

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H02239

研究課題名(和文) 熱帯雨林生態系における水循環機構と植生のレジリエンスの相互作用の解明

研究課題名(英文) Interactions between water cycle mechanisms and vegetation resilience in tropical rainforest ecosystems

研究代表者

小杉 緑子 (Kosugi, Yoshiko)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：90293919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：東南アジア熱帯雨林(Pasoh森林保護区・半島マレーシア低地フタバガキ林)において、生態系フラックスおよび各種環境条件の連続観測を行い、蒸発散活動および光合成活動が長期間にわたり非常に安定していることを明らかにした。さらに恒常性を保つメカニズムを解析し、熱帯雨林としてはぎりぎりの降水条件下にある本森林において、深い不飽和帯土壌が安定的な蒸発散量を維持するための貯水タンクとなっているものの、乾燥時には不飽和帯土壌中に存在する利用できる水の大部分を使っている状況であること、また樹木の生存戦略として、普段から厳しめの気孔開閉様式で蒸散制御を行っていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯雨林機能の評価と未来予測は重要な課題であるが、どちらも限られた実測データに基づくモデリングに頼っているのが現状である。本研究は、熱帯雨林に蒸発散や光合成の安定性を保つようなメカニズムと限界が存在するのかを明らかにしたもので、モデル構築の際の重要な情報源である。水のフローは炭素をはじめ様々な物質のフローとも関係して熱帯雨林機能の中核をなし、全球環境とも深く結びついているため、本研究で得られる知見は、熱帯雨林機能の未来予測を行う上で重要な意義を持つものである。

研究成果の概要(英文)：In a Southeast Asian tropical rainforest (Pasoh Forest Reserve, a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia), continuous observation of ecosystem fluxes and various environmental conditions revealed that evapotranspiration and canopy photosynthetic activities are very stable over a long period of time. We also analyzed the mechanism of the resilience, and found that the deep unsaturated zone soils in this forest, which is at the edge of rainfall conditions for a tropical rainforest, provide a water reservoir to maintain stable evapotranspiration, but during dry periods, most of the available water in the unsaturated zone soils is used. We also found that the tree survival strategy is usually to control transpiration with a strict stomatal opening/closing pattern.

研究分野：森林科学

キーワード：東南アジア 水循環機構 植物水分生理 生態系フラックス 低地フタバガキ林

1. 研究開始当初の背景

熱帯雨林はその名の通り、豊富なエネルギーと‘有り余る’水とを享受して発達した森林である。では、実際にどのような水文環境下で、どの程度の水がどのように存在すれば、熱帯雨林としての姿と機能を保ちうるのだろうか。立地の違いによる養分の問題を別にして、気候帯スケールで見れば水が熱帯雨林の存在を規定する重要な要因であることは自明の事実である。しかし問題は、定量的に水がどう樹木の反応を介して諸機能を規定しているかの詳細である。水循環機構と熱帯雨林の存在様式・存在限界とのリンクは、自明のように見えて、いまだに核心部分が未解明のまま残されており、未来の気候変動下での熱帯雨林のレジリエンスを評価する上で欠かせない重要なキーとなっている。しかし今日研究の方向は、この核心を解明しきらないまま、各分野単独での俯瞰へと向かっている。水の影響を定量評価するのに、数値モデリングによる解析や、年・月単位降水量・土壌水分等との単なる相関解析だけでは不十分である。降雨・蒸発散に伴う時々刻々の変動から気候アノマリーに伴う長期変動まで様々な時間スケールで動的に移り変わる水フローの実態を、生態系全体から植物体を含む各コンパートメントまで多様な空間スケールで定量した上で、現実の樹木の反応や諸機能とのリンクをみていく必要がある。

熱帯雨林機能の評価は、世界的にも重要な課題と目されており、数々の数値実験や衛星データを使った広域マッピングなどが世界中でおこなわれているが、その妥当性を担保すべき、現地測定に基づくガス交換の動的変動に関する情報は限られてきた。サイト横断比較は皮相的な段階に留まっていて、生態系フラックスデータのもつ情報は十分活用しきれていない。15年に及ぶ連続した生態系フラックスデータを有し且つ情報を発信している熱帯雨林サイトは世界中でわずか数箇所である。また一方、最近の水文学研究や植物水分生理研究はいずれも、水と植物の関係についてそれぞれの分野での単独視点での俯瞰を目指して発展している。生態系フラックス・水文学・植物水分生理学の視点をリンクさせ、水の動態と植物の振る舞いを定量的に繋いで解析するという方向性は、特に実測ベースのものがあまり進展していない。本研究は、3つの視点を組み合わせることで複眼的な視点から熱帯雨林のレジリエンスを評価する研究と位置付けられる。この手法により、既往研究で皮相的な理解に留まっていた幾つかの事象に、より深く切り込んだ解析が可能になると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、フィールド調査に基づき、熱帯雨林の水循環機構と植生のレジリエンスとの相互作用を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

東南アジア熱帯雨林 (Pasoh 森林保護区・半島マレーシア低地フタバガキ林)において、いつ・どこに・どれだけ「利用できる水」が存在するか (= 水循環機構)、水ストレスに対する樹木の生存戦略 (= 植物水分生理)、ガス交換機能の安定性の中に隠された樹木の反応が示す安定性を支えるメカニズムと限界 (= 生態系フラックス) の3つの視点から現地観測を行い、これらの結果をアマゾン熱帯雨林などの他所のデータとも併せて統合的に解析することで、降水量変動に対して熱帯雨林がどのように反応しその機能を保ちうるか (= 熱帯雨林のレジリエンス) を評価した。

【A. 水循環機構】

降水強度、および土壌各深度での土壌水分の30分インターバルでの連続観測を行った。また土壌体積含水率・土壌物理性・化学性の時空間分布を把握した。保護区内の河川に水位計・EC計を設置し降雨流出応答を連続観測した。水文過程におけるすべての採取可能な水を定期的かつ降雨時に採取し、酸素・水素安定同位体比および各種水質分析を行った。樹冠・土層各層の水収支・流出・貯留量の時間変化を定量し、蒸発散のデータと併せて、いつ・どこに・どれだけ「利用できる水」が存在するかを解析した。

【B. 植物水分生理】

タワーサイト周辺の突出木から林床木まで様々なサイズの樹木において、各部の樹液流速および直径変化を連続測定した。水ポテンシャル、個葉の蒸散・光合成速度、気孔開閉様式、葉および葉柄での貯水量の日変化パターンを乾湿条件の異なるシーズン毎に測定した。これらのデータから樹体各部におけるフラックスおよび貯留量の時間変化を定量した。生態系フラックスデータから得られる群落コンダクタンスの挙動と併せて解析することで、水ストレスに対する樹木の生存戦略を明らかにした。

【C.生態系フラックス】

タワー上生態系フラックス（運動量・顕熱・潜熱・蒸発散・CO₂フラックス）、分光反射および樹冠画像、降水量、放射各項、各高度での風速・気温・湿度・光量、CO₂濃度、土壌各深度における体積含水率・地温・圧力水頭、分光反射特性等について、継続中の観測を増強・高度化し、高品質な長期連続データの取得を行った。生態系フラックスから蒸発散、群落コンダクタンス、NEE、GPP、RE、群落最大光合成能、を算定した。これらの結果をもとに、ガス交換機能の安定性を支えるメカニズムと限界について解析を行った。

4. 研究成果

国際生物学事業計画（IBP）以来の東南アジア熱帯雨林コアサイトであるマレーシア国 Pasoh 森林保護区は、熱帯雨林天然林であるが、平均年降水量が 1,800mm 程度と熱帯雨林の中では非常に少ない上に、かなりの年々変動がある。また乾期・雨期のパターンや程度の年々変動も大きい。あたかも天然の乾燥実験区に如く、同サイトが実際に経験する水文環境の変動幅における蒸発散や光合成などの諸機能の応答を定量することで、将来起こるかもしれない気候変動に対する東南アジア熱帯雨林の生の応答を評価できるという利点を有している。同サイトにおいて、我々はマレーシア森林研究所（FRIM）との連携の下で、渦相関法による生態系フラックスの連続観測を行った。

生態系フラックスの観測結果によると、これまで 20 年間一貫して、本森林では非常に安定した蒸発散が見られた。2 か月続く無降雨時にも蒸発散量が低下することはなく、これに対応して総光合成量 GPP も若干の低下に留まった。生態系フラックスおよび各種環境条件の連続観測に基づくデータベースを解析し、CO₂交換についても、NEE は非常に安定している中で、GPP や RE が若干の乾湿に応じた変動を見せること、突出木を含む高木で見られる日中の不均一な気孔閉鎖が光合成の激しい低下の原因となっていることなどが分かった。

一方で、このようなガス交換機能の安定性の中に隠された水ストレスの兆候も検出された。

生態系内の水循環機構に着目すると、降水の多く（年収支で約 60～90%）が蒸発散に使われ、強乾燥期においては数か月以上前の降水まですべて利用しなければ蒸発散を維持できない。水収支の結果から、乾燥時には不飽和帯土壌中に存在する利用できる水の大部分を使っている状況であることが明らかになった。地下水面を有さず深部に至る不飽和帯土壌や、基底流量が非常に少なく乾期に涸れる森林内河川などの観察情報、河川水・土壌水・降水の水質分析の結果などから、深い不飽和帯土壌が本森林の安定的な蒸発散量を維持するための貯水タンクとなっていると考えられた。当初、降雨の度に見られる粘土質の土壌面上を浸透せずに流れる地表流から、河川水の主な供給源はごく浅い地表流であると想定されたが、水質分析の結果、主な供給源は地表流ではなく、土壌を一定深度浸透した水であることがわかった。

また植物水分生理に着目すると、葉柄に水を貯留する高木種が多く存在すること、植物体内水の酸素・水素安定同位体比の調査から樹木体内に普段あまり動かない多くの貯留水が存在すること、個葉の不均一な気孔閉鎖と光合成低下が水分条件そのものよりも気象条件を信号として危険を事前回避するよう日々調整されていることなどが明らかになった。これらのことから、樹木の生存戦略として、普段から厳しめの蒸散制御を行っていることがわかった。一方、植物体内の貯留水はレジリエンスを保つためのバッファとして機能しているものの、蒸発散への寄与度は少ないと考えられた。また、安定した蒸発散の影で群落コンダクタンスは土壌水分変動に応じた明瞭な低下を見せた。

これらはすべて、本森林が決して有り余る降水を利用して無調整の蒸発散を行う楽観的な生存戦略で成り立っているのではないことを強く示す結果となった。

深い不飽和土壌層が供給する最大限の給水バッファと、樹冠を構成する樹木葉の気孔開閉による蒸発散のシビアな制御が、20 年の長期間にわたり非常に安定した本森林の蒸発散および光合成活動の恒常性を支えている主な機構であることを明らかにした。

熱帯雨林機能の評価と未来予測は重要な課題であるが、どちらも限られた実測データに基づくモデリングに頼っているのが現状である。本研究は、熱帯雨林に蒸発散や光合成の安定性を保つどのようなメカニズムと限界が存在するのかを明らかにしたもので、モデル構築の際の重要な情報源である。水のフローは炭素をはじめ様々な物質のフローとも関係して熱帯雨林機能の中核をなし、全球環境とも深く結びついているため、本研究で得られる知見は、熱帯雨林機能の未来予測を行う上で重要な意義を持つものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Itoh Masayuki, Osaka Ken'ichi, Iizuka Kotaro, Kosugi Yoshiko, Lion Marryanna, Shiodera Satomi	4. 巻 859
2. 論文標題 Assessing the changes in river water quality across a land-use change (forest to oil palm plantation) in peninsular Malaysia using the stable isotopes of water and nitrate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 160319 ~ 160319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2022.160319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kamakura Mai, Kosugi Yoshiko, Takanashi Satoru, Matsuo Naoko, Uemura Akira, Lion Marryanna	4. 巻 30
2. 論文標題 Temporal fluctuation of patchy stomatal closure in leaves of Dipterocarpus sublamellatus at upper canopy in Peninsular Malaysia over the last decade	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tropics	6. 最初と最後の頁 41 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3759/tropics.MS21-05	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakaji, T., Oguma, H., Nakamura, M., Kachina, P., Asanok, L., Marod, D., Aiba, M., Kurokawam H., Kosugi, Y., Abdul Rahman Kassim, Hiura, T.	4. 巻 233
2. 論文標題 Estimation of six leaf traits of East Asian forest tree species by leaf spectroscopy and partial least squares regression	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rse.2019.111381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Zheng-Hong Tan, Jun-Fu Zhao, Guan-Ze Wang, Meng-Ping Chen, Lian-Yan Yang, Chun-Sheng He, Natalia Restrepo-Coupe, Shu-Shi Peng, Xue-Yan Liu, Humberto R. da Rocha, Yoshiko Kosugi, Takashi Hirano, Scott R. Saleska, Michael L. Goulden, Jiye Zeng, Fang-Jun Ding, Fu Gao, Liang Song	4. 巻 275
2. 論文標題 Surface conductance for evapotranspiration of tropical forests: Calculations, variations, and controls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 317-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2019.06.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Marryanna, L., Noguchi, S., Kosugi, Y., Niiyama, K., Itoh, M., Sato, T., Takanashi S., Siti-Aisha, S., Abd Rahman, K.	4. 巻 31
2. 論文標題 Spatial distribution of soil moisture and its influence on stand structure in a lowland dipterocarp forest in peninsular Malaysia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Tropical Forest Science	6. 最初と最後の頁 135-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Besnard S., Carvalhais, N., Altaf Arain, M., Black, A., Brede, B., Buchmann, N., Chen, J., Clevers, J. G. P. W., Dutrieux, L. P., Gans, F., Herold, M., Jung, M., Kosugi, Y., Knohl, A., Law, B. E., Paul-Limoges, E., Lohila, A., Merbold, L., Rouspard, O., Valentini, R., Wolf, S., Zhang, X., Reichstein, M.	4. 巻 14
2. 論文標題 Memory effects of climate and vegetation affecting net ecosystem CO2 fluxes in global forests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0211510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0211510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Satake, A., Yu-Yun Chen, Fletcher, C., Kosugi, Y.	4. 巻 34
2. 論文標題 Drought and cool temperature cue general flowering synergistically in the aseasonal tropical forests of Southeast Asia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 40-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1440-1703.1012s	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 緒方澄人・小杉緑子・伊藤雅之・渡辺伸一・勝山正則・野口正二・高梨聡・Marruanna Lion
2. 発表標題 半島マレーシア熱帯雨林Pasoh森林保護区における降水・流出水起源の推定
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東若菜、野口結子、鶴田健二、鎌倉真依、小杉緑子、Marryanna Lion
2. 発表標題 熱帯低地林におけるフタバガキ科高木種の水利利用特性
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小杉緑子、高梨聡、野口正二、伊藤雅之、中路達郎、鎌倉真依、東若菜、Siti Aisha Shumsuddin、Marryana Lion
2. 発表標題 熱帯雨林における蒸発散の恒常性について
3. 学会等名 水文・水資源学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiko Kosugi, Satoru Takanashi, Shoji Novughi, Tatsuro Nakaji, Mai Kamakura, Wakana Azuma, Siti Aisha Shumsuddin and Marryanna Lion
2. 発表標題 Are the evapotranspiration and canopy photosynthesis of Asian tropical rainforests affected by climate change?
3. 学会等名 The 3rd Asia Research Node Symposium on Humanosphere Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小杉緑子、野口正二、高梨聡、伊藤雅之、Marryana Lion
2. 発表標題 東南アジア熱帯雨林における蒸発散に寄与する土層深についての水文学的解析
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 三枝 信子、柴田 英昭、高梨 聡 編	4. 発行年 2022年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 208
3. 書名 森林と水	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中路 達郎 (Nakaji Tatsuro) (40391130)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授 (10101)	
研究分担者	伊藤 雅之 (Itoh Masayuki) (70456820)	兵庫県立大学・環境人間学部・准教授 (24506)	
研究分担者	野口 正二 (Nouchi Shoji) (90343780)	国立研究開発法人国際農林水産業研究センター・林業領域・領域長 (82104)	
研究分担者	高梨 聡 (Takanashi Satoru) (90423011)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------