

令和 6 年 6 月 6 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：19K06153

研究課題名（和文）土壌水分供給能からみた極めて高い樹高を有する熱帯平地乾燥常緑林の成立条件

研究課題名（英文）Conditions for the establishment of tropical dry evergreen forests with extremely high tree heights from the perspective of soil moisture supply capacity

研究代表者

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

研究者番号：10353616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱帯モンスーン地域に分布する平地乾燥常緑林の、乾季の蒸散を支える土壌の水分供給能力を解明するために、数値モデルを用いたシミュレーションを行い、実測値により検証を行った。その結果、強い乾燥が続いた2015～2016年を数値モデルの解析対象にした場合、根系深を8mと仮定し、蒸発散速度の低下レベルの設定を行えば、土壌水分の再現性は相応に高いことを確認できた。現地での実証研究としては、常緑林と疎林では降雨に対する地下水位変動が大きく異なったこと、常緑林では疎林や落葉林よりも土層が厚く、表層土壌含水率が高いこと、それらが常緑林、疎林、落葉林の樹高分布に影響している可能性を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平地乾燥常緑林の成立条件を解明するために、植生タイプごとの土壌水分供給能の違いを実測値の比較により明らかにし、数値モデルによる土壌水分移動シミュレーションにより、スーパーエルニーニョの特異年における土壌水分動態を再現できた。これにより、気候変動の影響を受けやすい熱帯モンスーン地域における、森林の劣化、減少、回復等の様々なシナリオを想定した、水資源の動態予測に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the soil moisture supply capacity that supports transpiration during the dry season in dry evergreen forests distributed in tropical monsoon regions, a simulation was performed using a numerical model and verified with actual measurements. As a result, when the numerical model was used to analyze the extremely dry period of 2015-2016, it was confirmed that the reproducibility of soil moisture was reasonably high if the root depth was assumed to be 8m and the level of decrease in evapotranspiration rate was set. In the field demonstration study, it was confirmed that the groundwater level fluctuation in response to rainfall was significantly different between evergreen forests and sparse forests, that the soil layer in evergreen forests was thicker and the surface soil moisture content was higher than in sparse forests and deciduous forests, and that these may affect the tree height distribution of those forests.

研究分野：森林土壌学

キーワード：土壌水分 深層土壌 乾燥常緑林 乾燥落葉林 根系到達深度 土壌特性 樹高

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東南アジア北部に位置するインドシナ半島は、年2回卓越風向を変えるモンスーンの影響を強く受け、明瞭な乾季と雨季が存在する熱帯モンスーン気候下にある。半島中南部に位置するカンボジア王国は、長らく内線が続き経済発展が遅れたため、天然生林が1990年代まで広範囲に残存していた。2000年代以降、内政の安定により天然生林は開発の名のもと急速に伐採が進んだが、王国中央部には非常に樹高の高い平地乾燥常緑林が、乾季にはほとんど雨の降らないのにもかかわらず、今なお広く分布している。しかしながら、樹高が高い木になるほど蒸散に用いる水分を吸い上げることが難しいため、乾燥常緑林の樹木は高木に生長しにくいというのが通説であり、植物生理学的な研究だけではその成立条件が説明できない。

2. 研究の目的

本研究では、カンボジア王国コンポントム州に位置する平地乾燥常緑林^{1*2}を主な研究対象とし(図1) 降雨パターンと地下水位変動、深層土壌の水分保持能力の実測値を検証値として、土壌水分移動シミュレーションにより、長く厳しい乾季における樹木への潤沢な水供給メカニズムを解明することを目的とする。これにより、極めて高い樹高を有する平地乾燥常緑林の成立メカニズムを、深層土壌層内の水分貯留の観点から明らかにし、スーパーエルニーニョのような極端な高温・乾燥に対して、厚い土壌層が分布する平地乾燥常緑林がどのくらいまで耐え切れるかを定量的に評価することができる。

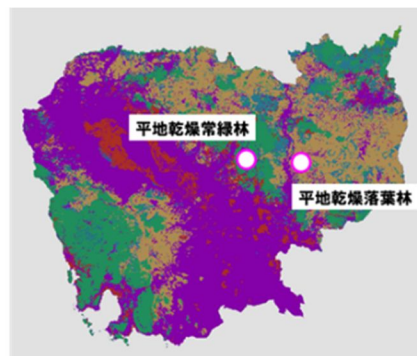


図1 カンボジア植生図 (緑色: 常緑林 黄緑色: 落葉林) Ito et al. (2021)を改変。

3. 研究の方法

(1) 大型土壌断面における地下水位と土壌含水率の実測・パラメータ化

世界に例をみない、平地乾燥常緑林内の深さ9mの大型土壌断面^{3*4}(図2)で7年間にわたって毎日実施されてきた地下水位観測結果の解析を行った。また、年数回の大型土壌断面内での深さ20cmおきの土壌含水率測定による精密な実測値を取得し、土壌水分移動シミュレーションの精度の高いパラメータを蓄積した。さらに、平地乾燥常緑林近隣の平地乾燥疎林(土層厚8m以上²)にも、新たにバックホウで大型土壌断面を掘削し、土壌含水率の実測と毎日の土壌断面撮影による地下水位観測を実施した。



図2 平地乾燥常緑林大型土壌断面 (地下水位: -6.0m)

(2) 蒸発散量の実測・パラメータ化

平地乾燥常緑林内の、高さ60mの気象観測タワーで2003年から実施されてきた蒸発散量計測^{5*6}を研究期間内でも継続し、深さ9mの大型土壌断面内の土壌水分移動シミュレーションに用いるパラメータを蓄積した。

(3) 植生センサスプロットおよびその周辺における樹高測定

土層が非常に厚い平地乾燥常緑林、およびメコン川を挟んだクラチェ州の、土層の薄い平地乾燥落葉林⁷(図1)にそれぞれ設置してある、4haの植生センサスプロットおよびその周辺において、前者においては航空機LiDARデータ、後者においてはレーザー距離計TruPulse360による現場での実測により、樹高測定を行った。

(4) 植生センサスプロット内の土壌含水率多点測定による年変動・季節変動の把握

平地乾燥落葉林内の40地点において、2019年11月、2020年1月、2023年1月、同8月に実施したTDR土壌水分計による土壌含水率多点測定結果に加え、両サイトで蓄積した2015~2016年(スーパーエルニーニョによる極度の乾燥年)を含む10年間の土壌水分分布の年変動・季節変動を解析した^{7*8}。

(5) 土壌水分移動シミュレーションによる深層土壌層内の水分貯留量算出

蓄積された地下水位、土壌含水率、蒸発散量をパラメータとして用いて、数値モデルによる土壌水分移動シミュレーションによる平地乾燥常緑林の深層土壌層内の水分貯留量を予測した⁹。特に、極度に乾燥したスーパーエルニーニョ年における土層内の土壌水分動態と下層土の飽和透水係数について解析した。

4. 研究成果

(1) 大型土壌断面における地下水位の長期変動

2011年12月～2018年11月の7年間にわたる、平地乾燥常緑林（以下常緑林）内の大型土壌断面における地下水位変動を図3に示す。概して1年周期で波型の地下水位の変動が認められるが、地下水位は11～12月に極大値を、5～6月に極小値を示し、降水量の極大値（9～10月に出現）からは2～3ヶ月の、極小値（1～2月に出現）からは4～5ヶ月のタイムラグがあった。年ごとの極大値と極小値の差もまちまちであったが、特にスーパーエルニーニョの影響が大きかった2015～2016年にかけては、地下水位の極大値が-7.2mと非常に低く、地下水位が観測されない期間が長く続いた。この期間は、深層土壌層内の水分貯留量が極端に減少した可能性が高いと考えられた。また、2017～2018年にかけては、地下水位の極小値が-6.7～-6.9mを示し、2013～2015年と比較して1.5m程度高かったが、この理由としては、2015年から始まった付近の違法伐採による樹木の消費量（蒸散量）の低下が考えられた。

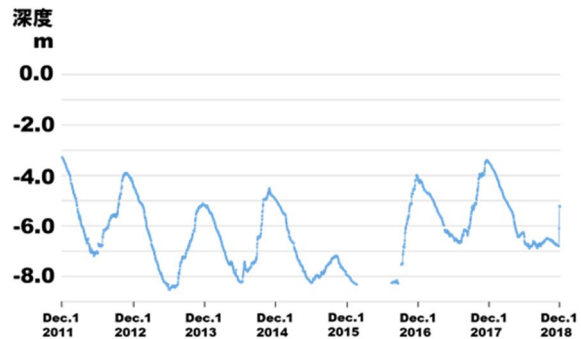


図3 平地乾燥常緑林大型土壌断面地下水位変動（2011～2018）

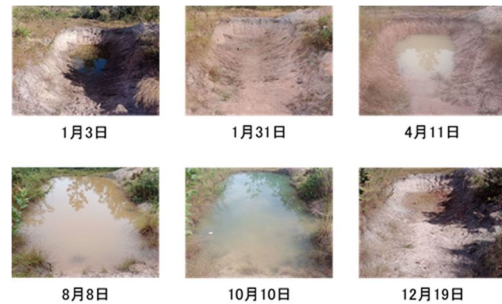


図4 平地乾燥常緑林大型土壌断面地下水位変化（2022年）

一方、平地乾燥疎林（以下疎林）内に掘削した大型土壌断面における2022年1月～12月の地下水位観測（図4）によると、常緑林とは異なり地下水位は降水量に対応する形で変動し、特に雨季の最盛期の8月8日には、地下水位は地表面付近に達していた。このことは、疎林の蒸散量は常緑林と比較して非常に少ないことを示唆している。

(2) 植生センサスプロットを中心とする樹高分布の特徴

航空機LiDARデータに基づく常緑林内の樹高分布、および実測値に基づく疎林内の樹高分布を図5に、同じく実測値に基づく平地乾燥落葉林（以下落葉林）内の土壌型別樹高分布を図6にそれぞれ示す。樹高は各林分で明確に異なり、常緑林（平均樹高 35.5m）、疎林（同 13.4m）、落葉林（同 8.7m）の順であった。落葉林が最も樹高が低い理由としては、分布する土壌は保水能が比較的高いが¹⁰、土層が薄いため利用できる水の量は少なく、樹高は高くなると考えられた。また、疎林土壌が常緑林土壌と同程度の土層厚でも平均樹高が2倍以上低い（図5）要因として、土性（シルト質：砂質）による土壌の保水能の違いと、標高や微地形の差による地下水位変動の違いが考えられた。



図5 平地乾燥常緑林および疎林内の樹高分布

落葉林は疎林と最高樹高はほぼ変わらないものの、6～9mの樹高を有するものが全体の57%を占めていた。土壌型別では（図6）土層が非常に薄いレプトソルの分布域で平均樹高 7.3mと、プリンソソル・アレノソル分布域の平均樹高 9.3mよりも2m低い値を示した。土層が極端に薄い場合、雨季乾季を問わず利用可能な土壌水分量が非常に少なく、そのことが落葉樹の成長差に影響を及ぼしていると推察された。

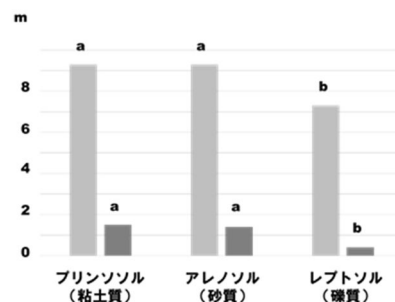


図6 平地乾燥落葉林内の土壌型別平均樹高（灰白色）と土層厚（灰色）
*aとbは5%水準で有意差有り。

(3) 植生センサスプロット内の土壌水分変動

常緑林と落葉林の、植生センサスプロット（各4ha）内の平年乾季（2014年2月）の表層土壌含水率分布図を図7に示す⁷。表層土壌含水率は植生、土壌型、土層厚、地形に影響を受け、最も影響が大きかったのは土層厚の違いであった（図8）。平年乾季の落葉林では下草が枯れ乾燥が進んでいるのに対し、常緑林では湿地が点在し、林床は湿潤な環境に保たれていた。一方、エルニーニョ現象が発生して極端な少雨となった2015～2016年には、常緑林においても林床が極端に乾燥することが明らかになった。気候変動により降水量が激減した場合、厚い土層の貯留水分が減少して、常緑林の生育に重大な影響を及ぼす可能性が示唆された。

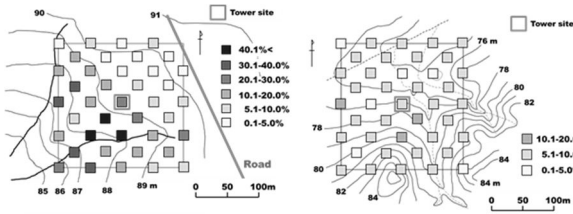


図7 平地乾燥常緑林 (左) と平地乾燥落葉林 (右) の平年乾季の土壌含水率分布 (2014年2月)

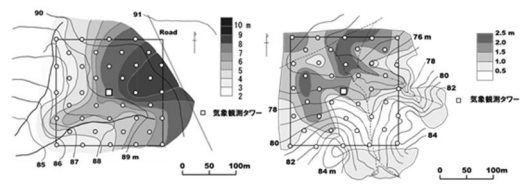


図8 平地乾燥常緑林 (左) と平地乾燥落葉林 (右) の土層厚分布

(4) 常緑林深層土層内の土壌水分移動シミュレーション

まず根系深、乾季蒸発散速度、下層土の飽和透水係数を変化させて、スーパーエルニーニョ年の乾季の蒸発散を維持しつつ、土壌水分動態の再現性が高い条件を探索した。非エルニーニョ年において土壌水分動態の再現性が高かった根系深4mの場合、根系深度内の積算有効水分量が0になり、非エルニーニョ年の蒸発散速度をベースにすると乾季の蒸散を維持することはできなかった。そのため、根系深を8m、乾季の蒸発散速度のレベルを50%で固定し、下層土の飽和透水係数を調整した。下層土の飽和透水係数を測定値の $1.06 \times 10^{-6} \text{cms}^{-1}$ とした場合、数値モデルにおける2016年の雨季の0~4mの積算有効水の貯留回復は、観測値より過大となった(図9)。続いて、飽和透水係数を $3.18 \times 10^{-6} \text{cms}^{-1}$ と高めた結果、0~4mの積算有効水の貯留回復は観測値に大きく近づいた。ただしこの設定値を用いても、下層土(深さ550~750cm)の飽和透水係数は、依然として他の層位より2~3オーダー低い。このため調査地において、緻密な構造をもつ下層土は飽和透水係数が非常に小さく、根系分布域の土壌水分の流出を遅延させる重要な役割を持つと考えられた。

さらに飽和透水係数を $5.30 \times 10^{-6} \text{cms}^{-1}$ と設定して土壌水分の鉛直分布を参照した結果、0~4mの積算有効水の積算値および鉛直分布が相応に再現できていることを確認した(図10)。本数値モデルは地下水位の変動を明示しないが、土層内のマトリックポテンシャルの値から描画を試みると図11の実線になり、観測値との乖離がみられ、未着手のパラメータによるモデル改良の余地を示唆した。

本研究の数値モデルは、スーパーエルニーニョ年では非エルニーニョ年と異なり、根系深を4mと仮定した場合、乾季の土壌水分動態を適切に再現できなかった。一方、根系深を8mと仮定し、非エルニーニョ年の土壌空隙パラメータを利用した場合、蒸発散速度の低下レベルの設定を行えば、土壌水分の再現性は相応に高いことを確認できた。本調査地ではスーパーエルニーニョ年の大量枯死の現象は確認されておらず、気孔閉鎖に伴う蒸散低下が生じていた可能性が高い。そのため、土壌の乾燥から気孔閉鎖につながるフィードバックの組み込みは、今後のモデル改良点の1つと考えられた。

(5) まとめと課題

熱帯モンスーン地域に分布する平地乾燥常緑林の、乾季の蒸散を支える土壌の水分供給能力を解明するために、数値モデルを用いてシミュレーションを行った結果、蒸発散レベルを調整することにより土壌水分変動を実測値に近づけることができた。特に、2015~2016年に発生したスーパーエルニーニョの際にも、蒸発散レベルを下げることで、土壌水分の再現性が相応に高い結果が得られた。とりわけ、厚い土層の土壌水分動態を特徴づける値となる、下層土の非常に小さい飽和透水係数の重要性が、スーパーエルニーニョ年においても示された。これらの結果は、近年森林の伐採圧が高まるメコン川下流域のカンボジアにおいて、森林の劣化、減少、回復等の様々なシナリオを想定した、水資源の動態予測に貢献するものである。

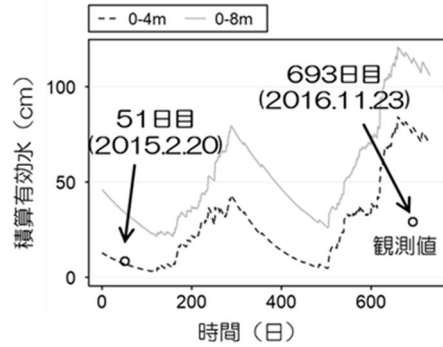


図9 モデル出力による積算有効水の推移
図中の点線と実線は、それぞれモデル出力による深さ0~4mと0~8mの積算有効水、2つの○は深さ0~4mの観測値を示す。

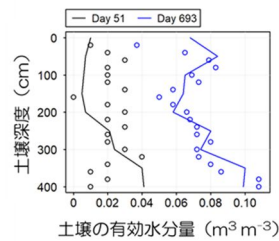


図10 土層内の有効水分の分布
図中の○は観測値、実線はモデル出力である。

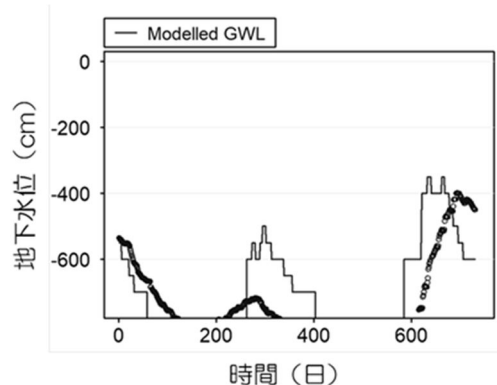


図11 地下水位の推移
図中の○は観測値、実線はモデル出力である。横軸は2015~2016年の経過日数(1~731)を示す。

一方、本研究期間内に発生した新型コロナウイルス感染症の全世界的な広がりにより、当初計画していた2020～2021年度の現地での観測・測定が、一部を除いて不可能となった。これにより、数値モデルに使用するパラメータを、過去に取得した測定データから算出せざるを得なかった。今後も新たな感染症の発生と世界的な拡大のリスクは避けられないと予想されるため、観測ベースの国際研究は、相手国側のスキル向上も含めたより密接な連携が必要になる。

引用文献

- *1 大貫(2009)熱帯モンスーン気候下での常緑林の成立 - 厚い土層のはたらき - , 水利科学 52(6):1-16 .
- *2 Ito et al (2021) Bimodal leaf fall in a lowland dry evergreen forest in Cambodia, *Cambodian Journal of Natural History* 2021:21-39.
- *3 Ohnuki et al. (2007) Apparent change in soil depth and soil hardness in forest areas in Kampong Thom Province, Cambodia, *Forest Environments in the Mekong River basin*, 263-272 .
- *4 Ohnuki et al. (2008a) Seasonal change in thick regolith hardness and water content in a dry evergreen forest in Kampong Thom Province, Cambodia, *Geoderma* 146(1-2):94-101 .
- *5 Nobuhiro et al. (2007) Year-round observation of evapotranspiration in an evergreen broadleaf forest in Cambodia, *Forest Environments in the Mekong River basin*, 75-86 .
- *6 Tamai et al. (2007) Measurements of wind speed, direction, and vertical profiles in an evergreen forest in central Cambodia, *Forest Environments in the Mekong River basin*, 87-96 .
- *7 大貫ら (2014) カンボジア国メコン川東岸に成立する平地落葉林の立地環境 , 水利科学 57(6):14-25 .
- *8 Ohnuki et al. (2022) Fluctuation of soil water content in tropical seasonal forests of Cambodia focusing on soil types and properties, *JARQ* 56(2):177-187 .
- *9 鳥山ら (2024) モンスーン熱帯のスーパーエルニーニョ年における低地常緑林の土壌水分動態 - 数値モデルによる解析 - , *九州森林研究* 77:195-198 .
- *10 Ohnuki et al. (2008b) Distribution and characteristics of soil thickness and effects upon water storage in forested areas of Cambodia, *Hydrological Processes* 22(9):1272-1280 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasuhiro OHNUKI, Jumpei TORIYAMA, Eriko ITO, Shin'ichi IIDA, Naoki KABEYA, Sophal CHANN, Samkol KETH	4. 巻 56-2
2. 論文標題 Fluctuation of Soil Water Content in the Tropical Seasonal Forests of Cambodia Focusing on Soil Types and Properties,	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JARQ (電子版)	6. 最初と最後の頁 177, 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6090/jarq.56.177	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 鳥山淳平、大貫靖浩、壁谷直記、清水晃、清水貴範、飯田真一、玉井幸治、KETH Samkol、CHANN Sophal	4. 巻 77
2. 論文標題 モンスーン熱帯のスーパーエルニーニョ年における低地常緑林の土壌水分動態 - 数値モデルによる解析 -	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 九州森林研究	6. 最初と最後の頁 195, 198
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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大貫 靖浩、鳥山 淳平、飯田 真一、伊藤 江利子、Keth Samkol、Chann Sophal
2. 発表標題 カンボジアの熱帯季節林における 土壌水分環境
3. 学会等名 2020年度東北地理学会秋季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大貫靖浩、飯田匡司、玉井幸治、清水貴範、Keth Samkol、Chann Sophal
2. 発表標題 カンボジアの熱帯乾燥常緑林・落葉林における土壌呼吸フラックスと土壌含水率・地温との関係
3. 学会等名 2019年度東北地理学会春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大貫靖浩、鳥山淳平、伊藤江利子、Keth Samkol、Chann Sophal、
2. 発表標題 カンボジアの森林植生分布に影響を与える土壌特性
3. 学会等名 2023年度東北地理学会春季学術大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Growth Conditions of Tall Evergreen Forests https://www.ffpri.affrc.go.jp/en/ipo/collaborativeresearch/soilmoisture/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	鳥山 淳平 (Toriyama Jumpei) (00582743)	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)	

	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	清水 貴範 (Shimizu Takanori)		
研究協力者	伊藤 江利子 (Ito Eriko)		

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	カンボジア森林野生生物開発研究所			