

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2020～2023

課題番号：20KK0140

研究課題名（和文）侵略的外来植物がハワイ諸島の森林流域水源涵養機能を壊す

研究課題名（英文）Invasive plants alter water resources and soil conservation functions in Hawaii forested watersheds

研究代表者

熊谷 朝臣（Kumagai, Tomo'omi）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：50304770

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：当初、ハワイ諸島の多数の観測点からなる森林流域において、侵略的外来植物による水源涵養機能の変化の統合解析を行おうとした。しかし、本研究期間における新型コロナウイルス感染拡大により、ハワイ諸島における観測・データ解析が不可能となった。そこで、（1）森林水源涵養機能を精緻に評価する全く新しいシミュレーションモデルBLADEを開発、（2）BLADEの正当性確認が行える土壌水分・基岩構造・森林構造の高時空間解像度観測データを神奈川県丹沢山地で遂行、（3）観測データを用いて、BLADEが、特に低流出時の森林水源涵養機能の評価に高い能力を発揮する、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

植生変化、気候変動など、森林の水源涵養機能を変え得る要因は、様々であるが、その定量的評価は全く不十分である。その原因は、森林流域の水文特性を精緻に記述できる機構論的モデルの欠如と、たとえ、それが完成したとしても、その正当性確認ができるほどの高時空間解像度観測を入手することの困難性にあった。本研究では、新機軸で開発された森林水循環シミュレータBLADEと、これまで長きに渡り水文観測が行われてきた水文試験地に高度観測システムを投入することで、これまででないレベルでの森林水源涵養機能の評価が可能となった。このことは、社会的には、森林の公益的機能を理論的に世に示すことに寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：The original plan was to conduct synthesized analyses on forest water resources impacted by invasive exotic plants with several experimental forested watersheds over the Hawaii Islands. However, it was impossible to conduct observations and data analysis of Hawaiian forest water resources because of the worldwide COVID situation. Under such a situation, we (1) were successful in developing a brilliant forest water cycling simulator, BLADE, (2) conducted fine time and space resolution data of soil moisture, bedrock structure, and canopy structure to validate the BLADE, (3) suggested that the BLADE can evaluate the forest function of stable water resources, especially, at low flow periods with high quality.

研究分野：森林生物地球科学

キーワード：水源涵養機能 森林 水循環

### 1. 研究開始当初の背景

四国とはほぼ同じ陸地面積を持つハワイ諸島は、北東貿易風と急峻地形要因の複合作用により急激な環境勾配を持ち、森林流域における水資源保全と土砂流出抑止、つまり、森林の水源涵養機能は、極めて脆弱でありながらも人々の生活の中で重大な役割を担っている。一方、ハワイ諸島の至る所で、キバンジロウという単一外来植物が固有在来植物を駆逐しキバンジロウのみが優占する群落を形成している。その結果、生物多様性の喪失をはじめ、様々な生態系サービスの低下を引き起こし、特に、水源涵養機能の劣化が大問題となっている。そこで本研究では、ハワイ諸島において失われた森林の水源涵養機能を取り戻すための方策に貢献することを目的として、既に構築・運用が行われている高密度の気象観測網とキバンジロウ優先群落・在来植生群落からなる多数の森林水循環観測サイトを利用し、これまでの蓄積観測データと必要に応じて行う新規観測とを組み合わせ解析することで、ハワイ諸島全域に渡るキバンジロウの逸出・侵略による森林流域の水源涵養機能の劣化メカニズムを明らかにする。

### 2. 研究の目的

上記の通り研究開始当初は、ハワイ諸島における侵略的外来植物の優占による森林の水源涵養機能の劣化を機構論的に評価することが目的であった。しかし、本研究期間中の新型コロナウイルス感染蔓延の影響により、目的の発展的変更を行った。すなわち、当初の目的の手段に相当することである：森林水源涵養機能を精緻に評価する全く新しいシミュレーションモデル **BLADE** (**BL**ock **Aggregation of Darcy's law Elements model**) の開発と **BLADE** を用いた森林水源涵養機能評価の実効性を確立することに注力するということである。

### 3. 研究の方法

**BLADE** の基本構造 (図1) は、流域をメッシュ分割して土壌・基岩柱に分け、**Darcy** 則に基づき隣接するブロック間での水移動 (土壌の飽和・不飽和側方流、土壌から基岩への浸透、基岩から土壌への湧出、基岩の飽和側方流) を計算するものである。ここでは、**BLADE** の実効性の検討のために、2つのタイプの **BLADE** : 「A: 土壌・基岩の両方を考慮」と 「B: 土壌のみを考慮」を神奈川県丹沢山地大洞沢流域 (図2) に適用した。

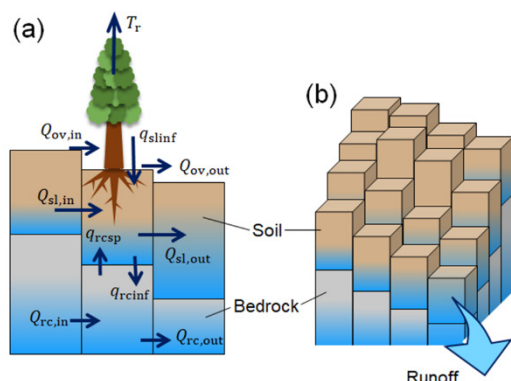


図1. **BLADE** の概念図。(a) 土壌ブロック・基岩ブロックの水収支。各水移動項は支配方程式に登場する。(b) 流域要素を表現するモデルブロック群。

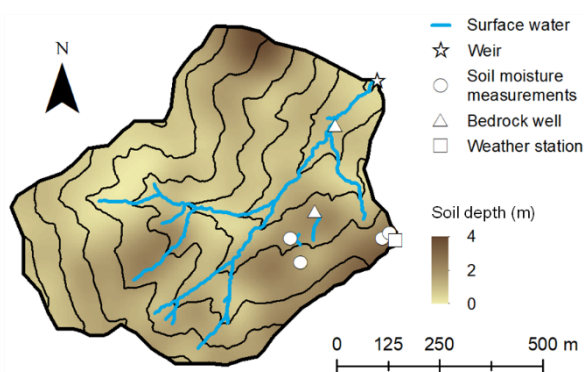


図2. 地形・土層厚分布図。対象水文試験地では流域スケールの水収支観測が行われている。等高線間隔は 50 m、等高線最高位・最低位はそれぞれ 850・450 m である。

一様乱数により生成した物理パラメータセットをモデル入力とし、同一セットを A・B 両モデルに入力してモデル計算を行なった。さらに、低流量時の再現性を重視してパラメータセットを評価するため、**Nash-Sutcliffe** 指標 (**NSE**) を尤度としてメトロポリス法を応用して不確実性込みの流量を求め、ベイズ推論によって推定されたパラメータに基づいて流域の保水性・透水性の推定を行ない、結果を両モデルで比較した。

### 4. 研究成果

高流量、低流量、両者のバランスを考慮、を重視した **NSE** を、それぞれ、 $NSE_o$ 、 $NSE_{inv}$ 、 $NSE_{in}$  とする (図3)。高水流量を重視した場合では、モデル A・B で優劣はつかないが、低水流量を

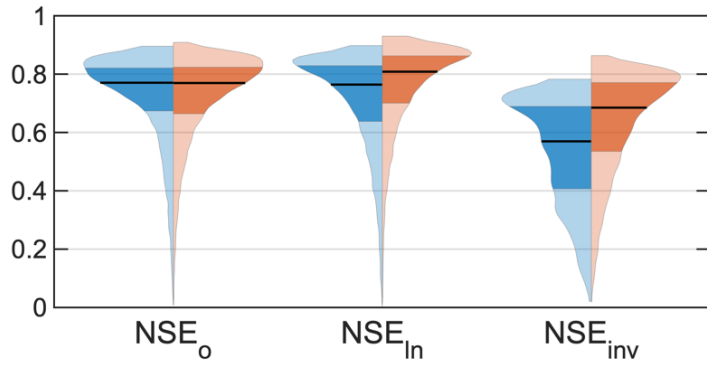


図3. 各種 NSE (パラメータの事後分布に基づいてランダムにモデル入力した場合に得られる NSE の確率密度) を標本 ( $n = 25000$ ) としたバイオリンプロット。黒の実線は中央値、濃い陰影は四分位範囲、上端は最大値、下端は最小値。赤・青は、それぞれモデル A・B の結果。

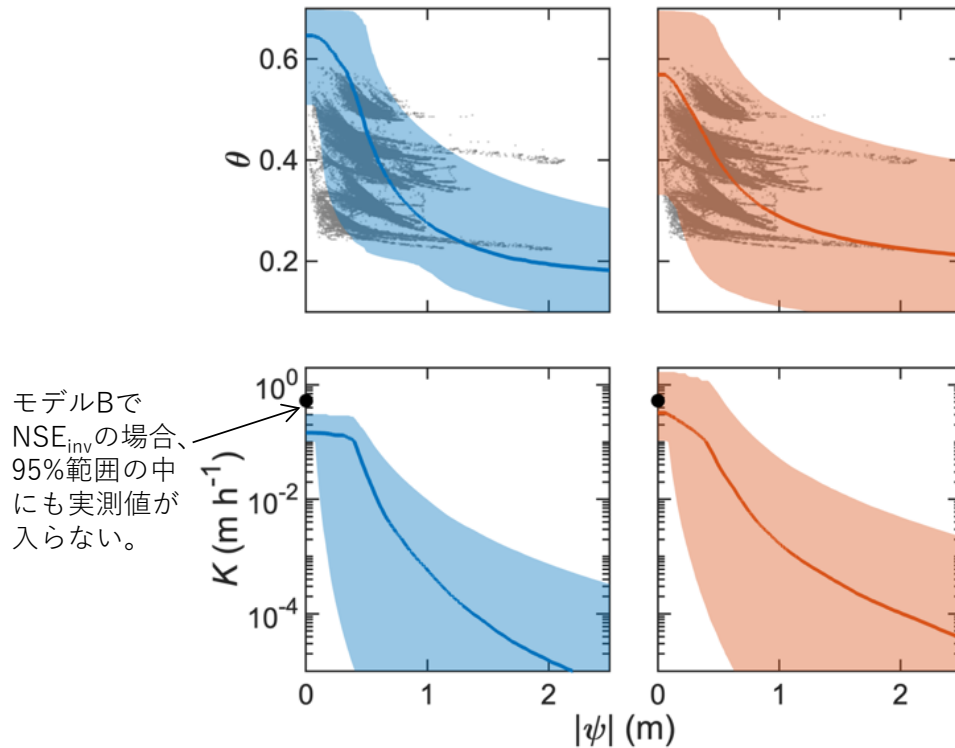


図4.  $NSE_{inv}$  の中央値以上を与えるパラメータによる計算土壌水分特性と実測特性の比較 (上段: 土壌水分特性曲線、下段: 土壌水分—飽和不飽和透水係数曲線)。赤・青が、それぞれモデル A・B の結果。 $\theta$ : 体積含水率、 $K$ : 透水係数、 $\psi$ : マトリックポテンシャル。実線が中央値、陰影が 95% 範囲、灰色の点が観測値。なお、実測特性は 4 サンプルの飽和透水係数の相乗平均値で、地表面から 10 cm 深で採取したコアサンプル (面積 19.6 cm<sup>2</sup>、高さ 5.1 cm) を用いて各サンプル 3 回の定水位試験により得られた。

重視するにつれて、モデル A、つまり基岩水文現象の考慮の重要度が格段に増すことが分かる。また、基岩水文現象を無視したモデル (モデル B) により、土壌水分特性曲線・透水係数曲線を逆算した場合、全流出に対する基岩流出の寄与を補償するような実測とは相容れない透水係数特性が出現した (図 4)。一方、基岩の役割の重要度を考慮したモデル (モデル A) の逆算による土壌水分特性曲線・透水係数曲線は、実測による特性と矛盾しなかった。

結論として、BLADE は、これまでにないレベルでの森林水源涵養機能、特に、湧水時流量・水資源、の評価が可能となる画期的な森林水循環シミュレータであることが示された。このことは、社会的には、森林の公益的機能を理論的に世に示すことに BLADE が多大に寄与することになることを意味するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hata, Y., Kumagai, T., Shimizu, T. and Miyazawa, Y.	4. 巻 477
2. 論文標題 Implications of seasonal changes in photosynthetic traits and leaf area index for canopy CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O fluxes in a Japanese cedar ( <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don) plantation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ecological Modelling	6. 最初と最後の頁 110271
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 -

1. 著者名 Egusa, T., Kumagai, T., Oda, T. and Ohte, N.	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of bedrock groundwater discharge on spatial variability of dissolved carbon, nitrogen, and phosphorous concentrations in stream water within a forest headwater catchment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e13993
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 -

1. 著者名 Egusa, T., Oda, T., Sato, T. and Kumagai, T.	4. 巻 35
2. 論文標題 Estimation of sub-annual inter-catchment groundwater flow using short-term water balance method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e14368
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 -

1. 著者名 Fujime, N., Kumagai, T., Egusa, T., Momiyama, H. and Uchiyama, Y.	4. 巻 301-302
2. 論文標題 Importance of calibration in determining forest stand transpiration using the thermal dissipation method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108356
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 -

1. 著者名 Momiya, H., Kumagai, T. and Egusa, T.	4. 巻 499
2. 論文標題 Model analysis of forest thinning impacts on the water resources during hydrological drought periods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 119593
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 -

1. 著者名 Egusa, T., Kumagai, T., Oda, T. and Ohte, N.	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of bedrock groundwater discharge on spatial variability of dissolved carbon, nitrogen, and phosphorous concentrations in stream water within a forest headwater catchment.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e13993
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 -

1. 著者名 Fujime, N., Kumagai, T., Egusa, T., Momiya, H. and Uchiyama, Y.	4. 巻 301-302
2. 論文標題 Importance of calibration in determining forest stand transpiration using the thermal dissipation method.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108356
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 -

1. 著者名 Levia, D. F., Creed, I....., Kumagai, T., .... and Bruen, M.	4. 巻 13
2. 論文標題 Homogenization of the terrestrial water cycle.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 656-658
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 Momiya, H., Kumagai, T., Fujime, N., Egusa, T. and Shimizu, T.	4. 巻 623
2. 論文標題 Forest canopy interception can reduce flood discharge: Inferences from model assumption analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 129843
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 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔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	堀田 紀文  (Hotta Norofumi)  (00323478)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授    (12601)	
研究分担者	宮沢 良行  (Miyazawa Yoshiyuki)  (80467943)	九州大学・キャンパス計画室・助教    (17102)	
研究分担者	江草 智弘  (Egusa Tomohiro)  (90829897)	静岡大学・農学部・助教    (13801)	

#### 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
---------	---------