

E-4 熱帯域におけるエコシステムマネジメントに関する研究

(1) 森林認証制度支援のための生態系指標の開発に関する研究

④ 森林伐採に伴う土壌流出と集水域生態系に与える影響評価に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境研究領域 熱帯生態系保全研究室

奥田敏統

(現広島大学大学院総合科学研究科)

EFフェロー (マレーシア工科大学)

Zulkifli Yusop

<研究協力者>

独立行政法人国立環境研究所

生物圏科学研究領域 熱帯生態系保全研究室

沼田真也・吉田圭一郎・鈴木万里子

マレーシア工科大学

Mazlan Hashim

平成14～18年度合計予算額 7,398 千円

(うち、平成18年度合計予算額 0 千円)

[要旨] 本研究では熱帯域で急速に進む森林伐採や土地利用変化が、河川への土壌や栄養塩類流出にどのような影響を及ぼすか、また、一方で森林を保全することでどの程度の保水能力が流域単位で得られるかを明らかにすることを目的とした。まず、マレーシア半島のパソ森林保護区を含むパイロットサイト内の集水域 (1987 km²) において、Universal Soil Loss Equation (USLE)モデルにより、土壌流出量および栄養塩流出量を求めた。集水域全体からの総土壌流出量は 7.15 mil ton/yr (35.9 ton/ha/yr) と推計され、最も土壌流出量が激しいのは非樹木性農耕地 (477 ton/ha/yr) で、天然林は最も少ない値となった (12.1 ton/ha/yr)。天然林は集水域の 59%を占めているものの、土壌流出量は集水域全体からの総流出量の 19.7%に過ぎなかった。単位面積あたりの栄養塩類の流出は天然林で最小、樹木以外の各種耕作地で最大であった。また、1980年から1990年までの河口における堆積物収量は、0.58 ton/ha/yr から 6.44 ton/ha/yr の範囲 (平均は 1.52 ton/ha/yr) であったのに対し、同時期の堆積物移動率 (Sediment delivery ratios: SDR)は 0.02 から 0.18 の範囲 (平均 0.04) であった。これらの結果をもとに、丘陵地の沈降や下流に移動する流水水路において再堆積した土壌の割合を推定した結果、丘陵地から流出した土壌の 4%が最終的に河口に到達し、多くは河川内に堆積、もしくは溶存することが明らかとなった。また、本研究では衛星画像から地表面熱収支解析アルゴリズム (Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL) を用いて、パイロットサイト内の Triang 流域からの蒸発散量の推定を行った。その結果、全流域の瞬間蒸発散量 (ET) は 1,135 mm/年となった。主な土地利用タイプ毎の平均蒸発散量はほぼ等しく、3,112 (森林)、3,111 (ヤシ園) および 3,109 mm/日 (ゴム園) であった。一方、通常の年間降雨量 (2,294 mm, 1995年) があつた年と乾燥年 (1,443 mm, 2002年) とで産出水量を比較したところ、1995年は 1,159 mm/年、2002年は 308 mm/年となり、約 4 倍近い隔たりがあることが分かった。

[キーワード] 栄養塩類流出、Universal Soil Loss Equation、蒸発散、産出水、水源涵養

1. はじめに

世界中の多くの地域で、急激な森林の改変および土地開発活動によって土壌浸食が加速し、世界における土壌浸食速度は 75×10^9 t/年に達すると推定されている¹⁾。特に、熱帯地域では、降雨強度が大きく流域土壌が侵食されやすい上に、十分な土壌保全対策が取られてこなかったこともあり、土壌浸食速度は他の気候帯の生態系に比べて著しく高い²⁾。一般に、攪乱を受けていない熱帯多雨林は多層構造を有し、リターと細根の厚い層を形成するため、土壌もよく保護されている。たとえば攪乱を受けていない天然林の土壌浸食速度は低く、水路侵食にほぼ比例する。一方、森林伐採などにより土壌浸食速度が加速すると、河川の水質悪化、農地生産性の損失、水処理コストの増加、堆積作用と河川狭窄による洪水リスクの増大、および水中生息環境へダメージを与える。また浸食に伴う堆積作用も流域における多様なコロジカルサービスの劣化を招く。特に下流域での損失が深刻である。従って、土壌浸食および堆積作用の効果的な管理は、流域資源の持続可能な管理にとって不可欠な要素である³⁾。

熱帯域における森林伐採や土地利用改変が土壌流出量に及ぼす影響に関しては、これまで複数の報告がなされているものの^{4),5),6)}、流出土壌と堆積物の移動プロセスは、地形、降雨、土質、植被、および土地利用形態などの複雑な相互作用によって規定されるため、人為攪乱や土地利用形態だけで数値を一般化するのは困難である。したがって、集水域の様々な条件について実際の土壌流出量や堆積物収量を算出するには、数多くの実験集水域が必要となるが、このようなアプローチには多くの時間とコストがかかるうえ、実験区画または小集水域からの結果から大規模ランドスケープの堆積物収量を推定する作業は概して問題が多い⁷⁾。

これに対して、Universal Soil Loss Equation (USLE)のような土壌流出モデルの適用は、簡便かつ迅速に流域単位の土壌流出量の推定が可能だけでなく、空間データがあれば地理情報システム(GIS)の導入により処理時間を短縮できるので、様々な土地利用シナリオを試す機会が得られる。本研究では、いくつかの主要な土地利用から構成される大規模な流域を対象とし、地理情報システム(GIS)を用いた USLE モデルにより土壌流出量および栄養塩類の損失量を推定した。

また、森林が降雨などをトラップする量、すなわち産出水量の推定は、森林生態系がもたらす水源涵養機能を評価するうえで極めて重要な指標である。通常、産出水量は集水地からの流出量の測定によって定量化されるが、多様な植生、地形、土壌、および支流域から構成される大河川流域の地形計測では空間的影響の調査は不可能であるため、集中型モデルの河川流量値はほとんど役に立たない。植生または土地利用が産出水量に及ぼす影響を明らかにするためには、多くの支流域で測定を繰り返す必要があるため、各種水資源事業および水資源開発では未調査流域での流量推定が必要になる。

このような状況を踏まえ、本サブテーマではパイロットサイト (E4(1)①) 内での土壌浸食量、土壌塩類流出量、森林による土壌産出水量の推定をおこない、エコロジカルサービスの重要な要素である集水域保全機能による定量化を試みた。

2. 研究目的

- (1) パイロットサイト内の集水域を対象に地理情報システム (GIS) を利用して、森林伐採に伴う関連した土壌浸食、栄養塩流出および土壌浸食耐性の影響評価や推定を行う。その際に用いる各種パラメータの適合性について検討を行う。その上でパイロットサイト内で土壌流出量お

よび栄養塩類の損失量を分析し、モデルの検証を行うと同時に広域的に土壌浸食量を迅速かつ精度よく評価するための手法開発をおこなう。

- (2) 現在、熱帯域で急速に進む森林伐採や土地利用改変は、河川への土壌流出に伴う水質悪化、河川狭窄による洪水リスクの増加、農地生産性の低下および水中生息環境の悪化など、流域生態系や流域の持つ様々なエコロジカルサービスに多大な影響をもたらす。本研究では、水源涵養機能を評価するうえで極めて重要な指標となる森林からの産出水量を迅速かつ精度よく評価するための手法の開発を行う。

3. 研究方法

(1) 研究サイトの概況

本研究対象地は、半島マレーシアのパソ森林保護区を含み、ネグリスンビラン、パハン、およびセランゴールの3州またがる Triang 川流域である(図1)。Triang 川はパソ森林保護区の南東部とセランゴールの南西部との境界に端を発し、最終的に一級河川であるパハン川と合流する。集水域の総面積は1987 km²であり、Kenaboi 川、Pertang 川、Gelemi 川、および Kemasul 川など複数の支流流域を含む。2003年撮影の衛星画像を用いて土地利用区分を行った結果、Triang 川流域の主な土地利用タイプは森林(58.6%)、ゴム園(22.4%)、およびアブラヤシプランテーション(10.7%)であった(表1)。また、この流域には Kemasol F.R.、Kenaboi F.R.、Garau F.R.、Berembun F.R.、Triang F.R.、および Pasoh F.R. の6つの森林保護区(F.R.: Forest Reserve)が存在する。

パソドゥア(Pasoh Dua) 測候所における過去13年余の記録によれば、この地域の年間降雨量は1469mmから2350 mmの範囲であり、平均は1811mmである。降雨パターンのピークは3~5月と9~12月に2回あり、南西と北東の両モンスーンの影響下にあることを示している。また、Noguhci ら⁸⁾によると、パソ森林保護区における降雨日は36ヶ月間に366日であり(年平均122日)、その約47%が降雨量5mm未満であった。降雨は短時間のものが多く、約50%が2時間未満であった。なお、降雨強度は平均7.8 mm/hr、最高63.8 mm/hrであった。

表1 2003年の衛星画像による Triang 川流域の土地利用構成

土地利用	面積(ha)	割合(%)
天然林	116 521.8	58.64
二次林	5 959.0	3.00
各種樹木栽培	5 675.5	2.86
樹木以外の各種栽培	435.0	0.22
水田	660.6	0.33
ゴム園	44 449.1	22.37
アブラヤシプランテーション	21 209.4	10.67
その他	3 788.1	1.91
合計	198 698.6	100.00

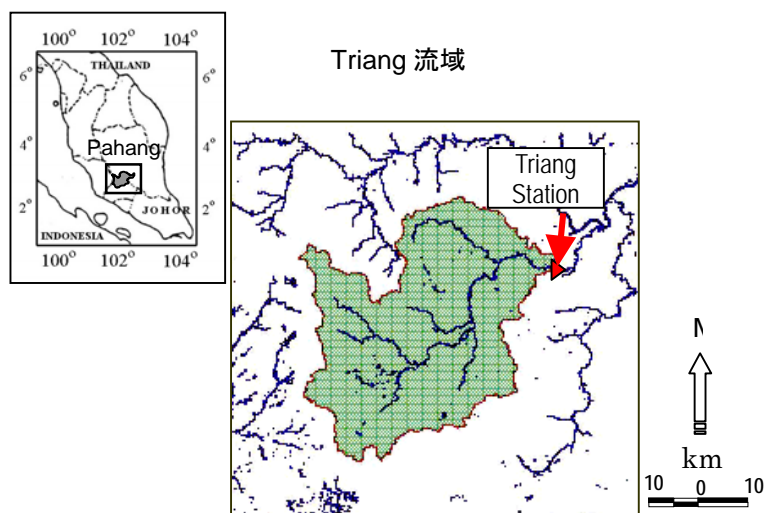


図1 マレーシア半島の Triang 流域

(2) 調査・分析方法

1) 土壌流出量に関わるパラメータについて

a. 一般土壌流出方程式 (Universal Soil Loss Equation : USLE)

Triang 集水域全体における土壌浸食を推定するために、Wischmeier と Smith (1978)⁹⁾によって開発された一般土壌流出方程式 (Universal Soil Loss Equation : USLE) を用いた。USLE はガリー侵食を考慮していないものの、地域規模での適用には最も実践的である。USLE は、Water Erosion Prediction Project (WEPP)¹⁰⁾および Griffith University Erosion System Template (GUEST)¹¹⁾などの他のモデルと比較すると、かなり単純でデータ依存度が低い。USLE では、潜在的侵食率 A は次のような式として計算される：

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

ここで、A は土壌損失 ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)、R は降雨侵食係数、K は土壌受食性係数、L は斜面長係数、S は傾斜係数、C は植被管理係数、P は侵食管理実施係数である。森林で覆われた地域では、CP 係数は植生管理係数 VM に置き換えることができる。以下のモデルの入力と計算は、ArcView GIS (ESRI, USA)にて行った。集水域の出口における流出土砂量を得るためには、USLE によって計算された土壌浸食量に土砂運搬率 (SDR) を掛ける必要がある。図 2 に全土壌浸食量、流出土砂量、栄養塩損失および土壌侵食耐性を推定するための一般的な研究方法およびモデル化の各段階を示す。

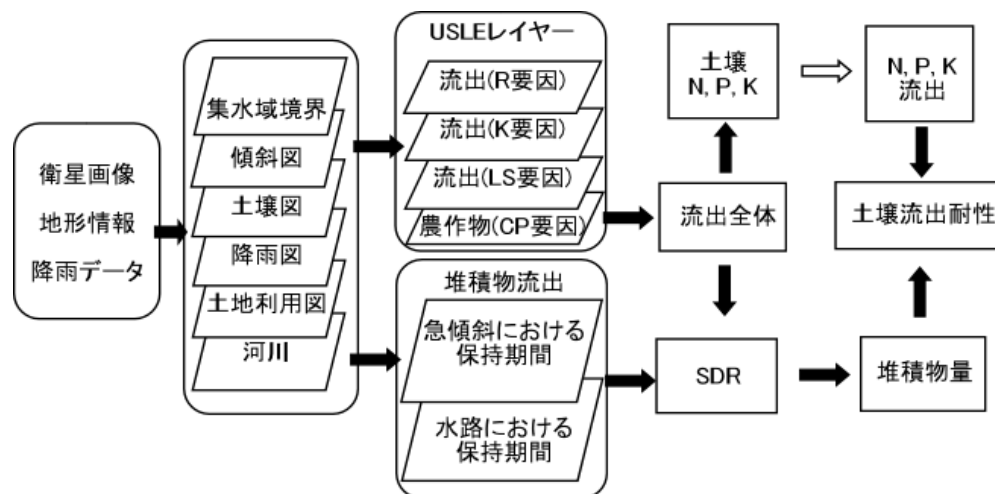


図2 土壌流出、堆積物量、土壌養分損失、土壌流出耐性推定のフローチャート

i. 侵食係数、R

侵食係数は、降雨エネルギー強度または EI 指数から次式を用いて計算した。

$$R = (E * I_{30}) / (100 * 17.02) \quad (2)$$

この式で、E は全運動エネルギー ($J m^{-2}$) また I_{30} は最大 30 分降雨量を $mm hr^{-1}$ で表した値である。分析には長時間の連続した降雨記録を使用できないため、 I_{30} の値は次式から求めた¹²⁾：

$$\ln(R I_t) = a + b \ln(t) + c (\ln(t))^2 + d (\ln(t))^3 \quad (3)$$

この式で、 $R I$ は平均降雨量 ($mm hr^{-1}$) であり、R は再降雨までの時間、t は降雨時間である。降雨時間 t は、分で表される降雨集中時間に等しい。本研究の分析では、欠測が少ない Kuala Pilah 測候所における 5 年分の再降雨時間を用いており、係数 a、b、c、d として、測候所から最も近い観測点での値、3.7967、1.2904、-0.4012 および 0.0247 をそれぞれ適用した。

次に、Morgan (1974)¹³⁾の式を用いて、以下のように E の値を求めた。

$$E = 9.28P - 8838.15 \quad (4)$$

この式で、E は J/m^2 で表される年間侵食率、また P は年間降雨量 (mm) である。

ii. 地形係数、LS

地形係数 LS は、侵食面の傾斜と長さを組み合わせた係数である。例えば Revised Soil Loss Equation (RUSLE) では、LS を地表流路の実際の長さとして表示し、地表流の開始点から主流に入る点までの距離を使用している。この定義は、地表流が少ない森林性の集水域または植生のある集水域に適している。森林性の集水域では中間流のほうが地表流より優勢で、地表流は水路の端の限られた地域、または浅い土壌の復帰流や飽和地表流として扱われている。従って、森林で覆われた集水域における地表流路は、地形図から認識される斜面長より短いと予測されるため、次の LS 改良式を用いた：

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^m (10.8 \sin \theta + 0.03) \quad \text{for } \theta \leq 9\% \quad (5a)$$

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^m (16.8 \sin \theta - 0.50) \quad \text{for } \theta > 9\% \quad (5b)$$

これらの式で、 θ は斜面の傾斜度、 L は最も近い排水点までの傾斜長である。べき数 m は次式にて計算される。

$$m = \frac{F}{1+F} \quad (5c)$$

なお、この式において

$$F = \frac{\sin \theta}{0.0896(3 * (\sin \theta)^{0.8} + 0.56)} \quad (5d)$$

とされる。

iii. 受食性係数、K

土壤受食性係数 K は、土壤侵食のされやすさを表す指標である。これは、土壤の物理特性から次式を用いて計算した。

$$K = (2.1 * 10^{-6})(12 - OM)M^{1.14} + 0.032(S - 2) + 0.025(P - 3) \quad (6)$$

この式における OM は有機物含有量 (%)、 M は (シルト % + 微細砂 %) (100 - 粘土 %)、 S は土壤構造コード、 P は透水性コードである。 S の値として微粒子では 1、細粒子では 2、中程度から粗い粒子では 3、ブロック状、板状または塊状では 4 となる。 P は透水性の段階に対応して 6 段階で表され、透水が非常に遅い場合には 6 で速い場合には 1 となる。土壤統図は、マレーシア農業省から入手したネグリスンビラン州およびパハン州南部の土壤調査図を利用した。

iv. CP 係数と VM 係数

農耕地については、農用係数 C は (休耕状態である土地と農地からの土壤損失の割合) を利用し、熱帯の作物と植生に関する C 、等高線耕作、段丘および帯状作付けのような保護が実施されている場合の係数 P を利用した。一方で、森林地域に対しては植生管理係数 VM を用いた。 VM 係数は、植被と土壤表面条件の相互作用を一つの因子として考慮している。この係数は、a) 樹冠の覆い、b) 根覆いおよび林床植生の覆い、c) 細根のある裸地、という 3 種類の下位係数から構成される。

v. 土砂運搬率 (SDR)

USLE を用いて計算される土壤浸食率は傾斜地からの潜在的土壤浸食を表す。しかし、土砂の一部は、集水域の出口まで運搬される間に窪地または水路に再堆積されるので、集水域から出る土砂、またはいわゆる「土砂流出量」は傾斜地で測定された値より小さくなるはずである。そのため、USLE では土壤浸食率に SDR 曲線から得られる係数を乗じて、値の調整を行う。 SDR は主に集水域の大きさと河川長の影響を受ける。 SDR と集水域面積との関係については、いくつかの研究が報告されており一般式は次のとおりである。

$$SDR = a.AREA^b \quad (7)$$

この式で、 a と b は係数、 $AREA$ は集水域面積 (km^2) である。 a および b の値の範囲は、それぞれ 0.4

〜0.6 および - 0.2 ~ - 0.1 の値をとる。

b. 栄養塩流出と土壌浸食耐性に関するパラメータについて

土壌浸食により土壌粒子に付着している栄養塩も持ち去られ、その土地の肥沃度を徐々に低下するため、長期間の生産性は傾斜地の土壌浸食率に大きく依存している。そのため、土壌浸食耐性とは、植物の成長と生態系の生産性を維持できる土壌の浸食量として定義される。これらの値は土壌の厚さおよび肥沃状態に左右されるが、土地利用の被度には左右されない。しかし、土地の被度または植生因子は、栄養分を保全し土壌損失を最低限に抑えるためにきわめて重要である。土壌浸食耐性 T の値が決まると、次の式を用いて得られる植生管理係数から、管理の選択肢を決定することができる。

$$VM = \frac{T}{R * K * LS} \quad (8)$$

2) 土壌および土壌塩類流出量の推定

a. 土壌流出量の推定

土壌流出量の推定には、上述した Universal Soil Loss Equation(USLE)モデル(Wischmeier & Smith 1978¹⁴)を用いた(式(1)参照)。なお、この式で C は植被管理係数、 P は侵食管理実施係数であるが、本研究では森林および樹木性の農地(例: ゴム園、アブラヤシプランテーション、果樹園)については、 CP の代わりに VM 係数¹⁵)を使用した。 VM 係数は、i)林冠植被、ii)根植被と地上植被、およびiii)細根のある裸地、の3つの係数から算出した。モデルの入力パラメータの詳しい計算方法については、Zulkifli & Okuda (2004)¹⁶)に詳しく述べられている。なお、地理情報システム(GIS)を用いたデータベース作成には30×30mのグリッド方式を採用した。

b. 堆積物収量の推定

堆積物収量の推定には、Walling (1978)¹⁷)による堆積-流出曲線を用いた。

$$C = aQ^b \quad (9)$$

ここで C は堆積物濃度(mg/l)であり、 Q は流量(m³/s)である。解析にはTriang測候所で11年間(1980～1990)にわたり観測された堆積物濃度と日間流量を用いたが、1981年と1982年のデータセット以外は記録が不完全であったため、その他の年については月平均流量および降雨量に関する回帰方程式を用いて補間した。また単位面積当たりの実測の堆積物収量と土壌流出速度の比率、すなわち、堆積物移動率(SDR)を算出し(式7)、Quyang & Bartholic(1997)¹⁸)によるモデル式と比較した。

c. 炭素および栄養塩類流出量の推定

表層土壌からの炭素(C)、窒素(N)、リン(P)、およびカリウム(K)の流出量を、各養分の土地利用別の面積加重平均濃度および推定した土壌流出量から算出した。なお面積加重平均濃度 \bar{C} の算出には次式を用いた。

$$\bar{C} = \frac{\sum_i^n C_i A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (10)$$

ここで C_i と A_i はそれぞれ土壌タイプ i における栄養塩濃度と面積である。

3) 森林からの産出水量の推定

a. 年間産出水量

本研究では物理的方法によるマルチステップの地表面熱収支アルゴリズム (SEBAL) モデルを用いてマクロスケールの流域の蒸発散量を推定し、年間の森林による産出水量の分析を行った。SEBALはマクロスケールの流域の ET を推定するために Bastiaanssen¹⁹⁾によって開発されたモデルであり、衛星スペクトルデータから導き出した熱収支と地表面フラックスをパラメータ化したものである。

本研究ではまず、マレーシア半島の大河流域のSEBALから導き出される蒸発散量 ET の推定おこなった。次に、以下の水収支式に基づいて Triang 流域の年間産出水量を推定した。

$$Y = P - ET - G \pm \Delta S \quad (11)$$

上の式の Y は産出水量であり、 P は地域雨量、 ET は実際の蒸発散量、 G は地下水充填量、そして ΔS は土壌含水量の増減を示す。なお、全てのパラメータを深さ (mm) の単位で表した。 ΔS の値は降雨に伴って変動したが、1年程度の期間でならずと、ゼロに近い平均値になる。この流域では水が滞留しがちと予想されたので、地下水の G は無視した。地域雨量 P は研究エリアとその周辺の降雨記録から推定した。 ET は、ランドサット 5 TMの衛星画像から導き出した必要パラメータを使用し、SEBALモデルにより推定した。研究エリアの全域をカバーするために、衛星が2002年2月12日と2002年7月14日に上空を通過した際に撮影した2点の画像を合成した。 ET は、以下の熱収支式から蒸発散に必要なエネルギーを算出する方法で推定した。

$$\lambda E = R_n - G_o - H \quad (12)$$

上の式の λE は蒸発散の潜熱フラックスであり、 R_n は純放射量、 G_o は地中熱フラックス、そして H は顕熱フラックスである。各種エネルギー要素の計算について以下に簡単に説明する。

b. 地表面エネルギー収支アルゴリズム (SEBAL)

SEBAL法では、水文気象学的パラメータのラスタライメージを得るために、可視帯域、近赤外帯域、および熱赤外帯域の衛星スペクトルデータが必要である²⁰⁾。そこで、これらのパラメータを用いてエネルギー期間を区切り、そして最後に、蒸発散に使用され得るエネルギーを推定した。今回の解析は主に以下の4つのステップから構成される。

ステップ 1: 衛星画像の前処理

このステップでは、放射解析補正と幾何学的補正、画像の合成、雲のマスキング、最後に研究エリアを囲うための画像の分割を行う。画像は、2点の画像を相互に確認した上で再サンプリングを施して幾何学的に補正した。画像のそれぞれに3つの地上管制ポイント（GCP）を設定した。次に、補正済み画像を合成して研究エリア全域の画像に仕上げた。放射解析補正は、大気中のエアゾール、ガス、および蒸気分子の存在に起因する放射散乱の影響を最小化するのに必要である。放射解析補正を行ったのは、2回の衛星通過の間に太陽の角度、土壌水分、および大気条件に違いがあったからであり、ヒストグラム補正法²¹⁾により補正を行った。雲マスキングは、湿気が多い熱帯地域では雲のない画像を得るのが困難であるために不可欠である。本研究では、ランドサット5 TMのバンド1の衛星反射を利用して雲をピクセル単位でマスクした。また、大気圏上端のスペクトル発光状態を示す衛星信号を、逆プランク方程式を使用して輝度温度と地表面反射率に変換した²²⁾。

ステップ2：土壌—植生—大気移動（SVAT）パラメータ

各種SVATパラメータの計算の基礎データである地表面アルベド ρ_o を、広域バンドパスラディアンスト大気透過率から推定した。

$$\rho_o = \frac{\rho^{TOA} - \Gamma_a}{\tau_{sw}^2} \quad (13)$$

上記の ρ^{TOA} は大気圏上端の広帯域アルベドであり、 Γ_a は広域バンドパスラディアンスト、 τ_{sw} は単方向透過率である。 ρ^{TOA} はChemin²³⁾の方法に従って大気圏上端の反射率に基づいて算出した。ランドサット5 TMの正規化植生指標（NDVI）は、Tuckerの論文²⁴⁾に述べられた方法に従って、バンド4（赤）とバンド3（近赤外）のそれぞれの地表面反射率の間の偏差を正規化して算出した。次に、得られたNDVI値を用いてラスタイメージの地表面放射率 ϵ_o を算出した。地表面のスキン層温度（ T_o ）は地表面と林冠表面の運動温度である。ランドサット5 TMのバンド6の放出スペクトル放射 L_6^\uparrow から、スキン層温度の算出が可能である²²⁾。

$$T_o = \frac{1235}{Ln\left(\frac{3662.48}{L_6^\uparrow} + 1\right)} \quad (14)$$

上記の地表面粗度 Z_{om} とNDVIの関係はMoranとJackson²⁵⁾によって導き出された。

ステップ3：純放射量 R_n と地中熱フラックス G_o の計算

地表面の純放射量フラックスである R_n (W/m^2) は、土壌や大気の温暖化と土壌水分の蒸発に使用されるエネルギーである。入力放射フラックスから短波放射と広域バンド長波放射の両方の放出エネルギーを差し引き、 R_n を算出した²⁰⁾。

$$R_n = (1 - \rho_o)(K^\downarrow) + L^\downarrow - (\epsilon_o \sigma T_o^4) \quad (15)$$

上の式の K^{\downarrow} は入力短波放射 (W/m^2) であり、 L^{\downarrow} は地表面の平均広域バンド入力長波放射 (W/m^2)、 ε_o は地表面放射率、 σ はStefan Boltzman定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{k}^4$)、そして T_o は地表面温度 ($^{\circ}\text{K}$) である。熱フラックスの土壌マトリックス G_o の透過は、熱伝導によって発生する。それは、熱が土壌に蓄えられる速度であり、温度勾配がその原動力である。温度勾配は、地表面に到達する光の量の決定要素である植生の状態と密度によって左右される。ランドサット5 TMの G_o 項は、下の経験式を用いて算出した⁴⁾。

$$G_o = \frac{R_n \times T_o}{\rho_o} (0.0032r_o + 0.0062r_o^2) (1 - 0.978NDVI^4) \quad (16)$$

上の式の r_o は、衛星通過の現地時間から導き出すことが可能な平均日間地表面反射率である⁹⁾。

ステップ4：顕熱フラックスHと潜熱フラックスの計算

顕熱は、地表面付近の垂直温度差 dT_a と熱移動の空力抵抗 r_{ah} から下の式で算出した。

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot dT_a}{r_{ah}} \quad (17)$$

上の式の ρ_{air} は大気空気密度であり、 C_p は一定気圧での空気の比熱である。この dT_a は、各画像の最乾燥ピクセルと最湿潤ピクセルの2点におけるエネルギー収支を計算することによって算定した。土壌と大気最大の温度差は、水蒸気発生源がわずかであったため、潜熱が最小限であった最乾燥セルから得た。一方、最湿潤セルでは、エネルギーのほとんどが蒸発に消費されて、顕熱フラックスに使われるエネルギーが理論的には全く残らなかった ($H=0$)。この両極端のピクセル条件に基づいて、下の関係を導き出した。

最乾燥ピクセル：

$$dT_a = \frac{(R_n - G_o) \cdot r_{ah1}}{\rho_{air} \cdot C_p} \quad \text{with } H = R_n - G_o \quad (18)$$

水体／最湿潤ピクセル：

$$dT_a = 0$$

各画像の残りのピクセルの dT_a の算定を可能にするため、 dT_a は T_o と線形相関にあると仮定した。各ピクセルの H 値は、残りのピクセルの dT_a 値と潜熱フラックス λE から算出した。 H の算定では、試行錯誤を繰り返して dT_a 値を洗練する必要があった。 H の初期値は、初期 r_{ah} のインプットが必要な式(8)により算定した。Pshycometricパラメータについては初期インプット (r_{ah1}) を補正しなかったが、このステップは、その後の r_{ah} 値におけるMonin-Obukhov長の計算を可能にする上で重要である。これを顕熱フラックスが収束するまで繰り返した。詳しい手順はCheminの論文²³⁾に述べられている。

SEBALの最後のステップは、土壌水分の蒸発に使われ得るエネルギーの計算と、蒸発率 Λ を用いた瞬間蒸発散量の日間蒸発散量への換算である。蒸発率は、実際の ET を最大 ET (ET_{pot}) で割り算して得られる瞬間ベース（衛星通過時）の比率である。

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_o} = \frac{R_n - G_o - H}{R_n - G_o} \quad (19)$$

実際の日間蒸発散量 ET_{act24} は、以下の式による瞬間蒸発率と最大日間蒸発散量 ET_{pot24} の積で算定できる。

$$ET_{act24} = ET_{pot24} \times \Lambda \quad (20)$$

4. 結果・考察

(1) 土壌流出量の推定

調査対象地における土壌流出量の算出に用いた各レイヤーを図3に示す。USLEモデルによって算出された流域全体からの総土壌流出量は7.15 mil t/yrであった。集水域面積の22.4%を占めるゴムプランテーションからは2.70 mil t/haの土壌流出が生じ、これは総土壌流出量の37.8%に相当した（表2）。アブラヤシプランテーションからの流出量は1.7 mil t/yrであり、ゴムプランテーションに次ぐ高い値を示した。これらに対し、流域の約59%を占める天然林からの土壌流出量は19.7%を占めたに過ぎなかった。単位面積当たりの土壌流出速度は樹木以外の植生が最高で477 t/ha/yrであり、水田、各種樹木栽培地、ゴム園、およびアブラヤシプランテーションがこれに次ぐ値であった。森林の土壌流出速度は最小の12.1 t/ha/yrであり、ゴム園とアブラヤシプランテーションのそれぞれ1/5と1/7に過ぎなかった。

表 2 1995 年の衛星画像に基づく Triang 川流域からの土地利用による土壌流出

土地利用タイプ	土壌流出量 (t/yr)	流出全体の割合 (%)	流出速度 (t/ha/yr)
天然林	1,407,526	19.69	12.1
二次林	413,256	5.78	69.3
各種樹木栽培 ¹	466,180	6.52	82.1
樹木以外の各種栽培 ²	207,581	2.90	477.2
水田	158,688	2.22	240.2
ゴム園	2,704,054	37.83	60.8
アブラヤシプランテーション	1,692,511	23.68	79.8
その他	98,444	1.39	26.4
合計	7,148,240	100.00	35.9

1: 各種樹木は主にドリアン、マンゴ、ランブータン、マンゴスチンなどの多年生樹木。

2: 樹木以外の各種栽培はバナナ、野菜、トウモロコシなどの一年生作物。

(2) 炭素および栄養塩類流出量の推定

Triang 川流域からの C、N、P、および K の総流出量はそれぞれ 184,929、12,607、3,739、および 3,963 t/yr と推定された（表 3）。単位面積当たりの炭素の流出量は、天然林の 0.312 t/ha/yr から樹木以外の各種栽培の 2.12 t/ha/yr の範囲であった。N、P、および K についても樹木以外の各種栽培からの流出量が最大であり、それぞれ 0.84、0.25、および 0.26 t/ha/yr であった。天然林は他のすべての生態

系よりも栄養塩流出のレベルが低かった。

表 4 に流出した栄養塩類を補充するのに必要な肥料の量をまとめた。この際、肥料としてマレーシアで広く普及している尿素、燐灰土、およびカリ塩化物の 3 つを N、P、および K の補充源として選んだ。炭素の排出に関わる費用を 8 USD/ton とすると、土壌流出に起因する総炭素損失金額は年間 148 万米ドルとなる。また補充のための肥料の費用は、それぞれ、N が 488 万米ドル、P が 340 万米ドル、K が 107 万米ドルである。

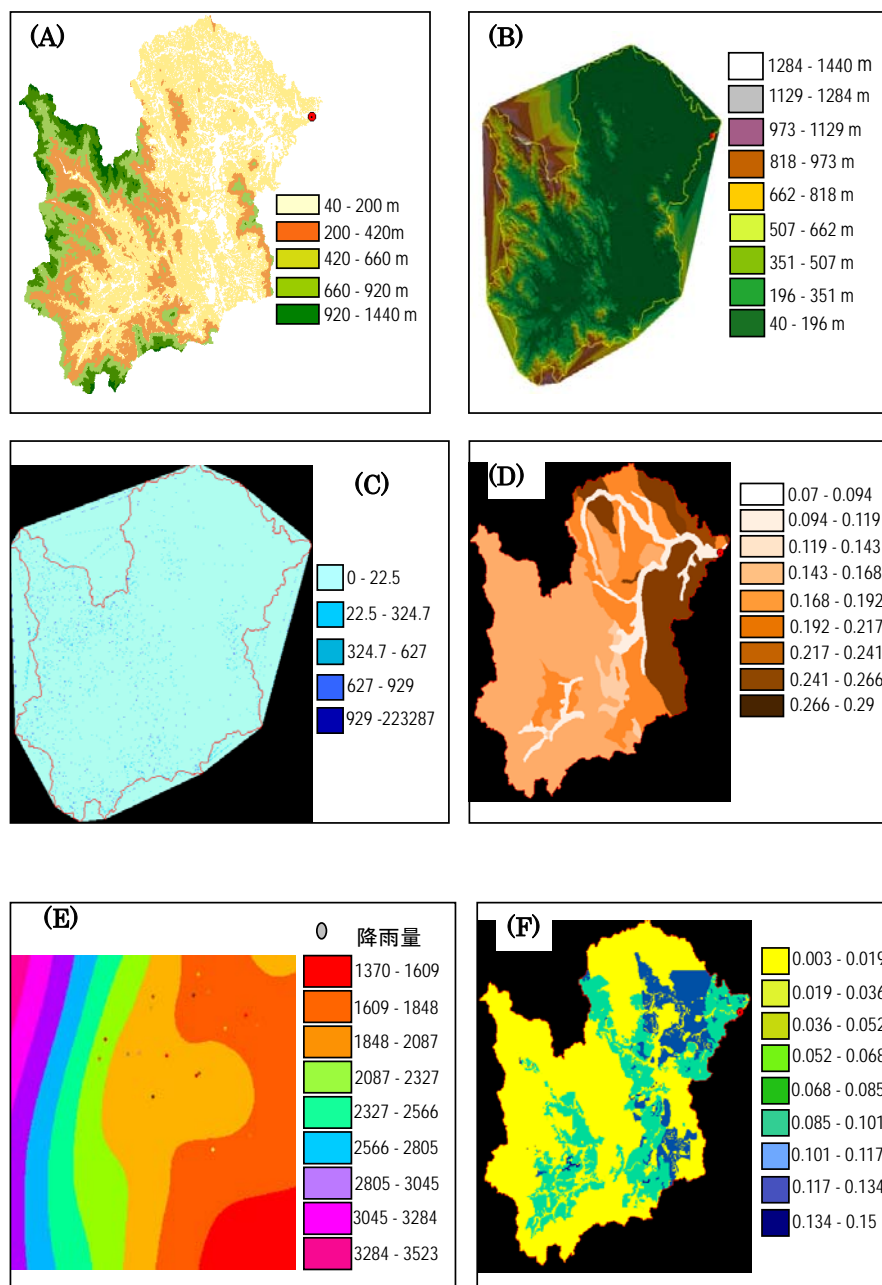


図 3 Triang 川流域の土壌流出量を算定するための GIS レイヤー。

(A)標高、(B)地形<TIN>、(C) 斜面長係数 S、(D)侵食係数 K、(E)降雨量、(F)作物・管理慣行係数 CP および植生管理係数 VM。

表3 各土地利用タイプにおける単位面積当たりの栄養塩流出量(t/ha/yr)

土地利用	塩類 (t/yr, 括弧内数値は t/ha/yr)			
	C	N	P	K
天然林	36 413.5 (0.312)	2 482.4 (0.021)	736.2 (0.006)	780.4 (0.007)
二次林	10 691.2 (1.794)	728.8 (0.122)	216.2 (0.036)	229.1 (0.038)
各種樹木栽培	12 060.3 (2.125)	822.2 (0.145)	243.8 (0.043)	258.5 (0.046)
樹木以外の各種栽培	5 370.2 (12.344)	366.1 (0.842)	108.6 (0.250)	115.1 (0.265)
水田	4 105.3 (6.215)	279.9 (0.424)	83.0 (0.126)	88.0 (0.133)
ゴム園	69 955.4 (1.574)	4 769.0 (0.107)	1 414.4 (0.032)	1 499.3 (0.034)
アブラヤシプランテーション	43 786.2 (2.064)	2 985.0 (0.141)	885.3 (0.042)	938.4 (0.044)
その他	2 546.8 (0.675)	173.6 (0.046)	51.5 (0.014)	54.6 (0.014)
合計	184 928.9 (0.931)	12 607.0 (0.063)	3 739.0 (0.019)	3 963.4 (0.020)

土壌中の平均濃度: C – 2.587%、N – 0.1764%、P – 52.30 ppm、K – 55.44 ppm

表4 Triang 川流域からの年間栄養塩流出量に相当する炭素と肥料の量

土地利用	損失相当量 (t/y)				損失補充費用 (USD)			
	C	尿素	CIRP	MP	C ¹	尿素 ²	CIRP ³	MP ⁴
天然林	36,413.5	5,396.5	6,197.2	1,567.1	291,307.8	960,576.0	669,300.4	211,560.7
二次林	1,069.2	1,584.4	1,819.5	460.1	85,529.3	282,029.5	196,509.6	62,115.2
各種樹木栽培	12,060.3	1,787.4	2,052.6	519.0	96,482.7	318,147.8	221,675.8	70,070.0
樹木以外の各種栽培	5,370.2	795.9	914.0	231.12	42,961.9	141,665.1	98,708.0	31,200.8
水田	4,105.3	608.4	698.7	176.7	32,842.8	108,297.7	75,458.6	23,851.9
ゴム園	69,955.4	10 367.4	11,905.7	3,010.7	559,642.6	1,845,400.7	1,285,819.5	406,437.7
アブラヤシプランテーション	43,786.2	6 489.1	7,452.0	1,884.4	350,289.6	1,155,066.0	804,815.1	254,395.9
その他	2,546.8	377.4	433.4	109.6	20,373.4	67,183.8	46,811.6	14,796.8
合計	184,928.9	31 473.1	31,473.1	7,958.7	1,479,431.4	4,878,366.6	3,399,098.6	1,074,429.1

1 – 炭素費用は 8.00USD /ton

2 – 尿素有窒素含有率は 46%。費用は 178USD /ton。

3 – CIRP はクリスマス島燐灰土であり P₂O₅ 含有率は 27%。平均費用は 108USD/t。

4 – MP はカリ塩化物であり K₂O 含有率は 60%。平均費用は 135USD /t。

(3) 堆積物収量の推定

月平均の河川流量と降雨量の関係を把握した結果、二者の間には正の相関関係が見られた($r^2=0.51$, $p<0.001$) (図4)。この相関関係を用いて、入手できなかった月間流量データを補間し、堆積負荷を算出した。堆積負荷の予測精度を改善するために、Reduced Major Axis Line (RMAL)回帰法を用いて負荷一流出曲線(load-discharge rating curve)を作成した。

$$L = 0.0237Q^{3.01} \quad (r^2=0.85, p<0.001) \quad (xx)$$

ここでLは平均負荷(t/day)であり、Qは平均流出速度(m^3/s)である。年間堆積物収量は1980年から1990年の期間において0.56から6.44 t/ha/yrの範囲で大きく変動したが平均は1.52 t/ha/yrであった(図5)。なお、SDR値は1.6%から17.9%の範囲であり、平均は4.2%である。

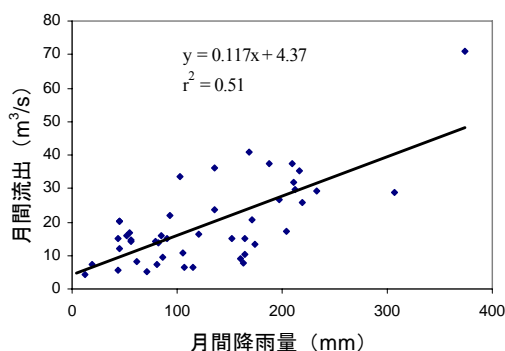


図4 Triang 流域における月間流出と月間流量の関係

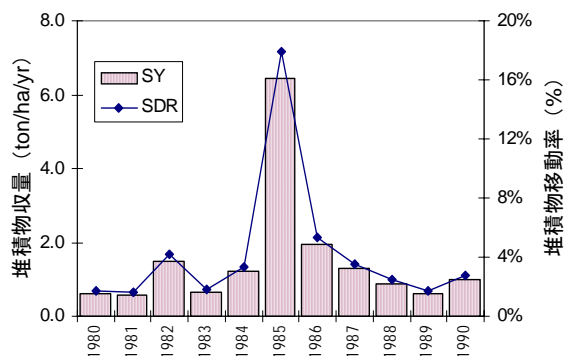


図5 1980～1990年の堆積物収量と堆積物移動率 (SDR)

(4) 土地利用変化が土壌流出および栄養塩類の流出に及ぼす影響についての考察

地理情報システム(GIS)を用いた Universal Soil Loss Equation(USLE)モデルにより、マレーシア半島部に位置する Triang 川流域において、土壌流出量および栄養塩類損失量を算出した。その結果、集水域全体からの総土壌流出量は 7.15 mil ton/yr (35.9 ton/ha/yr)と推計され、土地利用タイプごとの比較では、樹木以外の各種耕作地で最も多く(477 ton/ha/yr)、天然林で最も少なかった(12.1 ton/ha/yr)。天然林面積は対象とした集水域の 59%を占めているものの、土壌流出量は集水域全体からの総流出量の 19.7%に過ぎなかった。

現在、マレーシアをはじめとする熱帯域での主要な土地利用変化パターンは、森林からゴム園およびオイルパームプランテーションへの転換であるが、このような土地利用転換が行われた場合、土壌流出量は森林を維持した場合に比べ、それぞれ 5 倍および 6.5 倍に増加することが示唆された。また、すべての森林が土地利用転換に伴い伐採された場合には、集水域全体からの総土壌流出量は現在の約 6 倍に達すると考えられる。

一方、Triang 測候所で観測された堆積物濃度と日間流量を用いて、堆積物移動率(SDR)を算出した結果、丘陵地から流出した土壌の僅かに 4%が最終的に河口に到達し、その多くが河川内に堆積もし

くは溶存することが明らかとなった。このことは、土地利用転換に伴い河川内に流出した土壌の多くは、水質の変化や河川内堆積物の増加をもたらす、最終的に水中生息環境の悪化や農作物の生産性の低下、および河川狭窄による洪水リスクの増加など様々な影響をもたらすことを意味する。また本研究では、土壌以外にリンやカリウムに代表される栄養塩類の流出についても評価を行い、流出した栄養塩類を補うのに必要な肥料の施肥に関わる費用を算出し、土地利用改変に伴う経済的損益についても評価を試みた。これは土地生産力に関する一面的な評価ではあるものの、今後上述のような農作物生産性や洪水リスクも加味することで、土地利用計画の策定などにおいて明瞭な指針を与えるものであると考える。

(5) 流域からの産出水量・蒸発散量

図6はSEBALモデルを用い、蒸発散量を推定するためのインプットとなる算定ラスタ画像を示したものである。算定地表面空中アルベドは0.03から0.25の範囲にあるが、平均値は非常に低く0.06である。妥当性確認のために選定された雲のない研究サイト、すなわち、森林（5箇所）、ゴム農園（3箇所）、およびアブラヤシ農園（2箇所）の平均アルベドは、それぞれ、0.146、0.164、および0.164であった。熱帯林の状態、特に障害からの回復状態によって、報告されたアルベド値は0.12から0.15の範囲で収束していた²⁶⁾。画像からのアルベド値で明らかに低いものは、雲量と大気中の蒸気の残留効果に起因するものと思われる。

近赤外帯域から赤帯域の範囲の0.0314から0.488、平均値0.061の偏差を正規化してNDVI値を得た。妥当性検証に使用した研究サイトのNDVI値は、森林、ゴム農園、およびアブラヤシ農園でそれぞれ、0.286、0.135、および0.381であった。やはり今回のNDVI値は、熱帯林に予想された0.36から0.46の範囲よりも低かった。このNDVIの低い値が、0.811から約1までの（平均値0.967）高い値の地表面空中放射率 ϵ をもたらした。妥当性検証サイトの森林、ゴム農園、およびアブラヤシ農園の平均 ϵ は、それぞれ0.872、0.946、および0.904であった。

各ピクセルから導き出された純放射量 R_n の値は、7.778から7.790 W/m²とごくわずかな偏差しかなかった。妥当性検証に用いられた研究サイトの森林、ゴム農園、およびアブラヤシ農園の R_n 値は7.78 W/m²前後の範囲にあり、非常に近似していた。地中熱フラックス G_o （0.006から0.21 W/m²）は R_n よりも小さかった。これは、植生の存在しない部分が約2%しかないこの流域の広大な植被によるものと思われる。熱帯林の特徴は繁茂した下層植生からなる多層林冠であり、地表面が完全に覆われるため、最小限の地中熱フラックスが予想された。アブラヤシ農園では、特に若木の時期など立ち木が非常にまばらなのだが、地表面はたいてい作物によって完全に覆われる。植林から5年後くらいに立ち木が成熟すると、林冠が非常に厚くなって、地表面は堆積物や下層植生によって覆われる。ゴムの木の葉は2月と3月に枯れるが、林冠は非常に素早く回復する。また、古いゴム農園では繁茂した下層植生と二次植生がよく見られる。この主要植生の特徴が、この流域の全域で地中熱フラックスが低い理由であると考えられる。森林の G_o は0.011 W/m²だが、ゴム農園とアブラヤシ農園の G_o も同程度（0.014 W/m²）であった。

ピクセル一つ一つについて空間的潜熱フラックスを算定する方法は時間がかかる上、かなり複雑なので、今回の予備的解析では1つの値だけを導き出した。算定 λE は4.66 W/m²であった。同様に、顕熱フラックス H についても1つの値だけを使用した。

Triang流域全体の瞬間蒸発散量を図7に示す。色の濃いピクセルは色の淡いピクセルよりも ET 値が高い。左上をはじめとする黒いピクセルの部分は、雲がかかっていたために今回の解析範囲から除外した。算

定ETの値は3.10から3.12 mm/日と、偏差はごくわずかだった。妥当性検証サイトである森林、ゴム農園、およびアブラヤシ農園の瞬間蒸発散量は、それぞれ、3.112、3.109、および3.111 mm/日であった。遠隔探査技術から導き出された平均ETを、平均的な地表面の気候パラメータを使用した経験的モデルからの計算値と比較した(表5)。SEBALからは経験的モデルよりも低いET値が得られたが、パン蒸発測定値に近似しており、Turcの公式からの値よりもわずかに高かった。

表5 SEBAL モデルと経験的モデルとの間の日間実蒸発散量 (ET) の比較

推定方法	日間 ET (mm/日)
Penman 法	5.19
Blaney-Cridle の公式	5.53
Turc の公式	2.18
Thornthwaite の公式	5.35
パン蒸発散量測定法	3.35
SEBAL モデル	3.11

また、マレーシア森林の選定調査流域における測定降雨量および河川流量に基づく推定ET値を表6に示す。やはり今回の年間ET推定値は、水収支による推定値よりも低かった。しかし、この流域の測定から得られたETは、地下水の漏出が算入されないため、概して過大に評価されている。Bruijnzeel²⁷⁾は、この湿潤熱帯地域における流域研究の結果に基づき、降雨量が1,400から1,500 mm/年の熱帯林のためのおよそのETを提案した。数値が上記の範囲外にあれば、それは流域からの漏出を示唆するものと思われる。興味深いことに、Triang流域のETは、降雨量が1,123 mm/年の中央アマゾン雨林のエネルギー収支式から導き出された数値に類似している²⁸⁾。しかし、降雨量1,545 mmのボルネオよりもかなり少ない²⁹⁾。ただし、ボルネオの研究では、流通水量と樹幹流下量の経験式と測定の両方による湿潤林冠の蒸発散量が算入されている。

1,135 mm/年の算定ETからは、この値を年間降雨量から差し引くことによって、産出水量の推定が可能である。従って、例年(降雨量2,294 mm)を代表する1995年の推定年間産出水量は1,159 mmであるが、乾燥年の2002年(降雨量1,433 mm)の推定年間産出水量はわずかに308 mmであった。この数字を換算すると、1995年の河川流量は23億 m³、2002年のそれは6億 m³であったことになる。しかし、ETが過小評価であることの可能性を踏まえると、推定産出水量は過大評価と考えるのが妥当である。

今回の解析では、衛星が上空を通過した瞬間の地表面反射を記録した衛星データを使用したことに注意しなければならない。それ故に、日間、週間、月間と時間間隔が長くなると、情報が実際の平均値と異なる可能性がある。KiteとDrooger³⁰⁾は、SEBALモデルによって導き出されたトルコ西部のETがFAO-56法のそれとほとんど一致しないことを発見した。FAO-56法は平均気象データに基づく局地点推定値を導き出すモデルである。しかし、SEBALを使用して米国西部の農作物からETを推定した結果は、浸漏計測定によるETに十分に一致した³¹⁾。また、彼らは、SEBALによる季節推定に高い再現性があり、衛星通過時期が異なっても偏差が小さいことを発見した。

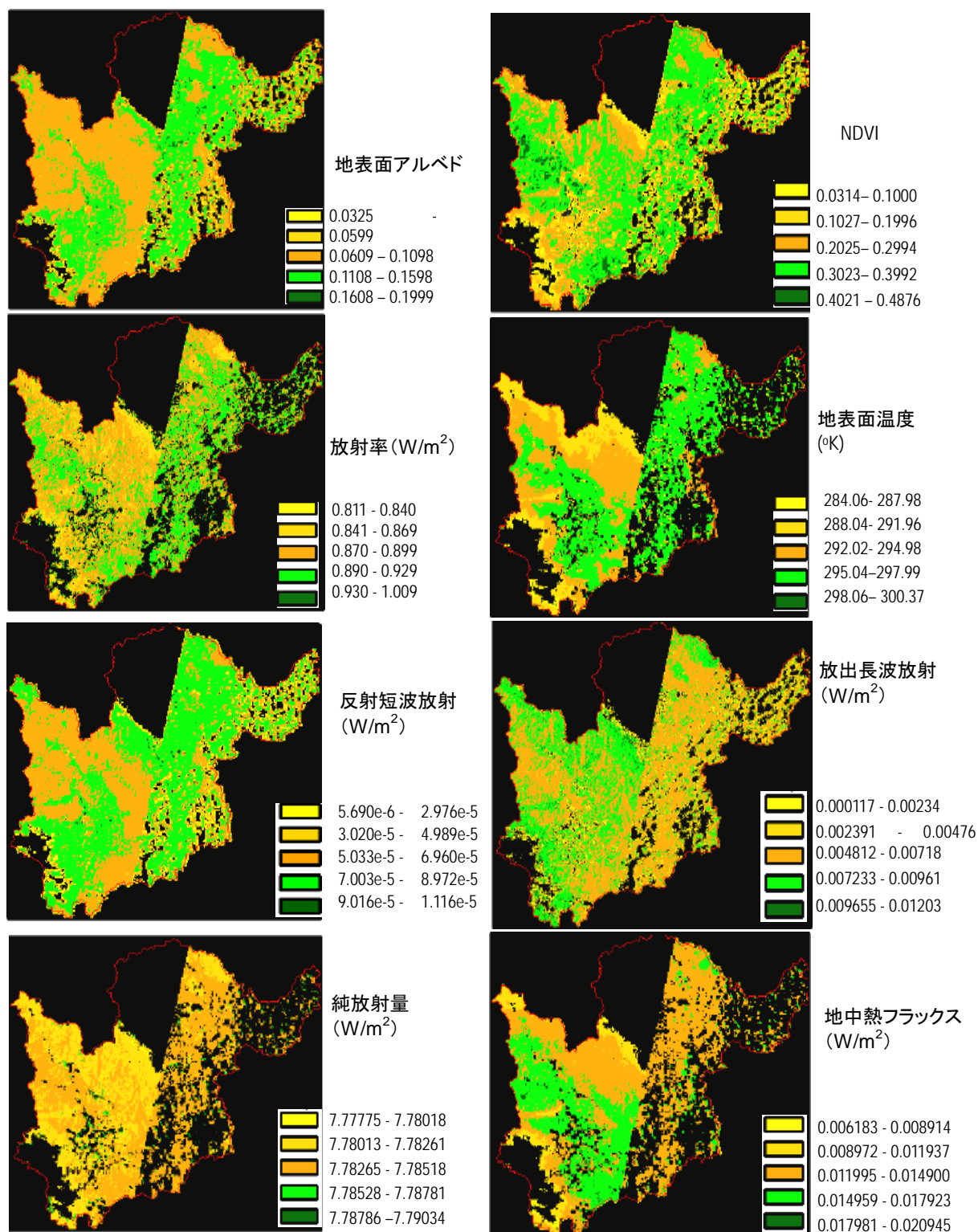


図6 Triang流域のETをSEBALモデルで推定するために用いたラスタライメージ

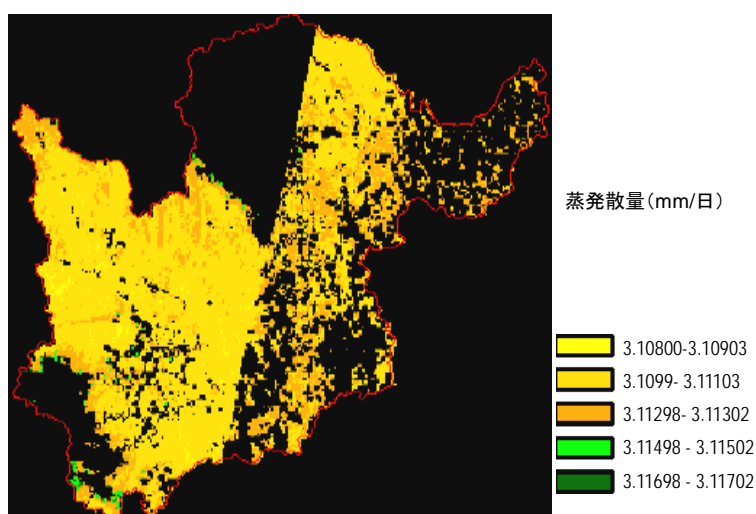


図7 Triang 流域の瞬間 ET の空間的偏差

これまでSEBALは、雲に覆われるといった問題がほとんどない半乾燥地域にほぼ限定的に用いられてきた。SEBALを湿潤地域に応用する際にもう一点困難なのは、高温湿潤ピクセルの示す極端な状態で信頼できる温度勾配の推定を得ることである。今回の解析では温度勾配が緩やかであった。よって、顕熱フラックスの空間的偏差を地表面温度から推定すると、大きな誤差が生じる恐れがある。

表6 マレーシアの選定森林流域の年間の降雨量、流出水量、および蒸発散量

場所	地質	降雨量 (mm)	流出水量 (mm)	ET (mm)	参考論文
Sipitang、サバ					
W3	砂岩、泥岩、泥	3,215	1,962	1,253	Malmer ³²⁾
W6	板岩の混合	3,490	1,950	1,540	
Bukit Tarek、セランゴール	変成砂岩	2,750	1,227	1,523	Zulkifli など ³³⁾
Danum Valley、サバ	火成、変成砂岩	2,800	1,400	1,400	Burghouts ³⁴⁾

(6) 産出水量・蒸発散量の広域推定についての考察

これまでの研究により森林からの水分蒸発率は、蒸発プロセスの生じる昼間にかなり安定していることが分かっている。とはいえ遠隔探査データは地表面の瞬間の状態しか示さないで、衛星が上空を複数回通過して採取した複数のデータを使用して解析する必要がある。複数回分のデータが必要なのは、SEBALの再現性を確認して、さまざまな制御条件下で衛星データから導き出されたETの偏差を評価するためである。ランドサット 7ETM+、NOAA AVHRR (11-14 と KLM シリーズ)、TERRA/Aster や TERRA/Modis などをはじめとする他の複数の衛星データを使用すれば、雲に覆われていない画像を得る確率を高めることができる。現在では複数の衛星画像を使用するSEBALのマニュアルが手に入る。SEBALの応用、特に熱帯地域への応用はまだ実験段階にあるので、衛星データから導き出されたETを特定の水文モデルおよび在来蒸発モデルの数値と比較することが肝要であ

る。

5. 本研究によって得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、地理情報システム(GIS)を用いた Universal Soil Loss Equation(USLE)モデルにより、Triang 川流域における土壌流出量および栄養塩類損失量を算出するとともに、森林伐採や土地利用転換が集水域保全機能に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。その結果、(1)ゴム園やオイルパームからの土壌流出量は、森林からの流出量のそれぞれ5倍と6.5倍に相当すること、(2)すべての森林が伐採された場合、流域全体からの土壌流出量は約6倍に増加すること、(3)流出した土壌の大部分が河川内に堆積もしくは溶存し、森林からの土地利用転換は水質の悪化に伴う生息地の破壊、河川狭窄による洪水リスクの増加、農作物の生産性の低下、および水処理コストの増加など、流域生態系とそのエコロジカルサービスに様々な影響をもたらすことが明らかとなった。熱帯地域での森林伐採に伴う土壌や塩類流出を空間的に推定した例としては他に類を見ない。

また本研究は SEBAL を湿潤熱帯に応用した初めての試みであろう。本研究における推定蒸発散量 ET は、流域の水収支と経験式から導き出された数値よりも低かったが、瞬間 ET から日間 ET を推定して、それを週間および月間の数値に換算する方法によって ET 推定の改良が可能であることがわかった。さらに日間 ET は、最大日間蒸発散量 ET_{pot24} と蒸発率 $(\lambda E / (R_n - G_o))$ の積で推定することが出来た。このことにより衛星データなどと組み合わせることでより広いエリアでの森林からの産出水量や蒸発散量が推定可能であることが明らかになったという点で本研究の科学的意義は大きい。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究は、森林が持つ水源環境機能に焦点を当て、広域的に評価を行うための手法を提示するものである。今年度はパイロットエリア内全域での蒸発散量を地理情報システム(GIS)や衛星画像データを用いて推定した。現在、熱帯地域における過度の森林伐採や違法伐採、並びに大規模な土地利用転換が、生物の生息環境や地域住民の住環境の悪化、さらには河川狭窄による洪水リスクの増加などの深刻な問題を引き起こしており、流域生態系を総轄的に管理するための生態系管理手法すなわちエコシステムマネジメントの一刻も早い導入がのぞまれている。本研究はこうした生態系管理手法の確立を行ううえでの第一歩となるもので、熱帯域における土地利用計画やランドスケープ管理に明瞭な指針を与えるものであると言える。

6. 引用文献

- 1) Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R. Science, 267: 1117-1123 (1995)
"Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits"
- 2) Hamilton, L.S. & P.N. King. Westview (1983)
"Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soil Response to Major Uses or Conversion. Boulder, Colorado"
- 3) Lal, R. Geoderma 16: 403-417 (1976)
"Soil erosion on Alfisol in western Nigeria, IV. Nutrient element losses in runoff and eroded sediments"

- 4) Baharuddin K. *Journal of Tropical Forest Science*, 1(1): 56-66 (1988)
"Effect of logging on sediment yield in a hill dipterocarp forest in Peninsular Malaysia"
- 5) Douglas, I., T. Greer, K. Bidin and W. Sinun In *Proceeding of the Yokohama Symposium on Hydrology of Warm Humid Regions*, July 1993. IAHS Publ., no 216: 213-218 (1993)
"Impact of road and compacted ground on post-logging sediment yield in a small drainage basin, Sabah, Malaysia"
- 6) Lai, F.S. In: *Proceeding of the Yokohama Symposium, Hydrology of Warm Humid Regions*, IAHS Publ. no 216: 219-229 (1993)
"Sediment yield from logged, steep upland catchments in Peninsular Malaysia"
- 7) Lane, L.J. Hernandez, M and Nichols, M. *Environmental Modelling and Software*, 12(4): 355-369 (1997)
"Processes controlling sediment yield from watersheds as functions of spatial scale"
- 8) Noguchi, S., A. Rahim N. and M. Tani. In T. Okuda, N. Manokaran, Y. Matsumoto, K. Niiyama, S.C. Thomas and P.S. Ashton (eds.) *Pasoh – Ecology of a Lowland Rain Forest in Southeast Asia*. Tokyo: Springer-Verlag. 51-58. (2003)
"Rainfall characteristics of tropical rain forest at Pasoh Forest Reserve, Negeri Sembilan, Peninsular Malaysia"
- 9) Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. *A guide to conservation planning*. USDA Handbook no 537. (1978)
"Predicting rainfall-erosion losses"
- 10) Foster, G.R., D.C. Flanagan, M.A. Nearing, L.J. Lane, L.M. Risse and S.S. Finkner. NESRL Report No2. W. Lafayette, Indiana: USDA_ARS. In L.J. Lane and M.A. Nearing (eds.) *USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation*. (1995)
"Hillslope erosion component"
- 11) Rose, C.W., K.J. Coughlan, C.A.A. Ceisioika and B. Fentie In K.J. Coughlan and C.W. Rose (eds.) *A New Soil Conservation Methodology and Application to Cropping System in Tropical Steeplands*. Canberra: ACIAR Technical Report, No 40: 34-58. (1997)
"Program GUEST (Griffith University Erosion Template)"
- 12) DID. Department of Drainage and Irrigation. Vol. 1 - 12. (2000).
"Urban Stormwater Management Manual For Malaysia. Malaysia"
- 13) Morgan R.P.C. *Malayan Nature Journal*, 28: 94-106. (1974)
"Estimating regional variation in soil erosion hazards in Peninsular Malaysia"
- 14) Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. *Agricultural Handbook no 537*, USDA, Washington, D.C., 58 pp. (1978)
"Predicting rainfall-erosion losses. A guide to conservation planning"
- 15) Baharuddin K., Abdul Rahim N and Zulkifli Y. *FRIM Technical Information Handbook No 25*. (1999)
"A guide for estimation surface soil loss using the Modified Soil Loss Equation (MSLE) on Forest Land"
- 16) Zulkifli Y and Okuda, T. *Annual Report of the NIES-FRIM-UPM joint Research Project on Tropical Ecology and Biodiversity*. NIES, Tsukuba, Japan. 77-89 (2004)
"Studies on evaluation of logging impact on soil erosion and watershed ecosystem – preliminary results"
- 17) Walling, D.E. In Davidson-Arnott R., Nickling W. (eds.) *Research in Fluvial System, Geoabstracts*, Norwich., 169-197(1978)
"Suspended sediment and solute response characteristics of the river Exe, Devon, England"
- 18) Quyang, D. and J. Bartholic. *Proceedings of the 22nd. National Association of Environmental Professionals Conference*, Orlando, 659-671 (1997)
"Predicting sediment delivery ratio in Saginaw bay watershed"

- 19) Bastiaanssen, W.G.M. Agricultural Research Department , Report 109, Wageningen, The Netherland. (1995)
 ”Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates”
- 20) Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. Journal of Hydrology, 212/213: 198-212 (1998a)
 ”A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation”
- 21) Verbyla, D. L. Florida: Lewis Publishers. 69-105 (1995).
 ”Satellite remote sensing of natural resources”
- 22) Roerink, G.J. DLO-Staring Center, Wageningen, The Netherlands, 61 p. (1995)
 ”SEBAL estimation of the areal patterns of sensible heat fluxes over the HAPEX-Sahel grid – a case study on 18 September 1992”
- 23) Chemin, Y. Space Technology Applications and Research Asian Institute of Technology. (2004)
 ”The application of the Surface energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) for estimating daily evaporation. A handbook of published methodologies”
- 24) Tucker, C.J. Remote Sensing of Environment. 4(2): 325-334 (1979)
 ”Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation”
- 25) Verbyla, D. L. Florida: Lewis Publishers. 69-105 (1995).
 ”Satellite remote sensing of natural resources”
- 26) Hahmann, A. and Dickinson, R.E. Journal of Climate, 10: 1944-1964 (1997)
 ”RCCM2-BATS Model over tropical south America: applications to tropical deforestation”
- 27) Bruijnzeel. UNESCO/IHP, Amsterdam. (1990)
 ”Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review”
- 28) Malhi, Y., Pegoraro, E., Nobre, A.D., Pereira, M.G.P., Grace, J., Culf, A.D. and Clement, R. Journal of Geophysical Research, 107 (D20): 45, 1-45 (2002)
 ”Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest”
- 29) Kumagai, T., Saitoh, T.M., Sato, Y., Takahashi, H., Manfroi, O.J., Morooka, T., Kuraji, K., Suzuki, M., Yasunari, T. and Komatsu, H. Agricultural and Forest Meteorology, 128: 81-92 (2005)
 ”Annual water balance and seasonality of evapotranspiration in Bornean tropical rainforest”
- 30) Kite, G.W. and Droogers, P. Journal of Hydrology, 229: 3-18 (2000)
 ”Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological model and field data”
- 31) Tasumi, M., Allen, R.G., Trezza, R. and Wright, J.L. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1): 94-109 (2005)
 ”Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves”
- 32) Malmer, A. Journal of Hydrology, 134: 77-94 (1992)
 ”Water yield changes after clear-felling tropical rainforest and establishment of forest plantation in Sabah, Malaysia”
- 33) Zulkifli Y, Abdul Rahim N., and Baharuddin K. Paper presented at International Conference on Hydrology and Water Resources of Humid Tropics, Ipoh, Malaysia, 24-26th Nov. 1998. (1998)
 ”Evapotranspiration loss from a second growth forest of Peninsular Malaysia”

7. 国際共同研究等の状況

この研究はすべてマレーシア工科大学との共同研究により行なわれた。

カウンターパート：Mazlan Hashim（マレーシア工科大学）。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T., Okuda, Nor Azman, H., Manokaran, N., Saw, L.Q., Amir, H.M.S., Ashton, P.S. In: Losos, E.C. & Leigh, E.G. Jr. (Eds.), *Forest Diversity and Dynamism: Findings from a network of large-scale tropical forest plots*, Univ. Chicago Press, Chicago. 221-239 (2004).
 ”Local variation of canopy structure in relation to soils and topography and the implications for species diversity in a rain forest of Peninsular Malaysia”
- 2) K., Hoshizaki Niiyama, K., Kimura, K., Yamashita T., Bekku Y., Okuda, T., Quah E.S., and Nur Supardi M.N. *Malaysia Ecol. Res.* 19 (vol. 3) 357-363. (2004).
 “Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Pasoh Forest Reserve”
- 3) Okuda T., Suzuki M., Numata, S., Yoshida, K., Nishimura, S., Niiyama, K., Adachi N, Manokaran, N. (2004). *Estimation of Tree Above-ground Biomass in a Lowland Dipterocarp Rainforest, by 3-D Photogrammetric Analysis, Forest Ecol and Management* 203: 63-75
- 4) M. Adachi, Y. S. Bekku, A. Konuma, Wan Rasidah Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi: *Forest Ecol. and Management*, 210, 455-159 (2005)
 “Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and two types of plantations, Malaysia.”
- 5) S. Konishi, M. Tani, Y. Kosugi, S. Tkakanashi, M. M. Sahat, Abd. R. Nik, K. Niiyama, and T. Okuda: *Forest Ecol. and Management*, 224, 19-25 (2006)
 “Characteristics of spatial distribution of throughfall in a lowland tropical rainforests, Peninsular Malaysia.”
- 6) M. Adachi, Y. S. Bekku, Wan Rasidah Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi: *Applied Soil Ecology* 34: 258-265 (2006).
 “Differences in soil respiration between different tropical ecosystems.”
- 7) S. Numata, M. Yasuda, T. Okuda, N. Kachi, and M. N. Nur Supardi: *J. Tropical Forest Science.* 18: 109-116. (2006)
 “Canopy gap dynamics of two different forest stands in a Malaysian lowland rain forest.”

<その他誌上発表>

- 1) T., Okuda, Yoshida, K., Numata, S. Nishimura, S. Suzuki, M. Hashim, M. Miyasaku, N. Sugimoto, T. Tagashira, N. Chiba, M. In Okuda, T. and Matsumoto, Y (eds.) *Kyoto Mechanism and the Conservation of Tropical Forest Ecosystem (Proceedings of the International Symposium/Workshop on the Kyoto Mechanism and the Conservation of Tropical Forest Ecosystems, 29-30 January, 2004, Waseda University, Tokyo Japan).* 67-78. (2004).
 “An ecosystem-management approach for CDM-AR activities: The need for an integrated ecosystem assessment based on the valuation of ecosystem services for forested land”
- 2) N., Manokaran, Quah, E.S. Ashton, P.S., Lafrankie, J.V., Nur Supardi, M. N., Wan Ahmad, W.M.S. and Okuda, T. In: Losos, E.C. & Leigh, E.G. Jr. (Eds.), *Forest Diversity and Dynamism: Findings from a network of large-scale tropical forest plots*, Univ. Chicago Press, Chicago. Pp. 585-598. (2004).
 “Pasoh Forest Dynamics Plot, Peninsular Malaysia”
- 3) T., Okuda, Kondo, T., Yoshida, K., Oguma, H., Yone, Y., Miyasaku, M., Ohki, H., Hashim, M., - *Proceedings of International Conference, Silvilaser 2006, Matsuyama, November, (2006)*

“Mapping three-dimensional canopy structure of a Malaysian tropical rain forest by airborne laser scanner”

- 4) 植田愛美、小林繁男：森林総合研究所研究分野パンフレット、1-12 (2003)
「地球環境変動下における森林の保全・再生に関する研究」
- 5) S. Kobayashi and E. Ueda: Joint Meeting for the Cooperative Research Project on “Ecological Impact on the Environments” Proceedings. JOOCO,RFD. Thailand, 81-92. (2003).
“Site management strategy on the forest harvesting and short/long term rotation of plantation.”

(2) 口頭発表 (学会など)

- 1) Okuda, T., Suzuki, M., Hashim, M., Yusop, Z., Numata, S., Nishimura, S., Kondo, T., Parker, K., M. Chiba, N. Tagashira. International Symposium on Biodiversity-Ecosystem Projects and Future Research Strategy. 23 April 2005, Tokyo.
“Ecosystem services and management for the sustainable resource uses in tropics”
- 2) 田代慶彦、桑原貴憲、米田健、水永博己、Wan Rashida、Sarayudh Bunyavejchewin、奥田敏統 日本熱帯生態学会第15回大会(2005)
「ギャップ構造が林床有機物の分解率に及ぼす影響」
- 3) NAITO Daisuke, ABE Ken-ichi, OKUDA Toshinori and Hood Saller. International Symposium on Eco-human Interactions in Tropical Forests. Kyoto Univ. June, 2005.
“The Changes of Subsistence Activities among Temuan Communities in Negeri Sembilan, Peninsular Malaysia: Focus on Hunting and Gathering”
- 4) Adachi, M., Yashiro, Y., Rasidah, W., Okuda, T., Koizumi, H., ESA Annual Meeting, Montreal, Canada, August, 2005
“Seasonal variation in soil respiration in tropical forests and agro-forests, Malaysia.”
- 5) 安立美奈子、Sarayudh Bunyavejchewin、奥田敏統、小泉博 日本生態学会第53回大会(2006)
「タイ国熱帯林における雨期と乾期の土壌呼吸速度」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) Application scaling up and monitoring tools to ecosystem management in tropical landscapes, Nov. 22, 2005 in Kuala Lumpur (熱帯生態系におけるエコシステムマネージメントのためのスケーリングアップとモニタリング技術に関する国際シンポジウム)国立環境研究所－マレーシア森林研究所主催 (2005)
- 2) Evaluation and Mapping of Ecosystem Service Value and Goods Of Forests In Malaysia, Aug 29, 2005 in Kuala Lumpur (マレーシアにおけるエコロジカルサービスの財と価値の地図化に関する国際シンポジウム) 国立環境研究所およびマレーシア林野局主催 (2005)
- 3) 奥田敏統：日本生態学会 54 回大会企画シンポジウム 長期気候変動と熱帯雨林－熱帯域に於ける森林衰退の背景とその影響 (2007)