

「神宮の森」の蒸散活動と熱収支 1996年夏期集中観測

Field Observation of Transpiration and Energy Balance in Meiji Shrine Forest

森脇亮*・神田学**・横山仁***・高柳百合子*・浜田崇****

BY Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA, Hitoshi YOKOYAMA, Yuriko TAKAYANAGI and Takashi HAMADA

The Heat Balance at Meiji-Shrine Forest, where is one of the largest green area in Tokyo Metropolitan, is observed by both a meteorological (MT) and a plant-physiological (PT) method. 70% of net radiation is distributed to latent heat flux. The diurnal variation of evaporation estimated by MT don't agree qualitatively with that by PT, because the latter is strongly affected by the local meteorological conditions of the sampling site. The characteristics of the stomatal conductance to meteorological conditions can be modeled well by Jarvis equation. The stomatal conductance modified by Jarvis model to exclude the local meteorological conditions, agree very qualitatively with the bulk stomatal conductance estimated by MT.

Key Words : Meiji-Shrine, Meteorology, plant-physiology, stomatal conductance

1 はじめに

都市の温暖化問題（ヒートアイランド）に対して、緑地の気候緩和効果を有効に利用することが期待されている。植生の水文・気象学的効果を評価するために、GCMにはSIBモデルやBATSなどの2層の簡易植生モデルが導入され¹⁾、またメソ・マイクロの植生モデルとしては、Multi-Layer Energyモデル²⁾や NEO-SPAM³⁾などが提案されている。しかしながら、実測データに対してモデルがあまりにも先行しすぎていることは植生モデラーの多くが認めるところであり、生物データ（気孔抵抗値）と熱収支データを兼ね備えた、モデルの検証に耐えうる質の高い実測データ（例えば、SIBの検証に使用されたShuttleworth⁴⁾など）は極めてまれであり、データ蓄積の必要性が強く認識されている。とりわけ、都市内の大規模緑地については、市街地との気温・湿度差やリモートセンシング画像解析など、計測が比較的容易な項目については多くの実測データがあるものの、最も肝心な熱収支・蒸散値に関する定量的データは、意外にも著者の知る限りない。

以上を踏まえ、本研究の目的は、以下の2点とする。

- 1) 都内の大規模緑地の代表として「明治神宮」の熱収支の実態を初めて明らかにすること。
- 2) 植物生理データと気象学データの同期観測を行い、その対応関係を明らかにすることにより、実測データをモデル化する際の指針を得ること。

* 学生会員 東京工業大学大学院土木工学専攻

** 正会員 工博 東京工業大学工学部開発システム工学科

*** 東京都農業試験場

**** 理修 長野自然保護研究所

2 都市内緑地の熱収支観測に必要な条件

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1.2～1.5倍）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～2kmでなくてはならない。この条件をクリアできるのは、都内では、「皇居」「明治神宮」「新宿御苑」などの大規模緑地に限られる。

3 観測の概要

3. 1 観測場所について

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

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たオアシス的存在（図1）であり、「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。

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程度の鬱蒼とした森林帯であり、2章で述べ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年前に作られた人工林である。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。

図1は、神宮周辺の地図と1995年8月10日に行われた地上の気温分布の計測結果である。神宮内部での気温が周囲の街区より最大で約4℃以上低くなっており、神宮が都市のクールスポットになっている。今回の現地計測は、クールスポットのほぼ中心に位置した神宮本殿の北側にある参道沿いの砂置き場（図中矢印）で行った。樹種は、クスノキ、スダジイなどの常緑広葉樹を主として、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⁵⁾。森林物性値をまとめて表1に示した。LAI-2000は光学特性を利用したもので、計測値は妥当な値である。

3. 2 観測日時

観測は平成8年8月9日から8月10日の2日間行った。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。当日の天気図を図2(a)(b)に示す。両日もとも日本海側に高気圧が張り出したため北東気流が卓越し典型的な夏型の気圧配置ではなかった。

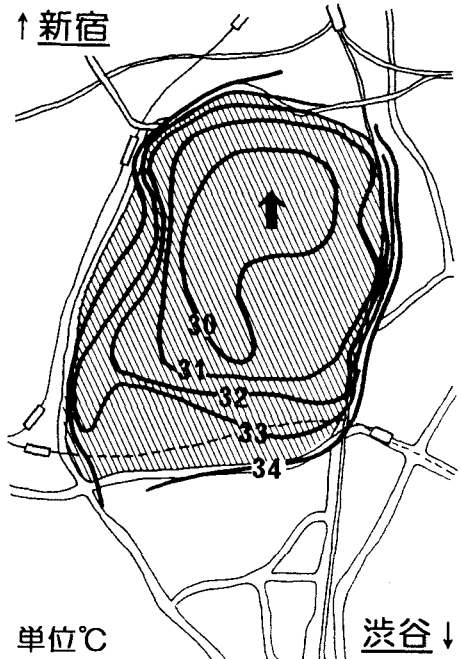


図1 水平気温分布の計測例（1995年8月10日15:00）

表1 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

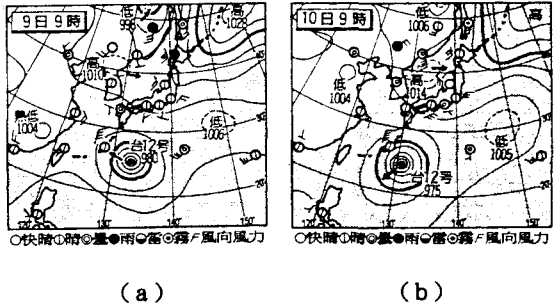


図2 当日の天気図 (a) 8月9日 (b) 8月10日

3. 3 観測方法

(a) 観測ステーション (24m高所作業車)

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、森林上空での計測・作業が中心となる。しかしながら、神宮内での鉄塔設置は困難であることから、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学関連の計測)を観測ステーションとして利用した。表2に測定項目と測定機器を示す。

(b) 植物生理学的測定 Li-Cor.社製の拡散型ポロメーターLI-1600を用いて植物生理データを計測した。ポロメーター法は、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。計測項目は、光合成有効放射量、飽差、葉温、蒸散量、気孔抵抗、などである。本観測では15分ごとに葉3枚(イチョウ2枚、イヌシデ1枚)を測定した。葉は地上から約20mの高さで日の良くあたる場所のものから各時任意に選び、イチョウ2枚の平均値を採用した。任意に抽出した葉の生理計測データの代表性と群落モデルへの利用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。

(c) 気象学的測定 温湿度・風速・日射・放射などの気象項目を、森林上と地上の2カ所で行っている。とりわけ、森林一大気間の潜熱・顕熱の算定は重要なので森林上ではボーエン比の算定が行えるよう2高度(森林上6mと11m)で計測を行い、同時に超音波温度風速計と赤外線H₂O・CO₂計による乱流計測を併用している。熱流板を地中と樹体(イチョウ)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。

表2 測定項目と測定機器

項目	観測機器	設置場所
気温・湿度	熱電対温湿度計	地上 1m, 4m 森林上 6m, 11m
	超音波温度計	森林上 7m
風向・風速	三杯式風速計	地上 4m 森林上 11m
	超音波風速計	森林上 7m
H ₂ O・CO ₂	赤外線方式	森林上 7m
日射(上下)	全天日射計	地上2m, 森林上5m
長波放射	赤外放射計	森林上5m
純放射	純放射計	地上2m, 森林上5m
熱流量	熱流板	地上, 樹体 3点
森林温度	サーモグラフィ	地上2m, 森林上6m
植物生理	ポロメータ	地上2m, 20m

4 観測結果

4. 1 気象条件

図3(a)(b)に、高所作業車上で計測された森林上空5mの風向・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っているが、これは海風の侵入であると思われる。全体的傾向として、北東気流が卓越傾向にあり、最高気温も30℃弱とあまり上昇しなかった。従って、夏型の典型的気象データとは必ずしも言えない。

4. 2 放射収支

(a) 放射収支式 放射収支は次式で表せる。

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

ここで、R_n: 正味放射量、S[↓]: 水平面日射、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。

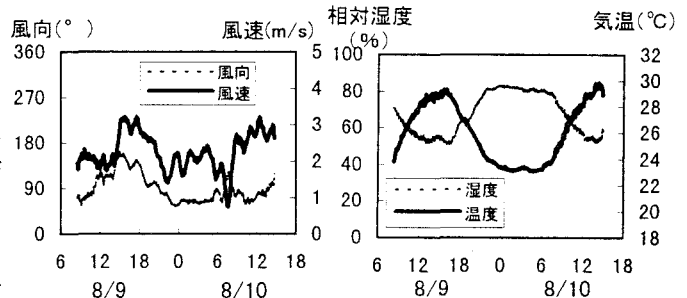


図3 森林上の気象 (a)風向風速 (b)気温・湿度

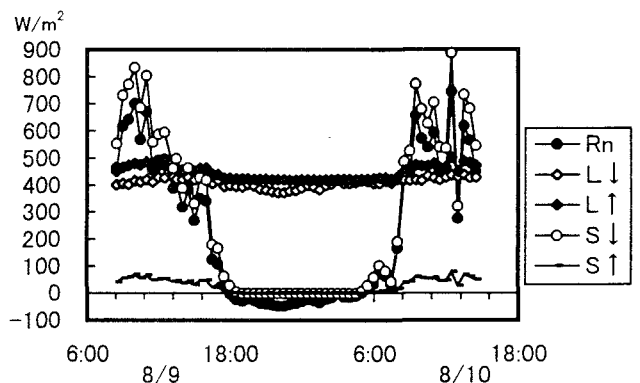


図4 放射収支の時間変化

(b) 実測放射収支 図4は放射収支量の時間変化である。純放射量は日射量の変化にほぼ追随し、最大で約700(W/m²)である。夜間は放射冷却により約50(W/m²)の負の値を示している。大気からの長波放射量は400(W/m²)でほぼ一定であるが、植生群落からの上向き長波放射量は、群落温度に対応して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放射量にほぼ等しい(図は割愛)。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。

4. 3 熱収支

(a) 熱収支式 熱収支式は式(2)で表せる。

$$R_n - G - G' - G_a = H + 1E \tag{2}$$

ここで、H：顕熱、1E：潜熱、G：地中熱流量、G'：樹体への貯熱量、Ga：森林内空気の貯熱量、である。このうち空気の貯熱量は他に比べて1オーダー小さいのでここでは無視する(容易に算定可能である)。

得られた実測熱収支を図5に示す。

(b) 顕熱・潜熱 今回の観測では、ボ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、ボーエン比法の結果を示した。潜熱は最大で400W/m²近く、顕熱は150W/m²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ことが分かる。入力された正味放射量のうち約7割程が潜熱に分配されており、神宮の森では大量の水蒸気を蒸発させることに熱エネルギーを消費させている。このことは同時に、神宮の森が大気の加熱にそれほど加担していないことを示している。

(c) 地熱流 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、葉面積密度の高い森林の地熱流の日周期特性がよく現れている。

(d) 森林貯熱 イチョウのデータをもとにした森林の貯熱量は日中最大で約30(W/m²)となっており、地中熱量(最大約10W/m²)よりも大きく、熱収支上無視できない大きさである。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⁸⁾とほぼ同程度の値を与えている。地熱流同様、13時頃にピークがある。

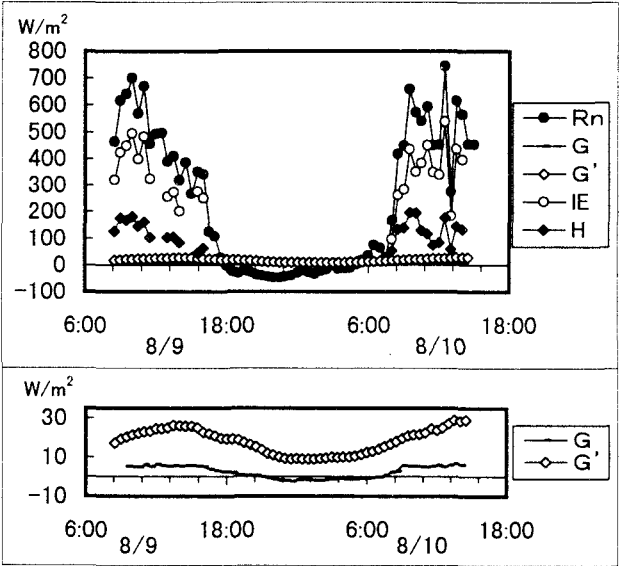


図5 熱収支の時間変化(下図はG,G'のみの拡大図)

5 葉の植物生理と群落熱収支の対応関係

植物生理学的手法から求めた一枚の葉の生理データと、気象学的手法より求めた群落全体の蒸散・熱収支データとの関係について考察し、実測データをモデルに同化させる際の指針を探る。

5. 1 ポロメータ蒸散量と群落蒸散量

植物生理学的に計測した一枚の葉の蒸散量と、気象学的手法より求めた森林全体の潜熱を比較する。一枚の葉の蒸散量と森林全体の潜熱では、定量的な比較は出来ないものの、時間変化の傾向

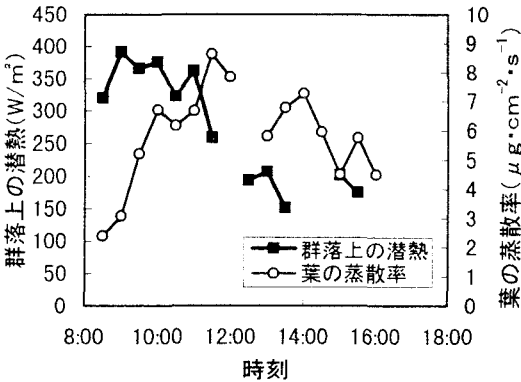


図6 ポロメータ実測蒸散量と群落蒸散量の比較

に類似性が期待される。しかし図6を見ると、両者の傾向は全く一致していない。植物生理学的手法によって測定した実測蒸散量そのものは、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、植生全体を代表するものとならないことを示している。

5.2 植物生理データを用いた気孔特性の抽出

(a) 応答関数としての気孔コンダクタンス特性

植物生理データから、環境因子に対する気孔特性を抽出することを試みる。部位による葉の蒸散量（アウトプット）の違いは、主にその場の環境因子（インプット）の違いによるもので、植物の気孔コンダクタンス特性（応答関数的なもの）そのものには、普遍性が認められるかもしれない。一枚の葉から群落を代表する気孔特性の関数が得られれば、モデル同化の際に極めて重要な情報を与えてくれることになる。

(b) 気孔コンダクタンスのモデル化 気孔コンダクタンスは、光合成有効放射量、飽差（植物内外の水蒸気圧差）、葉の温度、植物内水ポテンシャル、土壤水分量など様々な要因に影響される。気孔コンダクタンスのモデルは数多く報告されているが、ここではJarvis(1976)の経験関数（式(3)）を用いることにする⁷⁾。このモデルを用いて、光合成有効放射量、飽差、葉温の3つの環境変数に対して観測結果から未知パラメータを非線形最小二乗法により同定した。

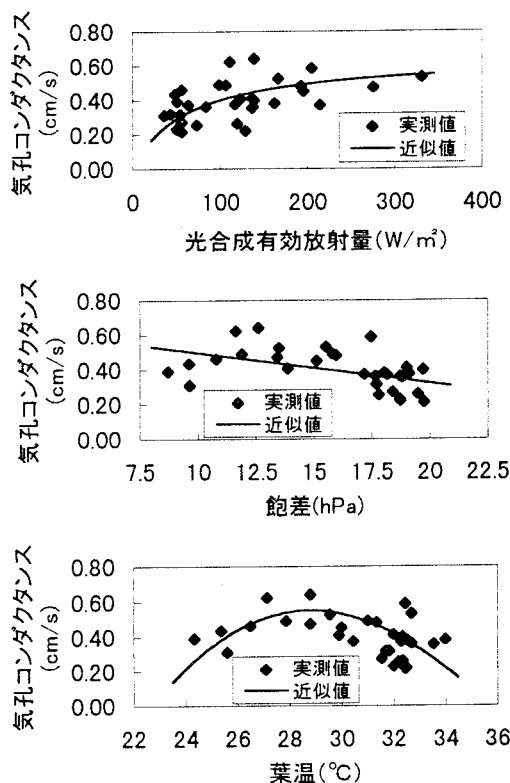


図7 Jarvis 式による気孔コンダクタンスの同定結果

(a) 光合成有効放射量 (b) 飽差 (c) 葉温

$$g_c = \frac{g_{cMAX} \cdot PAR}{PAR + \frac{g_{cMAX}}{a}} \cdot (1 - B\Delta e) \cdot \left(\frac{T - T_n}{T_0 - T_n} \right) \left(\frac{T_x - T}{T_x - T_0} \right) \{ (T_x - T_n) (T_n - T_n) \} \quad (3)$$

ここで、 g_c ：気孔コンダクタンス(cm/s)、PAR：光合成有効放射量(W/m²)、 Δe ：飽差(hPa)、T：葉温(°C)であり、パラメータは、 g_{cmax} ：気孔コンダクタンスの最大値(cm/s)、a：PARに関する係数、B：飽差に関する係数(hPa⁻¹)、 T_x ：最高限界温度(°C)、 T_0 ：最適温度(°C)、 T_n ：最低限界温度(°C)、である。図7(a)(b)(c)にポロメータによる実測値とそれぞれの環境変数についてモデル化した気孔コンダクタンスを示す。PARについては飽和曲線、 Δe については負の比例直線、Tについては最適温度で頂点となる凸型の曲線でモデル化され、式(3)で表されるモデルは良好に実測値を再現している。

(c) 気象データからの群落コンダクタンスの算出 群落コンダクタンスは、群落全体を一枚のBIG LEAFと見立て、個葉とのアナロジーで定義されるものであるが、植物生理データとは全く無関係に、4章で算出された群落蒸散量と気象データだけから逆算される⁶⁾ものである。

(d) 一枚の葉から得られた気孔コンダクタンスモデルと気象学的群落コンダクタンスの対応関係

植物生理データからモデル化された気孔コンダクタンス関数(式(3))に、森林の代表的な象因子(PAR、 Δe は森林上6mの計測値、Tは熱収支より逆算した森林代表温度)を代入し「一枚の葉の気孔コンダクタンス」を求め(ポロメータ計測場所のローカルな気象因子を代入しているのではない点に留意されたい!!)、それを

気象測定から求められた「群落コンダクタンス」と比較したのが図8(a)(b)である。驚くべきことに、植物生理学的手法から求めた気孔コンダクタンスと、気象学的手法から求めた森林全体の群落コンダクタンスが極めてよく対応している。このことは「一枚の葉」レベルから得た気孔コンダクタンスの情報に適切な気象条件を与えれば、森林全体の群落コンダクタンスを表現し得る可能性のあることを示している。一枚の葉のコンダクタンス・蒸散量を森林全体のものに換算し、定量的に比較するためには、葉の面積をかけるなどの単純な積分ではだめで（場所による環境因子とその非線形性による）、序論で述べたNEO-SPAMなどの非線形モデルで直接数値積分する方法が挙げられる。NEO-SPAMによるフルシミュレーションは今後の課題とするが、図8は、非線形解析の結果に極めて大きな期待を抱かせるものである。

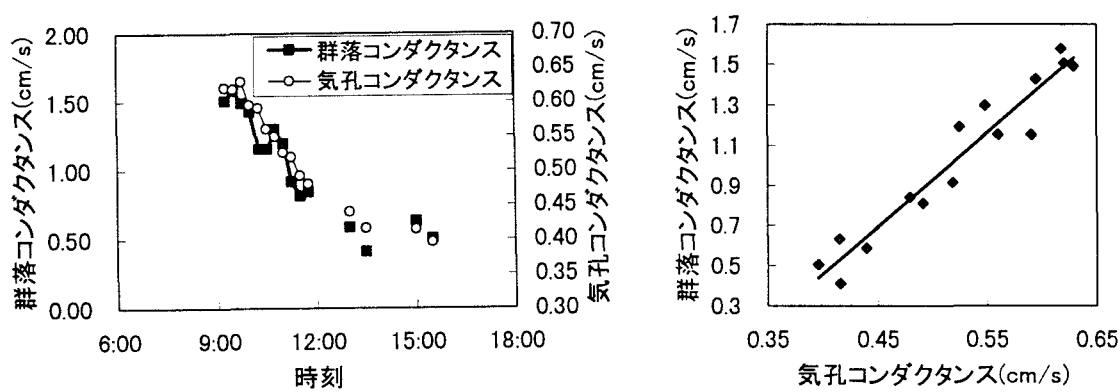


図8 モデル化された気孔コンダクタンスと実測群落コンダクタンスの比較
(a) 時系列データの比較 (b) 相関比較図

6 結論

- 1) 神宮の森の夏の放射収支・熱収支の実態を明らかにした。
- 2) 植物生理データから気孔開度のモデル化を行いJARVIS(1976)型モデルで表現できることを示した。
- 3) 植物生理データから抽出された気孔開度特性は、適切な気象因子をインプットすることにより、群落蒸散特性を表現できることが示された。

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。また、本研究は、文部省科学研究費一般C 07650594「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。東工大水工研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

1) Sellers, P. J. et al. (1986) : J. Atmos. Sci., 43, 505-531.
2) Kondo, J. and Watanabe, T. (1992) : J. Atmos. Sci., 49, 2183-2199.
3) 神田学(1995) : メソスケールモデルへの多層植生モデル導入効果に関する検討、水文学会誌, 8, 547-559.
4) Shuttleworth et al. (1984) : Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 110, 1143-1163.
5) 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
6) 近藤純正(1982) : 大気境界層の科学、東京堂出版
7) Jarvis, P. G. (1976): Phil. Trans. R. Soc. Land. B., 273, pp. 593-610.