

研究テーマ

- (1) 研究領域 : 地球変動のメカニズム
- (2) 研究総括 : 浅井富雄
- (3) 研究代表者 : 総合地球環境学研究所、教授、浅野(中静)透
- (4) 研究課題名 : 熱帯林の林冠における生態圏-気圏相互作用のメカニズムの解明
- (5) 研究期間 : 平成10年12月1日～平成15年11月30日

1. 研究実施の概要

熱帯林は、高い生物多様性と生物生産性に支えられ、大気との間に複雑で活性の高い相互作用をもっている。生態圏と気圏の相互作用の多くは、両者の境界層としての林冠における生態プロセスに支配されている。しかし、これまで有効な林冠アクセスシステムや広域の生態プロセスを把握する手法が開発されなかったため、因果関係やメカニズムの解明が進まず、地球科学と生態学のギャップとして残されてきた。この研究では、ボルネオ島の熱帯雨林に高さ 80m の林冠クレーンシステムを構築することにより、とくに(1)エルニーニョ南方振動などの環境変動が熱帯樹木の斉開花および生態系に及ぼす影響、および(2)地球規模の環境変動と熱帯林の炭素・水収支の時間的・空間的変動の解明をめざした。

< 調査地と林冠アクセスシステム >

調査は、マレーシア連邦サラワク州のランビルヒルズ国立公園(北緯 4°2′、東経 113°50′、標高約 150m)でおこなった。年平均気温 26°C、年降水量 2700 mm で、明瞭な乾季をもたないため、フタバガキ科の樹木を中心とする典型的な熱帯雨林が発達している。2000 年 3 月に、このプロジェクトにより林冠クレーンを建設した(写真 1)。この林冠クレーンは高さ 80m、ジブ長 75m の巨大なもので、面積 1.77ha の林冠に容易なアクセスが可能になった。



写真 1. 建設最終段階の林冠クレーン。2001 年 3 月。

< 斉開花と生物間相互作用 >

1992 年以降、このプロジェクトの実施期間を含む 2003 年 11 月までに、96 年、97 年、98 年、2002 年にさまざまな規模の開花があった。30 日積算降水量と開花状況を比較すると、例外なく開花の直前に積算降水量 25mm 以下の乾燥が見られることがわかり、低温よりも乾燥仮説が有力であることが明確になった。また、種子生産に必要な炭素資源は樹体内からの資源貢献はほとんど無く、開花から結実までの期間に行われる光合成量が重要である

ことがわかった。しかし、窒素は主に一斉開花期間中に脱落した葉から回収された資源によって、リンはその大部分を幹からの転流で供給されていた。したがって、開花・結実周期には栄養塩の貯蔵量が影響する可能性がある。

経年変動スケールの多雨、旱魃は、季節内変動スケールの降水量が非常に増えたり、あるいは、減ったりして、無(少)降水日が数十日継続するかたちで現れる。旱魃・少雨期間は、北半球の夏から秋(7-10月頃)に、多雨期間は冬(1-3月頃)に出現しやすい傾向がある。ランビルでの降水量変動が、ボルネオ島全域での変動とどのような関係にあるかを調べるために、1997-2002年のボルネオ地域(108E-120E, 7N-5S)におけるGPCPの5日平均降水量の主成分分析を行った。第1主成分(寄与率33%)には、ボルネオ島南部を中心に、北部山岳域を除くほぼ全地域で同時に変動するモードが現れ、この時間変動は、ランビルでの降水量変動とも、良く相関していることがわかった。乾燥トリガーと推測されている、97年後半、98年5月、98年1-2月、2001年7-9月の少降水量(乾燥)時期も、このモードで基本的に説明できる。

一斉開花の進化的要因に関しては、捕食者飽食仮説(不規則な大量結実によって、捕食圧を逃れる)、送粉促進仮説(同調した大量開花により受粉率を高める)、遺伝子流動促進仮説(大量開花により優秀な花粉媒介者を誘引することで花粉移動を促進する)について検討した。捕食者飽食仮説として、種子散布前の主として昆虫によるものと、散布後の哺乳類によるものについて検討した。開花規模の小さな年には、多くの種で虫害率は高く、仮説を支持する結果を得た。ただし、従来、熱帯林では植食昆虫の種特異性は高いと考えられてきたが、多くのフタバガキ種子食昆虫が複数の属にまたがる種子を餌として利用することが分かり、その食性幅は比較的広く、その範囲は互いに重なり合っていることが明白となった。また、一部の樹種について、一斉開花時にはネズミなどによる種子散布後の死亡率が低下することから仮説を支持する結果をえているが、このようなデータをさらに多くの樹種で蓄積して検討する必要がある。

一斉開花の規模と結実率のあいだには、正の相関があり、送粉促進仮説で群集レベルで支持する結果を得た。また、開花規模によって送粉者が異なるという現象も発見され、実際にDNAマイクロサテライトを用いた花粉散布パターンを解析したところ、開花規模の大きい場合には生産される種子の遺伝的多様度も高いことがわかった。一斉開花によって送粉が促進され、近親交配を緩和するという、遺伝子流動促進を新たな仮説として提出できた。

< 林冠動態と炭素水収支 >

熱帯雨林の林冠部は日常的に強光や乾燥状態にさらされており、樹木の光合成にとって必ずしも快適な環境にあるとはいえない。しかも、樹高が著しく高い熱帯の樹木は、その高い樹高が及ぼす水分通導抵抗の増大と重力ポテンシャルの低下により、樹冠頂部では常に大きな水ストレスを受けていることも予想される。そこで、フタバガキ科の巨大高木数種について、その光合成や蒸散特性、水ポテンシャル、葉の形態や化学的組成など様々な角度から調査を行い、林冠構成種の環境への順応メカニズムや樹種特性を明らかにした。さらに、同じ樹冠内の上部と下部での水ストレスの受け方や、樹冠内での水利用特性に大き

な種間差があることがわかった。とくに、*S. beccariana* は最大 5 - 7 層というこれまでに例をみない数の柵状組織をもち、他の樹種にくらべて高い光合成能力をもつことがわかった。調査用クレーンを中心として 4 ha、および林冠ウォークウェイを中心として 8ha の永久方形区を設定し、アロメトリー関係を用いて樹木の現存量とその変化を推定した。さらに両調査地でリタートラップを使ってリター供給量を測定し、土壌呼吸量の測定などとあわせて炭素収支を推定した。その結果、4ha プロットにおける炭素収支は、2000-2001 年が 4.85 tC ha⁻¹year⁻¹、2001-2002 年が 2.80 tC ha⁻¹year⁻¹ であり、2 年間とも炭素を吸収していることが分かった。一方で 8ha プロットにおける炭素収支は、1993-1997 年が平均で 5.11 tC ha⁻¹year⁻¹ の炭素を吸収していたが、非常に強い乾燥を経験した 1998 年を含む 1997-2001 年の平均では -12.59 tC ha⁻¹year⁻¹ の現存量が減少しており、長期の変動観測の必要性も明らかになった。

一方、乱流変動法でも純生態系 CO₂ 交換量 (NEE) の 2 年間に渡る長期連続計測を行った。乱流変動法を基本とする NEP (4.83 tC ha⁻¹year⁻¹) で毎木調査を基本とする NEP (2.80 tC ha⁻¹year⁻¹) よりやや大きい。推定された NEE 日変化のピークを湿潤条件、乾燥条件のそれぞれで見ると、アマゾン熱帯林の雨季、乾季のそれぞれに近い値であった。海洋性東南アジア熱帯では降雨や気温、放射環境に季節変動が乏しく、雨季・乾季のような区別が存在しない。そのかわり、年内変動として突発的で不規則な短期の乾燥状態が生じるほか、エルニーニョ南方振動の影響を強く受け、超年変動として強い乾燥条件を経験する。したがって、これまで測定例のあるアマゾン熱帯林と東南アジア熱帯林とは、環境特性がまったく異なっており、ここでの測定値は重要な意味をもつ。

林冠クレーンタワーの地上 59.0m の地点に超音波風速温度計、赤外線 H₂O/CO₂ 変動計を設置し、林冠上の水蒸気フラックスが計測された。2 年間の観測資料より、1) 水蒸気フラックス (蒸発散量) は日々の変動はあるが、大きい季節変化は持たず、2) 蒸発散量は土壌水分変化の影響をほとんど受けていないことがわかった。年蒸散量は、953.1mm と推定され、年樹冠遮断量 351.9mm を加えると蒸発散量は 1305.0mm となった。これは湿潤熱帯の森林で報告される年蒸発散量の下限值に近い。乱流変動法による測定に特有の過小評価があるとしてこれを補正すると、年蒸散量、年蒸発散量は 1191.4mm、1543.3mm となる。これらの数値は、湿潤熱帯の森林で報告される年蒸発散量のほぼ上限値である。正味放射量に対する蒸発散量の割合は、年蒸散量 953.1mm とするとき 0.55、1191.4mm とするとき 0.69 で、これらはそれぞれ南米アマゾン流域の森林で報告される乾季における値、乾季と雨季の中間の値に対応するものである。

< 林冠状態の広域把握 >

主として太陽 - 林冠反射モデル構築のための物理要因取得に関しては、林冠観測クレーンでアクセス可能な約 4 ha の領域について、林冠 3 次元構造計測ができた。また、二方向性反射特性については、特定樹種について、太陽高度条件の異なる複数時期における観測が実施できた。また、植生タイプ/状態分布図については、衛星画像の画像判読によって初期成果が挙げられた。これらの知見は、太陽 - 林冠反射モデル構築にあたっては、光合成量計測との同期観測ならびに推定される日射エネルギー分布を基に、光合成量の非接触計測手

法の開発に利用できる基礎的情報である。また、林冠クレーンは、さまざまなリモートセンシングの検証サイトとして注目されており、今後も大きな利用価値をもつと考える。

2. 研究構想

熱帯林は大きなバイオマスと高い生物生産性をもち、その急速な消失は大量の二酸化炭素放出、気候変化などの地域環境問題を引き起こしている。熱帯林のもつ生物多様性は生産性やプロセスの複雑性と深い関係をもち、多様性の消失は同時に熱帯林の持つ高度な機能の消失につながる。このような複雑な生態プロセスの多くは、林冠という気圏と生態圏の境界層で機能している。林冠部で生物が行うガス交換プロセスは、生態圏と気圏の炭素、熱、水収支を大きく支配し、生態系レベルの局所的な気象条件にとどまらず、全地球的な気候変動に影響を与える。

一方、気圏から生態圏への逆方向の作用についても、近年、地球規模の環境変動が熱帯林生態系の維持に関わる諸現象に大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつある。例えば、東南アジア熱帯の主要樹種は平均約5年間隔で大規模な一斉開花、結実を行うことが知られているが、ENSOによってもたらされる異常低温が引き金となっているという説がある。また、地球規模の変動と連動して、熱帯雨林地域でもごくまれに起こる異常乾燥によって大規模な山火事や樹木の大量枯死が生じたり、大型ハリケーンによる大規模な一斉倒木が起こったりすると言われている。1983年や1997年のENSOにともなうボルネオ島の山火事、ヘイズ、乾燥枯死現象などは顕著な例である。

一斉開花や大規模な自然攪乱は、熱帯林の世代交代（更新）に関わる要因でありその頻度や規模が熱帯林の構造・機能や生物多様性を大きく左右する。一斉開花に伴って多様な送粉昆虫が個体群を急速に増加させるほか、結実した種子や増加した昆虫を捕食する動物がタイムラグをもって個体群を変動させるなど、生態系内部でカスケード的な反応が起こるので、一斉開花時には非開花時通常の生態系とは異なった生態系が出現している、とも言える。樹木の枯死や倒木は、それ自体が生態系の部分的破壊として大きな影響であるが、一方では、破壊によって生じたオープンスペースは樹木の実生や稚樹の定着の場として重要であり、オープンスペースの大きさや頻度によって、樹種の組成が変化する。

また、気候変動を原因とする大規模な攪乱は森林の構造や機能を不均一なモザイク構造に保つ。そのため、生態圏から気圏への作用としての炭素、水収支にも大きな時間的・空間的変動が生じる。攪乱直後の森林は局所的に炭素のソースとなるが、時間を経てシンクへと変化する。これまでの生態学的プロセスの研究では、このような変動を重視してこなかった。このことが炭素のミッシングシンク論争などで顕著のように、生態学的メカニズムのスケールアップを困難にし、プロセス研究と観測システムのリンクを妨げてきた可能性が大きい。

以上の背景と研究状況を踏まえて、この研究では、生態圏と気圏の相互作用の解明という大きな目的の中で、とくに地球規模の環境変動を介在した現象に的を絞る。環境変動が熱帯林生態系の構造・機能と生物多様性に与える影響を解明すると同時に、それによって生じる炭素、水収支の時間的・空間的変動を明らかにする。そのためには、効率の良い林冠アクセスシステムが必要である。そこで、高さ80m、アーム長75mという林冠クレーンとしては世界最大級を熱帯林に建設する。林冠クレーンをもちいた林冠生態プロセスの研究

は、すでに国際ネットワーク活動が動き始めており、将来的には共通メニューによる観測とそれに基づく国際データベースへと発展する可能性が高い。こうした新たなスタンダード形成にイニシアティブをとる研究となる。さらに、生態プロセスと衛星や航空機による観測システムのスケールギャップを埋め、生態系機能（その多くは林冠で起こっている）を高い精度で推定する手法が確立され、高い技術資産となると同時に、これを用いた地球変動予測技術への発展が期待できる。生態プロセスの詳細な解明により、環境変動とそれに対する生態系の反応メカニズムが各スケールで把握でき、温暖化に対する植生の影響をモデルに組み込むことが可能になる。また、環境変動が引き起こす生態系の共生関係や食物連鎖の変化が解明され、予測される環境変動のシナリオの中でとりうる生物多様性保全策を検討する基礎データが得られる。

研究分担体制としては、サブチームとして、1) 一斉開花と生物相互作用、2) 林冠動態と炭素水収支、3) 林冠状態の広域把握の3チーム体制を作った。一斉開花と生物相互作用については、一斉開花を引き起こすメカニズム、とくに開花トリガーとなる気象条件の解明に重点をおく。さらにその気象条件を引き起こす全球的な気候場を明らかにする。一方、一斉開花が進化してきた背景となる生物間相互作用に対しても解明を進める。炭素・水収支に関しては、森林の動態および樹木の成長から炭素固定能力を測定するグループ、乱流拡散法により炭素・水蒸気のフラックスを直接測定するグループ、および植物の生理生態的活性を測定して、それを森林全体へスケールアップさせるといグループという3つの異なった手法でのアプローチを試みる。広域把握のチームは、炭素水収支のグループと共同で、林冠および森林の詳細な構造把握を行い植物生理活性のスケールアップを図るほか、一斉開花や炭素収支のグループが得た結果をさらに大きな空間スケールで統合する試みを行う。その手法としては、リモートセンシングが有力なツールであるが、林冠クレーンは衛星と同じ観測を至近距離で行うことが可能で、地上での観測とリモートセンシングとの観測のギャップを埋める有力な手法でもある。

3. 研究成果

3.1 一斉開花と生物相互作用

(1) 研究内容及び成果

A. 一斉開花の観測と開花・結実状況

1992年8月から林冠ウォークウェイとタワーを使ってフタバガキ科の突出木、林冠木、つる、着生植物などを含む約500個体の植物を月2回観察してきた。(個体の死亡に伴い、観察開始時から調査が継続されている個体の数は、現在は300あまりである)個体ごとに、繁殖器官の量(5段階評価)とそれぞれの器官(つぼみ、花、未成熟果実、成熟果実)の割合を記録している。同様の調査を1997年からは林床の樹木、2001年からはクレーンサイトの植物について開始しているが、種組成などに違いがあるので本論の解析には含めていない。一方、降水量についてはも農業省灌漑排水局によってランビル国立公園内で観測されたデータ、及び第2タワーで観測された日データを30日積算降水量としてフェノロジーと比較を行った。日最低気温については、第1タワーおよび第2タワーで観測されたものを使っている。

1992年に調査を開始したときは92年の一斉開花の最終ステージにあった。その後、96年に2回のピークがある著しい開花がみられ、97年、98年、2002年に中規模の開花があった(図1)。開花の増減は観察対象のほとんどすべての種類でみられたが、やはりフタバガキ科がとくに激しい開花の集中を見せた。

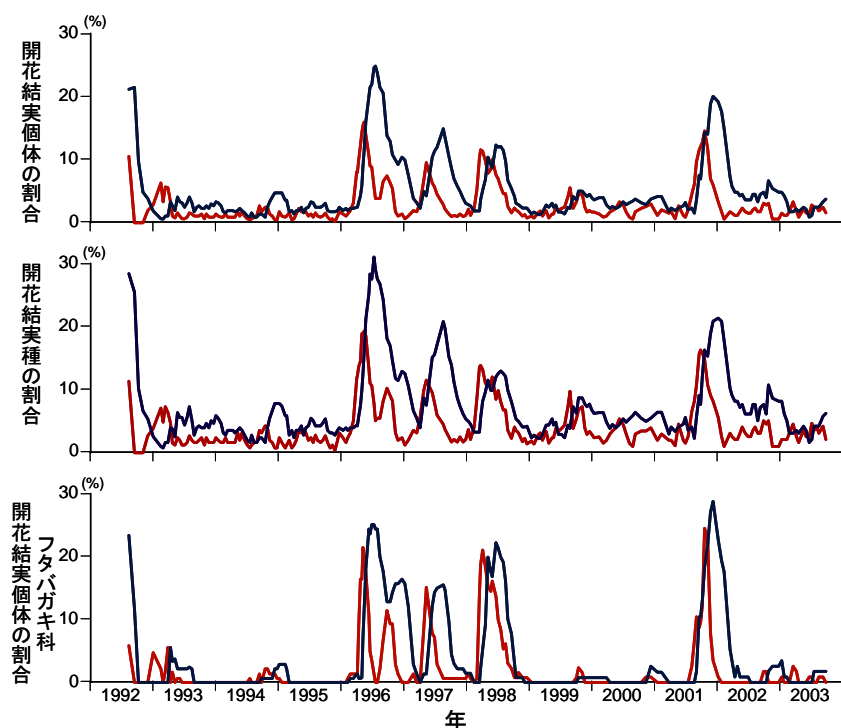


図1. ランビルヒルズ国立公園における樹木の開花・結実状況。

赤い線は開花個体、青い線は結実個体の割合を示す。

気温については、欠損値があり、すべての開花について低温の有無を確認できなかった。96年の1回目のピーク、97年の開花については開花の3、4ヶ月前に気温の低下を観測した(図2)。98年についてはランビル国立公園では観測できなかったが、20kmの距離にあるミリ空港でのデータ等を検討した結果、この地域では今世紀最大といわれたエル・ニーニョのために乾燥状態にあり、むしろ気温は上昇していた可能性が高い。また、2001年の開花の前には低温は観察されなかった。

一方、30日積算降水量と開花グラフを比較すると、例外なく開花の直前に積算降水量25mm以下の乾燥が見られることがわかった(図2)。また、乾燥が起きているときには、直前に大きな開花があった93年をのぞいて開花が起きている93年もリュウノウジュなど開花頻度が高いといわれている一部のフタバガキ科は小規模ではあったが開花した。これらのデータは、低温よりも乾燥仮説を支持する。

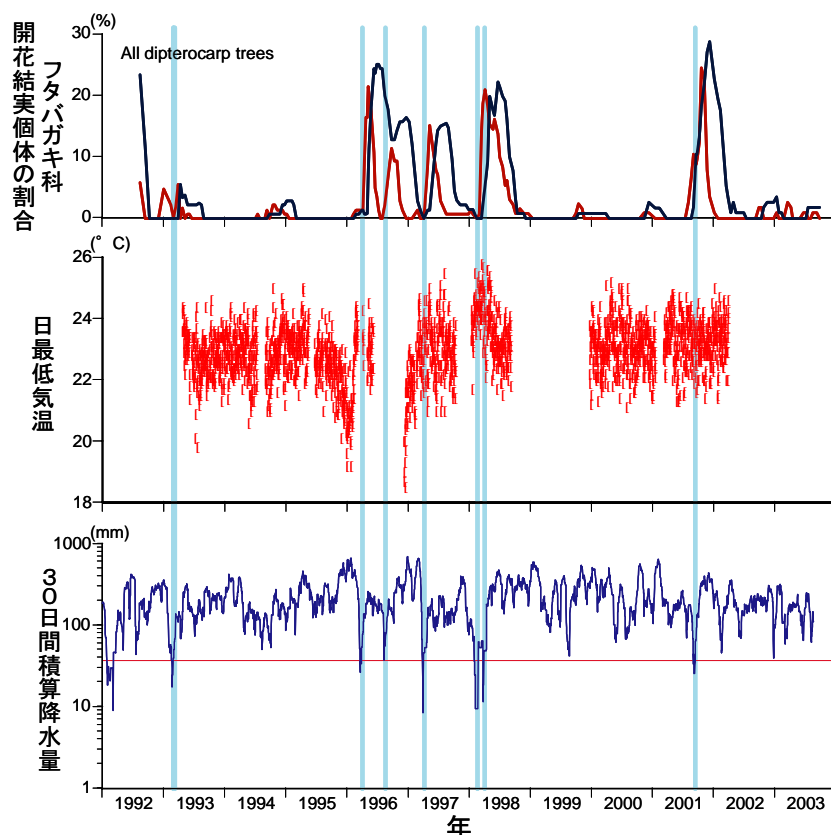


図2. 一斉開花のトリガーとしての低温および乾燥条件の比較

B. サラワク熱帯雨林地域の気象・気候特性と一斉開花の気象トリガー

CMAF(CPC Merged Analysis for Precipitation)および GPCP(Global Precipitation Climatology Project)による全球格子点降水量データ、GMS(静止気象衛星)データ、TRMM(熱帯降雨観測衛星)データ、および全球客観解析気象データなどを併用して、さまざまな時間スケール、空間スケールでの統計的解析、時系列解析等を通して、現象の記述と機構解明を行った。

降水量の系統的な季節変化は非常に弱く、日降水量時系列のスペクトル解析(図 3)で示すように、15 日、20-25 日、30-50 日の季節内変動の周期帯および 120 日周期スケールでの準季節的変動あるいは長周期季節内変動が卓越し、1 年、半年周期の季節サイクルは、ほとんど見られないことが明らかになった。CMAP による 20 年間の月降水量データから計算した、降水量の総分散に対する季節変化成分の寄与率(図 4)をみても、このサラワク地域は、全熱帯あるいは熱帯アジア地域でも季節変化成分が特に小さい地域であることがわかる。

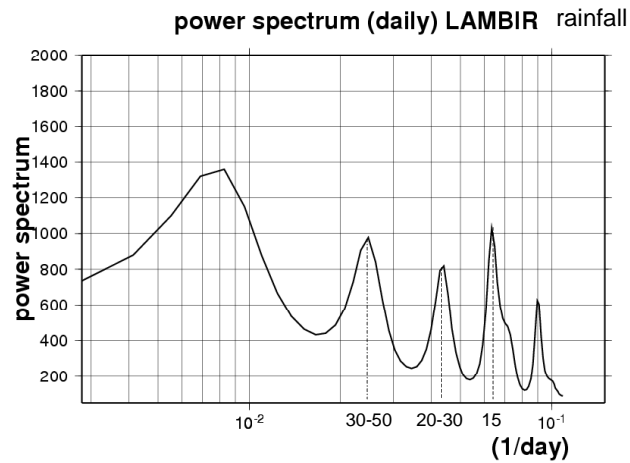


図 3. ランピルの日雨量のパワースペクトル分析

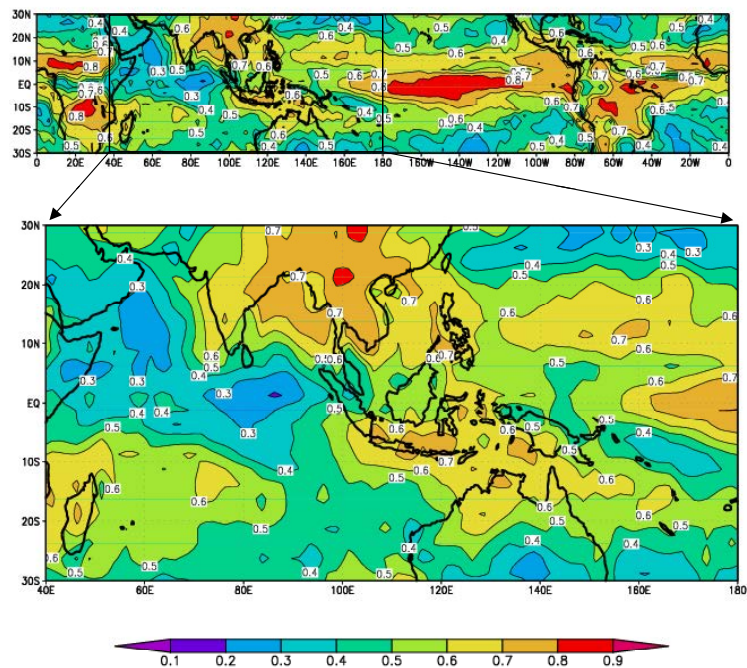


図 4. 月降水量の全変動に季節変動(周期が1年以内の変動)の占める割合の地理分布. CMAP(1979-2000)による.

降水量、降水頻度などの日周変化の長期変動をみると、季節内変動スケールの多雨、早魃は、主に夜間の雨の変動が寄与していること、昼間の雨は、長期的な変動にあまり関係

なく、常に、短時間に集中するが、現れやすいという傾向がわかる。また、日射量の日周変化とその長期変動でも、午前の無降水傾向と日射量は、多雨期間においてもあまり変化せずに見られた。これは、熱帯雨林の生理生態を考慮する場合に、重要な情報とも考えられる。旱魃・少雨期間は、季節内変動による降水活動の頻度に依存し、季節性は弱いとはいえ、北半球の夏から秋(7-10月頃)に、多雨期間は冬(1-3月頃)に出現しやすい傾向は見られる。気温変動も降水量変動と同様に、顕著な季節変化はほとんど見られず、季節内変動が卓越している。日降水量と日平均気温は、季節内変動スケールで非常に高い負の相関を示す。

ランビルでの降水量変動が、ボルネオ島全域での変動とどのような関係にあるかを調べるために、1997-2002年のボルネオ地域(108E-120E, 7N-5S)におけるGPCPの5日平均降水量の主成分分析を行った。第1主成分(寄与率33%)には、ボルネオ島南部を中心に、北部山岳域を除くほぼ全地域で同時に変動するモード(図5a)が現れ、この時間変動(時間スコア(図5b))は、ランビルでの降水量変動とも、良く相関していることがわかった。即ち、ランビルでの乾燥トリガーと推測されている(Sakai, 2002)97年後半、98年5月、98年1-2月、2001年7-9月の少降水量(乾燥)時期も、このモードで基本的に説明できる。

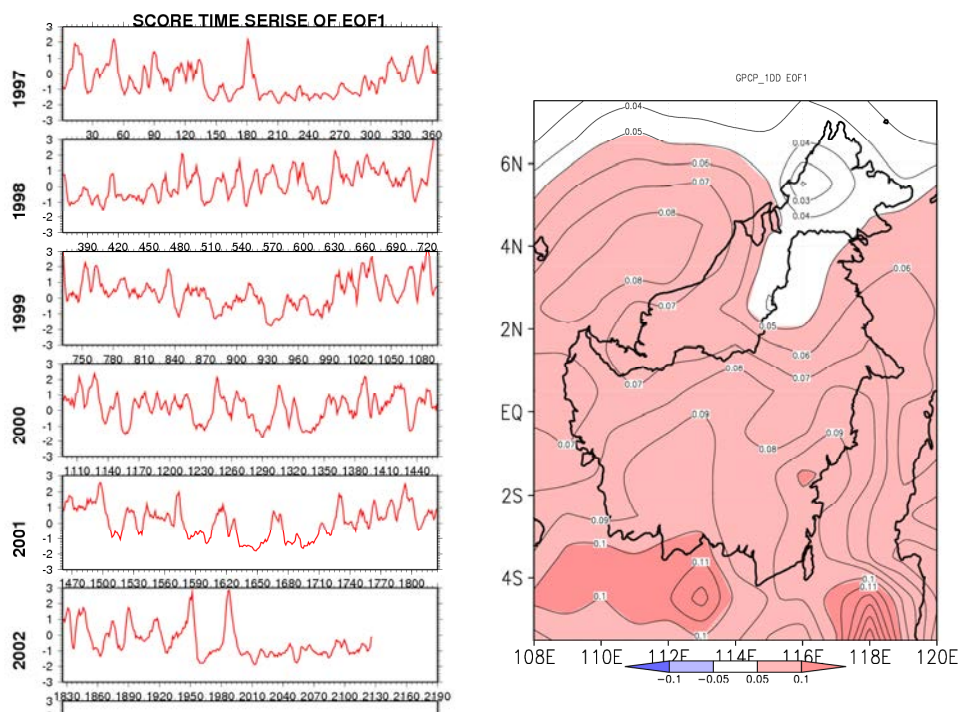


図5. ボルネオ島付近の降水量(GPCP)変動の第1主成分(EOF-1)

これまで指摘されている一斉開花に対応した低温トリガー(例えば1996年1-2月)は多降水期と、乾燥トリガー(例えば2001年9月)は少降水・高温期と、それぞれ対応がよく、気候の年々変動と一斉開花の関係が、決して一定ではないことを示唆している。また、最低気温は早朝(明け方)にのみ出現するが、乾燥のピークは昼間の12LT頃に集中するという、1日におけるトリガーとなりうる時間帯も、低温か、乾燥かで大きく異なることも気

象トリガーの働くメカニズムを特定する上で留意する必要がある。

どのような大規模な気候（気象）変動が低温、乾燥トリガーに関与しているかは、結論は出ていない。これまでの解析（吉田, 1996）や、マレー半島における研究(Numata et al., 2003)でも、低温か乾燥かというトリガー問題には決着がついていない。Sakai (2002)は、降水量の 30 日移動平均データから、このデータで見られる異常乾燥期がサラワクの一斉開花の先行現象となっていることをかなり明瞭なたちで指摘している。赤道地域では、季節内変動からエルニーニョに対応したような経年変動は、大規模な降水・対流システムの東進、あるいは西進する波動じょう乱に伴っている。そこで、サラワク付近の緯度帯にあたる北緯 4 度沿いの 5 日平均降水量 (GPCP) の東西時間断面をインド洋から東部太平洋地域について作成し、関連する乾燥イベントがどのように発現しているかを調べた。しかし、これらの乾燥イベントは、エル・ニーニョに明らかに対応した 1998 年初めのようなケースもあるが、2001 年 7-9 月のケースのように、どちらかといえば、ラ・ニーニャ最盛期の中の季節内変動スケールでの乾燥イベントに対応したケースもあり、一般的な説明はできにくい。また、低温か乾燥かといったトリガーを考える時の開花までの時間ラグなどの考え方にまだ不確定さが多く、どのイベントを真に意味のあるものとするか、より生理生態学的視点での研究が必要であろう。また、トリガーと同時に、開花のエネルギー（栄養）の必要水準といった側面を考慮するならば、低温、乾燥トリガーというイベント的な気象要素と、光合成量に関連した気象要素の統計量なども考慮して、一連の時系列イベントとしての理解も必要であろう。

C. 一斉開花と樹木の生理状態

数年に一度の大規模な一斉開花・結実現象に対し、樹木は膨大な資源（エネルギー）を必要とすることが予想される。特に、フタバガキ科に代表される東南アジア熱帯雨林の突出木層を形成する樹種では、その多くが一斉開花の年にのみ開花・結実を行い、大型の種子を大量に生産する。そのため、熱帯雨林の樹木の資源蓄積やその動態といった資源要因は、環境要因とともに一斉開花の重要な至近要因の一つであると考えられている。しかし、これまで一斉開花と貯蔵資源の関係に関する研究はほとんどなく、熱帯樹木の基本的な資源分配についてさえ情報が不足していた。この研究では、一斉開花のメカニズム解明に向け、特にフタバガキ科巨大高木の一斉開花・結実期間中の資源動態を定量的に明らかにする。また、いくつかの操作実験を組み合わせることにより、一斉開花に対する主要な資源供給器官の特定を目指す。中でも、繁殖に必要な資源のうち最も量的な要求度が大きい炭水化物と、熱帯雨林で欠乏が指摘されている窒素やリン等の栄養塩のやり取りに注目して研究を行った。

1998 年の一斉開花期間中に *D. tempehes* は $447 \pm 23 \text{g/m}^2$ の成熟種子を生産した。このとき、生産した花の量や果実の発達段階ごとの物質量を計算した結果、必要な資源のほとんどが種子の成熟過程で要求されることが分かった。種子生産に必要な資源のうち、炭素は樹体内からの資源貢献はほとんど無かった。しかし、窒素は主に一斉開花期間中に脱落した葉から回収された資源によって賄われていた。リンはその大半が幹から供給されてい

た(図 6)。

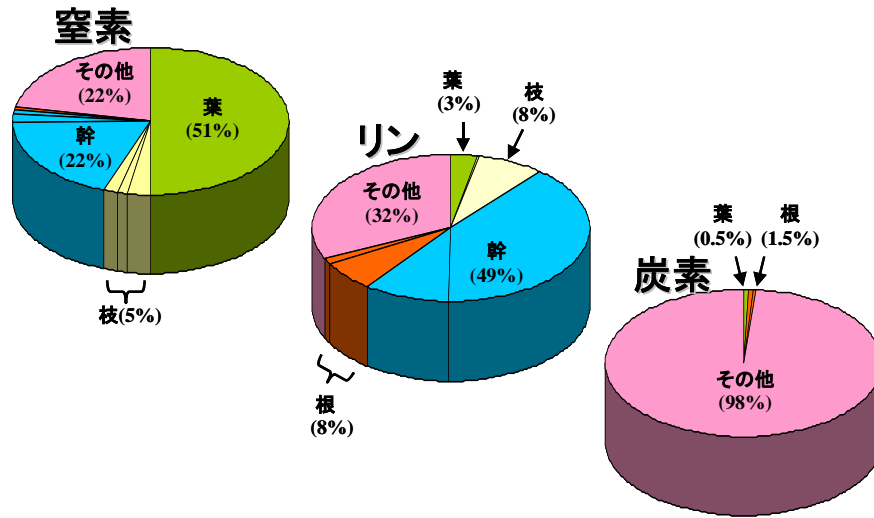


図 6 . 種子生産に必要な資源の供給源

2001 年に調べた一斉開花・結実期間を通した炭水化物資源の動態では、*D. aromatica* は開花期間中に枝(直径 10cm)からの有意な濃度低下が認められた。しかし、種子の成熟過程における低下は認められず、むしろ増加傾向にあった。操作実験の結果では、開花期間中は環状剥皮が結実率の低下に有意に影響を与え、アポシオンを引き起こす要因となったが、種子の成熟過程では逆に葉の切除が結実率の有意な低下を引き起こした。最終的な結実率は枝(直径 5mm)あたりの葉面積と高い相関関係があった(図 7)。フタバガキ科樹木の羽根は、光合成能力は認められたものの、葉に比べればその能力は極端に低かった。

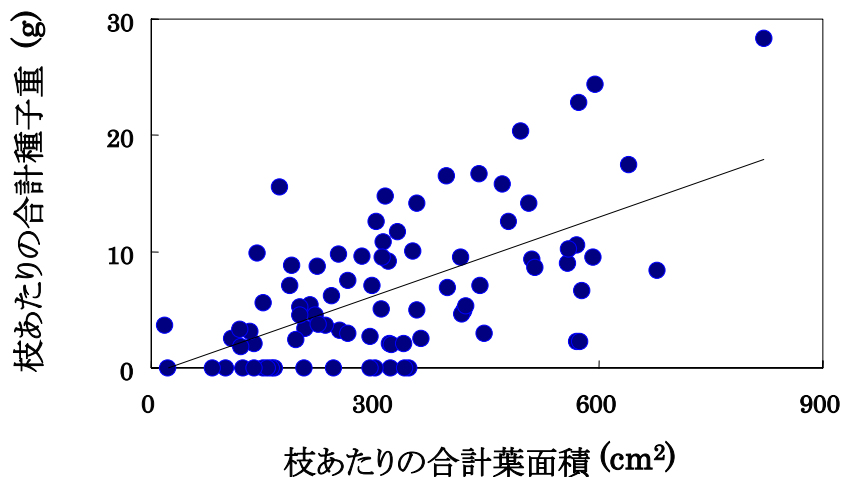


図 7 . 枝あたりの葉の量と種子生産量 (各種の操作実験を含む)

一斉開花に必要な炭水化物資源のうち、数週間という短期間のイベントである開花には樹体内資源が、そして数ヶ月に及ぶ長期の種子の成熟に必要な資源は、大半がその年の葉の光合成生産物によって賄われていることが分かった。主要な炭素供給源と考えられてい

たフタバガキの羽根は、光合成器官としての役割は小さく、むしろ光合成に必要な窒素やクロロフィルの量を減らして捕食者から回避している可能性が示唆された。一方、一斉開花に必要な栄養塩については、特にリンの樹体内資源への依存度が高かった。一般に土壤がリン不足だと考えられている熱帯雨林では、樹体内へのリンの蓄積具合が、一斉開花への参加頻度に大きな影響を与えている可能性がある。

D. 一斉開花の進化的要因としての捕食者飽食仮説

一斉開花現象の適応的意義を説明する有力な仮説の一つに、凶作時に種子食者の個体数を減少させ、逆に豊作年に種子食者を飽食させることでより多くの種子を次世代に残すとする捕食者飽食仮説がある。この仮説は、従来単一の個体群と少数の種特異性の高い種子食者の関係として解析されてきたが、一斉開花に見られるような異なった複数樹種間での同調を説明するには、一斉開花に参加する樹木に共通する優占的な種子食者が存在し、

実際に年次変動の大きな種子生産によって、この捕食者に飽食効果が生じていることを確認する必要がある。また、種子食者相が種子の散布前後で大きく異なることが多くの樹木で報告されており、散布前は主に昆虫、散布後はげっ歯類などの哺乳類が主要な種子食者となることが多い。そこで本研究では、この森の優占種であるフタバガキ科樹木を対象に、種子散布前後の两段階において、(1) 種子食者の特定とその食性幅の解明、(2) 捕食者飽食仮説の検証、を目的に野外調査を行った。

散布前捕食者については、シードトラップを合計 145 個設置し、半月に一度、または週に一度落下した種子を回収し、それを食べている昆虫を同定した。シードトラップは、開花・結実木の林冠下にも追加設置し、必要があれば林床に落下したばかりの新しい種子も林床で採集した。採集した種子及びトラップの内容物は実験室に持ち帰り、フタバガキ種子を選別後、そのサイズ・個数を計測し、プラスチック容器に入れて乾燥に注意しながら 3 ヶ月間飼育した。飼育期間中、全ての容器を週に一度チェックし、羽化してきた成虫昆虫は全て標本にした。飼育終了後、種子を全て割り、虫害・発芽・残存昆虫・動物害の有無を確認した。昆虫の同定は複数の専門家をお願いした。

Dipterocarpus, *Dryobalanops*, そして *Shorea* のフタバガキ科 3 属 24 種の種子から、ゾウムシ、キクイムシ、小型のガを含む合計 51 種 (11 科) の種子食昆虫が出現し、うち約 35% は未記載種であった。種子食昆虫の科毎の割合を種数で見ると、1996 年、1998 年ともよく似た傾向を示しているものの、個体数で見ると、両年では出現個体数の割合に大きな差が認められた (図 8)。また、熱帯林では植食昆虫の種特異性は高いと考えられてきたが、多くのフタバガキ種子食昆虫が複数の属にまたがる種子を餌として利用することが分かり、その食性幅は比較的広く、またその範囲は互いに重なり合っていた。調査地における一斉開花の規模は、1998 年より 2001 年の方が大きかったが、虫害率は多くの種で 1998 年の方が有意に高かった。また、各年の虫害率全体を比較しても、一斉開花の規模が小さかった 1998 年の方が有意に高く、捕食者飽食仮説を支持する結果であった (表 1)。

散布後の捕食者としての小哺乳類相を明らかにするため、畀かごをプロットの合計 48 個設置し、年に 2~4 回記号放逐法による調査を行った。また、実生の生残率に与える種子食

者の影響を明らかにするため、フタバガキ科の1種、*Dipterocarpus tempehes* を材料に、種子散布後から実生定着までの約4ヶ月間、実生の調査を定期的に行い、その死亡要因を特定した(1997年と1998年)。

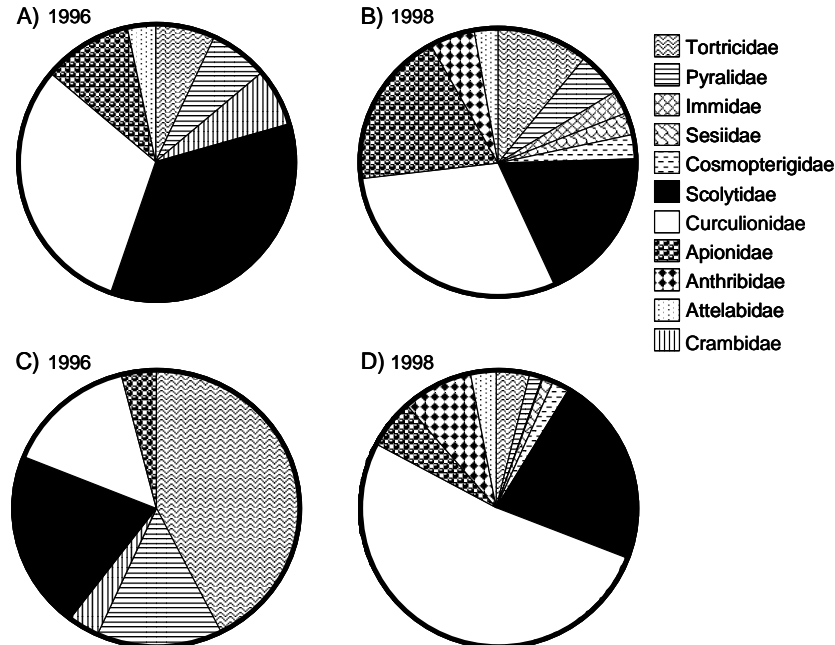


図8. 1996年と1998年に出現したフタバガキ科種子食昆虫の科毎の割合。A, B; 種数による内訳
C, D; 個体数による内訳

表1. 1998年と2001年におけるフタバガキ科種子の虫害率の比較(%)

Plant species	2001	1998 ^a
<i>Dipterocarpus crinitus</i>	5.9	40.9 ****
<i>Dipterocarpus globosus</i>	78.4	84.1 n.s.
<i>Dipterocarpus palembanicus</i>	44.1	85.9 ****
<i>Dipterocarpus pachyphyllus</i>	32.4	62.3 ****
<i>Dipterocarpus tempehes</i>	35.3 ***	28.0
<i>Dryobalanops aromatica</i>	19.7	77.9 ****
<i>Dryobalanops lanceolata</i>	17.1	59.8 ****
<i>Shorea laxa</i>	18.2 **	6.3
<i>Shorea smithiana</i>	27.6	45.7 *

a 1998年全体の虫害率は2001年のものより有意に高かった (Mann-Whitney's U-test, $P < 0.05$)

種内における年次比較でも1998年の虫害率の方が有意に高いものが多い (*; $P < 0.05$, **; $P < 0.01$, ***; $P < 0.001$, ****; $P < 0.0001$, n.s.; not significant)。

これまでに、ツパイ、リス、ネズミを含む合計3科13種の小哺乳類を捕獲した。畾かご内に仕掛けたバナナや紅芋は高い頻度で食害を受けていた。また共同研究者によるネズミの飼育実験により、これらの小哺乳類はフタバガキ科の種子も含めかなりの広食性であると考えられた。小哺乳類全体で見ると、その個体群動態は一斉開花が起こった前後で増減していることが分かった(図9)。 *Dipterocarpus tempehes* の種子生産量は1997年より1998年の方が大きかったが、種子から実生定着までの約4ヶ月間の生残率は、1998年の方が有

意に高く、捕食者飽食仮説を支持する結果となった。

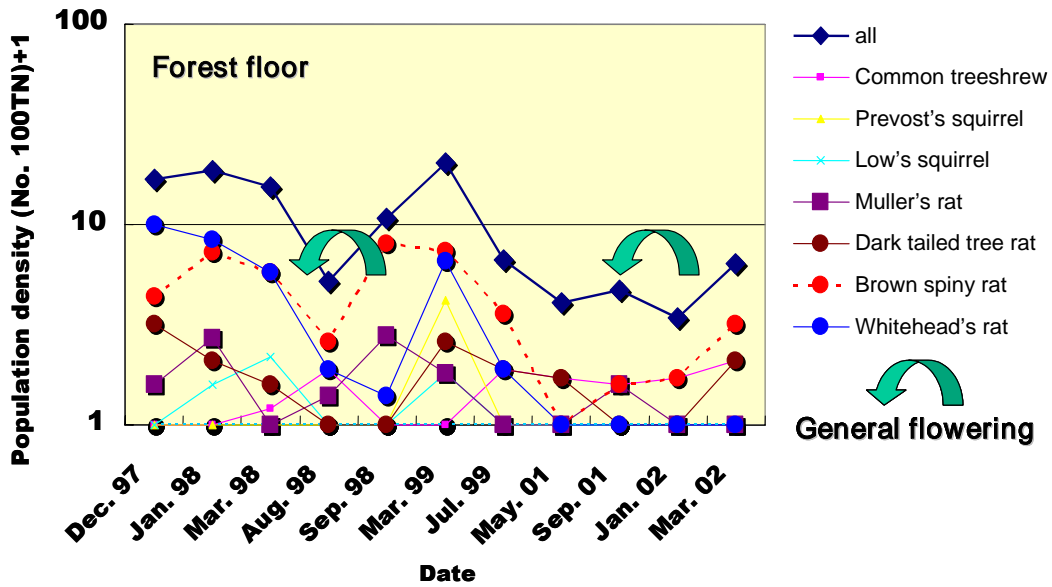


図9. 1997年12月から2002年3月までの小ほ乳類の個体群動態

E. 送粉促進仮説

多種・多数の樹木が開花することによって、移住や個体群の成長による送粉者の増加、花以外の資源から花への食物シフトなどによって動物群集の送粉能力が高まると考えるのがこの仮説である。開花フェノロジーの観測データのなかから、その中で約1/3を占めるフタバガキだけを分析の対象とした。フタバガキの個体あたり開花回数をその年の開花規模と定義した。開花が認められた場合に、5段階評価のうち上2つのランク（林冠の半分以上を覆うような状態）以上の結実をしたものを結実が成功したと考え、開花のうちどのくらいが結実に成功したか、その割合を計算した。

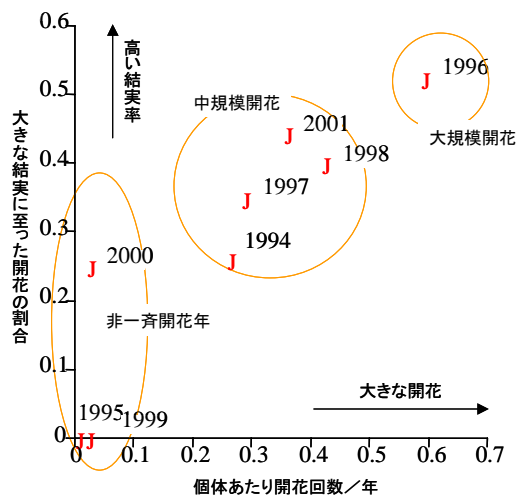


図10. 一斉開花の規模と結実率

結実規模には一斉開花の規模（その年のフタバガキ全体の開花規模）と、その開花自体（その個体自身の開花規模）の2変数が影響を与えていると考えて、この2つを説明変数

として重回帰分析を行い、2変数の有意性を検定した。その結果、一斉開花の規模と結実率のあいだには、正の相関が認められた(図10)。また、個々の開花の規模($P = 0.0001$)とフタバガキ全体の開花規模($P = 0.0006$)の2変数とも結実規模と有意な相関があり、送粉促進仮説を支持する。

F. 遺伝子流動促進仮説

Dipterocarpus tempehes (フタバガキ科)は開花頻度が高く、大規模な一斉開花と小規模な一斉開花の両方に参加するため、一斉開花が送粉成功に与える影響を調べるのに好適な材料である。*D. tempehes*の送粉者は大規模な一斉開花時にはオオミツバチ、小規模な一斉開花時には蛾と交替することが知られている。そこで、本研究では、大規模および小規模な一斉開花時の*D. tempehes*の花粉散布パターンと成木の遺伝構造を調べることで、a)大規模な一斉開花時に花粉散布が促進されるか、2)大規模な一斉開花時に近親交配を避けているか、を検討した。ランビル丘陵国立公園で、70haの調査範囲内の*D. tempehes*成木(胸高直径50cm以上)273本の位置を測るとともに、幹の形成層からDNAを採集した。そのうち3本の成木の樹冠下から、1996年(大規模一斉開花)と1998年(小規模一斉開花)に発生した2年生実生(各年147本と187本)の葉のDNAを採集した。これらの成木・実生のDNAを、マイクロサテライト6座についてジェノタイピングを決定した。上に樹冠を持つ樹を実生の母と仮定した上で、ジェノタイピングエラー1%を考慮した最尤法(Marshall et al. 1998)により、信頼度80%で実生の父を推定した。成木間の血縁度をQueller & Goodnight (1989)の方法で測り、サブ個体群の中と間で比較した。他家受粉によって生じた実生のうち母樹を共有する実生群内の平均血縁度を測定して近親交配の指数とし、年間で比較した。

まず成木の遺伝構造を解析した結果、集団は空間的に離れた4つのサブ個体群に分かれており、サブ個体群間の血縁度はサブ個体群内よりも低く、遺伝的な血縁個体によってサブ個体群が形成されていることがわかった。さらに、大規模および小規模一斉開花に由来する実生のそれぞれ89および85%が、信頼度80%で父親が決定された。他家受粉率は、それぞれ0.088、0.044だったが有意な差ではなかった($p = 0.31$)。両年ともに、サブ個体群内からの花粉散布が多いものの、尾根を超えたサブ個体群間の花粉散布もかなりの水準で生じていた(1996年の花粉散布パターンを図11に示す)。花粉散布距離はそれぞれ、 217.5 ± 174.9 m(平均 \pm SD)、 182.5 ± 173.9 mで大規模一斉開花時に大きい傾向があった(Fig. 3, $p = 0.10$)。両年の花粉散布パターンの最も大きな違いはサブ個体群間の花粉散布の割合で、大規模一斉開花時(0.438)に小規模時(0.305)よりも有意に($p < 0.05$)に高かった(図12)。また、大規模一斉開花時には、他家受粉に由来する実生の平均血縁度がより低く($p < 0.05$)、遺伝的多様性がより高い傾向($p = 0.06$)があった。

花粉散布パターンや植物の近親交配の程度が開花規模によって異なることは、初めての発見である。このような年間の差が生じた理由として最も可能性が高いのは、送粉者の違いである。蛾は単独性で、ある資源から別の資源へ単純に機会的に移動する。一方、オオミツバチは社会性昆虫で、スカウト・リクルート採餌(質の高い資源を発見したワーカーが他のワ

一カーにそれを伝えて動員し、コロニーレベルで同じ資源を集中的に採餌する性質)を行う。そして、ある資源を採餌するといった巣に帰ってから次の資源に向かう。そのため、次の資源は単に前の資源からの距離ではなく、巣からの距離によって決まる。また、オオミツバチの採餌距離は非常に長い(10数km以上、Dyer & Sheeley 1991)ことが報告されている。このような資源間の間接移動と長い採餌距離によって、大規模一斉開花時に見られた長い花粉散布傾向や高いサブ個体群間散布率を説明できる。

図 11 . *D. tempehes* の成木分布と花粉移動

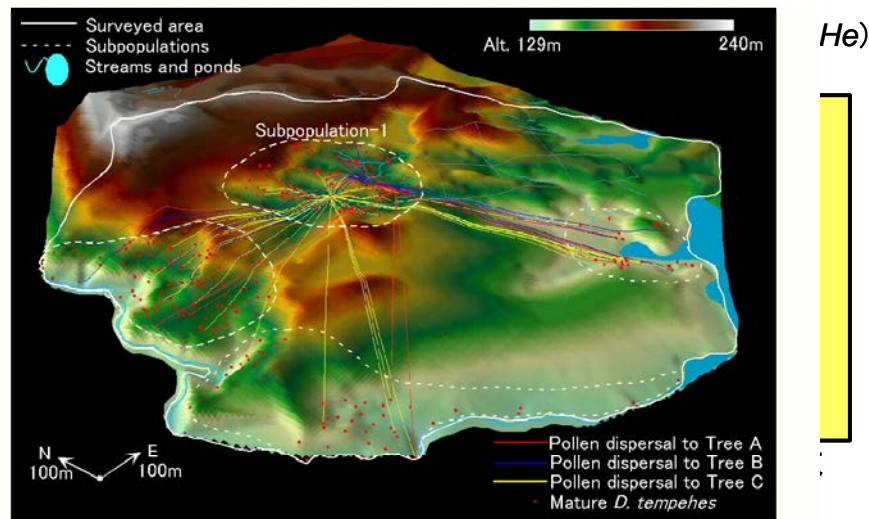


図 12 . 開花規模 (大/小) と実生の遺伝的組成

オオミツバチは移住姓を持ち、大規模な一斉開花時にしか観察されない (Itioka et al. 2001)。したがって群集との開花同調が、*D. tempehes* に効率の良い送粉者であるオオミツバチの利用を可能とさせ、結果として花粉散布を促進して近親交配を緩和した可能性がある。このような、大規模な一斉開花によって送粉者の利用性を高めて花粉散布を促進する効果を、「遺伝子流動促進仮説」として提出する。

G . 一斉開花および気候変動と昆虫群集

一斉開花は、花序・花粉・蜜・果実・種子といった普段は存在しないタイプの資源を突発的にもたらすことによって森林生態系の樹木を起点とする食物連鎖網に大きな影響を与えていることが予想される。一斉開花がもたらす食物連鎖網への影響は、生態系における生物種間相互関係に変化をもたらし、さらに、生物多様性の維持・創出機構や生態系の機能にも密接に関連しているであろう。一方、一斉開花の見られる東南アジア熱帯の中心部においては、気象の超年変動も一斉開花と同様に生物群集に大きな影響をもたらす可能性がある。特に、エルニーニョと関連する乾燥は、樹木の生理状態を大きく左右し、森林生態系の食物連鎖網の構造に強い影響を与えていることが予想される。

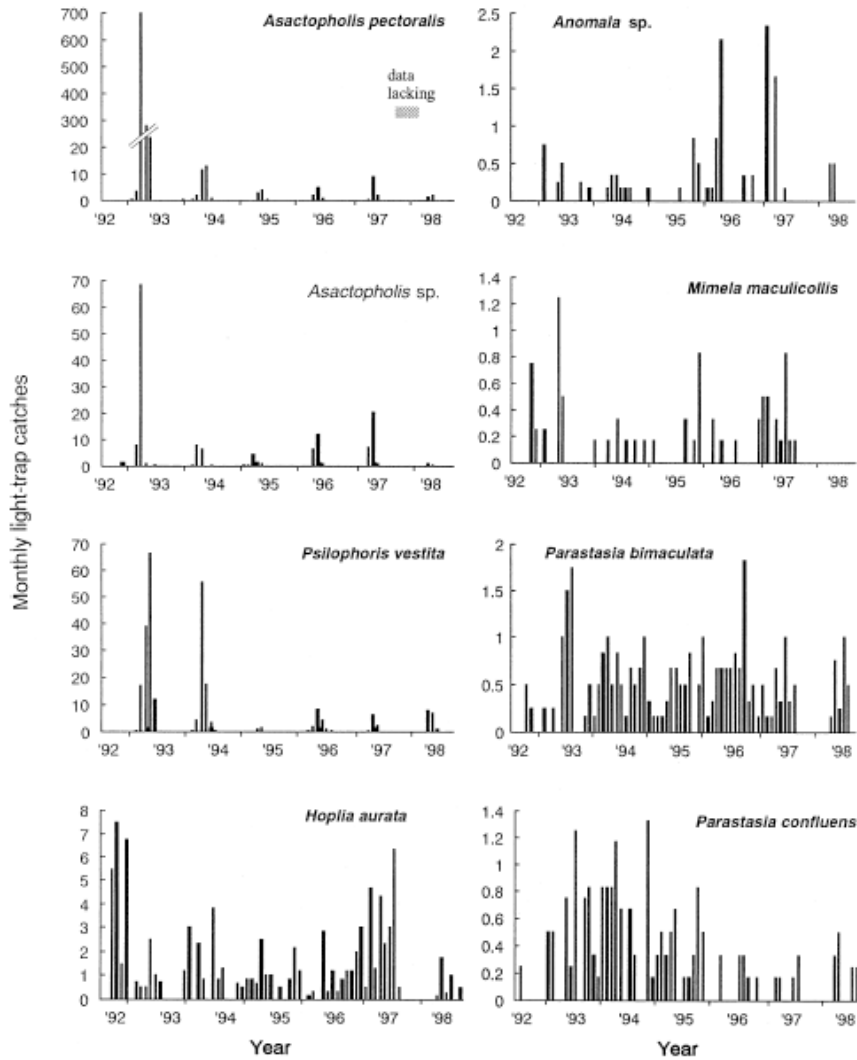
そこで、年中高温多雨で季節性の不明瞭な熱帯地域における、一斉開花や乾燥を始めとする超年気象変動が、生物群集に対してどのような影響を与えているかを明らかにするために、長期にわたって定期的・定量的に昆虫を採集することにより、昆虫群集の時間的変化を追跡した。昆虫類は、森林生態系においてもっとも多様な種分化を遂げた分類群の一つであるとともに、食物連鎖網のあらゆる部分において重要な役割をになっている。定期的定量的によって得られた昆虫類の採集データをもとに、一斉開花や乾燥の発生に関連して、昆虫群集が質的量的にどのような時系列変化を示すのかを明らかにした。また、昆虫類の採餌習性や生態的地位の違いによって、時系列の変化様式にどのような差があるのかを解析した。

1992年8月以来、約7年間にわたって、ボルネオ島にある調査地（マレーシア国サラワク州ランビル・ヒルズ国立公園）の自然林内の一ヶ所において、毎月、新月をはさむ連続する4日間の毎晩、ライトトラップが設置され、これに飛来する夜間飛翔性昆虫がこれまでに数十万点採集されている。この標本を種ごとに整理してその時系列変動を数値化し、1992年、1996年、1997年、1998年に発生した一斉開花の期間とそれ以外の期間における昆虫群集の種構成の変化を解析した。

コガネムシ科の *Anomala* sp. と *Hoplia aurata* は、おもに一斉開花時に開花する植物種に訪花することが観察によって明らかにされている。*Anomala* sp. は花粉食者で数種の樹種を利用しており、一斉開花期に個体数が著しく増加した（図13）。一方、*H. aurata* は一斉開花期にもっとも増えたが、非一斉開花期にも個体数の増減がみられたので、一斉開花期以外にも開花する植物を利用している可能性が考えられた。年中連続的に開花するサトイモ科の植物の花序を特異的に利用する1種を含む、コガネムシ科の *Parastasia* 属2種は年間を通して比較的安定しており、一斉開花に同調した個体数増加も示さず、季節性も示さなかった。花を利用しない大型コガネムシのコフキコガネ族3種は、明瞭な周年的な季節性を示すことが明らかになった。

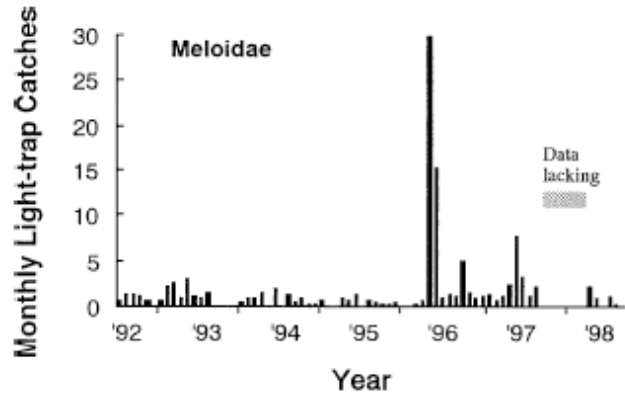
一斉開花期に咲く約17樹種に訪花することが明らかにされ、一斉開花時に咲く樹種にとって重要なジェネラリスト送粉者であると考えられているオオミツバチ *Apis dorsata* の個体数は、一斉開花時期に著しく増加した。ライトトラップの設置によって明らかにされたオオミツバチの増加は、この種が超高木につくる大型巣盤数の調査結果によっても裏付けられた。オオミツバチの移動能力や採餌習性と巣盤の消長を考慮すると、オオミツバチは一斉開花に同調した長距離移動によって採餌・営巣活動をおこなっていることが推測された。一方、同様の採餌習性をもつボルネオミツバチでは、一斉開花期に個体数を増加させるが、一斉開花に同調した移動は観測されなかった。

Fig. 13. 8種のコガネムシ成虫の1992年から1998年までの毎月のライトトラップによる捕獲量の変化。



寄生者や捕食者など送粉者以外の昆虫数種の個体群変動も明らかにされた（図 14）。ハキリバチやミツバチに寄生することが知られているツチハンミョウ科 6 種の個体数は、一斉開花気に急激に個体数が増加した。この増加は、寄主であるハキリバチをはじめとするハナバチが一斉開花にともなって増加することに起因するものと考えられた。一方、広食性捕食者であるヤミスズメバチ *Provespa* 属（膜翅目）2 種の個体数は、一斉開花に伴う変化を示さなかった。

Fig. 14. ツチハンミョウ科成虫の 1992 年から 1998 年までの毎月のライトトラップの捕獲量の変化。



ほとんどの種類が食葉性である鱗翅目昆虫類全体の成虫および幼虫の存在量は、1998年始めの3ヶ月に発生した大乾燥の終了直後に劇的な増加を示した(図 15)。乾燥の終了とともに、鱗翅目昆虫の餌として好適であると考えられる新葉が多くの樹種で一斉に展葉したこと、新葉に対する鱗翅目の幼虫の食害量が増加していることから、乾燥の発生によって群集レベルで斉一化した展葉フェノロジーが鱗翅目昆虫の大発生をもたらした可能性が示唆された。

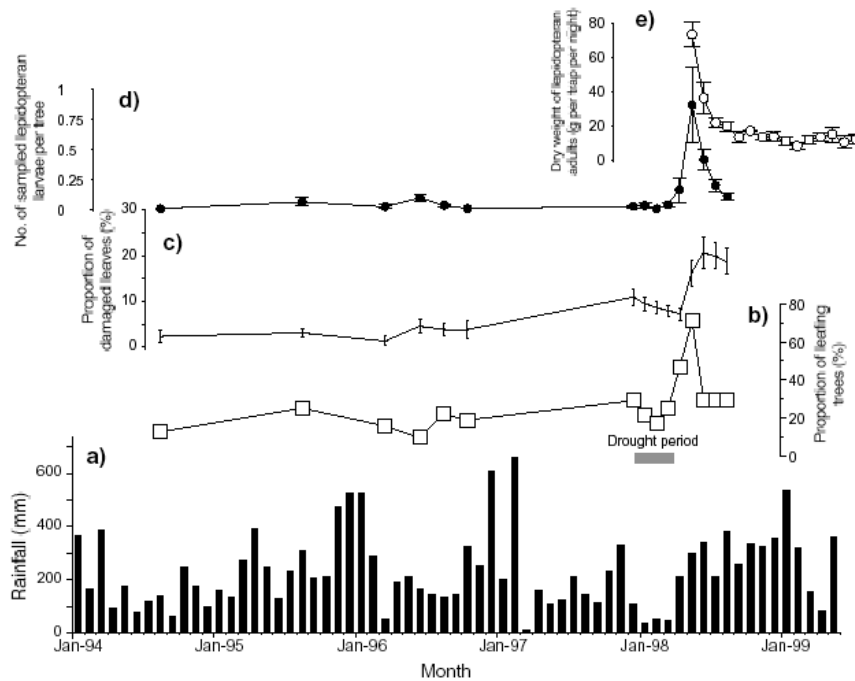


Fig. 15. 乾燥直後の樹木の斉展葉に同調した鱗翅目昆虫の増加。1994年から1999年にかけての、a) 月別降水量、b) 新葉を展開中の林冠構成木の割合、c) 食害を受けた葉の割合、d) 鱗翅目幼虫の密度、e) ライトトラップに捕獲された全鱗翅目昆虫の乾燥重量。

以上に示した結果から、気象変動が比較的小さく、その季節性の弱い熱帯雨林地帯においても、乾燥後の斉展葉や斉開花といった数年以上の間隔をもって突発的に発生する年次を超えた気象変動にともなう植物の生理反応によって、植物を起点とする森林生態系の生物群集の構成が大きく変動することが明らかになった。また、分類群、採餌習性、生態的地位などの違いによって、生物群集を構成する各種の生物が、そうした環境変動から

受ける影響は一樣ではなく、そのことが生物多様性の維持・創出に大きな役割を果たしている可能性が示唆された。

(2)研究成果の今後期待される効果

A. 一斉開花のメカニズムについて

ランビル国立公園での観測結果は、一斉開花の引き金は低温だと考えるよりも乾燥であると考えた方が理解しやすい。このプロジェクトの開始前は低温仮説がほぼ定説になっていたことを考えると、長期間の精度のよい観測によって乾燥仮説の状況証拠がでてきた意義は大きい。また、広域の気候変動の解析により、気象トリガーの起こりうる周期、同調的な開花のおこる地理的範囲などに関する示唆が得られた。一方、樹木の生理としても、貯蔵物質としての栄養塩類の重要性が示唆された。これらの解明により、一斉開花のメカニズムに関する問題点が整理され、より絞り込んだいくつかの仮説をもつに至った。

<乾燥仮説に残されている課題>

乾燥仮説をさらに検討するために、他の調査地での開花と降水量の関係を調べる必要がある。とくに、気候変動の解析で同調的な変動をする地域が明らかとなったので、それらの地域での解析が重要である。

一方、乾燥が花芽形成を誘導する生理的メカニズムの考慮も重要である。乾燥と低温のタイミングを開花の開始と比べてみると、低温は開花の3-4ヶ月前に起きているのに対し乾燥は開花の開始直前に見られる。図2では降水量は30日の累積なので、乾燥のピークは実際の乾燥時期の終わりをとらえていることにはなるものの、乾燥状態がはじまって一ヶ月ほどで開花にいたるには、急速に花芽を形成し成長させる必要がある。可能な説明の1つは、弱い乾燥でも花芽は形成されているのだが、強い乾燥に至らない場合花芽の成長は中断され開花に至らない、というものである。開花（乾燥）を予測するのは難しいが、定期的に花芽をサンプリングし花芽の形成時期を特定することを試み始めている。

<開花・結実の規模や繁殖成功に関する問題>

開花・結実の規模に関しては、樹体内の栄養塩蓄積量が関係する可能性がある。フェノロジーと同時に樹体内の栄養塩モニタリングを継続し、開花や結実の規模との対応関係を見る必要がある。

また、開花の引き金となる環境要因は開花の同調を可能にするばかりでなく、ある程度の環境の予測をもたらす。たとえば、サクラの開花条件として知られる積算温度は、開花後果実を成熟させるのに適した温暖な気候がこれから一定期間続くことを示している。一斉開花の引き金が乾燥状態だとしたとき、これがどの程度未来の環境について教えてくれるのだろうか？もし、乾燥後は一定期間晴天が続く可能性が高いのならば、開花しても花粉を媒介する動物の活動も活発で光合成量も増えるだろうから繁殖に適しているといえるだろう。あるいは、その乾燥の後2-3ヶ月後に雨の多い日が続くならば、休眠性がない種子の実生の定着率が高くなるので種子散布に好条件である。降水パターンの周期性を生態的

な視点から分析することは、一斉開花の究極要因の検討としても重要である。その意味では、このプロジェクトで一部着手されたように、降水量と低温や日射量などが一連の気象イベントとして時系列的な関連性をもつ可能性について解析を進める必要がある。

<一斉開花はなぜ東南アジアに限られるのか>

一斉開花が東南アジアだけに限られる理由の1つとして、1年周期の季節性が弱い気象環境という理由があげられることがある。中南米の熱帯雨林では、湿潤林であっても群集レベルでははっきりとした1年周期の季節性がある。これは、降水量の変動に一年周期の要素が大きく、多くの植物が降水量の変化に応答して繁殖活動を行っているからだと考えられている。一方、一斉開花が降水量の変動を引き金としているとすると、一般に熱帯雨林で重要だと考えられてきた環境変数がやはりフタバガキ林でも卓越していることになる。同じ環境変数に異なる反応をするから異なるパターンが生まれるのか、それとも環境変数の変動そのものが異なっているのか。一斉開花の進化を考える上で不可避な問いだが、降水量の変動パターンを世界の熱帯で比較した研究はまだない。このプロジェクトにより、東南アジア熱帯は世界の熱帯地域の中でも気候の季節変動がもっとも少ない地域であり、ランビルを含む地域は中でも変動が小さいことが明確になった(図4)。このような変動の大きさの違いによる樹木フェノロジーの違いが今後大きな問題となるだろう。

一方、東南アジア地域の土壌の栄養塩濃度が関係している可能性も指摘されている。このプロジェクトでは樹体内の栄養塩蓄積と開花・結実の関係が明らかとなった。ランビルの土壌は栄養塩の乏しい状況にある。こうした生態系レベルでの栄養塩循環と一斉開花の関係も今後の重要な課題となる。

<開花の予測とその応用>

以上のような研究が進み、一斉開花の予測が可能になると、熱帯林の造林や再生・修復などへの技術的応用が可能になる。現在、熱帯では成長の早い樹木の単一種造林が主流であるが、生物多様性や持続性などの点で問題が大きい。このため自生樹種の造林を志向する動きも出ているが、最大の問題点は苗木の入手が困難なことである。一斉開花および結実によって苗木の計画的生産ができないのである。このプロジェクトでこれまで明らかになった点だけでも、乾燥のモニタリング、樹木の栄養塩モニタリングによって、ある程度大規模な開花・結実を予測できる見込みが出てきたといえる。今後モニタリングを継続することで、この予測性を高める必要がある。

B. 一斉開花の究極要因に関する発展

一斉開花の究極要因として有力といわれていた、捕食者飽食仮説、送粉促進仮説の両方について肯定的な結果を得た。これらの仮説は排他的な関係にはなく、同時に進化的な淘汰圧を生み、一斉開花を維持するメカニズムとして働く可能性がある。しかし、二つの仮説の重要性を定量的評価は今後の課題である。

また、両仮説とも、温帯林のような種多様性の低い森林で知られていたものより、ずっ

と複雑なメカニズムを持っていた。つまり、温帯林で見られるマスティング現象では、少数の優占樹木と種特異的な種子捕食者、あるいは単一個体群の受粉効率の問題として考えられていたのに対して、熱帯では両メカニズムとも、多種対多種のネットワーク構造の上に成り立っていた。したがって、個々の種にとっては温帯よりも一斉開花に対する淘汰圧は低いのではないかと考えられる。一方では、このような複雑なネットワーク構造が種の多様性維持に果たしている役割も重要な課題として残される。また、このプロジェクトによって、新たに、一斉開花が遺伝子流動を促進することが見出され、新たな仮説として提唱できた。

< 捕食者飽食仮説の発展 >

調査を行った全ての種子を食べるような広食性の種子食昆虫はいないものの、2~3の属にまたがる複数の種子を利用する昆虫が多いこと、各種子食昆虫の食性幅がお互いに重なり合うこと、年によって優占的な種子食昆虫や出現する種子食昆虫相に差が認められることより、種子散布前の共通捕食者からの回避が、一斉開花の選択圧になっていることを示唆する。実際に結実規模の異なる2年間で虫害率を比較すると、結実規模の小さい年より大きかった年の虫害率の方が低下する傾向があることも分かり、異なる樹種間で同調して開花・結実することで、群集全体として散布前の捕食を回避していることを支持する結果と言え、これまでの捕食者飽食仮説の枠組みを超える発見といえる。しかし、その相互作用系は単純ではなく、個々の個体群にとって選択圧となっているのかについて、さらに継続的な検証を続ける必要がある。

林床での小哺乳類は、広い食性幅をもつこと、一斉開花前に個体群が減少し種子落下後に増加することから、種子散布後段階においても、同調して結実することで共通の種子捕食者を飽食させている可能性が考えられる。事実、*Dipterocarpus tempehes* 個体群では、結実規模の大きかった年に、種子から実生までの生残率が有意に高く、捕食者飽食仮説は支持された結果となったが、1つの個体群しか調査しておらず、多種での同調を説明するためには、他の複数の樹種で同様の調査を行う必要がある。

< 送粉促進仮説の発展 >

この分析により、大きな一斉開花では結実率が高いことが示された。この結果は、送粉促進仮説を支持するものである。今後、どのようなメカニズムによってこのような相関が生まれるのかを明らかにすることが大切であろう。この分析では、種内の開花個体密度の効果と送粉者の活性の効果とを区別できないからである。

ランビル国立公園では、すでに一斉開花時の送粉者を含めた昆虫について、また開花規模による送粉者の違いをもたらす種子の遺伝的な組成の違いについてなど、送粉促進仮説に関わりの深い研究が行われ成果がでてきている。一斉開花をめぐる送粉者と植物の関係はまだその一部が明らかになったにすぎないが、このような詳細な研究を積み重ねることが、送粉促進仮説の重要性や一般性、詳細なメカニズムを検討するもっとも近道だと考えている。

< 遺伝子流動促進仮説の発展 >

一斉開花群集のように送粉条件が大きく変動する群集においては、花粉散布の変動とそれが花粉の質に与える影響を評価することが特に重要である。このプロジェクトでは、フタバガキ科の 1 種について確認できたのみであったが、今後の継続調査と近縁種への調査の拡張によって「遺伝子流動促進仮説」を検証していくことが必要である。また、今回の発見は、オオミツバチという東南アジアに特有の送粉昆虫の存在が重要な意味を持っている。一斉開花をしない南米の熱帯林ではこのような送粉昆虫が存在せず、一斉開花の淘汰圧と関連して、大きなテーマになるだろう。

オオミツバチの個体群維持と空間的移動についても問題である。一斉開花期以外には、オオミツバチは何を資源としてどこで個体群を維持しているのか？この点に関しては、より広域な森林分布や開花フェノロジーの把握などを含めて解明が必要である。

< 一斉開花・環境変動と昆虫群集 >

このプロジェクトによって、一斉開花やエルニーニョなど超年性の環境変動によって、生物群集が大きな影響を受けていることが明確となった。変化の実態に関しても、まだまだ未解明の部分が多く、送粉者、植食者、捕食者など森林生態系の機能で分類した生物群の時間的变化については今後のさらなるデータ採取と、さまざまな気象データとの照合を組み込んだより詳細なデータ解析が必要である。また、これらの群集動態と食物連鎖網あるいは生物間相互作用の構造変化と結びつける作業は、熱帯雨林生態系の維持や保全に重要な示唆を与える研究となるだろう。

< 熱帯林の保全への応用 >

樹木の繁殖過程は、森林の更新や存続に直接影響する。このプロジェクトで明らかになった重要な点のひとつは、この繁殖過程にきわめて多くの動物が複雑に関わっているという点である。熱帯雨林の保全を考える場合には、樹木個体群を考えるだけでなく、送粉昆虫の群集もあわせて維持する必要性が具体的に示された。送粉昆虫群集が失われたり劣化したりすれば、現在の樹木群集も維持できない。また、森林が劣化したり孤立化したりする過程で、種子食動物の捕食回避が働かなくなる可能性も指摘されており、熱帯林の取り扱いが種子捕食者群集に与える影響を明らかにすることは、森林の存続を考える上できわめて重要である。

3.2 林冠動態と炭素水収支

(1) 研究内容及び成果

A. 炭素・水収支の基礎データとしての森林微気象観測

森林における気象要因は、開花結実のトリガーとして、エネルギー・水・炭素循環を算定する基礎資料として極めて重要である。樹高が著しく大きい熱帯雨林における気象要素の林内での鉛直的な分布は未だ十分に明らかではなく、林冠と林床で大きく異なる気象環

境は熱帯林生態系の多様性を支える重要な要素と考えられる。このプロジェクトでは、一般気象要素の観測とともに、気温、湿度、風速、二酸化炭素濃度については、林冠上から林床までの鉛直分布の計測も継続的に実施した。

観測は、林冠クレーンおよびそれから約 540m離れた高さ 60mのツリータワーにおいておこなった。ツリータワーでは 1999 年 1 月より、林冠クレーンでは 2000 年 11 月より観測が開始された。測定項目は、両地点とも雨量、日射量、長波放射量、気温、湿度、風向、風速、地温、土壌水分などである。気温、湿度、風速、二酸化炭素濃度については林冠上から林床までの鉛直分布を計測した。

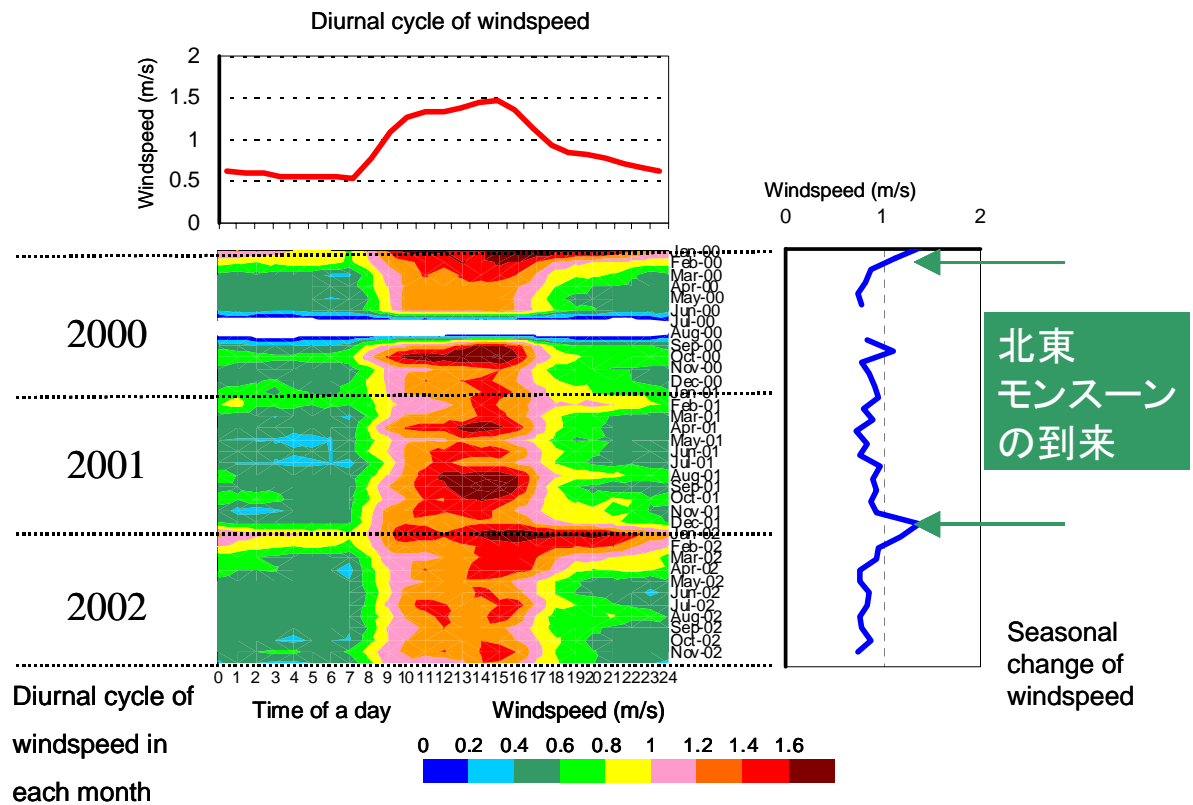


図 16 . 風速の日変化・季節変化

気象は良好に記録されてきた。ここでは、クレーンサイトにおける風速の長期測定結果を示す(図 16)。樹冠上の風速は、12 月から 1 月にかけて生ずる北東モンスーンのと時に比較的強い風が吹くという季節変化と、午後 2 時頃に風速最大となり夜間が弱風であるという一年を通して一定の風速日変化が、明らかとなった。また水蒸気や二酸化炭素の鉛直輸送に関わる乱流特性と対応する風速の鉛直分布については、図 17 に示すような結果が得られた。風速の鉛直分布は大気不安定度によって変化するが、中立状態のときの分布を対数法則で近似すると、粗度長は 1.24m、ゼロ面修正量 46.6m が得られた。粗度長はアマゾンの熱帯林で報告されている値とほぼ同様で、ゼロ面修正量はこの森林の樹高が 50m 以上に達することを反映した数値となっている。そして、一般には上空ほど強い風が吹くが、

著しく風が弱い夜間に、地上 90m や 70m の風速より 60m の風速の方が大きくなるという、林冠上を放射冷却で冷たい気流が流下するという現象が生ずることが検出されている。

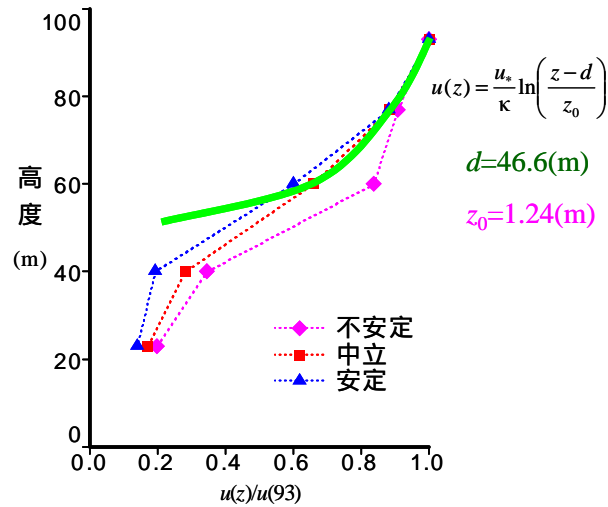


図 17 . 風速の鉛直プロファイル

B. 林分の成長と積み上げ法による炭素収支

ここでは、炭素収支を樹木の成長量の積み上げによる方法で推定するとともに、強い乾燥が炭素収支に与える影響を解明することを目的とする。2000 年 5 月に調査用クレーンを中心に 4 ha (200m × 200m、クレーンプロットと呼ぶ) の永久方形区を設定した。同年 6 ~ 7 月にかけて、プロット内の胸高直径 10cm 以上の樹木全てを対象に毎木調査を行った。2001 年 8 月、2002 年 9 月に同じ場所で再測定した。2 回目以降の測定では、前回記録された個体の生死確認を行うとともに、新たに胸高直径 10cm に達した樹木を新規加入個体として同じ方法で調査個体に加えた。クレーンプロットから南西に約 500m 離れた場所に、もう 1 つの永久方形区(1.38ha、Canopy Biology プロット)が 1993 年 10 月に設置されており、同様の方法で再調査を 1997 年 8 ~ 10 月と 2001 年 7 ~ 8 月に行った。落葉・落枝などのリター量を調べるため、2000 年 9 月に受け口 0.5m² のリタートラップをクレーンプロットに 80 個、Canopy Biology プロットのコア部分に 65 個設置し、毎月 1 回収した。トラップで回収したリターは研究棟に持ち帰り、50 度で 3 日間乾燥させた後重さを 0.01g 単位まで測定した。

地上部現存量の推定には、同じボルネオ島のインドネシア側にある Sebulu 低地フタバガキ林で得られたアロメトリー式を、地下部の推定式にはインドネシア・ガジャマダ大学で得られたアロメトリー式を適用した。得られた現存量に 0.5 を掛けることで、炭素量を得た。純生態系生産(Net Ecosystem Productivity: NEP, 単位は tC ha⁻¹year⁻¹)は、次式で表される。

$$NEP = F + B + S + R + LIT - Rh$$

$$Rh = 0.73 * LIT$$

F ; 葉の年間C増加量、 B ; 枝の年間C増加量、 S ; 幹の年間C増加量、 R ; 根の年間C増加量、 LIT ; リターの年間C投入量、 Rh ; 年間土壌呼吸量

なお、土壌呼吸量は、調査地におけるリターの分解速度が不明なため、アマゾン熱帯雨林において得られた値、0.73を用いて推定した。

表2 クレーンプロットにおける推定される炭素の貯留量(tC ha⁻¹)

	2000 ¹	C to soil in 2000-2001 ⁴	2001 ²	C to soil in 2001-2002 ⁴	2002 ³
Tree foliage	2.90	(0.030)	2.92	(0.042)	2.93
Tree branches	42.01	(0.31)	42.63	(0.53)	42.82
Tree stems	220.82	(1.73)	223.86	(2.85)	224.70
Coarse roots	20.20	(0.19)	20.42	(0.28)	20.47
Whole tree total	285.93	(2.26)	289.84	(3.70)	290.91
Annual litter fall		2.51		2.73	

¹ Census in May to July 2000

² Census in August 2001

³ Census in September 2002

⁴ Carbon inputs to soil from coarse dead trees' detritus in 2000-2001 or 2001-2002

表3 Canopy Biology プロットのコア部分(1.38ha)における炭素の推定貯留量(tC ha⁻¹)

	1993 ¹	Annual C to soil in 1993-1997 ⁴	1997 ²	Annual C to soil in 1997-2001 ⁴	2001 ³
Tree foliage	2.6	(0.011)	2.8	(0.10)	2.6
Tree branches	41.7	(0.097)	44.3	(1.76)	40.1
Tree stems	213.9	(0.56)	226.4	(8.85)	206.1
Coarse roots	18.6	(0.067)	19.6	(0.73)	18.0
Whole tree total	276.9	(0.74)	293.0	(11.44)	266.7
Annual litter fall		NA ⁵		3.31 ⁶	

¹ Census in October to November 1993

² Census in August to October 1997

³ Census in July to August 2001

⁴ Annual Carbon inputs to soil from coarse dead trees' detritus in 1993-1997 or 1997-2001

⁵ No data available

⁶ Value from September 2000 to August 2001 at Canopy Biology Plot

表3 年間炭素収支の推定値(tC ha⁻¹ year⁻¹)

	NEP (tC ha ⁻¹ year ⁻¹)
Crane Plot	
2000-2001	4.85
2001-2002	2.80
Canopy Biology Plot	
Ave. 1993-1997	5.11
Ave. 1997-2001	-12.59

クレーンプロット、及び Canopy Biology プロットにおける各調査年の炭素貯留量、炭素投入量、そしてリター量は、それぞれ表2、3のようになった。これらの結果より、クレーンプロットにおける炭素収支は、2000-2001年が4.85 tC ha⁻¹year⁻¹、2001-2002年が2.80 tC ha⁻¹year⁻¹であり、2年間とも炭素を吸収していることが分かったが(表4)、さらに細かい

スケールで見ると、年現存量変化はプロット内ではばらついていることも明らかとなった。一方で Canopy Biology プロットのコア部分にける炭素収支は、1993-1997 年が平均で $5.11 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ の炭素を吸収していたが、非常に強い乾燥を経験した 1998 年を含む 1997-2001 年の平均では $-12.59 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ となるが (表 3) 枯死材の多くはゆっくり分解されるので短期的な放出量はこれより少ない。

C. フラックス観測による炭素収支

東南アジア熱帯林は全熱帯林の 17% を占めるに過ぎないが、森林消失速度とその結果生じる大気への CO_2 放出は全熱帯林中で最も大きい。それにも関わらず、東南アジア熱帯林の大気 - 森林間における CO_2 交換過程に関する研究は非常に少ない。海洋性の東南アジア熱帯は、南アメリカや中央アフリカ熱帯とその気候特性が大きく異なる。したがって、ア東南アジア地域に CO_2 交換特性をマゾン熱帯林のもので代用することはできない。このプロジェクトでは、この情報不足を解消するため、ランビル国立公園の熱帯自然林を対象とし乱流変動法による純生態系 CO_2 交換量 (NEE) の 2 年間に渡る長期連続計測を行った。特に、(1) 当該地域のような特に乾季の存在しない湿潤熱帯林での炭素吸収量はどのくらいになるのか? (2) 環境因子の変動が乏しいこのような地域で NEE の変動は何によって支配されているのか? そもそも NEE は変動するのか? (3) 毎木調査による炭素吸収量 (前出; 中川・中静) と乱流変動法によるそれとは一致するのか? を考える。

NEE は、クレーン本体の 60m 高で行われた乱流変動法による樹冠上フラックスと林内大気中の CO_2 濃度プロファイルの時間変動から算出される貯留フラックスの和により得られる。乱流変動法システムは超音波風速計、オープンパス方式の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 変動計、通風乾湿計からなり、クレーン下のコンテナ内に設置されたパソコンで制御されている。サンプリング速度は 10Hz で平均化時間は 30 分であった。座標回転処理、トレンド除去、密度効果補正が行われている。降雨時間中のデータは信頼性が低いので排除されている。林内大気中の CO_2 濃度プロファイルの計測は林内微気象プロットで、樹冠上と林内 6 高度の気温・湿度プロファイル計測が行われた位置で計測された。計測システムは赤外線式 CO_2 濃度計、自動空気サンプリング装置、自動校正装置からなっている。土壌表面から放出される CO_2 フラックス (土壌呼吸) は、2002 年 (DOY 134-137、234-235、341-343) に携帯型赤外線式 CO_2 濃度計に土壌呼吸チャンバーを付けて $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ のプロット中 25 点でマニュアル計測された。

図 18 に標準的な湿潤条件下 (2001 年 DOY 188-200) での樹冠上フラックス、貯留フラックス、NEE の平均日変化を示す。負値は森林による CO_2 吸収を示すことに注意されたい。夜間 NEE (つまり生態系呼吸量) に対する貯留フラックスの寄与は、18~24 時で風が強いため 0~6 時より低い。平均的には夜間 NEE (18~6 時) は樹冠上フラックスと貯留フラックスにほぼ等しく配分された。貯留フラックスが最も大きな負値を示すのは 8~10 時であるが、樹冠上フラックスのそれは 10~12 時であった。これは、夜間の呼吸により樹冠内に貯留された CO_2 が朝に始まる光合成活動で樹冠内に再び吸収されていることを示している。

前述のように本地域は、森林のガス交換に影響を与える環境因子が比較的一定であるが、時に短期間の乾燥を受ける。よって、土壌水分によってフラックスデータを場合分けするのが適当であるように考えられた。ここでは0～50cm土層内の水分量(SWC)を用いて、 $SWC > 125\text{mm}$ を湿潤条件、 $SWC \leq 125\text{mm}$ を乾燥条件とした。乾燥、湿潤条件下のそれぞれの昼間NEEの最大負値は、 -17 、 $-20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。日射と気温は、おそらく雲の影響により湿潤条件下で乾燥条件より比較的低値であった。つまり、乾燥条件下の湿潤条件下に比した低 CO_2 吸収速度は日射や温度の影響ではなく土壌水分の影響を受けたとすることができる。また、大気飽差は土壌水分が小さいときに大きくなっている。よって、低 CO_2 吸収速度は大気飽差の大きさに対応しているとも言える。夜間NEEは湿潤、乾燥条件で違いが見られず、その平均は $5.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。夜間NEEに違いが見られなかった理由は、乾燥、湿潤条件下で夜間の気温に違いが無かったからであろう。

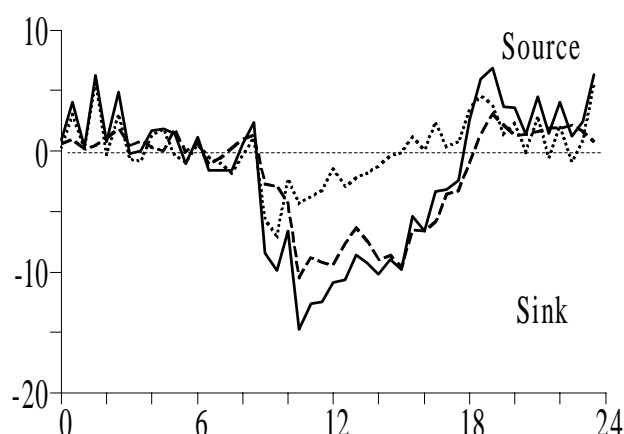


図 18．標準的湿潤条件下(2001年DOY188 - 200)におけるNEE(実線)、樹冠上フラックス(破線)、貯留フラックス(点線)の平均日変化

乾燥、湿潤条件で場合分けして光 - 光合成曲線を非線形回帰分析によりフィッティングさせた結果、以下のようなことが判った(図19)。その結果、乾燥、湿潤条件で光 - 光合成曲線の初期勾配、光補償点には違いが無く、光飽和は乾燥、湿潤条件下のそれぞれで -49.1 ± 9.0 、 -71.7 ± 18.4 (95% 信頼度) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と湿潤条件で高かった。また、昼間生態系呼吸量は乾燥、湿潤条件下のそれぞれで 8.1 ± 1.6 、 9.3 ± 1.8 (95% 信頼度) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

昼間土壌呼吸速度は $5.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から $6.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の間を変動した。土壌呼吸速度は計測期間中に土壌水分にも土中温度にも目立った依存性を示さなかったため、本研究では昼間平均値である $5.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を本地域の昼間土壌呼吸速度として扱うことにした。本研究では地上部バイオマスの呼吸速度を計測していないが、アマゾン熱帯林を対象に開発された既往のモデルから、本地域の地上部バイオマス呼吸速度は $1.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と見積もられた。以上の土壌呼吸速度と地上部バイオマス呼吸速度の和は生態系呼吸量と同等であり、 $7.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と見積もられた。つまり、乱流変動法を主体として見積もられた生態

系呼吸量とチャンパー法を主体として見積もられた生態系呼吸量は比較的近い値を示したと言えよう。

純生態系生産力(NEP; $\text{tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$)は、毎木調査を基本として算定される年間の地上・地下部バイオマスと土壌有機物の年間増加量から従属栄養呼吸を引いたものとして算出される。本研究では従属栄養呼吸は計測されていないので、アマゾン熱帯林で得られた従属栄養呼吸に対する土壌有機物投入量の比を用いて見積もった。その結果、本地域のNEPは、2000～2001年で $4.85 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ 、2001～2002年で $2.80 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ となった(表5)。この2期間のNEPの差(約 $2 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$)は2001～2002年に多くの枯死・倒木があったことから説明できる。

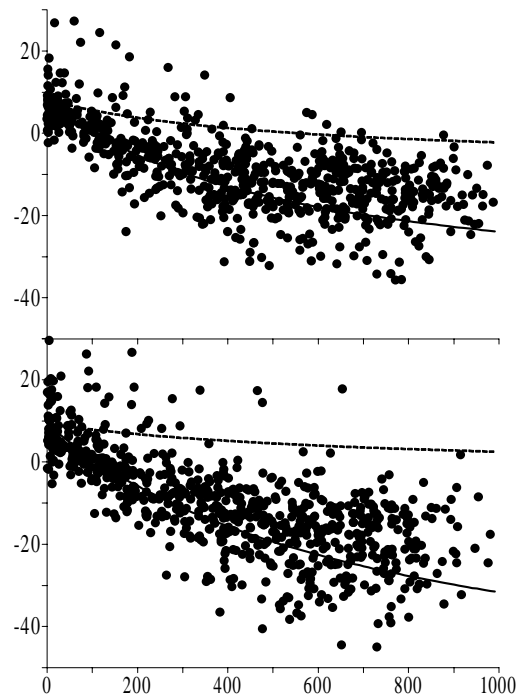


図19. 乾燥(a; $\text{SWC} \leq 125\text{mm}$) 湿潤(b; $\text{SWC} > 125\text{mm}$)条件で場合分けした日射と昼間NEEの関係。図中の線はプロットに対して非線形回帰された光-光合成曲線。実線は飽差が0、破線は飽差が4 kPaの場合を示す。

前出の光-光合成曲線を用いてフラックスデータの欠測部分やその精度に信頼できない部分を埋めて積算した結果、2001～2002年のNEPは $4.83 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ と算定された(表5)。NEPに従属栄養呼吸を加えたものは、純1次生産力(NPP; $\text{tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$)と呼ばれる。毎木調査によるNPPは、2000～2001年、2001～2002年のそれぞれで $8.21 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ 、 $7.50 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ であった。一方、乱流変動法によるNPPは2001～2002年で $9.52 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ と算定された(表4)。

2001～2002年において、チャンパー法を基本とする年間生態系呼吸量は $24.60 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ と見積もられた。一方、乱流変動法を基本とする年間生態系呼吸量は $26.31 \text{ tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$ であった。チャンパー法では地上部バイオマス呼吸速度や夜間の土壌呼吸速度を測っていないといった不確定要素があり、また、乱流変動法では夜間のNEE計測の精度に難があるという点から考えると、両者の値は驚くほど近いと言えよう。総1次生産力(GPP; $\text{tC ha}^{-1}\text{year}^{-1}$)はNEPに年間生態系呼吸量を加えたものである。本研究では、乱

流変動法、毎木調査を基本とする GPP をそれぞれ 31.14、29.11 tC ha⁻¹year⁻¹ と見積もった (表 5)。

本地域の NEE 日変化のピークを湿潤条件、乾燥条件のそれぞれで見ると、アマゾン熱帯林の雨季、乾季のそれぞれに近い値であった。また、群落レベルの最大光合成速度と昼間呼吸速度も湿潤・乾燥条件下の値がそれぞれアマゾン熱帯林の雨季・乾季に対応しているように見えたが、本地域の最大光合成速度と昼間呼吸速度の絶対値はアマゾンのそれよりも大きかった。ここでは、突発的で短い乾燥条件に反応する本地域の森林の CO₂ 交換特性がアマゾンの乾季という定期的かつ長期のイベントに対応しているという点が興味深い。

表 5. 見積もられた年間炭素フラックス (tC ha⁻¹ year⁻¹) R_{ag} : 地上部バイオマス呼吸、 R_{soil} : 土壌呼吸、 R_h : 従属栄養呼吸、 $Reco$: 生態系呼吸量、ND はデータ無し

項目	方法	2000/2001*	2001/2002†
(1) R_{ag}	モデルによる見積	ND	7.22
(2) R_{soil}	チャンバー計測	ND	17.38
(3) R_h	アマゾン熱帯林の既往の成果を利用	3.36	4.69
(4) $Reco$	乱流変動法の計測値とモデルによる見積	ND	26.31
(5) $Reco$	(1)+(2)	ND	24.60
(6) NEP	乱流変動法の計測値とモデルによる見積	ND	4.83
(7) NEP	毎木調査	4.85	2.80
(8) NPP	(6)+(3)	ND	9.52
(9) NPP	毎木調査	8.21	7.50
(10) GPP	(6)+(4)	ND	31.14
(11) GPP	(7)+(4)	ND	29.11

*2000年9月から2001年8月の値
†2001年9月から2002年8月の値

本研究では、乱流変動法を基本とする NEP (4.83 tC ha⁻¹year⁻¹) と毎木調査を基本とする NEP (2.80 tC ha⁻¹year⁻¹) で大きな差が生じた。理由として以下が考えられる。夜間のフラックス計測による NEE 算出は過小評価されやすいと言われている。本研究でも夜間の NEE は昼間生態系呼吸速度と比して低すぎると感じられる。次に、2001~2002 年では倒木や枯死木といった分解に時間のかかる有機物が土壌に多く投入されている。よって、本研究で用いた従属栄養呼吸に対する土壌有機物投入量の比が過大であったことが考えられる。

我々の算出した NEP に 2.80~4.83 tC ha⁻¹year⁻¹ という幅を持たせたとしても、既往の熱帯林の結果 (全てアマゾンで得られた結果) の範囲内に収まるので、熱帯林の NEP とし て典型的な値として見ても良いのだろう。ここで得られた NEP は、冷温帯の森林と比べると明らかに大きい が、温帯林と比べるとほとんど差が無い。しかし我々が得た生態系呼吸量は、冷温帯はもちろん温帯林のそれよりはるかに大きく、アマゾン熱帯林と比べても若干大きい。また、GPP も温帯林の GPP よりはるかに大きく、アマゾン熱帯林と比べても若干大きい。よって、本地域の森林は世界で最も高い総生産力と消費 (呼吸) を持った結果、相殺されて、世界の標準的温帯・熱帯林とほぼ同じ正味の生産力を持つに至ったと考えら

れる。

D. 樹木の生理生態的特性

熱帯雨林の林冠は大きなガス交換の場としての機能が期待されているが、実は林冠部は日常的に強光や乾燥状態にさらされており、樹木の光合成にとって必ずしも快適な環境にあるとはいえない。しかも、樹高が著しく高い熱帯の樹木は、その高い樹高が及ぼす水分通導抵抗の増大と重力ポテンシャルの低下により、樹冠頂部では常に大きな水ストレスを受けていることも予想される。このような強光や水ストレスに対して、フタバガキ科に代表される熱帯雨林の林冠構成樹種はどのように対応しているのか？この研究では、フタバガキ科の巨大高木数種について、その光合成や蒸散特性、水ポテンシャル、葉の形態や化学的組成など様々な角度から調査を行い、林冠構成種の環境への順応メカニズムや樹種特性を解析した。さらに、同じ樹冠内の上部と下部での水ストレスの受け方の違いを調べ、樹冠内での水利用特性の違いや樹種間差異について検討を行った。調査対象樹種としたフタバガキ科樹種は、*Dryobalanops aromatica*, *D. globosus*, *Shorea acuta*, *S. beccariana*, *S. macroptera* の5種で、測定項目は、光-光合成曲線、A-Ci 曲線、葉室素・クロロフィル含量、葉厚、SLA、柵状組織厚・水ポテンシャルである。

5種の飽和光合成速度は、樹種間で差が見られ、*S. beccariana* では $18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に達したが、その他の樹種では $7\sim 15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の値を示した(図 20)。また、葉の窒素濃度と5樹種の飽和光合成速度には正の相関が見られた($r^2=0.46$)。葉の内部構造については、柵状組織厚と飽和光合成速度に強い正の相関が見られた($r^2=0.76$)。特に *S. beccariana* ではこの柵状組織が他の樹種に比べよく発達しており、最大5-7層の柵状組織が観察された。

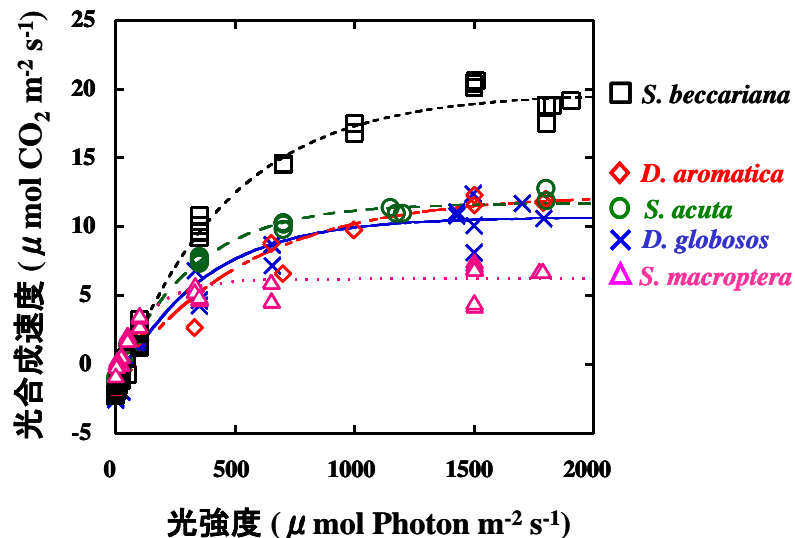


図 20. フタバガキ科 5 種の光-光合成曲線

S. beccariana と *D. aromatica* の樹冠内での水ポテンシャルは、両樹種とも常に樹冠下部よりも上部において低い値を示した(図 21)。気孔コンダクタンスは早朝には樹冠上部・下部ともに同程度

の値を示したが、日射や気温、大気水蒸気飽差の上昇に伴い樹冠の上部では日中、気孔コンダクタンスの低下が起こった。ただし、*D. aromatica* は *S. beccariana* に比べ、気孔コンダクタンスや水ポテンシャルの最大値は低いものの、日中の低下は小さく、一日中比較的安定した値を示した(図 21)。また、日中の水ポテンシャルの低下は、両樹種とも夕方にはほぼ回復し早朝と同程度の値を示した。Fm/Fv(光合成系 II の量子収率)は、特に *S. beccariana* で下部に比べて樹冠上部の日中低下が大きかった。葉厚と SLA は両樹種ともに上部と下部で差がなかった。

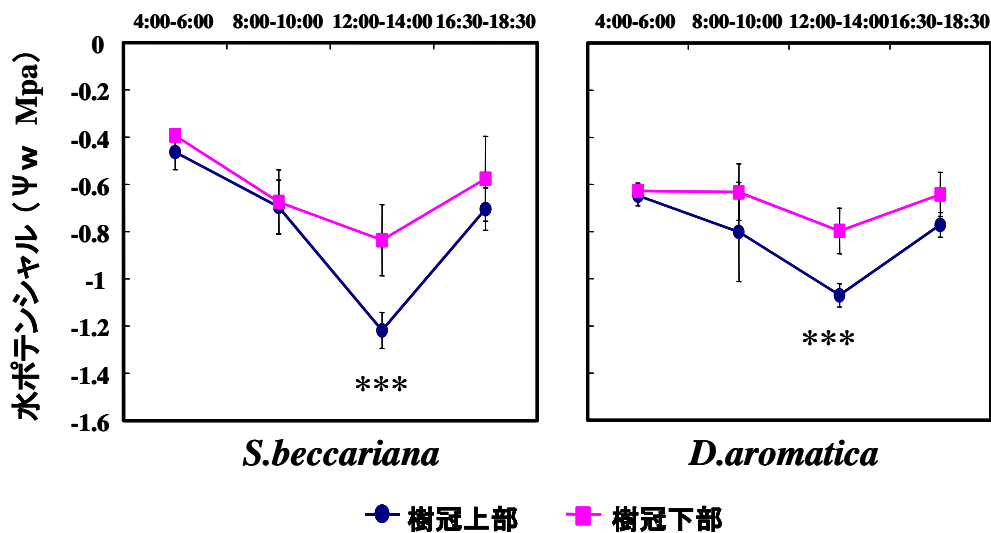


図 21. 水ポテンシャルの日変化

熱帯雨林の林冠構成樹種の光合成能力には大きな種間差があることが分かった。この種間差は、一般に光合成能力と密接な関係にある葉内窒素濃度に起因すると考えられている。しかし、本研究では、飽和光合成速度との間に正の相関関係はあるものの、*S. beccariana* では他の樹種と同程度の窒素濃度でも高い光合成速度を示すなどその関係は弱く、熱帯雨林の林冠で見られる光合成能力の種間差は窒素濃度だけでは説明できないことが分かった。一方、葉の内部で最も活発に光合成を行っている柵状組織の厚さは樹種ごとの飽和光合成速度と非常に高い正の相関関係にあった。特に調査した 5 樹種の中で最も光合成能力の高い *S. beccariana* は最大 5-7 層の驚くほど多層な柵状組織を持っており、多層にすることで葉内での柵状組織の表面積を増大させ、効率よく葉内の CO₂ の拡散を行っていることが考えられた。そして、柵状組織の発達具合が熱帯雨林の林冠木の光合成能力に大きな種間差を生み出している重要な要因であることが示唆された。

樹冠内での水ストレスは、同じ光環境でも樹冠下部よりも上部のほうが大きかった。特に日中は水不足の影響から樹冠上部で下部よりも強い強光阻害を受けていた。それを受けて、下部と比べ上部では気孔を閉じ気味にしていた。しかし、調査した 2 種はいずれも樹冠全体に厚い葉を持つなど、比較的乾燥に強い形態が備わっていることが考えられた。潜在的な光合成能力の高い *S. beccariana* と、前述の 5 樹種の中では平均的な光合成能力を示した *D. aromatica* の比較では、*S. beccariana* が樹冠上部で明瞭な光合成の日中低下を示すのに対し、*D. aromatica* は樹冠全体に気孔を閉じ気味にして一日中安定した光合成生産を行っていることが示唆された。光合成能力の高い葉を持つがストレス耐性能が低く、環境状態の良い時に大きな光合成資源の獲得を行う *S.*

beccariana と、光合成能力は落ちるが、一日中安定した光合成資源の獲得が可能な *D. aromatica* といったように、両者の違いはエネルギー資源の獲得に対する生存戦略の違いを明確に反映している。

E. モデルコラム観測に基づく林内光環境・植物生理活動パラメータ導出

植物を構成する葉・枝・茎は、種に固有な空間的配置により独特な三次元構造を形成し、群落内の光環境を作り出す。さらに光合成に代表される植物生理活動は、この光環境によって大きな影響を受ける。言い換えれば、葉・枝・茎から構成される 1) 林内の空間的構造は、2) 日射環境を規定し、さらに日射環境は、3) 生理・生態機能に影響を与えるといった関係を構築していると言える。これらの因果関係を植物群落の光収支といった観点から明らかにするには、上記3つの状態を正確に把握することがここでの目的となる。さらに、これらの結果を時空間で組み合わせることによって純生産速度や炭素収支といった課題へ展開することが可能となる。ここでのモデルコラム観測は、1) 林冠の三次元計測・2) 日射量・分光反射特性の時間変化計測・3) 葉面積指数・光合成有効放射量の鉛直プロファイル計測から構成される。

三次元構造の計測は、クレーンに垂架されたゴンドラからレーザー光を下方に照射させて行う。水平方向を 0.25 度分解能で走査するレーザープロファイラに対して、ステッピングモータの駆動により垂直方向についても水平方向と同様 0.25 度の高い分解能で走査線移動を行い、面的広がりを持った領域における距離計測を実現する。同時にデジタルカメラと近赤外デジタルカメラによる全景撮影を行う。

植物の光合成速度は、光の強度に応じて変化し、樹種によっても異なる。しかし、強い光が樹冠に照射するとき、葉は吸収しきれない光エネルギーを熱放散し、光合成の日中低下が起こる。一日の光合成量を推定する場合、この現象は無視できない。近年、分光データを用いて光の強弱による葉内の生化学反応を示す指数 (PRI: Photochemical Reflectance Index) が提案されており、この PRI は、強光時に起こる熱放散と強い関係があることが報告されている。そこで、熱帯林の個体レベルでの光合成量推定を目的とし、光強度変化の指標となる日射量、および樹冠の分光放射輝度の連続同期計測を行った。また、取得した分光放射輝度データから PRI を算出し、日射量変化に伴う PRI の変化傾向およびその関係について調べた。計測対象は、ボルネオ島熱帯低地林の優先種であるフタバガキ科の *Dryobalanops aromatica* で、樹高は約 49m である。

一般に、林内の光環境分布は、対象群落の構造と日射エネルギーの垂直分布から表現することができる。対象群落の構造については、1) で得られる三次元構造データと地上地形三次元データとの組み合わせによって詳細な把握が可能である。また、林内の日射エネルギーの垂直分布は、日射の吸収・散乱・透過や日射遮蔽の結果として生じる。これは、種々の溶液中を通過する光の減衰を表す Lambert-Beer の式で表現できることが知られている。計測は、Above Canopy(林冠上)・Below Canopy(林内)・Forest Floor(林床)の3つの異なる状況下で行った。

林冠クレーンでアクセス可能な4Haの領域については、林冠部の三次元構造計測ができた。さらに、同領域の地上部における地形測量もあわせて実施しており、いわゆる林冠表面における三次元構造データと言える DSM(Digital Surface Model)と、地表面の構造をあらわす DEM(Digital Elevation Model)の構築が完了した。

PRI の観測日 (2002 年 9 月 5 日) は、朝からうす雲がかかる程度の快晴で、午前 9 時の日射量は 600 W m^{-2} を越えていた。そのときの PRI は、マイナス値を示していた。時間とともに太陽高度が高くなると、快晴時の日射量は最大で 1200 W m^{-2} 近くまで増え、それに伴って PRI は下がる傾向が見られた。南中時 (地方時で 12 時 30 分頃) の前後 2 時間の午前 10 時 30 分から午後 2 時 30 分の快晴時においては、PRI は約 -0.02 の値が続いていた。一方、太陽に雲が被って日射量が下がると、同時に PRI は大きくなりプラスの値を示していることがわかった。このような傾向は、9 月 4 日および 6 日の観測結果からも同様に見られた。日射量と PRI には、強い負の相関がある (図 22)。また 2 次で近似した式から、PRI が 0 のとき日射量は約 600 W m^{-2} になる。 600 W m^{-2} の日射量は、光合成有効放射量 (PAR) の光強度に換算すると、おおよそ $1200 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 前後になる。計測対象樹木の樹冠部で測定した光-光合成曲線によると、光合成速度は光強度が約 $1200 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で飽和する。今回の対象樹木については、日射量がおおよそ 600 W m^{-2} より大きくなると、強光による熱放散が葉内で起こること一般に、林内の光環境分布は、対象群落の構造と日射エネルギーの垂直分布から表現することができる。

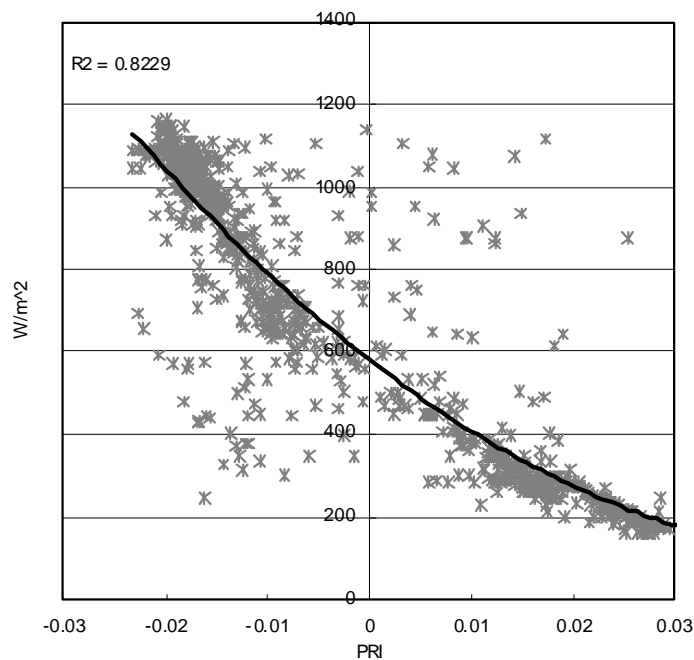


図 22. 日射量と PRI の分布図

林床に近くなるにしたがって LAI の値は大きくなる (図 23)。また、密生した群落では、LAI が 3 ~7、場合によっては 10 を超える場合もあるという経験則と比較しても、本研究の対象が熱帯の巨木である事を加味すれば、得られた成果は十分納得のいくものであると判断できる。Above Canopy と Below Canopy で計測された PAR 値から導き出される相対光強度と LAI の関係は Lambert-Beer の式によくフィットし、吸光係数 0.8635 が求められた (図 24)。一般的に、k は、水平葉で 1.0、傾斜葉で 0.7 程度と言われており、対象群落の葉の形状を考慮した場合、得られた成果は妥当と考えられる。林冠クレーンを利用して得られたこれらのパラメータは炭素・水収支モデルの構築・検証に利用される。

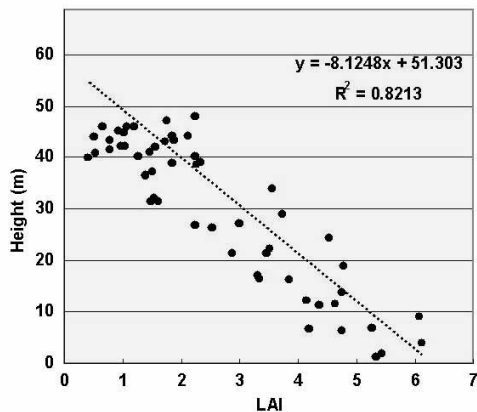


図 23 . 計測点高と LAI の関係

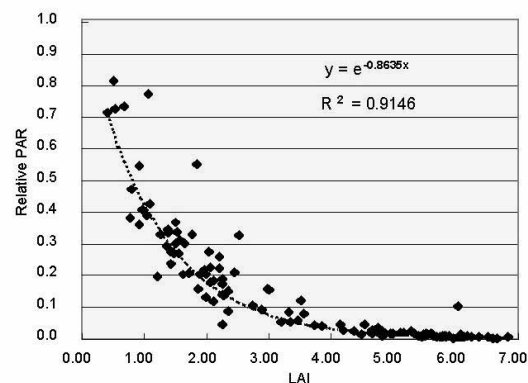


図 24 . 相対光強度と LAI の関係

F. 熱帯雨林の水収支

降水量の大きい熱帯雨林において、森林の蒸発散量がいくらかあるかについて検討する。森林の蒸発散量は、樹冠遮断量、蒸散量、林床蒸発量から構成されるが、林冠が閉鎖した森林では林床からの蒸発は少なく、主に前二者による。本研究では、蒸発散全体は林冠クレーンの地上 60m における乱流変動法による測定、樹冠遮断量は降水量、樹冠通過雨量、樹幹流下量の測定から求める手法をとった。

サラワク・ランビル国立公園のクレーンサイトにおいて、10m × 10m の固定プロットとほぼ 10 回の降雨ごとに場所を変える 10m × 10m の移動プロットを設けた。これらのプロットでは、それぞれ 20 個の貯留式雨量計と 2 個の自記雨量計によって樹冠通過雨量を測定し、樹幹流下量は固定プロットにおいてプロット内にある胸高直径 10cm 以上の全ての木 78 本とプロット外の胸高直径 1 m 以上の木 3 本について計測した。固定プロットにおける 1 年間の計測結果では、降水量 2292mm に対し、樹幹流下量 3.5%、樹冠通過雨量 82%、樹冠遮断量 14.5% であった。下層木である直径 10cm 以下の樹幹流下量は 77% を占め、一雨雨量が 20mm 以下のときに限ると 90% を占める。大きい木の樹幹流下量は一雨雨量が 20mm 以上のときに割合が大きくなる。これまでの樹幹流下量観測例の多くは、胸高直径 10cm 以上を対象に測定されており、下層の細い木の樹幹流下量が多いという結果は、熱帯林における重要な新事実である。

2 . 乱流変動法による蒸発散量計測と土壌水分計測による水収支推定

林冠クレーンの支柱部分の地上 23.5, 38.5, 59.0, 75.5 m にある観測用足場のうち、59.0 m の地点に超音波風速温度計、赤外線 H₂O/CO₂ 変動計を設置し、林冠上の水蒸気フラックスが計測された。2 年間の観測資料より、1) 水蒸気フラックス (蒸発散量) は日々の変動はあるが、大きい季節変化は持たず (図 25) 2) 蒸発散量は土壌水分変化の影響をほとんど受けていなかった。年蒸散量は、953.1mm と見積もられ、年樹冠遮断量 351.9mm を加えると蒸発散量は 1305.0mm となった。これは湿潤熱帯の森林で報告される年蒸発散量の下限值に近い。乱流変動法による測定に特有の過小評価があるとしてこれを補正すると、年蒸

散量、年蒸発散量は 1191.4mm、1543.3mm となる。これらの数値は、湿潤熱帯の森林で報告される年蒸発散量のほぼ上限値である。正味放射量に対する蒸発散量の割合は、年蒸散量 953.1mm とするとき 0.55、1191.4mm とするとき 0.69 で、これらはそれぞれ南米アマゾン流域の森林で報告される乾季における値、乾季雨季の中間の値、に対応するものである。

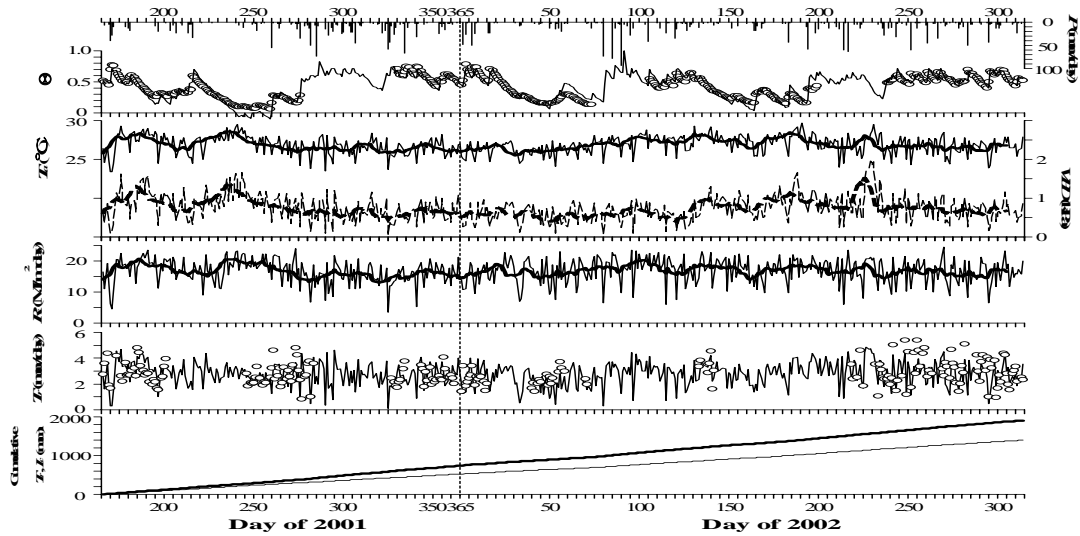


図 25 . ランビル・クレーンサイトにおける 2 年間の水収支各項の推定値。最下段：積算蒸発散量（太線）
積算蒸散量（細線）

G . 炭素・水収支モデル

炭素・水循環モデルを構築した(図 26)。炭素・水循環モデル中のサブモデル(図 26 で、2重線四角で囲まれている項目)は全て観測データにより検証された。炭素・水循環モデルの計算の流れは以下の通りである。

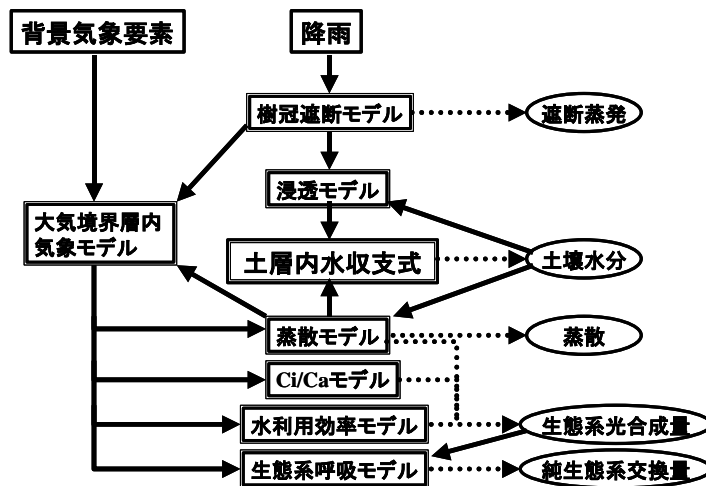


図 26 . 炭素・水循環モデルの構造 . 四角で囲まれた項目は入力、2 重線四角で囲まれた項目はサブモデル、
楕円で囲まれた項目は出力である。

(1) 降雨データが入力される。また、太陽放射等の背景気象要素により大気境界層内の気象

要素が一旦決定される。

- (2) 樹冠遮断、浸透を経て計算土層内の土壌水分が決定される。
- (3) 土壌水分状態からストレス関数を経て、また、大気境界層内の気象要素を変数としながら蒸散が決定される。
- (4) 蒸散も計算土層内の水収支に組み込まれ、結果として再び土壌水分が決定される。
- (5) 樹冠遮断、蒸散により大気へ返った水蒸気や潜熱変換により影響を受けた熱・放射環境により、大気境界層内の気象要素が再計算される。
- (6) (2)へ戻り、出力として土壌水分と大気境界層内気象要素が平衡状態に達するまで繰り返し計算が行われる。平衡状態に達したら次へ進む。
- (7) 大気境界層内気象要素と大気 CO₂ 濃度により水利用効率を決定する。この計算には未知数として C_i / C_a (C_i : 細胞間隙内 CO₂ 濃度、 C_a : 大気中 CO₂ 濃度) が含まれる。 C_i / C_a を決定する方法として、 C_i / C_a を定数で与えてしまう方法 (NR モデル) と C_i / C_a を飽差の関数とする方法 (BB モデル) の 2 つが考えられた。本研究では NR モデルと BB モデルの出力の違いも検討する。
- (8) 水利用効率と蒸散を掛け合わせることで生態系光合成速度を得る。また、これから生態系呼吸速度を引くことで純生態系交換量が得られる。

構築された炭素・水循環モデルは、まず観測期間中の気象データを入力として計算され、やはり観測されたフラックスデータや土壌水分データと出力を比べることでその正当性を確かめられる。

地球変動が炭素・水循環にどのような影響を与えるかを知るためには、“平年の炭素・水循環”と“地球変動条件下の炭素・水循環”を知らねばならない。よって、これらをモデル出力として得るためには“平年の気象要素”と“地球変動条件下の気象要素”が時系列データとして得られる必要がある。しかし、現実の時系列データを得ることは不可能である。そこで、まず、“平年の気象要素”時系列データとしてランビルの近郊にあるミリ空港の 34 年分の長期気象データから気象要素の統計学的特性を抽出した。そして、この統計学的特性に従った乱数発生により気象要素の 1960～1990 年の時系列データを作り出した。これが“平年の気象要素”時系列データとなる。次に、ハドレー気候変動予測センターが地球大循環モデル (GCM) を用いて 1960～1990 年の気象条件に対する 2070～2100 年の気象条件の偏差に関する予報を発表しているので、これとミリ空港気象データを利用して 2070～2100 年の気象要素の統計学的特性を算定した。そしてまた、ここでも乱数発生を用いて 2070～2100 年の気象要素の時系列データを作り出した。これが“地球変動条件下の気象要素”時系列データである。

図 27 は炭素・水循環モデルの計算値と観測値の比較である。土壌水分、蒸散、生態系光合成で良好な再現性を見せている。純生態系交換量で若干再現性が良くないが、それは生態系呼吸のモデル化に難があったためと考えられる。それでも、多くの点が 1:1 直線と平行にプロットされており、純生態系交換量の計算においても本モデルのパフォーマンスは良好であると判定しても差し支えないだろう。

1960～1990 年と 2070～2100 年の炭素・水循環の比較は、モデル計算によって得られた土壌水分変動や蒸発散、流出、CO₂ フラックスといった炭素・水循環要素の確率密度分布や平均値によって行われる。ここでは 1960～1990 年と 2070～2100 年の蒸発散、純生態系交換量、生態系光合成速度の年間平均時系列の比較を紹介する。ハドレーセンターの予測結果によれば、ランビル付近では 1960～1990 年に比べ 2070～2100 年の 12～2 月季は強く乾燥し 9～11 月季でより湿潤になるとされている。また、他の月では変化は無いとされている。

図 28 では、蒸散と蒸発散の積算値の時系列が比較されている。2070～2100 年における降水量

の変化よりも気温の上昇が大気の乾燥を強め、大気側の蒸発要求能を高めた結果、全ての季節で 2070～2100 年は蒸散が増加している。ただし遮断蒸発は目立って増加しないため、蒸発散の変化は蒸散の変化に支配されている。2070～2100 年では、たとえ蒸発散が高まり大気への水蒸気投入量が増えてもなお強い乾燥が続行したことを強調しておきたい。また、降雨が増加するとされる9～11 月季でも、本地域の土壌の特性により降雨は直ちに流出し、水蒸気は蒸発散として大気に戻ることはなかったということも付け加えておく。

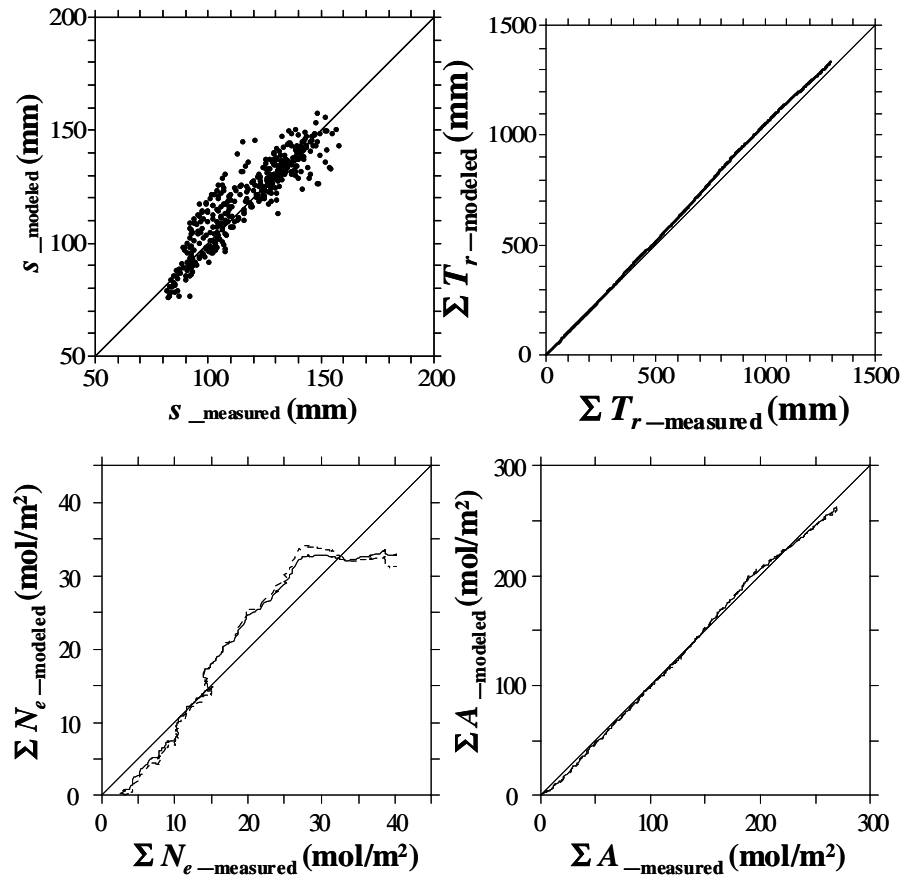


図 27 . 炭素・水循環モデルの計算値（縦軸）と観測値（横軸）の比較。(a) 土壌水分、(b) 蒸散、(c) 純生態系交換量、(d) 生態系光合成量 . シグマは積算値を示す .

図 29 では、BB モデルを利用して計算した純生態系交換量と生態系光合成量の積算値の時系列が比較されている。2070～2100 年は大気中 CO₂ 濃度が 570ppmv に達しており CO₂ 施肥効果で森林の CO₂ 吸収が増加するとも考えられていたが、本研究のシミュレーションでは大気の乾燥が強くなり、水利用効率が下がった結果、2070～2100 年では CO₂ 吸収が下がってしまった。なお、NR モデルを使った場合、この CO₂ 吸収の低下は数倍にも甚だしくなったことを付け加えたい。この理由は、大気の乾燥に対し NR モデルでは Ci/Ca が無反応であるのに対し、BB モデルでは Ci/Ca が低下した結果、水利用効率の低下を抑えるからである。

現在世界中で行われている大気中 CO₂ 濃度増加実験 (FACE) では NR モデル、BB モデルともに良好に CO₂ フラックスを再現しているが、それは FACE で変化したフラックスの大気へのフィードバックを考慮していないからであると考えられる。本研究の結果により、温暖化ガス上昇時の地球変動に対する大気－森林間の CO₂ 交換過程を考えるためには、炭素循環と水循環との相互作用

を考えた上で大気環境への水を媒介とするフィードバックを考慮せねばならないことが明らかになった。

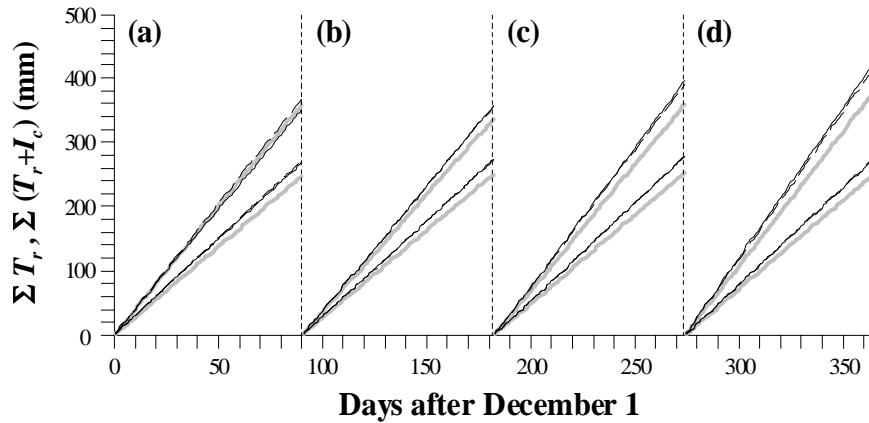


図 28 . 蒸散 (T_r) と蒸発散 ($T_r + I_c$) の積算値の時系列 . 灰色太線は 1960 ~ 1990 年の計算値、細い実線と破線は 2070 ~ 2100 年の計算値である . (a) 12 ~ 2 月、(b) 3 ~ 5 月、(c) 6 ~ 8 月、(d) 9 ~ 11 月

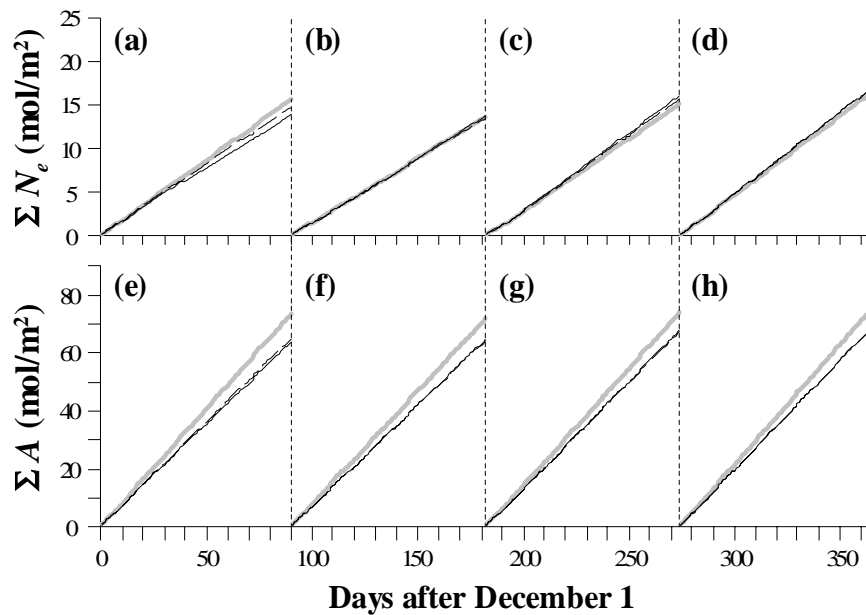


図 29 . B B モデルを利用して計算した純生態系交換量 (N_e ; a ~ d) と生態系光合成量 (A ; e ~ h) の積算値の時系列 . 灰色太線は 1960 ~ 1990 年の計算値、細い実線と破線は 2070 ~ 2100 年の計算値である . (a, e) 12 ~ 2 月、(b, f) 3 ~ 5 月、(c, g) 6 ~ 8 月、(d, h) 9 ~ 11 月

(2) 研究成果の今後期待される効果

このプロジェクトでは、東南アジア熱帯雨林という最大の生物生産ポテンシャルをもつ熱帯地域で、炭素・水収支を推定することができた。とくに、炭素収支に関しては積みあげ法による林分の純生産速度、フラックス測定など複数の方法による推定ができた。また、熱帯林の炭素・水収支のモデルが完成し、気候変動シナリオに沿った予測が可能となった。林冠クレーンはそのモデル化や検証に必要な森林三次元構造およびそれに依存した微気象

および生理活性パラメータの取得に大きく貢献した。熱帯林と大気との相互作用の解明においては、東南アジアが空白地帯となっており、今回の成果は貴重である。一方、今後に残された課題もある。

< 炭素収支研究の発展 >

フラックス観測と積み上げ法による炭素収支の推定値はやや食い違いを見せたが、これは枯死した倒木が分解されるタイムラグなどで説明できる可能性がある。大形リタ - の分解速度や土壌への炭素供給速度などを明らかにすることで、このギャップを埋める必要があるだろう。また、測定を行った森林は、これまで伐採などの人為的影響を受けたことのない原生林であり、地上部現存量はほぼ安定していると考えられるので、長期間の炭素収支は拮抗しているとも考えられる。実際、Canopy Biology プロットではエルニーニョの乾燥により、大量の枯死木が発生し、それが分解される過程で炭素放出が起きている。このような、長時間の変化や広い面積での空間的変動を把握する必要がある。この点に関しては、リモートセンシングを利用した他の森林タイプでの炭素収支の問題も含めて、検討される必要がある（次節参照）。

樹種による樹木の生理活性の重要な違いが明らかになった。今後はフタバガキ科や林冠層の樹木だけでなく、さらに多くの樹種についての光合成や強光阻害などの生理生態情報やその樹種特性などを調べる必要がある。さらに、林冠クレーンの利点を利用して、モデルコラムを考えた計測が行われ、これらの情報を森林全体のレベルに統合する道筋が開けた。これらの様々な情報は、これまで経験的に言われていたものであるが、実証は行われていなかった。本研究で林冠観測クレーンをプラットフォームとし、これら熱帯林の太陽光を基礎としたさまざまな植物活動を把握できたことは、今後の熱帯林冠で起こる諸現象解明に引き続き利用されていくことだろう。また、時間的変動を捕らえるためにも、ここで確立された計測手法・計測機器は、引き続き運用・利用されていくべきであると考えている。また、このプロジェクトで構築された炭素収支モデルにこれらのパラメータをもちいたサブモデルを組み込み、個葉から森林全体へのスケールギャップを埋めて機能モデルに発展させることが重要である。

< 水収支 >

基本的な観測システムが完成し、年間の水収支が推定できたほか、モデルの構築も可能になった。しかし、観測期間は2年間と短く、より長期の変動を明らかにする必要がある。とくに、エルニーニョ期間に対応して生ずるとされる著しく降水量の少ない期間に、蒸発散量がどのように変動するかについて、今後の解明がのぞまれる。少雨期の蒸発散低下は、大気湿度と気孔開閉の関係によって生ずるもの、土壌水分の低下によるもの、水分不足が葉量の減少をもたらす結果として生ずるもの、の3種の要因が考えられる。水分不足の程度によって、それぞれの要因が影響する程度が変わることになる。アマゾン流域とボルネオ島における熱帯林の水収支の差異は、このような時点の反応の差として生ずる可能性があるからである。

3.3 林冠状態の広域把握

(1) 研究内容及び成果

<林冠クレーンによる衛星データの検証>

衛星リモートセンシングで得られる画像データは、地上の分光反射特性が基礎となったデータであるが、地上とセンサの間に存在する大気やセンサ感度むらなどの影響を含む情報であることが知られている。また、定期的に衛星の上空通過と同期した地上の分光反射特性や太陽直達光などのデータ取得を実施し、センサの劣化やデータ処理系などの検証・評価を繰り返しながら運用されている。検証・評価にあたっては、そこを構成する土地被覆やその広がりなどが重要になる。特に、熱帯林地域では、その高い樹高のため、これまでこの種のデータが計測された例は、ほとんどないのが常識であった。しかし、ランビル国立公園の建設された林冠クレーンによって、我々は林冠部からさらに約 40m もの上空からの観察が可能となった。ここでは、ランビル林冠クレーンを衛星データの熱帯林地域における検証サイトとして貢献することを目的として、1) 2 方向性反射計測, 2) 検証サイト全域の分光反射計測, 3) 検証サイト全域の葉面積指数計測の 3 種の計測を実施した。

林冠観測クレーンは、二方向性反射係数 (Bi-directional Reflectance Factor: 以下 BRF と記す) 計測を可能にするプラットフォームである。ゴンドラに計測システムを載せ、対象樹冠上方を半円状に移動しながら、異なるセンサ角度から対象領域を計測する。今回の計測対象樹冠の場合、センサ方位は磁北から 174°、センサ角度は-40°~60°の範囲での 10° 間隔で BRF 計測を行なう。センサと CCD カメラは同じ領域を視準するように円柱パイプに固定されている。アーム下を半円状に移動するゴンドラの各計測位置において、センサ受光部が対象樹冠を正確に視準するよう CCD カメラ映像を確認しながらセンサ受光部を回転して調整する。また、このときのセンサ角度を傾斜計で読み取った。

2001 年 9 月から 2002 年 2 月にかけて観測および蓄積してきた BRF データの中から、太陽高度がほぼ等しいときに計測したデータを選び出し、太陽高度別の BRF データセットを作成した。図 30 に、太陽高度 60° のときに計測した BRF データセットを示す。各 BRF データについて、可視・赤(630-690nm)、および近赤外(760-900nm)の 2 波長域でそれぞれ平均反射係数を算出し、センサ角度 0° (Nadir)の値で正規化した BRF 相対値のセンサ角度変化をグラフに示したものである。

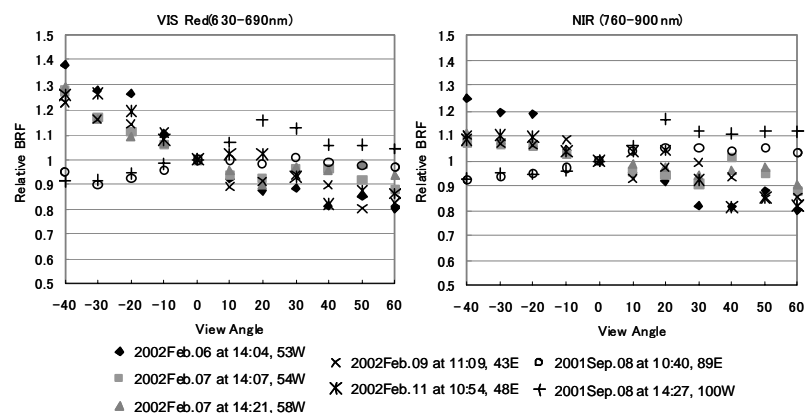


図-30. 可視・近赤外波長域における異なる7つの太陽方位別のBRF相対値

対象樹冠のBRF特性として、センサ方位と太陽方位がほぼ直行するときのBRF相対値(2001Sep.08 10:40,14:27計測)は、センサ角度の違いによるBRF相対値に大きな差は見られず、やや右上がりを示している。一方、太陽方位が直交していないときのBRF相対値(2002Feb.6,7,9,11計測)は、太陽後方視のセンサ角度が深くなるにつれて差が大きくなっている。これらの特性は、可視および近赤外域に共通して見られる。また、異なるセンサ角度においてこのようなBRF相対値にバラつきが見られる理由の一つとして、樹冠に対して異なる方位から太陽が照射することで形成される陰陽領域の割合の違いが関係していると考えられる。

衛星データの検証に用いる分光反射データは、通常、均一でかつ同じ被覆の状態をする広い領域において複数回計測した結果に基づいて算出したものが用いられる。しかし、我々の熱帯林地帯では、均一でかつ同じ被覆の状態のところは、見つけることが不可能である。したがって、本計測では、林冠クレーンでアクセスできる4ha円領域において、規則正しく、かつ均等に分光放射計の計測円が位置するよう分光計測点を図-31に示すように合計90点配置し、各点においてセンサを直下に向けて計測を実施した。本来ならば、計測時間も計測領域全域で同時が望ましいが、ここでは計測時間が短くなるよう計測作業の効率化を図った。

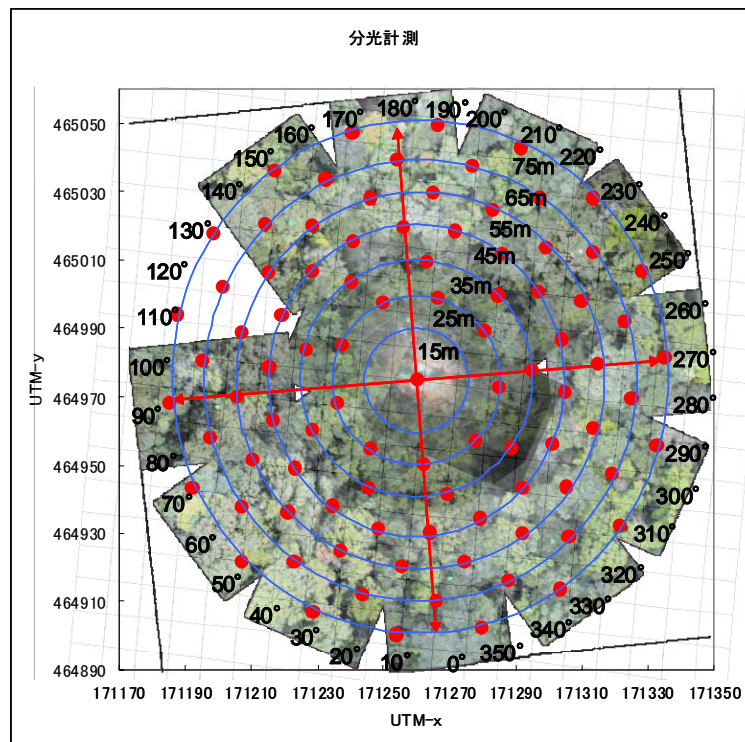


図 31. クレーンサイト全域における分光反射係数計測点(90点)

ランビル国立公園は、ADEOS-II 衛星 GLI (Global Imager) センサの陸圏検証サイトの一つである。GLI センサ検証のためのクレーンサイト全域における分光計測データは、反

射係数算出の基準となる標準白色板および対象林冠領域それぞれの分光放射輝度と、標準白色板に対する対象林冠領域の分光放射輝度の比を取ったものが分光反射係数からなる。図 32 には、ADEOS-II 衛星がランビル国立公園上空を通過する現地時刻 11:00 頃に測定した分光計測データを示す。

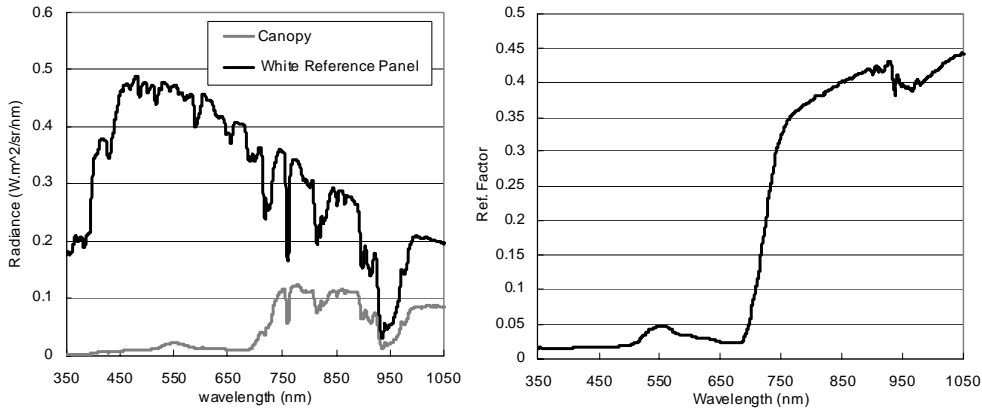


図 32 標準白色板と対象林冠の分光放射輝度（左）および分光反射係数グラフ（右）
（2003 年 9 月 30 日現地時刻 11:00 計測）

さらに、クレーンサイト全域において取得した合計 90 ポイントそれぞれの分光反射データを、GLI センサの Ch.22（可視赤：630-690nm）および Ch.23（近赤外：770-880nm）の波長帯域において平均反射係数を算出し、それらを用いて NDVI を求めた。図 33 には、90 点各々の算出結果から、20m メッシュで内挿した可視赤、近赤外および NDVI の分布図を示す。

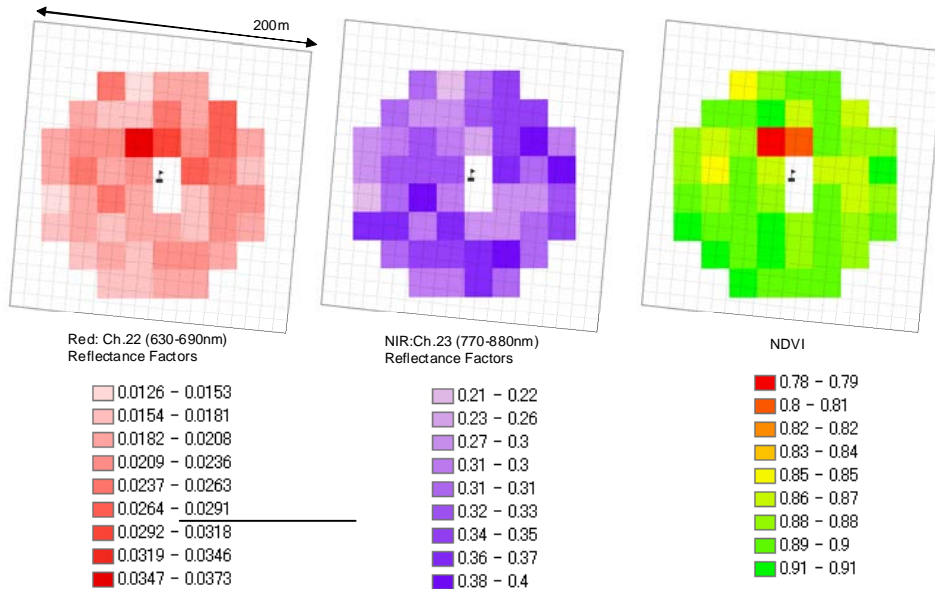


図 33. クレーンサイトにおける 90 点の分光計測データより作成した、
可視赤:630-690nm(左)、近赤外:770-880nm(中)、および NDVI (右) の分布図

葉面積指数計測の基本的な考え方は、全域反射計測と同じ考え方である。計測点は分光反射計測点よりも多く配置させ、およそ各計測点が 10m 間隔に分散するようにした。葉面

積指数計測は、プラントキャノピーアナライザ(Li-cor 社製：LAI2000) を 2 台使い、林冠へ入射する光と樹冠表面からおおよそ 50cm 程度の位置における光を時間同期して測定し行なった。合計 198 点において葉面積指数計測を行なった結果、計測箇所によってまちまちであるが、最小値で 0.77、大きい値では表層部の LAI にも関わらず 3.5~4 の値を示す箇所もいくつか見られた。全体的には、LAI 2.0 を中心に前後 ± 1 を示していた。

<合成開口レーダによる広域バイオマス推定>

森林の二酸化炭素吸収量を見積もるための指標にバイオマスがある。リモートセンシングは広域情報を効率よく得ることができる宇宙技術であるが、とりわけレーダを利用したリモートセンシングに森林バイオマスの計測能力が期待されている。

衛星合成開口レーダ(SAR)はマイクロ波の能動型センサで、マイクロ波を利用するため、雨雲等に左右されない全天候下での観測が可能であり、合成開口技術により光学センサと同等の空間分解能を有する。特に、本研究の研究サイトである熱帯林地域においては、被雲の問題は重要であり、SAR の潜在的利用可能性に期待する部分が多い。SAR が得る情報は、地表散乱体からのマイクロ波の後方散乱強度であり、それは地表物の電気的な性質(特に水分で変化する誘電率)、大きさや凸凹、向きや方向等によって決まる。当該研究で使用する日本の JERS-1 衛星(1992 年~1998 年)に搭載された SAR のマイクロ波の波長は 24 cm(通称 L バンド)で、森林各部の物理的な大きさと比較すると、林冠下へのある程度の電波の透過が期待でき、林冠葉部、林冠枝部、幹部、基部地面部等での各部散乱が全体の散乱に寄与していると考えられる。ここでは、JERS-1 衛星 SAR による熱帯雨林のバイオマス推定等の広域モニタリングを目的とする。

広域バイオスマスマップや経時変化画像の作成手法は次の手順を踏む。

- (1) SAR 信号データの画像化、
- (2) 信号強度の各種補正(信号強度絶対値変換、斜面補正、正射補正)およびマッピング、
- (3) 信号強度からバイオマスへの変換推定
- (4) 時系列データの重ねあわせによる経時変化画像作成

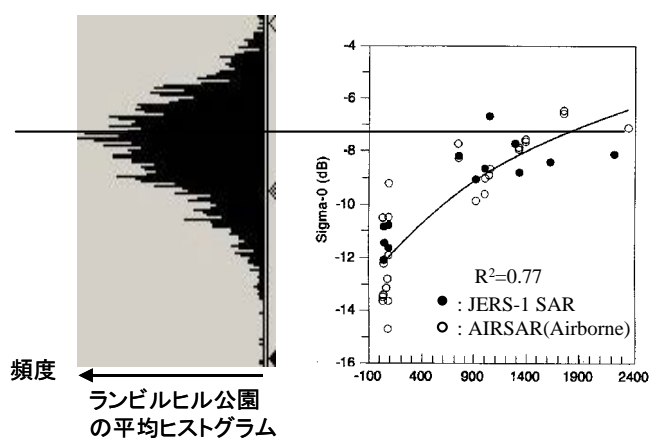


図 34 . 合成開口レーダ後方散乱とバイオマスの関係

手順(2)では地形高度情報が必要となるので、地形図から作成した 50m 間隔の数値地形モデル(DEM)を参照した。手順(3)では、信号強度 - バイオマスとの関係式が必要となるので、既存の文献に記述された関係式を参照した。

ランビル国立公園では、ほとんどの場所で信号強度が -7.70 (dB)以上となり、Luckman et al. (1998)がアマゾンの熱帯雨林を対象に求めたバイオマスとの関係式を適用できなかった。一方、Paloscia et al. (1999)がイタリアの Tuscany 地方の森林を対象に求めた関係式を適用すると、バイオマスとして 2100 ± 1400 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)となり、現実的な値ではない(図 34)。また、SAR に特有の地形に起因する歪み補正を実施したが、顕著な効果は得られなかった。経時変化画像にはオイルパームの変化(特に更新期)が顕著に現れた。

(2) 研究成果の今後期待される効果

BRF 計測結果からは、太陽入射角と樹冠の 3 次元構造に起因する陰影領域の変化により、異なるセンサ角度から計測される反射係数の特性が把握できた。このことから、クレーンサイトにおける林冠 3 次元構造データを用いた林冠面の分光反射シミュレーションが可能となる。今後も、衛星通過と同期した分光計測を継続して実施し、分光反射特性と葉面積指数や PAR などの植生パラメータとの関係を導き出し、広域推定への展開を図っていく。

合成開口レーダから得られたバイオマス 2100 ± 1400 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)は推定式を外挿したものであり、解釈には検討が必要である。地形補正については、テストに使用した富士山麓では効果が確認されており、DEM の精度が向上すれば補正効果が期待できる可能性が有る。一方、DEM よりも表面高度モデル(SEM)を参照すべき可能性もあり、検討課題として残る。経時変化画像には、経年変化だけでなく、季節変化が含まれており、解釈は複雑である。これらは、今後さらに、地上レベルで計測された各種パラメータとの突き合せ等により、より高度化が図られていくものと期待できる。

4. 研究実施体制

(1) 体制

研究代表者（総括）：浅野 透（総合地球環境学研究所）
一斉開花と生物相互作用：グループ統括・二宮生夫（愛媛大学・農学部） 環境変動と一斉開花：安成哲三（名古屋大学・地球水循環研究センター） 一斉開花の生理生態メカニズム：二宮生夫（愛媛大学・農学部） 一斉開花と栄養塩ダイナミクス：北山兼弘（京大大学生態学研究センター） 一斉開花と植物食動物の多様性：市岡孝朗（名古屋大学・生命農学研究科）
林冠動態と炭素水収支：グループ統括・浅野 透（総合地球環境学研究所） 攪乱と更新モザイク：浅野 透（総合地球環境学研究所） 林冠と大気的气体交換：鈴木雅一（東京大学・農学生命研究科） 林冠における生態プロセス：小池孝良（北海道大学・北方生物圏フィールド科学） 更新過程と林冠構造：Lee Hua Seng (Forest Department Sarawak)
林冠状態の広域把握：グループ統括・吉村充則（総合地球環境学研究所） 林冠状態の広域把握：吉村充則（総合地球環境学研究所）

(2) メンバー表

研究グループ名：一斉開花と生物相互作用

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
二宮生夫	愛媛大学・農学部	助教授	グループ統括・一斉開花の生理生態メカニズム	H10～15
安成哲三	名古屋大学地球水循環研究センター	教授	環境変動と一斉開花	H10～15
北山兼弘	京都大学・生態学研究センター	教授	一斉開花と栄養塩ダイナミクス	H13～15
市岡孝朗	名古屋大学・生命農学研究科	助手	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
永益英敏	京都大学・総合博物館	助教授	一斉開花と植物食動物の多様性	H14～15
戎 信宏	愛媛大学・農学部	助教授	環境変動と一斉開花	H10～12
中北 理	森林総合研究所	研究員	環境変動と一斉開花	H10～12
齋藤英樹	森林総合研究所	研究員	環境変動と一斉開花	H10～12
永光輝義	森林総合研究所	研究員	一斉開花と植物食動物の多様性	H14～15
酒井章子	筑波大学	講師	環境変動と一斉開花	H13～15
百瀬邦泰	京都大学アジアアフリカ研究科	助手	一斉開花と植物食動物の多様性	H14～15

野村昌弘	京都大学・生態学 研究センター	CREST 研究 員	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
箕口秀夫	新潟大学農学部	助教授	一斉開花の生理生態メカニズム	H10～15
田中健太	北海道大学・農学 部	学 振 研 究 員	一斉開花と植物食動物の多様性	H10～15
中川弥智子	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
畑田 彩	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
堀 真人	東京大学農学生命 科学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H10～15
黒川紘子	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と栄養塩ダイナミクス	H11～15
鮫島弘光	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
藤森直美	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と栄養塩ダイナミクス	H12～15
竹内やよい	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H13～15
Rhet Harrison	京都大学・生態学 研究センター	研究員	一斉開花と植物食動物の多様性	H14～15
饗庭 正寛	京都大学・生態学 研究センター	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H15
村瀬 香	名古屋大学・生命 農学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H12～15
山田 圭子	名古屋大学・生命 農学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H14～15
米山 千温	筑波大生命環境科 学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H13～15
高橋 洋	筑波大生命環境科 学研究科	大学院生	環境変動と一斉開花	H13～15
市川 裕樹	筑波大生命環境科 学研究科	大学院生	環境変動と一斉開花	H14 - 15
山本卓司	名古屋大学・生命 農学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H11 - 13
斎藤 琢	筑波大学・環境科 学	大学院生	環境変動と一斉開花	H11 - 13
筑木 秀毅	名古屋大学・生命 農学研究科	大学院生	一斉開花と植物食動物の多様性	H13 - 14
大串隆之	京都大学・生態学 研究センター	教授	一斉開花と植物食動物の多様性	H10 - 11
福井晶子	東京大学・農学生 命研究科	研究生	一斉開花と植物食動物の多様性	H10 - 11
佐々木恵美	茨城大学・生命理 工学研究	大学院生	環境変動と一斉開花	H10 - 11
Abang Abd Hamid	Forest Research Center	Assistant Director	一斉開花と植物食動物の多様性	H10 - 11
Oswald Braken Tisen	Forest Department Sarawak	Executive Officer	一斉開花と植物食動物の多様性	H10 - 11

研究グループ名：林冠動態と炭素水収支

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
浅野 透	総合地球環境学研究所	教授	グループ統括・攪乱と更新モザイク	H10～15
鈴木雅一	東京大学農学生命科学研究科	教授	林冠と大気的气体交換	H10～15
蔵治光一郎	東京大学農学生命科学研究科	講師	林冠と大気的气体交換	H11～15
田中延亮	東京大学農学生命科学研究科	助手	林冠と大気的气体交換	H11～15
久米朋宣	東京大学農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H14～15
吉田斉正	東京大学農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
吉藤奈津子	東京大学・農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
熊谷明子	東京工業大学・総合理工学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
田中友理	東京工業大学・総合理工学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
大滝 諭	東京工業大学・総合理工学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
高田麻衣歌	東京大学・農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H13～14
澤野 真治	東京大学・農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H13～14
橋口 剛	東京大学・農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H13～14
熊谷 朝臣	九州大学農学研究科	助手	林冠と大気的气体交換	H12～15
小林 元	九州大学農学研究科	助手	林冠と大気的气体交換	H12～15
小笠原大輔	鳥取大学大学院農学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H10～12
吉藤奈津子	東京大学・農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H13～15
佐藤嘉展	九州大学農学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H11～15
斎藤 琢	九州大学農学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H12～15
児玉直美	九州大学農学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H14～15
猿木重文	九州大学農学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H14～15
大橋瑞江	九州大学農学研究科	学振研究員	土壌呼吸	H11～15
香川珠実	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
伊藤誠	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
諸岡 利幸	東京大学農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気的气体交換	H11～15

西澤絵奈	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
中島康介	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
宮柱明日香	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
志風伸幸	九州大学農学研究科	大学院生	土壌呼吸	H14～15
ジョセ・オル ル・マンフロ	東京大学農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気 の ガス交換	H13～15
南光一樹	東京大学農学生命科学研究科	大学院生	林冠と大気 の ガス交換	H14～15
小池孝良	北海道大学農学部	教授	林冠と大気 の ガス交換	H10～15
市栄智明	北海道大学農学部	学振研究員	林冠における生態プロセス	H10～15
北岡 哲	北海道大学農学部	大学院生	林冠における生態プロセス	H12～15
香山雅純	北海道大学・農学部	大学院生	林冠における生態プロセス	H12～15
北橋善純	北海道大学・農学部	大学院生	林冠における生態プロセス	H12～15
田中憲三	愛媛大学・連合農学研究科	大学院生	林冠における生態プロセス	H14～15
Lee Hua Seng Lucy Choung	Forest Department Sarawak Forest Research Center, Sarawak	次長 センター長	更新過程と林冠構造	H10～15
村上正志	北海道大学・農学部	助手	林冠における生態プロセス	H10-11
吉田俊也	北海道大学・農学部	助手	林冠における生態プロセス	H10-11
志水謙祐	北海道大学・農学部	大学院生	林冠における生態プロセス	H10-11
柳原祐子	北海道大学・農学部	大学院生	林冠における生態プロセス	H10-11

研究グループ名：林冠状態の広域把握

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
吉村充則	京都大学・東南アジア研究センター	助手	グループ統括・林冠状態の広域把握	H10～15
木村 宏	岐阜大学・工学部	助教授	林冠状態の広域把握	H12～15
山本浩万	宇宙開発事業団	招聘研究員	林冠状態の広域把握	H13～15
山下 恵	JST	CREST 技術員	林冠状態の広域把握	H12～15
Josephine Wong	Forest Department Sarawak	研究員	林冠状態の広域把握	H13～15

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
1999年5月28日	研究打ち合わせ会議	京都大学生態学研究センター	10	研究開始にあたっての細部検討および事務的打ち合わせ
2000年2月28・29日	研究ワークショップ	北海道大学 苫小牧演習林	40	クレーンを使った林冠プロセスの研究
2000年4月28日	研究打ち合わせワークショップ	ホテルニューサイチ(大津市)	20	研究推進の細部検討および事務的打ち合わせ
2000年10月28日	研究打ち合わせおよびワークショップ	ホテルニューサイチ(大津市)	20	研究の進捗状況とクレーン観測に関する細部打ち合わせ
2001年3月12-14日	国際シンポジウム	マレーシア・サラワク州リーガロイヤルホテル	90	林冠研究の現状とサラワク州における位置づけ
2001年7月6日	研究打ち合わせ会議	ホテルニューサイチ(大津市)	20	研究推進にあたっての細部検討および事務的打ち合わせ
2002年5月15日	研究成果および計画の検討と事務的打ち合わせ	総合地球環境学研究所 大会議室	20	研究推進にあたっての細部検討および事務的打ち合わせ
2003年3月20日	生態学会シンポジウム	つくば国際会議場	200	生態学会企画シンポジウムによる研究成果の発表
2003年4月30日	研究打ち合わせ会議	京都ばるる	20	最終年度の成果取りまとめに関する打ち合わせ

(2) 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Het Kaliang (Forest Research Center, Sarawak 研究員)	日本生態学会シンポジウムにおける成果発表	京都、筑波	平成15年3月16-21日
Lee Hua Seng (Forest Department, Sarawak 次長)	日本生態学会シンポジウムにおける成果発表	京都、筑波	平成15年3月18-21日

6 . 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (国内 20 報、海外 66 報)

(H11)

海外

- 1) Sakai, S., Momose, K., Yumoto, T., Nagamitsu, T., Nagamasu, H., Hamid, A. A., Nakashizuka, T. & Inoue, T. 1999. Plant reproductive phenology over four years including an episode of general flowering in a lowland dipterocarp forest, Sarawak, Malaysia. *American Journal of Botany*, 86: 1414-1436
- 2) Yamashita M., Yoshida T., Yoshimura M., Nakashizuka T. 1999. Application of Topographic Animation for Solar Energy Amount, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXII-Part5-3W12, 203-206.
- 3) Nakashizuka, T., Kohyama, T., Whitmore, T. & Ashton, P. 1999. Tree diversity and dynamics of Western Pacific and Eastern Asian forests: An introduction. *Journal of Vegetation Science*, 10: 765-766.

国内

- 1) 山下恵, 吉田俊也, 吉村充則, 中静透. 1999. 数値地形モデルを応用した熱帯林・環境動態把握のための太陽エネルギー量推定. 日本写真測量学会平成 11 年度秋季学術講演会発表論文集:pp.121-124.
- 2) 広見 徹・二宮生夫・小池孝良・荻野和彦. サラワク熱帯雨林におけるフタバガキ科林冠構成種の不均一な気孔開閉による蒸散速度の調節. *日本生態学会誌*・49: 33-90. 1999.
- 3) Ninomiya, I., Tanaka, K., Koike, T. & Ogino, K. 1999. Ecophysiological studies on seedlings planted in the Bakam Experimental Forest, Sarawak. *Proceedings of International Symposium, Can Biological Production Harmonize with Environment ?*, 417-420, Asian Natural Environmental Science Center, The University of Tokyo, Tokyo.
- 4) Breulmann, G., Ogino, K. & Ninomiya, I. 1999. Foliar concentration of chemical elements in Dipterocarpaceae and Euphorbiaceae from a tropical rain forest in Sarawak, Malaysia. *Proceedings of International Symposium, Can Biological Production Harmonize with Environment ?*, 425-428, Asian Natural Environmental Science Center, The University of Tokyo, Tokyo.
- 5) Hiromi, T., Ninomiya, I., Koike, T. & Ogino, K. 1999. Transpiration of canopy tree species in tropical rain forest, Sarawak. *Proceedings of International Symposium, Can Biological Production Harmonize with Environment ?*, 421-424, Asian Natural Environmental Science Center, The University of Tokyo, Tokyo.

(H12)

海外

- 1) Nakagawa, M., Tanaka, K., Nakashizuka, T., Ohkubo, T., Kato, T., Maeda, T., Sato, M., Miguchi, H., Nagamasu, H., Ogino, K., Teo, S., Hamid, A. A. & Lee, H. 2000. Impact of severe drought associated with the 1997-1998 El Nino in a tropical forest in Sarawak. *Journal of Tropical Ecology*, 355-367.
- 2) Yamashita M., Yoshida T., Yoshimura M., Nakashizuka T. 2000. Application of Solar Energy Simulation for Rainforest Environment, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Part B7, Pp.1723-1728.
- 3) Kitao, M., Lei, T.T., Koike, T., Tobita, H. 2000. Temperature response and

- photoinhibition investigated by chlorophyll fluorescence measurements for four distinct species of Dipterocarp trees. *Physiol. Plant*, 109: 284-290.
- 4) Kitao, M., Lei, T.T., Koike, T., Tobita, H. and Maruyama, Y. 2000. Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes. *Plant Cell Physiol.*, 23: 81-89.
 - 5) Kato, M., Itioka, T., Sakai, S., Momose, K., Yamane, S., Hamid, A. A. and Inoue, T. 2000. Various population fluctuation patterns of light-attracted beetles in a tropical lowland dipterocarp forest in Sarawak. *Population Ecology* 42(1): 97-104.
 - 6) Itioka, T., Nomura, M., Inui, Y., Itino, T. and Inoue, T. 2000. Difference in intensity of ant defense among three species of *Macaranga* myrmecophyte in a Southeast Asian dipterocarp forest. *Biotropica* 32(2): 318-326.
 - 7) Nomura, M., Itioka, T. and Itino, T. 2000. Variations in abiotic defense within myrmecophytic and non-myrmecophytic species of *Macaranga* in a Bornean dipterocarp forest. *Ecological Research* 15: 1-11.
 - 8) Yamamoto, T., Yata, O. and Itioka, T. 2000. Descriptions on the Early Stages of *Chilasa paradoxa* (Zinken, 1831) from North Borneo (Lepidoptera: Papilionidae). *Entomological Science* 3(4): 627-633.
 - 9) Pampasit, S., Khamyong, S., Breulmann, G., Ninomiya, I. and Ogino, K., 2000. Elements Concentration in Tree Species of Tropical Hill Evergreen Forest, Northern Thailand. *TROPICS*, 9(4), 287-308
 - 10) Pampasit, S., Khamyong, S., Breulmann, G., Ninomiya, I. and Ogino, K., 2000. Mineral Element Accumulation in Soils and Trees in Tropical Hill Evergreen Forest, Northern Thailand. *TROPICS*, 9(4), 275-286
 - 11) Nakamura, T., M. Kitao, H. Tobita, Y. Maruyama, T. T. Lei and T. Koike. 2000. Observation of patchy stomatal closure and growth of white birch seedlings raised under ambient and elevated CO₂ with special reference to soil moisture. In: Terazawa, M. et al. eds. *Birch Wood Utilization*, Bifuka, Japan. 78-86
 - 12) Koike, T., Yazaki, K., Funada, R., Maruyama, Y., Mori, S. and Sasa, K. 2000. Forest heath and vitality in northern Japan. *Research Note of Fac. Forestry, The Univ. Joensuu* 92: 49-60.
 - 13) Ninomiya, I., Sakurai, K., Harada, K., Kendawang, J.J., Lee, H. S. and Ogino, K. 2000. Island and corridor planting system in ecosystem rehabilitation - a proposal, *Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation*, Forestry Department Sarawak, Kuching, 18-21
 - 14) Ninomiya, I., Tanaka, K., Koike, T., Lee, H.S. and Ogino, K. 2000. Ecophysiology of seedlings planted in the Bakam Experimental Reserve, Sarawak, *Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation*, Forestry Department Sarawak, Kuching, 25-29
 - 15) Ninomiya, I., Hiromi, T., Yoneda, R., Ichie, T., Kamiya, K., Kohira, M., Lee, H.S. and Ogino, K. 2000. Phenology of shoot elongation and leaf dynamics in a tropical Rain Forest in Sarawak, *Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation*, Forestry Department Sarawak, Kuching, 182-186
 - 16) Tanaka, K., Koike, T., Ninomiya, I., Kendawang, J. J. and Ogino, K. 2000. Response of light-photosynthesis curve of several tree species planted in the Bakam Experimental Reserve, *Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation*, Forestry Department Sarawak, Kuching, 162-165
 - 17) Hiromi, T., Ninomiya, I., Koike, T. and Ogino, K. 2000. Transpiration and stomatal regulation at canopy top of Tropical rain forest, Sarawak, *Proceedings of Workshop*

on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 176-181

- 18) Koike, T., Tanaka, K., Kitao, M., Ninomiya, I., Kendawang, J. J. and Ogino, K. 2000. Photoinhibition of seedlings detected by a chlorophyll fluorescence method in the Bakam Experimental Reserve, Sarawak, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 166-175.

国内

- 1) 吉村充則・山下恵・野村昌弘・中静透 . 2000. 熱帯林・林冠観測クレーンをプラットフォームとする三次元・分光計測システムの開発とその運用 , 日本写真測量学会平成 12 年度秋季学術講演会発表論文集 , 127-130.
- 2) 山下恵, 吉村充則, 本多嘉明, 梶原康司. 2000. 簡易標準白色板の作成およびその評価に関する検討. 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集: pp.237-240.
- 3) 市榮智明・二宮生夫・荻野和彦 , 2000. オヒルギ、Bruguiera gymnorrhiza の実生初期生長にともなう胎生種子内貯蔵養分の利用消費 , TROPICS , 9(2), 153-163

(H13)

海外

- 1) Ichie, T., Ninomiya, I. and Ogino, K. 2001. Utilization of seed reserves during germination and early seedling growth by *Dryobalanops lanceolata* (Dipterocarpaceae). Journal of Tropical Ecology, 17: 371-378.
- 2) Koike, T., Kitao, M., Maruyama, Y., Mori, S., and Lei, T. T. 2001. Leaf morphology and photosynthetic adjustments among deciduous broad-leaved trees within the vertical canopy profile. Tree Physiol., 21: 951-958.
- 3) Itioka, T., Inoue, T., Kaling, H., Kato, M., Nagamitsu, T., Momose, K., Sakai, S., Yumoto, T., Mohamad, S. U., Hamid, A. A. and Yamane, S. 2001. Six-year population fluctuation of the giant honey bee *Apis dorsata* F. (Hymenoptera: Apidae) in a tropical lowland dipterocarp forest in Sarawak. Annals of Entomological Society of America 94(4): 545-549.
- 4) Itino, T. and Itioka, T. 2001. Interspecific variation and ontogenetic change in anti-herbivore defense in myrmecophytic *Macaranga* species. Ecological Research 16(4): 765-774.
- 5) Itino, T., Itioka, T., Hatada, A. and Hamid, A. A. 2001. Effects of food rewards offered by ant-plant *Macaranga* on the colony size of ants. Ecological Research 16(4): 775-786.
- 6) Inui, Y., Itioka, T., Murase, K., Yamaoka, R. and Itino, T. 2001. Chemical recognition of partner plant species by foundress ant queens in *Macaranga-Crematogaster* myrmecophytism. Journal of Chemical Ecology 27(10): 2029-2040.
- 7) Itino, T., Davies, S. J., Tada, H., Hieda, Y., Inoguchi, M., Itioka, T., Yamane, S. and Inoue, T. 2001. Cospeciation of ants and plants. Ecological Research, 16(4): 787-793.
- 8) Nomura, M., Itioka, T. and Murase, K. 2001. Non-ant anti-herbivore defenses before plant-ant colonization in *Macaranga* myrmecophytes. *Population Ecology*, 43(3): 207-212.
- 8) Hatada, A., Ishiguro, S., Kawano, S. and Itioka, T. 2001. Myrmecosymbiosis in the Bornean *Macaranga* species with special reference to food bodies (Beccarian bodies) and extrafloral nectaries. Plant Species Biology, 16: 241-246.
- 10) Wall, D., Mooney, H., Adam, G., Boxshall, G., Dobson, A., Nakashizuka, T., Seyani, J., Samper, C. & Sarukhan, J. 2001. An International Biodiversity Observation Year. Trends in Ecology and Evolution, 16: 52-54.

- 11) Nakashizuka, T., Lee, H. S. & Chong, L. 2001. Studies on canopy processes of a tropical forest in Lambir Hills National Park. Proceedings of the International Symposium, "Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain forest", pp. 2-7.
- 12) Kenta, T., Isagi, Y., Nakashizuka, T. & Hamid, A. A. 2001. Is pollen promoted at the general flowering period and is it advantageous to avoid inbreeding depression in *Dipterocarpus tempehes* (Dipterocarpaceae)? Proceedings of the International Symposium, "Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain forest", pp. 240-43.
- 14) Koike, T., Kitahashi, Y., Nakagawam M. & Nakashizuka, T. 2001. Mid-day depression of the photosynthetic rate in canopy trees native to a tropical rain forest in the Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia. Proceedings of the International Symposium, "Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain forest", pp. 51-56.
- 15) Kurokawa, H., Nakashizuka, T., Yoshida, T., Nakamura, T. & Lai, J. 2001. Strategy of defensive allocation in borneo ironwood. Proceedings of the International Symposium, "Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain forest", pp. 115-119.
- 16) Tomo'omi Kumagai, Kuraji Koichiro and Masakazu Suzuki. 2001. The monitoring of CO₂ and H₂O exchange over a tropical rainforest canopy using a 80m crane. Proceedings of the International Symposium on Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain Forest, 78-84
- 17) Kuraji Koichiro, Yuri Tanaka, Tomo'omi Kumagai and Masakazu Suzuki. 2001. Long-term monitoring of physical environment in and above the canopy and underground in Lambir. Proceedings of the International Symposium on Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain Forest, 72-77
- 18) Sakai, S. 2001. Pollination guilds and the evolution of floral characters in Bornean Zingiberaceae and Costaceae pp.342-346. in: Tropical Ecosystems: Structure, diversity and human welfare (eds.) K.N. Ganeshiah, R. Uma Shaanker & K.S. Bawa. Oxford & IBH Publishing CO. Pvt. Ltd.
- 19) Sakai, S. 2001. Flowering phenology and plant-pollinator interactions in tropical forests of SE Asia and Neotropics pp.359-362. in: Tropical Ecosystems: Structure, diversity and human welfare (eds.) K.N. Ganeshiah, R. Uma Shaanker & K.S. Bawa. Oxford & IBH Publishing CO. Pvt. Ltd.
- 20) Koike, T., Kitahashi, Y., Nakagawa, M. and Nakashizuka, T. 2001. Mid-day depression of the photosynthetic rate in canopy trees native to a tropical rain forest in the Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia. In: Ichioka, T., Nakashizuka, T. and Chong, L. (eds.) Proceedings of the International Symposium, Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain Forest. Sarawak, Malaysia, pp. 51-56.
- 21) Ichie, T., Kenta, T., Sato, K., Nishimura, K. and Ninomiya, I. (2001) Dynamics of the storage resource for reproduction of the tropical canopy tree, *Dipterocarpus tempehes*. In: Ichioka, T., Nakashizuka, T. and Chong, L. (eds.) Proceedings of the International Symposium, Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain Forest. Sarawak, Malaysia, pp. 57-61.
- 22) Kitaoka, S., Kitahashi, Y., Shimizu, K., Hiura, T. and Koike, T. (2001) Canopy photosynthesis and transpiration in deciduous trees with special references stomatal and non-stomatal regulation. In: Ichioka, T., Nakashizuka, T. and Chong, L. (eds.) Proceedings of the International Symposium, Canopy Processes and

国内

- 1) 山下恵・吉村充則・土田聡・本多嘉明・梶原康司. 2001. 簡易白色板作成の検討およびその性能評価・校正, 写真測量とリモートセンシング vol. 40, No. 2, 26-32.
- 2) 吉村充則・山下恵・中静透. 2001. 熱帯林・林冠観測クレーン搭載レーザープロファイラによる林冠構造三次元計測, 日本写真測量学会平成13年度年次学術講演会発表論文集, 53-56.
- 3) 山下恵・吉村充則・中静透. 2001. 熱帯林林冠観測クレーンを用いた二方向性反射計測の試み, 日本写真測量学会平成13年度年次学術講演会発表論文集, 57-60.
- 4) 北橋善範・丸山 温・小池孝良(2002) 高さの異なる部位における広葉樹冠の水利用特性 日本林学会北海道支部論文集 50: 20-22.
- 5) 中静 透. 2001. 景観レベルでの林冠動態研究の応用可能性と方向. 国際景観生態学会日本支部会報, 6: 5-8.

(H14)

海外

- 1) Ichie, T., Kitahashi, Y., Matsuki, S., Maruyama, Y. and Koike, T. 2002. The use of a portable non-destructive type nitrogen meter for leaves of woody plants in field studies. *Photosynthetica* 40:289-292.
- 2) Murase, K., Itioka, T., Inui, Y. and Itino, T. 2002. Species specificity in settling-plant selection by foundress ant queens in *Macaranga*-*Crematogaster* myrmecophytism in a Bornean dipterocarp forest. *Journal of Ethology*, 20(1): 19-24.
- 3) Nomura, M. and Itioka, T. 2002. Effects of synthesized tannin on the growth and survival of a generalist herbivorous insect, the common cutworm, *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Applied Entomology and Zoology* 37(2): 285-289.
- 4) Hatada, A., Itioka, T., Yamaoka, R. and Itino, T. 2002. Carbon and nitrogen content of food bodies in three myrmecophytic species of *Macaranga*: implications for antiherbivore defense mechanisms. *Journal of Plant Research*, 115(3): 179-184.
- 5) Matsumoto, T., Itioka, T. and Nishida, T. 2002. Fitness cost of parasitoid avoidance behavior in the arrowhead scale, *Unaspis yanonensis* Kuwana. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 105(2): 83-88.
- 6) Kenta, T., Shimizu, K. K., Nakagawa, M., Okada, K., Hamid, A. A., & Nakashizuka, T. 2002. Multiple factors contribute to outcrossing in a tropical emergent *Dipterocarpus tempehes*, including a new pollen-tube guidance mechanism for self-incompatibility. *American Journal of Botany*, 89: 60-66.
- 7) Isagi, Y., Kenta, T. & Nakashizuka, T. 2002. Microsatellite loci for a tropical emergent tree, *Dipterocarpus tempehes* V. SI. (Dipterocarpaceae). *Molecular Ecology Note*, 2: 12-13
- 8) Sakai, S. 2002. General flowering in lowland mixed dipterocarp forests of Southeast Asia. *Biological Journal of Linnean Society*, 75: 233-248.
- 9) Nakashizuka, T. & Chong, L. 2002. Studies on canopy biodiversity of a tropical rain forest in Lambir Hills National Park. *Proceedings of the 11th International Workshop of BIO-REFOR*, Seoul, Korea. 77-79.

国内

- 1) 山下恵,吉村充則,中静透. 2002. 太陽入射角の季節変化を利用した二方向性反射計測. 日本写真測量学会平成14年度年次学術講演会発表論文集:pp.5-8.

- 2) 吉村充則,山下恵,中静透,市栄智明. 2002. 植物生理活動に着目した光環境計測. 日本写真測量学会平成 14 年度秋季学術講演会発表論文集:pp.65-66.
- 3) 山下恵,吉村充則,中静透,市栄智明. 2002. 日射量と分光特性の時間変化からみた植物生理活動に関する検討. 日本写真測量学会平成 14 年度秋季学術講演会発表論文集:pp67-68.
- 4) 吉村充則,山下恵,中静透,市栄智明. 2003. 熱帯林における林内光環境時空間推定のための LAI・PAR 鉛直プロファイル計測. 日本写真測量学会平成 15 年度秋季学術講演会発表論文集:pp.147-148.
- 5) 酒井 章子. 2002. 花の上で繁殖する送粉者 . 日本生態学会誌 52

(H15)

海外

- 1)Kenta, T., K. K Shimizu, M. Nakagawa, K. Okada, A. A. Hamid, and T. Nakashizuka. 2003. Self-rejection systems including a pollen guidance defect in a tropical emergent *Dipterocarpus tempehes* (Dipterocarpaceae). *American Journal of Botany*.
- 2) Kurokawa, H., Yoshida, T., Nakamura, T., Lai, J. & Nakashizuka, T. 2003. The age of tropical rain-forest canopy species, Borneo Ironwood (*Eusideroxylon zwageri*), determined by 14C dating. *Journal of Tropical Ecology*, 19: 1-7.
- 3) Kohira, M. and Ninomiya, I. 2003. Detecting tree populations at risk: Using single-year VS long-term inventory data. *Forest Ecology and Management* 174: 423-435.
- 4) C.M.P. Ozanne, D. Anhuf, S.L. Boulter, M. Keller, R.L. Kitching, C. Korner, F.C. Meinzer, A.W. Mitchell, T. Nakashizuka, P.L. Silva Dias, N.E. Stork, S.J. Wright, M. Yoshimura. 2003. Biodiversity Meets the Atmosphere: A Global View of Forest Canopies. *Science* 301: 183-186.
- 5) Nakagawa, M., Itioka, T., Momose, K., Yumoto, T., Komai, F., Morimoto, K., Jordal, B. H., Kato, M., Kaliang, H., Hamid, A. A., Inoue, T. and Nakashizuka, T. 2003. Resource use of insect seed predators during general flowering and seeding events in a Bornean dipterocarp rain forest. *Bulletin of Entomological Research* 93(5): 455-470.
- 6) Itioka, T., Kato, M., Kaliang, H., Merdek, M., Nagamitsu, T., Sakai, S., Mohamad, S. U., Yamane, Sk., Hamid, A. A. and Inoue, T. 2003. Insect responses to general flowering in Sarawak. In "Arthropods of Tropical Forests: spatio-temporal dynamics and resource use in the canopy" (eds. Basset, Y., Novotny, V., Miller, S. E. and Kitching, R. L.), Cambridge University Press. pp. 126-134.
- 7) Kenzo, T., Ichie, T., Ninomiya, I. and Koike, T. 2003. Photosynthetic activity in seed wings of Dipterocarpaceae in a masting year: Does wing photosynthesis contribute to reproduction? *Photosynthetica* (in press).
- 8) Harrison, R. D., Hamid, A. A. Kenta, T., LaFrankie, J., Lee, H. S., Nagamasu, H., Nakashizuka, T., & Palmitto, P. 2003. The diversity of hemi-epiphytic figs (*Ficus*; *Moraceae*) in a Bornean lowland rain forest. *Biological Journal of Linnean Society*, 78: in press).
- 9) Murase, K., Itioka, T., Nomura, M. and Yamane, Sk. 2003. Intraspecific variation in the status of ant symbiosis on a myrmecophyte, *Macaranga bancana*, between primary and secondary forest in Borneo. *Population Ecology*, 45(3): (in press).
- 10) Itioka, T. and Yamauti, M. Severe drought, leafing phenology, leaf damage and lepidopteran abundance in the canopy of a Bornean aseasonal tropical rain forest. *Journal of Tropical Ecology* (in press)
- 11) M.Nakagawa, T.Itioka, K.Momose, T.Yumoto, F.Komai, K.Morimoto, B.H.Jordal,

- M.Kato, H.Kaliang, A.A.Hamid, T.Inoue, T.Nakashizuka. "Resource use of insect seed predators during general flowering and seeding events in a Bornean dipterocarp rain forest" *Bulletin of Entomological Research* (in press).
- 12) Sakai, S. and H. Nagamasu Systematic studies of Bornean Zingiberaceae IV. Alpinioideae of Lambir Hills, Sarawak. *Edinburgh Journal of Botany* (in press).
 - 13) Manfroi J.O, Kuraji K. ,Tanaka N., Suzuki M., Nakagawa M., Nakashizuka T., Chong L. The stemflow of trees in a Bornean Lowland Tropical Forest. *Hydrological Processes* (in press).
 - 14) Kumagai , T., Saitoh, T., Sato , Y., Morooka, T., Manfroi, O. J., Kuraji, K. and Suzuki, M. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *Journal of Hydrology* (in press).

国内

- 1) 山下恵,吉村充則,中静透,市栄智明. 2003. 全天画像を用いた雲量の時系列推定手法に関する検討. 日本写真測量学会平成 15 年度秋季学術講演会発表論文集:pp.155-156.
- 2) 蔵治光一郎・田中延亮(2003)世界の熱帯林における樹冠遮断研究, 日本林学会誌 85 , pp.18-28.

(2) その他の著作物

(H11)

- 1) 市岡孝朗・市野隆雄. 1999. 数百万年にわたる共進化. *インセクトリウム* 36(6): 172-179.
- 2) 市岡孝朗・市野隆雄. 1999. 熱帯雨林のアリとアリ植物 相利共生と共進化 [2] アリとマカランガの利害関係. *インセクトリウム* 36(7): 188-194.
- 3) 市岡孝朗・市野隆雄. 1999. オオバギの対植食者防衛戦略 アリ防衛と化学防衛の組合せ. *昆虫と自然*, 34(12): 15-18.

(H12)

- 1) 中静 透. 2000. オランウータンの技とホーンビルの視界 - 熱帯林の林冠生態学 - タマリスク, 35: 2-3.
- 2) 市岡孝朗. 2000. アリ類が生物群集に果たす役割. *昆虫と自然*, 35(5): 4-6.
- 3) 山本卓司・市岡孝朗. 2000. 東南アジア島嶼における蝶類の擬態現象. *昆虫と自然*, 35(12): 4-9.

(H13)

- 1) 中静 透. 2001. いろんな生き物がいる森とはどんな森なのか。「里山と水辺の保全を考える」越路町環境シンポジウム実行委員会, 6-17.
- 2) 市岡孝朗、蔵治光一郎、中静透、安成哲三、米本昌平. 2001 熱帯雨林から見る地球の未来(座談会). *科学*, 71: 1172-1185.
- 3) 市岡孝朗. 2001. 林冠における動物と植物の相互作用. *科学*, 71(9): 1198-1203.
- 4) 中静 透. 2001. サラワク熱帯林のクレーンプロジェクト. *科学*, 71: 1188-1192.
- 5) 中静 透. 2001. 総論: なぜ、いま林冠か. *科学*, 71: 1170-1171.
- 6) 市岡孝朗. 2001. 林冠における動物と植物の相互作用. *科学*, 71(9): 1198-1203.
- 7) 鈴木雅一. 2001. 熱帯林の水循環と炭素循環- 気候変動と森林, *科学* 71, 1221-1225

- 8) 蔵治光一郎 2001. 国立公園とアブラヤシ農園のはざままで、科学 71, 1226
- 9) 市野隆雄・市岡孝朗. 2001. 生物間相互作用の歴史的過程 アリ植物をめぐる生物群集の共進化. 「群集生態学の現在」(佐藤宏明・山本智子・安田弘法 編), pp. 353-370, 京都大学学術出版会, 京都.

(H14)

- 1) 市岡孝朗. 2002. 地上 40m での昆虫調査: 熱帯低地フタバガキ林の林冠昆虫の生態. 昆虫と自然, 37(8): 16-19.
- 2) 北岡哲, 北橋善範, 市榮智明, 小池孝良. 2002. 林冠に関する第 3 回国際会議報告 (上) - 基調公演とシンポジウム -. 北方林業 54: 210-213.
- 3) 北橋善範, 北岡哲, 市榮智明, 小池孝良. 2002. 林冠に関する第 3 回国際会議報告 (下) - ポスター発表と現地検討会 -. 北方林業 54: 234-237.
- 4) 市榮智明. 2002. フタバガキ科巨大高木の資源利用. 日本熱帯生態学会ニューズレタ - 49: 9-11.

(H15)

- 1) 市榮智明. 2003. 種子生産の豊凶はなぜ起こるのか? - 樹体内養分のやりくりからその仕組みを垣間見る -. 北方林業 55: 37-40.

(3) 口頭発表(国内 63 報、海外 29 報)

招待・口頭発表

(H10)

国内

- 1) 広見徹・米田令仁・小平真佐夫・上谷浩一・二宮生夫・市榮智明・荻野和彦. サラワク熱帯雨林における樹木のシュート伸長と直径成長の周期について. 第 8 回日本熱帯生態学会. 滋賀県立大学. 1998.

(H11)

海外

- 1) Ninomiya, I. Canopy Processes in Tropical Rain Forest, International Symposium 'Global Environmental Issues and Forests' Science Sessions. College of Agriculture Ehime University. 1999.

国内

- 1) 市榮智明・中静透・佐藤香織・箕口秀夫・田中憲蔵・二宮生夫・小池孝良・Oswald Braken. フタバガキ科 *Dipterocarpus tempehes* 実生の初期生長に及ぼす種子内貯蔵養分の影響. 第 46 回日本生態学会. 信州大学. 1999.
- 2) 佐藤香織・箕口秀夫・田中健太・市榮智明・中川弥智子・中静透・堀真人 1999 *Dipterocarpus tempehes* の更新における齧歯類の影響. 第 46 日本生態学会大会講演要旨集、松本、p.101.
- 3) 中川弥智子・田中健太・中静透・大久保達弘・前田禎三・佐藤香織・箕口秀夫・永益英敏・Teo, S., Hamid, A. A., Lee, H. S. 1999 エルニーニョがマレーシアサラワク州熱帯林の動態に及ぼした影響. --1998 年の異常乾燥と樹木の死亡-- 第 46 日本生態学会大会講演要旨集、松本、p.132.
- 4) 榎木勉・川口英之・中静透・Hamid, A. A. 1999 構造の不均一な林冠下における *Shorea parvistipulata* 稚樹の分布と成長. --サラワク州クバでの測定-- 第 46 日本生態学会大会講演要旨集、松本、p.193.

- 5) 田中健太・中静 透. 1999. 熱帯高木 *Dipterocarpus tempehes* (フタバガキ科) の樹冠デモグラフィと交配実験による近交弱勢の推定. 第 110 日本林学会大会学術講演集、松山, p.354.
- 6) 二宮生夫、田中憲蔵、小池孝良、荻野和彦, 1999. サラワク州バカム造林試験区に植栽された 9 樹種の苗の生態生理—強光、乾燥に対する樹種特性. 第 9 回日本熱帯生態学会大会、千葉. 1999.
- 7) 蔵治光一郎、熊谷朝臣、野口宏典、佐藤嘉展、鈴木雅一. 1999. サラワク・ランビル 国立公園における林内環境の鉛直分布特性、第 9 回日本熱帯生態学会講演要旨集、p.38.
- 8) 田中憲蔵、二宮生夫、小池孝良、荻野和彦. 1999. サラワク州バカム造林試験区に植栽された 9 樹種の苗の生態生理—光合成の樹種特性. 第 9 回日本熱帯生態学会大会、千葉.

(H12)

海外

- 1) Itioka, T. 2000. "On the DIWPA biodiversity project in Sarawak: Ant-Macaranga mutualism" DIWPA Network for Establishment of Ant Reference Collections (ANeT) Workshop in Thailand "Promoting taxonomy and reference collection of ants in Asia". Kasetsart University, Bangkok,
- 2) Itioka, T. (Nagoya University), Nomura, M., Hatada, A and Murase, K. 2000. "Optimal resource allocation for two modes of anti-herbivore defense in Macaranga myrmecophytes" The second workshop of the International Network for the Study of Asian Ants (ANeT) in Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia.
- 3) Murase, K. (Nagoya University) and Itioka, T. 2000. "Colonization onto Macaranga myrmecophytes by foundress queens of *Crematogaster* plant-ants" The second workshop of the International Network for the Study of Asian Ants (ANeT) in Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia.
- 4) Yamamoto, T. (Nagoya University) and Itioka, T. 2000. "Are the nymphs of *Acromantis japonica* ant-mimics?" The second workshop of the International Network for the Study of Asian Ants (ANeT) in Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia.
- 5) Nakashiuzka, T. 2000. Network research activities on tropical forest ecosystem studies. Abstract of International Workshop on the Responses of Tropical Forest Ecosystem to Long-Term Cyclic Climate Change. Japan Science Technology Agency and National Research Council Thailand. p. 43.
- 6) Tanaka, K., Nakashizuka, T., Nakagawa, M. & Hamid, A. 2000. Out-crossing and pollen limitation in a tropical emergent Dipterocarp. Abstracts, 43rd symposium of the International Association for Vegetation Science, p. 58.
- 7) Ninomiya, I., Sakurai, K., Harada, K., Kendawang, J.J., Lee, H. S. and Ogino, K. 2000. Island and corridor planting system in ecosystem rehabilitation - a proposal, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 18-21
- 8) Ninomiya, I., Tanaka, K., Koike, T., Lee, H.S. and Ogino, K. 2000. Ecophysiology of seedlings planted in the Bakam Experimental Reserve, Sarawak, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 25-29
- 9) Ninomiya, I., Hiromi, T., Yoneda, R., Ichie, T., Kamiya, K., Kohira, M., Lee, H.S. and Ogino, K. 2000. Phenology of shoot elongation and leaf dynamics in a tropical Rain Forest in Sarawak, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation,

Forestry Department Sarawak, Kuching, 182-186

- 10) Tanaka, K., Koike, T., Ninomiya, I., Kendawang, J. J. and Ogino, K. 2000. Response of light-photosynthesis curve of several tree species planted in the Bakam Experimental Reserve, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 162-165
- 11) Hiromi, T., Ninomiya, I., Koike, T. and Ogino, K. 2000. Transpiration and stomatal regulation at canopy top of Tropical rain forest, Sarawak, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 176-181
- 12) Koike, T., Tanaka, K., Kitao, M., Ninomiya, I., Kendawang, J. J. and Ogino, K. 2000. Photoinhibition of seedlings detected by a chlorophyll fluorescence method in the Bakam Experimental Reserve, Sarawak, Proceedings of Workshop on Forest Ecosystem Rehabilitation, Forestry Department Sarawak, Kuching, 166-175.

国内

- 1) 山下恵. 2000. 熱帯林環境動態把握のためのリモートセンシング・GIS の応用, 平成12年第4回気候メカニズム研究会, 東京.
- 2) 吉村充則. 2000. 熱帯林の環境調査における空間情報の計測と利用の試み(1), 写真測量学会関西支部空間情報ワーキンググループ第1回話題交換会, 大阪.
- 3) 吉村充則・山下恵・野村昌弘・中静透. 2000. 熱帯林・林冠観測クレーンをプラットフォームとする三次元・分光計測システムの開発とその運用, 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会, 鳥取県民文化会館, 鳥取.
- 4) 山下恵・吉村充則・本多嘉明・梶原康司. 2000. 簡易標準白色板の作成およびその評価に関する検討, 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会. 鳥取.
- 5) 吉村充則. 2000. 熱帯林の環境調査における空間情報の計測と利用の試み(2), 写真測量学会関西支部空間情報ワーキンググループ第2回話題交換会, 大阪.
- 6) 田中健太・中静透. 2000. 熱帯高木の花のデモグラフィー - 開花時期と花序内位置の効果 - 第47回日本生態学会講演要旨集, p. 139.
- 7) 市栄智明・田中健太・中川弥智子・中静透・佐藤香織・西村和雄・二宮生夫. 2000. フタバガキ科 *Dipterocarpus tempehes* の繁殖に対する資源投資. 第47回日本生態学会講演要旨集, p. 109.
- 8) 中静透. 2000. 環境変動と森林の更新. 日本植物学会第64回大会研究発表記録, 静岡. p. 56.
- 9) 田中友理・蔵治光一郎・鈴木雅一. 2000. サラワク・ランビル国立公園における林内温度の鉛直分布、第10回日本熱帯生態学会講演要旨集, p.59.

(H13)

海外

- 1) Yoshimura M. 2001. Introduction of GIS and Remote Sensing Activities in Lambir Hills National Park, Borneo Workshop -Linking vegetation processes with remotely sensed data on Borneo-, Kyoto Japan.
- 2) Josephine Wong. 2001. GIS and Remote Sensing Activities in Forest Department Sarawak, Borneo Workshop -Linking vegetation processes with remotely sensed data on Borneo-, Kyoto Japan.
- 3) Itioka, T., Kaliasang, H., Kato, M., Mohamad, S. U., Meleng, P. and Hamid, A. A. 2001. "Long-term census on insect populations by light-trapping in Lambir Hills National Park" The International Symposium "Canopy Processes and Ecological Roles of Tropical Rain Forest", Miri, Sarawak, Malaysia.
- 4) Sakai, S., Nagamasu, T., Ooi, K., Kato, M. & Inoue, T. 2001. Pollination guilds and the

evolution of floral characters in Bornean Zingiberaceae and Costaceae. International Conference on Tropical Ecosystems: Structure, Diversity and Human Welfare (India).

- 5) Sakai, S. 2001. Flowering phenology and plant-pollinator interactions in tropical forests of SE Asia and Neotropics. International Conference on Tropical Ecosystems: Structure, Diversity and Human Welfare. (India).

国内

- 1) 吉村充則. 熱帯林の環境調査における空間情報の計測と利用の試み(2), 写真測量学会関西支部空間情報ワーキンググループ第2回話題交換会, 大阪, 2001年1月12日
- 2) 黒川紘子・中静 透. 2001. ボルネオテツボクの防衛に関する資源投資戦略. 第48回日本生態学会講演要旨集, 熊本, 91.
- 3) 田中健太・井鷲裕司・中静 透. 2001. 熱帯高木 *Dipterocarpus tempehes* の花粉散布. 第48回日本生態学会講演要旨集, 熊本, 91.
- 4) 畑田彩・市岡孝朗・中静透. 2001. アリ植物マカラングにおけるアリ防衛へのアロケーションの定量・種間比較. 第48回日本生態学会講演要旨集, 熊本, 115.
- 5) Sakai, S. 2001. Diverse pollination systems in tropics: pollinators breeding on flowers. International Symposium: Novel mechanisms of dispersal related events in tropical and subtropical plants (沖縄・西表)
- 6) 酒井章子・大井和之・井上民二. 2001. ショウガ科における送粉システムと花の形態の進化. 日本生態学会, 仙台.

(H14)

海外

- 1) Yoshimura, M., Yamashita, M., Nakashizuka, T. Three Dimensional Canopy Structure Identification by Laser Scanning System, The 3rd International Canopy Conference. Cairns, Australia. 26th Jun 2002.
- 2) Yamashita, M., Yoshimura, M., Nakashizuka, T. 2002. Bi-directional Reflectance Factor Measurement by Canopy Crane. The 3rd International Canopy Conference. Cairns, Australia. 26th Jun 2002.
- 3) Koike, T. Photosynthetic characteristics of emergent trees in Lambir, Malaysia. 3rd International Canopy Conference. Australia, Cairns. 2002.
- 4) Ichie, T., Kenta, T., Nishimura, K., Ninomiya, I., Koike, T. and Nakashizuka, T. Dynamics of the storage resource for general flowering process of a tropical emergent tree, *Dipterocarpus tempehes*. VII INTECOL. Korea, Seoul. 2002.
- 5) Itioka, T. (Nagoya University) "Diversity of antiherbivore defenses in *Macaranga* ant-plants" BRAIN Symposium "Multitrophic Interactions and Environmentally Benign Pest Management", Shiran-Kaikan, Kyoto University, Kyoto. 2002 January 14.
- 6) Murase, K. (Nagoya University) and Itioka, T. "Difference in the status of myrmecophytism on *Macaranga bancana* between primary forests and secondary forests" XIV International Congress of the International Union for the Study of Social Insects (IUSI), Hokkaido University, Sapporo. 2002 August 1.
- 7) Nakashizuka, T. 2002. Tropical forest canopy biology and biodiversity in Lambir Hills National Park. 4th Asian Science Technology Congress 2002, Kuala Lumpur, Malaysia, D-KL2.
- 8) Nakashizuka, T. & Chong, L. 2002. Long-term researches on tropical forest canopy in Lambir Hills National Park, Sarawak. Regional Conference on Long-Term Ecological Research (LTER) in East Asia. 27.

国内

- 1) 吉村充則. RS・GIS を利用した熱帯林・環境動態把握, 日本リモートセンシング研究会 地域セミナー, 大阪, 2002 年 11 月 13 日
- 2) 山下恵. 熱帯林林冠木における光合成活動に関連した環境パラメータ計測, 日本写真測量学会関西支部空間情報ワーキンググループ第 13 回話題交換会, 大阪, 2002 年 12 月 13 日
- 3) 田中憲蔵・市栄智明・小池孝良・二宮生夫. フタバガキ科種子の羽根は光合成をおこなっているのか? 第 12 回日本熱帯生態学会 金沢大学. 2002.
- 4) 田中健太・井鷲裕司・中静 透. 2002. 二種類の送粉者によるフタバガキの花粉散布パターンの違いとその影響 - 一斉開花で送粉促進されるか -. 第 49 回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 95.
- 5) 竹内やよい・田中健太・中静 透. 2002. 花粉・種子散布距離の異なるフタバガキ科 4 種の空間分布パターン. 第 49 回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 231.
- 6) 鮫島弘光・永光輝義・中静 透. 2002. 人為攪乱が熱帯林のハリナシバチ群集に与える影響. 第 49 回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 312.
- 7) 中静 透・吉田俊也・田中浩・中川弥智子・紙谷智彦・吉村充則・山下恵. 2002. 林冠三次元構造を利用した森林動態パラメータの広域推定. 第 49 回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. P. 244.
- 8) 市岡孝朗・加藤真・酒井章子・永光輝義・井上民二・湯本貴和・百瀬邦泰・Het Kaliang・Sarkawi Umar Mohamad・Abang Abdul Hamid・山根正気. 2002. 一斉開花に対するオオミツバチ個体群の反応. 第 49 回日本生態学会大会. 東北大学、仙台.
- 9) 村瀬香・市岡孝朗. 2002. オオバギ属アリ植物における被食防衛戦略の変異が絶対共生アリとの関係に与える影響. 第 49 回日本生態学会大会. 東北大学、仙台.
- 10) 米山千温・市岡孝朗・野村昌弘・磯村要. 2002. 沖縄産オオバギの被食防衛. 第 49 回日本生態学会大会. 東北大学、仙台.
- 11) 野村昌弘・畑田彩・村瀬香・市岡孝朗・市野隆雄. 2002. オオバギ属植物における被食防衛戦略の多様性. 第 49 回日本生態学会大会. 東北大学、仙台.
- 12) 相場慎一郎・北山兼弘. 2002. キナバル山の熱帯山地林における樹木種の生育場所とニッチ. 日本生態学会第 49 回大会
- 13) 畑田彩・野村昌弘・村瀬香・市岡孝朗・市野隆雄・中静 透・北山兼弘. 2002. 防衛戦略の多様性が植物の共存を可能にする? - アリ植物オオバギ属におけるアリ防衛強度種間比較 -. 第 49 回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 100.
- 14) 市栄智明・小池孝良・二宮生夫・西村和雄・中静透. 2002. フタバガキ科の巨大高木 *Dipterocarpus pachyphyllus* の展葉のメカニズム(監), 第 49 回日本生態学会(東北大学) 北橋善範・丸山 温・市栄智明・小池孝良. 2002 熱帯林の樹冠部における水利用特性, 第 113 回日本林学会(新潟).
- 15) 中静 透. 2002. 熱帯林の生物多様性 - 林冠という知られざる世界 -. 第 17 回「大学と科学」公開シンポジウム予稿集, 10-11.
- 16) 中静 透. 2002. 林冠生物学から地球環境学へ. 地球環境学への課題 - 統合理解への道. 地球研フォーラム. 総合地球環境学研究所, 15-20.
- 17) 田中憲蔵・櫻村精一・二宮生夫・入野和朗・櫻井克年・J.J.Kendawang・H.S.Lee・荻野和彦, 2002. マレーシアサラワク州ニア造林試験地に植栽された 7 樹種の生態生理, 第 113 回日本林学会 講演要旨集, 17. 新潟大学.
- 18) 田中憲蔵・市栄智明・二宮生夫・小池孝良, 2002. フタバガキ科種子の羽根は光合成をおこなっているのか?, 第 12 回日本熱帯生態学会 講演要旨集, 27. 金沢大学.
- 19) 古谷良・二宮生夫・田中憲蔵・櫻井克年・田中壮太・J.J.Kendawang, 2002. マレーシアサラワク州における二次林の現存量, 第 12 回日本熱帯生態学会講演要旨集, 19 金沢大学.

- 20) 田中憲蔵・櫻村精一・小澤智子・二宮生夫・入野和朗・櫻井克年・J.J.Kendawang・H.S.Lee・荻野和彦, 2002. マレーシアサラワク州でおこなわれた造林試験 - 植栽木の生態生理 -, 第 53 回日本林学会関西支部大会 研究発表要旨集 64. 愛媛大学.
- 21) 田中憲蔵・櫻村精一・小澤智子・二宮生夫・入野和朗・櫻井克年・J.J.Kendawang・H.S.Lee・荻野和彦, マレーシアサラワク州でおこなわれた造林試験 - 植栽木の生存と生長 -, 第 53 回日本林学会関西支部大会 研究発表要旨集 63. 愛媛大学.
- 22) 北橋善範・市榮智明・丸山 温・小池孝良. 2002. 熱帯林の樹冠部における水利用特性. 第 113 回日本林学会, 新潟.
- 23) 諸岡利幸・蔵治光一郎・熊谷朝臣・鈴木雅一. 2002. サラワク・ランビル国立公園の熱帯雨林樹冠上の風速鉛直分布と乱流特性について, 第 113 回日本林学会学術講演集, 151. 新潟.
- 24) Manfroi, O.J., Kuraji K., Tanaka T. and Suzuki, M. 2002. Canopy water balance study in Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia, 第 113 回日本林学会学術講演集, 699.
- 25) 斎藤琢・熊谷朝臣・佐藤嘉展・諸岡利幸・Odair J. Manfroi・蔵治光一郎・鈴木雅一. 2002. マレーシア, ボルネオ島, 熱帯雨林における CO₂, H₂O フラックスの長期観測, 日本気象学会 2002 年春季大会発表要旨集.
- 26) 諸岡利幸・蔵治光一郎・鈴木雅一. 2002. サラワク・ランビル国立公園における降雨と風向・風速の日周変動特性, 水文・水資源学会 2002 年研究発表会要旨集, pp.228-229.

(H15)

海外

- 1) Yoshimura M., Yamashita M. 2003. Spatial Understanding for Ecological Functions in Tropical Rainforest - Canopy Access System and Its Capability -, Awaji symposium, Hyogo, Japan.
- 2) Nakashizuka, T. 2003. Canopy biodiversity Research in Lambir Hills National Park, Sarawak. BBEC International Conference 2003, p. 15.

国内

- 1) 田中憲蔵・市榮智明・北橋善範・小池孝良・米田令仁・二宮生夫. 生育段階の異なるフタバガキ科 5 樹種の光合成特性と葉の形態. 第 13 回日本熱帯生態学会. 鹿児島大学. 2003.
- 2) 市榮智明. フタバガキ科巨大高木の繁殖に対する資源投資. 第 13 回日本熱帯生態学会. 鹿児島大学. 2003.
- 3) 市岡孝朗 (名古屋大学大学院生命農学研究科) ボルネオの熱帯雨林における昆虫群集動態調査. 日本進化学会第 5 回大会 公開講演会「生物多様性研究 - 世界のフィールドから-」(日本進化学会・日本分類学会連合 共催). 福岡, 九州大学箱崎キャンパス. 2003 年 8 月 1 日.
- 4) 斎藤琢・熊谷朝臣・佐藤嘉展・諸岡利幸・Odair J. Manfroi・蔵治光一郎・鈴木雅一 (2003) マレーシア熱帯雨林における二酸化炭素フラックスの長期観測, 日本生態学会
- 5) 酒井, 百瀬, 湯本, 永光, 永益, A. A. Hamid, 中静, 井上, 蔵治 (2003) ボルネオの低地フタバガキ林における繁殖フェノロジーと一斉開花, 日本生態学会
- 6) Hatada, A., Nomura, M., Itioka, T. & Nakashizuka, T. 2003. Diversity of anti-herbivore defense in the genus Macaranga. 第 50 回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 89.
- 7) Murase, K., Itino, T. & Itioka, 2003. T. Mechanism for maintenance of the species-specificity in Macaranga-Crematogaster mutualism. 第 50 回日本生態学会

- 大会講演要旨集 (筑波), P. 89.
- 8) Nomura, M., Itioka, T., Ichie, T. & Nakashizuka, T. 2003. Promotion and maintenance of biodiversity through defense strategies of the genus Shorea. 第50回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 89.
 - 9) Ichie, T., Koike, T. & Ninomiya, I. 2003. Dynamics of the storage for reproduction of tropical emergent trees, Dipterocarpus tempehes and Dryobalanops aromatica. 第50回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 89.
 - 10) Nakagawa, M., Miguchi, H., Itioka, T. & Nakashizuka, T. 2003. Seed predation and plant reproductive phenology. 第50回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 90.
 - 11) Kaliang, H., Sakai, S. & Itioka, T. 2003. The population of the honeybee (*Apis dorsata*) responds to the reproductive phenology of trees in a tropical lowland dipterocarp forest: does the bee promote the supraannual community-wide mass-flowering there? 第50回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 90.
 - 12) Kenta, T., Isagi, Y., Nakagawa, M. & Nakashizuka, T. 2003. Significance of the avoidance of inbreeding for a tropical emergent: timing and intensity of inbreeding depression derived from selfing and biparental inbreeding. 第50回日本生態学会大会講演要旨集 (筑波), P. 90.
 - 13) Nomura N., Hatada A. & Itioka T. 2003. Intra- and interspecific variations in the balance between ant and non-ant defenses in *Macaranga*. IUFRO (International Union of Forestry Research Organization) International Symposium "Forest Insect Population Dynamics and Host Influences". Kanazawa Citymonde Hotel, (金沢).

ポスター発表

(H12)

海外

- 1) Nakagawa, M., Nakashizuka, T., Itioka, T., Momose, K. & Kaliang, H. 2000. Synchronous seed production among three genera of Dipterocarpaceae in a lowland tropical rainforest: A test of post-pre-dispersal predator satiation hypothesis. Abstracts, 43rd symposium of the International Association for Vegetation Science, p. 132.
- 2) Kurokawa, H., Nakashizuka, T., Yoshida, T., Nakamura, T. & Lai, J. 2000. The age of a rain forest canopy tree, Borneo Ironwood (*Eusideroxylon zwageri*), determined by ¹⁴C analysis. Abstracts, 43rd symposium of the International Association for Vegetation Science, p. 137.

国内

- 1) 箕口秀夫・佐藤香織・中川弥智子・中静透. 2000. 低地フタバガキ林における齧歯類群集の動態と空間利用. 第47回日本生態学会講演要旨集, p. 237.
- 2) 黒川紘子・中静透・吉田俊也・中村俊夫・Julaihi Lai. 2000. ¹⁴Cによるボルネオテツボクの樹齢解析. 第47回日本生態学会講演要旨集, p. 213.
- 3) 中川弥智子・市岡孝朗・百瀬邦泰・Het Kaliang・中静透. 2000. 東南アジア熱帯林における種間の結実同調は散布前捕食者飽食仮説で説明しうるか? 第47回日本生態学会講演要旨集, p. 254.

(H14)

海外

- 1) Ichie, T., Nishimura, K., Ninomiya, I., Koike, T. and Nakashizuka, T. (2002) Flushing mechanism for a tropical canopy tree, *Dipterocarpus pachyphyllus*. 3rd International Canopy Conference. Australia, Cairns.

- 2) Tohru Nakashizuka 2002 Spatial Heterogeneity in biomass dynamics estimated by canopy height profile. 3rd International Canopy Conference, Cairns, Australia.
- 3) Kitahashi, Y., Ichie, T., Maruyama, Y. and Koike, T. Difference of water-use efficiency in the crown of tropical trees. 3rd International Canopy conference (Cairns, Australia, 2002年6月)
- 4) Koike, T. Photosynthetic characteristics of emergent trees in Lambir, Malaysia. 3rd International Canopy Conference (Cairns, Australia, 2002年6月)
- 5) Ichie, T., Kenta, T., Nishimura, K., Ninomiya, I., Koike, T. and Nakashizuka, T. Dynamics of the the storage resource for general flowering process of a tropical emergent tree, Dipterocarpus tempehes. VIII INTECOL(Seoul, Korea, 2002年8月)

国内

- 1) 竹内やよい・田中健太・中静 透. 2002. 花粉・種子散布距離の異なるフタバガキ科4種の空間分布パターン. 第49回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 231.
- 2) 鮫島弘光・永光輝義・中静 透. 2002. 人為攪乱が熱帯林のハリナシバチ群集に与える影響. 第49回日本生態学会大会講演要旨集, 仙台. p. 312.

(H15)

海外

- 1) Kitahashi, Y., Ichie, T., Maruyama, Y. and Koike, T. (2003) Difference of water-use efficiency in the crown of tropical trees. 3rd International Canopy conference. Australia, Cairns.

プレス発表

- 1) 吉村充則. 「地球環境における林冠の役割を明らかに」. 文部科学省プレスルーム, 2003年7月10日

(4) 特許出願 (国内 0件、海外 0件)

なし

(5) 受賞など

受賞

- 1) 野村昌弘・市岡孝朗・市野隆雄 (Nomura M., Itioka T. & Itino T.): Variations in abiotic defense among myrmecophytic and non-myrmecophytic species of Macaranga in a Bornean dipterocarp forest. Ecological Research 15: 1-11. 2000年 Ecological Research 論文賞.
- 2) 酒井章子: 「東南アジア熱帯の低地フタバガキ林における植物の繁殖フェノロジーと植物 - 送粉者相互作用についての研究」第5回(2001年)日本生態学会宮地賞、2001年3月
- 3) 市栄智明: 「熱帯樹木の成長における貯蔵物質の役割に関する研究」. 第6回日本熱帯生態学会吉良賞, 2002年6月.
- 4) 山下恵: 「太陽入射角の季節変化を利用した二方向性反射計測」. 日本写真測量学会平成14年度年次学術講演会論文賞受賞. (社)日本写真測量学会, 2002年7月.
- 5) 東マレーシアにおける熱帯雨林生態研究チーム. 第12回松下幸之助葉の万博記念賞. 2004年3月受賞

新聞報道

- 1) 「熱帯林に巨大クレーン」沖縄タイムス、2000年5月3日
- 2) 「巨大クレーン、密林にニョキッ」岐阜新聞、2000年5月3日
- 3) 「熱帯林に温暖化監視の巨大クレーン」北國新聞、2000年5月3日
- 4) 「密林にニョキッ 80メートルクレーン」神戸新聞 2000年5月3日
- 5) 「巨大クレーンで温暖化監視」南日本新聞、2000年5月3日
- 6) “Canopy findings will help reforestation” The Borneo Post, March 13 2001.
- 7) 「吊臂視察生態」美里日報、2001年3月13日
- 8) 「山林現貌、自然生態」星州日報、2001年3月18日
- 9) “Sarawak’s canopy crane is the first in South East Asia”, ‘Scientist Sakai explores life in Lambir’s forest’ and ‘Remote sensing used to gather data on forest canopy’. Sarawak Tribune. Thursday September 27 2001. OUTLOOK 1-2, Sarawak Tribune, August 30 2001.
- 10) 「東南アジアの熱帯雨林 乾燥すると一斉開花？」朝日新聞 43736号(日刊). 2003年7月11日. 3頁総合.
- 11) 「熱帯雨林謎の現象 . 巨大クレーンで迫るいっせい開花」赤旗(日刊). 2003年8月17日 .
- 12) 「クレーンなど活躍「林冠」研究 . 木の「昼寝」も解明」朝日新聞(夕刊). 2003年8月23日 .

その他

< 雑誌特集記事 >

- 1) 「林冠クレーンが導く熱帯雨林研究の未来」、科学、2001年9月号特集.

< テレビ番組 >

- 1) 「中空の樂園に一億年の共生を見た」テレビ朝日、「すてきな宇宙船地球号」2000年11月5日放映
- 2) 「緑の小宇宙 ポルネオ 森の謎を追え!!」東京放送「世界不思議発見」、2003年6月21日放映
- 3) タイトル未定、東京放送「動物奇想天外、2004年2月22日放映予定

(6) その他特記事項

- 1) 「熱帯雨林が教えてくれた「地球で生きる意味」FRIDAY2001年12月24日増刊号 .
- 2) 稲本正「森の惑星 . マレーシアポルネオ」家庭画報 2001年12月号 376 - 384 .
- 2) 「ジャングルにそびえる世界一のクレーン」 . 5年の学習および6年の学習 2002年5号 , 学習研究社 , pp108-109.