

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K12847

研究課題名（和文）水文環境からみた法定アマゾンにおける天水及び灌漑農地の持続可能性評価

研究課題名（英文）Sustainability assessment of irrigated and rainfed agricultural land in the Brazilian Amazon

研究代表者

吉川 沙耶花（Yoshikawa, Sayaka）

茨城大学・地球・地域環境共創機構・学術振興研究員

研究者番号：60785492

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：1980年代以降から現在までの法定アマゾン内にある大規模及び小規模農地を特定した。そのほとんどが森林からの変遷である。大規模農地については既存の衛星観測解析データをから抽出したが、小規模農地の中でもより小さな規模の農地開発である土地なし農民による土地利用開発についてはリモートセンシング及び現地調査を通して明らかにした。得られた土地利用変化及び現地調査の状況から天水及び灌漑シナリオを作成し、最新の全球水資源モデルを用いて水需給シミュレーションを行った。非持続的である可能性の高いアマゾンでの農牧地開発が世界市場とどのように繋がっているのかという点について、自治地区レベルで追加的に解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、ブラジル法定アマゾン内における大規模及び小規模農地の土地利用及び灌漑状況及びその水利用について水資源モデルを用いて明らかにした。ほとんどが森林開発に伴って拡大された農地であるため、森林減少に伴う降水量減少、気候変動による干ばつが報告されているアマゾンにおける農地での灌漑増加や継続は、農業の持続可能性が低いことを示唆している。また、森林から農地開発した地域で大豆、トウモロコシ、綿花の輸出が大幅に増加しており、その輸出相手国は日本を含め複数ある。アマゾンの食料生産に頼る世界市場についても、その持続可能性の観点で本研究成果から重要な示唆を与えらる。

研究成果の概要（英文）：In the legal Amazon, Large-scale and small-scale agricultural lands were identified from the 1980s onward to the present. Most of this transition is from forests. Large-scale farmland was extracted from existing satellite observation and analysis data. Land use development by landless farmers, which is part of smaller-scale farmland development, was clarified through remote sensing and field surveys. Based on the obtained land use change and field survey data, rain-fed and irrigation water use scenarios were developed. Then water supply and demand simulations were conducted using the state-of-the-art global water resource model and the scenarios. Additional analysis was conducted at the municipal district level to determine how agro-pastoral development in the Amazon, which is likely to be unsustainable, may be linked to global markets.

研究分野：リモートセンシング、水文学

キーワード：法定アマゾン 大規模及び小規模農地開発 土地なし農民占有地 灌漑シナリオ 水資源モデル

### 1. 研究開始当初の背景

ブラジル国土の 60% を占める法定アマゾン域 (ブラジル政府が自然保護を目的に定めた行政地域) に存在する熱帯林は、地域の気候や CO<sub>2</sub> の貯留のみならず、地球規模の水循環へ大きな役割を果たしていると考えられている。複数気候モデルの予測によれば、アマゾンの森林減少の影響は世界の降水パターンを変化させ、南北アメリカ大陸のみならずヨーロッパのような遠隔の農業地域にも干ばつ・不作をもたらす可能性があるとして指摘されている。加えて、熱帯林の下に存在する地下水貯留の存在が、アマゾン南東部の河川流量の変動に大きく寄与することが明らかになっている。一方で、1970 年代以降より人口の流入や大規模農牧場建設に伴う道路などのインフラ整備による熱帯林の大量伐採が行われてきた (1988 ~ 2015 年までの森林伐採面積は約 41 万 km<sup>2</sup>)。2005 年までの過去 10 年間の平均熱帯林消失面積が約 2 万 km<sup>2</sup> であった。現在

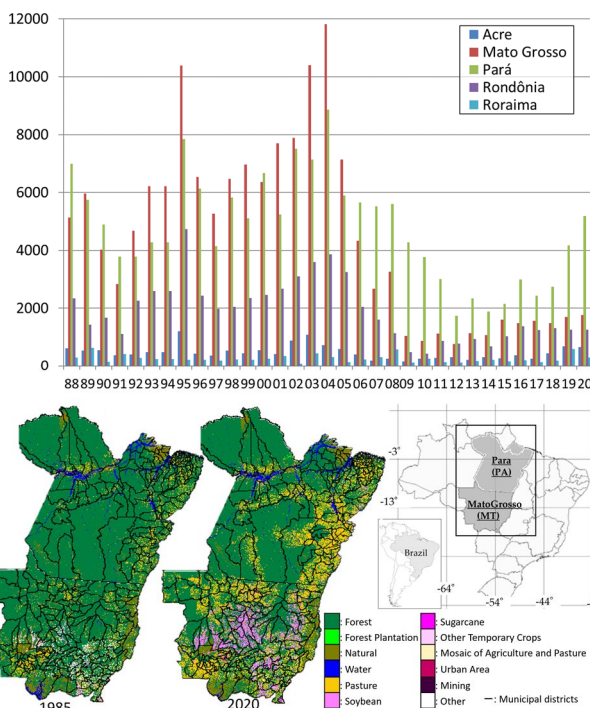


図 1 法定アマゾンにおける森林伐採量の経年変化 (上図) と 1985 年と 2020 年の土地利用分布 (下図)

では政府による規制監視の強化、行政システムの連携、農牧業者の意識の高まり等、様々な解決策がとられ、直近 2015 年には約 6,200 km<sup>2</sup> と 3 分の 1 以下に縮小しているものの (図 1 上) 未だ森林伐採は続いている (図 1 下)。近年、リモートセンシング技術の進展により、どのように森林伐採が行われているのかというメカニズムが明らかとなりつつある。今のところ、主に未舗装道路を含む道路建設や河川が重要な輸送手段となって人々の森林へのアクセスが可能となることで、森林が違法に大量伐採され、その後大規模牧場へと利用される。数年後その土地のほとんどが放棄されるため大豆などの大規模農場へと変貌をとげる。法定アマゾン内では、全体のおよそ 30% が農牧用地として登記されているが、環境保全への規制のため森林法によりそのうちの 20% の使用しか許されていない。つまり、法定アマゾン全体の 6% のみが農牧用地のはずだが、実際には遵守されていないことが多いことを示している。これは家族単位での農業を行う小規模農家の増加によるところが多いことが原因として考えられ、大規模な未利用地は農地改革の対象とされ、小規模農家ならば不法に占拠したとしても占有権や時効取得等が可能となると憲法に規定されていることから、自発的な土地占有による農地獲得運動を促す結果となっている。しかし、大土地所有者の土地に勝手に侵入し生産活動を行ったとしても、小規模農家の多くは経験が不足しており十分な生産を上げられず (= 貧困状況を改善できず) また別の場所へ他者の権利侵害をするという連鎖を繰り返している。

近年では、採算の問題から大規模牧場は放棄され、大規模なアブラヤシ農地への変換が進んでいるという報告もある。変換された農牧地を含む大規模農地および小規模農地では、より多くの収量を得るために乾季に灌漑農業を行うことが始まっている。統計上では法定アマゾン内での灌漑農地はほとんど報告されていない。しかし、申請者がマツグロツ州とパラ州で行った調査 (2014 年度) によると、これらの灌漑地では地下水を利用していることがわかり、地下水の灌漑利用は安価にて得られるため今後確実に増えていく可能性が高い。大規模農場の拡大に加えて、潜在的な小規模農家戸数は 30 万 ~ 100 万戸とも言われ、これらの農地が灌漑を行うことは水ストレス増大などのアマゾン全体の水資源および水循環に大きな影響を与えるのではないかと懸念される。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の二項目を明らかにすることを目的とした。

- ・ 天水/灌漑農地データベースを構築し、その立地・拡大条件を明らかにする。
- ・ 得られた農地データから天水/灌漑農地拡大シナリオを作成し、最新の水資源モデルを用いて水需給シミュレーションを行い、水ストレスが増大する地域などの水文環境影響評価からその持続可能性について明らかにする。



### 3. 研究の方法

法定アマゾン内にある現在までの大規模農地と小規模農地を特定し、天水農地と灌漑農地を区分することを試みた。その際、農地区分には大規模農場と小規模農場で異なる手法をとった。大規模農地については、既存のデータを用いた。小規模農地の中でもより小さな規模の農地開発である土地なし農民による土地利用開発に注目し、その土地利用変化について明らかにした。また、現地でのアンケート調査を通して灌漑状況を明らかにした。得られた土地利用変化及び現地調査の状況から天水及び灌漑シナリオを作成し、最新の全球水資源モデルを用いて水需給シミュレーションを行った。非持続的である可能性の高いアマゾンでの農牧地開発が世界市場とどのように繋がっている可能性があるのかという点について、自治地区レベルではあるが追加で解析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 大規模及び小規模開発による農地のデータベース

本課題を開始した頃は、大規模農地分布（面積  $> 0.5\text{km}^2$ ）は既存のものを使用した。統計データ・衛星データなど手法は様々であるが近年までの大規模農地分布データは、全球及び領域スケール共に存在するため、それらの特徴を把握・整理し、使用する農地データを決定した。しかし、2020年代に入り新たな土地利用データベースが公開されたため、本課題に最終的に使用する大規模農地データベースは、2021年に公開された Mapbiomas Collection 6 (LANDSAT 衛星より作成され、空間解像度は  $30\text{m}$ ) の土地利用データを利用した。小規模農地（面積  $0.5\text{km}^2$ ）についても、Mapbiomas Collection 6 を基本的には利用することとした。

#### (2) 土地なし農民による土地利用開発

ブラジル政府は、他者の土地へ農地開拓を目的に侵入・占拠し集落を形成している人々と土地所有者との和解プロジェクトを失業者と都市の人口を減らす目的で推し進めている。記録されているだけで、120万家族およそ8900集落の和解プロジェクトが進んでいる。これらの集落は犯罪者なども多く危険であるため調査が難しいということもあり、どのように農地開発が進んでいるのかはほとんど明らかとなっていないため、小農による森林開発がアマゾン全体の森林破壊にどの程度寄与しているかは不明の状態である。そこで、現地観測が可能とある集落を対象に土地利用の変化がどのように行われてきたのかを衛星画像といくつかの手法を駆使することで定量化した。ここで対象とする土地なし農民占有地の小規模開発は、Mapbiomasでも特定が難しいより小規模な開発についてである。

法定アマゾン内パラ州の州都ベレン市から北東へ40kmほど移動したサンタバーバラ地区を含むその周辺地域（南緯  $1.15 \sim 1.22$  西経  $48.24^\circ \sim 48.3^\circ$ ）を衛星画像解析対象地域とした。現地調査の対象集落は、サンタバーバラ地区の幹線道路から森の中に入った2つの集落である。集落A（占有面積： $1.5\text{km}^2$ ）は2007年頃入植し、アグロフォレストリー法や点滴灌漑なども導入し活発に生産活動を行っている。集落B（占有面積： $1.3\text{km}^2$ ）は入植して30年ほど経過している集落である。

DigitalGlobe社GeoEye-1（空間解像度： $2\text{m}$ ）から2012年9月13日および2018年6月12日に取得された全マルチスペクトル（青  $450\text{-}510\text{nm}$ 、緑  $510\text{-}580\text{nm}$ 、赤  $655\text{-}690\text{nm}$ 、近赤外  $780\text{-}920\text{nm}$ ）データを使用した。日時の抽出には、衛星観測開始から対象領域で雲量が10%以下になるときという条件のみを与え、この条件を満たすものが2画像のみであったため使用することとした。ベレン周辺は年間を通して、蒸し暑く気温に大きな変化はないが、降水量に明瞭な差があり6月から11月は乾季である。上記二つの時期は気候的にもおおよそ同じ時期に該当するため、比較可能であるとした。加えて、衛星画像と同様の時期に行った現地調査を通して得た集落Aと集落Bの土地利用状況（およそ500地点）をグランドテュルースデータとして使用した。

衛星画像を利用した土地利用分

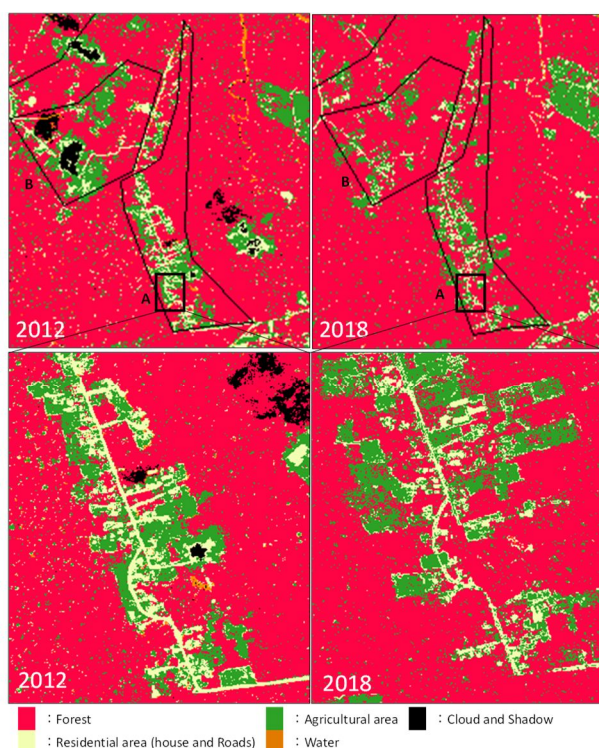


図2 集落Aと集落Bの土地利用変化（上：各集落の全容，下：集落Aの拡大図，左：2012年，右2018年）

類には、被覆の反射特性または構造特性を利用する方法がある。前者は、異なる植生が類似した反射特性を示すことがある場合、分類ミスが発生してしまうという弱点がある。一方、後者は物体の空間的分布から被覆を推定するため、類似した反射を示す場所でも分類可能であると考えられている。構造特性から土地利用を推定する方法のひとつにラクナリティ指標を用いる分類法がある。この指標は、地表構造の空間分布の均一性を定量的に表す指標である。本研究では1時期の衛星データに対してこの指標を含む5通りのデータ組み合わせで土地利用図を作成した。分類方法は、教師なし分類法のうちISODATA法で全て分類し、精度評価した。

図2は、2012年と2018年の集落Aと集落Bの土地利用変化図である。表2の土地利用の内訳が示すように、集落Aでは森林減少は少ないものの農地拡大は顕著であった。これは、いくつかの世帯が給食提供プロジェクトに参加するため野菜とキャッサバなどの栽培の拡大を進めていることに起因している。森林減少は一見みられないように見えるが、これは2012年では農地として分類判断されたものが、2018年には森林として分類判断されているものが多く含まれているためである。この集落ではNGO主導でアグロフォレストリー農法を取り入れており、その成果によるものと言える。集落Bでは、居住地・農地が極端に減少し、森林地が増加している。これは、近年急激に無人化がすすみ、農業生産活動が衰退していることから、森林が回復しつつあることが要因と考えられる。集落A集落Bともに、居住地や道路、農地などの生産活動に占有地のおよそ50%を生産活動として使用しており、残りの50%を森林として残すことを維持していることも分かった。また、生産活動をしている場所としては全体のおよそ20%が農地で占められていることも明らかにした。精度評価のため現地の土地なし農民占有地域にて聞き取り調査を行った。調査の際、灌漑の有無に加えて、農地面積、作付け品種、灌漑の時期、灌漑水のために使用している水源、灌漑水利用量、灌漑水散布方法の確認なども行った。結果として、多くの農地で規模はそれぞれ異なるが灌漑を行っていることが分かった。

研究開始当初は、この土地利用分類手法を法定アマゾン全域へ適用することで土地なし農民占有地の在処を明らかにする予定であったが、研究を進めていく中で、土地なし農民占有地で特に占有権を認められた地域に関しては、ブラジル国全土で地図データベース化されたものが公開された。そこで、ブラジル全国データベースから法定アマゾン地域を抜き出すことで、土地なし農民占有地域として利用した。現在までの土地なし農民による灌漑状況は現地観測以外の情報がないため、現地でのアンケート調査及び衛星リモートセンシングの解析により明らかとなった情報を法定アマゾン全域の土地なし農民占有地へ適用できるものとした。

### (3) 天水及び灌漑シナリオと水需給シミュレーション

大規模農地の灌漑地については、既存のFAOデータの灌漑率を各グリッドで用いることとした。例えば、あるグリッドで灌漑地が40%としているグリッドではMapbiomasの大規模農地の中で40%を灌漑地、60%を天水農地とした。FAOの灌漑率データには存在しない大規模農地や小規模農地の天水及び灌漑の区別は、4つの組み合わせ( 天水80%・灌漑20%、 天水70%・灌漑30%、 天水60%・灌漑40%、 天水50%・灌漑50%)及び1・2期作を想定してシナリオを作成した。

本課題では、最新の全球水資源モデルH08を用いた。土居ら(2020)の研究枠組みに習い、5分解像度での解析を試みた。空間解像度が細かくしたことにより、計算コストが膨大にかかるようになった。そこで、データの入手可能性と計算コストを勘案し、1998-2002年までを水需給シミュレーションの解析対象とした。最新のH08モデルでは、河川水、貯水池貯留水、運河導水、再生可能・非再生可能地下水、海水淡水化施設、その他表層水の7つの水源から取水が行われる仕組みになっているが、アマゾンでの多くの灌漑地では地下水を利用していることから、ここでは河川水及び再生可能・非再生可能地下水のみを取水源として設定した。作成した天水及び灌漑シナリオを用いて、最新の水資源モデルを用いて水需給シミュレーションを行った。結果として、アマゾンの雨期である1~6月は東部のみに水需要があり、7~9月にかけて西進しアマゾン川中流付近でも水需要があった。8月は水需要の最大量を示した。また、6~12月は南部・西部などアマゾン川支流の上流付近で水需要が増加することが分かった。東部では、乾季と雨季で増減はあるが灌漑を行うことで全期間を通して水需要があることが分かった。土地なし農民占有地域での水需要は、各シナリオでブラジルの農業水需要総量のおよそ10~25%に当たる量に相当することが明らかとなった。一方、大規模農地による水需要は、ブラジルの農業水需要総量のおよそ66~79%であることが明らかとなった。多くが河川もしくは再生可能地下水からの取水であり、非再生可能地下水からの取水はほんのわずかであった。気候変動を考慮した場合の水需給シミュレーションは、データ入手と計算コストの都合上で本課題では到達することができなかった。しかし、アマゾンでは森林減少に伴い、気温上昇と降水量減少、森林地を放牧地へ開発することによるさらなる降水量減少、気候変動による干ばつの増加が報告されている。地下水の源である降水及び森林が減少することによる影響は今後大きくなる可能性がある。森林破壊を伴い拡大を続ける農地で地下水を利用する灌漑地が増加することは農地の持続可能性の観点からみてかなり脆弱な行為であると言える。気候変動を考慮したさらなる解析が必要であり、今後の課題である。

### (4) 大規模農牧地開発と世界市場との関連

土地利用変化(森林破壊や農地の増加など)と、牧畜および上位5作物(ダイズ、サトウキビ、トウモロコシ、綿、コメ)である農牧活動の関係を市区町村レベルで検討した。そして、農牧業

によって土地利用が変化した市町村の輸出量(寄与率も含む)を明らかにした。植生変化のパターンから、マットグロッソ州北西部では牧畜、トウモロコシ、綿花、中部では大豆とサトウキビ畑が森林破壊の主な要因であることが示された。ダイズやトウモロコシの栽培による土地利用の変化は、それぞれ主にマットグロッソ州西部と南東部で大規模に起こっていることが示された。トウモロコシ栽培は、大豆栽培よりも人為的な影響を受けた地域の増加に関連している。2001年までは、Denise自治地区が、森林破壊を伴う牧牛輸出の世界市場に関連している唯一の自治体であった。輸出先は、サウジアラビア(53.6%)、オランダ(19.4%)、香港(14.6%)、ドイツ(6.5%)、レバノン(5.9%)の5カ国のみであった。森林破壊と大豆開発に関連した市町村地区は、Sorriso自治地区だけであった。Sorrisoからの輸出先は、オランダ(35.8%)、イギリス(24.9%)、ドイツ(20.4%)、ベルギー(11.87%)、イタリア(2.6%)、ポルトガル(2.6%)、スペイン(1.3%)およびウズベキスタン(0.5%)の8カ国であった。2002年以降、輸出量は280倍になった。そして、輸出相手国も43カ国に増えている。Campos de Julio自治地区から輸出される大豆は、ボリビア(98.7%)およびウルグアイ(1.3%)向けである。2004年以降、輸出相手国は35カ国に増加している。Sapezal自治地区は、トウモロコシの輸出先がスイスだけに関連する唯一の自治地区であった。2007年以降、輸出量は2,300倍になった。輸出相手国も56カ国に増えた。森林破壊と綿花生産に関連する市町村区は、Lucas do Rio Verde、Rondonopolis、Sorrisoの3つの自治地区であった。Lucas do Rio Verdeの輸出先は、ドイツ(25.1%)、インド(24.5%)、インドネシア(35.9%)、タイ(14.4%)の4カ国のみであった。Sorrisoの輸出先はドイツ(60%)、インドネシア(40%)の2カ国である。一方、Rondonopolisは、インドネシア(31.3%)、インド(15.4%)、パキスタン(12.8%)、ポルトガル(6.6%)など59カ国とすでに取引をしている。2002年以降、輸出量は65~453倍、輸出相手国数は3~12倍に増えている。森林破壊を行ったあと開発した農地から世界市場へ向け輸出している自治体地区の数はとても少なく限定的である。しかし、その限定的な自治地区の多くで、近年、大豆、トウモロコシ、綿花の輸出が大幅に増加している。これらの結果は、アマゾンにおける環境資源開発活動が全体として非持続的であることを浮き彫りにしている可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉川 沙耶花、石丸 香苗	4. 巻 40
2. 論文標題 アマゾン川流域の土地なし農民による違法占拠	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会誌	6. 最初と最後の頁 214～217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11440/rssj.40.214	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 吉川沙耶花	4. 巻 43
2. 論文標題 マットグロツソ州及びパラ州における土地利用変化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ラテンアメリカ学会定期大会報告ペーパー	6. 最初と最後の頁 1-16
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 HIGASHIYAMA Kota、YOSHIKAWA Sayaka、KANA E Shinjiro	4. 巻 76
2. 論文標題 SALINIZATION POTENTIAL RISK DUE TO IRRIGATION ON A GLOBAL SCALE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_115～I_120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.76.2_I_115	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吉川沙耶花、石丸香苗
2. 発表標題 アマゾン川河口における土地なし農民による違法占拠地の土地利用変化
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第67回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sayaka Yoshikawa
2. 発表標題 Long-term projections of global water use for electricity generation
3. 学会等名 HYDROLOGY DELIVERS EARTH SYSTEM SCIENCES TO SOCIETY 4 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sayaka Yoshikawa, Kota Higashiyama, Shinjiro Kanae
2. 発表標題 Global salinization risk in irrigated areas
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meetinge 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sayaka Yoshikawa, Kanae Ishimaru
2. 発表標題 Land use and land cover change of illegal settlements by landless peasants in the Brazilian Amazon
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小野芳朗、池道彦、藤原拓、柳橋泰生、小松一弘、尾崎則篤、高橋啓和、中島典之、大河内由美子、渡邊智秀、治多伸介、日高平、栗栖聖、山田一裕、原田英典、原圭史郎、吉川沙耶花、鼎信次郎	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉出版	5. 総ページ数 640
3. 書名 水環境の事典	

〔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
---------	---------