

湿潤地帯の森における水の流出： 神話 vs 観測結果

ニック・A・チャペル

本論は、ユーラシア大陸の両端に位置する熱帯のマレーシアと、温帯の英国における、湿潤地帯の森林の水文学的な役割、ならびに林業が水にもたらす影響についての「一般的な信仰」に対して、科学者の立場で展望したものである。マレーシアにおいては、50年以上にわたり自然林の択伐がほとんどであったのに対し、英国では同じ期間に外来の針葉樹を植林して小面積皆伐を行うのが一般的であった。これらの（日本とは若干異なる）2地域での森林及び林業の及ぼす影響を解析する目的は、十分に証明された結論を明快に解説することよりは、活発な議論を促すことである。

A. はじめに

全ての土地利用は悪影響と好影響の両方の側面を持つ。例えば、都市的土地利用は、汚染の一方経済的文化的な繁栄をもたらす。同様に、管理された森林も好悪両方の側面を持っている。例えば、熱帯湿潤地域では、経済的な好影響を評価する一方で、社会的環境的な悪影響についても同時に考慮する必要がある。湿潤地帯の森林経営における問題として、英国であれマレーシアであれ、(a) 森林の水文学的な役割、及び、(b) 林業が水環境に及ぼす影響についての「一般的な信仰」が存在することを挙げなくてはならない。一般的な信仰の中には、後述する科学的手法による実験などの科学的な根拠をもたないものもあり、ひどい場合には科学的な理論についての誤解を含んでいるものもある。

これは何を意味するのであろうか？ 社会経済的見地から見ると、森林地の開発が不必要に制限されることを意味するかもしれない。また、生態学的また

は環境学的な見地から見れば、不正確な科学に基づいた政策によってとるにたらない影響が保護される一方で、この保護対策によって深刻な影響がかえって悪化することを意味するかもしれない。例えば、無舗装の切り土による道路上に樹冠が覆い被さるままにした場合、雨滴による侵食を減少させることが出来るかも知れないが、道路が日射により乾燥しない場合、崩壊の危険性が大きくなることが考えられる。

ところで、これらの一般的な信仰とはどんなものがあるであろうか？ 少なくとも以下の9項目を挙げる事ができる。(i) 流水流量の増加は斜面地表流によるものである。(ii) 森林を伐採すると斜面上で(土壌の浸透能を超過して発生する)地表流が増加し、ピーク流量が増加すること。(iii) 森林は「スポンジ」のような機能を持ち、河川流量を増加させること。(iv) 森林を伐採することにより無降雨時の流出量が減少すること。(v) 森林を伐採することにより河川の流量変動が大きくなること。(vi) 森林があることにより地域の雨量が増加すること。(vii) 溪流に河川に流れ込む水の生化学的な水質が森林があることにより改善されること。(viii) 森林があることにより侵食量崩壊量が遅くなること。(ix) 森林を伐採することにより侵食が増加し斜面が不安定になること。

B. 一般的な信仰と研究結果の比較

ここでは、英国やマレーシアのような国における9つの一般的な信仰のそれぞれについて、主に同じ国を対象とした現地観測やモデルに基づいて比較検討する。

1. 流水流量の増加は斜面地表流によるものである

上述の点は、少なくともマレーシアや英国などの湿潤地帯では、科学的な現地観測による事実と異なる。この結論については以下の4つの証拠を挙げる事が出来る。

第1に、斜面(河道以外)で多量の地表流が発生することはほとんどないことである。このことは、1930年代から Charles Hursh などの米国の林学者が観察を通じて述べてきたことである。著者が英国、米国並びにマレーシアの森林で豪雨時に観察を行った結果も同様であった(例えば Chappell ら, 1990,

1999)。第2に、森林斜面の主な小区画におけるプロット試験の結果から、地表流の割合がたいへん小さいことがわかっていることである。例えば、赤道に近いボルネオのダナン (Danum) 調査地では、地表流は溪流流量の5%以下であった (Sinunら, 1992, Chappellら, 1999より)。森林内の一部 (例えば、樹幹直下部、転圧された林道や集材路、急斜面上にある撥水性の林床等) では、地表流の比率はこれより高くなる。例えば、ダナンの被覆のない集材路では溪流流量の約20%から50%であったが (前掲論文より)、林道・集材路の流域面積に占める割合は2%以下であったことに注意すべきである (Chappellら, 2004)。第3に、(例えば英国の高地やマレーシアといった) 湿潤地帯の降雨強度は、土壌浸透能と比べて非常に小さく、森林地ではより顕著である (例えばダナン (Danum) における降雨強度 (Chappellら, 2001) と表土の透水性 (Chappellら, 1998など))。世界的に非常に強い熱帯低気圧性の降雨が発生する地域 (例えばオーストラリアのクイーンズランド、マダガスカル、フィリピンなど) では、降雨強度が土の浸透能を超えることがしばしばあるかもしれない (例えば Bonell and Gilmour, 1978を参照のこと)。

地表流が発生せず、地中流がほとんどであるという事実は、(例えば塩素といった) 水中に存在する化学反応性の低いトレーサーを用いた実験によって最終的に証明されている。すなわち、雨水中のトレーサーの濃度は変動が大きいのに対し、河川水中の濃度の変動は非常に小さい (例えば英国の高地のプリンリモン (Plynlimon) 流域など (Neal and Kirchner, 2000))。このように、雨水は斜面の表面上を流れて河川に入るのみではなく、溪流に流れ込む前に大量の貯留地中水と混ざっていることになる。よって、流域研究の結果、以下の結論を得ることが出来る。

「湿潤地帯の森林 (及び草地) では、豪雨による河川流量の増加は、地中水の急速な移動によって生じる」

2. 森林を伐採すると斜面上で (土壌の浸透能を超過して発生する) 地表流が増加し、ピーク流量が増加すること

湿潤熱帯林において、択伐の影響に関係する最も信頼できる流域水収支研究は、半島マレーシアのブルンブン山 (Bukit Berembun) においてマレーシア森林研究所 (FRIM) が行ったものであろう。ここでの実験データを再解析した結果、従来行われてきた方法で伐採を行った直後には、(基準流域の洪水流

量はわずかに減少したが) ピーク流量は1.43倍に増加した (Chappell ら, 2004)。ピーク流量の一時的な増加が, (硬化した地面が流域面積の4.9%に過ぎないにせよ) 地表流による速やかな流出経路からの流出量の増加によるものであるのか, または, 樹冠遮断蒸発が減少することで地面に達する林内雨量が増加することによるのかは明らかではない。Subba Rao ら (1985) や Gilmour (1977) による類似の研究では, こうした変化はもっと小さかった。

英国の森林においては小面積の皆伐がピーク流量に与える影響について, 著者の知る限り, 公表された研究事例がない。アメリカの北西部では, Jones and Grant (1996) の解析では, 道路建設や針葉樹の伐採によりピーク流量が増加することが示されている。しかしながら, Thomas and Megahan (2001) は, これらの効果は比較的小規模の降雨の場合に限られることを示唆している。従って, 流域研究の結果, 以下のことが言える。

「(通常の降雨による) 河川のピーク流量の小さな増加は, 伐採の度合いが小さいときに起こりうるが, それが樹冠遮断蒸発の減少によるものではなく地面の硬化によるものであるという決定的な証拠はほとんどない」

3. 森林は「スポンジ」のような機能を持ち, 河川流量を増加させること

この項目を検討するときに, 4つの鍵となる事項があるだろう。

第1に, 湿潤地帯の森林の樹冠それ自体 (または幹) は, ほとんど水を貯留させないことである (Calder, 1990, Tani ら, 2003)。

第2に, 1940年代にアメリカで行われた (例えば Hoover, 1949), 土壌研究によって森林土壌は天然林を牧畜的な農地に転換した土よりも大きな間隙を有することが明らかにされていることである。しかしながら, 川の流出量を決めるのは, 地面から1m (A層及びB層) までの土壌よりも下方の深部の貯留水であることである。現在ではこれらの風化した岩や崩積土における深部貯留からの排水が, 小流域であっても河川流出量の非常に重要な構成要素であると考えられている (例えば Hill, 2000, Chappell ら, 2004を参照のこと)。これらの深層の構造は通常森林による攪乱の影響を受けないわけである。

第3に, (特に湿潤地帯の) 全ての流域試験では, 木の除去により河川の流出量が増加することが明らかになっている (Bosch and Hewlett, 1982, Bruijnzeel, 2001 a)。これはそもそも, 樹木の除去に伴い樹冠遮断蒸発量と蒸散量

のどちらかまたは両方が減少することによる。逆に、英国の高原地帯の荒地を緑化することにより河川の流出量は減少する。この例では、樹冠遮断蒸発の増加が大きく影響する (Robinson ら, 2003)。このことは、1950年代に英国ランカスターの近くのボウランドフェルズ (Bowland Fells) において、Frank Law 氏の先駆的研究により見出され、水文学研究所 (Institute of Hydrology) (現在は CEH (生態水文学研究所) Wallingford) が英国のプリンリモン (Plynlimon) 流域で行った研究により確認された。この地域では、牧草地においては降水量の19.6%が蒸発するのに対し、67.5%が針葉樹で植林された箇所では25.4%が蒸発したのである (Hudson ら, 1997)。

最後に、天然林を水需要量の多い栽培植物に置き換えること (アグロフォレストリ計画の一部を含む) により、蒸散量が増加し無降雨時の河川流出量が減少することが考えられる。水要求量が高く水収支に悪影響を及ぼすことが考えられる栽培樹木の一つとして例えばユーカリがある (Le Maitre ら, 2002, Robinson ら, 2003)。従って、現地観測からは以下のことが導かれる。

「天然林を農地に転換するとき生じる地表近く (1 m 以浅) の間隙率のわずかな減少量は、河川流出量のもととなる流域全体の貯留量と比較したときにとるに足りない程度である。したがって、もし『スポンジ効果』が『貯留』を意味するのであれば、それは河川の挙動にほとんど影響を及ぼさない」

そして、

「湿潤地帯の森林は水要求量の高い栽培植物と比較したときには河川流出量は多いかも知れないが、水要求の低い牧草地よりは明らかに少なくなる」

4. 森林を伐採することにより無降雨時の流出量が減少すること

Bruijnzeel によるレビュー (1990, 1996, 2001 a) によると、湿潤熱帯林においては、森林伐採により低出水時の流出量が増加するという結果がほとんどの研究で得られている。明らかに、天然林が (例えばユーカリといった) 水要求量の高い作物や樹木に置き換えられたときには、逆のことが考えられる。著者は英国において針葉樹の植林が、低出水時の流出量に与える影響を評価した

研究を目にしたことがない。従って、現地観測からは以下のことが導かれる。

「湿潤地帯で残された森林を伐採すると、蒸発散量が減少し、低水時の流出量、総流出量ともに増加するが、天然林を水要求量の大きい作物や樹木に転換すると、低水時流出量及び総流出量には逆効果となり得る」

5. 森林を伐採することにより河川の流量変動が大きくなること

われわれは最近、熱帯林で択伐の結果として溪流の流出量変動が大きくなることがあるのかどうかについて調査を行った。われわれは半島マレーシアのブルンブン山 (Bukit Berembun) 流域におけるデータセットの再解析を2つの異なる手法で行った (Abdul Rahim and Harding, 1992を参照のこと)。第一の手法は、流況曲線 (FDC) (Searcy, 1959) を用いた手法である。河川の流出量の変動の大きさはFDCの特定部分の傾きによって評価される。Ward (1981) の手法にならい、Q₃₀ (即ち流況曲線において上位から30%にあたる日の流量) とQ₇₀との間の傾きを選択し評価を行った。解析の結果、伐採と直後の回復の2年間 (1984-85) で、通常的手法で伐採された流域は、わずかに変動が大きくなったが、1984-88年のより長期について検討を行った場合には伐採前と違いが見られなかった。一方、影響を小さく抑制する伐採法 (Reduced Impact Logging, RIL) により伐採を行った流域では、流出量変動がむしろ減少した。このことは、樹木の除去に伴う蒸散量の低下により低出水時の流量が増加することによる結果であると考えられる (Chappellら, 2004)。

流況曲線を用いた解析は、統計を導くために用いる曲線の特定の箇所に依存するためやや主観的である。もし流量の全域を把握することによって流出応答特性を検出することができれば、上記の変化の結論はもっと信頼できるはずである。ダイナミックモデル (物理的な流出機構に基づいたモデル) はこれらのことを実現させると考えられる。しかしながら、パラメータの値を求める過程で複数のパラメータが相互に影響し合うという問題があるため、パラメータの意味を解釈することは、儉約的なモデルによるアプローチ (すなわち、簡潔かつ効果的にまとめられ、わずかのパラメータしか必要としないようなモデルによるアプローチ) でないと成功しないということを認識しなければならない。(Young, 2001)。ランカスター大学で行っているデータに基づくモデル化研究 (DBM) は、そのような儉約的なアプローチの一つである。

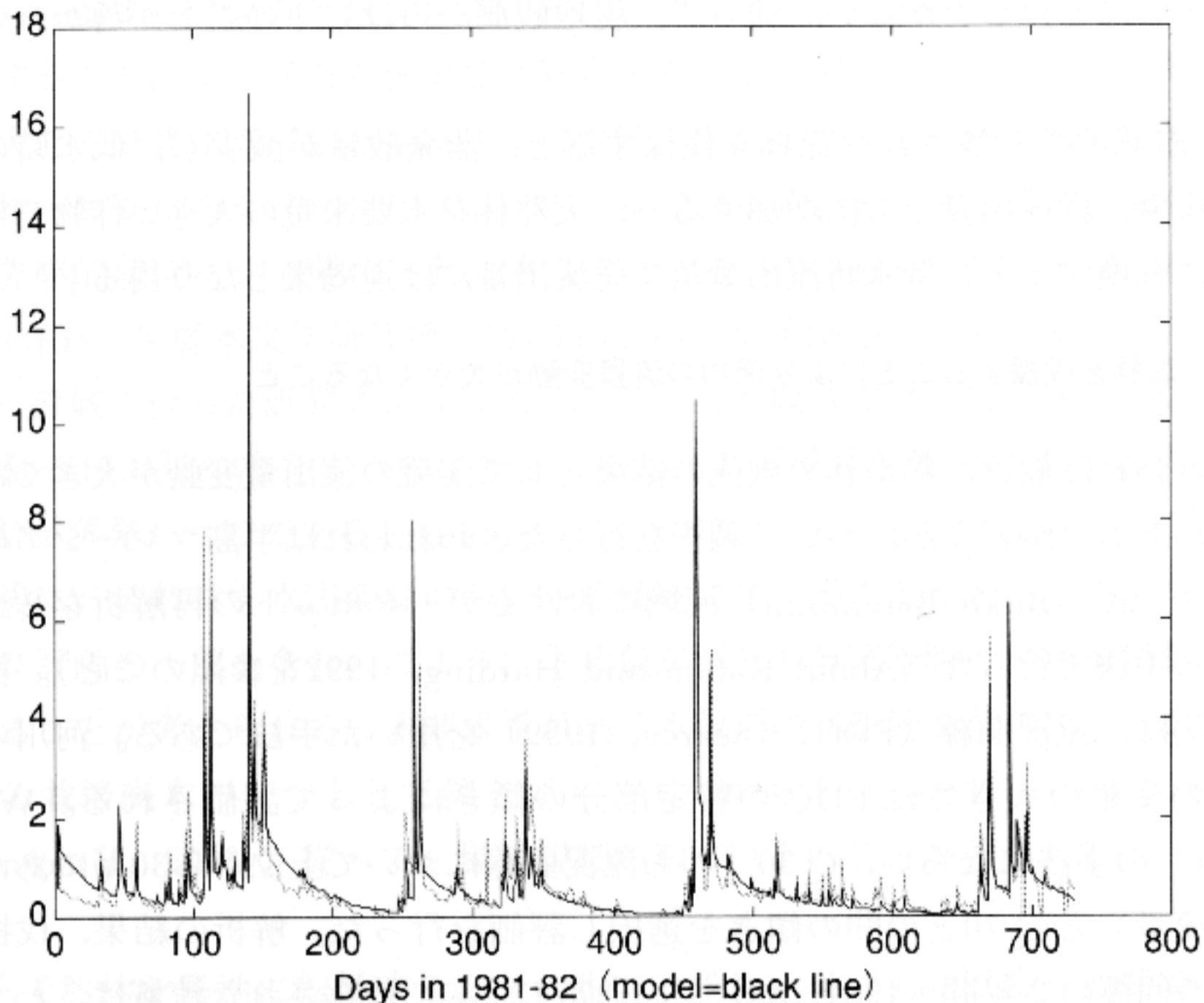


図1 1981-82年においてブルンブン山 (Bukit Berembun) のCI流域における観測流量 (破線) 並びに計算流量 (実線)

DBMは、(i) 線形の伝達関数 (非線形の物理過程は内包される) に基づくモデル構造の同定、(ii) 客観的な統計的推定による不合理なモデル構造の棄却、(iii) 流出システムのふるまいを物理的に解釈できるかどうかによる最終的なモデルの選択を組み合わせたものである (Youngら, 1997)。我々は、FDC (流況曲線) 解析を行ってきたブルンブン山 (Bukit Berembun) のデータセットについて、DBMによるモデルアプローチを適用した。解析にあたり、1981-82年 (伐採前) と1984-85年 (伐採中及び伐採直後) の2期間を選択した。流出システムのふるまいに関する非線形性については Store-Surrogate サブモデル (Young, 2001) を適用した。

本モデルは、単純な一次モデル構造によって河川流出量変動のほぼ90%を説明できることを示している (図1参照)。ここでは、ブルンブン山の流出応答特性 (Dynamics Response Characteristics, DRCs) を、単一の時定数 (TC) 項で表現するため、双方の期間において、非線形な関係式に表れる指数を変え

ないようにした。伐採前の期間では、TCが 23.06 ± 0.19 日であったのに対し、伐採途中並びに伐採直後の期間ではTCが 23.47 ± 0.17 日であった。このように、骨太な (robust) モデリング手法を用いることによって、通常の択伐手法が河川流出変動を大きくさせないことが明らかになった。なお、英国の河川流出部分に及ぼす皆伐の影響はまだ研究がなされていない。したがって、この特に配慮された熱帯の林業経営システムの影響についてのモデル研究からは以下のことがいえるであろう。

「湿潤林におけるすべての森林（例えば赤道直下の熱帯雨林など）、攪乱が河川の流出変動を大きくし続けるというわけではなくて、地形が急峻で比較的透水性のよくない地域箇所、皆伐した後に継続的に土地を圧密させるようなことをした場合に流出変動が大きくなると考えられる。」

6. 森林があることにより地域の雨量が増加すること

森林が存在することにより降雨量が増加することは、1世紀以上もの間森林関係者の間で考えられてきた（例えば Brown, 1877）。観測による研究としては、HAPEX-Sahelの研究により、半乾燥地において蒸発量の多い一部の地域では、降雨量が増加することがわかっている（Taylor and Label, 1998）。したがって、森林地域からのより多量な蒸発量は、理論的には、多くの降雨をもたらすことになる。

湿潤熱帯林を対象として、全球気象モデル（GCM）により森林消失の影響を評価する研究がいくつかなされている。しかしながら、森林の減少の降水量への影響は、研究によって非常にばらつきが大きい（Henderson - Sollers ら, 1996, Fowell and Chappell, 2002）。この理由には、現況のGCMでは熱帯の降雨の空間的および時間的な特性を表現する性能が不十分であるということなどが挙げられる（Fowell and Chappell, 2003）。

森林による降水量増加の可能性のある地域として高山が挙げられ、これに関する関心が高まっている。すなわち、高山では雲霧林が雲水を捉えることによって降水量が増加するというわけである。したがって、現地観測及びGCMモデリングの結果として以下のことが言える。

「森林による降水量の増加メカニズムは存在するが、観測による確かな証

拠は依然として欠けている」

7. 溪流に河川に流れ込む水の生化学的な水質が森林があることにより改善されること

1930年代から1960年代にかけて、英国の森林関係者は、水を農業による汚染から守るために高地の貯水池のまわりに（いわゆる緩衝地帯として）針葉樹を植林してきた。著者は湿潤林が川に流れ込む水の生化学的な性質を改善させるかどうかについて4つの課題を挙げたい。第1に、森林は他の土地利用と比較して一般に化学的な入力が多く、それ故に富栄養化や農薬および工業による汚染が水の経路に及ぼす損害が少ない。第2に、河畔林は栄養分を浅層の地下水から取り込むことができるため、もし河畔近くの地中流が浅く根系の箇所を迂回せずに（排水管、水路、自然に出来たパイプ状の経路、深部の流出経路などを通して）通っているならば、樹木は河川を上流の農業による汚染から「緩衝」するはずである。第3に、酸性の強い地質上の土地に植樹された針葉樹は湿潤温暖な高地の河川の酸性化を助長することがある（例えば Chappell ら, 1990, 1996, Waters and Jenkins, 1992）。最後に、湿潤地域を広大な地球規模で見た場合、森林の攪乱（例えば伐採）は栄養分の流出量を増加させてきた（Swank, 1988, Bruijnzeel, 1990, Stevens ら, 1995）。この結論がよく証明されている一方で、熱帯の択伐施業についてこの影響の大きさと持続期間を定量化する研究は非常に少ない（Chappell ら, 2004）。最も信頼できる流域研究は、おそらく Yusop (1989) が半島マレーシアのブルンブン山で行ったものであろう。この試験地では、主要栄養分（硝酸、リン酸、カリウム、カルシウム、マグネシウム）の流量は、伐採年において、（通常の手法で）択伐された流域においては1.7から5.6倍に増加し、RIL（影響を小さく抑制する択伐手法）を行った流域においては1.2から2.1倍に増加した。硝酸の損失量は伐採年において確かに増加したが、この熱帯の環境においては、伐採終了後6ヶ月以内に元の水準に戻るということがわかった。このような栄養分の循環の急速な回復は、熱帯林が皆伐や火入れ処理されたときでさえも観測されている（Malmer and Grip, 1994）。英国の針葉樹を皆伐するときには、栄養素に及ぼす伐採の影響はより長く持続する。例えば、プリンリモン（Plynlimon）のホア（Hore）流域のケースでは8年かかった（Neal ら）。従って、現地観測の結果以下のことがいえよう。

「湿潤な森林が存在することは、酸性の強い荒地に針葉樹を植林する場合を除いて、河川の生化学的な水質には有益である」

また、次のようにもいえる。

「湿潤林を伐採することは、河川への栄養分の流出量を増加させるが、影響の持続期間（月あるいは年を単位とした時間）はその生態系のもつ一次生産力に依存する」

8. 森林があることにより侵食量崩壊量が遅くなること

森林（天然林・人工林）において土砂収支量を観測した結果、侵食量が大きい場合も小さい場合もあることがわかっている。例えば、英国の高原地帯において皆伐後に植林した地域では、侵食量が $57.1 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ と少なかった（プリンリモン（Plynlimon）のホア（Hore）流域（Kirbyら, 2004））。一方、ボルネオの泥岩地質上の攪乱のはいっていない多雨林の流域では、侵食量は $300 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ と大きかった（ボルネオのW8S5流域（Chappellら, 2004））。これらのことから、現地観測の結果以下のことが導かれる。

「森林地の侵食量は他の植生条件をもつ地域と比べて、（地質、テクトニクス、地形や気候の違いにより）多い場合と少ない場合の両方がある。いずれにせよ、永続的な植生被覆が侵食防止に役立つことは明らかである」

9. 森林を伐採することにより侵食が増加し斜面が不安定になること

全ての研究で、森林における排水溝や林道の建設や伐採が侵食や斜面の不安定を増加させることが得られている。例えば、Kirbyら（1991）によれば、英国の高地において、一定期間にわたって改良された牧草地には $6.1 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ （サイフ（Cyff）流域）の土砂が生産されるときに、人為的に枯渇させた針葉樹の植林地である隣接した3つの流域（タンルウィス（Tanllwyth）、ホア（Hore）およびハフレン（Hafren）流域）では、生産量はそれぞれ12.1、24.4及び $35.3 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ であり、1.9から5.8倍大きかった。局所的な皆伐の結果、Hore流域の土砂生産量は $57.1 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ 、すなわち比較して2.3倍に増加した。ただし、この生産量は英国内の小流域の土砂生産量の平均値である 50 t/km^2

/yr よりも必ずしも大きくないことには注意すべきである (Moffat, 1991)。

湿潤熱帯林では、森林の攪乱が土砂生産量に与える影響は一般的に大きい、そのばらつきは非常に大きい。著者らは択伐施業の影響を中心に研究を行ってきた。Chappell ら (2004) は、択伐が熱帯の天然林に与える影響を評価する研究は 4 例あるのみで、全てがマレーシアで行われていることを指摘している。それらの研究のうち 2 つは、泥岩地帯での林道建設と伐採による土砂生産の増加量がそれぞれ 4.3, 5.3 倍であるとしているのに対し、他の花崗岩地域での 2 つの研究では、20 から 56 倍に増加したとしている。研究が少ないため、(a) 熱帯地域で最も影響を受けやすい地域、(b) 森林施業法の違いによる侵食の差異について正確に明らかにすることは非常に困難である。従って、現地観測の結果として導かれることは以下の通りである。

「湿潤熱帯地帯のいくつかの地域において、森林施業は、侵食並びに斜面の安定に対して大きく悪影響を及ぼすが、保護地域の設定や最善の施業法の決定を行うためにはより多くの研究が必要である」

C. 結論

農業や工業が行われている地域とくらべて、湿潤天然林における河川の化学的な水質は一般的にすぐれている。湿潤地域の森林施業の結果として、低水時の流量や水資源量の減少、流域の貯留容量の変化や降雨量の変化などといった多くの悪影響が発生すると一般的に信じられているが、研究結果にこれが明白に表れているとはいえない。例えば、河川流出量変動の大きさについては、マレーシアの多雨林での択伐など、地域や森林によってはそうした影響が確認されなかった。

しかしながら、湿潤地域における森林の攪乱によって河川の濁度は明白な増加が見られた。濁度に及ぼす大きな変化は、湿潤熱帯林の攪乱により生じるが、最も負荷の小さい森林施業法を特定するためには多くの研究が必要である。今後の検討にあたって考えなければならないことは、(a) 発生する変化に対して確固たる科学的証拠があること、そして、(b) 絶対的または相対的な変化が非常に大きいことといった条件を満たす影響のみを、環境保護対策の対象として取り上げるべきだということである。侵食や崩壊に対する影響はこの部類に

入るといってよい。

最後にひと言，林業は社会的，経済的，環境的に重要であり，これらの観点すべてのバランスをとる必要がある，ということ述べて，本稿を閉じたい。

引用文献

- Abdul Rahim, N. & Harding, D. (1992). Effects of selective logging methods on water yield and streamflow parameters in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 5 : 130–154.
- Bidin, K. (2001). Spatio-temporal variability in rainfall and wet-canopy evaporation within a small catchment recovering from selective tropical forestry. Unpublished PhD thesis. Lancaster: University of Lancaster.
- Bonell, M. & Gilmour, D.A. (1978). The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. *Journal of Hydrology*, 39, 365–382.
- Bosch, J.M. & Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 : 3–23.
- Brown, J.C. (1877). *Forests and moisture*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Bruijnzeel, L.A. (1990). *Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of the art review*. Paris: UNESCO.
- Bruijnzeel, L.A. (1996). *Predicting the hydrological impacts of land cover transformation in the humid tropics: the need for integrated research*. In *Amazonian deforestation and climate*, eds. J.H.C. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts, & R.L. Victoria, pp. 15–55. Chichester: Wiley.
- Bruijnzeel, L.A. (2001 a). Forest hydrology. In *The Forests Handbook*, ed. J. Evans, pp 301–343, Oxford: Blackwell.
- Bruijnzeel, L.A. (2001 b). Hydrology of tropical montane cloud forests: a reassessment. *Land Use and Water Resources Research*, 1 : 1.1–1.18.
- Calder, I. (1990). *Evaporation in the uplands*. Wiley, Chichester.
- Chappell, N.A., Ternan, J.L., Williams, A.G., & Reynolds, B. (1990). Preliminary analysis of water and solute movement beneath a coniferous hillslope in mid-Wales, UK. *Journal of Hydrology*, 116, 201–215.
- Chappell, N.A., Stobbs, A., Ternan, J.L., & Williams, A. (1996). Localised impact of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) on soil permeability. *Plant and Soil*, 182, 157–169.
- Chappell, N.A., Franks, S.W. & Larenus, J. (1998). Multi-scale permeability estimation for a tropical catchment. *Hydrological Processes*, 12 : 1507–1523.

- Chappell, N.A., McKenna, P., Bidin, K., Douglas, I. & Walsh, R.P.D. (1999). Parsimonious modelling of water and suspended - sediment flux from nested - catchments affected by selective tropical forestry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B.*, 354 : 1831 - 1846.
- Chappell, N.A., Bidin, K., and Tych, W. (2001). Modelling rainfall and canopy controls on net - precipitation beneath selectively - logged tropical forest. *Plant Ecology*, 153, 215 - 229.
- Chappell, N.A., Nik, A.R., Yusop, Z., Tych, W and Kasran, B. 2004. Spatially - significant effects of selective tropical forestry on water, nutrient and sediment flows: a modelling - supported review. In *Forests - Water - People in the Humid Tropics*, Bonell M. and Bruijnzeel, L.A. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge. in press.
- Fowell, M. & Chappell, N.A. (2002). Potential impacts of forest change in SE Asia: how valid are GCM studies? Presented at the *ES4 Workshop*, University of East Anglia, UK.
- Fowell, M. & Chappell, N.A. (2003). A spatio - temporal methodology for evaluating GCM simulations of tropical water fluxes. *UGAMP Newsletter*, 27 : 9 - 11
- Gilmour, D.A. (1977). Effect of rainforest logging and clearing on water yield and quality in a high rainfall zone of North - east Queensland. In *Symposium on The Hydrology of Northern Australia, Brisbane*. pp. 156 - 160. Old National Conference Publication No. 7715, Institute of Engineers (Australia).
- Henderson - Sellers, A., Zhang, H. & Howe, W. (1996). Human and physical aspects of tropical deforestation. In: T.W. Giambelluca and A. Henderson - Sellers (Eds), *Climate change: Developing Southern Hemisphere perspectives*. Wiley: Chichester, pp. 259 - 291.
- Hill, T. (2000). Dynamic modelling and analysis of hydrochemistry in upland forested catchments. Unpublished PhD thesis, University of Reading, UK.
- Hoover, M.D., (1949). Hydrologic characteristics of South Carolina Piedmont forest soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 14 : 353 - 358.
- Hudson, J.A., Crane, S.B., & Blackie, J.R. (1997). The Plynlimon water balance 1969 - 1995 : the impact of forest and moorland vegetation on evaporation and streamflow in upland catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1 : 409 - 427.
- Jones, J.A. & Grant, G.E. (1996). Peak flow responses to clear cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon, *Water Resources Research*, 32 : 959 - 974.
- Kirby, C., Newson, M.D., & Gilman, K. (1991). *Plynlimon research: The first two decades*. Report No. 109. Institute of Hydrology, Wallingford.

- Le Maitre, D.C., van Wigen, B.W., Gelderblom, C.M., Baily, C., Chapman, R.A. & Nel, J.A. (2002). Invasive alien trees and water resources in South Africa: case studies of the costs and benefits of management. *Forest Ecology and Management*, 160 : 143–159.
- Malmer, A. & Grip, H. (1990). Soil disturbance and loss of infiltrability caused by mechanised and manual extraction of tropical rainforest in Sabah, Malaysia, *Forest Ecology and Management*, 38 : 1–12.
- Moffat, A.J. (1991). Forestry and soil protection in the UK. *Soil Use and Management*, 7 : 145–151.
- Neal, C., Wilkinson, J., Neal, M., Harrow, M., Wickham, H., Hill, L. & Morfitt, C. (1997). The hydrochemistry of the headwaters of the River severn, Plynlimon, *Hydrology and Earth System Sciences*, 1 : 583–617.
- Neal, C., & Kirchner, J.W. 2000. Sodium and chloride levels in rainfall, mist, stream-water and groundwater at the Plynlimon catchments, mid-Wales: inferences on hydrological and chemical controls. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4 : 295–310.
- Prosser, I., Bunn, S., Mosisch, T., Ogden, R., & Karssies, L. (1999). The delivery of sediment and nutrients to streams. In: Price, P., & Lovett, S., (eds.) *Riparian Land Management Technical Guidelines*. 331. Principles of Sound Management. Land and Water Resources Research Development Corporation (LWRRDC) Canberra. pp. 37–60
- Quinn, J.M., Suren, A.M., & Meurk, C.D. (2001). *Riparian management classification for Canterbury streams*. NIWA Client Report MFE 01229/1.
- Robinson M, Cognard-Plancq, A.L., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Fuhrer, H.W, Hall, R., Hendriques, M.O., Marc, V., McCarthy, R., McDonnell, M., Martin, C., Nisbet, T., O'Dea, P., Rodgers, M., & Zollner, A. (2003). Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186 : 85–97.
- Searcy, J.K. (1959). *Flow-duration curves*. Wat. Sup. Pap.1542-A. Washington D.C.: USGS.
- Sinun, W., Meng, W.W., Douglas, I., & Spencer T. (1992). Throughfall, stemflow, overland-flow and throughflow in the Ulu Segama rain-forest, Sabah, Malaysia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B.*, 335 : 389–395.
- Stevens, P.A., Norris, D.A., Williams, T.G., Hughs, S., Durrant, D.W.H., Anderson, M.A., Weatherley, N.A., Hornung, M. & Woods, C. (1995). Nutrient losses after clearfelling in Beddgerlert Forest – a comparison of the effects of conventional and whole-tree harvest on soil-water chemistry. *Forestry*, 68 : 115–131.

- Subba Rao, B.K., Ramola, B.C. & Sharda, V.N. (1985). Hydrologic response of a forested mountain watershed after thinning. *Indian Forester*, 111 : 681–690.
- Swank, W.T. (1988). Stream chemistry responses to disturbance. In *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*, eds. W.T. Swank & D.A. Crossley Jr., pp. 339–357, Ecological Studies, Vol. 66. New York: Springer – Verlag.
- Tani, M., Nik, A.R., Yasuda, Y., Noguchi, S., Shamsuddin, S.A., M.M. Sahat, and Takanashi, S. (2003). Long-term estimation of evapotranspiration from a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. In *Water Resources Systems – Water Availability and Global Change*. Proceedings of symposium HS 02 a during IUGG 2003 at Sapporo, July 2003. IAHS Publication number 280.
- Taylor, M. & Lebel, T. (1998). Observational evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review*, 126 : 1597–1607.
- Thomas, R.B. & Megahan, W.F. 2001. Comment on “Peak flow responses to clear cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon” by J.A. Jones and G.E. Grant, 1996—reply, *Water Resources Research*, 37 : 181–183.
- Ward, R.C. (1981). River systems and river regimes. In *British Rivers*, ed. J. Lewin, pp. 1–33. London: Allen and Unwin
- Waters, D. & Jenkins, A. (1992) Impacts of afforestation on water quality trends in two catchments in mid-Wales. *Environmental Pollution*, 77 : 167–172.
- Young, P.C. 2001. Data-based mechanistic modelling and validation of rainfall-flow processes. In *Model validation: perspectives in hydrological sciences*, eds. M.G. Anderson and P.D. Bates, Chichester: Wiley.
- Young, P.C., Jakeman, A.J. & Post, D.A. (1997). Recent advances in the data-based modelling and analysis of hydrological systems. *Water Science and Technology*, 36 : 99–116.
- Yusop, Z. (1989). Effects of selective logging methods on dissolved nutrient exports in Berembun Watershed, Peninsular Malaysia. In *Regional Seminar on Tropical Forest Hydrology*, 4 – 9 September 1989, Kuala Lumpur.

(英国ランカスター大学助教授)