

カンボジア平地熱帯季節林の環境に関する研究

清水 晃

1. はじめに

カンボジア国は、インドシナ半島南部に位置し、チベット高原を源とする東南アジアで最長の国際河川であるメコン川下流域の国である。国際河川であるメコン川下流域の水資源管理等に関わる政府間組織は、1957年に旧メコン委員会として設立され、1995年にメコン川委員会（MRC）として再発足して活動を継続している。一方、カンボジア国における流域の主要な土地利用である森林に関する調査・研究は、我々が研究プロジェクトを開始した2002年の段階では、フランス統治下の影響が残っていた内線前までの調査を含めてほとんど実施されていなかった。このような事情から、この地域はデータ空白域と言われており、様々なスケールの気候・気象・水循環モデル等やリモートセンシング解析に対して検証可能な地上データの無い地域であった。このデータ空白域に対して森林環境に関する地上データの充実を図り、持続可能な森林管理に資するためにさまざまな研究プロジェクトを推進した。研究開始に当たり、カンボジア森林局と合意書を締結し、協力・連携して研究を進めることで地上データを取得する観測サイト選定・設営を円滑に行うことができ、多くの困難な問題を克服して現在まで約10年間にわたり研究を継続している。

参画した主な研究プロジェクトは、2002年に開始した文科省のRR2002プロジェクト「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変

化予測モデルの開発」、2003年開始の農水省プロジェクト「地球規模水循環変動が食料生産に及ぼす影響の評価と対策シナリオの策定」、2008年開始の環境省プロジェクト「メコン中・下流域の森林生態系スーパー観測サイト構築とネットワーク化」等である。

常緑林に関する初期の研究成果についてはプロジェクト成果を中心に公表されているので^{1,2)}、本稿では全体の研究概況とともに落葉林流域の調査・研究を中心に常緑林との比較などの成果を説明する。これらの成果は、研究プロジェクトに参画した森林総合研究所をはじめ、東京大学、名古屋大学、京都大学、筑波大学などの多くの研究者およびカンボジア森林局の研究者による共同研究の賜である。

2. 試験地の概要と観測システム

研究対象地域は、図1のようにメコン川本流の東西にほぼ同緯度の流域を選定し、植生の分布に応じて西側のコンポントム州に常緑林流域、東岸のクラチエ州に落葉林流域を設定した。常緑林流域は、入れ子を含む4流域（流域面積4~3659km²）から構成され、落葉林流域は大流域1カ所（流域面積2245km²）である。

この流域の中に、高さ60m（常緑林）および30m（落葉林）の森林気象観測タワー（写真1および図2参照）を建設し、大気平均値系のデータや乱流変動観測による森林と大気との様々なガス交換過程の解析を実施している。さらにタワーサイトを中心に遮

断観測による降雨の配分や土壤水分変動，樹液流計測などの各種個別水文現象の観測も継続している。これらの観測地点を含む森林植生の分布や生理特性および土壌型・土層厚等に関する森林立地特性の研究を数 ha 規模のプロットを設定することにより実施し，基盤となる森林の実態について詳細に調査研究している。加えて，より広域の森林変動を衛星観測データから把握する準リアルタイムの全自動処理システムを開発し，500 m メッシュ単位で森林生態系の変化把握を継続するシステムを開発した。

平地熱帯季節林流域の水環境観測システムの構築

平地熱帯生態系成立の重要なファクターである総合的な水環境をモニタリングし，その特性を解明するために，カンボジア国の主要森林タイプである常緑林と落葉林を対象に，森林気象総合観測タワーを中心とする森林水循環観測システムを構築した。森林気象要素としては，日射量や長波放射量などの放射測定や3杯風速計，風向計などによる風向・風速測定，温度・湿度・気圧・地中熱流量などの一般気象要素測定をさまざまな高さで実施し，乱流観測は超音波風速計や湿度変動計，二酸化炭素変動計，メタン変動計などを組み合わせてタワー上部に設置するとともに，下層植生対象の観測など目的に応じて比較的低い位置にも設置した。一般気象および乱流変動計測はそれぞれ対応するデータロガーに時間解像度に応じてデータ集積した。さらに，土壤水分変

動や浅層および深層地下水の水位，地温変動などもデジタルデータとしてロガーに収録することとした。また，個別樹木の蒸散量推定のためグラニエ法による樹液流速測定を行い，対象木にセンサーを設置して計測を行った。

降水量は遮断雨量の解析に使用する直近のオープンスペースに基準の雨量計を設置して測定したが，流出解析のために可能な範囲で流域内にできるだけ多数の雨量計を配置した。遮断雨量解析のための機器も多数の対象木に取り付けた。このようなセンサーやデータロガーには電源が必要であるが，本地域のような山間部には当然 AC 電源は整備されていない。したがって，ソーラーパネルとバッテリーを組み合わせた電源供給システムを設計し，すべての供給電力をまかなっている。これらのタワーおよびプロットサイズの観測に加えて流域単位での水流出解析を行うために，対象河川の流域出口部分で水位観測を行い，流出量を圧力式水位計とブザー式水位計を併用して継続的に取得した。測定ポイントは，河道断面が土砂の堆積・浸食により変化せず，洪水時でも比較的安定した流れを維持できる地点を選び，河道断面測量および流速分布調査を行って水位-流量曲線を作成し，流量データを取得した。また，安定同位体解析による流域の水通過時間を推定するために，人力による採水と1日1回の水位計測も平行

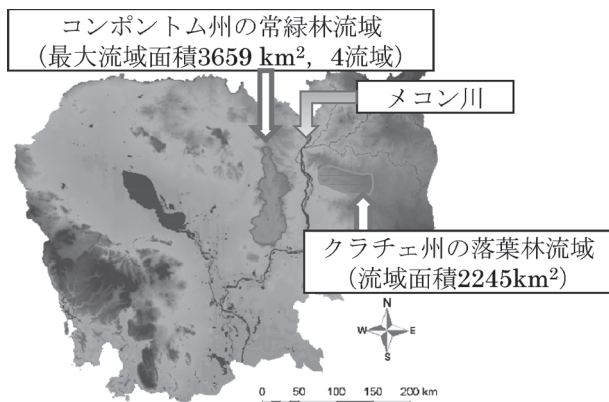


図 1 常緑林流域と落葉林流域の位置図



写真 1 常緑林（左：高さ 60 m）と落葉林（右：高さ 30 m）に建てた森林気象観測タワー

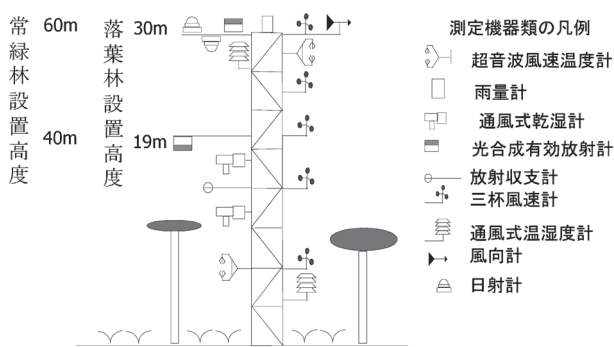


図 2 タワー観測模式図

して行った。

これらの施設は、現地住民にとっては初めて見るもので、森林地帯の中に急に作られて観測活動が開始されることから不測の事態も予想されるため、次のような周知活動を行った。施設を設置した常緑林、落葉林ともに本格的な観測開始前に、各地域の長を含む多数の現地住民（子供含む）や各種現場行政官などにタワーサイトに集まって頂き、農林省の副大臣や森林局長、対象地域の知事等関係組織長から研究プロジェクトの目的や成果の意義などを十分に説明するタワー観測式典を開催し、地域の協力・連携により破壊やいたずらなどの防止、安全な施設の管理に努めることとした。このような活動の結果、本プロジェクトでは人為的な施設の被害はほとんどなく、維持管理が行われている。

熱帯季節林生態系の種多様性と立地環境に関する調査観測プロットの設置

常緑林サイトにおける調査研究と同様に、落葉林地帯に構築された上記水環境観測サイトを包含するように4ha固定試験地を設置し、立地環境情報と植生情報を組み合わせた熱帯季節林生態系データセット作成や特性評価のために植生・土壌に関する精密調査を行った。対象とする落葉林に設定した200m×200mの4ha植生調査プロットにおいて、植生の広域精密調査を10×10mプロット400箇所で行い、樹種組成・樹木密度・樹高・胸高直径・胸高断面積合計・植被率等を測定した。試験地の葉群動態を明らかにするため、葉面積指数（LAI）の光

学的非破壊測定を毎月1度行った。また、同サイト内で掘削した幅2×2mの大型土壌断面を深さ2mまで掘削し、土壌断面観察および記載を進めた。本落葉林地帯の土層厚分布を把握するために4ha固定試験地内および周辺地域で簡易貫入試験による土層厚測定を行い、樹高や微地形との対応関係を検討した。

また、常緑林における林分レベルの生理特性を解明するために、樹高30m以上の林冠木から林床の低木まで様々な樹種の葉の光合成速度、窒素濃度、形態を測定し、林分レベルでの生理特性の解明を進めた。林床から林冠までの高さ0.8m～33mまでの18樹種24個体の葉を採取し、光合成に関する柵状組織やククチラ層の厚さ、気孔サイズと密度、葉面積あたりの葉重（LMA）、窒素・炭素濃度、葉の炭素安定同位体比、および葉の光合成・呼吸・蒸散速度を測定した。

衛星観測による森林環境情報の準リアルタイム取得処理システムの開発方針

タワーを含む地上での森林観測は、時々刻々森林生態系の活動を記録しているが、そのデータは森林の季節的変化や開発による変化などの影響を受けている。そのため、観測サイト周辺の森林生態系の質的な変化を把握しておくことは不可欠である。しかし、毎日継続している地上計測のタイムスケールと同程度で森林変動をとらえることは極めて困難であった。そこで、衛星観測データから森林開発状況や環境パラメータの変動を把握する準リアルタイムの全自動処理システムを開発し、メコン中・下流域における継続的な地上観測と同期できるように、500mメッシュ単位で森林生態系の変化把握を継続するシステムを開発することを目的とした。メコン中・下流の全域を高頻度に観測できるMODISの人工衛星データから森林伐採や火災等による森林開発状況を準リアルタイムで把握するための一連の処理手法を開発した。開発したシステムを計算機システム上に実装し、近年の森林変化把握を自動的に継続することとした。

3. 成果の概要

平地熱帯季節林流域の水環境観測システムによる研究成果

水流出量については、落葉林流域では常緑林流域とは異なり、乾季末に河川水量がほとんど停止あるいは極めて少なくなるという特徴が観測された。一方、流出量に影響する蒸発散量については、常緑林流域では季節変化が少なく安定しているが、落葉林流域では乾季と雨季の間で明瞭な違いが認められた。この流出量と蒸発散量解析から、乾期になると落葉林流域では土層が非常に薄いため、貯留される水分が極めて少なくなり、河川流出や蒸発散に供給する水量を賄うことができなくなると考えられた。したがって、当該地域の森林タイプを支配する主要な要因として土壌特性の中でも特に土層の厚さに起因する乾季土壌水分状態が抽出された。また、常緑林では観測データセットに基づいて、蒸発散量、気象要素から算出した可能蒸発散量および地下水位の月平均量を2004年～2007年の4年間にわたって比較した。その結果、常緑林の厚い土層は大量の水を保持することにより乾期においても蒸発散の制限はほとんど発生せず、植生の維持と周辺環境の安定化のためのバッファの役割を果たしているものと推察された。これらの結果に関連の個別水文現象（遮断蒸発、土壌水分、浅層地下水、安定同位体解析、樹液流に関する研究など）の研究成果も整合的に得られている。

熱帯季節林生態系の種多様性と立地環境に関する研究成果

落葉樹サイトの調査により、落葉性のフタバガキ科・シクンシ科樹種が優占するプロットの樹木密度は 538 tree ha^{-1} 、胸高断面積合計は $13.3 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ 、平均樹高は 8.7 m、最大樹高は 27.1 m、出現樹種数は 46 種と確認された。また、微地形測量により作成した DEM を使用して下層植生と微地形との間には明瞭な対応関係を確認した。さらに、落葉林の植生の特徴を葉群動態に注目して明らかにした。優先

樹種であるフタバガキ科個体間および樹種間の落葉期間のずれにより、林分としての完落期間は存在しないことが確認された。落葉林の下層植生の LAI は上層植生の 3～5 倍存在し、生態系水循環の駆動力として重要な存在であることがわかった。一方、落葉林の LAI は上層+下層で常緑林の LAI とほぼ同等となることが、クラチエ、コンポントム両サイトでの測定値から明らかになった。

常緑林の葉の LMA、クチクラ層、表皮層は樹高に従って増加したことから、林冠層の葉は高い耐乾性を持ち、林冠層の高温・乾燥環境に順応していると考えられた。一方、葉の光合成速度は林冠層で低下しており、葉の光合成速度と気孔コンダクタンスには強い正の相関が見られたことから、林冠層での光合成速度の低下は気孔制限によるものと考えられた。一方、林冠層での気孔コンダクタンスの低下は、林冠層での葉の水利用効率を増加させ、耐乾性を高めるのに貢献していることも明らかになった。以上から、カンボジア熱帯常緑林では、樹木の葉は垂直方向に大きく変わる環境に対して、形態と機能の両面を変化させることで順応していることが明らかになった。

データセットの作成

上記の常緑林流域と落葉林流域における観測により蓄積した水文や森林環境のデータを整備し、データセットを作製し、衛星解析等も含めて森林総合研究所の Website で公開した。プロジェクト Website <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/cwcm/index.htm>

衛星観測による森林環境情報の準リアルタイム取得処理システムの開発

本課題ではまず、季節変化を含む森林の変化を準リアルタイムで捉えることを可能にするアルゴリズムを開発した。MODIS データ（空間分解能 500 m）の記号列処理による離散の状態空間モデルを利用した異状検知法を開発することで、森林開発地を適切に抽出することができた。さらに、衛星観測データから森林開発状況や環境パラメータの変動を把握する準リアルタイムの全自動処理システムを計算機シ

システム上で実装するために、ハードウェア、ソフトウェアのシステム化を行った。その結果、森林開発状況を MODIS データから準リアルタイムで把握するシステムを PC 上で実装することができた。このシステムを運用して、森林開発地の抽出処理の堅実性を確認し、全処理をスクリプト化して自動化を完了させた。これによってワークステーションレベルの汎用 PC 上で動くソフトウェアとし、準リアルタイムでメコン川中下流域の全域（北緯 5~35 度，東経 90~110 度）を対象とした森林開発監視を可能にした。実際に継続されるモニタリングは、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナムの 5 カ国全域をカバーしている。MODIS を用いたこのような全自動システムは世界初のシステムである。

準リアルタイムシステム Website アドレス <http://157.82.154.31/FDPDS.html>

4. カンボジア社会の発展と今後の研究プロジェクト推進

研究開始当初は、毎回警備の兵隊が同行して試験地での作業を行っていたことを考えると、カンボジアの社会情勢は現在とても安定した環境となることが強く感じられる。プロジェクト期間中に 2 回の総選挙があり、今年も総選挙の年であるが、最初の総選挙前にプノンペンで発生した暴動で滞在したホテルが焼き討ちに合ったことがずいぶん前のことのように思われる。焼き打ち時には、試験地サイトにいて問題は無かったものの、帰国便の飛行機がすべて飛ばなくなるなど現地社会の不安定感はいままでに経験したことの無いものであった。また、試験地サイト周辺では山間僻地における外国人（ゴム農園技師）の誘拐事件（身代金目的ですでにこの地域にもネゴシエーターが存在した）や不満のある地域住民による橋の焼き落としなど（これによって迂回する必要があるため、サイトまでの片道時間が 4 時間 30 分になって毎日サイトまで行くのがとても大変だった）なども発生しており、カンボジア国内の社会情勢が全国的にまだ安定への途上であったことは、今となっては感慨深いものがある。

プロジェクト開始後、2 回目の総選挙以降は徐々に社会的安定が進んでいることが毎回の出張時に感じられ、普通に 4-6 人くらい乗車した 50cc バイクが大量に走っていたプノンペンの町では、今や道路は多くの車でひしめくような状況になり、町中の渋滞も常態化しつつある。このように都市部では、国際社会の支援により、開発・発展が急速に進みつつあるが、いまだ、地方山間部では生活レベルの向上が遅れており、森林地域の開発に期待が持たれているし、急速に増えつつある若い世帯の居住・生活地域としても森林は期待されている。一方、これまで述べたようにカンボジア国はインドシナ半島ではほとんど残っていない熱帯平地季節林が大量に存続しており、これらの森林を無計画に開発されないためにも森林の環境に関する総合的データに基づいた森林管理計画が必要であることは論を待たない。我々が現地研究者と共同で推進している研究プロジェクトは、このような目的に合致した観測システムを有しており、カンボジア国の森林分布の大宗を占める主要な森林タイプである常緑林、落葉林を対象としている。本観測システムのデータはその精度を維持しつつ、欠測無く安定的に取得され、解析することにより、成果を現地に還元するとともにデータ空白域のデータセットとして整備していくことが肝要である。そのためには、現地機関と緊密に連携して観測システムの保全・管理を継続していくことが重要である。

我が国としてもデータ空白域に設置した観測システムを十分に活用し、また維持管理して本地域の発展に貢献することがアジアモンスーン地域の国家としてその責務を果たすことになるだろう。最後に、プロジェクトの安全と成功を祈念して常緑林・落葉林サイトのほぼ中間に位置する有名な寺院にプロジェクト関係者により、仏像を寄進したことも付記しておく。

〔参考文献〕 1) 清水 晃 (2006) カンボジア森林流域における水循環研究について, 山林 1467: 18-27. 2) 沢田治雄 (2007) カンボジア平地林における水循環観測研究, 熱帯林業 69: 2-8