

「水の循環系モデリングと利用システム」  
平成 15 年度採択研究代表者

鈴木 雅一

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授

熱帯モンスーンアジアにおける降水変動が熱帯林の水循環・生態系に与える影響

## 1. 研究実施の概要

**目的:** 熱帯モンスーンアジアは ENSO など地球規模の気候システムの影響とともに、大規模な森林伐採／土地利用変化との関連も指摘されている地域で、自然や人為による気候変動の実態の解明が急務である。また、降水量変動に伴って生じる水循環の変動と深く結びついた陸上生態系の動態や水資源賦存量の変動の実態が、熱帯アジア域においては未だ明らかではなく、降水変動がもたらす影響を総合的に解明する必要がある。

**方法:** 本研究は、気候・気象学的視点から降水の様々な時間スケールでの変動を明らかにするとともに、降水変動が土壌水分を媒介として陸域水循環や陸上生態系の物質循環に与える影響をタイ、マレーシアにおける現地観測により把握し、これを予測する水循環、物質循環モデルの構築を目指している。

本研究は、Ⅰ) 降水現象の季節性、年々変動機構の解明、Ⅱ) 森林流域での水循環、物質循環研究、の2つの研究グループによりなり、両者の知見を合わせ、Ⅲ) 「降水変動の影響」を解明する。このうち、森林流域での水循環、物質循環研究は、マレーシアの平地熱帯雨林、タイの山地モンスーン林(常緑林)、平地モンスーン林(落葉林)の調査地で、林冠クレーン、微気象観測タワー、流量観測施設などの研究基盤を用いて長期観測資料を取得し、これに基づいた現象の理解と将来予測モデル化を図る。

**結果:** Ⅰ) 降水現象の季節性、年々変動機構の解明では、ミャンマー、ラオス、ベトナム、カンボジアに各国の気象機関と連携して雨量計設置し、3年間の記録が蓄積された。これらインドシナ半島およびボルネオ島の降雨記録、GPS による可降水量データの解析と領域気象モデルによる解析から、モンスーン開始時期、山岳性降水の高度依存性などの年々変動を広域気候システムとの関わりの中で明らかにしつつある。また、インドシナ半島の降水季節内変動の地域性、季節性について、これまでよりきめ細かい把握が進んだ。

Ⅱ) 森林流域での水循環、物質循環研究では、マレーシア、タイの観測地のそれぞれで特徴ある年間水収支、炭素収支を持つことが明らかとなった。またこれらの各項目の値は、降雨の季節変化、年々変動の影響を受けて変化する。平地モンスーン林(落葉林)の着葉期間が降水年々変動の影響

響で 60 日以上変動することと、それが水収支、炭素収支に大きい影響をもつことなどが明らかになった。また、熱帯林流域の渓流水質の解析が進み、特にランビル国立公園の渓流水質は、地質が海成の第三紀層であることの影響で、硫酸酸性の特徴が明らかにされ、ボルネオ島の森林流域における渓流水質、物質循環研究の新知見を得ている。

## 2. 研究実施内容

### 1. 降水現象の季節性と年々変動の解明

東南アジアモンスーンのオンセット前後の降水分布、降雨特性、鉛直循環、熱的低気圧の発達状況などを明らかにする研究は主に、NCEP/NCAR 再解析による等圧面高度・風・水蒸気場および OLR、降水量、GPS の観測データと数値解析を組み合わせて進めた。インドシナ半島全域における 1912 年以來の約 90 年間における夏のモンスーン期(5~9月)の降水量データを作成し、その長期間にわたる変化の解析がなされた。ENSO forcing がアジア大陸の陸面水文過程を通して、夏季のアジアモンスーンの強弱に有意な影響を与えることを検証するための、CSIRO で開発された大気海洋結合気候モデル(Mark3 CGCM)を用いた ENSO-モンスーン関係の解析、ENSO-Monsoon 関係の数値実験を進めた。

気候・気象学の視点から降水の様々な時間スケールでの変動を明らかにするための高精度の雨量計は、ラオス3地点、ヴェトナム4地点、ミャンマー3地点、カンボジア3地点に設置されたが、そのうち多くの観測点は北緯 18 度線に沿って展開され、インドシナ半島を横断する東西断面での現象をより細かい時間スケール、例えば日変化の現象を明らかにしている。また、インドシナ半島とボルネオ島の降雨記録、ゾンデ観測、GPS による可降水量データの解析を進めた。また、領域気象モデルによる解析により、モンスーン開始時期、山岳性降水の高度依存性などの年々変動を広域気候システムとのかかわりの中で明らかにする研究を進めた。そして、明瞭な雨季・乾季があるタイ北部の流域面積約 3853Km<sup>2</sup>の山地流域に 14 箇所の雨量観測点(標高 380m~2535m)を設けた観測が維持されている。また、マレーシア・サラワク州における降水量季節変動の空間分布と季節区分について、灌漑排水局により 17 地点において 41 年間にわたり観測された日降雨量データセットを用いて降雨季節変動パターンとその空間分布特性を把握した。

各国に配置された高精度の雨量計記録の検討では、例えばミャンマーでは午前中に極大になる海岸側から、午後から夕方に極大になる内陸部と日変化が明瞭に異なる。ベトナムの降水に地変化特性の季節変化も明らかとなった。タイ北部山地流域の雨量計網の記録より、明瞭な降雨量の高度分布が得られ、降雨量高度依存性の季節変化、年々変動の実態が明らかとなった。また、インドシナ半島の降水季節内変動の地域性、季節性について、これまでよりきめ細かい把握が進んだ。サラワク州ランビル国立公園周辺における海岸からの距離と降水特性の関係に関して、ランビル国立公園と最寄りの海岸を結ぶ線上に3つの雨量計を配置して、降水日周変動が把握された。そして、各地の降水特性について、10 分雨量を用いたより詳細な解析が着手されている。

### 2. 森林流域での水循環、物質循環研究

マレーシアの平地熱帯雨林、タイの平地モンスーン林(落葉林)、山地モンスーン林(常緑林)の

3調査地で、

- 1) 水文プロセスの観測:雨量、土壤水分、流出量、地下水位
- 2) 水質調査, 水質分析:雨水、渓流水、林内雨、土壤水
- 3) クレーン、タワーによる観測:エネルギー収支、顕熱と水蒸気フラックス、二酸化炭素フラックス
- 4) 土壤中有機物分解の観測:土壤中二酸化炭素濃度、土壤呼吸調査

の現地観測を継続的に行い、水、物質循環の特性を比較可能な物質循環モデルを作成している。

タイ北部の丘陵性常緑林(コグマ試験地)では、乾季後半に年間で最も大きい蒸発散が生じていた。従来、他の植生や土地利用ではこの時期は土壤の乾燥により蒸発散が低下すると報告されている。熱帯常緑林の蒸散が乾季後半でも活発に維持されることについて、4m以上の厚さの土壤に貯留された水分によっていることが、数値モデルによって説明され、このプロセスの傍証として、乾季後半に林内の下層木で根が未だ浅い個体では、上層の樹木より強い水ストレスを受けることが樹木生理学的な計測からも得られている。また、土壤中の有機物分解による土壤からの二酸化炭素放出もまた雨季乾季と対応した土壤水分変動の影響を受け、大きい季節変化があることがわかり、土壤水分変動と有機物分解を連成した数値モデルによってこれを再現している。また、林内微気象の形成と山谷風形成の相互関係の解析がなされ、山地林の環境形成に関わる新たな情報が蓄積された。

一方同じタイ北部で、落葉樹であるチーク林(メーモ試験地)では乾季は落葉により蒸散が生じない。熱帯季節林では常緑林と落葉林で、植生によって蒸発散の季節変化が顕著に異なる。そこでチーク人工林を対象に着葉期間と蒸散期間を求め、大きい年々変動があることを見出した。チーク林はプレモンスーンの降雨に対応した展葉時期と雨季の終了後の落葉時期を持つが、降雨の年々変動でこれらの時期が前後し、3年間の観測で着葉期間に60日以上の差異が生じた。落葉期間には蒸散が生じないので、水収支、エネルギー収支に大きい年々変動がもたらされる。降水の変動が植生の影響を含む地表面プロセスへの影響を通して、水循環に影響を与える典型的な事例の一つであるといえる。このような季節性が詳細なフラックス観測によっても明らかにされ、二酸化炭素収支の季節性も論じられるようになった。

マレーシア・サラワク州ランビル国立公園の低地熱帯雨林は、樹高50mを超える世界で有数のバイオマスを持つ森林で、林冠クレーンなどを用いたフラックス観測、微気象観測、土壤水分観測などが進められた。アマゾン川流域の熱帯林に比べて報告例がわずかであった東南アジア熱帯雨林の年蒸発散量、年樹冠遮断量、年蒸散量、炭素収支などが見積もられた。その値の概略は、年蒸散量1200mm、年樹冠遮断量200mm、年蒸発散量1400mm、炭素吸収量4.9tC/ha/yrという値である。

「雨の後、濡れた樹冠が乾く樹冠蒸発のプロセスは、50mに達する樹木と下層の樹木でどのように異なるのか」について、現地観測と森林微気象を解析する多層モデルによって明らかにした。樹冠上層の濡れ具合をモニターする手段である樹液流測定により求める方法を新たに提案し、2.8mの低木から53mの卓越木までの濡れ時間の鉛直分布がわかった。

蒸発散量と二酸化炭素吸収量評価のため、高さ90mのクレーンを用いて、個葉生理特性と葉面積密度の樹冠内における空間変動を特定し、これを考慮する多層モデルによる群落CO<sub>2</sub>交換速

度のシミュレーションを行った。シミュレーション結果から、入力データ取得のためにどこまで詳細な観測が必要か、どこまで精緻なモデルが必要かの指針が得られた。

これらの結果は、国際的な関心をもたれ熱帯水文研究者に受け取られており、既に幾つかの論文に引用されている。

また、タイの熱帯季節林、マレーシアの熱帯雨林ともに、水文観測とともに行なわれてきた水質観測の解析が進み、新たにそれぞれの森林の物質収支が把握された。特にランビル国立公園の渓流水質は、地質が海成の第三紀層であることの影響で、硫酸酸性の特徴を示している。ボルネオ島では森林火災などによる森林劣化の後の再生林が、硫酸酸性土壌のために困難になる事例が報告されているが、自然林流域であるランビル国立公園でも潜在的に同様の状況である可能性が示唆された。ボルネオ島の森林流域における渓流水質、物質循環研究の新知見といえる。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「森林生態系の水循環、物質循環」研究グループ

①研究者名：鈴木 雅一（東京大学大学院農学生命科学研究科）

②研究項目：森林生態系の水循環、物質循環の観測とそのモデル化

マレーシアの平地熱帯雨林、タイの平地モンスーン林（落葉林）、山地モンスーン林（常緑林）、水田などにおける、

1) 水文プロセスの観測（雨量、土壌水分、流出量、地下水位）

2) 水質調査、水質分析

3) クレーンとタワーでの観測：エネルギー収支、顕熱・水蒸気フラックス、二酸化炭素フラックス

4) 土壌中有機物分解の観測：土壌中二酸化炭素濃度、土壌呼吸調査

5) 上記観測結果を用いた、水、物質循環の特性を比較可能な物質循環モデル作成。

#### (2)「降水現象の季節性と年々変動」研究グループ

①研究者名：里村 雄彦（京都大学大学院理学研究科）

②研究項目：降水現象の季節性、年々変動機構の解明

1) 東南アジアモンスーンのオンセット前後の降水分布、降雨特性、鉛直循環

2) GPS による水蒸気観測データの取得・解析

3) 気候モデルを用いたモンスーンの季節推移のシミュレーション

#### (3)「モンスーンアジアの熱帯における水循環変動の影響予測」研究グループ

①研究者名：上記2グループの研究者が、共同して解析に当たる。

#### 4. 研究成果の発表等

##### (1) 論文発表(原著論文)

1. Ohashi M, Kume T, Yamane S, Suzuki M (2007) Hot Spots of soil respiration in an Asian tropical rainforest, *Geophysical Research Letters* Vol.34,L08705,doi:10.1029/2007GL029587,2007
2. Sawano S, Hotta N, Komatsu H, Suzuki M, Yayama T (2007) Evaluating of Evapotranspiration in Forested Areas in the Mekong Basin Using GIS Data Analysis, *Forest Environments in the Mekong River Basin*, P36-44
3. Kume T, Takizawa H, Yoshifuji N, Tanaka K, Tanaka N, Tantasirin C, Suzuki M (2007) Severe drought Resulting from Seasonal and interannual Variability in Rainfall and Its Impact on Transpiration in a Hill Evergreen Forest in Northern Thailand, *Forest Environments in the Mekong River Basin*, P45-55
4. Yoshifuji N, Tanaka N, Tantasirin C, Suzuki M (2007) Factors Affecting Interannual Variability in Transpiration in a Tropical Seasonal Forest in Northern Thailand: Growing Season Length and Soil Drought, *Forest Environments in the Mekong River Basin*, P56-66
5. Kuraji K, Punyatrong K, Sirisaiyard I, Tantasirin C, Tanaka N (2007) Scale Dependency of Hydrological Characteristics in the Upper Ping River Basin, Northern Thailand, *Forest Environments in the Mekong River Basin*, P67-74
6. Ohba M, Ueda H (2007) An impact of SST anomalies in the Indian Ocean in Acceleration of the El Niño to La Niña Transition, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.85 335-348
7. Yamada K, Kawamura R (2007) Dynamical link between typhoon activity and the PJ teleconnection pattern from early summer to autumn as revealed by the JRA-25 reanalysis, *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)*, *Meteorological Society of Japan*, Vol.3:65-68
8. Hashimoto S, Tanaka N, Kume T, Yoshifuji N, Hotta N, Tanaka K, Suzuki M (2007) Seasonality of vertically partitioned soil CO<sub>2</sub> production in temperate and tropical forest, *Journal of Forest Research*, 12(3):209-221
9. 田中延亮・久米朋宣・吉藤奈津子・田中克典・瀧澤英紀・白木克繁・小坂泉・タンタシリン チャチャイ・タンタム ニボン・鈴木雅一(2007) タイ北部の熱帯季節林における現地観測をベースにした水文気象研究－既往研究の整理と今後の課題－. *水文・水資源学会誌*, Vol.20 No.4 pp.347-361
10. Inoue T, Matsumoto J (2007) Abrupt climate changes observed in late August over central Japan between 1983 and 1984, *Journal of Climate*, DOI:10.1175/JCLI4217.1

11. Yokoi S,Satomura T(2007) Climatological Characteristics of the Intraseasonal Variation of Precipitation over the Indochina Peninsula, *Journal of Climate*, DOI:10.1175/2007JCLI1357.1
12. Tanaka N,Kume T,Yoshifuji N,Tanaka K,Takizawa H,Shiraki K,Tantasirin C,Tangtham N,Suzuki M(2008) A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions, *Agricultural and Forest Meteorology*, doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.011
13. Kume T,Manfroi O J,Kuraji K,Tanaka N,Horiuchi T,Suzuki M,Kumagai T(2008) Estimation of canopy water storage capacity from sap flow measurements in a Bornean tropical rainforest, *Journal of Hydrology*, 352(3-4):288-295