

B-11 地球温暖化の高山、森林、農地生態系への影響、適応、脆弱性評価に関する研究

(3) 自然林・人工林の脆弱性評価と適応策に関する研究

③アジアの熱帯林生態系の影響、脆弱性の評価に関する研究

京都大学生態学研究センター

北山兼弘

独立行政法人森林総合研究所九州支所

齋藤英樹

平成14～16年度合計予算額 14,048千円
(うち、平成16年度予算額 3,985千円)

[要旨] ボルネオ島の熱帯林生態系では降雨量が多いにも関わらず、植物季節や生態系動態が大気の乾燥度によって支配されている。得られた土壌と樹木生理のパラメータを使い、CENTURYモデルで温暖化予測を行ったところ、2000年から2050年まで月最大・最低気温の年上昇率0.043℃のシナリオでは熱帯林の生産性と森林バイオマスが漸次上昇、土壌炭素が漸次減少する。しかし、1998年規模のエル・ニーニョが10年毎に発生し樹木の死亡率が2.6%上昇すると、回復が追いつかず森林バイオマスは漸次減少を始める。さらに、現在行われている規模の商業伐採影響がこれに加わると、森林回復は困難になると予測される。現在の森林及び土地利用を把握するため高頻度観測衛星データから広域土地利用図を作成した。これにNOAAのホットスポットデータによるこれまでの火災発生およびインドネシア政府による森林事業権の設定状況を重ね合わせ、これらを考慮した森林の脆弱性について検討を行った。

[キーワード] 熱帯降雨林生態系、干ばつ、純一次生産、リモートセンシング 広域土地利用図

1. はじめに・研究目的

湿潤熱帯地域では、温暖化による温度上昇率は高緯度地域と比べると低いとされている。しかし、東南アジアの赤道熱帯は Walker 循環の直接的な影響下にあり、温度が上昇することによりエル・ニーニョ干ばつの規模が増大すると予測されている。湿潤熱帯では、降雨量の高さから植物は乾燥によって制限されていないと信じられてきた。しかし、これまでの研究から、湿潤熱帯アジア地域ではエル・ニーニョが起こっていない通常年でも常緑樹の植物季節や生態系の生産が大気の乾燥度に密接に関係していることが示唆されてきた。熱帯降雨林は、通常年にあってもその様々な素過程が大気乾燥度に支配されている可能性が高いので、温暖化により干ばつ規模が増大するとその影響は想像するよりも大きいと思われる。

一方、低地熱帯では、自然林が農林業開発によって改変を受け、様々な開空度の二次林生態系がモザイク状に景観を成している。大気乾燥の生態系影響は開空度に応じて異なると予測される。全期間を通じた本研究の目的は、長期的な温度上昇による大気飽差の増加や短期的な干ばつの影響を CENTURY モデルに取り込み、土地利用によってモザイク的な森林景観を成す湿潤熱帯域において、干ばつを伴う温度上昇の生態系影響（特に森林構造と炭素動態）を予測することである。

予測の時間スケールを 50~100 年のレベルとする。また、これに基づき、適応策の提言を行う。

また森林分布の現状を知るために高頻度衛星データを用いて広域土地利用図作成を行い、森林火災の発生を示す、NOAA データのホットスポットや森林事業権設定図等と合わせ、ボルネオ島熱帯林の脆弱性について評価する。

2. 研究方法

キナバル山の異なる標高や土壤栄養状態の熱帯降雨林（原生林）に固定試験地を設け、生態系動態に関するパラメータの測定を行った。これらのパラメータは、主に樹木生理特性と土壤栄養塩特性に分けられる。樹木生理では、葉・枝・幹・根の窒素・リン濃度、それらのバイオマス、成長過程での炭素分配、栄養塩の再吸収効率など多数にのぼる。土壤栄養関係のパラメータは、各土壤層の化学特性（炭素量、無機・有機態窒素量、画分毎のリン量、リンの吸着性など）や物理性（土性など）を含む。各固定試験地では、2週間毎のリター動態、年間の純一次生産（葉、繁殖器官、枝と木部）、土壤呼吸、樹木個体群の死亡率や加入率などの測定を行った。同山の標高 550m、1650m、2700m、3300m に設けた気象ステーションを用いた気象測定を継続した。伐採と気象変動の相互作用を調べるために、サバ州中央に位置する Deramakot 施業区において、伐採後の経過時間や伐採強度の異なる択伐林を複数選び、試験地を設定し、森林構造などを測定した。得られたパラメータを CENTURY モデルに組み込み、温暖化の無い状態で 2000 年間のシミュレーションを行い、達成された平衡状態と実測値のクロスチェックを行い、モデルの妥当性を検討した。

広域土地利用分類のために解析に使用したデータは 2002 年 1 月から 12 月に取得された SPOT VEGETATION（以下 VGT）データである。また分類の際の参照データ、また分類後の検証用データとしてランドサット ETM+データを用いた。VGT データは地上空間分解能が約 1km でほぼ 1 日 1 回以上の観測頻度を持つ高頻度観測衛星である。この種の衛星では従来 NOAA AVHRR データがあるが、VGT データでは可視域、近赤外域の他、ランドサット TM や ETM+と同様に短波長赤外域にも観測バンドを持っている。このため従来の NOAA データでは難しかった。原生林と二次林を区別した土地被覆分類が可能である。NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) と NDWI (Normalized Differential Water Index) を以下の計算式を用いて計算した。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}) \quad (2)$$

これらを時間方向に前後 2 シーンずつ 5 シーンの中から 2 番目に大きい値を取るピクセルを選ぶノイズ軽減フィルタを施すことにより雲等の影響を軽減した。ここで最大値を選ばなかった理由は、最大値にも受信にかかわるノイズ成分が含まれているからである。この後、時間軸方向に主成分分析を行い、それぞれの第 1 主成分を用いることによってさらに細かいノイズを除き、2002 年の NDVI、NDWI の代表値とした。これらを用いて教師無し分類（ISODATA クラスタリング）を行い土地利用図を作成した。この際、クラスタへのラベリングはランドサット ETM から作成したボルネオ島を対象とするモザイク画像を参照しながら行った。作成した広域土地利用図に NOAA データから作成されたホットスポットとインドネシアの森林事業権設定図を重ね、熱帯林の脆弱性について森林火災及び土地利用計画上の問題点を検討した。

3. 結果・考察

(1) 北ボルネオにおける近年の気象動向

キナバル山で実測した5年間の気象データを解析し、気象の年内・年間変動の様式をみた。乾燥の規模を表すために、最大蒸発量を求めた。最大蒸発量は、理想的な水面蒸発量 E_a を近似する以下の Penman 式から求めた。

$$E_a = 0.175(1 + 1.07 v)(E - e) \quad v = \text{高さ 2m の平均風速 (m/s)}; E = \text{日平均気温に対する飽和蒸気圧 (hPa)}; e = \text{実測の蒸気圧 (hPa)}$$

また、日平均気温と蒸気圧の関係を、1996年（湿潤な年）と1998年（エル・ニーニョ干ばつ年）の両年について求めた。この結果、強い大気の乾燥は、低地（600m）においてはエル・ニーニョ年以外の通常年においても季節的に現れること、さらにエル・ニーニョ年には雨量減に伴う飽差増ばかりではなく風速増加によっても最大蒸発量が増加し強い大気の乾燥が生じていることがわかった（図1）。また、エル・ニーニョ年には、平均水蒸気圧が変化しないまま日平均気温が高温側に1℃シフトしていることがわかった。この温度上昇によって飽差が増加し、大気乾燥が進むことが示唆された（データは示していない）。エル・ニーニョが及ぼす地上での気象変化の実態はあまり明らかにされていないが、ここに実測データとして、乾燥度の規模を示すことができた。

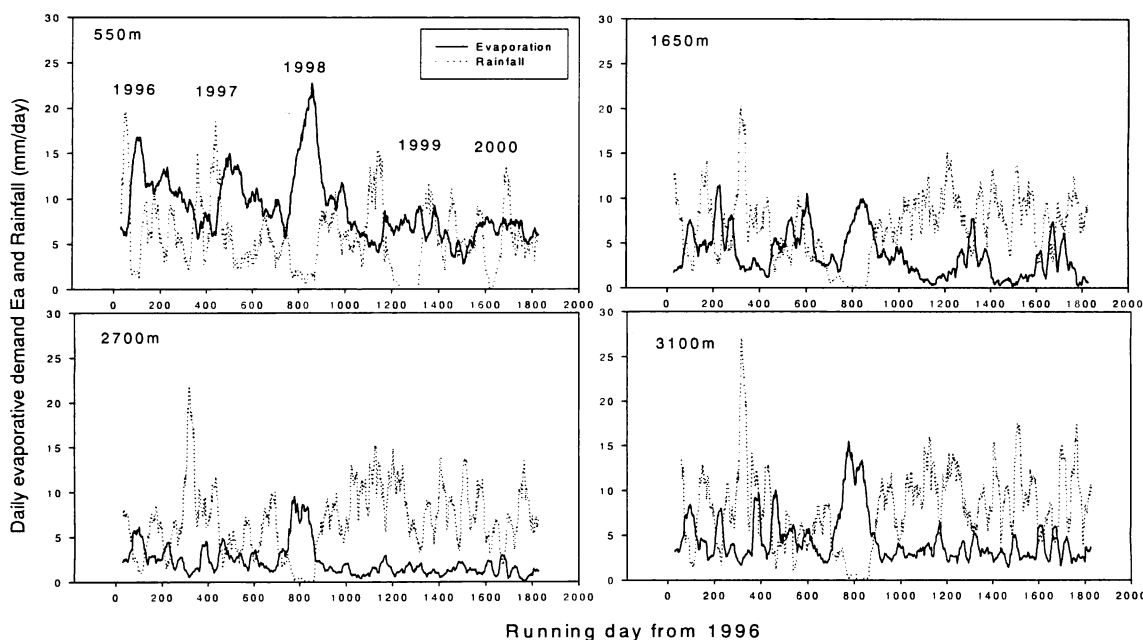


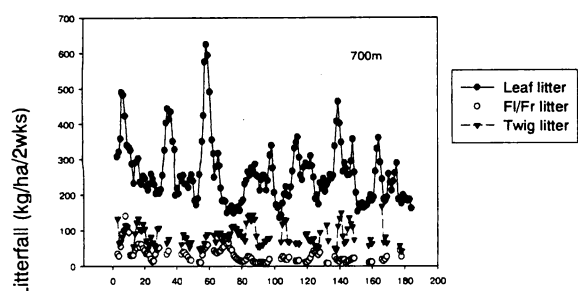
図1. キナバル山における4標高(550、1650、2700、3300 m)での大気乾燥度の季節・経年変化。推定日蒸発量と実測日雨量の30日移動平均を、1996年から2000年までの5年間示した。乾燥度は両指数の差として現れる。

(2) 植物季節への影響

固定試験地から得られたリターフォールのデータを活用し、落葉・落枝や落花（果）量の季節パターンを明らかにした。落葉などの植物季節の気象的な支配要因を明らかにするため、落葉に先立つ時期の大気乾燥度と落葉量（2週間の積算値）との相関関係を解析した。大気乾燥度は、最

大蒸発量をもって指標し、先の Penman 式から求めた。

キナバル山丘陵熱帯降雨林（600m）の落葉量の2週間積算値の季節性を、1996年から2000年までの5年間について示した（図2）。この結果、1年を単位とする明瞭な季節変化が見られることがわかった。落葉のピークは、毎年2月後半から3月に集中している。1998年はエル・ニーニョによる大型の干ばつが見られた年であるが、ピーク時の落葉量には明らかな増加が認められた。落葉に先立つ7、14、21、28日間のPenman式最大蒸発量の移動平均と、落葉量との相関関係を解析したところ、落葉前7日間移動平均値とにもっとも高い相関関係が認められた $\{r^2=0.46, P<0.00001; \text{Litterfall (kg/ha/14days)}=103.36 + 18.06Ea (\text{mm/day})\}$ （図3）。これにより、落葉動態は、通常年と干ばつ年を通して、大気の乾燥度によって支配されている可能性が示された。



1996年2月26日からの回収回数の通算（1目盛りは2週間）

図2. キナバル山の標高700mにおけるリターの季節性。2週間のリター量(kg/ha/2wks)を3回分（6週間）移動平均して表した。

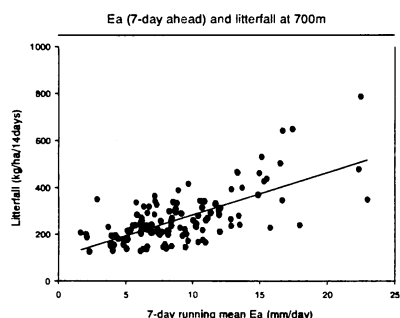


図3. キナバル山の標高700mにおける大気の乾燥度（Eaの7日間の移動平均値）と落葉量（kg/ha/2wks）の関係

（3）モデルを使った熱帯林生態系の環境変動影響予測

これまでに固定試験地から得られた、気候、植物と土壌のデータをパラメータとして使い、CENTURYモデルによる熱帯林生態系への環境変動影響の予測を行った。熱帯林生態系としては、北ボルネオに広がる丘陵フタバガキ林を想定し、キナバル山の標高600mにある堆積岩起源の土壌に成立する熱帯降雨林のパラメータを用いた。モデル実験には二酸化炭素の増加影響は取り込まなかった。

森林に関するパラメータ：森林の葉面積指数、樹木の栄養生態に関する変数（葉、小枝、幹、根、細根のN、P、S濃度；再吸収効率）、樹木における器官への炭素分配比率、土壌栄養に関する変数

(リン画分の濃度、窒素、イオウ濃度)、土壌物理性、水文特性など多岐に渡るが、ここでは詳細は避ける。

仮定する気候変動：

ベースライン予測 IPCC 3 次報告の東南アジアでの温度上昇予測に基づき、2000 年から 2050 年にかけて、月最大・最低気温の年平均上昇率を 0.043℃とした (IS92a 温暖化ガス増加シナリオに基づき複数の気候変動シミュレーションの平均的な予測値として報告されている；Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Cambridge Univ. Press, 2001, p.546)。CENTURY モデルで、1999 年の気象データ (干ばつ無し) を基準データとし、2000 年間のシミュレーションを繰り返し森林生態系の平衡状態を達成させた。その後、上記気候変動シナリオを使って、干ばつを組み込まず、2000 年から 2050 年の温度上昇影響をシミュレートした。これをベースライン予測とする。

干ばつ影響 上記シナリオに加えて、2000 年から 2050 年にかけて 10 年毎に 1998 年規模のエル・ニーニョ干ばつ (図 1 を参照) が起こるものと想定し、生態系影響をシミュレートした。降雨量データは 1998 年の実測値を用い、これが繰り返し起こるものと想定した。干ばつにより、樹木の死亡率が有意に上昇することが確認されているので (Aiba & Kitayama 2002)、モデルにこの影響を組み込んだ。乾燥月はエル・ニーニョ年の 1～5 月に起こり、樹木の死亡率は 6 月に 2.6% 上昇するとした。葉と小枝は土壌に還り、幹は地上に残る、「立ち枯れ」状態を想定した。

森林施業 (択伐方式の伐採) の影響 現在、赤道熱帯域では、急激な経済開発のため、林冠が大きく開放した二次林が広がっている。気象変化の生態系影響は開空度に応じて異なると思われるため、伐採の影響をモデルに組み込んで気候変化の模擬実験を行った。伐採量と伐採方法は、これまで通例行われてきた比較的インパクトの大きな伐採方式を想定した。想定した伐採シナリオは、以下のようなものである。地上部バイオマスの 49% が減少する (実測データから)。細根と大型根の根の被害度も地上バイオマスに比例する。枝、葉、樹皮は土壌に還元され、それに含まれる炭素、窒素、リン、イオウは 100% 土壌に還元。幹バイオマスとそれに含まれるミネラルは 100% 系外に持ち去られる。このような施業が 2000 年に一回だけ行われ、森林は放置されるものと仮定する。

シミュレーション実験の結果は、以下のようになった (図 4 を参照)。森林生態系の健全性の総合的な指標となるバイオマス (根も含む) は、ベースライン予測 (温度上昇のみ) では今後 2050 年まで漸次上昇する。これに対して、10 年毎の干ばつを想定すると、バイオマスは年内変動を続けながら、漸次減少する。2000 年に伐採を行った場合、その後干ばつがなければ、バイオマスは 2050 年にかけて急激に回復する。しかし、伐採に干ばつの影響が加わると、回復はかなり遅れ、年ごとに干ばつが無い回復シナリオとの差が拡大する。

森林生態系全体の炭素貯留量を見ると (図 5)、ベースラインでは、土壌炭素の量が温度上昇によって漸次減少するのでバイオマス増加分と差し引きゼロとなり、変化はほとんど起こらない。しかし、干ばつが生じると、森林生態系全体の炭素貯留量も 2050 年にかけて緩やかに減少を続け、結果として熱帯地域は炭素のソースとなる。伐採、及び伐採と干ばつの相互作用をみると、森林

生態系全体の炭素貯留量においてもバイオマスと同様の傾向がみられる。すなわち、伐採に干ばつの影響が加わると、生態系の回復はかなり遅れ、年ごとに干ばつが無い回復シナリオとの差が拡大する。

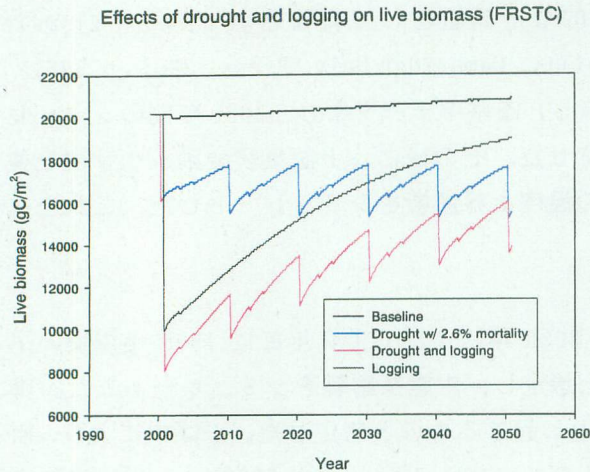


図4. 森林バイオマス量変化の予測

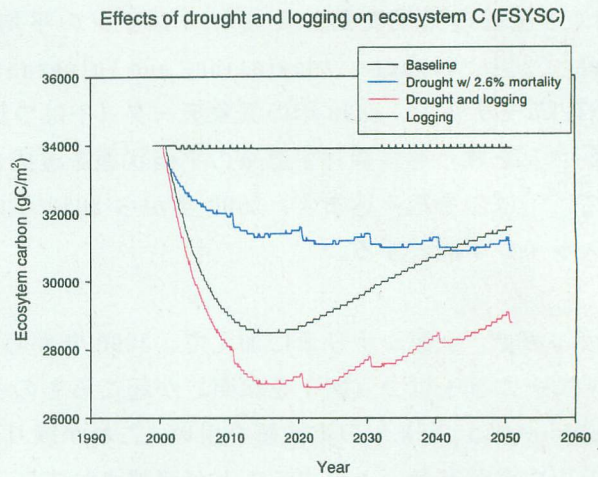


図5. 生態系の炭素貯留量の予測

用いた CENTURY モデルは、基本的に炭素および主要ミネラルを中心とした生態系素過程のモデルであり、種組成や生物多様性変化のような質的变化を捉えることが出来ない。そこで、質的变化とよく相関すると思われる性質の異なる2つの土壤有機物プールを目安として、質的变化を表すことを試みた。使った土壤有機物プールは、表層リターの微生物量と土壤の易分解性有機物量である。前者の微生物には分解にともなう遷移が知られていることから、量変化は微生物群集変化も表すはずである。易分解性有機物は回転が速く、その分解には多くの土壤生物が介在しているはずで、これも土壤生物の変化の目安となると期待される。これら2つの有機物プールは、ベースライン予測で漸次減少する。微生物量は干ばつが生じると漸次上昇、伐採と干ばつの相互作用では大きく変動する(図6)。一方、易分解性有機物量はどのようなシナリオでも漸次減少するが、干ばつが生じると大きく変動し(図7)、これは細根の分解が効いているものと推測される。

Effects of drought and logging on surface-litter microbial biomass (g C/m²)

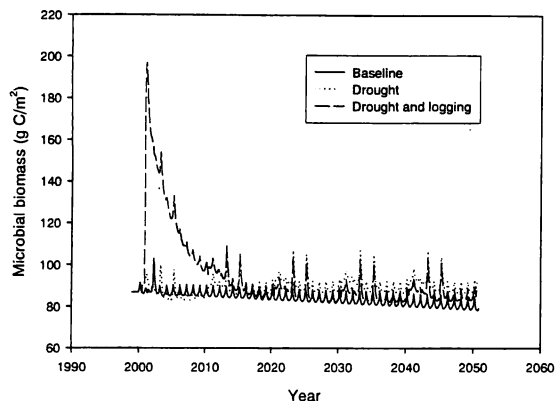


図 6. リター層の微生物量 (炭素換算)

Effects of drought and logging on active SOM (SOM1C(2))

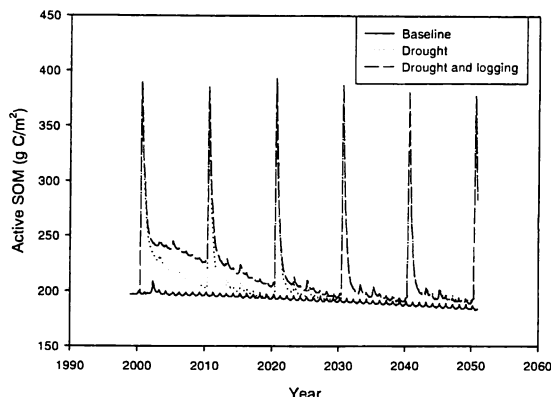


図 7. 土壌の易分解性有機物量 (炭素換算)

(4) 広域土地利用図作成

SPOT-VGT による解析では当初 NDVI の季節変化を用いて土地利用図作成を試みた (図 8)。しかし、森林と農地の区別はできたものの、原生林と二次林といった森林内部の分類には課題が残った。一方、ランドサット ETM+と地上観測による解析の結果、短波長赤外域のバンドを用いた指数である NDWI は熱帯林の地上バイオマスとの相関が高いことが示された (図 9)。また図 10 が示すように土地被覆の各要素の季節変化は平行な関係で変化しているため、季節変化情報は森林内部の分類に重要でないと判断されたため、より雲の影響等が少ない年間データの第一主成分を用いた。この結果では Dense forest と Open forest がある程度区分された利用図を作成することができた (図 11)。しかし Open forest とプランテーションを区別することができなかった。

CCCma/A2a (GCM/Scenario) によるとボルネオ島周辺地域は、年平均気温が 2050 年代で 1–2℃、2080 年代に 2–3℃ 上昇すると予測されている。また地球温暖化の進行に伴い、El Nino のような異常気象の頻度がアジアにおいて高まるとされ、このためボルネオ島においては 1997/1998 年に発生したような早魃の発生が予測されている。1997/1998 年の火災発生状況をみるとその大部分は農地やプランテーションとその開発地域に集中しており、また最近の観測でもその傾向は変わっていない (図 12)。また特にボルネオ島のインドネシア側では国境付近を除いてほとんどの森林に HPH (森林事業権) が設定されており (図 13)、森林の開発が予定されている。このため早魃に伴う大規模火災による森林破壊を防ぐためには、保護すべき森林周辺における農林業を含む産業活動の制限及び監視が不可欠である。

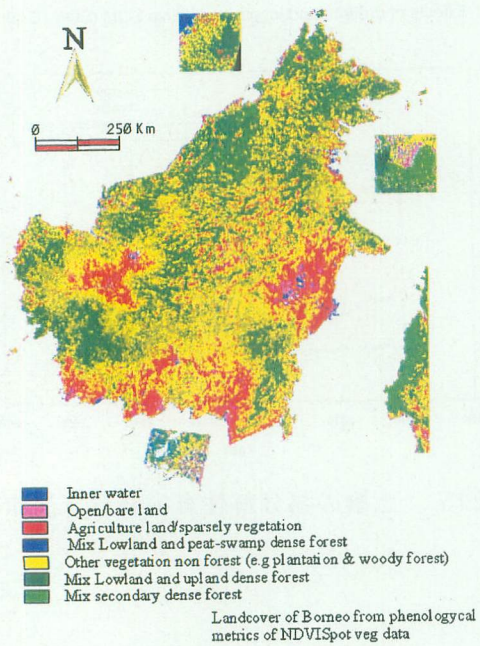


図 8. SPOT-VGTによる土地利用分類図

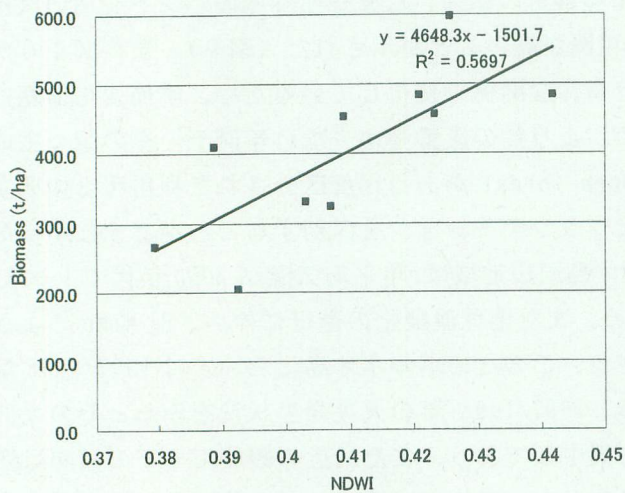


図 9. 地上測定バイオマスとランドサット ETM NDWI の関係

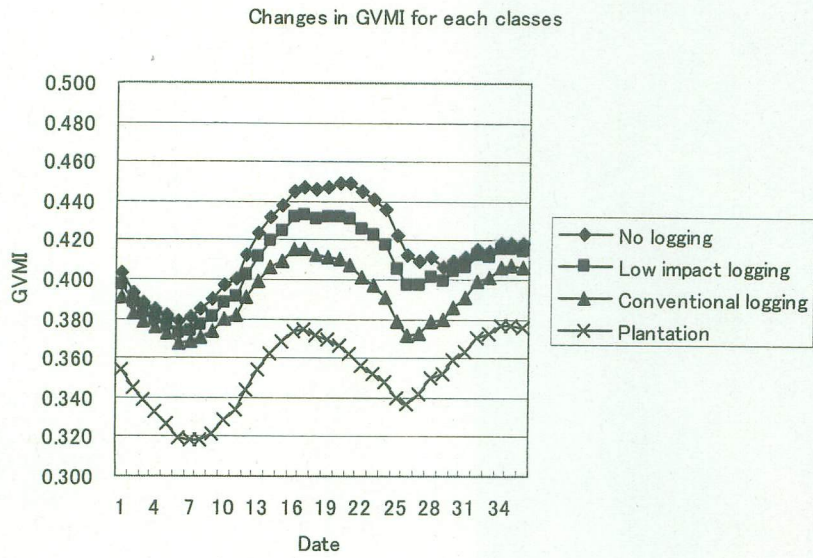


図 1 0. 伐採方法の違いと SPOT-VGT NDWI の季節変化の関係

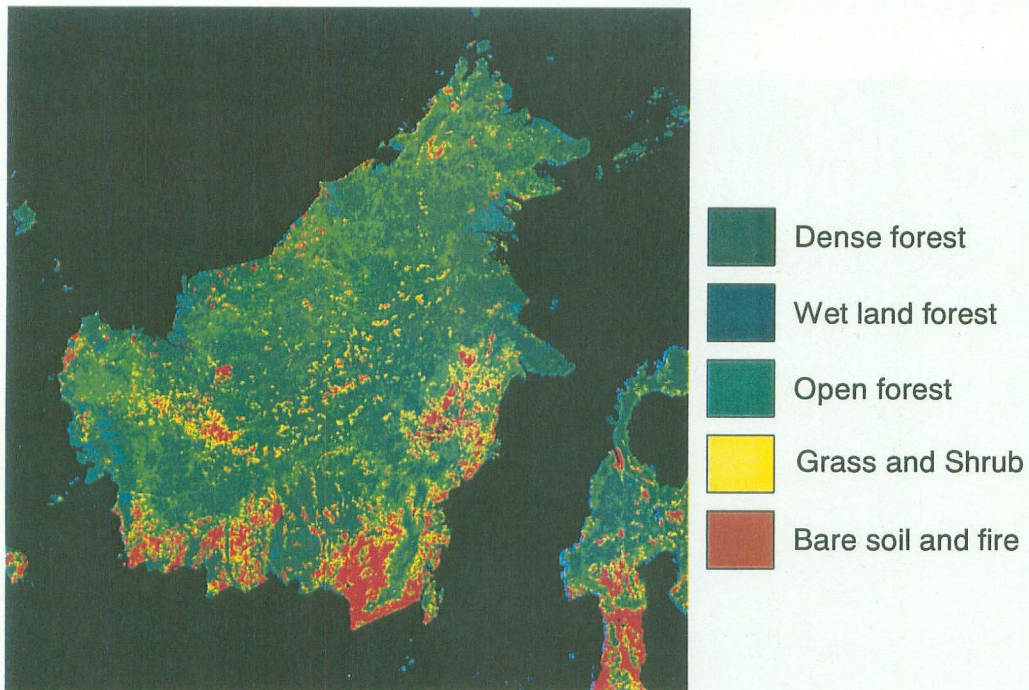


図 1 1. SPOT-VGT による土地被覆図

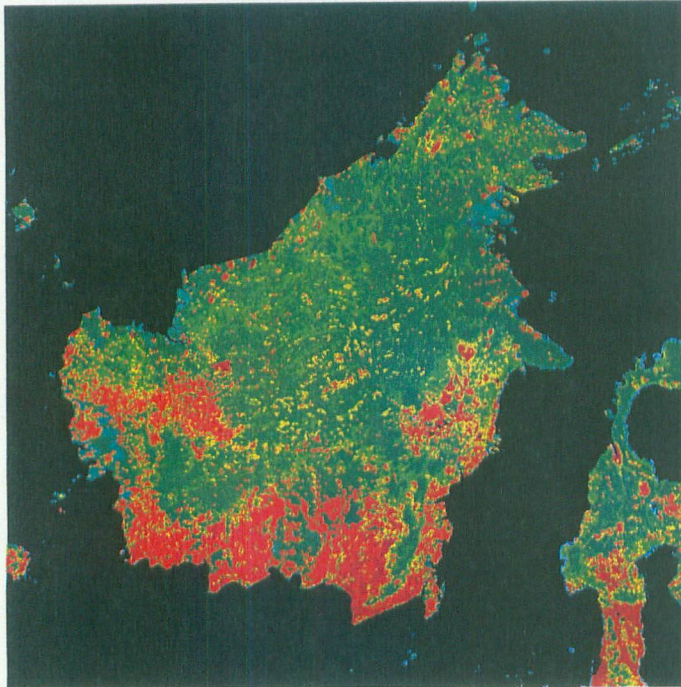


図 1 2. 土地被覆と火災発生状況の関係（赤印は Hotspot）

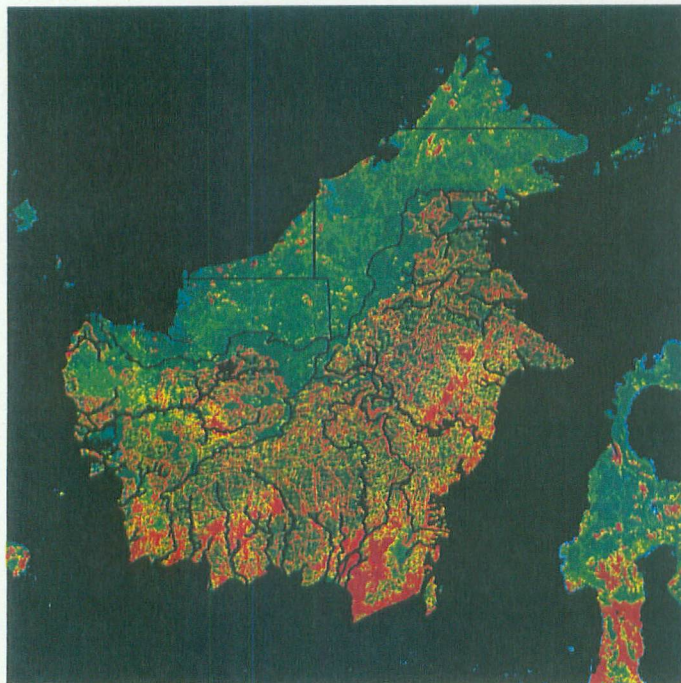


図 1 3. 土地被覆と HPH（森林事業権）との関係

4. 本研究により得られた成果

(1) 湿潤熱帯の将来予測

これまで北ボルネオで得られた結果を総合すると、熱帯降雨林生態系は将来的に以下になると予測される。

1. 干ばつが生ぜずに、平均気温だけが漸次増加すると、森林生態系のバイオマスは漸次増加

するが、土壌有機物が減少することで、ネットに変化量がゼロとなる。バイオマスの増加量は緩やかで、これに伴う生物群集の変化は、もしあったとしても緩やかなものであろう。

2. 温度上昇に加えて、1998年規模の干ばつが10年毎に生じると、樹木の死亡率上昇に森林回復が追いつかず、バイオマスも生態系炭素貯留量も漸次減少を始め、丘陵フタバガキ林は炭素のソースとなる。植物季節の変化、乾燥による淘汰を通じた植物群落の変化、土壌生物の変化など、生態系の質的な変化が起こりうる可能性は高い。
3. これまで通例行われてきた規模の伐採が原生林に加わると、干ばつにより、森林回復は著しく遅れ、年ごとに干ばつが無いシナリオとの差が大きくなる。これは既に伐採が行われ、回復途上にある二次林にも適用され、現在の土地利用状況を考慮すると、2050年には森林の林冠が開放したままの二次林が広がる。林冠が開放した森林は火災に脆弱であると仮定すると（要 生態学的根拠）、大規模火災が発生する可能性が大きくなる。

以上のシナリオには、干ばつ時の気温上昇、最大風速上昇及びそれによる大気飽差上昇の影響が入っておらず、生態系影響は過小評価されている。一方、実際の干ばつ発生周期がより長ければ、生態系影響は過大評価されたものとなる。いずれにしろ、保全、土地利用の地帯区分、伐期の見直しなど森林計画に見直しが必要となる。

5. 国際共同研究等の状況

この数年、国際地球環境プログラムIGBP、IHDP、WCRP、DIVERSITASが緩やかに統合し、共同プログラムが形成されつつある。この共同プログラムは、地球科学システムパートナーシップ（略してESSP）と呼ばれる。この中で、地球環境にとって、他の地域よりも重要な地域を重点的に共同研究しようとする計画、地域統合研究計画が提唱され、モンスーンアジア地域が選ばれた。STARTが中心となり、2003から準備のための国際ワークショップが不定期に開催されている。これらの会議に参加し、「生態系改変・生物多様性喪失」分野の責任者として、モンスーンアジアの地球環境研究の現状について、緊急アセスメントを行い、報告書を提出した。

6. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- ①Takyu M., Aiba S. & Kitayama K. : OECOLOGIA 134, 397-404 (2003)

“Changes in biomass, productivity and decomposition along topographical gradients under different geological conditions in tropical lower montane forests on Mount Kinabalu, Borneo”

- ②Darmawan M., Tsuyuki S., Saito H., Sawada H. & Kitayama K. : Journal of Forest Planning, 9, 35-46 (2003)

“Recognition of spectral pattern characteristic of land cover for assisting visual interpretation of landsat ETM - A forest degradation mapping in tropical rain forest of Sabah, Malaysia -”

- ③Kitayama K., Aiba S., Takyu M., Majalap N. & Wagai R. : Ecosystems, 7, 259-274 (2004)

“Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiency of a Bornean tropical montane rain forest during soil ageing with podzolization”

④Hall J. S., Asner G. P. & Kitayama K.: Biogeochemistry, 70, 27-58 (2004)

“Substrate, climate, and land use controls over soil N dynamics and N-oxide emissions in Borneo”

⑤Aiba S., Kitayama K. & Takyu M.: Plant Ecology, 174, 147-161 (2004)

“Habitat associations with topography and canopy structure of tree species in a tropical montane forest on Mount Kinabalu, Borneo. ⑥Kitayama K., Suzuki S., Hori M., Takyu M., Aiba S., Majalap-Lee N. & Kikuzawa K. (2004) On the relationships between leaf-litter lignin and net primary productivity in tropical rain forests”

<学術誌（査読なし）>

特になし

(2) 口頭発表（学会）

特になし

(3) 出願特許

特になし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特になし

(5) マスコミ等への公表・報道等

特になし

7. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究の結果より温暖化に対応できる熱帯林管理のため以下のことが提案可能であり、今後の学術発表や共同研究を通じて提案していく予定である。

・温度上昇に加え干ばつによって森林の回復速度が減少することが予測されるため、森林の伐採にあたっては、これまでよりも生態系に与えるインパクトの小さい伐採、伐出技術を用いた方法を採用するとともに長伐期化や伐採量の制限を行うべきである。

・特に原生林では、その豊かな生物多様性が回復困難な状況に陥ることも予測されるので伐採は原則的に控えるべきである。

・ボルネオ島には二次林が広範囲に広がっているが、これらの森林の回復速度が遅くなることが予測されるため、その森林利用、例えば焼畑移動耕作などについてはより細かな管理が必要となる。

・干ばつによって大規模森林火災の発生が予測されるため農地開発等に火入れ等の手法を用いることは禁止すべきであり、また焼畑移動耕作での火の取り扱いについては十分な注意が必要である。

・こうした熱帯林管理を実現するためには、熱帯林の分布をはじめとする土地利用や森林資源量の適切に把握し、温暖化による温度上昇や大規模干ばつに対応できる森林計画制度が必要である。