

# カンボジア平地林における水循環観測研究

沢 田 治 雄

## 1. はじめに

メコン川は中国に端を発し、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナムを流れる国際河川であり、その流域はいずれも多民族国家からなっている。歴史的にはヒンズー教の寺院であったアンコールワット遺跡に見られるように、クメール王国などの特有の文化・国家を築き、繁栄していた時代もあった。しかし19世紀にはミャンマー、タイがイギリスの影響を強く受けたのに対し、東部はフランスの影響を受けた。また第二次大戦後に安定した国家とベトナムやカンボジアのように混乱した国家がある。このように複雑な社会的様相を示すメコン川流域において、生活基盤である水資源の管理やインドシナの持続的開発を目的として現在のメコン委員会が1995年に組織された。しかし、中国とミャンマーは加盟していない為、効果的な流域対策に欠ける状態が続いている。

このような状況の中で、メコン全流域の水循環問題に科学的知見を集積するために、文部科学省のプロジェクト「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（主査：山梨大学）」が発足した。平成14年から19年3月まで行われたこのプロジェクトでの森林分野の研究は次の5つの課題で構成されている。森林総合研究所が主査となり、東京大学、名古屋大学、京都大学との共同体制で進められた。

- ① 森林域における雨水捕捉・林地水供給
- ② 森林土壤の保水容量に基づく水資源貯留変動予測
- ③ 森林管理が水蒸気輸送過程に及ぼす影響の解明
- ④ 森林流域における水循環変動予測モデルの開発

---

Haruo Sawada : Observation Study on Forest Water Cycle in Cambodia  
(独)森林総合研究所 研究コーディネータ

## ⑤ リモートセンシングによる森林生態系の水分環境推定手法の開発

### 2. カンボジアにおける地上観測

このプロジェクトではメコン全流域をカバーする水循環モデルに資するため、0.1度メッシュ（約10km四方）での水循環パラメータを作成することも求められた。そのため研究対象流域としては国内研究と比較しても広い流域を対象とする必要があった。そこでインドシナ半島のデータ空白域でもあるカンボジアの中央東部のチニット川流域（流域面積3,659 km<sup>2</sup>）を大流域として選定した。これは南北に長い流域で常緑林を主体とする丘陵林と平地林が広がっている（図1）。この流域内および隣接する流域に詳細観測流域として3つの小流域を設定した。特にそのうちのひとつの流域（オートムI号）を集中観測サイトとした。モニタリング項目は、降水量、流出量、遮断量、蒸発散量、各種気象要素、土壤水分量、浅層地下水位、森林植生、地形、地質、土層厚などであった（図2）。これらにより、地上部と地下部の水分移動状況を降雨によるインプットから流出アウトプットまでのさまざまな過程でモニターすることを目指す。

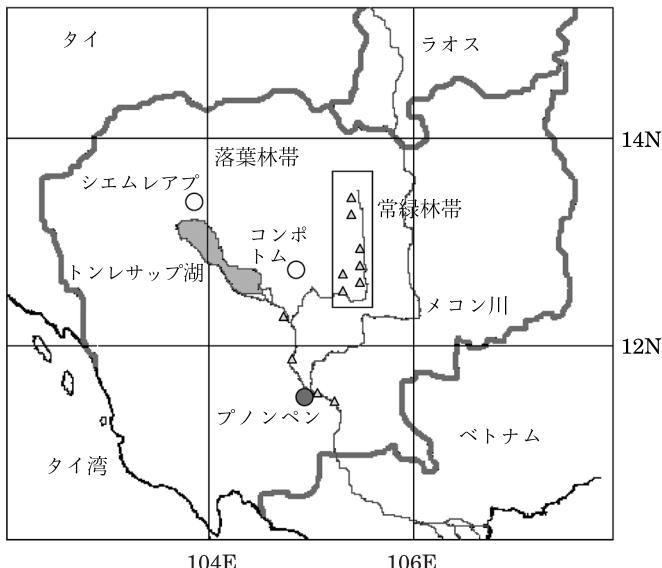


図1 カンボジアにおける地上観測対象地（△、枠内がチニット流域）

した。

平成 15 年には対象とする全ての流域で降水量、流出量の観測を開始した。また対象流域の土壤調査プロット及び飽和帯（浅層地下水）・不飽和帯（土壤水分）の土壤水分観測体制も順次整えた。加えて、同年 12 月には集中観測サイトの常緑林地帯に 60 m の森林気象観測タワーを建設し、隣接する樹冠遮断プロットとともに観測を開始した（写真 1）。この観測タワーではソーラーパネルの導入で観測を安定化させ、落雷や盗難などによる欠測はあるものの、迅速な対応を図ることで最小限の欠測に留めた。また雨量観測サイトを随時追加し、流域内の降水量観測精度の向上を目指した。一方、衛星による季節変化把握のための地上観測地点も平成 14 年から設定しており、カンボジア南部の森林地域でもモニタリングを行ってきた。

### 3. 研究課題ごとの成果

#### 1) 森林域における雨水捕捉・林地水供給

樹種構成、林分構造などから森林タイプ区分を行うとともに、土壤型と土壤特性を調べ、森林タイプと土壤の対応関係を明らかにした。また典型的な森林タイプごとに固定試験地を設定し、葉面積指数（LAI）、土壤水分、地下水位を

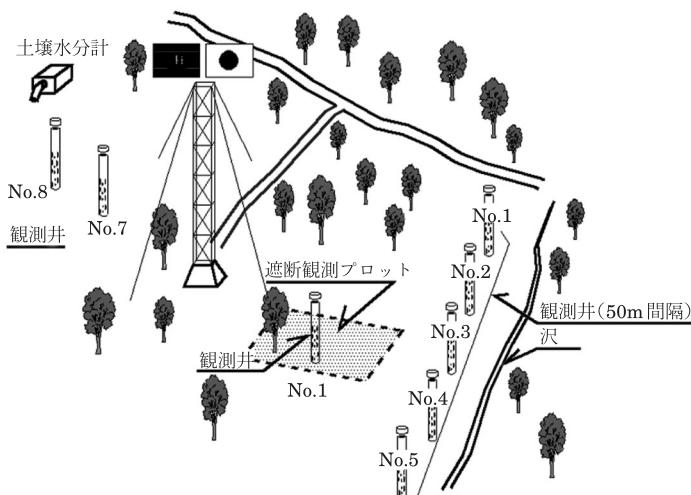


図 2 集中観測サイトの構造

定期的に測定した。

常緑林地帯には、常緑林の他に落葉林および、常緑樹と落葉樹が混生する常落混交林もモザイク状に成立している。このような落葉林は樹種数が少なく密度の低い疎林で、常落混交林は樹種数が多く密度の高い森林である。落葉林では *Dipterocarpus obtusifolius*, 常落混交林では *Dipterocarpus intricatus*, *Syzygium grandis*, *Vatica odorata* などが優占している。常緑林は最も密度が高く、優占種は *Dipterocarpus costatus*, *Vatica odorata*, *Anisoptera costata* などである。常緑林の上層木樹高は概ね 30~40 m で、落葉林は直径、樹高ともに比較的小さく、上層木樹高は概ね 10~20 m である。常落混交林は常緑林ほど大きな樹木はないが、落葉林に比べればやや大きく立木密度も高い。

土壤では、常緑林下には Acrisols が卓越して分布する一方、落葉林下には Arenosols が、常落混交林下には鉄・アルミニウム・腐植が下層に集積した Podzols が、また湿地林下には多量の有機物が蓄積した黒色の Histosols がそれぞれ対応して分布していた(図3)。また、これら土壤間で最も際だって異なる土壤の基本特性は粘土含量であることがわかった。

LAI は季節変動するが、年平均では常緑林で 4.1、落葉林で 0.9 であり、その季節変動幅は森林型の違いに比べれば小さい。また LAI と土壤水分の関係は乾季には正の相関、雨季には負の相関が認められた。

## 2) 森林土壤の保水容量に基づく水資源貯留変動予測

土層厚測定データを蓄積し、地質・土壤型ごとの土層厚分布予測を可能とするとともに、土壤物理性データも加えて保水容量を推定した。特に雨季と乾季に土壤硬度や見かけ上の土層厚が変化することに着目し、水資源貯留の変動特性を把握した。

カンボジアでは地形単位自体が大きな広がりを持ち、日本より少ない土層厚



写真 1 集中観測サイトに建設した気象観測タワー

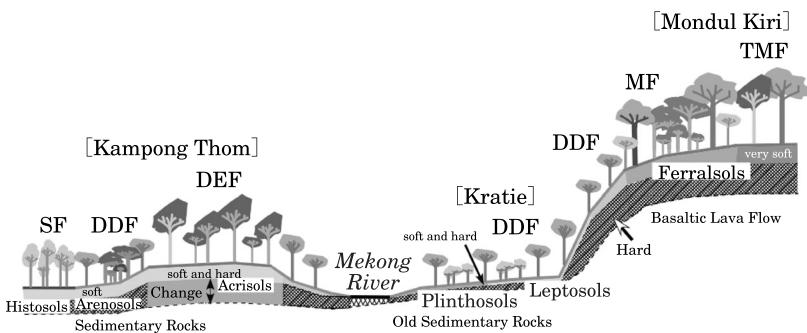


図 3 森林タイプと土壤タイプ  
(SF : 湿地林, DDF : 落葉林, DEF 常緑林, MF : 針広混交林, MDF : 常落混交林)

データで広域の水資源貯留可能量を推定できた。詳細観測流域の常緑林の土層厚は 10 m 以上であるが、有効孔隙率が高くなかった ( $0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) ため、平均の保水容量は 1,131 mm で、中孔隙も有効孔隙率に含めた場合は 2,200 mm 程度であった。落葉林の土層厚は、カンボジア東部のクラチエ州では平均 2.6 m で、北部のモンドキリ州では平均 1.5 m と非常に薄いが、有効孔隙率はいずれも高く ( $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )、平均保水容量はそれぞれ 394 mm と 225 mm であった。

常緑林では深度 9 m 以上まで根系が認められ、地下深部からの水供給によって、乾季があるにもかかわらず常緑林が成立できることが示唆された。水分条件で物理性が大きく変化するシルト質土壌が分布する深度 4 m 以浅では、乾季と雨季で土壌水分と土層硬度に明瞭な変化が認められた。

### 3) 森林管理が水蒸気輸送過程に及ぼす影響の解明

常緑林流域に設置した観測タワーで、森林群落からの年間の蒸発散量変動を明らかにした。同時にポロメータを使用した個葉の蒸散量測定・解析も常緑樹と落葉樹で行い、地面蒸発量および降雨遮断量の測定とともに森林からの蒸発・蒸散に関わる個別要素を明らかにした。

観測タワーでの年間の総蒸発散量は約 1,200 mm であった。乾季の始まり(10月から 11 月頃)の蒸発散量は、その時期でも土壌深部まで十分な水が存在するため、非常に高い値を示した。これに対して雨季の蒸発散量はやや低く、水蒸気飽差や太陽放射量の違いが反映していると思われた。またタイと同様に、乾季の 2 月から 3 月にかけては蒸発散量の増加が見られる。

葉面積指数に現れるような群落構造の違いが浅層土壌の温度や水分環境に違

いをもたらすことがわかった。たとえば深さ 3 cm での地温は常緑林で 23.1～28.0°C、落葉林で 23.1～37.1°C となり、落葉林の最高地温は常緑林より約 9°C 高かった。なお、両森林型の表層付近の土壤水分は雨季には飽和状態に近いが、乾季にはいずれも含水率が 2% 以下に減少し、極度に乾燥する。

#### 4) 森林流域における水循環変動予測モデルの開発

チニット川流域と 3 つの詳細観測流域の流出特性を明らかにするとともに、集水面積が 100 km<sup>2</sup> オーダー（0.1 度グリッド相当）の流域を対象に通年の流出再現計算を行い、地下水位の実測値を用いてモデルの計算結果を検証した。また、安定同位体比をトレーサとしてメコン川とトンレサップ川の合流点の混合過程を明らかにするとともに、4 つの対象流域の流出水と井戸で採取した地下水の平均滞留時間を推定した。

TOPMODEL による流量計算では、全体的には実測値との合致が見られるものの、雨期の初期に生じている流量や地下水位の小さなピークを再現できなかつた。地下水位については、年間の最大値と最小値の範囲は実測値と計算値がほぼ一致したが、通年的に計算値が過小となる傾向が見られた。安定同位体比を用いた調査では、メコン川とトンレサップ川合流点付近で、両河川の河川水はしばらく混合せずに流下している様子や、0.1 度メッシュ相当の流域での平均滞留時間が約 4 ヶ月であることを明らかにした。

#### 5) リモートセンシングによる森林生態系の水分環境推定手法の開発

この研究における最大の特徴は、20 年間にわたる 10 日間隔の植生指数と表層温度の雲無し画像を森林総研のソフトウェア (LMF-KF) で作成して活用したことである。この手法の大きな利点としては、1) 大気・雲などのノイズ軽減効果により地表観測データが得られること、2) 観測センサ間の感度の補正効果により 20 年間のデータ比較が可能となること、3) 時系列観測により位置精度が向上すること、4) 等期間間隔データの生成効果により、ほぼ 10 日間隔と見なせるデータが得られること、5) 時系列モデルパラメータの生成により画素ごとに近未来予測が行えること、などが挙げられる。

これによって 20 年間の森林の成長と劣化の様子が抽出できた。また 20 年間の表層温度の季節変動（10 日間隔）がメコン川流域全体で画素ごとに明らかになり、衛星データによる温量指数で植生環境を類型化できるようになった。さらに、水分指数 (NDII : 近赤外と中間赤外データから作られる葉の水分含有指数 (LWCI) を近似する簡略な指数) をノア衛星で取得される植生指数データと表層温度データから推定する手法を開発し、10 日間隔で 20 年間の水分指数の

変動を明らかにした。物理量としては Mints-Thornthwaite 式により、可能蒸発散量の 20 年間月別データを生成した（図 4）。

#### 4. おわりに

本プロジェクトでは地上観測サイトをカンボジアに設定した。その大きな理由は、アジアモンスーン地帯の代表的な季節林が平地でまだ広く残っていることと、その森林に関する情報がほとんど蓄積されていないことである。特にクメール・ルージュの影響は多くの分野に及ぶが、とりわけ当時の主要な輸出產品であった林産物を生み出していた森林分野への圧力は大きかったといわれ、森林に関する情報は全て失われてしまっている。

本プロジェクトではカンボジア森林局・森林野生生物研究所と森林総合研究所との間で平成 14 年に合意書（Letter of Agreement）を締結して行ってきた。平成 19 年に 5 年間の第 1 期間を終了し、あらためて 5 年間の合意を結び、第 2 期に入ったところである。成果は毎年の現地ワークショップで発表してきたが、それらの活動によって、田中潔、佐々朋幸と筆者はカンボジア国家勲章（友好騎士勲章）を受章した。なお本研究の主要成果は平成 17 年 12 月にプノンペンで開催した IUFRO・森林総研主催の国際研究集会で報告した<sup>1)</sup>。

〔参考文献〕 1) Sawada, H., M. Araki, N.A. Chappel, J.V. LaFrankie, A. Shimizu, Forest Environments in the Mekong River Basin, Springer, 2007

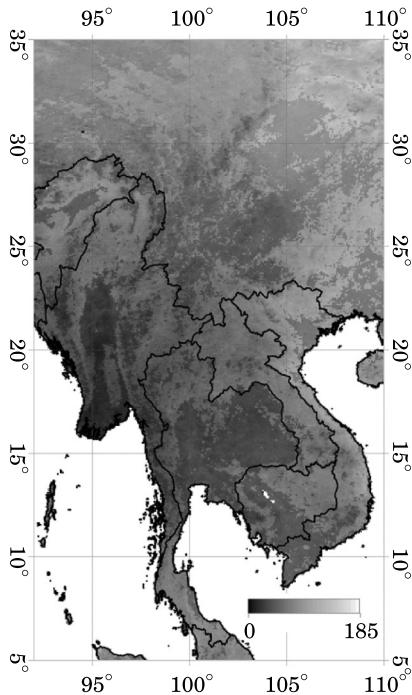


図 4 雨季中期の可能蒸発散量（0～185 mm/月）の推定図（2000 年 7 月）