

機関番号：82105

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20770021

研究課題名 (和文) 展葉の不均一性に着目した季節性熱帯常緑林における乾季蒸散量の時系列推定

研究課題名 (英文) Temporal changes in transpiration in seasonal tropical evergreen forest focusing on heterogeneous leaf expanding phenology

研究代表者

伊藤 江利子 (ITO ERIKO)

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・主任研究員

研究者番号：20353584

研究成果の概要 (和文)：乾季と雨季が明瞭に分かれる季節性熱帯気候に生育するカンボジア低地常緑林で、新葉を開く「展葉現象」と葉から水蒸気を放出する「蒸散」の関係を研究した。カンボジア低地常緑林では、乾季に出た新葉が豊富な地下水を使い、乾季中にもさかんに蒸散していた。フタバガキ科大径木は新葉を乾季の始めに出すので、乾季中期に多くの水蒸気を地面から空中へ送り出す役割を果たす。フタバガキ科大径木が失われると森林を巡る水の動きが変わると考えられる。

研究成果の概要 (英文)：This study aims to clarify influence of leaf phenology on water cycle in seasonal tropical evergreen forests. Cambodian lowland dry evergreen forests marked heterogeneous leaf-exchange phenology in space and in time. Peak of leaf exchange was at the early dry season for tall dipterocarp, while at the late dry season for understory tree species. We measured intact leaf stomata conductance of emergent dipterocarp trees. Leaf-expanding *Dipterocarpus costatus* displayed high transpiration potential. The disappearance of the emergent Dipterocarp possibly alters water cycle, in which transpiration, i.e., pumping up groundwater into air, at the mid dry season would decrease drastically.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学・生態・環境

キーワード：生態系

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年急速に減少しているカンボジアの森林は、メコン流域にあるインドシナ半島の水循環において重要な役割を果たしている。水循環の観点から、森林減少の影響を早急に検討する必要がある。

(2) 季節性熱帯の森林水文過程を再現・予測するモデルは数多く発表されているが、それらは常緑林の季節変動を考慮しておらず、常緑種の展葉フェノロジーが蒸散速度に及ぼす影響を反映したものではない。

2. 研究の目的

(1) カンボジアの季節性熱帯常緑林における展葉現象の実態を明らかにする。

(2) 展葉現象と蒸散速度の関係を解明し、乾季蒸散量を広域的かつ時系列的に推定する。

3. 研究の方法

(1) 林冠を構成する常緑樹種の展葉フェノロジーを、目視調査と衛星 NOAA 画像解析 (2001-2002 年) を併用してカンボジア各地で調査した。カンボジアの季節性熱帯常緑林における展葉パターンを類型化した。

また、カンボジア中央部コンポントム州の試験林において、落葉量およびフタバガキ科樹種の落下芽鱗量を測定するリタートラップ法を用いて、林分単位の展葉フェノロジーを調査した。展葉フェノロジーの結果から葉群の葉齢構成を推定した。さらに、(2)の蒸散活性測定対象個体で乾季中の個体葉量を直接観測により調査した。また林分葉量の季節変化を葉面積指数の非破壊的光学推定により明らかにした。

(2) カンボジア中央部コンポントム州の試験林において個葉の蒸散活性を経時測定した。(1)で特徴的な展葉パターンが認められ、かつ林冠を構成する常緑樹種である *Dipterocarpus costatus* を対象とし、2009年12月-2010年2月の乾季期間に推定した。個葉の蒸散活性は簡易蒸散量測定装置 (DECAGON SC-1) で測定できる気孔コンダクタンスを指標として評価した。個葉の経時測定は *D. costatus* の壮齢個体 (DBH=48cm) および若齢個体 (DBH=43cm) 上の個葉 140 枚を対象にのべ 7184 回行った。

(3) 成果の時空間的なスケールアップを図るため、個葉蒸散活性の時間変化と林分葉群動態を統合した乾季蒸散量変化モデルを構築し、高頻度・中解像度の特徴を有する衛星MODISの画像情報を用いた外挿手法を検討した。

解析には東京大学生産技術研究所のウェブサイトよりダウンロードした空間分解能15秒 (約500m)・10日間合成のMODIS画像を用いた。MODIS雪プロダクトで用いられる雲判別アルゴリズムに従い、画像中で雲に相当するスペクトルを示した画素は解析から除外した。フタバガキ科大径木の存在に特徴的な、乾季始期に変動する葉群動態パターンを検出するため、乾季始期 (11-12月) のスペクトル振幅の大きさを示す指標を開発した。指標算出時には期間輝度較差や画素輝度較差を考慮した植生指数補正值を用いた。

高解像度衛星ALOS解析 (環境省 環境総合 B-072) で検出されたコンポントム州の大径木

伐採エリアにおいて、乾季始期の葉群変動性が伐採 (2006-2007年乾季) 前後で変化するかどうか検証した。検証には2005年11-12月、および2008年11-12月に取得された画像を用いた。

さらにカンボジア低地常緑林を対象として乾季始期の葉群変動性の空間分布を広域的に推定した。画像は前項と同様に2005年11-12月、および2008年11-12月に取得された画像を用いた。解析対象域は常緑林地域のうち使用画像 (計12枚) のすべてで雲の被陰が認められなかった画素とした。常緑林地域の判断はカンボジア森林局作成の土地利用図に依った。

4. 研究成果

(1) カンボジアの季節性熱帯常緑林における展葉現象の実態

① 広域的な展葉フェノロジーの不均一性

カンボジアの季節性熱帯低地常緑林では林冠層で優占する樹種によって展葉フェノロジーが異なっていた。カンボジア北西部に位置するシェムリアップ州の環境省バイオマス調査林では *Dipterocarpus alatus* が優占しており、衛星NOAAによって取得されたNDVIの季節変化を解析した結果では、乾季の前半に落葉する傾向を示していた。同様にカンボジア南東部のモンドルキリ州の環境省保全林では *Dipterocarpus dyeri* が優占しており、この地域は乾季の前半に落葉する傾向と乾季の後半に2回落葉する傾向が隣接した区域に該当していた。カンボジア中央部に位置するコンポントム州では *Anisoptera costata* および *Dipterocarpus costatus* が優占しており、衛星NOAAのNDVI解析では乾季の前半に落葉する傾向と乾季の後半に2回落葉する傾向が卓越していた。この傾向はカンボジア中央部に広範に認められ、この地域に残存する季節性熱帯低地常緑林にフタバガキ科大径木が数多く残存していることが示唆された。このように衛星観測によって展葉フェノロジーの空間的不均一性が把握可能であり、優占樹種の予測にも応用できることが示された (図1)。一方で、コンポントム州の谷頭部湿地林で優占する *Myristica iners* は乾季の終わりに一斉に落葉するものの落葉量が隔年結果と連動して大きく変動する傾向を示していた。このような葉群動態において年々変動を示す樹種の存在は衛星解析の解釈において留意する必要がある。

低地常緑林の優占樹種における落葉の程度と落葉期間の長さも樹種ごとに違いが認められた。*Dipterocarpus intricatus*, *Sindora siamensis* (Leguminosae) はほぼ全木的に落

葉し、落葉状態も1週間程度認められた。*Anisoptera costata*、*Dipterocarpus costatus*、*Irvingia malayana* (Irvingiaceae)などでは、枝条に葉が多少残り、また落葉期間と展葉期間が重なるために落葉状態が明瞭でない。乾湿が著しい貧栄養地でしばしば認められる*Dipterocarpus obtusifolius*、*Parinari annamensis* (Rosaceae)では落葉程度はさらに少なかった。このような落葉の程度と期間の不均一性は衛星解析結果の解釈にも影響を与える。頻繁に用いられる10日間合成画像は期間中の最大輝度値を合成するため、落葉状態は過小評価となりがちである。

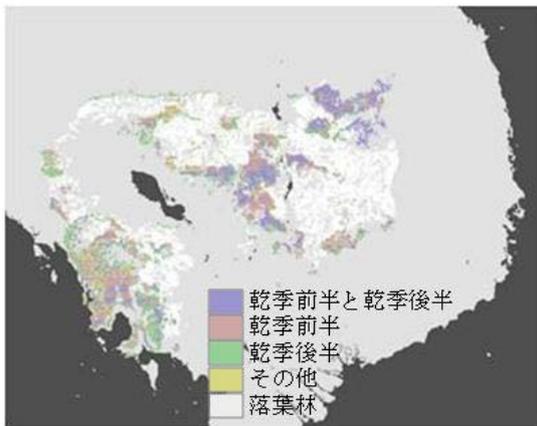


図1: 衛星NOAAのNDVI解析により推定したカンボジア常緑林の落葉フェノロジーパターン広域分布図。灰色部はカンボジア国外もしくは森林以外。

② 局所的な展葉フェノロジーの不均一性
調査地で卓越する林冠構成種であり、伐採対象樹種でもあるフタバガキ科大径木の*Anisoptera costata*は乾季の前半に落葉し、*Dipterocarpus costatus*は乾季の前後半に2回落葉する傾向が現地調査で認められた。この結果は衛星解析結果と矛盾しなかった。これらのフタバガキ科大径木とその他の中・下層木では展葉時期が異なっていた(図2)。中層木にはフタバガキ科の*Vatica* sp.なども含まれるが展葉時期のピークは全く異なり、乾季后半に落葉・展葉していた。

このようにカンボジアの季節性熱帯低地常緑林では林冠層で優占する樹種と中下層で優占する樹種の間で展葉フェノロジーが異なっており、林冠層優占種が択伐された場合には林分単位の葉群動態フェノロジーが大きく変化することが示唆された。

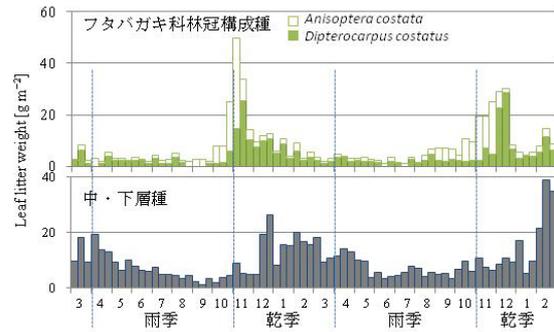


図2: カンボジア低地常緑林における落葉フェノロジー。上図: フタバガキ科林冠構成2種、下図: その他の中・下層種。

(2) 林冠構成種*Dipterocarpus costatus*における蒸散活性と葉齢の関係

経時測定に先立ち、個葉蒸散活性評価に用いた簡易蒸散量測定装置(DECAGON SC-1)の精度検定を行った。検定は乾季始め(2009年11月)の現地にて多樹種の切り枝を用いた光合成測定装置の標準機種(LI-COR, LI-6400)測定結果(田中ら unpublished)との気孔コンダクタンス値の比較によって行った。両者の相関係数は高くない($R^2=0.35$)ものの、蒸散活性の高低を示唆しようと判断した。

展開した新葉の蒸散活性は展葉後10-40日目で高かった。30-40日目に最大となった後、60日目以降は最大活性の40-50%程度で推移した。

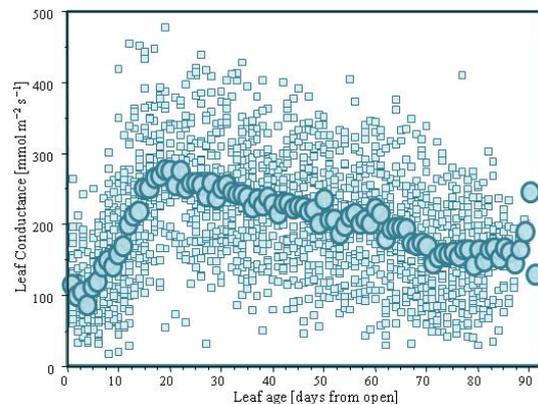


図3: 葉齢(x)に対する気孔コンダクタンス(y)の関係。気孔コンダクタンスは蒸散活性の指標として用いた。□:測定値、○:各葉齢の平均値。

調査対象となった*Dipterocarpus costatus*の林冠には、間歇的な展葉現象を反映して葉齢の異なる個葉が混在していた。枝単位の蒸散活性が最も高かったのは11-12月に展葉した新葉の活性が高まる12月であった(図4)。2月末日の測定終了時には展葉間近の葉芽が樹冠上に認められ、3月下旬から4月上旬に掛け

て、樹冠の蒸散活性が再び高くなることが予想された。

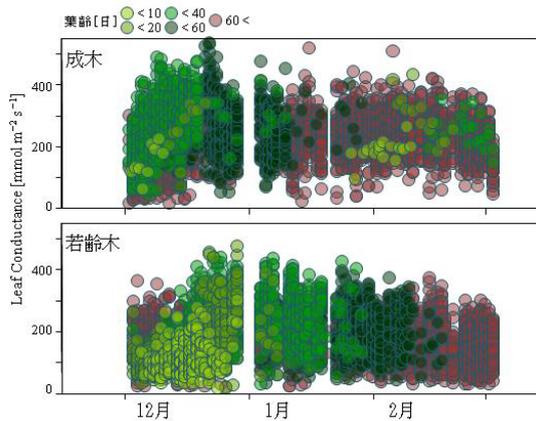


図4: 気孔コンダクタンスの季節変化。上図: 成木、下図: 若齢木。シンボルの色は葉齢を示す。

(3) 個葉蒸散活性の時間変化と林分葉群動態を統合した乾季蒸散量変化モデル

以上の結果を踏まえて、カンボジア低地常緑林における葉群フェノロジーに起因する乾季蒸散量変化をモデル化した。

カンボジア低地常緑林は大量の地下水が貯留・供給される厚い土層上に成立するため、乾季中でも水分条件に著しい制約が掛からない。個葉蒸散量は気象条件（飽差）と個葉蒸散活性（気孔コンダクタンスで指標）に依存すると考えられる。個葉蒸散活性は展葉後の成熟に伴って急速に高まったのち漸減するため、樹冠葉群の展葉フェノロジーが林分蒸散量の時系列変動に大きく影響すると推察される。

林分蒸散量は個葉蒸散量に加え、個葉存在量にも左右される。しかしながら乾季中の個体葉量と林分葉量はほぼ一定であった。個体蒸散量（林分蒸散量）は個体葉量（個体蒸散量）の影響を受けず、個体内の葉齢構成（林分の葉齢構成）を反映すると考えられる。

フタバガキ科大径木が卓越する林分では展葉は乾季前半と後半に起こるが、フタバガキ科大径木を欠く林分では展葉は乾季後半に集中する（①②）。このためフタバガキ科大径木が残存する高蓄積で多層構成の保全林分では乾季前半と後半に蒸散量が増加するが、択伐等によりフタバガキ科大径木が欠損した低蓄積で単層～2層構成の二次林では乾季前半の蒸散増加を欠くと推測される。

(4) 葉群動態特性を利用した森林劣化による乾季蒸散量変化の広域推定

カンボジアの森林面積は1990–2000年の10年間で年平均5%の速度で減少している（FAO,

2009）。カンボジアの森林を巡る社会的情勢の変化は著しい。研究期間内に限っても、調査地近傍の森林で中国の経済成長を見越したゴム植林やバイオエタノール原料の需要増によるキャッサバ畑への土地利用転換（森林減少）が大面積で進行し、更には木材利用のためのフタバガキ科大径木の集中的な択伐（基本的には違法伐採）が行われている。フタバガキ科大径木の消失による森林劣化が進行すると、中・下層樹種のみから構成される林冠層では従前はフタバガキ科大径木によってもたらされていた乾季始期の落葉・展葉がなくなり、乾季始期の葉群動態が停滞する。葉群動態の振幅を評価する指標を開発し、伐採前の2005年と伐採後の2008年を比較した（図5）。雲被陰によるデータ欠損のため、年度間での指標値の比較や伐採数との相関解析はできなかったが、伐採が相当数認められたエリアでフタバガキ科大径木の存在可能性が相対的に低減しており、該当地域で乾季始期の蒸散量が低下したことが推察される。

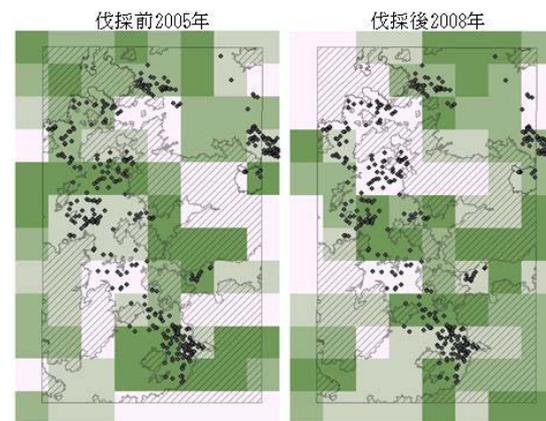


図5: 大径木伐採地域における伐採前後の乾季始期(11-12月)葉群動態指標。左図: 伐採前2005年、右図: 伐採後2008年。緑色が濃いセルほど植生指数の振幅が大きく、フタバガキ科大径木の存在可能性が高いことを示す。ただし指標は各解析年内における相対値。セルサイズは約500m角。円形シンボルは高解像度衛星画像ALOS/PRISMの解析で検出された2006-2007年の大径木伐採位置。枠はALOS/PRISM解析範囲、そのうち斜線部は雲被陰のため解析対象外。

カンボジア低地常緑林における葉群動態指標を広域的に推定した。年度間比較による時系列解析を可能にするため、データ欠損のない画素のみを解析対象とした。指標値は2005年の方が概して高く、活発な乾季始期の蒸散が示唆された。局所的には2008年で指標値の増加が認められたが、ベトナム国境地域のゴ

ム林地域に該当しており、適切な解釈のためには現地確認が必要である。

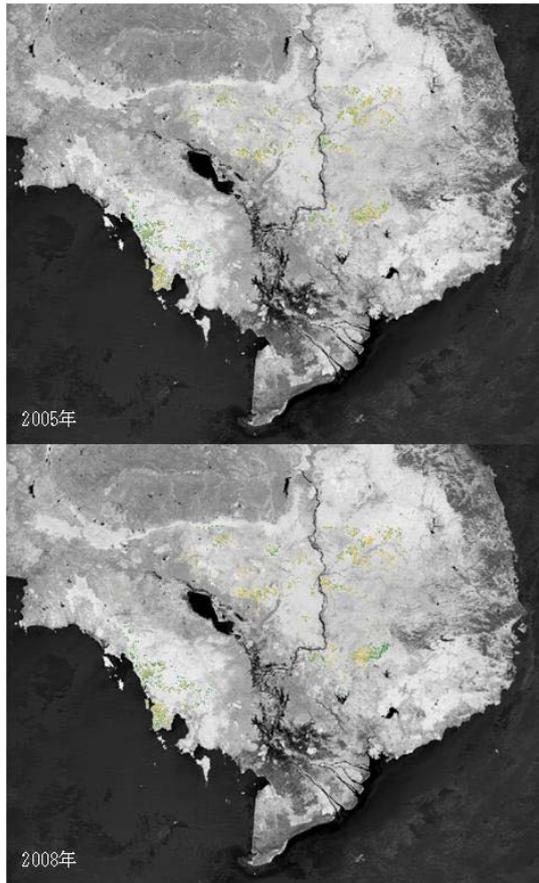


図 6: カンボジア低地常緑林における葉群動態指標の広域分布図。左図: 2005 年、右図: 2008 年。緑色が濃いセルほど乾季始期の蒸散が活発であると推察される(図 5 凡例も参照)。データ欠損のない画素のみを解析対象としたため、指標値の年度間比較が可能。背景は乾季 NDVI 値。白いエリアが常緑林。撮影日は 2007 年 12 月上旬。

(5) まとめ

本研究は常緑林の葉群動態フェノロジーに乾季蒸散量が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。フタバガキ科大径木の欠損を伴う森林劣化によって、乾季の蒸散パターンが変化していることが推察された。蒸散パターンの変化が大気水循環を通じて地域気象に与える影響や、林分蒸散量の減少が地下水資源に与える影響を検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

① Akihiro Tani、Eriko Ito、Masahiro Tsujino、Makoto Araki、Mamoru Kanzaki、Threshold determination by reference to

open sky overcomes photographic exposure error in indirect leaf area index estimation、*Japanese Journal of Forest Environment*、査読有、in press (掲載確定)

② 清水晃、伊藤江利子他 (19 人中 11 番目)、カンボジアの森林流域における水資源量—国際河川メコン川下流域における森林流域水資源量及び季節変動—、*森林総合研究所第二期中期計画成果集*、査読無、2011

③ Eriko Ito、Naoyuki Furuya、Bora Tith、Samkol Keth、Sopha Chann、Mamoru Kanzaki、Yoshio Awaya、Kaoru Niiyama、Yasuhiro Ohnuki、Makoto Araki、Tamotsu Sato、Mitsuo Matsumoto、Yoshiyuki Kiyono、Estimating diameter at breast height from measurements of illegally logged stumps in Cambodian lowland dry evergreen forest、*JARQ*、査読有、44 巻、2010、435-446。

④ 清野嘉之、松本光朗、佐藤保、高橋與明、伊藤江利子、古家直行、栗屋善雄、REDD+ 実現のため、衛星リモートセンシングと地上観測を組み合わせ、熱帯林からの炭素吸排出量をモニタリングする、*森林総合研究所平成 22 年度研究成果選集*、査読無、2010、12-13。

⑤ 荒木誠、伊藤江利子、カンボジア中央部の平坦な低地に成立する乾燥常緑林とその立地環境、*森林立地*、査読有、51 巻、2009、1-11。

⑥ Tatsuhiko Nobuhiro、Akira Shimizu、Katsunori Tanaka、Koji Tamai、Naoki Kabeya、Eriko Ito、Takanori Shimizu、Makoto Araki、Sopha Chann、Evapotranspiration characteristics of a lowland dry evergreen forest in central Cambodia examined using a multilayer model、*Journal of Water Resource and Protection*、査読有、1 巻、2009、325-335。

⑦ Eriko Ito、Makoto Araki、Bora Tith、Sopheavuth Pol、Craig Trotter、Mamoru Kanzaki、Seiichi Ohta、Leaf-Shedding Phenology in Lowland Tropical Seasonal Forests of Cambodia as Estimated From NOAA Satellite Images、*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*、査読有、46 巻、2008、2867-2871。

[学会発表] (計 7 件)

① 伊藤江利子他 (9 人中 1 番目)、リター除去が表層土壌の炭素貯留量に及ぼす影響、第 12 回日本森林学会大会、2011 年 03 月 26 日、静岡大学 (静岡市)

② Eriko Ito et al. (6 人中 1 番目)、Temporal changes in stomatal conductance of leaf expanding Cambodian evergreen emergent dipterocarp、*日本生態学会第 58 回全国大会*、2011 年 03 月 09 日、札幌コンベンションセンター (札幌市)

③ 延廣竜彦、伊藤江利子他(10人中6番目)、多層モデルを用いて検討したカンボジア低地常緑林における蒸発散特性、第121回日本森林学会大会、2010年04月04日、筑波大学(つくば市)

④ 飯田真一、伊藤江利子他(10人中8番目)、カンボジア国低地乾燥常緑林における蒸散活動の種間差、第121回日本森林学会大会、2010年04月04日、筑波大学(つくば市)

⑤ Shin' ichi Iida, Eriko Ito et al. (10人中8番目)、Differences in seasonal courses of transpiration among several evergreen-broadleaf species in Kampong Thom, Cambodia, International Workshop on Forest Research in Cambodia 2009、2009年11月25日、JICA研修センター(カンボジアプノンペン)

⑥ Shin' ichi Iida, Eriko Ito et al. (10人中8番目)、Transpiration activities of evergreen trees in central Cambodia: abrupt changes revealed by sap flow, Asia Flux Workshop 2009、2009年10月27日、北海道大学開学100年記念会館(札幌市)

⑦ Eriko Ito et al. (4人中1番目)、Nutrient supply by biennial fruiting Myristicifers to the Cambodian lowland evergreen forest、日本生態学会第56回全国大会、2009年3月19日、岩手県立大学(滝沢村)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 江利子 (ITO ERIKO)

独立行政法人森林総合研究所・北海道支所・主任研究員

研究者番号：20353584