

E-3 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

(2) 熱帯林の熱・水収支に関する研究

研究代表者 森林総合研究所 谷 誠

農林水産省 林野庁 森林総合研究所

森林環境部 水土保持科 水流出管理研究室 野口正二

森林環境部 防災科 気象研究室 谷 誠

水土保持科 水資源保全研究室 志水俊夫

平成2-4年度合計予算額 13,641 千円

〔要旨〕熱帯林が河川の水流出や気候に及ぼす影響は、その環境形成作用として重要である。そこで、その基礎である熱・水収支を明らかにするため、マレーシアの熱帯降雨林において観測を実施し、その特性について検討した。予備調査の結果、現地は、年2回降雨の多い時期と少ない時期があるが、極端に少なくなる季節はなく、湿潤高温な気候条件をもつこと、森林の流出に及ぼす影響に関する試験結果がすでに得られていて、それによると、森林伐採により年流出量が増加することなどがわかった。この結果を踏まえ、雨量や流出量など基本的な水文観測が実施されている小流域試験地において、新たに試験斜面を設定し、降雨特性、土層構造・土壌の物理性の調査、土壌水分の観測を行った。その結果、次の知見が得られた。1) 強度の大きい降雨が短時間に午後に集中する。2) 斜面上の土層構造は、比較的均質な厚さをもつ表層土層と、その下の厚さの変動の著しい風化土層に分かれる。3) 表層土壌においては、孔隙が深さとともに小さくなるのにとともに、透水性も小さくなる。4) 土壌水分状態の時間変化の特性については、土壌が十分湿潤な場合には、地中への水の浸潤は速やかで、部分的に地下水位の発生もみられる。一方、土壌が乾燥している場合には、深さとともに緩やかに湿潤域が伝達されるが、何回かの降雨により土壌が乾燥から湿潤になるにしたがい、洪水流出量が増加し、ピークの後の減水が緩やかになってゆく。さらに、この水文試験地の研究の他に、森林の熱収支について、マレーシアの別の試験地に観測タワーが設置されたのを受けて観測を開始した。この観測結果の検討については、平成5年以降の再編課題において実施してゆくこととした。

〔キーワード〕熱帯林、水収支、小流域、斜面水文、表層土壌

1. 序

近年、地球規模の気候変動に人間活動が及ぼす影響が問題となり、熱帯地域における森林減少の影響も大きいことが指摘されている。また一方、森林の減少は地域においても、有効な水資源の減少や土砂災害の激化につながる面が大きく、熱帯の各国においても強い関心をもたれている。このような地球規模のあるいは地域における問題への対応を行なうには、森林における熱や水の

輸送過程を実測に基づいて明らかにし、森林の環境形成作用を評価することが必要である。しかしながら、最も重要な地域である熱帯におけるこの面の研究蓄積は乏しく、各地で観測データの収集、一般化のためのモデル化研究が強く望まれている。

本研究では、熱帯林におおわれた地域において、雨水の流出過程および森林－大気の熱・水輸送を測定し、熱帯林の熱・水収支の実態を把握し、その特性を明らかにする。

2. 既往研究のまとめ

観測結果を述べる前に、研究の位置づけに資するため、マレーシア現地の気候条件と既往の森林水文研究の状況について、簡単に調べておく。マレーシアの半島部の気候をみると、気温は年中高く年変化が乏しいのであるが、降雨は季節風の影響によって、年2回の降雨の少ない季節と多い季節が区別される¹⁾。すなわち、1-2月、6-8月の雨量が少なく、4-5月、10-11月の雨量が多い。しかし、乾季でも月雨量は100mm程度あり、熱帯季節林地域に比べれば乾燥は弱く、熱帯雨林の気候帯に属している。年雨量は、2000mmから3000mm程度で内陸に少ない傾向がある。

さて、マレーシアにおいては、国立森林研究所（F R I M）が、すでに各地に森林水文試験地を設置し、降雨の流出に対する森林の影響について試験を実施してきた。森林を伐採してアブラヤシのプランテーションを開発した場合などの、年流出量の変化などの基本はすでに理解できる^{2) 4)}。図-1は、Sungai Tekam試験地

における年間水収支を示したものであり、全期間森林であったC流域に比べ、プランテーション開発の行われたB流域では、移行期間以降、年流出量が増加していることがわかる。すなわち、プランテーション開発によって約300mmの流出量が増加することが指摘できる。

森林水文の基本的特性はこうに理解できるが、熱帯林におおわれた小流域や斜面における水流出の物理機構についてはほとんど明らかになっていない現状である。そこで、乾季と雨季の移り変わりによる土壌水分量の変化が降雨流出応答に及ぼす影響の評価、熱帯特有の短時間豪雨が斜面の土壌侵食に及ぼす影響の評価など、流域条件や降雨条件の流出影響予測についての研究を推進する必要がある、本課題では、流域内部の水文諸条件の調査を実施した。

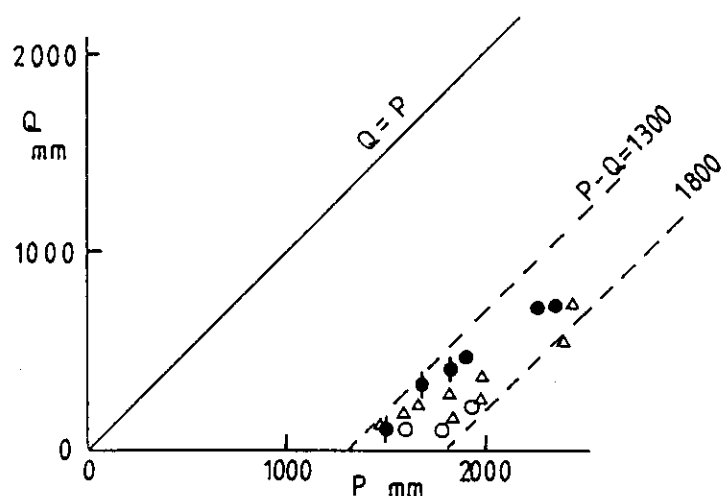


図-1 Sungai Tekam試験地の年間水収支

P : 年総雨量、 Q : 年総流量

△ : C流域（全期間森林）

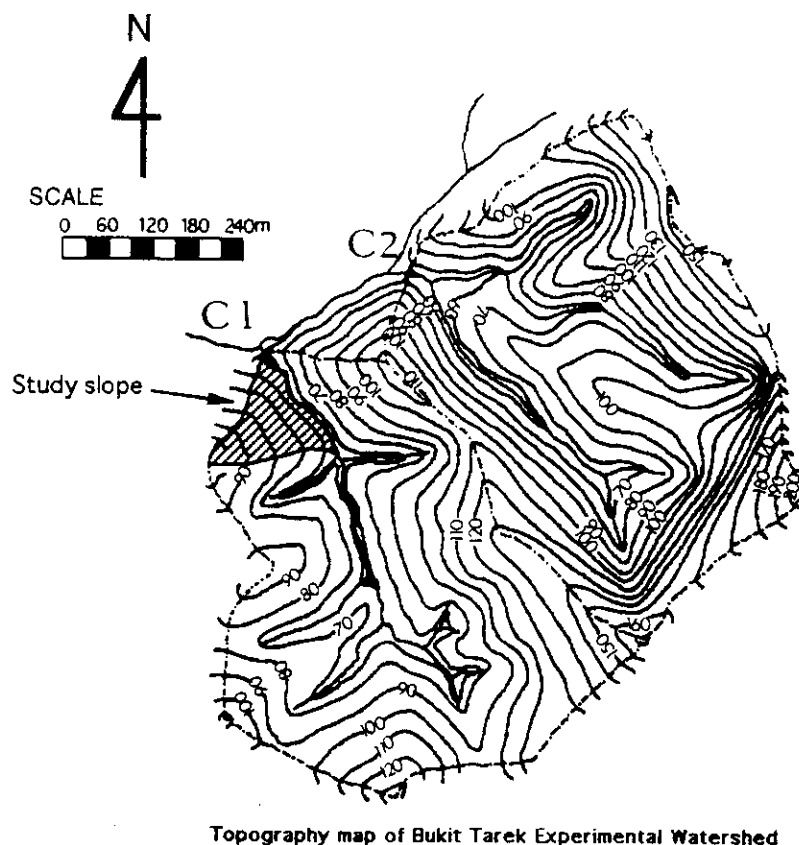
Bサブ流域の ○ : 森林期間、◆ : 移行期間

● : 農地期間

3. 試験地の概要

本課題では、FRIMが設定しているBukit Tarek試験地（図-2）⁵⁾で調査観測を行った。この試験地は、首都Kuala Lumpurの北約50km（北緯3°31'30"、東経101°35'）、Selangor州の北部に位置し、2つの小流域（C1およびC2）からなる。流域面積はそれぞれ32.8ha、34.26haである。植生は、*Koomassia malaccensis* や *Santiria* spp. が多くみられ、ところどころに *Dipterocarpus crinitus* や *Shorea leprosula* がみられる。標高は48m～213m、地質は変成岩で、雲母片岩、千枚岩がみられる。

過去10年（1976～1986）の年平均降水量は2414(mm/year)で、平均年最大・最小気温はそれぞれ33.0°C、21.9°Cである。²⁾



Topography map of Bukit Tarek Experimental Watershed

4. 研究方法

図-2 Bukit Tarek試験地

降雨が与えられた時の土壤水分変化と降雨の流出過程を把握するため、流域内に試験斜面を設定し、降雨特性、土層構造、土壤物理性、土壤水分変化などの観測調査を下記の要領で実施した。

1) 降水量は転倒式雨量計（一転倒0.5mm）を用いて測定した。1時間インターバルデータを用いて、6時間以上無記録の場合は異なる降雨イベントとして区別し、1992年2月～1993年1月の1年間の降雨イベント（1mm以上）について解析を行った。

2) 斜面調査用簡易貫入試験機を用いて試験斜面において11地点で土層深を測定した。なお、 $N_c = 0 \sim 5$ を表土層、 $N_c = 5 \sim 50$ を風化土層とする。ここで、 $N_c = N / d \times 10$ 、 N （回）：打撃回数、 h （cm）：貫入深さ、 $d = h_n - h_{n-1}$ 。

3) 400ccの土壤採取用円筒（ $\phi = 113\text{mm}$, $H = 40\text{mm}$ ）を用いて深さ10, 20, 40, 80cmにおいて土壌を採取し、透水性と保水性を測定する。なお、透水性は定水位法で飽和透水係数を測定し、保水性は砂柱法（pF0.5～pF1.5）と加圧法（pF2.5～pF3.0）によって測定した。

4) エアプール式テンシオメータを試験斜面上にL1（深さ：10, 20, 40, 80cm）、L2及びL3（深さ10, 20, 40, 80, 160cm）に埋設し（位置は図-6参照）、土壤水分を測定した。

4 結果と考察

1) 降水特性

月別降水量、降水日数はともに、収束帯の移動に伴って4、5月と11、12月にピークが現れる。しかし、1年間を雨季と乾季に明瞭に分けることはできない。降水量・降水日数ともに最も少ない1月においても、1時間以内に36mm、32mmの降雨イベントがあり、この地域ではどの月でも豪雨がある。

1992年2月～1993年1月に177の降雨イベントがあった。図-3に示すように、降雨イベントの総雨量の頻度分布は逆J型を示す。1mm以下の降雨イベントは40.1%、20mm以上の降雨イベントは27.1%を占めた。

熱帯の降雨は午後から夜遅くにかけて短時間に強く降ると言われている。図-3にみるように、降雨開始時刻は午後1時～7時にかけて集中し、全体の56.5%を占めた。また、20mm以上の降雨イベントの64.6%はこの時間帯に降り始めた。降雨継続時間の頻度分布をみると、63.8%が1時間以内である。これらには20mm以上の降雨イベントが23含まれている。今回は、1時間データを用いたが、実際はかなり短い時間に強く降るイベントも存在するようであった。

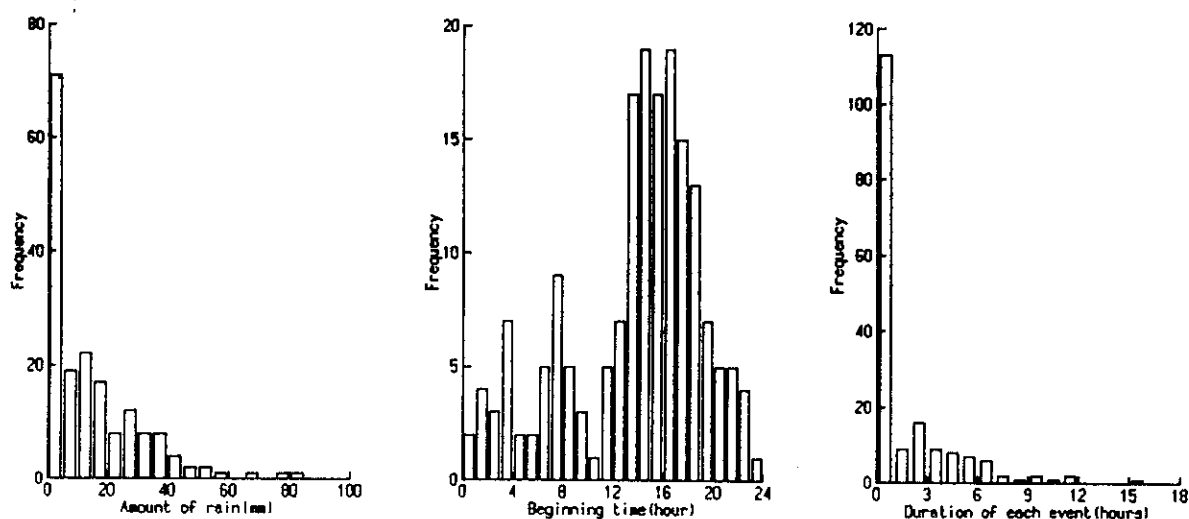


図-3 Bukit Tarek試験地の降水特性

2) 土壌の透水性

図-4に飽和透水係数の測定結果を示す。なお、その値は水温20°Cの時の値に補正している。

斜面下部では深さ10, 20, 40cmで 10^{-2} cm/s、80cmで 10^{-3} cm/sのオーダーとなり、尾根部では深さ10, 20cmで 10^{-2} cm/s、40, 80cmで 10^{-3} cm/sのオーダーとなった。斜面下部、尾根部いずれにおいても、深くなるにつれて飽和透水係数は小さくなる傾向を示した。同じ深さでは、斜面下部より尾根部の方が多少小さい値であった。これらの値は、深度10cmでは1500mm/hr、深度80cmにおいても180mm/hrの降雨強度に相当する。このことは、熱帯の強度の大きい雨であっても、鉛直浸透が可能であることを意味している。したがって、土中での水の動きが流出において重要な役割をもつと考えられる。

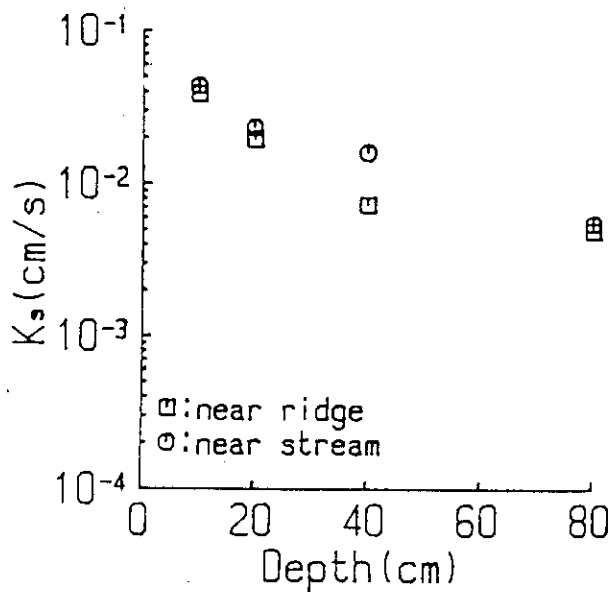


図-4 飽和透水係数の測定結果

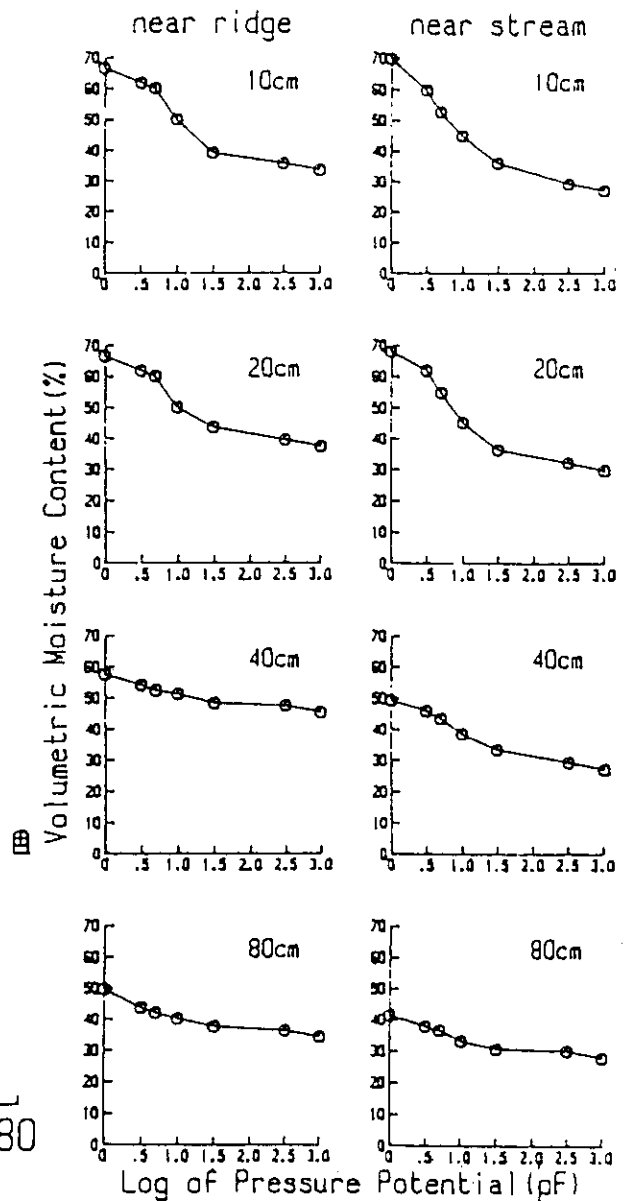


図-5 深度別 pF - 水分特性曲線

3) 土壌の保水性

図-5 に pF - 水分特性曲線を示す。最大含水量は深さ10cmから順に尾根部では、66.5%, 64.2%, 57.6%, 49.6%、斜面下部では70.3%, 68.0%, 49.3%, 41.4%である。尾根部・斜面下部とともに深度が増すにつれて小さくなる傾向があった。図中から読み取れる粗孔隙 (pF0~pF1.8に相当) は、尾根部では10cmから順に28.3%, 21.8%, 9.5%, 12.4%、斜面下部では36.2%, 32.8%, 17.0%, 10.9%であ

る。尾根部・斜面下部でともに40cmで粗孔隙が少なくなっている。次に細孔隙（pF1.8～pF4.2に相当）についてみる。測定値はpF3.0までだが、pF1.5から体積含水率がpF値に比例して変化すると仮定した。尾根部では10cmから順に9.0%, 9.9%, 4.4%, 5.0%で、20cmと40cm間で値が変化している。斜面下部では10cmから順に14.7%, 10.7%, 10.2%, 4.1%で、10cmと20cm間および40cmと80cm間で変化している。粗孔隙・細孔隙ともに40cmまでは斜面下部の方が多い傾向を示し、80cmではほぼ同じ値を示した。なお、仮比重は尾根部で10cmから順に0.66, 0.79, 1.22, 1.53、斜面下部で、0.73, 0.92, 1.49, 1.41であった。

4) 土層深の測定結果

図-6に試験斜面における土層縦断面を示す。表土層はほぼ同じ厚さを示し（範囲：65-110cm、平均値：91.4cm、標準偏差：16.0）、風化土層厚は斜面位置によって大きく変化する（範囲：18-476cm、平均値：221.8cm、標準偏差：126.8）。

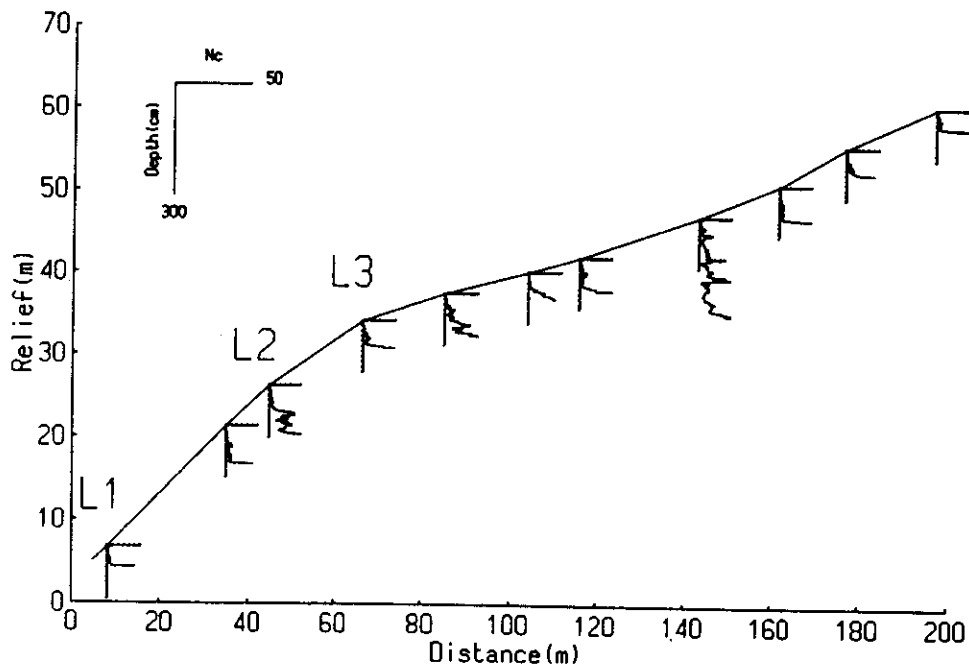


図-6 土層深の測定結果

5) 土壤水分変化

図-7に1992年11月10日～26日および1993年1月1日～31日の土壤水分、降水量、流域流量を示す。まず、11月についてみると、この期間を通じての土壤水分は湿潤であり、サクシオンは-55.2cmH₂O以下の低い値で変化している。各測定点（場所は図-6参照）の各深さのサクシオンの変化は類似しており、速やかに深部にサクシオンが伝達されている。21日の降水（総雨量83.0mm、最大時間雨量47.0mm）時、L3地点では、深度160cmにおいて最大99.1cmH₂Oの正圧が観測され、地

下水帯の発生が確認された。L3地点は勾配変曲点でかつ土層が浅い（161cm）ため、地下水が発生しやすいと考えられる。

次に1月について見ると、12月31日～1月14日までの降水量はわずか3.5mmで、土壤の乾燥過程が示されている。このような乾燥時には、15,16日に降雨があっても、出水流量の規模は小さく、降雨の終了とともにすばやく流量が減水する。その後の土壤水分状態をみると、降雨により高サクションから低サクションに変化してゆくが、このことは、雨水が土壤に保持されてほとんど流出しない状況を示している。河道付近や局所的な表面流だけが流出成分となっているため、急な減水をもつ小さな流出ハイドログラフが得られたと考えられる。これ以降、土壤の乾燥状態が解消され低サクションになるにつれて、土壤中に保持された雨水の一部が流出成分となるため、出水時の流出量が大きくなり、その減水が緩やかになっている。このように、土壤が乾燥から湿潤に移行するにともなって、降雨の流出へ寄与する程度が変化する傾向が明らかになった。

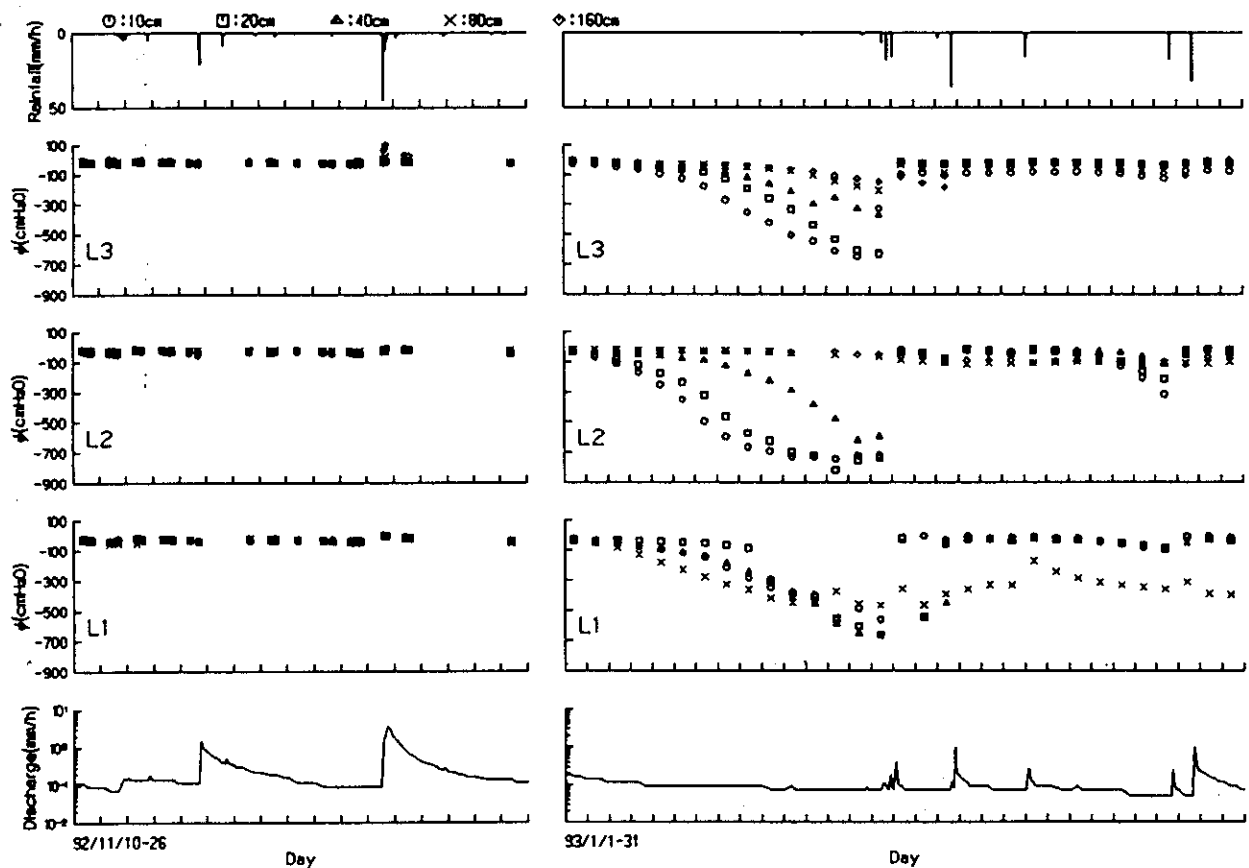


図-7 Bukit Tarek試験地における土壤水分、降水量、C1流域の流量の測定結果

5. 今後の課題

本研究は、熱帯林流域における雨水の流出過程をモデル化する上で必要な、流出経路の情報を得ることをさしあたりの目的とし、FRIM側の全面的な協力によって、斜面上の土層構造、土

壤物理性などの実測値を得ることができた。従来、熱帯林地域のこの種の情報はたいへん乏しいものであったから、今後の流出特性の解明研究のてがかりとして重要な知見が得られたものと考えている。平成5年度からの課題「熱帯林の水流出特性に関する研究」では、その特性を解明するよう、研究を進めてゆく。また、これまでの観測では、とくに土壌水分の時間変化についてまだ十分なデータが得られていないので、今後はこれに重点をおき、降雨の流出過程における土壌水分の役割を解明してゆきたい。

6. 微気象観測の概要

以上の水収支に関する研究に加え、熱帯林の気候形成作用解明のために必要な森林熱収支を把握するため、熱帯雨林において、微気象観測を行うことにした。観測試験地は、Kuala Lumpurの西南西70km、Negri Sembilan州に位置するPasoh試験地（北緯2°59'、東経102°17'）であり、1992年に設置された40mの観測タワーに気象測器を設置して、1993年3月に観測を開始した。

図-8は、4月10～11日における、下向き日射(s.d.)、35.6m高の風速(w.v)、気温(t.)、相対湿度(r.h)、樹冠上の雨量(r.)の観測結果を示したものである。今回の観測では、夕方から夜にかけて風が強くなり雷雨が発生する場合が多いこと、アルベドは約0.12程度であること、地中熱流は小さく日射量の1/100のオーダーであることなどの結果が得られた。これらは、熱帯林の放射エネルギーの収支や、微気象環境の基礎資料となる。

今回得られた結果は、試験的なものであるので、今後、平成5年度から開始する「熱帯林の微気候形成作用の解明に関する研究」において、気象観測を継続するとともに、森林-大気間の熱や水蒸気、二酸化炭素などの交換量の推定を目的とした集中観測を随時実施することにする。これにより、熱収支の特性を検討し、気候形成に及ぼす熱帯林の役割の評価をめざして、研究を推進してゆきたいと考えている。

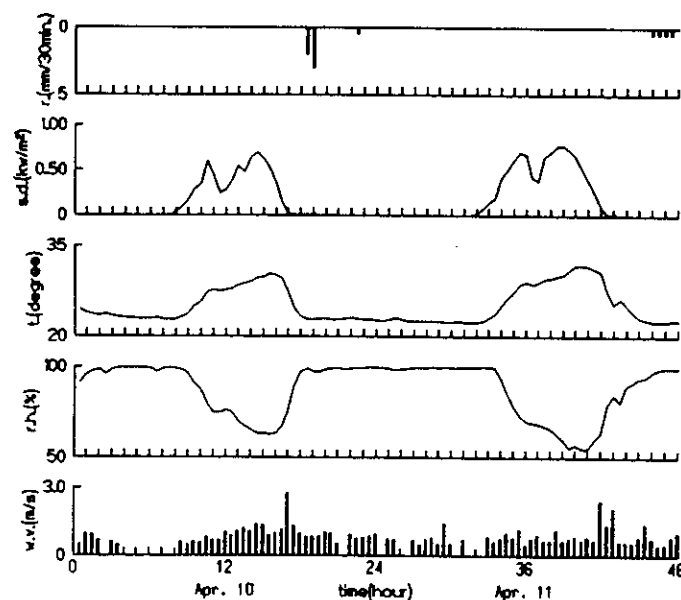


図-8 Pasoh試験地における気象観測結果

引用文献

- 1) Robiah, Leong, Yip and Kelsom (1988): Mean monthly, mean seasonal and mean annual rainfall maps for Peninsular Malaysia. Bahagian Parit dan Taliair Kementerian Pertanian Malaysia, water Resources Publ. No. 19
- 2) Saifuddin S., Abdul R. and Muhammad R. (1991): Establishment and physical characteristics of Bukit Tarek watershed, FRIM research pamphlet No. 110
- 3) Sungai Tekam Experimental Basin Transition Report, July 1980 to June 1983. Bahagian Parit dan Taliair Kementerian Pertanian Malaysia, water Resources Publ. No. 16
- 4) Sungai Tekam Experimental Basin Final Report, July 1977 to June 1986. Bahagian Parit dan Taliair Kementerian Pertanian Malaysia, water Resources Publ. No. 20

[国際共同研究等の状況]

国際共同研究計画名: FRIM-NIES-UPM Joint Research Project on

Tropical Forest Ecology and Biodiversity

カウンターパート: Abdul Rahim Nik, Zulkifli Yusop, Baharuddin Kasran

and Saifuddin Sukaiman (Forest Research Institute Malaysia, FRIM)

参加・連携状況: カウンターパートである、FRIMの水文研究室の全面的な協力により、海外における観測研究を進めているが、土壌水分や気象要素を過酷な現場条件の中で長期間観測する上で機器の故障などが避けられず、迅速な対応ができない場合もあった。このため、FRIM側に負担をかけているが、観測が維持できている。FRIMの水文研究室のAbdul Rahim Nik室長はじめ研究員、観測スタッフの努力に心から感謝したい。

[研究発表の状況]

野口正二・三森利昭・谷誠・Abdul Rahim Nik・Saifuddin Sulaiman(1993): 熱帯小流域の水・土砂流出特性 (I) - Bukit Tarek試験地の斜面水文観測概況 -、第104回日本林学会大会要旨集、p. 255

Tani, M., Sammori, T., Noguchi, S., Abdul Rahim Nik, Zulkifli Yusop, Baharuddin Kasran and Saifuddin Sulaiman (1993) (予定): Quantification of hydrological processes in tropical forests, Research Report for 1993 of Forest Research Institute Malaysia