

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K02023

研究課題名（和文）合成開口レーダを利用した東北タイ農村地域発展経路の再評価

研究課題名（英文）Analysis on developing processes of rural areas in Northeast Thailand using SAR data

研究代表者

星川 圭介（Hoshikawa, Keisuke）

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：20414039

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：合成開口レーダ後方散乱係数を用いて東北タイの天水田を湿潤度（湛水頻度と湛水割合）に応じて分類する方法の開発を行った。谷間や低地の水田と丘陵斜面の畑地（かつては水田として開拓）という湿潤度が顕著に異なるカテゴリへの分類を行うには、クロス偏波の使用が有効であった。さらに雨期を挟んだ時系列のライク・クロスの両偏波を使用することにより、比較的湿潤で現在も水田として使用されている土地をさらに細かな湿潤度の違い（季節的湛水パタンの違い）に応じて分類することが可能であり、ランダムフォレストを用いたOOB精度は90%以上であった。その際、C-bandとL-bandの間で分類精度に大きな差異は認められなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天水田の湿潤度（湛水の頻度や面積割合）は収量や生産安定性を規定する重要な要素である。東北タイにおいては、天水稲作の不安定性は地域住民の生存戦略や地域発展史に影響を与えてきたとされ、国内外の研究者により多くの研究がなされている。地域における水田の湿潤度を定量的に評価できれば、これまで東北タイにおいて積み重ねられてきた研究成果をより精緻化できる。ただし天水田の湿潤度は地形条件等により連続的に変化するため、広域にわたって把握・評価することが困難であった。本研究の成果は、天水田を広域的に評価する実用的な手法を提供するもので、東南アジアをはじめとする天水田地域を対象とした地域研究に大きく貢献しうる。

研究成果の概要（英文）：This study developed methodologies to classify the rainfed paddy fields in Northeast Thailand according to wetness (frequency and proportion of waterlogging) using synthetic aperture radar backscatter coefficients. Use of the cross-polarization backscatter coefficient effectively distinguished rice paddies in valleys and lowlands from upland-crop fields on hillsides that were once rice fields. Time-series backscatter coefficients in both co- and cross-polarizations throughout the rainy season resulted in accurate classifications of paddy fields into subcategories according to more detailed differences in wetness (differences in seasonal waterlogging patterns). OOB accuracy of Random Forests was more than 90%. No significant differences in classification accuracy were found between C-band and L-band.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：合成開口レーダ 天水田 生産安定性 開墾 東北タイ

1. 研究開始当初の背景

タイ国東北部(以下、「東北タイ」)では、1900年代初めごろから水田面積が急拡大し、1970年代までに地域総面積の4割近くを占めるに至った。低地から丘陵、氾濫原に至るまで多様な条件への土地が水田化されたため、東北タイにおける水田の水文的地立地条件は非常に多様である。

水稲の生産量や安定性を規定する水文的地立地条件とは、氾濫被害を別にすれば、各水田区画における湛水面の割合および湛水継続時間となる。水田が急拡大する中、各時代においてどのような水文条件の土地に水田が分布していたか、ということは、地域における食料生産の安定性や生存戦略を読み解くカギとなる。たとえば福井らのグループは東北タイにおける一つの村落のすべての水田区画を踏査し水文条件や稲の生育状況等を調べ、村落の社会構造の成因や食糧需給とその変化について緻密な考察を行った(福井, 1988)。また研究代表者も東北タイ各地の農村で土地利用変化や伝統的灌漑に関する聞き取り調査を実施して、それぞれの地域が水文条件に応じた生存戦略と発展経路を取ってきたことを示した(星川, 2009)。しかし福井らのような定量的かつ詳細な調査を広域にわたって実施した事例はない。地形のわずかな違いに規定される東北タイの水文条件は地形データなどからの推定が難しく、現場の踏査によるしかなかったのがその理由である。したがって伝統的灌漑が果たしてきた役割についても定性的な評価にとどまっている。

衛星搭載合成開口レーダ(SAR)は、土壌の湿潤状態を広域にわたって推定する有力な手段である。SARにより観測されるマイクロ波の後方散乱係数は土壌水分と高い正の相関があることが知られており、ヨーロッパや中近東など、比較的乾燥した地域における農地の含水率推定に広く用いられている。また、水面においては前方への鏡面反射のために後方散乱は極端に小さくなることを利用し、SARを利用した水田の抽出も行われている。しかし部分的湛水を生じる天水田では、土壌含水率の影響と水面による鏡面反射の影響が混在するため、非湛水不飽和の畑作地や湛水状態が安定的に保たれる灌漑水田に用いられてきた既存の方法により、天水田の湿潤度を評価することはできない。

本研究の開始までに、研究代表者らは、一辺50km程度の領域において、後方散乱係数の季節変化に基づくピクセルベースクラスタリングによって水文条件に基づく農地の分類が一定精度の精度において可能なこと(Hoshikawa et al. 2014)、および、面積1km²程度の窪地における天水田を、綿密な現地踏査に基づく教師データと時系列後方散乱係数の組み合わせによる機械学習により、最大90%程度の精度で分類可能なことを示した(Hoshikawa et al. 2018)。

ここからさらに、広域にわたって実用的な精度で天水田の分類・評価を行うにあたっては、2つの課題が存在した。まず、土壌水分と湛水面が後方散乱係数に及ぼす影響を分離する、あるいは2つの因子の合成により生成される後方散乱係数と地表面の状況の関係を特定することが求められた。また、教師データについては、空中写真や地形図の判読といった簡易な手法で取得できることが望ましい。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2点とした。

(1) 雨期の湿潤度に応じて天水田を分類する手法の開発

部分的湛水面が生じている水田を、湛水面の割合や持続期間に基づいて評価・分類する手法を開発する。その際、既往の研究では、広域を対象とした際に後方散乱の低下要因が乾燥によるものか湛水によるものか、十分に分離できていなかった点を解決し、精度の向上を図る。分類に当たっては機械学習機を用いるものとし、モデル構築に用いる教師データは空中写真や地形図、現地での聞き取り結果など、比較的簡易に得られるものとする。

(2) 天水田分類結果を用いた水田拡大過程の検討

開発された手法に基づいて、水田拡大過程の分析を試行的に実施する。これにより、分類手法の妥当性を検証するとともに、天水田の分類を通じた東北タイ農村地域発展経路の再評価への見通しを検討する。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

東北タイ全体を対象とした予備調査を実施した上で対象領域を絞りこみ、分類手法を開発するための地上データを取得するための詳細な調査を行った。

天水田の湿潤度は、稲作期における降水量と水田周辺の地形に規定される。東北タイでは地域によって年間降水量が900mmから2000mm程度にまでばらついており、降水量が過多でも過小でも、地域内での湿潤状態に差異が現れにくく、分類手法の開発には適さない。予備調査の結果、詳細な調査を行う地域をコンケン県ウボンラット郡周辺およびナコンラチャシマ県ブアヤイ郡周辺(いずれも年間降水量1300mm程度)とした。

詳細調査対象の2地域では、水田の性質に対する聞き取り調査を実施した上で、GNSSを用い

た地形測量を実施した。また、領域内の水田や畑地の湿潤状況に対する目視の調査も行った。

(2) 後方散乱係数の挙動分析

水田の湛水および植生状況に対する後方散乱係数の挙動は、偏波や波長によって異なることが指摘されている (Minh et al.2019 など)。本研究では L-band PALSAR と PALSAR-2 の HH および HV 偏波、C-band Sentinel-1 の VV および VH 偏波について、湿潤度と後方散乱係数の関係を分析し、天水田の分類に適した組み合わせを検討した。

湿潤度を定量的かつ広域的に推定することは現実的ではないため、代理指標として地形条件を用いることとした。天水田は直接降雨に加えて、相対的に標高の高い土地からの流入水に依存しており、その集水面積が大きいほど安定的に湿潤状態が保たれる。本研究は、GNSS で測定した局所的かつ微細な起伏、空間解像度 10m の DEM (SRTM) による 1km 四方領域における相対的標高、地形図や空中写真に基づき判別した地形区分 (低地・谷間・丘陵上の窪地) と後方散乱係数の関係との関係を分析した。

(3) 水田拡大過程の検討

対象地域は、後方散乱係数分析対象地域であるウボンラット郡周辺、および東北タイの中では比較的遅い 1960 年代以降に水田拡大が生じ、地形図等によって水田拡大過程を定量的に追跡しやすいウボンラチャタニ県デートウドム郡とする。水田分布の情報としては 1954 年と 2000 年代の情報に基づくタイ陸軍地図局の L-708 および L-7018 Series 1/50,000 地形図の他、2020 年代の情報として Sentinel-2 光学画像を使用した。

4. 研究成果

(1) 分類手法の開発

GNSS 測量結果と後方散乱係数

ブアヤイ郡周辺とウボンラット郡周辺においてそれぞれ 4 断面と 2 断面を測量し、後方散乱係数の季節的変化との比較を行った。図 1 にブアヤイ郡における結果を示す。Line A, B, C では低地部分において後方散乱係数の季節的変動が大きくなる傾向が見て取れる。低地部分の変動は降雨等による湛水の生成消滅によって後方散乱係数が大きく変動することに起因しており、後方散乱係数を用いることにより 1-2m 程度の標高差による水田の湿潤度を推定可能であることを示している。Line D の右端 (600m 地点) の相対標高は低いものの、低平となるのはその先であり、湛水を生じるには至っていないと考えられる。

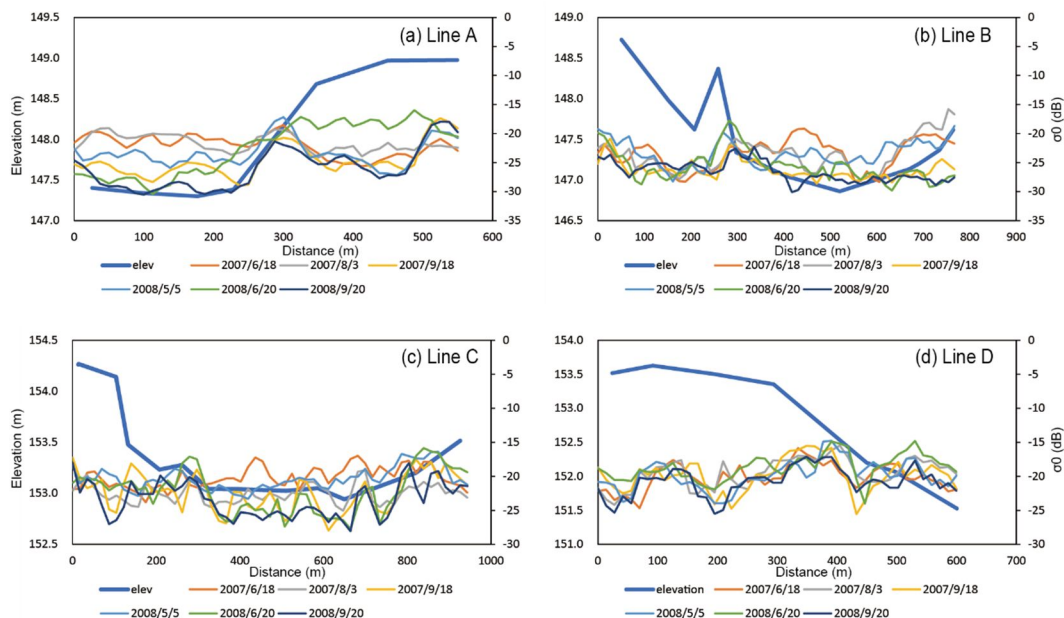


図 1 ブアヤイ郡の GNSS 測量 4 縦断面における後方散乱係数の挙動 (L-band PALSAR HV)

DEM 相対標高と後方散乱係数

対象地域を 1km 四方の領域に区画し、各領域内の水田の標高と後方散乱係数の相関関係を分析した。ウボンラット郡周辺における結果を図 2 に示す。C-band と L-band とともにクロス偏波において高い相関関係が示されている。また、相関関係は低地と丘陵部の境界付近で高くなる傾向がみられた。

相対的に標高が低い部分では湛水割合が高く、後方散乱係数が低下する。そのため、後方散乱係数と相対標高との間に正の相関関係が現れたものと考えられる。クロス偏波において高い相関関係が示されたことは、クロス偏波が湛水面の割合に対して敏感である可能性を示唆している。

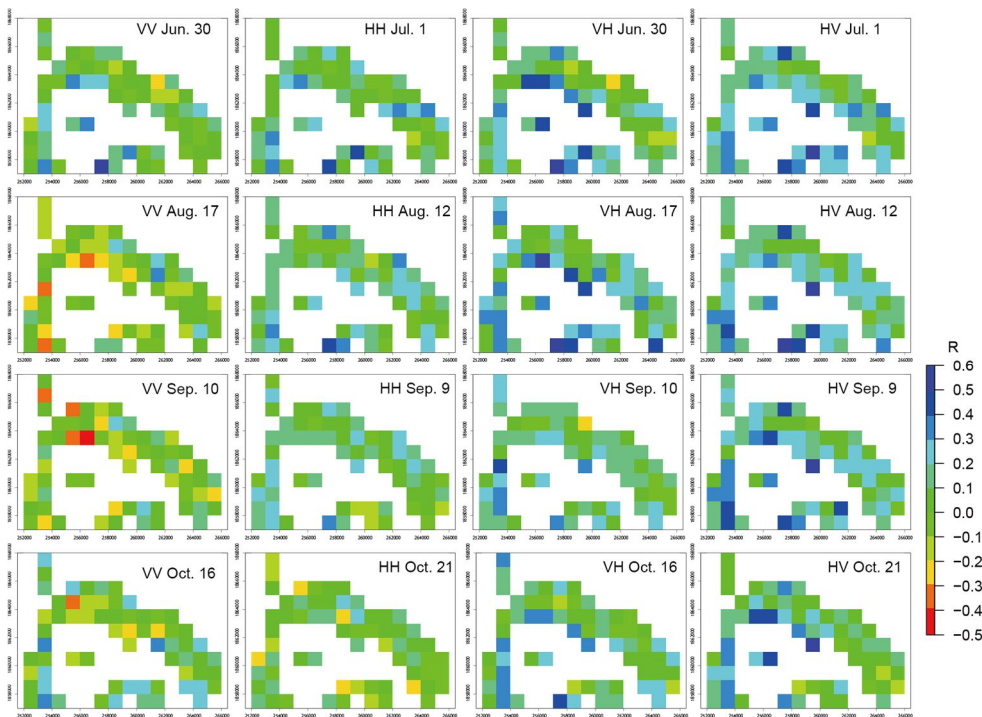


図2 各偏波と波長（C-band Sentinel-1 VV・VH，L-band PALSAR-2 HH・HV）の後方散乱係数と標高の相関係数（2020年）
領域は東西 20 km × 南北 13 km，各正方形は南北 1km

各偏波を用いたクラスタリング分析

偏波ごとの後方散乱係数の時系列変化に基づきピクセルベースの *k*-means クラスタリングを行った。図3にブアヤイ郡周辺領域の L-band PALSAR HV 偏波（2007-2008年）を用いた結果を示す。丘陵部に多く分布するクラスタに暖色系，低位部に多く分布するクラスタに寒色系の色を配している。クラスタリングの対象領域は，2000年代のタイ陸軍地図局によるもので，現在までに丘陵部の一部はサトウキビ畑等に変化している。

クラスタ空間分布と地形条件の関係を詳細に分析した結果，HV を用いたクラスタリングが HH を用いたクラスタリングよりも地形条件とよく符合していることが明らかになった。相対標高との相関の分析結果と合わせ，クロス偏波が湛水状況に基づく分類に有効であることを示唆している。

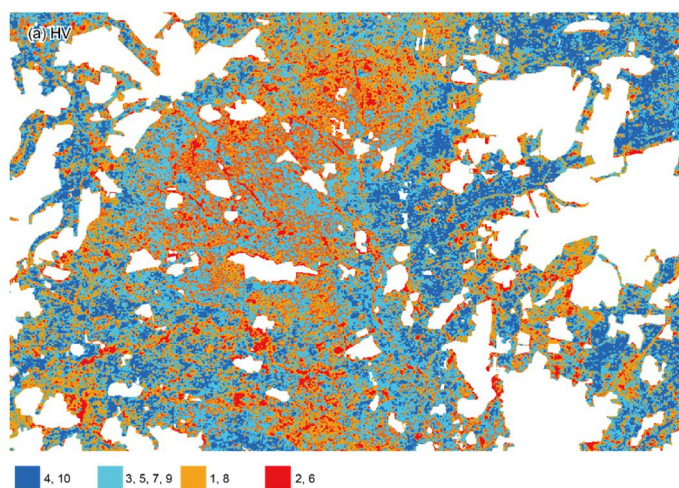


図3 L-band PALSAR HV 偏波後方散乱係数の季節変化に基づくクラスタリング結果
領域は東西 20 km × 南北 13 km

地形的立地条件と後方散乱係数

低地，谷間，丘陵上の窪地の3カテゴリを設定し，現地調査による確認を行いながら各カテゴリ10地点のサンプル地点を配置し，3月末から10月末の各 SAR 観測時点（L-band PALSAR-2：6時点，C-band Sentinel-1：19時点）における各偏波の後方散乱係数を抽出した。その結果，地

形カテゴリ間で後方散乱係数に顕著な季節変動パターンの違いが見出された。また、波長間・偏波間でもそのパターンは異なった。

次にL-bandとC-bandについて、それぞれ両偏波の各時点後方散乱係数を同時に学習データとして用いてRandomForestによる機械学習モデルを構築した。その結果、3つの地形カテゴリ分類のOOBの精度はL-bandとC-bandともに90%を上回る結果となった。

また、ウボンラット郡の学習データによるモデルをウボンラチャタニ県デートウドム郡周辺で観測された2020年のSentinel-1 VV+VHの19後方散乱係数に適用し、同地域の水田の分類を行ったところ、河川沿いや丘陵部、開けた低平地部分に分布する水田が、それぞれウボンラット郡の谷間、丘陵上の窪地、低平地として分類された。地形や気候に極端な相違がない限り、他地域での学習結果が適用可能であることを示唆する結果といえる。

(2) 水田拡大過程の検討 ウボンラット郡

1950年代時点での水田の分布域は2000年代水田クラスタリングで「低地」のクラスタが分布していた場所、および2020年水田のRandomForestによる分類で「低地」および「谷間」に分類された水田の分布域に限られた。2000年までに「丘陵上の窪地」よりさらに乾燥した場所にまで水田が広がり、その後、乾燥した地域の水田はサトウキビやキャッサバ畑へと転換されたものであろう。

デートウドム郡

図4に対象地域の一部について結果を示す。1950年代の水田の大部分は、2020年水田のRandomForestによる分類で「低地」および「谷間」に分類された地域に分布する。現在「丘陵上の窪地」水田が広がる部分に1950年当時からの水田は少ない。ただし1950年代当時の水田分布域にも丘陵上の窪地の水田は混在している。また、より広域的には、現在「低地」や「谷間」の水田が広がっている領域の多くは、1950年代当時未開墾の森林であった。

つまり水田の拡大は、土地の湿潤性を重視しつつも、面としての連担性を保ちつつ進められた（進めざるを得なかった）と推測される。

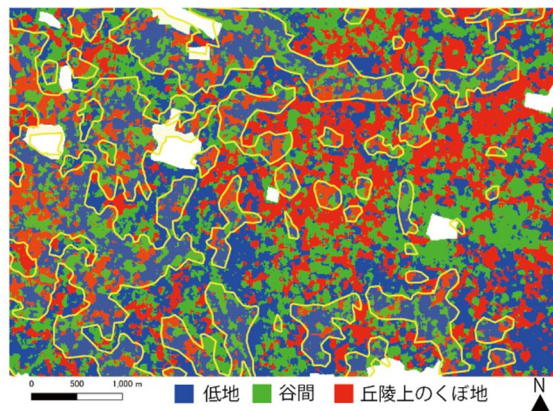


図4 2020年水田分類結果および1950年代水田分布（黄色斜線網かけ）

参考文献

- 福井捷朗 . 1988 . 『ドンデーン村 東北タイの農業生態』 創文社
- 星川圭介 . 2009 . 『東南アジアの農村はどのくらい自給的か』 . Kyoto Working Papers on Area Studies 64
- Hoshikawa, K., Takanori Nagano, Akihiko Kotera, Kazuo Watanabe, Yoichi Fujihara, Osamu Kozan. 2014. Classification of crop fields in northeast Thailand based on hydrological characteristics detected by L-band SAR backscatter data. *Remote Sensing Letters* 5(4) 323-331
- Hoshikawa, K., Kazuo Watanabe, Takanori Nagano, Akihiko Kotera, Yoichi Fujihara. 2018. Determination of patterns of rainfall history creating situations for accurate classification of rain-fed paddy fields with SAR backscatter coefficients, *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 9: 42-51
- Minh, H.V.T., Avtar, R., Mohan, G., Misra, P., Kurasaki, M., 2019. Monitoring and Mapping of Rice Cropping Pattern in Flooding Area in the Vietnamese Mekong Delta Using Sentinel-1A Data: A Case of An Giang Province. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujihara Yoichi, Okuyama Koki, Hoshikawa Keisuke, Fujii Hideto, Nakamura Takashi, Lun Sambo, Siev Sokly	4. 巻 13
2. 論文標題 Characteristics of the Annual Maximum and Minimum Water Temperatures in Tonle Sap Lake, Cambodia from 2000 to 2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3972 ~ 3972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs13193972	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 星川圭介, 堀田善之, 川島秀樹, 竹沢良治	4. 巻 89(9)
2. 論文標題 富山県における農業用水路事故の実態解明	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 27-30
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 星川圭介, 小林知, 百村帝彦	4. 巻 59(1)
2. 論文標題 21世紀の開拓移住によるカンボジア南西部山地の変容 移住者による農地拡大過程に関するリモートセンシング分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東南アジア研究	6. 最初と最後の頁 119-145
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 竹沢良治, 星川圭介, 川島秀樹, 堀田善之	4. 巻 89(4)
2. 論文標題 農業用水路のヒヤリハット調査を通じた安全啓発方針の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 249-252
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 無
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 星川圭介・小林知・百村帝彦	4. 巻 -
2. 論文標題 1世紀の開拓移住によるカンボジア南西部山地の変容：移住者による農地拡大過程に関するリモートセンシング分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東南アジア研究	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) なし	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 -

1. 著者名 Hideto Fujii, Takashi Nakamura, Sarann Ly, Sambo Lun, Sokchhay Heng, Yoichi Fujihara, Keisuke Hoshikawa, Masato Nakata	4. 巻 24
2. 論文標題 Acoustic Doppler current profiler analysis of the discharge of the seasonally repeating normal and reverse flow of the Tonle Sap River	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Rainwater Catchment Systems	6. 最初と最後の頁 17-25
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 Hoshikawa Keisuke, Fujihara Yoichi, Siev Sokly, Arai Seiya, Nakamura Takashi, Fujii Hideto, Sok Ty, Yoshimura Chihiro	4. 巻 33
2. 論文標題 Characterization of total suspended solid dynamics in a large shallow lake using long term daily satellite images	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 2745-2758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.13525	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 Tanaka Kenji, Fujihara Yoichi, Hoshikawa Keisuke, Fujii Hideto	4. 巻 64
2. 論文標題 Development of a flood water level estimation method using satellite images and a digital elevation model for the Mekong floodplain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hydrological Sciences Journal	6. 最初と最後の頁 241 ~ 253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02626667.2019.1578463	査読の有無 無
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 Shigeki Yokoyama, Le Canh Dung, Hideto Fujii, Yoichi Fujihara, and Keisuke Hoshikawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Economic Feasibility of Diversified Farming System in Flood-prone Mekong Delta: Simulation for dike area in An Giang province, Vietnam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Asian Journal of Agriculture and Development	6. 最初と最後の頁 25 ~ 40
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 無
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 Tanaka Tomohiro, Yoshioka Hidekazu, Siev Sokly, Fujii Hideto, Fujihara Yoichi, Hoshikawa Keisuke, Ly Sarann, Yoshimura Chihiro	4. 巻 10
2. 論文標題 An Integrated Hydrological-Hydraulic Model for Simulating Surface Water Flows of a Shallow Lake Surrounded by Large Floodplains	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w10091213	査読の有無 無
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 Hoshikawa Keisuke, Watanabe Kazuo, Nagano Takanori, Kotera Akihiko, Fujihara Yoichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Determination of patterns of rainfall history creating situations for accurate classification of rain-fed paddy fields with SAR backscatter coefficients	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Remote Sensing Applications: Society and Environment	6. 最初と最後の頁 42 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rsase.2017.11.004	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 星川圭介, Patarapong Kroeksakul	4. 巻 85
2. 論文標題 天水稲作卓越地域における農業土地利用変化と水文条件 タイ国東北部の事例	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 85-92
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 星川圭介, 宮口知也, 寺田和真, 田村悟志, 竹沢良治
2. 発表標題 用水路転落事故防止に向けたセミハード対策設置方法の検討
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星川圭介・竹沢良治・松本祥二
2. 発表標題 PALSAR-2後方散乱係数を利用した排水不良水田検知
3. 学会等名 日本写真測量学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星川圭介・石井孝宗
2. 発表標題 里山林整備が地表面土壌含水率に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Hoshikawa, Pontip Phontusang and Roengsak Katawatin
2. 発表標題 Classification of rainfed paddy fields based on ponding frequency using time-series SAR images
3. 学会等名 PAWEES & INWEPF International Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuki Kawashita and Keisuke Hoshikawa
2. 発表標題 Determination of causes for abandonment of cultivated land in six prefectures in Japan
3. 学会等名 PAWEES & INWEPF International Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星川圭介, 渡辺一生, 小寺昭彦, 長野宇規, 藤原洋一
2. 発表標題 合成開口レーダを用いた天水田分類に適した状況をもたらす降雨履歴の特定
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2017年

〔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

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