半島マレーシア熱帯雨林の蒸散特性

高梨 聡¹⁾・谷 誠¹⁾・Abdul Rahim Nik²⁾

1) 京都大学農学研究科 Graduate School of Agric., Kyoto Univ.

takanash@kais.kyoto-u.ac.jp

2) マレーシア森林研究所 Forest Research Institute Malaysia

摘要: 半島マレーシア熱帯雨林において行われた1998年の気象観測データを用いて、群落コンダクタンスの解析を行った。群落コンダクタンスと日射量、大気飽差との関係には良い相関がみられた。飽差と日射量を説明変数とする群落コンダクタンスモデルを適用した結果、年間を通して良好な再現結果が得られた。熱帯雨林の中では、かなり大気や土壌が乾燥する当試験地において、土壌が乾燥しても群落コンダクタンスの特性に変化はなく、蒸散が低下することがなかった。

キーワード: 群落コンダクタンス, 蒸散, 熱帯雨林

TAKANASHI, Satoru, TANI, Makoto, Abdul Rahim, Nik : **Characteristics of transpiration over a tropical rainforest in Peninsular Malaysia**

Abstract : Surface conductance was studied using micrometeorological data obtained at a tropical rain forest in Peninsular Malaysia in 1998. Surface conductance could be estimated through the year using the surface conductance model expressed as the function of solar radiation and specific humidity deficit. Soil drought did not affect the characteristic of the surface conductance and transpiration rate in the driest period at this study site where soil and the air tend to dry in a tropical rain forest.

Key words : surface conductance, transpiration, tropical rain forest

1. はじめに

地球温暖化などの環境変動に対する森林の役割を評価することに国際的な関心を持たれている現在、森林の蒸発散過程の評価は最も重要な課題として位置づけられる。なかでも太陽エネルギーの豊富な熱帯地域において、森林は蒸散作用によって熱環境を和らげていると考えられ、熱帯雨林の気候におよぼす影響解明にその蒸散特性を解析することは重要であると考えられる。アマゾン熱帯雨林において進められてきた長期観測によると、純放射エネルギーの蒸発散潜熱に配分される割合は大きく、年間を通じてペンマン式などで表される可能蒸発量に対する比はほとんど同じになる。熱帯雨林であるからには長期の無降雨期間は見られないが、雨季と乾季の交代がある。しかし乾季においても、土壌水分の乾燥による蒸発散の抑制はほとんど見られなかったということが結論となっている¹⁾。そこで、東南アジア熱帯雨林の蒸発散・エネルギー交換の研究では、アマゾンと同じような傾向があるかどうか、エルニーニョなどの数年周期の気候変動に伴って生じるような、長期無降雨条件によって蒸発散にどのような影響が見られるのかが、ひとつの重要な着眼点になると考えられる。そこで本研究では、半島マレーシアの中でも特に降雨の少ないPasoh保護林において、環境条件に対して気孔

調節によってどのように蒸散を制御しているのかについて、そのモデルパラメータである群落コンダクタンスの日射量と大気飽差に対する関係を明らかにする。

2. 観測方法

2.1 観測地概要

気象観測は、半島マレーシアのPasoh森林保護区の低地フタバガキ林に設置された52.6 mのタワーを使用して実施された。Pasoh保護林はNegeri Sembilan州、北緯2度58分、東経102度18分にあり、年平均気温は24.8℃、平年の降雨量は1804 mmである¹⁰⁾。降雨量は、南西モンスーンの4・5月、北東モンスーンの10・11月に多いが、半島の内陸にあるため、半島マレーシアの中では比較的少雨の地域に位置づけられる。Pasoh保護林2450 haの中央650 haが多くのフタバガキ科樹種により構成される低地原生林であり、連続した樹冠の高さは約35 mであるが、突出したエマージェント木の高さは45 mに達する。葉面積指数LAIは6.52と見積もられる(新山ら、未公表)。地形は緩やかな起伏をもち、標高は75・150 mである。土壌は粘土質であり30 cm以深は礫に富む¹²⁾。

2.2 気象観測

タワー最上部52.6 mにおいて、下向き、上向きの短波放射

量をアルベドメーター(EKO MR-22)で、純放射量を放射収支計(EKO MF-40)で、気温湿度を温湿度計(Visala HMP-35C)で、風向きと風速を風向風速計(Campbell 03001)で、降雨量を雨量計(Yokogawa B-011-00)で測定した。サンプリングは15秒毎に行い、30分間の平均値をデータロガー(Campbell CR-10)に記録した。これに加え、ボーエン比法等による蒸発散とエネルギー交換量の推定のため、52.6 mと43.6 mの気温・湿度を、通風乾湿計(EKO MH-020S)で、52.6 m, 49.1 m, 46.6 m, 43.6 mの風速を三杯式微風速計(Ikeda WM-30P)で測定した。森林群落内の空気顕熱・潜熱貯熱、樹体貯熱を算出するため、1995年3月4・5日に、通風乾湿計、微風速計を52.6 m, 49.1 m, 41.5 m, 33.0 m, 17.0 m, 1.0 mに設置して林内気象条件を測定した。なお、解析の対象とした期間は1998年の1年間である。

3. 解析方法

3.1 蒸散量

群落におけるエネルギー交換は、下記のエネルギー収支式によって表現される。

$$R_n = H + \lambda E + Q_s + A \quad (1)$$

ここで、 R_n は純放射、 H は顕熱フラックス、 λE は潜熱フラックス、 A は光合成などによるエネルギー吸収量である。 Q_s は群落貯熱変化であって、群落内の顕熱および潜熱の増加(Q_a , Q_w)、樹体貯熱増加(Q_b)、地中貯熱(Q_g)によって構成され、下記のように表される。

$$Q_s = Q_a + Q_w + Q_b + Q_g \quad (2)$$

Q_a , Q_w , Q_b については、1995年3月に実施した気温・湿度の鉛直分布の集中観測結果を基に、これらの時間変化から求めた Q_a , Q_w , Q_b の値とタワー最上部52.6 mの気温(T)と水蒸気圧(V)の関係を次の経験式⁷⁾で表して推定した。

$$Q_a = 0.0172(dT/dt) \quad (3)$$

$$Q_w = 0.0253(dV/dt) \quad (4)$$

$$Q_b = 0.0180(dT/dt) \quad (5)$$

このようにして、これらの貯熱変化量を継続観測の行われている後者の気温・湿度のデータから計算で推定した。なお、熱量、温度、水蒸気圧の単位は kJ m^{-2} , $^{\circ}\text{C}$, hPa とし、 dT/dt , dV/dt については1時間の気温、水蒸気圧の変化量から計算した。 Q_g の値は熱流板で測定したが1%未満であったので無視可能であった。光合成、呼吸に関する(A)については3%未満とされており³⁾、無視した。

以上の処理によって、エネルギー収支式は、純放射(R_n)から群落貯熱量(Q_s)を差し引いて求めた有効エネルギー(Q)を顕熱と潜熱に配分する形になる。

$$Q = H + E \quad (6)$$

顕熱および潜熱フラックスはボーエン比法を用いて有効エネルギーから以下のように求められる。

$$H = \frac{B}{1+B} Q \quad (7)$$

$$\lambda E = \frac{1}{1+B} Q \quad (8)$$

ボーエン比(B)は、43.6 mと52.6 mの通風乾湿計の気温・湿度から計算される温位・水蒸気圧の値、 θ_1 , θ_2 , e_1 , e_2 から次式で計算される。

$$B = \gamma \frac{\theta_1 - \theta_2}{e_1 - e_2} \quad (9)$$

ここで γ は乾湿計定数である。

3.2 群落コンダクタンス

森林群落におけるエネルギー交換に関与する条件は、放射エネルギー・気温・湿度などの与えられた気象環境条件と森林群落条件に大きく分けられる。これは、最も簡単には、いわゆるビッグリーフモデルにより表現できる。すなわち、群落上部の気象環境条件と向き合う一枚の葉(仮想葉)を考え、その空気力学的な特性と植物が蒸散を制御する特性を抵抗またはコンダクタンスで表現するモデルが用いられる。ビッグリーフモデルにおいて、潜熱フラックスは、仮想葉内部と大気との間の水蒸気圧差という濃度勾配と、抵抗、またはその逆数であるコンダクタンスという拡散の度合いによって決定される。このようなモデルにより、エネルギー交換量の推定プロセスから、エネルギー交換に関するその群落の特性を検討するプロセスに移行することができる。ここでは、ビッグリーフモデルの代表的な式として、Penman-Monteith式⁶⁾を用いて以下のように植物の生理的な活動による気孔開閉の度合いを示す群落コンダクタンス(g_c)を算出した。

$$g_c = \frac{1}{r_c} = \left[\left\{ \frac{\Delta Q + \rho C_p (e_s(r_a) - e_a)}{\lambda E} - \Delta \right\} \frac{1}{\gamma} - 1 \right] r_a \quad (10)$$

ここで、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き(hPa K^{-1})、 ρ は空気密度(kg m^{-3})、 C_p は空気の定圧比熱($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 e_a , $e_s(T_a)$ は測定高度(52.6 m)における水蒸気圧および飽和水蒸気圧(hPa)である。群落コンダクタンス(g_c)はボーエン比法によって式(8) (9)から計算された λE と空気力学的抵抗(r_a)から計算できる。森林群落の空気力学的抵抗は主に群落の粗度長と風速に支配され、風速以外の環境条件の変化による変動は少なく、蒸発散に対する影響は小さいため、大気の中立を仮定し、運動量に関する抵抗(r_m)と等しいとして以下のように計算した。

$$r_a = r_m = \frac{u_r}{u_*^2} \quad (11)$$

ここで u_r は52.6 mにおける風速、 u_* は摩擦速度である。摩擦速度 u_* は4高度での風速分布から対数則と呼ばれる以下の式に回帰し計算した。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (12)$$

ここで u は各測定高度における風速(m s^{-1})、 κ はカルマン定数、 z は測定高度(m)、 d は地面修正量(m)、 z_0 は粗度長(m)である。ただし、地面修正量(d)は、複雑な多層構造をもつ熱帯雨林で定めるのは困難ではあるが、樹高を43 mとし、文献¹⁰⁾による式をもとに33 mと見積もった。

また、52.6 mにおける風速(u_r)と摩擦速度(u_*)の間には図-1のように相関があるので、

$$\frac{u_*}{u_r} = c \quad (13)$$

とかけ、

$$r_a = \frac{u_r}{u_*^2} = \frac{1}{c^2 u_*} \quad (14)$$

図-1 52.6 mにおける風速と摩擦速度との関係

Fig. 1 Relationship between wind velocity at 52.6 m and friction velocity.

となる。式(14)によって、1高度での風速から空気力学的抵抗(r_a)が計算できる。

4. 観測結果および解析

4.1 一般気象要素

1998年1月1日から12月31日までの日単位の気象観測結果を図-2に示す。時間単位は1月1日を1とした通し日数(Julian日)を用いた。図-2を見ると、日射量や気温は、北緯3度の条件から、季節変化が乏しい。ただし、3-5月に日射量が大きく、飽差が大きくなる傾向が認められる。この時期には、エルニーニョであった1997年からの継続的な少雨傾向の中で最も大気と土壌が乾燥していたと考えられる。年末には日射量は小さくなり、飽差についても小さくなる傾向が見られる。1998年の降雨量は1425.9 mm、平均気温は26.4 °Cであった。

4.2 群落コンダクタンスの特性

群落コンダクタンスの特性の季節変動を調べるため、期間A-Fを抽出し、遮断蒸発の影響がないと考えられる前日、当日に雨のない日を解析期間とした。気孔を介さない蒸発現象である遮断蒸発の影響を取り除くことにより、ボーエン比法により得られた潜熱フラックスは蒸散量と考えることができ、これにより算出された群落コンダクタンスは気孔の開閉の度合いを表していると言える。

各期間の気象諸要素を表-1に示す。年末に当たる期間Fで日射量が小さく、飽差が小さく、先行雨量の多い傾向が見られ、大気が比較的湿潤な期間といえ、土壌も湿潤であったと考えられる。群落コンダクタンスの値は、植物の気孔の開閉に依存して変化していると考えられ日射量や飽差と関係が深いので、各期間の群落コンダクタンスの値と、日射量、飽差との関係を図-3に示す。各期間の群落コンダクタンスの傾向を比較するため、群落コンダクタンスの値を比湿による飽差で2 g kg⁻¹ごとに区切り、その間の平均値をプロットし、その標準誤差をエラーバーで表現したものである。図-3を見ると、飽差が大きくなるにつれてコンダクタンスが小さくなること、日射量が大きくなるとコンダクタンスが大きくなる事が分かる。しかし、各期間において同じ日射量、飽差に

図-2 観測された日射量、純放射量、気温、飽差、雨量

Fig. 2 Seasonal change of solar radiation, net radiation, air temperature, specific humidity deficit and daily rainfall.

対して群落コンダクタンスの値は同程度となっており、コンダクタンスの特性の明確な季節変化は見られない。特に大気や土壌が比較的湿潤だと考えられる期間Fにおいて植物の気孔は開きやすくなっていると考えられ、それに対応して同じ日射量、飽差に対して群落コンダクタンスの値は大きくなる事が予想されたが、そのような傾向は見られなかった。なお、図中の曲線は群落コンダクタンスモデルの適用結果であり、次節に詳細を記す。

4.3 群落コンダクタンスモデルの適用結果

森林群落からの蒸散量は、究極的には気孔にある孔辺細胞によって制御されている。しかし、これらの生理的な過程をそのままモデル化し、森林群落レベルの微気象特性の解析に用いるには現実的ではない。群落レベルでのコンダクタンスの環境変化に対する応答を記述するモデルが必要である。気孔レベルにおける代表的なモデルとして、気象環境条件に対する気孔の応答をそれぞれの独立変数として表現したJarvis型のモデル²⁾が存在する。このモデルは森林群落に拡張され、いろいろな森林での観測結果を基に改善され、現実

表-1 抽出された期間の気象諸要素

Table 1 Daily mean or total meteorological variables in each period.

期間		下向き日射日総量 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	純放射日総量 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	平均気温 (degC)	平均飽差 (g kg ⁻¹)	平均風速 (m s ⁻¹)	30日先行降雨量 (mm)
A	3/2-4/6	21.30	14.37	27.49	6.25	1.99	96.53
B	4/16-4/23	21.35	13.61	28.25	7.14	1.75	42.31
C	5/19-5/31	20.51	13.86	28.04	5.93	2.05	107.0
D	6/10-6/25	18.61	12.04	26.79	5.06	1.83	142.5
E	9/29-10/6	18.08	11.38	26.99	6.10	1.90	81.44
F	12/5-12/23	13.34	8.399	24.91	2.86	1.57	175.4

的に適用可能なモデルとして提案されている^{4,8,9}。本研究では、Dolmanと同様のJarvis型のモデル¹⁾を用いて、群落コンダクタンスの再現計算を試みた。

群落コンダクタンス(g_c)を、比湿による飽差(δq)、日射量(S_d)、気温(T)、土壌水分($\delta \theta$)の関数とし、次式で表す。

$$g_c = a_1 f(\delta q) f(S_d) f(T) f(\delta \theta) \quad (15)$$

このモデルは、比湿による飽差(δq)、日射量(S_d)、気温(T)、土壌水分($\delta \theta$)を説明変数とする関数で群落コンダクタンスを表現しているが、当地の気温の日変化は日射量に近く、季節変化も乏しいので、気温の関数は省略した。また、前節で見たように群落コンダクタンスの特性は日射量と飽差でおおむね説明でき、土壌の乾燥によるコンダクタンスの低下は見られなかったため土壌水分の影響はないものとした。比湿による飽差(δq)、日射量(S_d)の関数は以下の式を用いた。

$$f(\delta q) = \exp(-a_2 \delta q) \quad (16)$$

$$f(S_d) = [S_d / (a_3 + S_d)] / [1000 / (1000 + a_3)] \quad (17)$$

ここで δq は比湿による飽差(g kg⁻¹)、 S_d は日射量(kW m⁻²)、また a_1 、 a_2 、 a_3 は群落ごとに固有のパラメータであり、それぞれ、最大群落コンダクタンス、飽差の増大に対する群落コンダクタンスの減少率、日射量の増加に対する群落コンダクタンスの初期増加率に関連した値である。

各期間において、計算される群落コンダクタンスと観測値との残差平方和が最小となるように非線形回帰分析⁵⁾により、モデル中のパラメータを決定した。表-2に、決定されたモデルパラメータを示す。この中で、期間Aが最も解析期間が長く取れ、飽差の条件も広い範囲にわたっているため、期間Aにおいて見積もられたパラメータを最も信頼できるパラメータとして考え、これを用いて群落コンダクタンスモデルの再現性を検証した。

図-3の曲線は期間Aにおいて見積もられたパラメータにより再現された群落コンダクタンスの $S_d=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ kW m⁻²の場合を示したものである。期間Bなど外れる部分がある期間もあるがおおむね良好に再現できている。

期間Aは比較的大気と土壌が乾燥した期間であるが、この期間Aにおいて見積もられたパラメータにより湿潤な期間Fにおいても良好に再現できている。したがって、群落コンダクタンスの応答特性に季節変化は乏しいといえる。次に各期間での比較的良好に晴れた3日間のモデルの再現結果と観測値の日変化を図-4に示す。図-5は群落コンダクタンスモデルを再びPenman-Monteith式に代入し、蒸散量を算出したものである。曲線がモデルによる再現値であり、パラメータは期間Aにおいて見積もられたものを使用した。どの期間においても良好に再現された。

表-2 各期間で見積もられたパラメータ

Table 2 The optimized parameters in each period.

期間		a_1	a_2	a_3
A	3/2-4/6	47.0	0.10	632.3
B	4/16-4/23	33.8	0.07	161.1
C	5/19-5/31	35.2	0.08	599.4
D	6/10-6/25	47.9	0.13	233.6
E	9/29-10/6	50.3	0.13	597.0
F	12/5-12/23	59.5	0.17	265.3
Amazon		20.8	0.06	250.0
(Dolman et al, 1991)				

図-3 群落コンダクタンスと飽差、日射量との関係

Fig. 3 Relationship of surface conductance to specific humidity deficit as a function of downward solar radiation.

図-4 群落コンダクタンスの再現計算結果

Fig. 4 Comparison of observed and simulated surface conductance using optimized parameters in period A.

図-5 潜熱フラックスの再現計算結果

Fig. 5 Comparison of observed and simulated latent heat flux using optimized parameters in period A.

表-2の末尾にアマゾンで見積もられたパラメータ¹⁾を示す。Pasohでは最大群落コンダクタンスは大きい、飽差の増大に対して群落コンダクタンスが敏感に小さくなる傾向が見られた。これが測定などの誤差によるものだとすると、通風乾湿計につく露が影響し飽差の小さいところで大きなコンダクタンスが観測されてしまったことが原因として考えられる。しかしながら、森林群落の生理特性や構造に起因するものである可能性もあり、そうであるならば熱帯雨林のなかでは大気や土壌の乾燥が進むPasohにおいては飽差の増大に対して敏感に反応し、乾燥に適応しているのだと考えられる。この点について詳しく議論するためには、今後精度の高い乱流変動法を用いてフラックスを観測するなどの改善が必要だと考えられる。

5. 結論

半島マレーシア熱帯雨林において行われた気象観測データを用いて、群落コンダクタンスの解析を行った。熱帯雨林の中では、かなり大気や土壌が乾燥するPasohにおいて、土壌が乾燥しても群落コンダクタンスは日射量と大気飽差によって制御されており、蒸散が低下することがなかった。また、飽差と日射量を説明変数とする群落コンダクタンスモデルを適用した結果、土壌が乾燥した期間のパラメータを用いて、年間を通して良好な再現結果が得られた。したがって、気象環境条件の変化に乏しい半島マレーシア熱帯雨林において、蒸散特性は季節変化に乏しいと考えられた。

引用文献

- 1) Dolman, A. J., Gash, J. H. C., Roberts, J. and Shuttleworth, W. J. (1991) Stomatal and surface conductance of tropical rainforest. *Agric. For. Meteorol.*, 54 : 303-318.
- 2) Jarvis, P. G. (1976) The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 273 : 593-610.
- 3) Jarvis, P. G., James, G. B. and Landsberg, J. J. (1976) Coniferous forest. In Monteith, J. L. (ed). *Vegetation and the atmosphere*. vol. 2. Academic Press, New York, pp.171-236
- 4) Lindroth, A. (1985) Canopy conductance of coniferous forests related to climate. *Water Resources Research*, 21(3) : 297-304
- 5) Marquardt, D. W. (1963) An algorithm for least-squares estimation on nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, 11 : 441-443
- 6) Monteith, J.L. (1965) Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19 : 206-234
- 7) Ohtani, Y., Okano, M., Tani, M., Yamanoi, K., Watanabe, T., Yasuda, Y. and Abdul Rahim, N. (1997) Energy and CO₂ fluxes above a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. - Under estimation of eddy correlation fluxes during low wind speed conditions. *J. Agric. Meteorol.*, 52 : 453-456
- 8) Stewart, J. B. (1988) Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43 : 19-35
- 9) Stewart, J. B. and Gay, L. W. (1989) Preliminary modeling of transpiration from the FIFE site in Kansas. *Agric. For. Meteorol.*, 43 : 305-315
- 10) Tani, M., Abdul Rahim, N., Mohd Md, S., Noguchi, S. and Ohtani, Y. (2003) Five-year meteorological observation at Pasoh Forest Reserve, Negeri Sembilan, Peninsular Malaysia. *Forest Research Institute Malaysia, Kuala Lumpur* (in press)
- 11) Watanabe, T. (1994) Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorol.*, 70 : 13-35
- 12) Yoda, K. (1978) Organic carbon, nitrogen and mineral nutrient stock in the soils of Pasoh Forest. *Malay. Nat. J.*, 30 : 229-251

(2003.5.17受理)