

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K06135

研究課題名(和文) 熱帯季節林のパラドックスの解明：気候変動は同生態系の存続に影響を及ぼすか？

研究課題名(英文) Understanding the mechanism in paradox of tropical seasonal forest: does climate change affect its sustainability?

研究代表者

飯田 真一 (Iida, Shin'ichi)

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

研究者番号：70375434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：東南アジア域の熱帯季節林地帯における落葉林は乾季のうちに早い展葉を行い、蒸散することが観測データから裏付けられた。特に、2010-2020年で最も乾燥した2020年でも、樹木は早い展葉を行った。しかし、乾燥の影響で蒸散量は約半分まで減少し、水ストレスが生じた。枝に含まれる水の安定同位体比の解析結果から、深度120cm以深から吸水する樹木の存在が示唆された。このように、異常乾燥が進むと蒸散量は減少するが、深部からの吸水によって生命活動を維持していた。エルニーニョ現象や気候変動によって増加する異常乾燥の影響については、今後も検討を要する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インドシナ半島の熱帯季節林は経済活動の発展等によって減少しているが、カンボジアには天然林が残存しており、貴重な生態系となっている。本研究によって、厳しい乾燥条件下で早い展葉を行うこと、また異常乾燥時には蒸散量が大きく減少するが、土壌深部からの吸水によって生命活動を維持することが明らかとなった。このことは、同生態系の保全策の検討に科学的知見を供給するのみならず、気候変動によって頻発が懸念される異常乾燥による影響について、今後、植物生理学的検討も含めた評価を早急に実施する必要性を示すものである。

研究成果の概要(英文)：Transpiration activities in a tropical dry forest were confirmed after the early leaf flush in the dry season. Especially in 2020, in which soil was driest among 11 years (2010-2020), trees exhibited early leaf flush and kept transpiration during the dry season. However, 50% decreases in transpiration, that is, occurrence of water stress, was measured. Stable isotope analysis of branch water implied the possibility of water uptake by root system from >120 cm depth. Our measurements revealed that extreme droughts caused by El Nino-Southern Oscillation declined transpiration, but trees kept photosynthetic activity through water uptake from deeper part of soil. Additional observations are required to evaluate the effect of increasing frequency of extreme drought.

研究分野：水文学、生態水文学、森林水文学

キーワード：熱帯季節林 吸水深度 蒸散量 植物季節

1. 研究開始当初の背景

東南アジアの熱帯季節林では、乾季には数ヶ月間に渡って雨が降らず、土壌は極端に乾燥した状況となる。熱帯季節林地帯の落葉林で特徴的なことは、乾季のはじめに葉を落とした後、無降雨が続く乾季中盤に展葉することである。この早い展葉は春分日付近に観測されるため、日長の変化がトリガーである可能性が指摘されている。しかし、極度の乾燥条件下で樹木が利用する水源がどこなのか？なぜ蒸散することができるのか？不明であり、「熱帯季節林のパラドックス」と呼ばれている (Elliott et al., 2006)。同植生は経済活動の発展に伴って減少しつつあるが、カンボジアには天然林が残存しており、貴重な森林生態系となっている。

他方、同地域ではエルニーニョ現象が生じると雨量が減少し、異常乾燥が生じる。ボルネオ島では、異常乾燥時に樹木の大量枯死が発生した (Kumagai and Porporato, 2012)。このことを考慮すると、極度の乾燥条件下で早い展葉を行う熱帯季節林は、異常乾燥時に枯死する危険性が考えられる。しかし、実際の計測データに基づいたこの種の検討はこれまで行われていない。そこで、同植生が乾季に展葉し、蒸散に利用する水源を現地計測により解明する必要があるとの考えに至った。

2. 研究の目的

カンボジアの熱帯季節林を対象として、乾季中盤の早い展葉および蒸散の実態を現地計測に基づいて明らかにすることを目的とする。同時期の土壌水分量をモニタリングするとともに、土壌の物理性を把握し、樹木の利用可能な水分がどの程度土壌中に存在しているのかを検討する。さらに、採取した枝および土壌に含まれる水の酸素安定同位体比を比較し、同位体メカニスティックモデルを用いて樹木の吸水深度の評価を行う。また、同モデルを用いて乾燥の強度が増加した場合の蒸散量の変化を試算し、異常乾燥が熱帯季節林に及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

カンボジアのクラチェ州に位置する落葉林を対象として計測を行った。高度 30m の観測塔を用いて、林冠上の微気象計測ならびにバンドパス渦相関法による蒸発散量の測定を行った。具体的な計測項目は、雨量、温湿度に基づく飽差、正味放射量、短波放射量、光合成有効光量子束密度である。林床面上に配置した 4 台の光量子計の出力を平均して林冠下の光合成有効光量子束密度を求め、Beer 則に基づいて葉面積指数を算出した (Iida et al., 2016)。

深度 10、20、40、60、90、110cm において静電容量型土壌水分センサーを用いて土壌の体積含水率を測定した。なお、静電容量型土壌水分センサーによる計測は 2020 年 2 月から開始したため、それ以前の期間については既設の Time Domain Reflectometry 法センサー出力値との回帰式を用いて補完した。

対象林分内の全個体 (12 個体) について熱消散法 (Granier, 1985) のセンサーを挿入し、樹液流速測定を行った。具体的には、*Dipterocarpus tuberculatus* 3 個体、*Shorea obtusa* 5 個体、*Terminalia alata* 3 個体、*Xylia xylocarpa* 1 個体である。同センサーの長さは 2.0cm であるため、供試木の辺材幅が 2.0cm 未満の場合は Clearwater et al. (1999) による補正を適用した。12 個体の樹液流速の平均値と林分の総辺材面積の積として林分蒸散量を得た。なお、Iida et al. (2020) によれば、Granier et al. (1985) による検定式は本林分の樹液流速を過小評価することが明らかとなっているため、修正された係数を用いて樹液流速を算出した。

深度 120cm のトレンチを作成し、樹木根系の本数を目視によりカウントするとともに、土壌断面図を作成した。また、100mL 採土円筒を用いて土壌をサンプルし、マイクロフィルターを用いた加圧板法に基づいて圃場容水量ならびに永久シオレ点に相当する体積含水率を得た。これらの

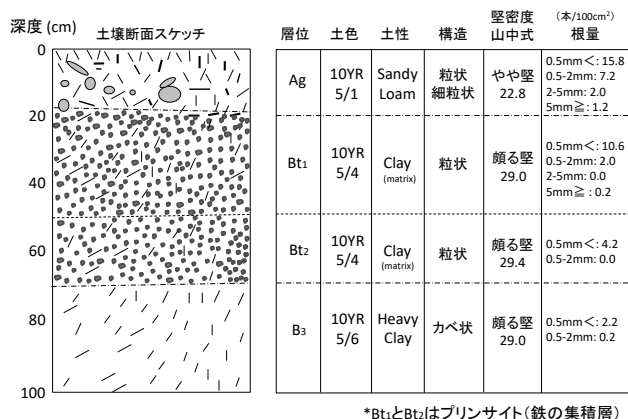


図1 土壌断面の特徴とスケッチ

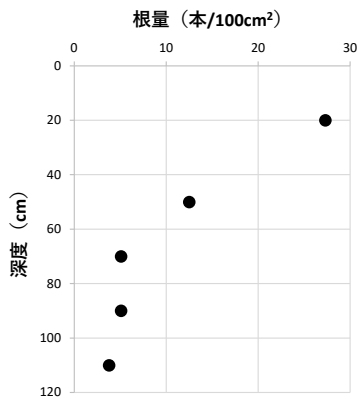


図2 土壌断面における根系の鉛直分布

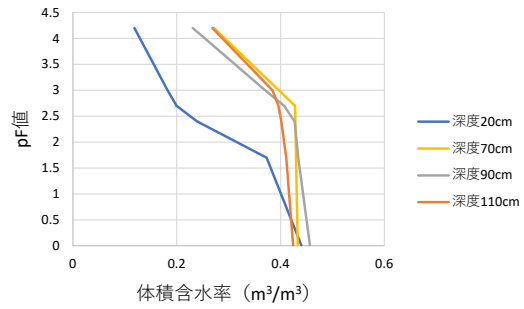


図3 土壌の水分特性曲線

値の差が、理論上、樹木が最大限利用可能な水分量に相当する。この値に対する、実際に利用可能な水分量の比 (Relative Extractable Soil Water Content : REW) を算出した。

乾季中盤の2020年1月下旬において、*Xylia xylocarpa*を除く各樹種の枝および土壌をサンプルしたのち直ちに密封し、前者については真空蒸留法を、後者については遠心法を用いて水を抽出した。水の酸素安定同位体比の定量には水同位体分析装置 (TIWA-45EP、ABB Los Gatos Research 社) を用いた。

Yamanaka et al. (2017)、Yamanaka (2018)による同位体メカニスティックモデルを用いて、土壌水の酸素安定同位体比の鉛直プロファイルを再現した。同モデルは森林生態系における水移動プロセスを考慮している。上述した方法で得られた蒸発散量および林分蒸散量を真値として、同モデルが水移動過程を高精度に再現していることを確認し、計算に用いた。

4. 研究成果

(1) 熱帯季節林の落葉樹の根系分布および土壌の物理性

本研究サイトの土壌型はプリンソソルとなっており、深度20cmまでがA層、それ以深の深度100cmまではB層であった(図1)。A層には特に根系が多く分布しており、B層の深度70cmに掛けて根量はリニアに減少した。しかし、それよりも深い部位においても、根量は5(本/100cm²)でほぼ一様であった(図2)。

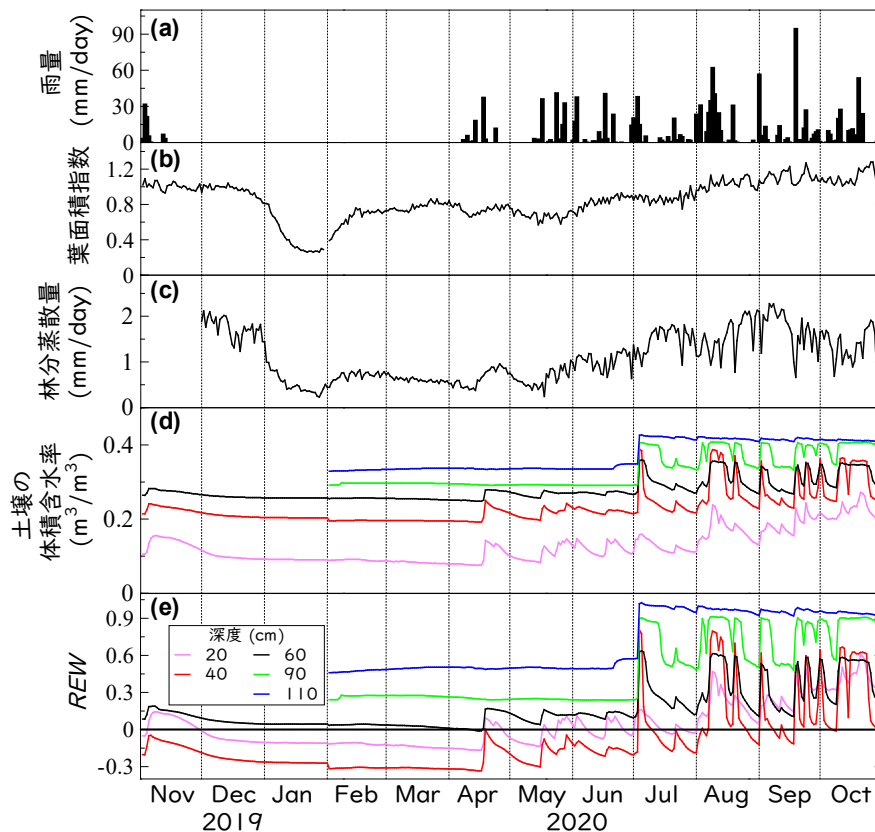


図4 微気象要素、葉面積指数、林分蒸散量の季節変化

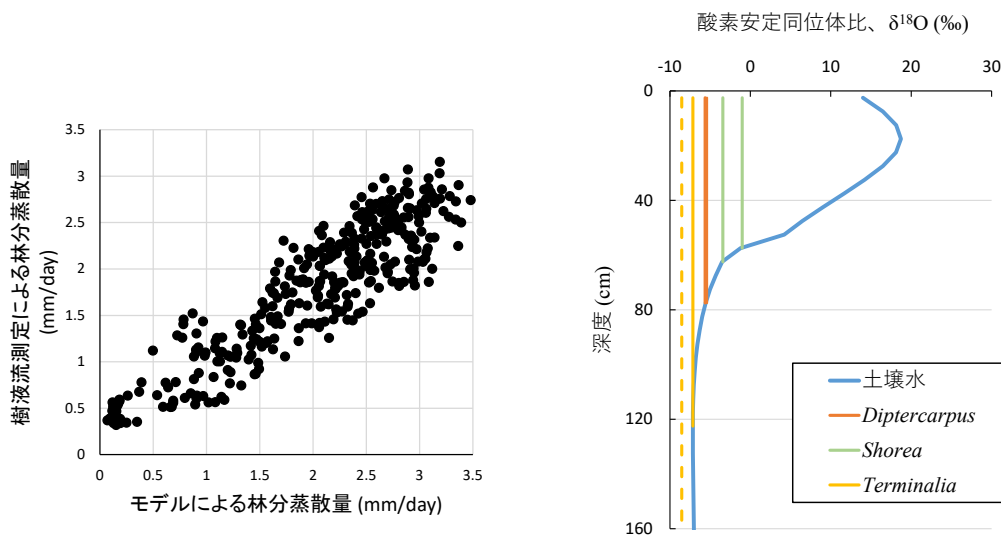


図5 同位体メカニスティックモデルによる
林分蒸散量と測定値の比較

図6 同位体メカニスティックモデルによる
土壌水の酸素安定同位体比の鉛直
分布と枝の水の比較

B層の土壌は粘土質で堅いことを反映し、土壌の水分特性曲線での空気侵入値が大きく、水が抜けにくい特徴を呈した(図3)。永久シオレ点(pF = 4.2)での体積含水率はA層が0.12、B層は0.25 (m³/m³)であった。

(2) 微気象要素、葉面積指数、林分蒸散量の季節変化

2019年11月中旬から雨が降らなくなり、本研究サイト周辺は乾季となった(図4a)。降雨が無い状態は2020年4月上旬まで継続した。葉面積指数は、乾季に入ったあとも約1カ月間程度は変化せず、雨季と同程度の値を維持していた(図4b)。2019年12月下旬から葉面積指数は減少を開始して2020年1月下旬に最低値を示し、その後すぐに増加した。この計測事実から、本研究サイトにおいて、乾燥が進む乾季中盤での早い展葉が確認されるとともに、「熱帯季節林のパラドックス」が実際に生じていることが分かった。この間、林分蒸散量は葉面積指数と類似した変化傾向を示しており、落葉に伴って蒸散量が減少し、展葉とともに蒸散量は増加した(図4c)。

以上のように、乾季中盤での早い展葉が生じ、同時に蒸散活動は活性化することが分かったが、蒸散の水源はどの部位なのであるか? 深度60cmまでの土壌の体積含水率は最低値に近い値で推移しており(図4d)、REWは負もしくはゼロに近い値となっている。負のREWは、実際の体積含水率が永久シオレ点を下回ったことを意味しており、その部位から樹木根系は吸水できないことになる。他方、深度60cmよりも深い90および110cmでは、土壌水分量は永久シオレ点よりも大きく、REWは0.3~0.5程度となっていた(図4e)。したがって、これらの計測結果から、落葉樹は深度60cmよりも深い部位を水源として、早い展葉後に蒸散活動を行っているものと推定される。

(3) 同位体メカニスティックモデルを用いた吸水深度の検討

林分蒸散量計測値(Iida et al., 2020)を真値として、同位体メカニスティックモデルによる計算値との比較を行った結果、両者には良い整合性が確認された(図5)。同モデルを用いて、現地にて枝を採取した2020年1月30日における土壌水の酸素安定同位体比の鉛直プロファイルを計算し、枝に含まれていた水の酸素安定同位体比との比較を行った(図6)。樹種および個体による差が存在するものの、*Shorea obtusa*の吸水深度は60-70cm、*Dipterocarpus tuberculatus*は80cm、*Terminalia alata*は120cm以深と推定された。これらの推定結果は、前節において検討した土壌の物理性を考慮した土壌水分量の鉛直分布から示唆される吸水範囲と矛盾しない。これらのことから、2020年1月下旬における落葉樹の利用水源は、深度60cm以深の土壌水であったものと考えられる。ただし、2020年3月以降、COVID-19感染症拡大の影響のため、現地での枝および土壌の採取ができない状況に陥ったことから、ここで示したデータは限られたものとなっている点に注意が必要である。

(4) 異常乾燥が熱帯季節林に与える影響

本サイトでは、2020年1月下旬以降に落葉樹が展葉して林分蒸散量は増加したが、その後も乾燥が進んだために、林分蒸散量は2月下旬~3月中旬に掛けて減少傾向を示した(図4b, c)。同時期の土壌水分量を過去11年間のデータと比較したところ、土壌は最も乾燥していたことが

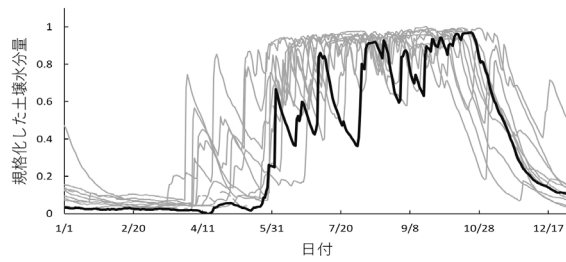


図7 2010～2020年の60cm深度までの土壌水分量の季節変化。同期間の最大値と最低値で規格化した。黒い実線が2020年のデータを示す。

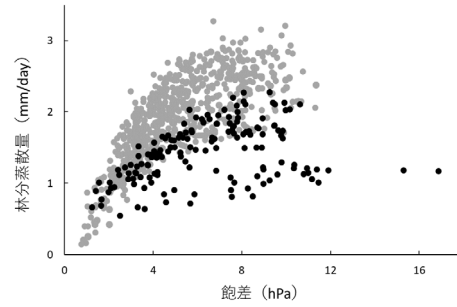


図8 2010～2020年の飽差と林分蒸散量の関係。黒色が2020年のデータを示す。

明らかとなった(図7)。このため、林分蒸散量は平常年の半分程度となっていた(図8)。その後も本生態系は枯死することなく存続しているため、この程度の干ばつであれば、生態系の生命活動の維持には問題は生じないものと考えられる。しかし、水ストレスが生じて蒸散量は減少することが確認された。仮に、異常乾燥が強まり、その頻度が増加した場合、水ストレスによって光合成活動も影響を受け、生態系の健全性が損なわれる可能性が危惧される。

乾季中盤での早い展葉は、虫害が少なく、また最初の降雨イベントの後から効率的な光合成が可能という点で有利であるとされる(Aide, 1992; Rivera et al., 2002)。他方、東南アジア地域では、エルニーニョ現象が生じると雨量は減少する傾向にある(Malhi and Wright, 2004)。そして、気候変動の影響を受けてエルニーニョ現象の発生頻度は増加することが懸念されている(Timmermann et al., 1999)。したがって、本研究サイト周辺でも、寡雨による異常乾燥の頻度が増加する恐れがある。異常乾燥が生じると蒸散活動に対する水ストレスが生じることから、その頻度の増加は生態系の劣化につながる危険性がある。そこで、同位体メカニスティックモデルを用いて、無降雨が実際よりも最大3カ月間長く継続した場合の林分蒸散量の減少量を計算した。その結果、林分蒸散量は無降雨日を増加させない場合と比較して6割まで減少した(図9)。前述したように、実際の計測結果は平常年の約半分であったことから、無降雨日が増加した場合の林分蒸散量は平常年の3割程度まで減少する可能性がある。この大幅な蒸散量の減少は、潜熱の減少を通じて周囲の気象環境にも影響を及ぼすことが示唆される。このような干ばつに伴う水ストレスが生態系の劣化に与える影響については、今後、光合成や葉の水ポテンシャルなどの現地計測を行った上で植物生理学的な応答特性を明らかにし、早急に検討を加える必要があるものと考えられる。

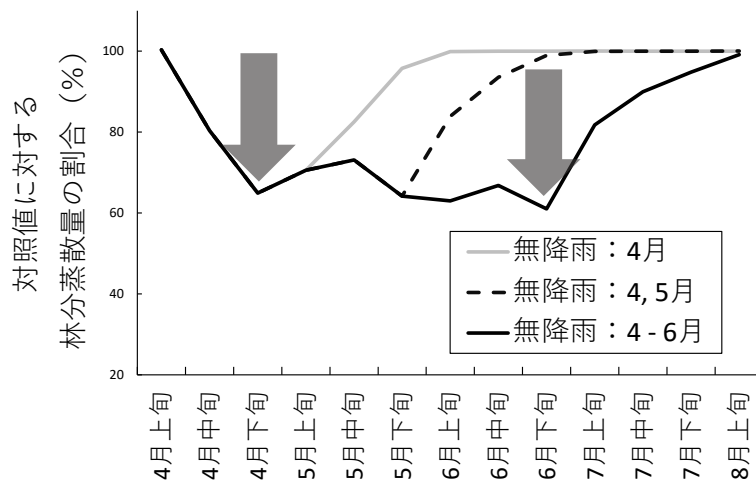


図9 同位体メカニスティックモデルを用いた無降雨日増加による林分蒸散量への影響に関する感度分析の結果。降雨条件を変化させない場合の対照値に対する割合で示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 飯田真一、清水貴範、玉井幸治、壁谷直記、清水晃、荒木誠、大貫靖浩、伊藤江利子、田中憲蔵、鳥山淳平、久保田多余子、山中勤、Sopha Chann、Delphis Levia	4. 巻 52
2. 論文標題 カンボジア熱帯季節林地帯の落葉林における蒸発散過程：上層木および下層植生による水循環への寄与の解明に向けて	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本水文科学会誌	6. 最初と最後の頁 65～72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4145/jahs.52.65	査読の有無 無
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 Iida Shin'ichi, Shimizu Takanori, Tamai Koji, Kabeya Naoki, Shimizu Akira, Ito Eriko, Ohnuki Yasuhiro, Chann Sopha, Levia Delphis F.	4. 巻 295
2. 論文標題 Evapotranspiration from the understory of a tropical dry deciduous forest in Cambodia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108170～108170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2020.108170	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 Carlyle-Moses Darryl E., Iida Shin'ichi, Germer Sonja, Llorens Pilar, Michalzik Beate, Nanko Kazuki, Tanaka Tadashi, Tischer Alexander, Levia Delphis F.	4. 巻 3
2. 論文標題 Commentary: What We Know About Stemflow's Infiltration Area	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Forests and Global Change	6. 最初と最後の頁 577247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/ffgc.2020.577247	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 Shin'ichi Iida, Takanori Shimizu, Yoshinori Shinohara, Shin'ichi Takeuchi, Tomo'omi Kumagai	4. 巻 240
2. 論文標題 The Necessity of Sensor Calibration for the Precise Measurement of Water Fluxes in Forest Ecosystems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Forest-Water Interactions, Ecological Studies Series	6. 最初と最後の頁 29～54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-26086-6_2	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shin'ichi Iida, Takanori Shimizu, Koji Tamai, Naoki Kabeya, Akira Shimizu, Makoto Araki, Yasuhiro Ohnuki, Eriko Ito, Jumpei Toriyama, Tanaka Kenzo, Tayoko Kubota, Tsutomu Yamanaka, Sophal Chann, Delphis F. Levia
2. 発表標題 Contribution of understory vegetation to evapotranspirational processes in a tropical dry deciduous forest in Cambodia
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2023, B13L-2065. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Shin'ichi Iida, Takanori Shimizu, Koji Tamai, Naoki Kabeya, Akira Shimizu, Eriko Ito, Yasuhiro Ohnuki, Sophal Chann, Delphis F. Levia
2. 発表標題 Effect of groundwater depletion caused by extreme drought on transpiration activity in a dry evergreen forest
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023, AHW19-P01.
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 飯田真一、大貫靖浩、荒木誠、鳥山淳平、清水貴範、玉井幸治、壁谷直記、清水晃、伊藤江利子、久保田多余子、山中 勤、田中憲蔵、チャン ソファル、レヴィア デルフィス
2. 発表標題 カンボジア乾燥落葉林における乾季蒸散活動の利用水源に関する検討
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2023年度研究発表会要旨集, PP-2-2-23
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 飯田真一、清水貴範、玉井幸治、壁谷直記、清水晃、伊藤江利子、大貫靖浩、Sophal Chann、Delphis Levia
2. 発表標題 エルニーニョ現象による異常乾燥が乾燥常緑林の水利用に与える影響
3. 学会等名 日本森林学会大会学術講演集, 135:273(PJ-54).
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 飯田真一、清水貴範、玉井幸治、壁谷直記、清水晃、伊藤江利子、大貫靖浩、Sopha Chann、Delphis Levia
2. 発表標題 乾燥常緑林における降雨レジームとリーフフェノロジーが樹液流速測定値に与える影響
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2022年度研究発表会要旨集, PP-2-23.
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Shin'ichi Iida, Takanori Shimizu, Koji Tamai, Naoki Kabeya, Akira Shimizu, Eriko Ito, Yasuhiro Ohnuki, Sopha Chann, Delphis Levia
2. 発表標題 Contribution of understory vegetation to evapotranspiration in a tropical dry forest, Cambodia
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021, AHW20-P01.
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 飯田真一・清水貴範・玉井幸治・壁谷直記・清水晃・伊藤江利子・大貫靖浩・Sopha Chann・Delphis Levia
2. 発表標題 熱帯季節落葉林での蒸発散収支に基づく樹液流速測定法の過小評価に関する検討
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2021年度研究発表会要旨集, PP-B-39.
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Iida Shin'ichi, Shimizu Takanori, Shinohara Yoshinori, Takeuchi Shinichi, Kumagai Tomo'omi, Carlyle-Moses Darryl E., Levia Delphis
2. 発表標題 Dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges and flow meters for precise measurements of rainfall partitioning
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020, AHW30-P15. (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Darryl Carlyle-Moses、Shin'ichi Iida、Sonja Germer、Pilar Llorens、Beate Michalzik、Kazuki Nanko、Alexander Tischer、Delphis Levia
2. 発表標題 Stand-Scale Metrics for Expressing Stemflow Commensurate with its Ecohydrological Importance
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2019, EGU2019-1855. (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Shin'ichi Iida、Darryl E. Carlyle-Moses、Sonja Germer、Pilar Llorens、Beate Michalzik、Kazuki Nanko、Alexander Tischer、Delphis F. Levia
2. 発表標題 Quantifying stemflow to better express its ecohydrological significance
3. 学会等名 Japan Geosciences Union Meeting 2019, AHW23-P09.
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 飯田真一、清水貴範、玉井幸治、壁谷直記、清水晃、伊藤江利子、大貫靖浩、Sophal Chann、Delphis Levia
2. 発表標題 カンボジア低地落葉林における下層植生が蒸発散プロセスに与える影響
3. 学会等名 水文・水資源学会2019年度研究発表会要旨集, 202-203.
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 飯田真一、Darryl E. Carlyle-Moses、Sonja Germer、Pilar Llorens、Beate Michalzik、南光一樹、Alexander Tischer、Delphis F. Levia
2. 発表標題 樹幹流の生態水文学的重要性を表現するための指標
3. 学会等名 2019年度日本水文学会学術大会発表要旨集, 34, 26-27.
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

熱帯季節林のパラドックスの解明：気候変動は同生態系の存続に影響を及ぼすか？
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ipo/jointresearch/paradox/index.html>

The Paradox of Leaf Phenology for Tropical Seasonal Forests: Will climate change affect their sustainability?
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/en/ipo/collaborativeresearch/paradox/index.html>

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	山中 勤 (Yamanaka Tsutomu) (80304369)	筑波大学・生命環境系・教授 (12102)	

	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
研究協力者	大貫 靖浩 (Ohnuki Yasuhiro)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究専門員 (82105)	
研究協力者	清水 貴範 (Shimizu Takanori)	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)	
研究協力者	久保田 多余子 (Kubota Tayoko)	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)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	壁谷 直記 (Kabeya Naoki)	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)	
研究協力者	鳥山 淳平 (Toriyama Jumpei)	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)	
研究協力者	チャン ソファル (Chann Sophal)	カンボジア森林局森林野生生物研究所・元副所長	
研究協力者	レヴィア デルフィス (Levia Delphis)	米国デラウェア大学・Professor	

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			
カンボジア	Forestry Administration			
米国	University of Delaware			