJO Cor.)	1分間隔, 移動平均 1/8秒間隔→渦相関法	b, j d
風向・風速	風向計* 三杯式風速計* (Campbell Scientific, Inc.) 超音波風速計(KAIJO Cor.)	1分間隔 1分間隔, 移動平均 1/8秒→渦相関法	a, i a, i d
H ₂ O・CO ₂	炭酸ガス・水蒸気変動計 (Advantec Inc.)	1/8秒→渦相関法	d
日射量	全天日射計* (英弘精機)	1分間隔, 30分平均	g, m
長波放射量	赤外放射計* (英弘精機)	1分間隔, 30分平均	f
純放射量	純放射計* (Campbell Scientific, Inc.)	1分間隔, 30分平均	h, l
熱流量	熱流板* (英弘精機)	1分間隔, 30分平均	n, o
植物群落温度	サーモグラフィー (日本アビオニクス社)	3分ごとに撮影	p
植物生理	拡散型ポロメーター (Li-Cor社, LI-1600)	15分ごとに3枚	q
葉面積密度	プラントキャノピーアナライザー (Li-Cor社, LAI-2000)		
O ₃	紫外線吸収式O ₃ 計 (荏原実業)	10秒平均, 3分ごとに 高度切り替え	c
NO ₂ ・NO	化学発光法式NO _x 計 (MONITOR LABS社)	〃	c
SPM	レーザー粉塵計 (柴田科学器械工業製)*	1分積算値, 5分ごと にトラバース測定	e



第3図 測定機器配置図.

心となる。しかしながら、神宮の森内での観測塔の設置は困難であることから、作業床高さ24mの高所作業車2台(それぞれ植物生理関連の計測と気象関連の計測用)を観測ステーションとして利用した。第2表に測定項目と測定機器およびデータ処理方法の一覧を、また計器配置の概念図を第3図に示す。第3図中に記したアルファベット記号は、第2表中のそれに対応して

いる。

4.2 植物生理学的測定

Li-Cor社製の拡散型ポロメーターLI-1600を用いて、個々の葉について光合成有効放射量、相対湿度、葉温、蒸散量、気孔抵抗といった、植物生理に関する項目を計測した。ポロメーター計測は、マニュアル操作で葉一枚ずつ測定するため(一枚につき約数分)、測定枚数に限界があるものの、植物の葉を傷つけずに自然の状態のままで葉の活性度を測定できる利点がある。本観測では15分ごとにイチョウの葉3枚を測定した。葉は地上から約20mの高さで日光の良くあたる場所のものを選んだ。このように任意に抽出した葉の生理計測データの利用可能性については考察で検討する。また、高所作業車上からサーモグラフィーにより広い範囲(約100m四方)の植物群落温度の計測を3分おきに行った。

4.3 気象学的測定

温度・相対湿度・風向・風速・日射量・長波放射量などの気象項目を、林冠上と林床部の2か所で測定した。とりわけ、森林一大気間の潜熱・顕熱の算定は重

要なので林冠上では、ポーエン比の算定が行えるよう2高度(平均樹高からの高さ6mと11m)で計測を行い、同時に超音波風速計と炭酸ガス・水蒸気変動計による乱流計測を併用している。熱流板を地中と樹体の複数点に取りつけ地中熱と樹体貯熱量の計測を試みている。なお、樹体貯熱量の計測にあたっては、曲面張り付け可能な薄型熱流板(50L×50W×0.7mm)を用い、樹体と同色系のガムテープにより樹体によく密着させた。また測定した樹体貯熱量を森林単位面積あたりの貯熱量に換算するため、現地で単位面積当たりの本数と胸高直径を測定し、1本の幹を高さ20mの円錐形として幹の体積を算出した。

4.4 大気汚染物質の測定

大気汚染物質としてO₃, NO₂, NO, SPMの各濃度の測定を、林冠上の2高度(林冠上6mと11m)で行った。O₃, NO₂, NOは、2高度に取り付けたテフロンチューブを、電磁弁で切り替える(3分毎)ことによって測定した。またSPMの測定は、計器をトラバースしておこなった。測定された濃度差と、熱収支結果から得られた輸送係数より、汚染物質の鉛直下向きフラックスを算定した。

4.5 夜間の計測について

発電器の使用や観測人員の神宮の森への出入りは明治神宮の開門時間内(5:30AM~6:00PM)に限られるため、夜間計測は、バッテリーのみによる無人自動計測が可能な測定機器のみに限られた。夜間の自動計測を行った測定機器は第2表中に(*)が付されている。

5. 観測結果

5.1 気象条件

第4図a, bに、林冠上空11mで計測された風向・風速および気温・湿度データを示す。風向は北東から南東方向である。15時頃南よりの風に変化すると同時に風速が強まるが、これは海風の侵入であると思われる。

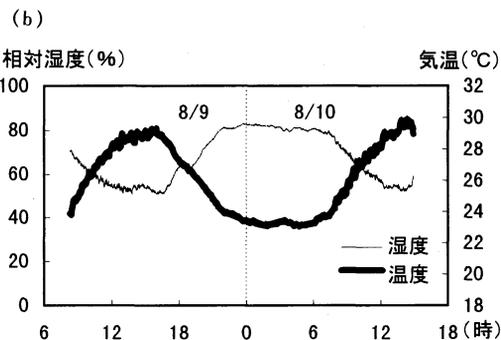
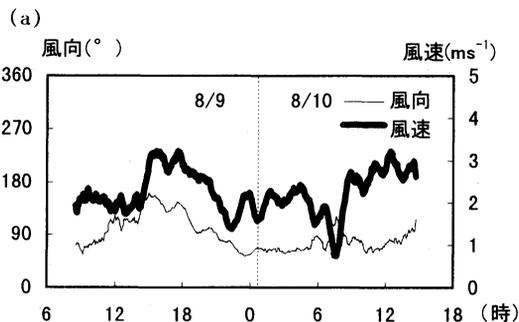
5.2 放射収支

(a) 放射収支式 放射収支は式(1)で表せる

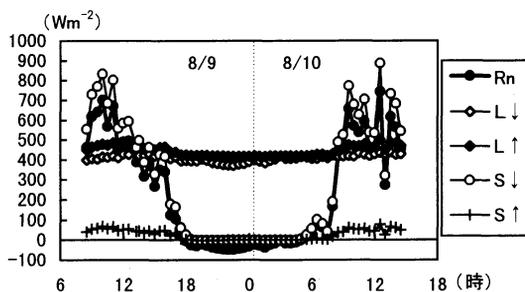
$$Rn = S^{\downarrow} - S^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad (1)$$

ここで、Rn:正味放射量, S[↓]:水平面日射量, S[↑]:反射による上向き短波放射量, L[↓]:大気放射量, L[↑]:群落からの黒体放射量である。

(b) 実測放射収支 第5図は放射収支の日変化である。正味放射量は日射量の変化にほぼ追従し、最大で



第4図 林冠上の気象条件の日変化 (a) 風向・風速 (b) 気温・湿度。



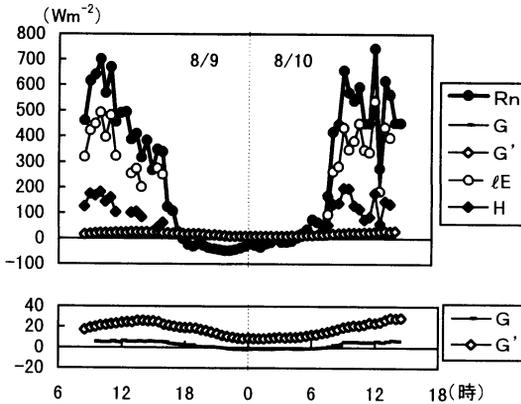
第5図 放射収支の日変化。

約700Wm⁻²である。夜間は放射冷却により約50Wm⁻²の負の値を示している。大気放射量は400Wm⁻²でほぼ一定であるが、群落からの黒体放射量は日中大きな値を示している。この値はサーモグラフィにより観測される群落温度から算定した黒体放射量にほぼ等しい。アルベードは約0.09であり、密な森林の標準的な値を示している。

5.3 熱収支

(a) 熱収支式 熱収支式は式(2)で表せる。

$$Rn - G - G' - Ga = H + IE \quad (2)$$



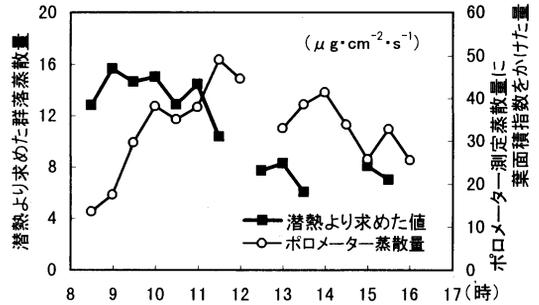
第6図 林冠上における熱収支の日変化(下図は, G , G' のみの拡大図).

ここで, H : 顕熱, LE : 潜熱, G : 地中熱流量, G' : 単位床面積当たりの樹体貯熱量, G_a : 森林内空気貯熱量, である. このうち空気貯熱量 G_a は他に比べて1オーダー小さいのでここでは無視する. 得られた実測熱収支を第6図に示す.

(b) 顕熱・潜熱 今回の観測では, ポーエン比法と渦相関法の2つから顕熱・潜熱を算定しているが, ここではほぼ同様の結果を与えたので, ポーエン比法の結果を示した. 第6図をみると潜熱は最大で 400Wm^{-2} 近く, 顕熱は 150Wm^{-2} 程度の値であり, 潜熱が顕熱よりも大きい値を示している. 潜熱は正味放射量の約7割を占めており, これを神宮の森全体の面積(約 $712,000\text{m}^2$)に換算すると, 日中に神宮の森が放出する水分量は1秒あたり約 150kg に達し, この量はペットボトル100本分に相当する. 同時期に行われた銀座の熱収支測定の結果では(神田ほか, 1997), 潜熱は正味放射量の約3割となっており, その結果と比較すると, 神宮の森の気候緩和機能が顕著に示されている.

(c) 地中熱流量 地中熱流量は日中に正の値を示し, 地面から地中に向かって熱の移動が起きている. また夜間は負の値を示しており, その逆である. しかし絶対値を見ると昼夜共に小さく, 葉面積指数の高い森林内部での地中熱流量の日周期特性がよく現れている.

(d) 樹体貯熱量 樹体貯熱量は日中最大で約 30Wm^{-2} となっており, 地中熱流量(最大約 10Wm^{-2})より大きく, 熱収支上無視できない大きさである. 樹体貯熱量の実測データは極めて少ないが, モデルによる見積もり(近藤ほか, 1991)とほぼ同程度の値を与えている. 地中熱流量と同様, 13時頃にピークがある.



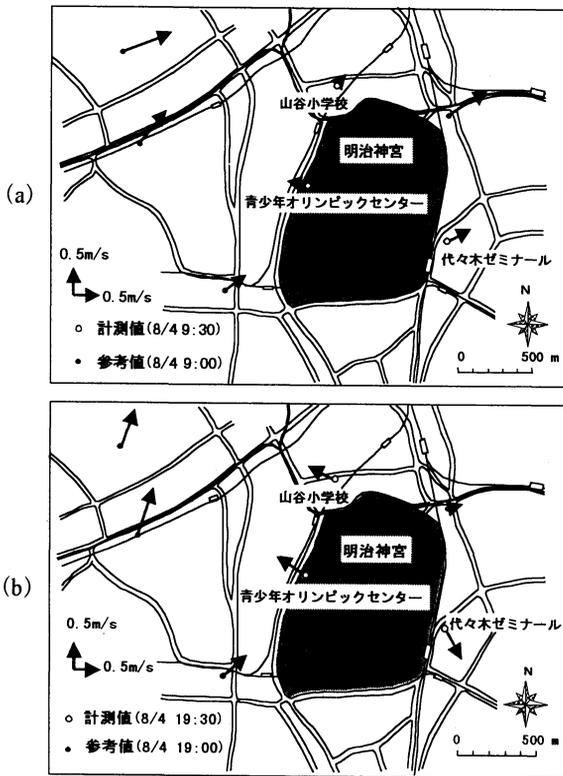
第7図 群落蒸散量とポロメーター蒸散量の比較(8月9日).

5.4 群落蒸散量とポロメーター蒸散量

気象学的手法より求めた森林全体の蒸散量(群落蒸散量)と, 植物生理学的に計測したポロメーター蒸散量を比較する(第7図). 群落蒸散量は, 5.3(b)で得られた潜熱を水の気化熱($=2.50 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$)で割ることにより求め, 一方ポロメーター蒸散量は, 個葉の蒸散量に $LAI (=5.7)$ をかけ森林単位床面積あたりの蒸散量に換算して求めた. 両者を比較すると, ポロメーター蒸散量は気象学的手法から求めた群落蒸散量より大きく, 日平均値にして約3倍である. この理由としては, 測定した葉が樹冠付近の活発なものであるため, その測定値が群落の平均値を上回ったためと考えられる. また両者は定量的に異なるだけでなく, 時間変動の傾向も一致していない. 以上よりポロメーター蒸散量そのものは葉の選定場所による局所的な気象条件に強く左右されてしまい, そのままでは群落全体に拡張できないことを示している. 植物生理データの気象モデルへの同化については後編で詳しく述べる.

5.5 森林風の存在

神宮の森規模の緑地が, 森林風と呼ばれる局所的な循環系を形成しているかどうかは興味のあるところであるが, 1km という水平スケールから考えて, それは極めて検出の難しい微弱なものと想像される. そこで, 一般風の風速が極めて弱くなる時間帯(具体的には, 海陸風のフロント通過に伴い卓越風向のなくなる時間帯)に着目し, 周辺域のビル屋上で計測した風向風速データから30分間のベクトル平均風を求めた(ただし生データで 0.2ms^{-1} 以下の風速は信頼性に欠けるので平均操作から削除した). 第8図a, bは8月4日に得られた風系図である. 朝の時間帯(9:30)では, 1.0ms^{-1} 程度の南西の一般風に対して, 神宮の森西側に位置する青少年センターで逆向きの微弱な東風が検

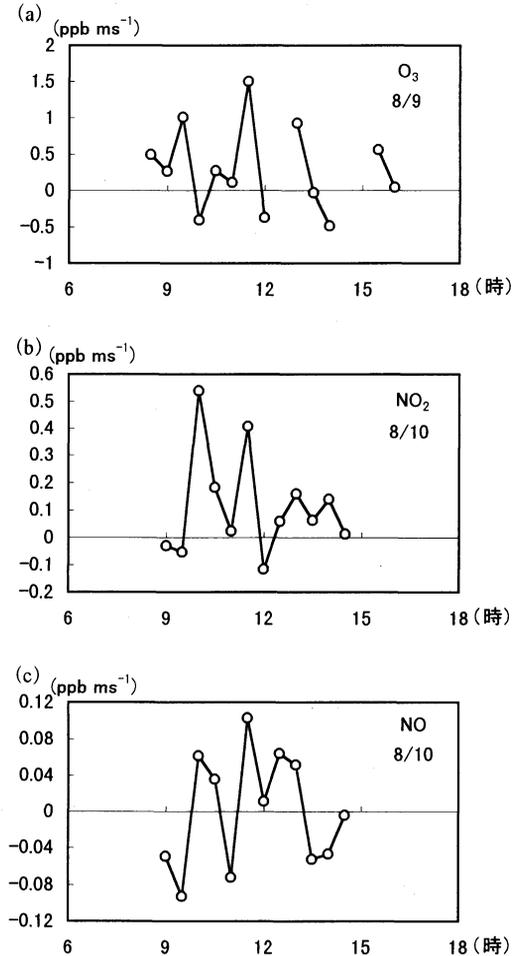


第8図 神宮の森周辺の風ベクトル図 (a) 8月4日 (9:30) (b) 8月4日 (19:30).

出されており、顕著ではないものの吹き出し風の傾向が見られる。一方、夕方時間帯 (19:30) では、都市域で 1.0ms^{-1} 程度の南南西の一般風が卓越しているのに対し、神宮の森周辺では 0.5ms^{-1} 程度と微弱ながら、森の中心から周辺域へ吹き出す森林風が朝方より顕著に検出されている。これ以外の日にも同様の解析を行ったが、森林風は、朝よりも夕方時間帯に、また曇天日より快晴日に、より顕著に抽出される傾向がある。森林からの吹き出し風が周辺との気圧降下量の差、言い換えれば大気への顕熱輸送量の差によって駆動されることを考えれば、この傾向は定性的に説明される。

5.6 林冠上における汚染物質の鉛直下向きフラックス

傾度法により林冠上における各種汚染物質 (O_3 , NO_2 , NO) の鉛直下向きフラックス、すなわち森林による汚染物質吸収量の算定を試みた(第9図)。ここでは、 O_3 については9日、 NO_2 , NO については10日の日変化を示した(他の期間は欠測)。各物質のフラックス



第9図 汚染物質フラックスの日変化 (a) O_3 (b) NO_2 (c) NO .

は大きく時間変動をしており、その経時変化に顕著な特徴は見いだされなかった。本観測に限らず、一般的に傾度法による汚染物質フラックスの抽出は精度的に非常に困難であり (Andreae and Schimel, 1989)、渦集積法のような新しい乱流計測法が期待されているが (Businger and Oncley, 1990)、未だ実用に達していないのが現状である。特に本観測のように日射量などの外部の気象変動が激しい場合は、第9図のように汚染物質フラックスの時間変動も著しくなっている。そこで、日中の日平均量により、算定値の妥当性を定量的に検討した。第3表は、本観測で得られた O_3 , NO_2 , NO の日平均フラックスと既存の研究で得られているものとを比較したものである。既存の測定例自体が少なく、また対象とする植物種や季節・気象条件あるい

第3表 汚染物質フラックスの既往研究との比較.

汚染ガス	フラックス (ppb ms ⁻¹) ^(注1)	引用文献	植物種	暴露濃度 (ppb)	備考
O ₃	0.833	Hill(1971)	アルファルファ群落	50	チャンバー実験
	0.128-0.514	山田ほか(1992)	ダイズ群落	20-80	現地測定
	0.30	本観測	イチヨウ群落	40	現地測定
NO ₂	0.992	Hill(1971)	アルファルファ群落	50	チャンバー実験
	0.414	戸塚・三宅(1991)	ヒマワリ群落	30	暴露実験に基づき算定
	0.11	本観測	イチヨウ群落	19	現地測定
NO	0.050	Hill(1971)	アルファルファ群落	50	チャンバー実験
	0.00083	本観測	イチヨウ群落	2.7	現地測定

注1) 各研究例のフラックスは、単位を ppb ms⁻¹ に換算して引用した。

は実験条件が異なるため、厳密な比較は出来ないが、O₃、NO₂ に関してはオーダー的に大体一致していると言える。チャンバー実験の吸収フラックスは、Hill(1971)も指摘しているように、強制的な風や濃度が空間一様に保たれること等の影響により、一般に現地での実測値より大きくなる傾向がある。NO については測定濃度自体が非常に小さい(5.7 (b) 参照)ことから、O₃、NO₂ よりもフラックスの算定はさらに困難であり、算定値は精度の点で問題がある。

汚染物質フラックスの細かい時間変動特性については植生モデルの助けを借りて、後編で詳しく議論することにする。

5.7 林冠上における汚染物質の濃度変動特性

前節で述べた汚染物質の鉛直下向きフラックスの算定に用いた濃度データを第10図に示す。各汚染物質濃度は林冠上11mで計測したものであり、参考のため周辺域の常時測定局(局名は図中、場所は第1図c参照)で得られたデータを合わせて示した。

(a) O₃ 濃度(第10図a) O₃ 濃度は、9日・10日ともに日中の13~14時頃にピークを持っている。この変化は一般的な濃度変動パターンであり、本町と比較しても大きな差異はない。

(b) NO₂・NO 濃度(第10図b, c) 測定したNO₂・NO 濃度は、いずれも周辺部と比べて濃度レベルが低く、日中の変動は小さい。一方幡代では、NO は午前中に、NO₂ は日中に明確なピークを示し、濃度レベルも1桁以上高い。NO は自動車の排ガスから一次排出物であり大気中で化学反応を起こして他の物質(NO₂ など)に変化する。幡代での濃度の挙動はこれより定性的に説明される。神宮の森の中心では排出源の影響は直接的に現れないようである。

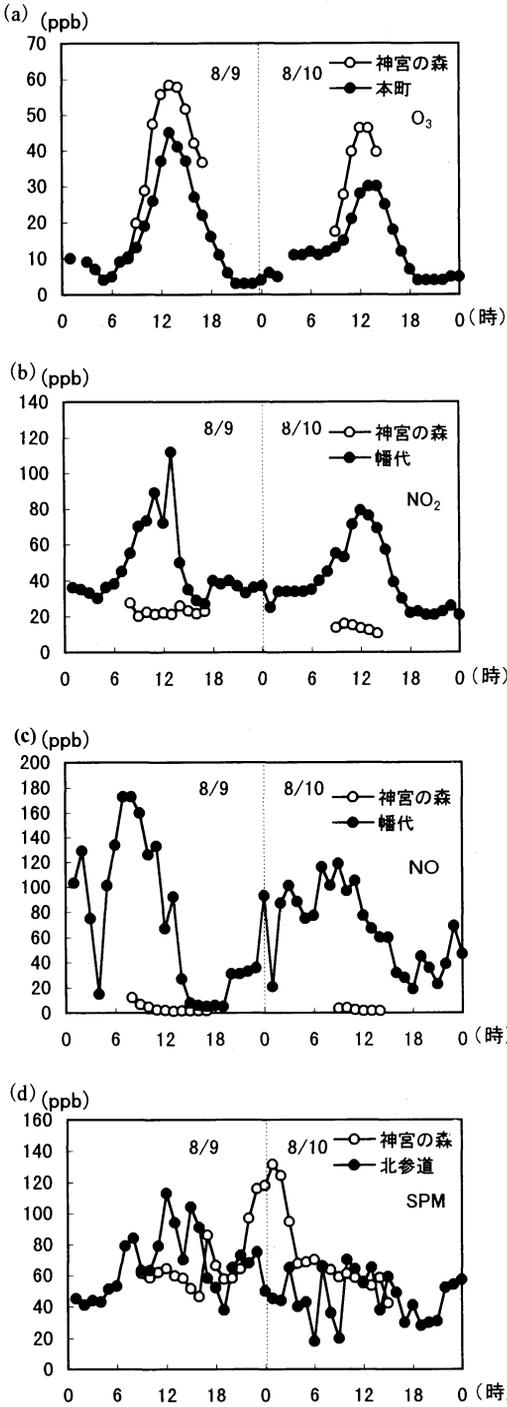
(c) SPM 濃度(第10図d) 唯一夜間の測定が行えた

SPM 濃度について、北参道のデータと比較する。周辺域では産業活動の沈静化する夜間に最低値を示すのに対して、神宮の森では夜間に最大値を示している。この時間帯は北参道は風上側に位置しており、移流の影響は見いだせない。ここでは、以下の2つを原因として推察する。神宮の森では夜間の相対湿度が80%を超えており、吸湿による膨潤によって濃度が上昇する可能性がある。またもう1つは拡散の影響である。第4表は、都市域(銀座)で測定された大気安定度(神田ほか, 1997)と神宮の森での大気安定度を比較したもので、9日の昼夜の平均値を示している。都市域が夜間においても不安定状態であるのに対し、神宮の森上では安定層が形成される。そのためSPMは夜間に森林上空で拡散が抑制され濃度が上昇すると推察される。

6. 結論

本観測により以下の結論が得られた。

- 1) 神宮の森の放射収支・熱収支を実測により算定した。その結果、正味放射量の約7割が蒸発潜熱に変換されており、神宮の森は1秒間にペットボトル100本分に相当する水蒸気を都市大気中に放出していることがわかった。また都市域の熱収支と比較したところ、神宮の森の気候緩和作用が明らかになった。
- 2) ポロメーターを用いた植物生理計測による一枚の葉の蒸散量は、計測地点の局所的な気象条件の影響が大きいため、そのままでは群落全体の蒸散量に換算できないことが示唆された。
- 3) 晴天日の夕方、一般風が弱まる時間帯において、0.5ms⁻¹以下の弱い森林吹き出し風の存在が示された。



第10図 汚染物質濃度の日変化 (a) O₃ (b) NO₂ (c) NO (d) SPM.

第4表 神宮の森と銀座における大気安定度の比較 (表中の数字は測定点の無次元高さ $\xi (=z/L : z$ は測定高さ(8m), L はモーニン-オブコフ長さ), 負の値は不安定, 正の値は安定を意味する).

	神宮の森	銀座
10時~11時 (日中)	-0.28	-3.85
22時~23時 (夜間)	0.66	-0.18

- 傾度法により各種汚染物質フラックスの算定を試みたところ, NO は測定精度の問題から定量的な評価が困難だったが, O₃, NO₂ は日中の平均量でそれぞれ約0.30ppb ms⁻¹, 約0.11ppb ms⁻¹であった. これらの値は既存の研究で得られた植生上のフラックスと比べて妥当な値であり, 神宮の森の大気浄化機能が定量的に評価された.
- 神宮の森で測定した汚染物質の濃度変動を検討した結果, 物質によりその挙動が異なった. 特にSPM濃度の日変化は夜間にピークをもち, 近接市街地のそれとは全く逆の傾向を示す. これは夜間森林上に形成される安定層の影響であることが推察された.

後編では, 植物生理データと植生気象モデルに同化する手法を提案し, それを用いて神宮の森による各種汚染物質吸収量の算定を行う.

謝 辞

本観測は, 明治神宮の特例的な観測許可によって実現したものであり, 都市環境問題に対して寛大な理解を示して下さった神宮社務所の関係者の方々に深く謝意を表します. 渋谷区から大気汚染等常時測定局測定データをお借りいたしました. 汚染物質の測定法, 結果の考察等では, 農業環境技術研究所の原園先生, 東京農工大学の青木先生にご指導いただきました. また本研究は, 文部省科学研究費一般 C07650594「河川・森林周辺の人体の熱環境解析とその評価法の提案 (代表者・神田学)」及び河川環境管理財団「河川美化・緑化研究助成 (代表者・神田学)」の財政的援助を受けて行われました. 東京工業大学水工学講座学生諸氏には観測の手伝いをしてもらいました. 合わせて謝意を表します.

参 考 文 献

Andreae, M. O. and D. S. Schimel, 1989 : Exchange of

- Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere, Wiley, 135-152.
- Businger, J. A. and S. P. Oncley, 1990 : Flux measurement with conditional sampling, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **7**, 349-357.
- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers and P. J. Kennedy, 1993 : Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model, NCAR Tec. Note 387+STR., 72pp.
- 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*, **67A**, 518-529.
- Hill, A. C., 1971 : Vegetation : A sink for atmospheric pollutants', *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **21**, 341-346.
- 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**, 299-304.
- 梅干野晃, 1995 : 航空機リモートセンシングによる都市環境の画像解析, *光技術コンタクト*, **33**, 306-315.
- 井上敏雄, 蜂屋欣二, 1986 : 森林の大気保全機能, 日本治水協会, 29-32.
- 神田 学, 1992 : 大気—植生—土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究, 東京工業大学博士論文, 1-3.
- 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮, 1997 : 銀座オフィスビル街における熱収支特性, *水文・水資源学会誌*, **10**, 329-336.
- 近藤純正, 中園 信, 山崎 剛, 桑形恒男, 1991 : 森林樹体の貯熱量の推定, *天気*, **38**, 49-53.
- 宮脇 昭, 奥田重俊, 井上香世子, 1980 : 明治神宮宮域林の植物社会学的研究, 明治神宮境内総合調査報告書, 269-333.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986 : A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- 戸塚 積, 三宅 博, 1991 : 緑地の大気浄化機能(解説), *大気汚染学会誌*, **26**, A71-A80.
- 山田千絵, 原蘭芳信, 岡野通明, 西沢利栄, 1992 : ダイズの生育に伴う群落上のオゾンフラックスと気象要因との関係, 筑波大学水理実験センター報告, **16**, 1-11.

Environmental Effect of Meiji Shrine Forest as a Sink for Atmospheric Energy and Pollutants

(1) Field Observation in Summer 1996

Manabu Kanda*¹, Ryo Moriwaki*², Yuriko Takayanagi*²,
Hitoshi Yokoyama*³ and Takashi Hamada*⁴

*¹ (*Corresponding author*) *Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152, Japan.*

*² *Tokyo Institute of Technology.*

*³ *Tokyo Metropolitan Agricultural Experiment Station.*

*⁴ *Nagano Nature Conservation Research Institute.*

(Received 6 February 1997 ; Accepted 9 July 1997)