

## 人口減少期における流域の太陽光発電の転用と農業系土地利用の適正化に関する研究

謝, 知秋

<https://hdl.handle.net/2324/7363807>

---

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



# 人口減少期における流域の太陽光発電の転用と 農業系土地利用の適正化に関する研究

A Study on the Conversion of Solar Power Generation and Optimization of Agricultural  
Land Use in Watersheds during the Period of Population Decline

謝 知秋  
XIE Zhiqiu  
2025 年 1 月

## 要旨

この論文は、流域圏における再生可能エネルギーの導入と生態系サービス（ES）の両立を目指した緑地環境評価に関する研究である。特に、日本の流域における土地利用の変化が環境に及ぼす影響に焦点を当て、GIS やリモートセンシング技術を用いてデータ解析を行い、持続可能な土地利用管理モデルの構築を目指している。産業革命以降、急激な都市開発や土地利用の変化により、森林や農地が減少し、温室効果ガスの排出が増大してきた。このような土地利用の変化は、炭素貯留機能の喪失だけでなく、地域の生態系や災害リスクにも大きな影響を与えており、特に日本のような人口減少社会では、土地の持続可能な管理が重要な課題となっている。

本研究では、まず流域圏の地理的・社会的空間情報を整理し、過去の土地利用パターンや今後の変化傾向を把握するために、GIS を用いたデータ分析を行った。次に、ソーラーパネルの設置による地表面温度の変化や水害リスクの増大、生態系サービス（炭素貯留、水資源、土壌保持、生息地の質など）の現状を評価し、これらの変化が環境に与える影響をシミュレーションした。さらに、将来の人口減少を考慮した土地利用シナリオを設定し、生産性の向上と環境保全を両立させるための具体的な手法の提案を行った。これにより、地域住民や自治体との協力を通じて、土地利用の管理労働量を減らしつつ、自然に返すべき土地と最低限の管理が必要な土地を特定し、持続可能な土地利用管理システムを構築することを可能とする。

研究の結論として、生態系サービスにおける供給サービス（農業生産など）と調整サービス（炭素貯留や水資源保全など）の間には明確なトレードオフが存在することが確認された。特に、ソーラーパネルの設置が土地の温度上昇や水害リスクの増加に寄与する一方で、炭素貯留や水源の質にはシナジー効果が見られた。これらの結果は、将来的な土地利用計画において、エネルギー供給と環境保全のバランスを取るための重要な示唆を与えている。

## Abstract

This thesis focuses on green space environmental assessment aimed at balancing the introduction of renewable energy and ecosystem services (ES) in watershed areas. Specifically, it examines the impact of land use changes on the environment within Japanese watersheds, utilizing GIS and remote sensing technologies for data analysis, and aims to develop a sustainable land use management model. Since the Industrial Revolution, rapid urban development and land use changes have led to a decrease in forests and farmlands, along with increased greenhouse gas emissions. Such land use changes have not only resulted in the loss of carbon sequestration capacity but also significantly affected local ecosystems and disaster risks. In a population-declining society like Japan, the sustainable management of land has become a crucial challenge.

In this study, the geographical and social spatial information of the watershed was first organized, and GIS-based data analysis was conducted to understand past land use patterns and future trends. Next, the impact of solar panel installations on surface temperature changes and increased flood risks was evaluated, along with the current state of ecosystem services, including carbon sequestration, water resources, soil retention, and habitat quality. Simulations were then conducted to assess the environmental effects of these changes. Additionally, land use scenarios that account for future population decline were developed, proposing specific methods to balance productivity improvements with environmental conservation. This approach enables the identification of areas that should be returned to nature and areas requiring minimal management, facilitating the development of a sustainable land use management system through collaboration with residents and municipalities.

The study concluded that there is a clear trade-off between provisioning services (such as agricultural production) and regulating services (such as carbon sequestration and water conservation) in ecosystem services. Specifically, while the installation of solar panels contributes to increased land surface temperature and flood risks, a synergy effect was observed between carbon sequestration and water quality. These findings provide

important insights for future land use planning, highlighting the need to balance energy supply with environmental conservation.

# 目次

## 第一章 研究背景と目的

1. 1 はじめに
1. 2 日本における流域圏の土地利用現状
1. 3 土地利用と環境変化をめぐる近年の既往研究
1. 4 本論文の目的と構成

## 第二章 櫛田川流域における緑地（農地）の分類と変化

2. 1 研究背景
2. 2 リモートセンシングを使った農地の分類
  2. 2. 1 対象地域における農地の分類
    2. 2. 1. 1 対象地域・データソースの紹介
    2. 2. 1. 2 研究フロー
  2. 2. 2 農地の分類と検証
  2. 2. 3 農地の分類結果
2. 3 Deep Learning モデルによる土地利用変化の検出と分布状況
2. 4 土地利用変化の要因分析
  2. 4. 1 各種農地の転用状況の統計
  2. 4. 2 農地転用の地理的・社会的特徴
    2. 4. 2. 1 農地転用の地理的特徴分布
    2. 4. 2. 2 流域単位における農地転用の要因
2. 5 考察とまとめ

## 第三章 土地利用変化における環境影響評価

3. 1 研究背景
3. 2 太陽光発電（PV）における地表面温度（LST）変化の評価
  3. 2. 1 PA の環境影響にめぐる近年の研究と本節の研究手順
  3. 2. 2 櫛田川流域 PA の抽出と建設状況の分析
  3. 2. 3 PV による地表面温度の変化解析

- 3. 2. 3. 1 地表面温度の計算モデルと精度検証
- 3. 2. 3. 2 地表面温度 (LST) 及び地表面温度差 (LSTD) の変化
- 3. 3 PV によって形成される LSTD に影響を与える要因
- 3. 4 本章の結論
  - 3. 4. 1 PV 建設状況の変化
  - 3. 4. 2 PV による LTS 変化及び周囲環境との関係性

#### 第四章 緑地土地利用変化後における生態系サービスのトレードオフ・シナジー

- 4. 1 研究背景
  - 4. 1. 1 生態系サービス (ES) に関する近年の議論
  - 4. 1. 2 研究の目的と流れ
- 4. 2 リモートセンシングによる流域圏の土地利用分類
  - 4. 2. 1 土地利用分類モデル
  - 4. 2. 2 土地利用分類の結果
- 4. 3 現状における ES 分析
  - 4. 3. 1 各種 ES の計算手法
  - 4. 3. 2 各種 ES の計算結果及び現状分析
- 4. 4 将来農地利用シナリオにおける ES 評価
  - 4. 4. 1 将来農地利用のシナリオ設定
    - 4. 4. 1. 1 人口減少シナリオの設定
    - 4. 4. 1. 2 人口減少における農地管理シナリオ
  - 4. 4. 2 将来農地利用における ES 評価
    - 4. 4. 2. 1 ES 評価における設定
    - 4. 4. 2. 2 マクロ減少型における ES 評価
    - 4. 4. 2. 3 現状進行型における ES 評価
    - 4. 4. 2. 4 コンパクト型における ES 評価
- 4. 5 本章のまとめ

#### 第五章 まとめと考察

- 5. 1 本論文におけるまとめ
- 5. 2 考察

### 5. 3 本研究における限界および展望

謝辞

用語集

図表リスト

付録

# 第一章

## 研究背景と目的

## 1. 1 はじめに

人口減少と気候変動が進む現代社会において、流域圏の土地利用は、多様な環境問題や社会的課題の解決において中心的な役割を果たしている。特に、農地から太陽光発電用地への転用は、再生可能エネルギーの普及促進に寄与する一方で、地域の環境、生態系、農業経済に深刻な影響を及ぼす可能性が指摘されている。

流域圏の土地利用問題を解決するためには、農地転用に伴う環境変化や生態系サービスへの影響を定量的に評価し、持続可能な土地利用計画を構築することが求められている。しかし、これまでの研究では、流域単位での土地利用変化を精緻に分析し、持続可能な農地管理を実現するための具体的な方策について、十分な議論がなされていない。

本研究は、日本中部の櫛田川流域を対象地域とし、農地から太陽光発電への土地利用変化が地域環境与える影響を明らかにするとともに、再生可能エネルギーと生態系サービスを両立する持続可能な土地利用計画の研究が目的であった。さらに、再生可能エネルギーと生態系サービスを両立させる持続可能な土地利用計画の提案を目指す。この研究を通じて、地域の特性を考慮した土地利用モデルを構築し、全国さらには国際的な適用可能性を模索する。

以下では、流域圏の土地利用変化の背景、転用パターンの分析、環境影響評価、そして将来の土地利用計画の提案に至るまでの研究プロセスを詳細に述べる。本論文が、持続可能な社会の構築に向けた貴重な知見を提供する一助となることを期待する。

## 1. 2 流域における土地利用への要請の変化

産業革命以降、人間活動に伴う都市開発が急激に進み、人々の生活環境に関わる土地利用は、それに求められる要請の変化に伴い、大幅に変化されてきた。限られた土地資源と増大する土地需要の均衡を取り、土地利用と保護の間の矛盾を調整することは日本だけではなく、世界中の各国が持続可能な発展を維持するための重要な課題であった。しかし、流域における土地利用への要請が多様化しているが、その均衡をどう取るかについての土地利用計画方法論の知見はまだ少ない。

ここでまず、流域の定義を見ると、広辞苑では、「河川の流れ行く区域、あるいは河川の四周にある分水界によって囲まれた区域」とされる。また、日本における流域圏の捉え方は、第三次全国総合開発計画（三全総）で提唱された流域圏構想からはじまった<sup>6) 7)</sup>。流域にかかわる圏域について、研究分野や分析の視点によって①水・物質循環系の観点、②生態系の観点、③経済圏・文化圏・生活圏の観点、④総合的な流域圏の観点でそれぞれ解釈されている<sup>8)</sup>。一方で、土地利用計画や都市開発を行う際に、③経済圏・文化圏・生活圏の視点からはじめ、通勤通学、総合的な居住環境を形成する広域生活圏が基礎的な圏域と捉えられている。流域圏を対象とした森林、農地などの土地利用の転換と自然環境の調和について、既に着眼された研究もあるが<sup>9) 10)</sup>、高度成長期に関する時代背景の討論が多く、現在の都市衰退と人口減少・地球温暖化現象などの問題点との関係性について議論されるには至っていない。

戦後の土地利用変化の要請をみると、人口増加期による住宅不足を解消するために郊外部では農地の宅地開発が行われ、また農地放棄が進行した。さらに、日本農林水産省が行う2020年農林業センサスでの報告では、全体的な農林業経営体数が1990年から急激に減少し、2015年の全国耕作放棄地と転用地の面積は1975年の3倍以上になっている（図1-1）。また、産業全体の一次産業への割合減少に伴い、人口が大都市圏に集中する一方、地方流域における農地転用と管理放棄が頻繁に発生している。これらの要因が重なりあい、

自然資本としての農地の荒廃・衰退が進み、流域圏全体で見ても農地問題はマイナスのループに陥っている。

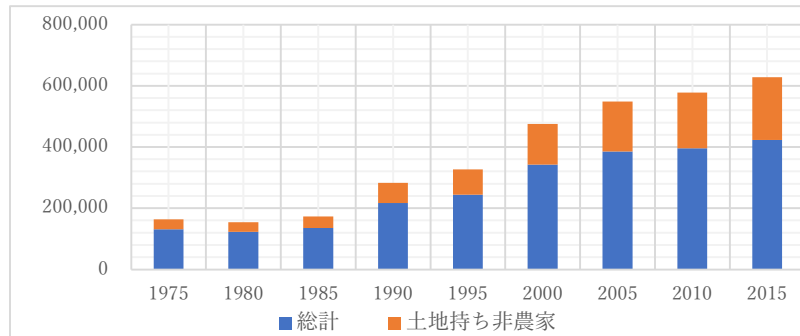


図 1-1 日本全国耕作放棄・転用面積推移 (ha) 「農林水産省 2020 農林業センサス」より作成

次に、森林を見ると、戦後の国土回復のために日本政府は急速な造林計画を展開してきた<sup>11</sup>。その結果、人工林の増加は土砂災害の頻度や被害の程度が下がったことが報告された面もある一方<sup>12</sup>、このような未利用地造林に加え、木材資源を回復する目的で天然林を針葉樹人工林へと転換する土地利用変化は、急速に流域圏の生物多様性が低下する要因の一つとなった。このように、防災・減災のための緊急避難的な荒廃地造林は、多面的な機能を有し、土砂災害の防止や環境保全、生態系の回復といった効果をもたらす一方で、すべての地域に適用することが適切であるとは限らない。地域ごとに異なる地形的条件や気候的特性、土地の利用状況を考慮する必要がある。また、防災や環境保全を優先するだけでなく、地域の持続可能な発展や生態系サービスの維持・向上を実現するためには、科学的なデータに基づく評価と多様な利害関係者との協議により、地域社会の合意形成や管理体制の整備状況が不可欠であった。これにより、限られた土地資源を最適に活用しつつ、地域の安全性と生態系の健全性を両立させるバランスの取れた土地利用計画を策定することが求められると言えよう。

一方で、脱炭素社会の実現に向け、日本における多くの中山間地域では、2010年から一部の管理放棄地において太陽光発電システム建設地として再利用され、再生可能なエネルギーを提供することが求められるようになった。こうした状況において、人口減少期に突入する現代社会では、里地里山を中心に、空闲地・空き家の増加のみならず、農地や森林の管理放棄地への太陽光発電システム建設地への転用をはじめとする土地利用変化による環境影響も懸念されている。

2019年にジュネーブで開催された第50回IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）総会の特別報告書では、「土地利用変化が温室効果ガス排出量増に寄与してきた」が指摘されている<sup>1</sup> (<https://www.env.go.jp/press/107068.html>)。特に、森林や草地などの自然の土地が、都市開発により人工的な土地に変わること、元々その土地が持っていた炭素の貯留機能が失われることが問題視されている。マクロの視点では、再生可能エネルギーを供給できる太陽光発電システムは確かに脱炭素に貢献し、持続可能な社会を実現するために必要とされている<sup>2</sup>。しかし、地域のレベルで見ると、緑地が太陽光発電システム設置のために人工地へと転用された場合、その地域でのCO<sub>2</sub>排出と吸収の均衡が崩れてしまう可能性がある<sup>3) 4) 5</sup>。この変化は、地域気候の均衡を崩すだけでなく、結果的に地球全体の温暖化に拍車をかけるリスクもはらんでいる。

ここで、農林地における太陽光発電システムの再生可能エネルギーの普及に影響しているFIT制度の動向について、概観を行う。日本政府は再生可能エネルギーの導入を促進するため、FIT制度（Feed-in Tariff制度）を導入している。この制度は、太陽光発電を含む再生可能エネルギーで発電された電力を、一定期間（日本では主に10年間）、固定価格で電力会社が買い取ることが義務付けるものであった。FIT制度の適用によって、太陽光発電は大幅に普及が促進された一方、そこにいくつかの課題がまだ残されている。太陽光発電は天候に依存し、広い敷地を必要とするため、設置場所の確保が課題とされ、地方の農業生産や自然環境への影響が懸念されるケースもある。FIT制度の適用によって、初期の導

入コストが下がり急速に普及したが、一部地域では太陽光発電の過剰供給により、電力供給網（グリッド）の調整が難しく、太陽光発電の買取価格も年々減少している<sup>13</sup>。10年間の買取保証が終了すると、発電事業者は市場価格での売電や自家消費などの選択を迫られる。しかし、市場価格は変動が大きく、売電収益の不安定化につながる。買取価格の推移をみると、10kw未満の場合、2022年の買取価格は、2012年の40%まで下がり、50kw以上の場合は25%しかない（表1-1）。更に、FIT終了後、発電事業を継続できない場合でも、設置されたソーラーパネルの撤去費用が問題となる。撤去には高額な費用がかかるため、放置される可能性があり、環境問題や土地利用の阻害要因となる懸念がある。適切な処理を促進するための仕組みが必要とされている。FIT制度は再生可能エネルギーの普及に貢献した一方で、卒FIT後の発電事業の持続性、太陽光パネルの撤去問題、財政負担、電力市場での競争力確保など、さまざまな課題を抱えている。一方で、全国の太陽光発電設備（500キロワット以上）の2割が土砂災害リスクの高いエリアに立地し、その中で東海地方は2番目に多い（256か所）地域であることが判明した<sup>14</sup>（図1-2）。また、無秩序の開発は土地の保水力を低下させ、崩壊を招く恐れがあり、持続可能性を高めるには適切な土地利用計画が必要であった。

以上より、太陽光発電の過剰供給の防止を行い、設置場所の環境影響を最小限に抑え景観・環境と調和した発展は、自治体と地域住民の共通の課題となっている。

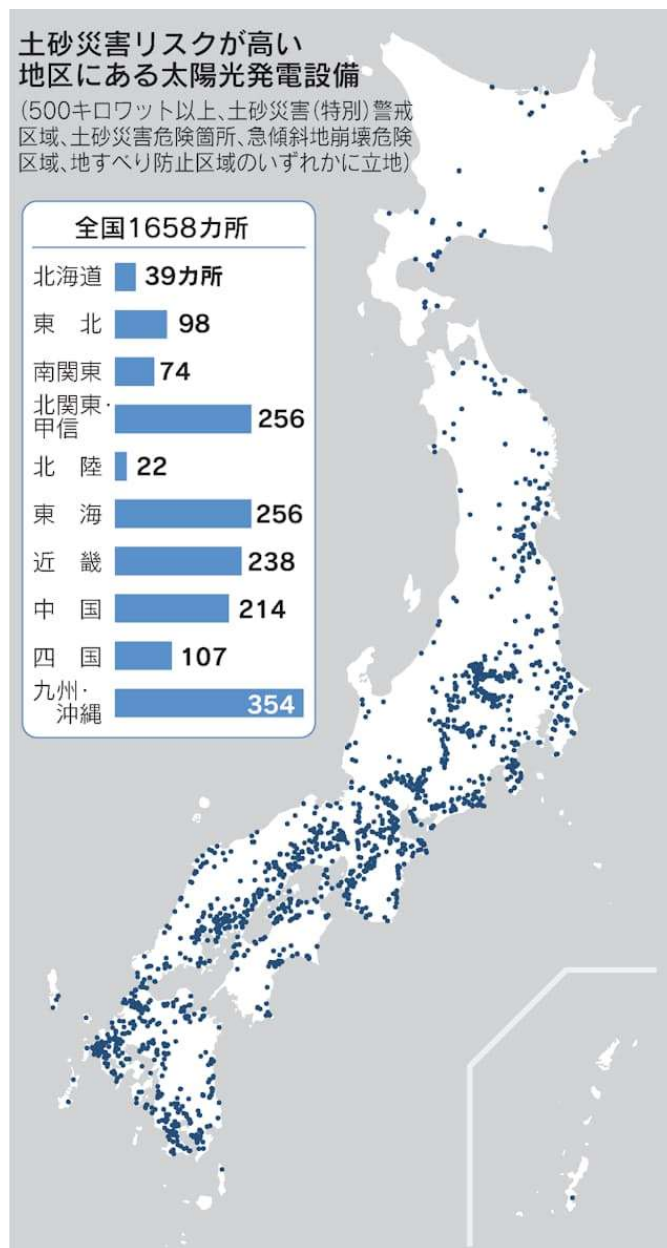


図 1-2 土砂災害リスク地区に設置された太陽光発電設備（日本経済新聞より）

以上のように、太陽光発電システムの発電はカーボンニュートラルに大きく貢献する可能性を有している。一方で、流域圏における緑地や低未利用地を太陽光発電システムに転用することにより、不透水層の増加による土砂災害と氾濫リスクを高め、地表面温度の上昇及び周辺エリアの生物多様性への影響・景観破壊等も懸念されている<sup>12)</sup><sup>13)</sup>。更に、農林地は社会に第一次産業の価値という産業価値だけでなく、生態系の調整と保全など多面的

機能、すなわち水循環と土壌保持などの自然生態系サービス機能にも影響を及ぼしている<sup>14</sup>。

このように、流域の土地利用変化が多様な環境に影響を及ぼすものの、その結果が具体的にどのような影響をもたらすのかについての定量的かつ科学的な評価は未だ十分に行われていない。農地の転用による生態系サービスの劣化や、森林伐採が地域の水循環や土壌保持に及ぼす影響については、多くのケースで個別的な事例研究が行われているものの、統一的なモデルや方法論に基づく体系的な評価は限られている。このため、土地利用の変化が環境、社会経済に与えるマイナスとプラスの影響を正確に理解し、それをもとに政策を立案することが難しい状況であった。したがって、科学的根拠に基づいた包括的な評価手法を確立し、流域ごとの土地利用計画に適用していくことが、今後の持続可能な地域づくりにおいて重要な課題となる。

表 1-1 太陽光発電の買取価格 2012-2016

	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
10kW未満	42円	38円	37円	27～33円	25～31円
10～50kW	40円+税	36円+税	32円+税	27～29円	24円
50kW以上	40円+税	36円+税	32円+税	27円	24円

表 1-2 太陽光発電の買取価格 2016-2022

	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
10kW未満	25～30円	25～27円	24円	21円	19円	17円
10～50kW	21円+税	18円+税	14円+税	13円+税	11～12円	11円
50kW以上	入札制度決定	制度決定	制度決定	制度決定	制度決定	10円

### 1. 3 流域圏の土地利用と環境変化をめぐる近年の既往研究

21世紀に入り、各国の研究機関は「人間活動における土地利用変化が地球環境に与える影響」にめぐるシミュレーションが行われ、IPCCによる評価報告書では、1990年から2100年の間に地上温度が1.4～5.8℃上昇することが予測された。「土地利用と環境変化の関係性」といったテーマに対する最初に関心が集まったのは、欧米をはじめとする海外の先進諸国であるが、日本も戦後の大規模な都市拡張を直面したことによって、この分野での研究が多数蓄積されてきた。これまでの「土地利用」と「環境変化」の研究については、主に地理空間情報システム（GIS）で整備されたデータを用いて、広範囲かつ長時期に観測と計算が行われてきた。その中でも、既存のデータから都市計画の面で考察と評価する計画論と、リモートセンシング技術を使って環境変化を定量的に分析する方法論の二種類に分けられる。

田畑（1979）は、「都市のグリーンマトリクス」で緑地をネットワークとして捉える「グリーンマトリクス」の概念を提唱し、農地も樹林地などと合わせて緑被地とし、その残存状況から緑地計画を立案することが必要であることを示した。緑地の分布と機能が都市の気候や生態系に与える影響を分析し、緑被地率と人口密度、呼吸器系疾患、小動物の生息、地下水位などの関係についても強い相関性があることを明らかにした。都市内外の緑地を連続的に配置し、生態系の連続性を確保することで、都市と自然の調和を図ることを目標とした。しかし、都市の急速な拡大や人口増加に伴い、土地利用の競合や経済的制約、行政間の調整の難しさなどが挙げられる。都市の持続可能性や住民の生活の質を向上させるために、グリーンマトリクスの概念を再評価し、スマートシティの概念やICT技術を活用した土地利用計画が必要とされている<sup>15</sup>。

中瀬（1981）は、流域を単位流域および分割流域といった新たな概念に基づいて計画単位としての意義づけを試み、流域を行政区域の境界線を利用した地域計画スケールでの新たな計画単位として位置づけられることの可能性を示した。広域・準広域スケールでそれ

それぞれの土地利用特性を解析し、流域における「縦方向の土地利用の連続性」の現象が発見されたと共に、流域内の環境特性を詳細に分析し、開発可能なエリアと保全すべきエリアを明確に区分する手法を提案した。しかし、技術的制約やデータの限界から、流域全体の詳細な環境情報の収集や分析には困難が伴った。GIS（地理情報システム）やリモートセンシング技術の発展により、流域単位での詳細な環境データの取得や分析が可能となった将来は、環境保全と持続可能な開発を両立させる取り組みが求められている<sup>16</sup>。

片桐ら（2012）は、緑地環境計画を流域単位で展開し、環境特徴を類型化すると共に、それと繋がる環境再生と保全政策の導入についての可能性を検討した。小流域は流域圏の物質循環の閉じた環境単位であり、河川整備・景観管理・生態系評価などの計画単位として、そのスケールの有効性を示した。また、今後流域圏の環境維持と調整は農業・林業・防災などの複数分野を一体に考える必要があると提示した。最後は、流域圏の環境再生を計る際には、元来の自然地形構造と結びついた小流域が現況に適して細分化された町丁目に替わる基本単位として提案した。計画単位として有効性を検証するためには、多くのステイクホルダーが共有できる判断基準が不可欠となることから、二酸化炭素吸収量などの環境評価の指標検討も今後の課題とされている<sup>17</sup>。

清水ら（2015）は、日本全国における土地利用変化を 1976 年から統計を始め、3 次メッシュデータを用いて分析を行い、それに対する社会的（人口）変化と環境的（植生）変化との関係性を解析した。土地利用変化の類型化と評価指標を提案するとともに、その結果に基づいて東京都市圏の土地利用と社会構造の変化を評価できる有意義なモデルが示された。しかし、3 次メッシュを単位とした分析は、広域的な変化傾向が推定されるが、地方の流域都市における土地利用変化の検出と環境影響の評価は、解像度と分析精度のアップが望まれている。人口構成の変化する今後の社会では、地方都市における有意義な分析モデルは不可欠であったと考えられる<sup>18</sup>。

石川ら（2020）は、小流域を単位として、神田川の上流部における土地利用変遷を背景

に、流域グリーンインフラの形成と構造を明らかにするとともに戦略的計画論について考察した。環境問題に都市計画のレベルから取り込むためには、気候変動予測のダウンスケーリングが必須であり、その前の基盤情報の構築が必要であったと結論付けた。そしてコア・コリダーの概念を提示し、それを社会実装についての議論をされた。土地利用の重要部分としたグリーンインフラの特質と分布状況は、小流域を単位とした細かな検討が必要であったとされた<sup>19</sup>。

劉ら（2016）は、三重県の流域圏における土地利用を航空写真からの分類を試し、1966年からの土地利用変化について分析を行った。従来の土地利用分類を更に細かくし、目視より農地を水田・畑・茶畑・桑畑の四種類に分類し、更に駐車場・資材置場などから人工地から切り分けた。高度成長期から現代に至る土地利用構造と変化を考察し、森林から公共施設への転用と茶畑の耕作放棄は地域問題であったことを判明した。それをもとにヒヤリング調査から今後の管理を維持するための作業量を算出、人口・就業構造・管理形態との関係について分析した。同時に実態変化に伴う里地里山に向ける景観と生態系サービスの維持に関する問題点を抽出し、人口減少期に向ける計画論が今後の課題であったとした<sup>20</sup>。

小川ら（2022）は、日英における大規模な農地を対象として、持続可能な土地利用型農業を多面的機能から分析し、緑地における土地利用の変化は環境性から経済性への負の影響、社会性から経済性と環境性への正の影響を示した。また、日本とイギリスでの比較分析によって、環境性の追求や社会関係に対する方針により、持続可能なトレードオフが生じていることを示唆している<sup>21</sup>。

Brian Dealら（2009）は、流域エリアにおける農林地や生息地の質などの生態系サービスに対して、土地利用の将来変化がそれを与える影響をシミュレーションと評価する「Three Steps」方法論が提示された。流域圏における都市開発政策と生態系サービス変化の関係性をシミュレーションし、違うスケールで自治体の政策の有効性に対して改めて検

討した。しかし、全体的な統計分析だけでは、各類型の土地利用の特性に基づいた評価に重点を置かざるを得ないと共に、将来に対する変化の具体的な分析が難しいとした<sup>22</sup>。

武藤ら（2022）は、流域圏の地理的特性と人工林の管理状況を GIS 上に整理し、SWAT モデルをもちいて両者の関係性に及ぼす河川流量の変化について分析した。1994 年以降のデータを用いて、対象流域の地質特性と地形特性の関係性を分析し、複数地域の林業関係者への聞き取り調査から、上流部のダム流域の流量に影響し、林道や作業道の建設の困難さに影響していることが示唆された。そして、土地被覆の変化による森林環境の変化が流量に及ぼす影響について、既存のモデルと統計的手法により分析した。土地被覆の変化と気象データを組み合わせて流域の流量変化を分類化することで、流量の年々変動の振れ幅が大きくなり、時系列変化の検出が困難であったことが示唆されている。これは、気候変動や土地利用の変化が流量の一貫性に影響を及ぼし、従来手法では変化パターンを明確に捉えにくくなっていることを意味する。このような振れ幅の増大は、水資源管理や災害リスク評価において、予測の不確実性を高める要因となる<sup>23</sup>。

以上のことから、流域全体において緑地の現状評価と変化を把握し、将来人口縮退下で管理労働量が減少する中で、いかに効果的に環境変化を評価し、流域全体で居住・生産空間の持続可能性の向上に繋がる土地利用を行っていくかは、先進国をはじめとする国内外に対して共通する課題であった。

## 1. 4 本論文の目的と構成

### 1. 4. 1 地域における課題および研究目的

前節の背景を踏まえて、三重県における太陽光発電の立地問題と中山間部の農地転用の実態を解明するため、本研究では、農地から太陽光発電施設への転用が顕著に進行している橿田川流域を対象地域とする。三重県では、ゼロカーボンシティ宣言を背景に、再生可能エネルギー導入が積極的に推進されている。一級河川である橿田川は、松阪市を中心に広がる流域を形成し、平野部と中山間地など、太陽光発電の導入に適した地形的特性を備えている。近年は高齢化や担い手不足により農地の耕作放棄が進行し、農地転用を含めた土地の有効利用として太陽光発電が注目されている。松阪市をはじめた橿田川流域の各自治体は、太陽光発電設備の設置に対する補助金制度を設け、市民や事業者の導入を支援した。一方で、近年「三重松阪再生はちすウインドファーム発電所」(風力発電)をはじめ、樋ノ山メガソーラー・四日市メガソーラーなどの再生可能エネルギーの導入に対し、住民による反対運動も起こるなど<sup>11</sup>、三重県の土地利用について深刻な課題となっている。生態系サービスにおける供給・調整・文化的価値の間にトレードオフ関係を生じさせており、それが地域の持続可能な発展に与える影響を明らかにすることが求められている。そこで、本研究において適切な対象地であったとして選定した。

また、本研究では経済圏・文化圏・生活圏視点の流域定義から、橿田川が経過した松阪市・明和町・多気町の三つの行政区画で構成された地域を橿田川流域と呼ぶ。

橿田川流域の農地利用と太陽光発電における課題は、以下の3つにまとめられる。

#### (1) 農地から太陽光発電への無秩序な土地利用変化

農地から太陽光発電用地に転用されることで、農作物の生産量が減少し、食糧供給に影響するとともに、地域の農業経済もダメージを受ける。また、無秩序な開発が進むと、太陽光発電設備の配置効率が低下し、発電量と維持管理のしやすさが最適化されない可能性がある。

## (2) 太陽光発電の開発が温熱環境および生態系サービスに与える影響

太陽光発電（太陽光発電システム）の開発は、再生可能エネルギーの普及に大きく寄与する一方で、温熱環境や生態系サービスにさまざまな影響を及ぼす。太陽光発電システムの設置は、日射熱の反射や吸収により、周辺の微気候や蒸散作用が変化する。また、地表面が人工素材で覆われ、土壌の侵食や農業生産など生態系サービスへの影響は懸念される。更に、大規模な配置が地域の景観に影響を与え、観光業や地元住民の満足度に悪影響を及ぼす可能性が考えられる。

## (3) 将来人口動態における農地の在り方

2050年まで、櫛田川流域は人口減少に伴い、流域地域の高齢化が進むことが予想され、農林業をはじめとする地域産業の担い手が不足する。また、インフラ施設の管理や保守、農地の維持管理に必要な労働力の確保が困難となる。管理されない農地や森林が増える可能性があり、土地の荒廃や生態系の劣化が進む。

これにより、農地から太陽光発電への無秩序な土地利用変化は、環境、生態系、地域社会に大きな影響を及ぼし、明確な土地利用計画やガイドラインが欠如している。また、開発事業者、地元住民、行政の間での利害調整が不十分であり、太陽光発電開発に関する規制が緩く、環境影響評価やモニタリングが十分に行われていない。持続可能な開発を実現するためには、適切な規制の導入、地域住民との協働、環境負荷を最小限に抑える技術的解決策が求められる。

そこで、本研究は、農地から太陽光発電への無秩序な土地利用変化が地域環境および生態系サービスに与える影響を明らかにし、再生可能エネルギーの提供と生態系サービスを両立する持続可能な土地利用計画の研究が目的であった。具体的には、以下の3点を目指す。

(1) 農地転用における科学的・理論的な要因分析：生態系サービス評価のもとである農地利用変化の背景にある地理的・社会的要因を明らかにし、土地利用の競合や地域住民

との対立などの問題点を整理する。

(2) 太陽光発電が環境への影響を数値化・可視化：将来太陽光発電の建設が環境に与える影響を最小限にするために、太陽光発電によつての温熱環境の変化特徴を把握するとともに、その空間分布を具体化・可視化する。更に生態系サービスの劣化、保全機能への影響を定量的に解析する。

(3) 持続可能な農地管理手法の分析：将来人口減少期を予想し、枝分かれのシナリオを作成するとともに、(2)で分析した環境負荷を最小限に抑えつつ、再生可能エネルギー利用、生態系保全、農業生産の両立を可能とする土地利用計画を GIS や環境評価モデルを用いて提案する。

#### 1. 4. 2 研究方法

本研究は、三重県橿田川流域における土地利用変化に着目し、前節で示した研究目的を従つて、以下の3つの章で構成する研究をてんかいした。

(1)第二章では、橿田川流域の地理的・社会的空間情報を整理し、時間列で基盤データベースを構築すると共に、農地を作物種類によつて分類し、今まで農地転用の空間的特徴と各種類の農地の転用傾向を把握する。まずは流域における既存の公開データを分析し、標高データなどを整備する共に、研究対象地域に分析単位とした流域（小地域）とそうていした。そして個々の流域における地理的特徴を GIS 上に整理・可視化する。衛星画像による高解像度のリモートセンシングデータを用いて、機械学習モデルによつて作物から農地を4種類に分類し、その土地利用の変化（農地転用）の年間推移を分析する。最後は4種類の転用農地の地理的条件（空間分布）および社会的特徴をそれぞれ解析し、その変化パターンと転用に影響を与える要因を抽出する。

(2)第三章では、再生可能エネルギーを提供できる地上設置型の太陽光発電システムについて、その土地利用の変化と環境への影響、特に温熱環境への影響を評価する。具体的

には、まず太陽光発電システムの増加による流域全体の地表面温度の変化を計算し、流域（小地域）単位で地表面温度差と地理的条件との関係性を GWR モデルで分析する。温熱環境の変化を解明するとともに、太陽光発電の環境影響を最小限にできる設置場所の地理的特徴を解明する。

(3) 第四章では、InVEST モデルを用いて、将来農地減少を想定した生態系サービスの変化、特に供給・調整・文化の三つの視点から考察し、将来の人口密度の変化に伴う土地利用変化シナリオを作成するとともに、生産性向上と環境保全を地域において棲み分けることによって両立する手法の研究を行う。まずは現状における炭素貯留機能や水資源産量などの生態系サービスの現況について分析し、更に農地における年間経済価値を GIS データとして統合し、各サービスの現状とその地理的分布状況を分析する。そして地域の人口動態を分析、2050年の人口を増減速度と空間分布により3種類の将来人口シナリオを作成する。将来人口減少期における縮小する土地利用の管理労働量の評価と環境影響評価をもとに、(1)で解明した農地の転用パターンと(2)で計算した環境影響を最小限に抑える地理的特徴をもとに、現存農地を自然に返すべき場所、再生可能エネルギーとして転用する場所、生産性を維持・向上する場所を特定するシナリオをつくる。最後は以上の将来シナリオにおける土地利用計画をもとに、流域単位で将来人口減少期における生態系サービスの地理的分布状況とトレードオフ関係を分析する。

本研究では、「流域の農地から太陽光発電システムへの変化」が「環境に影響を与える」という課題を背景に、GIS（地理情報システム）の視点から流域スケールで土地利用の変化を定量的に分析する。個々の流域（小地域）の機能や特徴を考慮しながら、土地利用の変化がミクロな環境条件からマクロな流域全体の生態系に与える影響を包括的に解析し、土地利用変化が及ぼす影響を空間的・時間的に可視化し、科学的な根拠に基づいた評価を行う。

さらに、リモートセンシングデータや機械学習手法を活用することで、高精度かつ効率

的なデータ解析を実現すると同時に、実務的な観点を反映させた評価モデルを構築する。このモデルは、流域内の農地利用の在り方を設定し、環境保全と生産性向上の両立を図る柔軟かつ持続可能な維持管理手法を提案することを目的とする。このようなアプローチを通じて、研究対象地域に留まらず、他の地域でも適用可能な汎用性の高い評価手法を提示することを目指す。

本研究の構成は図 1-3 で示す。

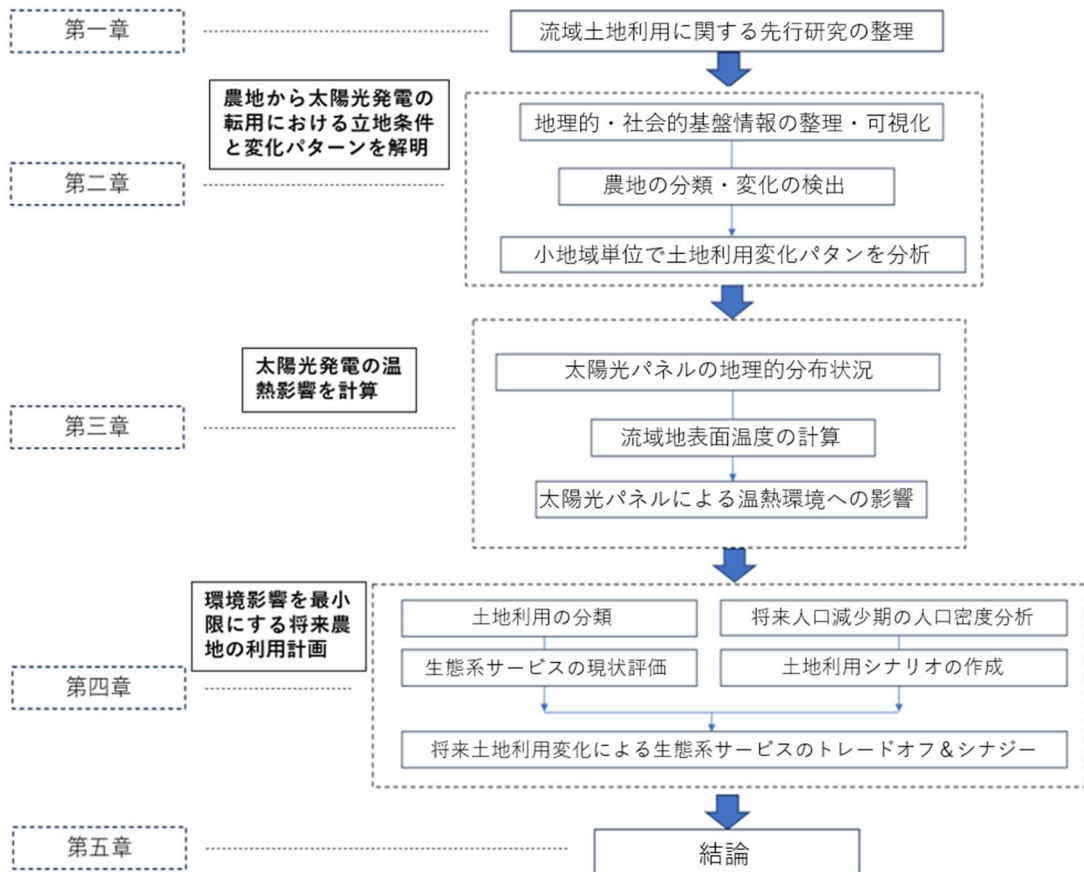


図 1-3 本研究の流れ

## 参考文献

1. 環境省(2019), 「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 土地関係特別報告書の公表」, 世界土地概況 (Global Land Outlook) , 第 6 章 , <https://www.env.go.jp/press/107068.html> (Access by 2024.10.19)
2. 尾山宏次 (2019), 「持続可能な社会の実現に貢献する環境エネルギー分野の研究開発の潮流」, JST 事業セミナー報告書-研究開発の俯瞰と潮流 ~今後の活路を展望する, 科学技術振興機構研究開発戦略センター , <https://www.jst.go.jp/crds/sympo/20190829/pdf/07.pdf> (Access by 2024.12.15)
3. Amro A. Zahrawi, Aly Mousaad Aly(2024), “A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability”, *sustainability*, 16, p.8271, <https://doi.org/10.3390/su16188271>
4. Xubang Wang, Qianru Zhou, Yong Zhang, Xiang Liu, Jianquan Liu, Shengyun Chen, Xinxin Wang, Jihua Wu(2024), “Diurnal Asymmetry Effects of Photovoltaic Power Plants on Land Surface Temperature in Gobi Deserts”, *Remote Sensing*, 16, p.1771, <https://doi.org/10.3390/rs16101711>
5. Alejandro del Pozo, Giordano Catenacci-Aguilera, Belén Acosta-Gallo(2024), “Consequences of Land Use Changes on Native Forest and Agricultural Areas in Central-Southern Chile during the Last Fifty Years”, *Land*, 13, p.610, <https://doi.org/10.3390/land13050610>
6. 竹下賢(2002), 「全国総合開発計画と流域圏構想」, 環境技術, 31(7), pp.536-540, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jriet1972/31/7/31\\_7\\_536/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jriet1972/31/7/31_7_536/_pdf/-char/ja) (Access by 2024.12.15)
7. 国土庁 (1977) , 第三次全国総合開発計画 (三全総) . 日本国政府 . <https://www.mlit.go.jp/common/001135928.pdf> (Access by 2024.12.15)
8. 吉川勝秀 (2005) , 「流域圏プランニングの時代第 5 章・流域、流域圏のとらえ方について」 , p 99-113.
9. 西岡洸紀, 藤生慎, 森崎裕磨(2022), 「自然環境調査を用いた生態系分布と土地利用形態の関連性分析」 , AI・データサイエンス論文集 , 3(J2), pp.985-993, [https://doi.org/10.11532/jsceiii.3.J2\\_985](https://doi.org/10.11532/jsceiii.3.J2_985)
10. 武内和彦 (1981) , 「自然立地的土地利用計画の方法論的研究」 , 造園雑誌, 44(3), pp.137-154, <https://doi.org/10.5632/jila1934.44.137>
11. 田村和也(2017), 「わが国の林業種苗政策の史的展開過程—1900 年代開始期から 80 年頃の確立期まで—」 , 東京大学博士論文集, <https://doi.org/10.15083/00075078>
12. Shinohara Y., Kume T. (2022) Changes in the factors contributing to the reduction of landslide fatalities between 1945 and 2019 in Japan. *Science of The Total Environment*, 827, 154392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154392>

13. 経済産業省（2023）「FIT・FIP 制度 - 過去の買取価格・期間」, [https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/kakaku.html](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html) (Access by 2024.12.10)
14. 日本経済新聞（2023）「太陽光発電 2 割に土砂災害リスク - 審査・監視追いつかず」調査報道, 2023.7.18 (Access by 2024.12.10)
15. 日本野鳥の会三重(2019) <https://miebird.org/index.php/ja/activity2/activity-sp> (Access by 2024.12.15)
16. 山下英俊(2020), 「地域に根ざした再生可能エネルギー事業による環境保全の可能性」, 環境技術, 49(3), pp.133-137, [https://doi.org/10.5956/jriet.49.3\\_133](https://doi.org/10.5956/jriet.49.3_133)
17. 小嶋一樹, 松本邦彦, 澤木昌典(2018), 「地上設置型太陽光パネルの規制・誘導条例の立地規制および景観保全への有効性」, 都市計画学会都市計画論文集, 53(3), pp.1313-1319, <https://doi.org/10.11361/journalcpj.53.1313>
18. 田畑貞寿(1979), 『都市のグリーンマトリクス』. 彰国社, 東京.
19. 中瀬勲(1981), 「流域を基礎にした緑地計画に関する研究」. 日本造園学会誌, 第 44 巻第 4 号, pp. 45-55.
20. 今枝優介, 大野研(2019), 「三重県における生態系サービス間のシナジーとトレードオフ解析」, H30 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.502-503, <https://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/18/6-6.pdf> (Access by 2024.10.19)
21. 片桐由希子, 石川幹子(2012), 「地方中心都市における小流域に基づく緑地環境計画手法の導入に関する一考察」, ランドスケープ研究, 75(5), pp.673-676, <https://doi.org/10.5632/jila.75.673>
22. 清水裕之(2015), 「標準地域 3 次メッシュを用いた日本の国土の土地利用の変化と人口・世代変化の観察と類型化」, 都市計画学会都市計画論文集, 50(1), pp.107-117, <https://doi.org/10.11361/journalcpj.50.107>
23. 石川幹子, 森田楓菜, 山本遼介(2020), 「小流域分析に基づく神田川上流域の緑地施策の歴史的経緯と今後の計画論に関する研究」, ランドスケープ研究, 83(5), pp.667-672, <https://doi.org/10.5632/jila.83.667>
24. 劉学, 川口暢子, 高取千佳, 清水裕之(2016), 「里山里地における土地利用の変化とその要因-三重県松阪市粥見・有間野地区を事例として」, 日本建築学会東海支部研究報告書, 54, pp.489-492, <https://www.aj.or.jp/paper/detail.html?productId=601017> (Access by 2024.10.19)
25. 小川景司(2022), 「持続可能な農業経営の実現に向けたステークホルダー・マネジメント : 日英の土地利用型農業を対象とした実証分析」, 東京大学博士論文集 [http://purl.org/coar/resource\\_type/c\\_db06](http://purl.org/coar/resource_type/c_db06) (Access by 2024.12.15)
26. Brian Deal, Varkki Pallathucheril (2009), Sustainability and Urban Dynamics: Assessing Future Impacts on Ecosystem Services, *Sustainability*, 2009-1, pp. 346-362,

<https://doi.org/10.3390/su1030346>

27. 武藤裕花(2022), 「流域の地理特性と人工林管理状況の関係性及びそれらが流量に及ぼす影響」, 東京大学博士論文集, <https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/record/2009040/files/A39064.pdf> (Access by 2024.12.15)

## 第二章

### 流域圏における農地の分類と変化

## 2. 1 研究背景

少子高齢化社会に突入することにより、日本の流域圏も過疎化によって労働管理量が不足している一方となった。日本中部に位置する櫛田川流域では、都市部から農村部、森林部にかけて、低・未利用地と耕作放棄地、管理放棄された森林などの緑地の増加などが広く見られるようになり、景観破壊と生態系の均衡の乱れが深刻化することが懸念されている。その結果、放棄された緑地や未利用地の再生は地方課題になり、農地（森林・農地）の管理放棄が増加し、地域の農林業における生産活動に大きな影響を与えている。

一方、気候変動のリスク緩和のために、日本でも 2050 年の脱炭素の実現に向け、ロードマップが示された（Carbon Neutrality）。再生可能エネルギーを提供する太陽光発電施設（Photovoltaic、以降は PV に略称する）の設置が注目され、全国に急速に設置が拡大しているとともに、その環境への影響についての議論が活発化している。PV の設置は、農地の上にパネルを置く営農型 PV と土地利用を含めて完全転用する地面型 PV に分けられるが<sup>1) 2)</sup>、管理人口不足面からも郊外や農村集落の耕作放棄地などの農林地に完全転用されるケースが多い。しかしながら、PV をはじめた再生可能エネルギー施設は周辺環境、特に緑地環境に影響を与えている<sup>3)</sup>。特に流域圏の生態系は環境の変化に対してより敏感であったため、このような土地利用転換は地域の土壌質や気候などへの影響は小さくない。更に農林地などの緑地は食料供給する一方、流域の内水氾濫や土砂崩れなどの災害防止にも役割を果たしているため<sup>4) 5)</sup>、このような地理的变化パターンを解明するのは地域にとって最も重要な課題であった。

日本の三重県は古くから大規模な農地が存在し、特に茶畑の規模は静岡につぐ全国 2 番目の産量を誇ると共に、地域景観として観光名所にもなっている。しかし、人口減少のため各地域で耕作放棄が増加し、更にこれらの農地の PV への転用が加速された。

本章では、櫛田川流域を例として農地を作物別に分類し、2016 年から PV に転用された各種類の農地を特定し、その地理的・社会的特徴を分析するとともに、PV に転用する土地

利用変化パターンを解明することを目的とする。その変化の地理的・社会的要因を理解する共に、オープンデータを利用した解析方法を活用し、日本だけでなく海外でも汎用可能な分析モデルを開発する。

## 2. 2 農地における土地利用分類

### 2. 2. 1 対象地域における農地の分類

#### 2. 2. 1. 1 対象地域・データソースの紹介

研究対象地域は日本中部地方における三重県の一級河川である櫛田川流域、松阪市・多気町・明和町の三つの行政エリアで構成される（図 2-1）。流域の総面積は 767.62 km<sup>2</sup>、現在の人口は約 20 万人、典型的な農林業型の流域圏であった。この地域では他の地方流域圏と同じく、少子高齢化問題に直面し、農林業地域の管理放棄が進んでいる。2010 年から 2020 の十年間、人口はおおよそ 10.1%が減少し、農業用面積は 6.3%が減少した。流域圏全体の農業産出額は 7.3%に低下し（E-STAT）、地方の支えとなる農林業の衰退が見られる。

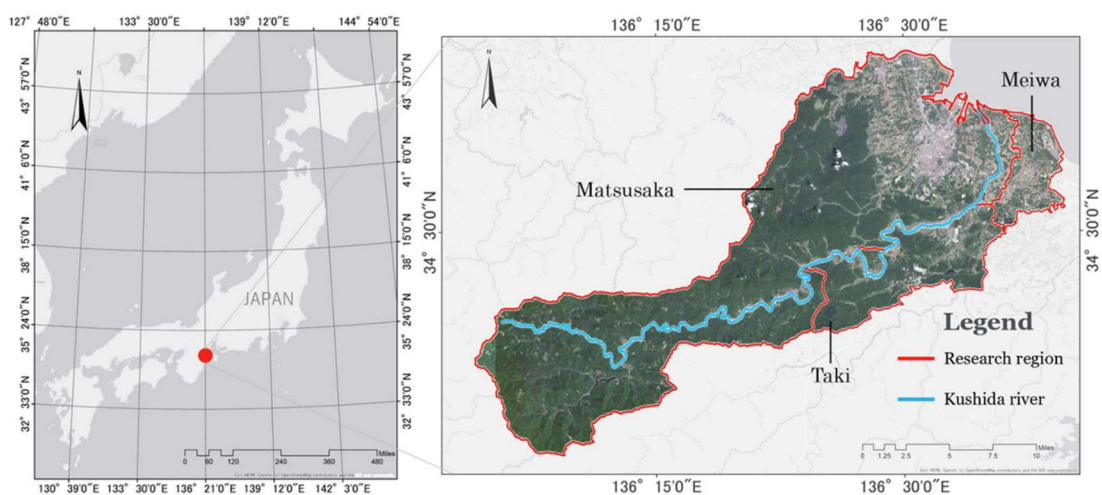


図 2-1 櫛田川流域の位置情報

また、本章の研究は汎用可能な分析手法を構築するが目的であったため、公開された公式データ及びリモートセンシングデータをもとに、その上で計算する分割流域（小地域）・傾斜率・年間日射量などのデータを使用した。本章の分析で使うオープンデータのソース及びフォーマットは表 2-1 に示す。

表 2-1 本章で使した公開データ情報

NAME	FORMAT	SOURCE
<b>Digital Elevation Model</b>	Tiff	Geospatial Information Authority
<b>River Network</b>	Shapefile	Geospatial Information Authority
<b>Aerial photographs</b>	Jpg	Geospatial Information Authority
<b>Road Network</b>	Shapefile	Open Street Map
<b>Farmland</b>	Shapefile	Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries
<b>Administrative Boundaries</b>	Shapefile	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
<b>Sentinel-2 images</b>	Remote sensing	European Space Agency
<b>Population</b>	Shapefile	e-Stat

本研究における単位流域（分割流域）は、DEM データを用いて ArcGIS で計算したものであった。計算のプロセスとして、先ずは ArcGIS の Fill ツールを使って、標高データの平滑化を行う。DEM データでは、窪地による解析エラーが生じることがあるため、解析前に平滑化する必要がある。そして Flow Direction と Flow Accumulation ツールを用いて、流域の各セルに流れ込む水の量を表す流向図および流量累積図を作成する。更に、流量の閾値を設定し、ストリームネットワークを定義する。ここでの閾値設定は、間接的に単位流域（もしくは分割流域）の大きさを決める。最後は Watershed ツールを利用し、流向データとストリームネットワークを基に流域界の境界データを生成する(図 2-2)。

また、本研究における中流域の定義では、下流部・中流部・上流部の三つで構成されそれぞれ分割流域の平均標高から計算した。下流部は平均標高 0 から 50m の分割流域を定義し、主に都市部で構成された流域であった。中流部は平均標高 50.1 から 300m の分割流域を定義し、主に郊外部や中山間部で構成された流域であった。上流部は平均標高 300.1m 以上の分割流域で、主に山間部で構成された流域であった(図 2-3)。

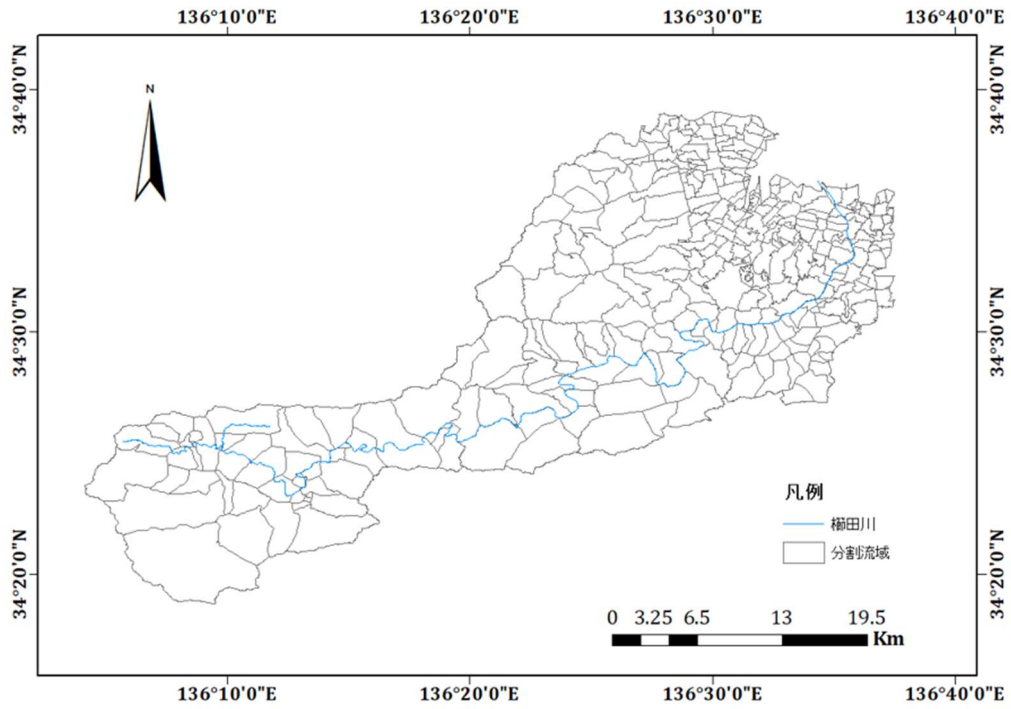


図 2-2 本研究における単位流域（分割流域）の設定

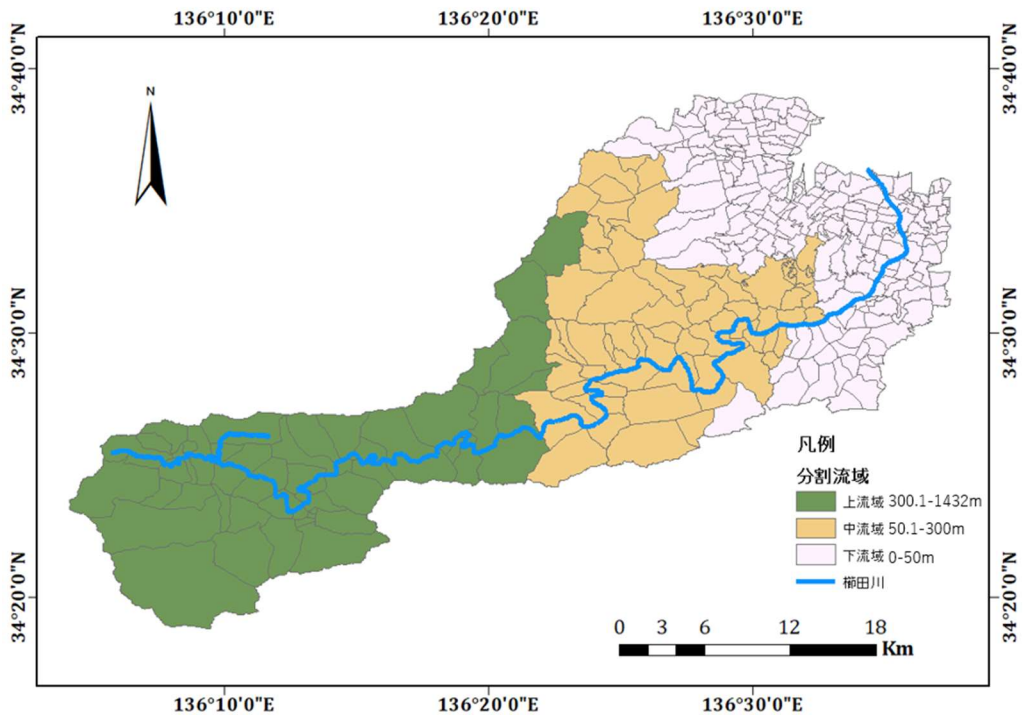


図 2-3 榎田川流域における中流域の定義

## 2. 2. 1. 2 本章における研究フロー

本章で使用した研究フローは図 2-4 で示す。まず、Sentinel-2 データを使用して、2016 年から 2017 年にかけての研究地域の毎月の NDVI（正規化植生指数）と MNDWI（修正正規化水体指数）を計算し、それを独立変数として、Random Forest (RF) 機械学習モデルを用いて、地域内の農地を水田 (PF)、麦畑 (WF)、茶畑 (TF)、豆畑 (BF) の 4 つのタイプに分類し、その地理的特徴を導き出した。次に、ArcGIS Pro の深層学習モジュールと、2021 年に撮影された航空写真を基にした手動補正を組み合わせることで、研究地域内の PV の位置情報を計算し、その分布状況を可視化する。これらのデータに基づき、2016 年から 2021 年にかけて PV に転換された農地の数と位置を特定した。最後に、社会的要因（人口変動）や地理的要因を組み合わせ、各作物タイプの PV 転用パターンを導き出した。

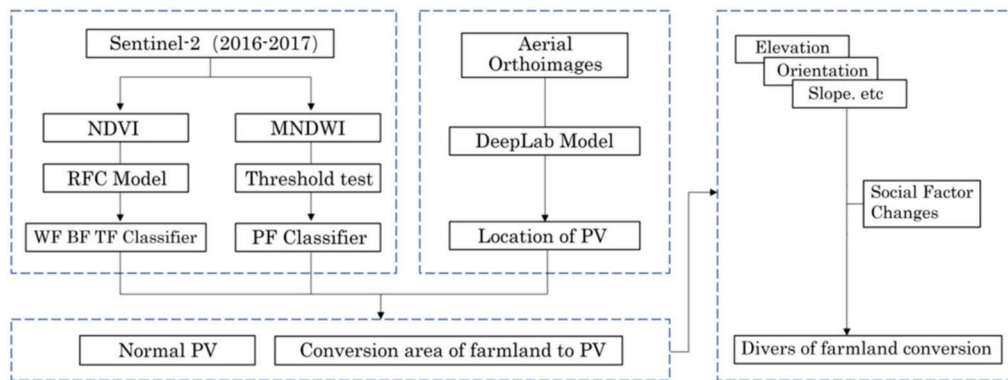


図 2-4 本章での研究フロー

## 2. 2. 2 農地の分類と検証

流域範囲内の農地の位置情報は農林水産省（MAFF）から取得し、ポリゴンデータとして ArcGIS にて分析を行う。また、2021 年に櫛田川流域における各自治体の農業産出額・作付面積の統計データに基づき<sup>6</sup>、この流域の農地は「水田 (PFs)」、「麦畑 (WFs)」、「茶畑 (TFs)」および「豆畑 (BFs)」次の 4 つの作物に分類できる。

水田（PFs）は、灌漑期に水域が存在することが特徴であったため、他の農地タイプと水田を区別するために、修正正規化水体指数（MNDWI）<sup>7) 8)</sup>を使用して抽出する。MNDWI の計算式（式 2-1）は、XU（2007）<sup>9)</sup>によって提案された NDWI 計算式を McFeeters（1996）<sup>10)</sup>に基づき改良したものであった。また、水田以外の農地作物は発芽成長時期が異なるため、その植生密度を表す NDVI 指数（正規化植生指標）の周期的な変動も異なる可能性がある。Sentinel-2 画像を用いて、2016 年 11 月から 2017 年 10 月までの月別 NDVI 画像を算出可能であった（式 2-2）。

$$MNDWI = (G - SWIR)/(G + SWIR) \quad \text{式 2-1}$$

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad \text{式 2-2}$$

ここで、G は緑のバンド値、SWIR は短波赤外放射計のバンド値、NIR は近赤外反射率、R は赤色光反射率を表す。

MNDWI の計算に必要な Sentinel-2 の SWIR バンドのデータは 30m 解像度であり、他に必要である green バンドの 10m 解像度と一致にするため、まず ArcGIS で SWIR バンドを Pan sharpen 処理を行い、すべてのバンドを 10m 解像度に統一する。調査地域の 2017 年 2 月～6 月（PF 灌漑期間）の MNDWI 時系列変化画像を算出し、統計観測から閾値を -0.05 に設定する（図 2-5）。農林水産省が提供する農地地域データから MNDWI 値の閾値より大きい地域（水域として特定）を抽出し、PF の面積と枚数を計算する。

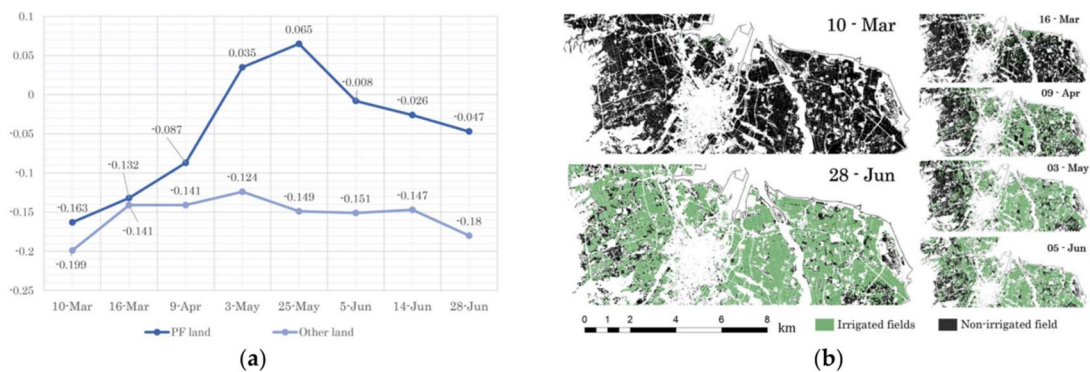


図 2-5 MNDWI の変化 (一部のエリア)

PF 以外の農地では、NDVI を独立変数とし、Random Forest 機械学習モデルを用いて農地を WF、TF、BF の三種類に分類した。先ず Google Earth と現地調査から確認で TF154 枚、WF206 枚、BF150 枚をラベル付き、その NDVI 値をモデルの学習とテストのためのサンプルとして使用した(図 2-6(a))。Random Forest は、landscape 分野のクラスター分析で広く使われている機械学習手法であった<sup>11) 12) 13) 14)</sup>。RF モデルのキャリブレーションは、3 つのパラメータ<sup>15)</sup>に決定されている：木の数 (`n_tree`)、各スプリットに選択される共変量の数 (`m_try`)、ターミナルノードのサイズ (`node_size`)。本研究では、いくつかの試しと調整の上、`n_tree=300`、`node_size=6`、`m_try=3` に設定した。510 サンプルのうち、学習サンプルを 70%、テストサンプルを 30%とする。これらのパラメーターを設定し、RF モデルを用いて、PF 以外の全体農地の NDVI 値から分類を行った (図 2-6 (b))。

また、PF 以外の農地を分類する RF モデルの精度を確認するために、混同行列 (Confusion Matrix) を使い、テストサンプルの正確率を計算した (表 2-2)。精度値と混同行列は、RF モデルの精度を評価する基準として使用する。モデルの精度値は、その全体的な精度を説明する指標であり、本研究では次の式を使用して算出した：

$$Accuracy = (T_{WF} + T_{BF} + T_{TF}) / S_n \quad \text{式 2-3}$$

ここで、 $T_{WF}$ 、 $T_{BF}$ 、 $T_{TF}$  はそれぞれ、テストサンプルに基づいてモデルを正確に予測した WF、BF、TF の事例数を表し、 $S_n$  はテストサンプルの総数であった。結果として、モデルの accuracy 値は 0.91 であり、有意義なモデルとして考えられる。最後に、上記のモデルから、調査地域の各種農地の数、面積、地理的分布の特徴を導き出した。



図 2-6(a) 学習サンプルにおける 3 種類農地の NDVI 変化。

図 2-6 (b) RF モデル分類結果の NDVI 変化。

表 2-2 混同行列 (Confusion Matrix)

		Predicted		
		TF	BF	WF
Actual	TF	44	2	0
	BF	5	47	2
	WF	1	4	48

### 2. 2. 3 農地の分類結果

分類結果から、櫛田川流域総計 115187 か所農地のうち、耕作放棄地・休耕地を除く 106508 ヶ所が存在する。その中で PF は 63888 か所 (9646.8ha)、TF は 4875 か所 (393.3ha)、BF は 24902 か所 (1177.7ha)、WF は 21513 か所 (1019.7ha) であった (表 2-3)。PF が研究地域内で最も数・面積が多く、流域圏の全体農地数の 54.6% を占

め、低地の平原に集中していることがわかった（図 2-7）。WF は PF の分布パターンは似ており、主に明和町の低地の平原や都市郊外地域に分布し、全体農地数の 18%がある。TF は数が少なく、全体農地数の 4.6%であったが、主に松阪市の中山間部などの高地に存在し、特に川沿いに集中している。BF は 22.6%の数であったが、分布状況は分散的であった。主に多気町の川や道添など、人口密度の高い近くに集中していると分かった（図 2-7）。

表 2-3 農地分類の結果

	PF	TF	BF	WF	Total
Num (放棄・休耕地を除く)	63888 (61785)	4875 (4838)	24902 (21134)	21513 (19137)	115187 (106894)
Area(ha)	9646.8	393.3	1177.7	1019.7	12237.5
%	54.6%	4.6%	22.6%	18%	100%

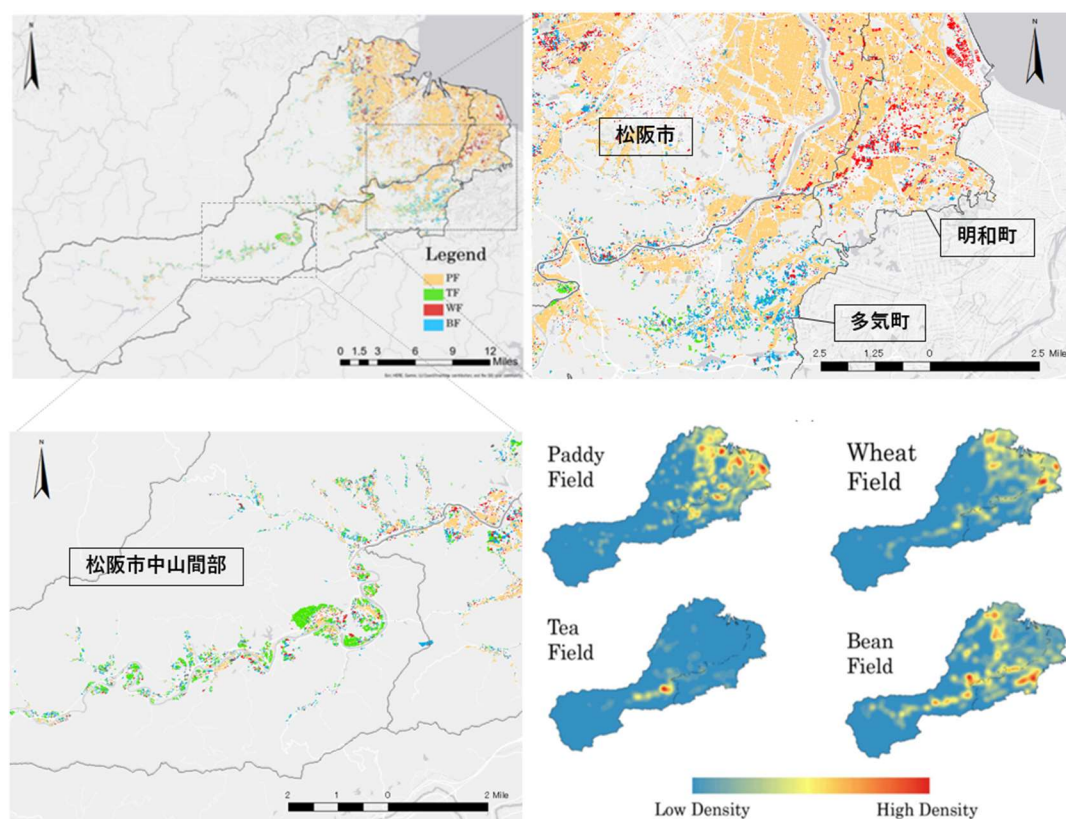


図 2-7 農地分類の空間分布と密度状況。

## 2. 3 Deep Learning モデルによる土地利用変化の検出と分布状況

2016年から2021年の間にPVに転換された農地を識別するために、ArcGIS Proのディープラーニングモジュールで内蔵したDeepLabモデルを使用して<sup>16) 17)</sup>、2021年の航空写真で解析を行った。DeepLabは、全畳み込みニューラルネットワーク(FCN)に基づく画像解析モデルで、土地利用や環境緑地の分野で広く使用され、画像から特定の対象オブジェクトを抽出することができる<sup>18) 19)</sup>。

本研究はまず、2021年の航空写真から研究地域内のすべてのPVのポリゴンデータを抽出し、結果を手動で検証および修正した。次に、ArcGISを使用して、PVのポリゴンと2016年の農地データをArcGISでオーバーレイ分析を行い、重ねた部分を抽出した。これにより、2016年から2021年の間に、各タイプの農地がPVに転換された数と位置を特定することができた(図2-8)。また、PVの面積は、元の農地面積と部分的に一致しない可能性があるため、本研究では、PVの転用率が50%を超える場合、農地が完全転用されたと見なす。

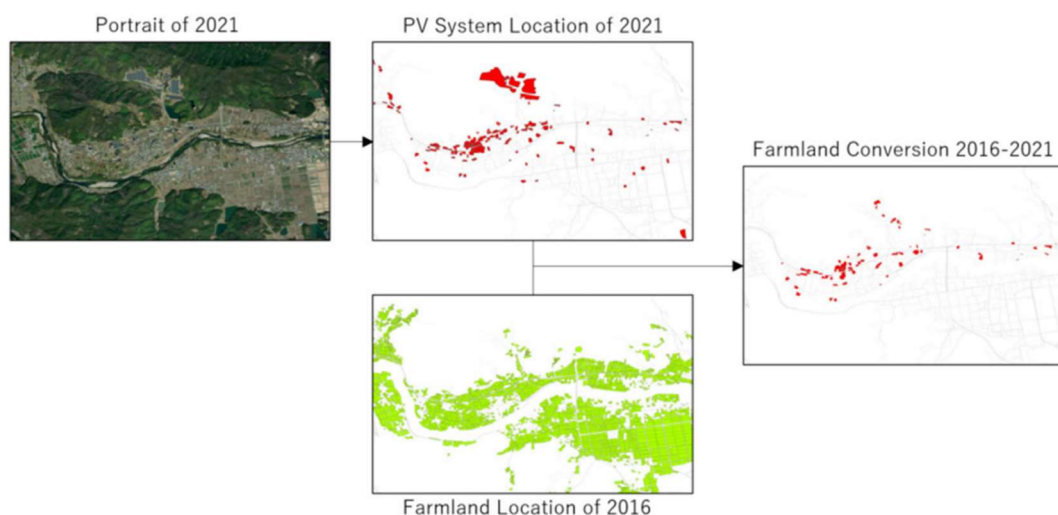


図 2-8 農地転用 PV の抽出手順

農地転用の計算結果について、櫛田川流域圏の約 11 万ヶ所のうち、1050 ヶ所の農地が

PV に完全転用され、全体の 0.91%であった。僅か 5 年かけての変化と考えると、これは地域における注意すべき問題となっていると考えられる。農地の種類から見ると、転用数と転用面積が最も多いのは麦畑 (WF)、1019ha のうち 20ha (0.93%) が PV に転用された。その一方、茶畑 (TF) と水田 (PF) はそれぞれ 0.47%と 0.54%しか転用されていない状況が判明した。

また、ArcGIS 上のカーネル密度計算ツールを使って分析を試みたところ、PV へ転用した農地を可視化した。転用した枚数で密度分析した場合、都市周辺部と中山間部の両方が高い密度を示したが (図 2-9a)、転用面積から密度計算すると、都市周辺部だけに転用地が高密度で集中することがわかった (図 2-9b)。

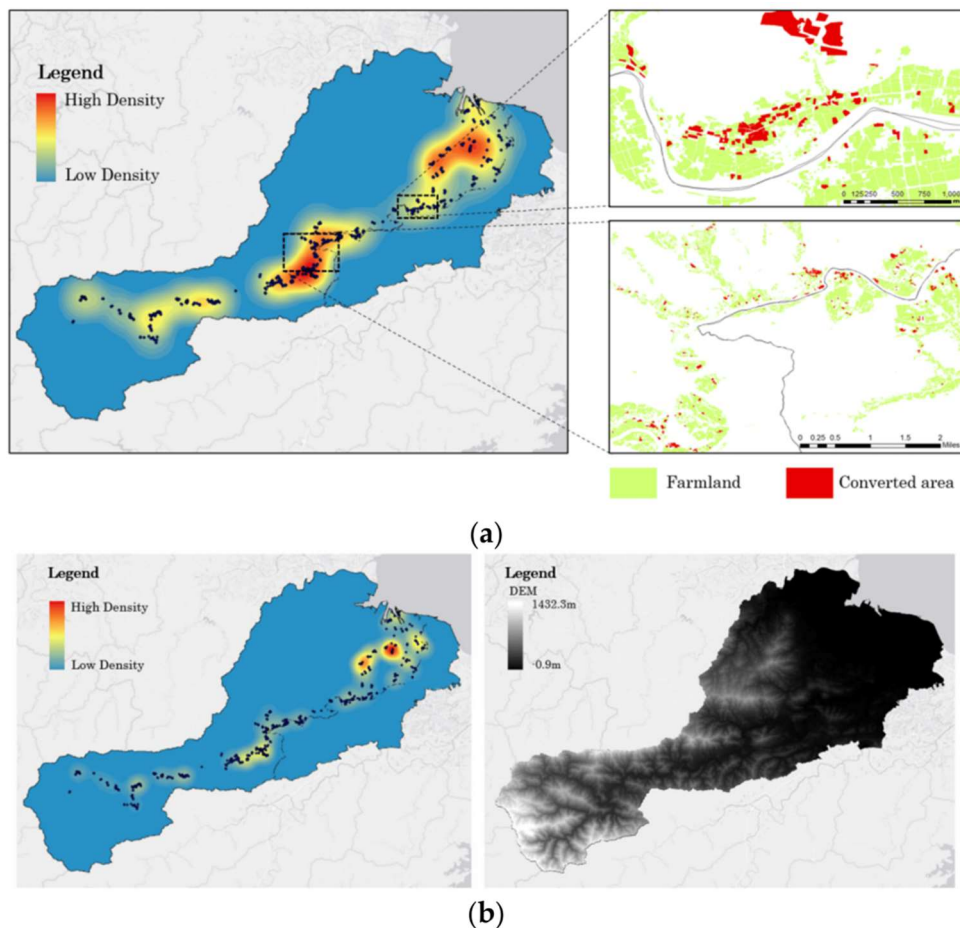


図 2-9 PV に転用された農地の分布状況

## 2. 4 土地利用変化の要因分析

### 2. 4. 1 各種農地の転用状況の統計

前文の計算によると、2016年から2021年の5年間に、櫛田川流域圏内では合計1806カ所のPVが建設され、総面積は394.8haに達した(表2-4)。また、農地の転用に関しては、耕作放棄地および休耕地を除いて約10.6万カ所の農地のうち、1052カ所がPVに転用されており、総数の0.98%に相当し、その面積は77.93haであった(総面積の0.64%)。各農地種類の転用面積パーセンテージからでは、WFからの転用が最も多く、合計1019haの土地のうち、0.93%の20haがPVに転用され、その次にBFが0.81%(9.56ha)が転用された。一方で、TFとPFの転用率はそれぞれ0.54%(2.1ha)と0.47%(45.52ha)にとどまっていた(表2-5)。

表 2-4 PVの細分枚数と面積

	松阪市	明和町	多気町	総計
PV数(細分枚数)	1210	342	254	1806
PV面積(ha)	220.3	117.4	57.1	394.8

表 2-5 各種農地の転用状況の統計

	PF	TF	BF	WF	Total
Num(放棄・休耕地を除く)	63888 (61785)	4875 (4838)	24902 (21134)	21513 (19137)	115187 (106894)
Area(ha)	9646.8	393.3	1177.7	1019.7	12237.5
Conv Num	431	32	247	340	1052
Conv Area(ha)	45.52	2.13	9.56	20.72	77.93
Conv Num%	0.67%	0.65%	0.99%	1.58%	0.98%
Conv Area%	0.47%	0.54%	0.81%	0.93%	0.64%

## 2. 4. 2 農地転用の地理的・社会的特徴

### 2. 4. 2. 1 農地転用の地理的特徴分布

農地転用の要因を研究するためには、地理的と人的要因の両方を考慮する必要があるため、本節では異なる種類の農地を分析し、転用農地の地理的特徴を解明することを目的としている。各種類の農地と転用地の地理的特徴に有意な差異があるかどうかを確認するために、一元配置分散分析を用いて分析を行う。一元配置分散分析は、関連要因を選別するためのフィルターとして、特徴空間の高次元問題を解決する上での有効性が実証され<sup>20) 21)</sup>、ランドスケープ分野の研究で幅広く使用されていた<sup>22) 23) 24) 25)</sup>。同時に、PVの設置場所の選定において、日射量が大きな影響を与えることが複数の研究で証明され、これらの特徴が流域圏の農地転用にも適用されるかどうかを確認するために、ArcGISの日射量解析ツールを使用して分析を行った。また、農地の地理的特徴について、本研究は①最寄り水源までの距離（WD）、②最寄り道路までの距離（RD）、③標高（DEM）、④傾斜率（SLOPE）、⑤傾斜率（SLOPE）、⑥傾斜方向（DIRECTION）である六つの変数をArcGISで計算した。結果として、各種類農地と転用地の平均値は表 2-6 と図 2-10 で示す。

表 2-6 農地と転用地における各地理的特徴の平均値

		WD (m)	RD (m)	DEM (m)	SLOPE	SLOPE	DIRECTION
<b>PF</b>	PF	209.6	60.1	43.8	2.21	0.241	125.8
	PF-conv	262	21.5	49.3	1.96	0.211	144.1
<b>WF</b>	WF	246.7	45	41.2	1.93	0.3	127
	WF-conv	172.8	14.9	126.4	5.08	0.051	146.3
<b>BF</b>	BF	187.1	108.6	93.7	5.5	0.152	149
	BF-conv	138.4	17	162.7	6.35	0.012	163.9
<b>TF</b>	TF	154.6	130.9	144	9.1	0.034	161.7
	TF-conv	129.7	22.1	152.8	10	<0.001	169.5

各変数の平均値から見ると、傾斜方向（DIRECTION）以外に、農地種類ごとでそれぞれ

れ違う特徴があると分かった（表 2-6）。特に、（1）WD（水路までの距離）は、TF・BF・WF 三種類に転用された農地では平均距離より近い場所に位置しているが、PF だけは全体平均より 20%遠い場所に位置している。（2）RD（道路までの距離）は、転用された農地はそれぞれ平均値より 64.2%（PF）、66.9%（WF）、84.3%（BF）、83%（TF）が少ない、ほぼ全部が道路の近いところに位置している。（3）DEM（標高）は、WF、BF、TF に影響があることが見られる。それぞれ平均値より 207%、73.6%、8%高い標高の中山間部に集中している。（4）SLOPE（傾斜角度）は WF だけ特に特徴的に見られ、転用地の角度は平均値より 163%高く、傾斜が激しい場所に位置している。（5）OPEN（地上開度）は、日照時間などに関係しているが、全体的に転用された場所の地上開度値は平均的に低い数値であった。（6）DIRECTION（傾斜方向）は特に関係性が見られないが、全体的に東南方向きの農地が転用されやすい傾向がある。

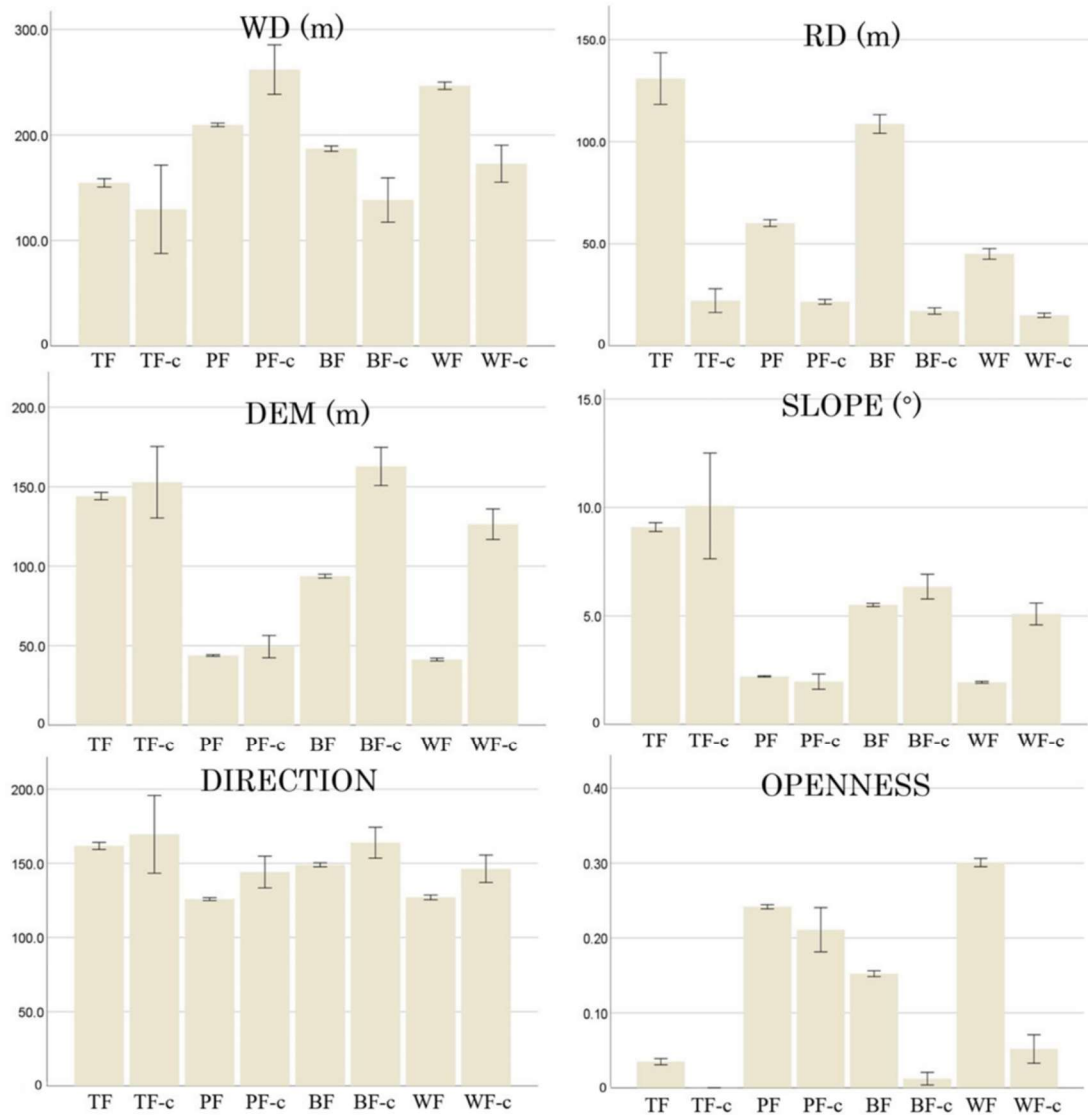


図 2-10 農地と転用地における各地理的特徴の平均値

そして、以上の平均値分析の結果が、実際に農地転用の特徴であったかどうかを検討するために、SPSS で一元配置分散分析 (one-way ANOVA) モデルを用いて各変数の有意性を計算した。有意分析の結果から、転用された農地と転用していない農地の間には、 $p < 0.01$  の変数は有意な地理的差異が存在することが結論付けられる (表 2-7)。

表 2-7 一元配置分散分析の結果

	<b>WD</b>	<b>RD</b>	<b>DEM</b>	<b>SLOPE</b>	<b>OPEN</b>	<b>DIRECTION</b>
<b>PF - PFc_Sig</b>	<0.001	0	0.972	0.996	0.709	0.025
<b>WF - WFc_Sig</b>	<0.001	0	0	0	0	0.02
<b>BF - BFc_Sig</b>	<0.001	0	0	0.106	0	0.144
<b>TF - TFc_Sig</b>	0.998	0	0.498	1	0	1
<b>F</b>	184.16	159.1	2380.92	3096.87	568.67	159.71
<b>DF</b>	7	7	7	7	7	7

以上の農地転用と地理的要因の関係を分析することにより、各種類の農地の転換に影響を与えるポジティブとネガティブの要因を特定できた（表 2-8）。ここで「PST」は、地理的特徴値が大きいほど、農地が PV への転用に対して促進する影響を与えることを示す。「NGT」は、値が大きいほど農地が PV への転用に対して緩和する影響を与えることを示す。「/」は、対応する要因が農地の転換に影響を与えないことを意味する。

表 2-8 農地転用における要因

	<b>WD</b>	<b>RD</b>	<b>DEM</b>	<b>SLOPE</b>	<b>OPEN</b>	<b>DIRECTION</b>
<b>PFs</b>	NGT	PST	/	/	/	/
<b>WFs</b>	PST	PST	NGT	NGT	NGT	/
<b>BFs</b>	PST	PST	NGT	/	NGT	/
<b>TFs</b>	/	PST	/	/	NGT	/

#### 2. 4. 2. 2 流域単位における農地転用の要因

本研究は、農地転用は地理的特徴以外に、人口減少期における管理者不足問題も加えて、それらの検証を行う。櫛田川流域における分割流域（集水域）は、ArcGIS で作成した。分割流域の作り方として、小地域の境界線はほぼ一致しているため、人口データなどの精度を保証するために、ここでは小地域の境界線データを使用して分析を行う。中瀬ら（1981）は<sup>26</sup>、流域に関しては、流域が地表流を媒体にした閉鎖系として取り扱えること、さらには「流域」がかつての行政区域としての「郡」の境界と一致している場合が多いこ

とに着目して検討を行った結果、流域の計画単位としての有効性を指摘した。

そして 2016 年から 2021 年までの流域の人口を分析し、農業従事者のデータを ArcGIS にインプットする。ここでは、農林業センサスの町丁目統計データを使用する (<https://www.e-stat.go.jp>. Access by 2023.10)。

更に、式 2-4 で、2016 年から 2021 年の個人農家の耕作率 (PFR) を計算し、市町村単位の農業従事者数の増減率を示す(図 2-11)。さらに、各流域の農地転用率 (FCR) も計算し、どれだけの農地が PV に転換されたかを示 (式 2-5)。最後はこれらの 2 つの指標を比較することで、農業従事者数の変化と農地転換との関係を把握することができる。

$$PFR_j = \frac{PFN_{j2020} - PFN_{j2015}}{PFN_{j2015}} \times 100\% \quad \text{式 2-4}$$

$$FCR_j = \frac{CL_j}{FL_j} \times 100\% \quad \text{式 2-5}$$

ここで、 $PFR_j$  は小地域  $j$  における農業従事者人口の変化率を表し、 $PFN_j$  は該当流域  $j$  の農業従事者の数を示します。 $FCR_j$  は該当流域  $j$  の農地転換率を表し、 $CL_j$  は該当流域  $j$  で転換された農地の面積を示します。 $FL_j$  は 2016 年における該当流域  $j$  の農地総面積を示す。

本研究は多変量回帰を使用して、流域の転用率 FCR を従属変数として、農業従事者の変化率 PFR と 6 つの地理的要因 (1) 傾斜方向、(2) 傾斜角度、(3) 標高、(4) 地上開度、(5) 水源までの距離、(6) 道路までの距離を独立変数として、地域単位における農地転換にどのような影響を与えるかを検討した。また、データの精確性を確保するため、本章における検討する流域は、農地転用が発生した分割流域に限る。

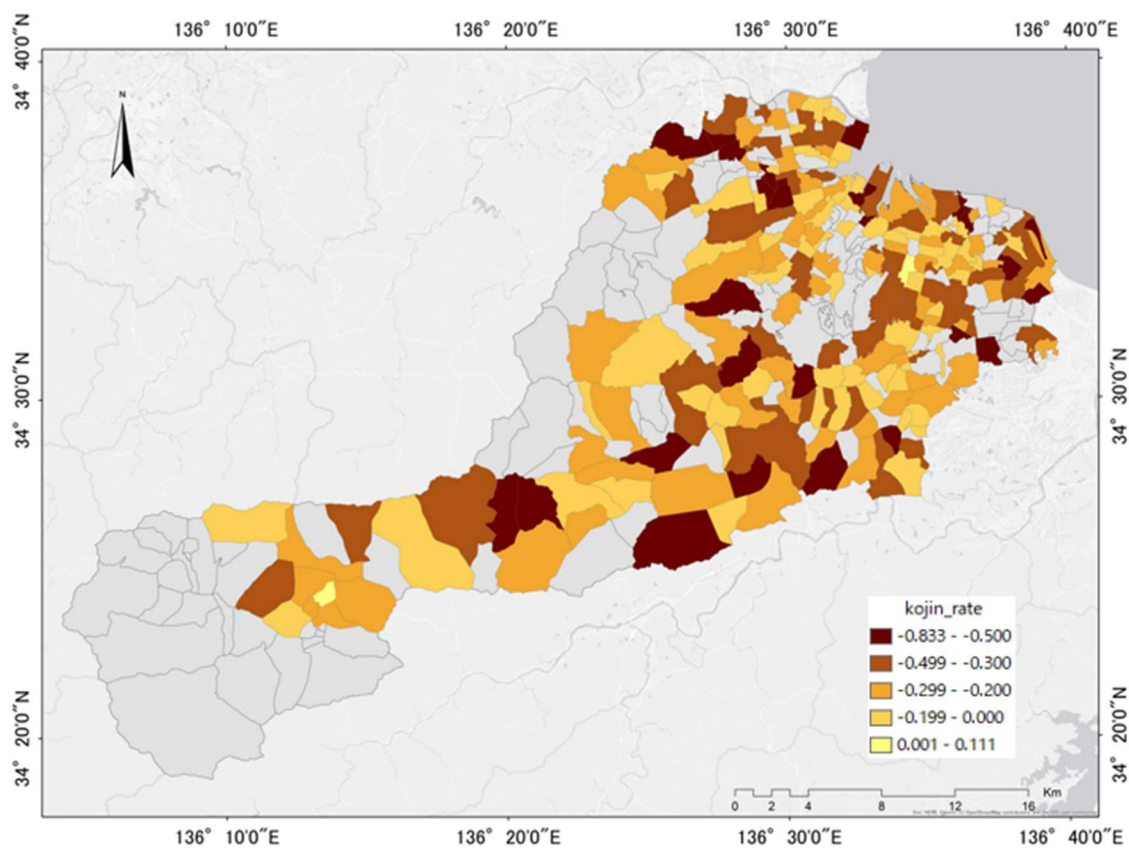


図 2-11 各分割流域における農業従事者人口の変化率(PFR)

表 2-9 回帰分析の結果

	Direction	Openness	DEM	Angle	WD	RD	PFR
P	0.014	0.316	0	0.05	0.613	0.084	0.517
B	0.005	0.002	0.016	-0.007	-0.001	-0.003	0.001
Beta	0.180	0.069	0.578	-0.244	-0.034	-0.112	0.040

P represents significance probability of each factor, B and Beta represents extent to which the factor influences the model.

回帰分析の結果（表 2-9）では、有意確率が 0.01 未満であり、モデルが有意であったことを示す。R<sup>2</sup>は 0.244 で、このモデルの変数が FCR の変動の 24%を説明していることを示す。さらに、有意確率（P）に基づいて各変数の有意性を確認することができ、4 つの変数について beta 値を用いて分析した。beta 値が大きいほど、従属変数に対する影響が大きい

くなるため、方位、傾斜角度、標高、および道路までの距離が有意な説明変数であった ( $p < 0.05$ 、 $\beta > 0.1$  または  $\beta < -0.1$ )。ただし、耕作管理者の変化 (PFR) と転換率 (FCR) の間には相関は見られなかった。

## 2. 5 考察とまとめ

本研究では、農地を作物の種類に基づいて分類し、各作物の太陽光発電システム（PV システム）への転換傾向を調査した。

まずは、農地から PV への転用については、約 78 ヘクタールの農地が 5 年間で太陽光発電システムに転換され、主に川の近くに広がっていった。異なる種類の農地の転換傾向に関して、WFs（麦畑）の転換率が最も高く（1.7%）、TFs（茶畑）の転換率が最も低かった（0.66%）。主要な地元作物とされる PFs（水田）や TFs の PV システムへの転換率は低い傾向が見られた。

さらに、各種農地の転換は地理的特性や栽培環境に影響を受けることがわかった。一般的に、道路に近い農地は転換される可能性が高くなることが判明した。各種農地の転換傾向から以下の結論を得られる：(1) WF の転換は、方向を除くすべての地理的特性と密接に関連している。(2) BF と WF は共に乾地作物であり、栽培条件に大きな違いはないため、地形の傾斜角度を除いて、転換地の地理的特性はほぼ同じであった。当地の BF（豆畑）は段々畑が多く、傾斜角度の影響を軽減する役割を果たしているため、持続可能な農業や土地利用管理に重要な意味を持っている。(3) PF は水路から遠く離れているほど転換されやすい傾向があり、これは PFs が独自の栽培環境と水資源を必要とするためと考えられる。(4) 高付加価値作物であった TFs の転換は、道路の近接性（RD）に影響されると同時に、開放性（地上開度）とも関連していることが分かった。

また、農地転換と社会的要因との関係を小地域単位で分析した結果から、農地の転換率と農家の増減には直接的な関係は見られなかった。しかし、個々の農家が複数の土地を所有しており、必ずしもすべての土地を転換していない可能性がある。これは、農業従事者の高齢化や周辺環境の変化も考慮する必要がある。また、農地を太陽光発電システムに転換することは、周辺環境に重大な影響を与える可能性がある。本章で提案した方法論的枠組みは、流域地域における農地転換の空間的分布を特定する上で重要な役割を果たし、他

の地域や国に応用することができると考えられる。ただし、サンプル数の限界やモデルの精度など、さらなる研究が必要であった。

1. 参考文献
2. NOZU, T. Analysis on Farmers' Willingness of Implement to Combinations of Solar Photovoltaic and Food Crops. *JOURNAL OF RURAL PLANNING ASSOCIATION* **2018**, *37*, 304–311, doi:10.2750/arp.37.304.
3. Pascaris, A.S.; Schelly, C.; Burnham, L.; Pearce, J.M. Integrating Solar Energy with Agriculture: Industry Perspectives on the Market, Community, and Socio-Political Dimensions of Agrivoltaics. *Energy Research & Social Science* **2021**, *75*, 102023, doi:10.1016/j.erss.2021.102023.
4. Kim, J.Y.; Koide, D.; Ishihama, F.; Kadoya, T.; Nishihiro, J. Current Site Planning of Medium to Large Solar Power Systems Accelerates the Loss of the Remaining Semi-Natural and Agricultural Habitats. *Sci Total Environ* **2021**, *779*, 146475, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146475.
5. Kenyon, W.; Hill, G.; Shannon, P. Scoping the Role of Agriculture in Sustainable Flood Management. *Land Use Policy* **2008**, *25*, 351–360, doi:10.1016/j.landusepol.2007.09.003
6. 農林水産省 (2021) 「わがまち・わがむら市町村別統計データ・作付面積・収穫量編」, <https://www.machimura.maff.go.jp/machi/map/24/index.html>
7. Posthumus, H.; Hewett, C.J.M.; Morris, J.; Quinn, P.F. Agricultural Land Use and Flood Risk Management: Engaging with Stakeholders in North Yorkshire. *Agricultural Water Management* **2008**, *95*, 787–798, doi:10.1016/j.agwat.2008.02.001.
8. Anusha, B.N.; Babu, K.R.; Kumar, B.P.; Kumar, P.R.; Rajasekhar, M. Geospatial Approaches for Monitoring and Mapping of Water Resources in Semi-Arid Regions of Southern India. *Environmental Challenges* **2022**, *8*, 100569, doi:10.1016/j.envc.2022.100569.
9. Gautam, V.K.; Gaurav, P.K.; Murugan, P.; Annadurai, M. Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia* **2015**, *4*, 739–746, doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.095.
10. Xu, H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing* **2006**, *27*, 3025–3033, doi:10.1080/01431160600589179.
11. McFEETERS, S.K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing* **1996**, *17*, 1425–1432, doi:10.1080/01431169608948714.
12. Ghosh, A.; Sharma, R.; Joshi, P.K. Random Forest Classification of Urban Landscape Using Landsat Archive and Ancillary Data: Combining Seasonal Maps with Decision

- Level Fusion. *Applied Geography* **2014**, *48*, 31–41, doi:10.1016/j.apgeog.2014.01.003.
13. Hengl, T.; Nussbaum, M.; Wright, M.N.; Heuvelink, G.B.M.; Gräler, B. Random Forest as a Generic Framework for Predictive Modeling of Spatial and Spatio-Temporal Variables. *PeerJ* **2018**, *6*, e5518, doi:10.7717/peerj.5518.
  14. Jiang, Z.; Yang, S.; Liu, Z.; Xu, Y.; Xiong, Y.; Qi, S.; Pang, Q.; Xu, J.; Liu, F.; Xu, T. Coupling Machine Learning and Weather Forecast to Predict Farmland Flood Disaster: A Case Study in Yangtze River Basin. *Environmental Modelling & Software* **2022**, *155*, 105436, doi:10.1016/j.envsoft.2022.105436.
  15. Nussbaum, M.; Spiess, K.; Baltensweiler, A.; Grob, U.; Keller, A.; Greiner, L.; Schaepman, M.E.; Papritz, A. Evaluation of Digital Soil Mapping Approaches with Large Sets of Environmental Covariates. *SOIL* **2018**, *4*, 1–22, doi:10.5194/soil-4-1-2018.
  16. Wang, Y.; Chen, X.; Gao, M.; Dong, J. The Use of Random Forest to Identify Climate and Human Interference on Vegetation Coverage Changes in Southwest China. *Ecological Indicators* **2022**, *144*, 109463, doi:10.1016/j.ecolind.2022.109463.
  17. Chen, L.-C.; Papandreou, G.; Kokkinos, I.; Murphy, K.; Yuille, A.L. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs 2016.
  18. Chen, L.-C.; Papandreou, G.; Kokkinos, I.; Murphy, K.; Yuille, A.L. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs 2017.
  19. Afaq, Y.; Manocha, A. Fog-Inspired Water Resource Analysis in Urban Areas from Satellite Images. *Ecological Informatics* **2021**, *64*, 101385.
  20. Liu, Z.; Li, N.; Wang, L.; Zhu, J.; Qin, F. A Multi-Angle Comprehensive Solution Based on Deep Learning to Extract Cultivated Land Information from High-Resolution Remote Sensing Images. *Ecological Indicators* **2022**, *141*, 108961, doi:10.1016/j.ecolind.2022.108961.
  21. Grünauer, A.; Vincze, M. Using Dimension Reduction to Improve the Classification of High-Dimensional Data 2015.
  22. Omer Fadl Elssied, N.; Ibrahim, O.; Hamza Osman, A. A Novel Feature Selection Based on One-Way ANOVA F-Test for E-Mail Spam Classification. *RJASET* **2014**, *7*, 625–638, doi:10.19026/rjaset.7.299.
  23. Brown, G.; Rhodes, J.; Dade, M. An Evaluation of Participatory Mapping Methods to Assess Urban Park Benefits. *Landscape and Urban Planning* **2018**, *178*, 18–31, doi:10.1016/j.landurbplan.2018.05.018.
  24. Chen, W.; Zhang, F.; Luo, S.; Lu, T.; Zheng, J.; He, L. Three-Dimensional Landscape Pattern Characteristics of Land Function Zones and Their Influence on PM<sub>2.5</sub> Based

- on LUR Model in the Central Urban Area of Nanchang City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2022**, *19*, 11696, doi:10.3390/ijerph191811696.
25. Leul, Y.; Assen, M.; Damene, S.; Legass, A. Effects of Land Use Types on Soil Quality Dynamics in a Tropical Sub-Humid Ecosystem, Western Ethiopia. *Ecological Indicators* **2023**, *147*, 110024, doi:10.1016/j.ecolind.2023.110024.
  26. Pandey, R.; Rawat, M.; Singh, R.; Bala, N. Large Scale Spatial Assessment, Modelling and Identification of Drivers of Soil Respiration in the Western Himalayan Temperate Forest. *Ecological Indicators* **2023**, *146*, 109927, doi:10.1016/j.ecolind.2023.109927.
  27. 中瀬勲 (1981) , 「流域を基礎にした緑地計画に関する研究」 . 日本造園学会誌, 第 44 巻第 4 号, pp. 45–55.

### 第三章

## 土地利用変化における温熱環境評価

### 3. 1 研究背景

緑地の変化が自然環境に与える影響は、世界中で様々な研究が行われているが、データ解析に基づく流域緑地におけるミクロスケールの温暖化・多面的機能の変化分析は、未だに少ない。日本は、南北に長く急峻な地形を持つ国土と、西に朝鮮半島や中国などの主要な貿易相手国が位置するという地政学的な条件が組み合わさり、地域ごとに土地利用の形態に大きな違いが見られる特徴を持っている。櫛田川流域の土地利用では、上流部と下流部は典型的な都市と農村の二極化であり、中流域の飯高地域は水田や茶畑が多く見られ、上流域の波瀬地域は森林資源の管理や保全のためのエリアとなっている（図 3-1）。しかし、第一次産業離れがもたらした大都市への人口流入による人口分布の偏りは、地域の農林地の転用と管理放棄を加速した。

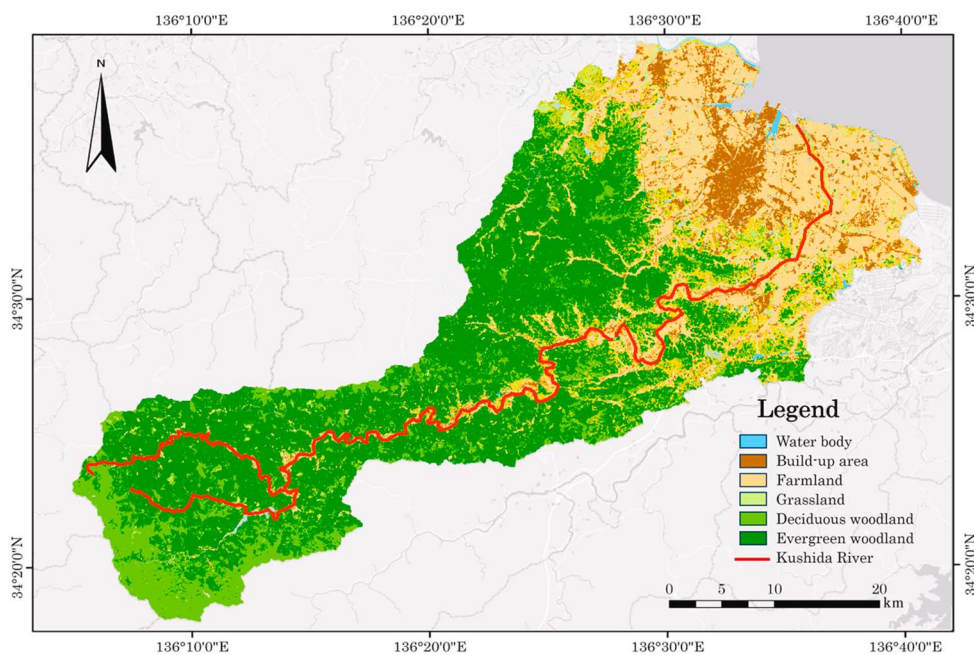


図 3-1 櫛田川流域における土地利用現状（6 種類）

JAXA ALOS データセットより作成

耕作放棄の農地を太陽光発電システム（PV）への転用は、二酸化炭素の排出削減や地域

の持続可能なエネルギー自給自足を貢献しているが、ミクロ的な地表面温度の上昇や生態系サービスにおいてはマイナス影響を起こしている。また、管理放棄された農地では、農業活動が停止することで土地が自然の植生に戻り、生物多様性が向上する一方、雑草や樹木が無秩序に生い茂るため、地域の景観が悪化する共に、地域の食品供給や獣害リスクの増加などが懸念される。このような農地の管理放棄と転用におけるトレードオフ&シナジー関係もまだ解明されていない。人口減少期に突入する流域圏において、いかに科学的・効果的な土地利用計画を構築するかは、社会全体における課題であった。

本章は、地面設置型太陽光発電システムへの土地利用変化における地域の地表面を時系列で解析し、その温度差に影響する地理的特徴を抽出することが目的であった。

### 3. 2 太陽光発電 (PV) における地表面温度 (LST) 変化の評価

#### 3. 2. 1 PA の環境影響にめぐる近年の研究と本節の研究手順

再生可能エネルギーの需要と現代社会における都市拡大は、流域圏の土地利用に新たな課題と機会をもたらしている。国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) の報告によると、2020 年までに太陽光発電の総設置容量は 714GW に達し、PV の新設率は加速し続けている<sup>1)</sup>。2021 年には、世界の太陽光発電容量が約 22% 増加し、これにより太陽光発電は 2 番目に成長が早い再生可能エネルギー技術となった<sup>2)</sup>。この成長は各国の努力によるもので、中国、アメリカ、欧州連合でそれぞれ 38%、17%、10% の増加が見られ、太陽光発電は現在、水力発電と風力発電に次ぐ第 3 の再生可能エネルギー技術として位置付けられていた<sup>3)</sup>。

しかし、PV の急速な発展に比べ、その周辺環境への影響に関する研究は依然として不足している。郊外や農村地域の生態環境は都市部よりもセンシティブであったため<sup>4) 5) 6)</sup>、PV の設置は小規模な土壌や微気候に影響を与えるだけでなく<sup>7)</sup>、地域の生態系パターンを変化させる可能性がある<sup>8) 9)</sup>。さらに、大規模な PV の設置は、地表のアルベド (反射率) や放射バランスを変化させ、間接的に風の流れ、蒸発、降水などの地域の気象パターンに影響を及ぼす可能性もある<sup>10) 11)</sup>。PV は、太陽放射を他の形態のエネルギーに変換する装置であり、その変換効率はさまざまな要因によって影響を受けている<sup>12) 13) 14)</sup>。変換プロセス中には、機械的な熱エネルギーが必然的に放出され、周囲の地表面温度 (LST) に変化を引き起こしている。これまでの研究では、PV 設置が周辺の気温に変化をもたらし、その影響は高度が上がるにつれて徐々に減少することが確認され<sup>15)</sup>、地域における大規模な観測において、局所的なヒートアイランド効果やクールアイランド効果を生み出す可能性があることが示されている<sup>16) 17)</sup>。しかし、中小規模の観測では、PV によって引き起こされる LST の変化は、地理的条件、季節の気候、設置規模によって異なると考えられる。現存する研究では、これらの要因に関する詳細な分析が不足している。

本節では、リモートセンシング技術と機械学習を基にした複合的解析モデルを設計し、異なる地理的特徴を持つ地域における PV が温熱環境に与える影響を定量化する。本節のワークフローは図 3-2 に示されており、2014 年から 2023 年までの 10 年間にわたって、地上設置型の PV の増加、分布、他の土地利用タイプへの侵食、周辺の熱環境への影響を分析することを目的としている。まず、航空写真と ArcGIS Pro で調査地域の PV を特定し、2 年ごとの統計結果をまとめて、PV の分布と増加傾向を把握する。次に、Google Earth Engine (GEE) 上で Landsat シリーズの衛星データを使用して、調査地域の地表温度を月単位で分析し、季節や年における PV 設置地点での地表温度の変化を統計的に評価した。最後に、地理加重回帰 (GWR) モデルと最小二乗法 (OLS) モデルを使用して、PV による地表温度の変化を分析し、これらの温度変化に影響を与える地理的・空間的要因を特定し、持続可能な PV 設置に向けた提案を行うことが可能になる。このモデルは、公開データを使用して地上設置型 PV (建物の屋根に設置された PV を除く) を特定し、複数タイプの PV の空間分布と周辺地表面温度の変化を研究する。

この解析モデルは、PV が流域における温熱環境にどのように影響するかについての科学的根拠を提供し、10 年間の時系列データに基づいて、PV と地表温度の相互作用の理解を深めることができる。将来 PV の建設において、環境への影響を最小限に抑えるための持続可能な理論的助言を提供することが可能であった。

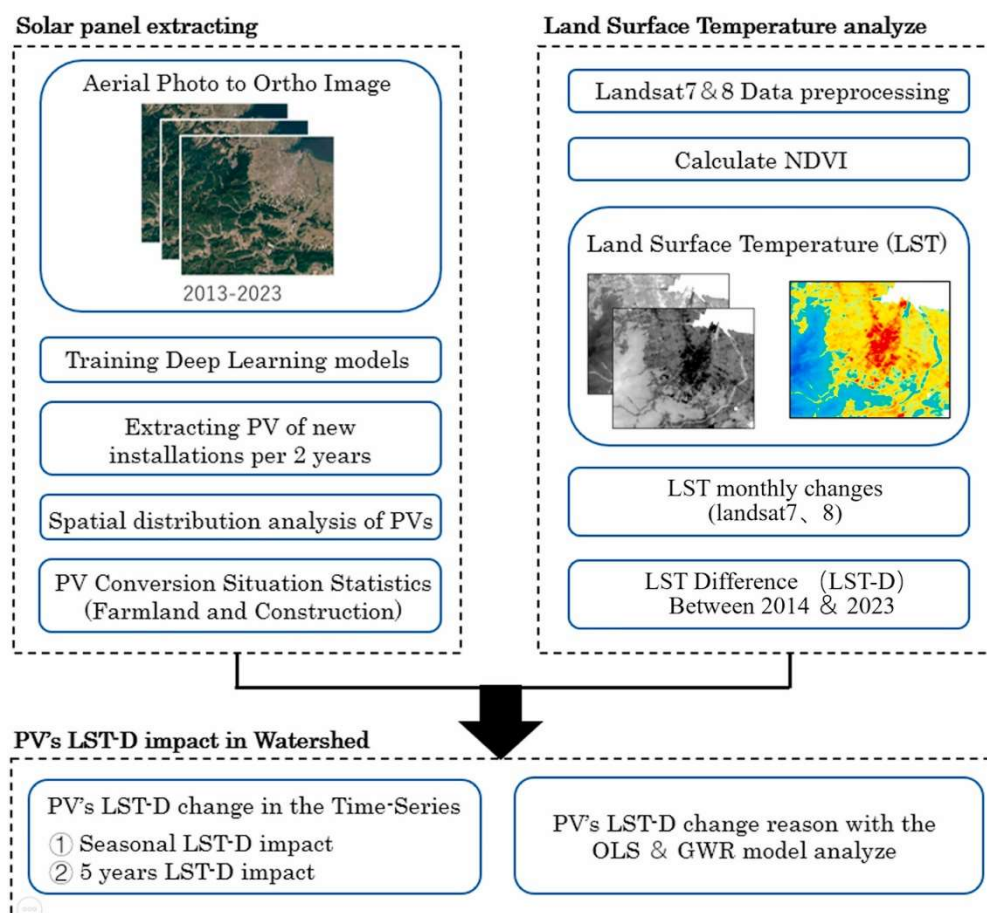


図 3-2 PV における地表面温度変化の評価モデル

### 3. 2. 2 櫛田川流域 PA の抽出と建設状況の分析

櫛田川流域内の地上設置型 PV の位置および面積情報を特定するために、まず国土地理院のデータベースと Google が提供するオープンマップサービス API (Google Earth API) を利用して、2013 年 2 月から 2023 年 8 月までの調査地域の航空写真および衛星画像を収集し、解像度が 0.5 m/ピクセルの GES 画像をダウンロードした。データ収集中、一部の PV 設置の工事期間が 12 か月を超える場合があることが確認されたため、2 年ごとに画像データの整理分析を行った。最終的に、2013 年、2015 年、2017 年、2019 年、2021 年、および 2023 年の画像データをまとめ、ArcGIS で航空写真のオルソ補正を行った。これらの画像データを ArcGIS Pro にインポートし、ランダムに選定された 210 か所の PV 設置

地点を手動でマーキングし、ArcGIS Pro 内の Pixel Classification ツールを使用し、Deep Lab V3 セマンティックセグメンテーションモデル (AI モデル) を用いて PV データの特定と抽出を行った。このモデルの入力と出力は図 3-3 に示す。

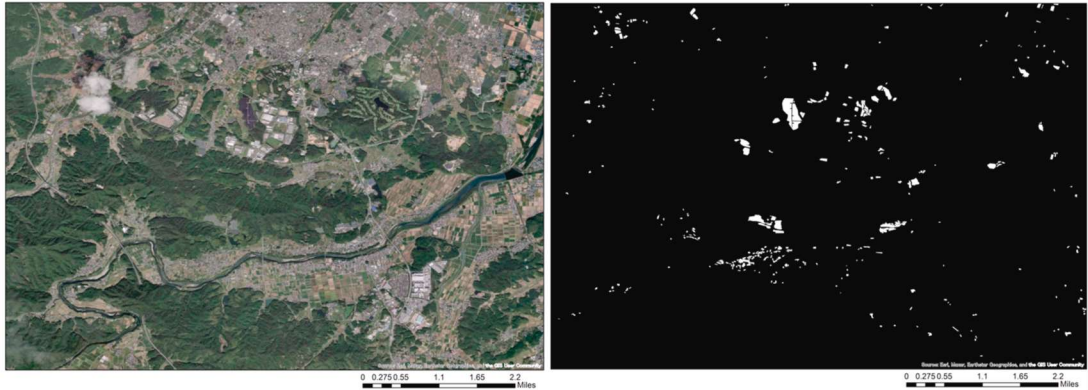
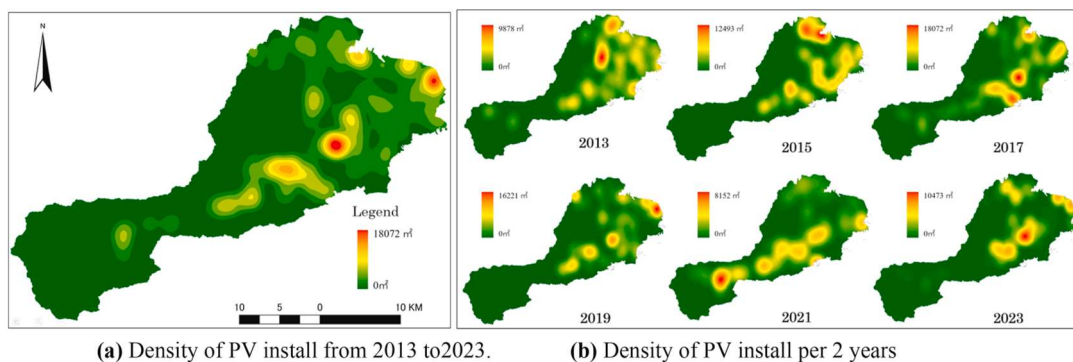


図 3-3 PV 位置情報特定モデルの input & output

モデルの精度を検証するために、平均交差連合 (mIoU) 値および混同行列を使用した。Deep Lab V3 で訓練された PV 抽出 AI モデルを調査地域全体の衛星画像に適用し、最終的に 2013 年から 2023 年の間における櫛田川流域の地上設置型 PV に関する画像分類結果を得られた。最後に、すべての分類結果を手動で修正し、これらがすべて地上設置型の PV 設置であったことを確認した。

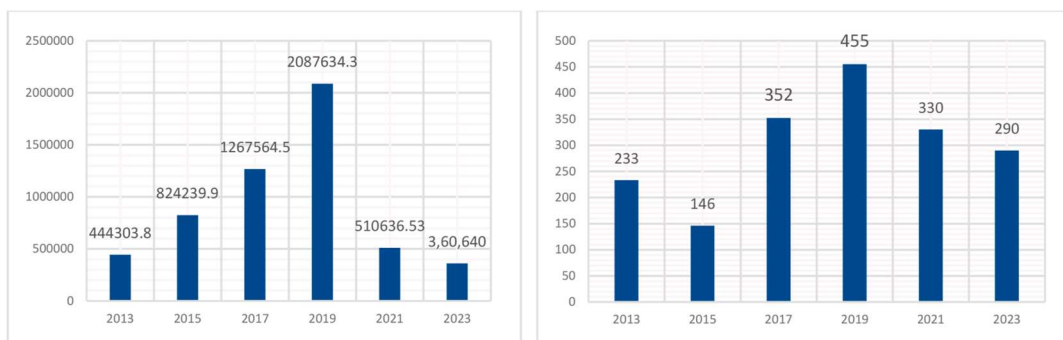
AI モデルの計算結果から、調査地域内のすべての地上設置型 PV の位置情報をポリゴンデータ形式で抽出した。次に、カーネル密度分析法を用いて、現状および 2 年ごとの増加分布を可視化した。図 3-4 (a)は、10 年間にわたる総 PV 設置量を示し、図 3-4 (b)は、過去に設置されたものを除いた、新たに 2 年ごとに設置された PV システムを示す。



(a) Density of PV install from 2013 to 2023.

(b) Density of PV install per 2 years

図 3-4 PV の設置密度分布状況



(a) Install PV area (m<sup>2</sup>) per 2 years.

(b) Install PV number per 2 years

図 3-5 PV の面積と数量の変化状況

PV 分布の分析結果によると、地上設置型の大部分は沿岸地域や下流部に集中しており、特に郊外の工業・農業地帯や海沿いの港湾地域で最も集中しているのが見られる。そこから南西部（上流域）に向かうにつれて、PV の数は徐々に減少している。毎年の新規設置 PV の分布を見ると、2013 年までは主に都市部南側の郊外平野に集中しており、調査地域全体に比較的均等に分布していた。2015 年には、沿岸の港湾地域での集中増加が見られ、他には郊外の平坦な農業地帯に分布していた。2017 年から 2023 年にかけて設置された PV はほとんどが榑田川流域に沿って分布しており、最新の設置は 2021 年に高地や中上流の農村地域で見られる。さらに、2013 年から 2023 年の間における調査地域内の 2 年ごとの PV 設置面積の追加数および増加傾向は図 3-5 に示されている。

しかし、図 3-5 (a)と図 3-5 (b)を比較すると、面積の増加が急激に減少しているにもかかわらず、設置数の減少率は安定していることが分かった。これは、2019 年以降の新規設置が比較的小規模な PV が中心であったことを示唆している。同様に、2015 年には新たな設置面積が大幅に増加したが、数量の棒グラフでは凹状のパターンが見られ、2015 年の増加が中規模から大規模の PV によるものであったと考えられる。さらに、土地利用変化の観点から分析するため、既存の農地や建物がどれだけ PV に再利用されたかについての統計も収集した。政府（農林水産省および国土地理院）からの公式データを基に、ArcGIS でオーバーレイ分析を行った。その結果、2013 年から 2023 年にかけて、PV に再利用された農地の面積は 851,416 m<sup>2</sup>に達し、建物は 59,064 m<sup>2</sup>を占めることが分かった。これらの土地利用変化密度は図 7 に示されており、農地からの転用が地域全体で発生しているものの、特に櫛田川中・下流域で集中していることが分かった。一方で、建物からの転用はより集中しており、主に北部の工業地域や上流の農村地域に位置している。

### 3. 2. 3 PV による地表面温度の変化解析

#### 3. 2. 3. 1 地表面温度の計算モデルと精度検証

PV による地表面温度の変化が環境に与える影響を分析するため、まず調査地域全体における地表温度の変化を計算する必要がある。Google Earth Engine (GEE) を使用して Landsat 7 および Landsat 8 からデータを収集し、それに基づいて月ごとの平均地表面温度 (LST) データを計算した。Landsat シリーズの衛星は高い空間解像度で LST の推定が可能であり、特に局所的または小規模な研究に適している。

計算モデルには、Sofia Ermida によって開発されたモデル<sup>18</sup>を基に、重み付き重回帰分析 (WMLR) を使用して Landsat 7 のセンサーデータの欠損を補正し、2014 年から 2023 年までの調査地域の月ごとの平均 LST データを算出した。また、雲の影響を最小限に抑えるために、リモートセンシングデータの収集時に GEE 上でフィルタを適用し、雲量が

20%を超える画像を除外した。

GEE における計算はまず、正規化植生指数 (NDVI) を計算し、調査地域の植生被覆率 (FVC) を推定し、これに基づいて、任意の時点で植生地域の放射率を導き出した。

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2 \quad \text{式 3-1}$$

1

ここで、 $NDVI_{bare}$  と  $NDVI_{veg}$  は、それぞれ裸地のピクセルと植生が覆われたピクセルの NDVI 値を示す。過去の研究結果<sup>19 20 21</sup>に基づき、 $NDVI_{bare} = 0.2$ 、 $NDVI_{veg} = 0.85$  というしきい値を設定した。一部の研究では  $NDVI_{veg} = 0.5$  を設定しているが、高解像度データに対しては 0.8~0.9 の値がより適していることを示す。NDVI 値が  $NDVI_{bare}$  より低いピクセルは完全に裸地と分類され、 $NDVI_{veg}$  を超えるものは完全に植生に覆われたものと見なされる。任意の時点で植生地の放射率 (エミッシビティ) は、Vegetation-Cover 法を用いて導出することができる。この方法は次の式で定義される：

$$\varepsilon_b = FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare} \quad \text{式 3-2}$$

ここで、 $\varepsilon_{b,veg}$  と  $\varepsilon_{b,bare}$  は、それぞれ特定のスペクトル帯域  $b$  における植生と裸地の放射率 (エミッシビティ) を示す。植生地の放射率は通常、熱赤外 (TIR) 領域での変動が小さいため、この値は 0.99 に固定されている。Landsat の TIR 帯域における裸地の放射率は、ASTER の裸地放射率から、Malakar ら (2018)<sup>22</sup> によって提供されたスペクトル調整を使用して導出される。最後に、LST (地表温度) は、CM-SAF が MFG および MSG シリーズの衛星データから LST データを導出するために使用している SMW

(Statistical Mono Window) アルゴリズムを用いて計算する。このアプローチは、単一の TIR チャンネルにおける TOA (大気圏上端) の輝度温度と LST との経験的な関係に基づいており、単純な線形回帰を使っている。このモデルは、放射伝達方程式の線形化によって構成され、地表の放射率に明示的に依存する形で表される。

$$LST = A_i \frac{T_b}{\epsilon} + B_i \frac{1}{\epsilon} + C_i \quad \text{式 3-}$$

3

ここで、**T<sub>b</sub>** は TIR チャンネルにおける大気圏上端 (TOA) の輝度温度を指し、**ε** は同じチャンネルにおける地表の放射率 (エミッシビティ) を表す。アルゴリズムの係数 **A<sub>i</sub>**、**B<sub>i</sub>**、**C<sub>i</sub>** は、放射伝達シミュレーションに基づく線形回帰により決定した。このシミュレーションは、10 クラスの大気水蒸気含量 (TCWV) ( $I = 1, \dots, 10$ ) に対して行われ、0 から 6 cm の範囲で 0.6 cm 刻みで分けられている。そして、TCWV が 6 cm を超える値は最後のクラスに割り当てられる。LST 方程式の係数は、Borbas et al. (2015)<sup>23</sup> によって編纂されたデータセットを使用して、Martins ら (2016)<sup>24</sup> の解析方法に従って決定された。このデータセットには、気温、水蒸気、スペクトル放射率などの変数が含まれ、15,000 以上のプロファイルをカバーしている。

最後は計算結果の検証である。LST 計算結果を得た後、それらを摂氏度に変換し、ArcGIS で分析を行った。計算結果の精度を確認するため、調査地域内の 2 つの気象観測点 (粥見および金剛川) を選定し、異なる期間の LST 計算結果と観測データを適合分析によって比較した。金剛川 (KGG) は下流部の都市郊外エリアに位置し (北緯 34° 33′ 46.0″、東経 136° 32′ 59.0″)、一方粥見 (KYM) は上流部の農村部に位置している (北緯 34° 26′ 59.0″、東経 136° 24′ 30.0″) (図 3-6)。

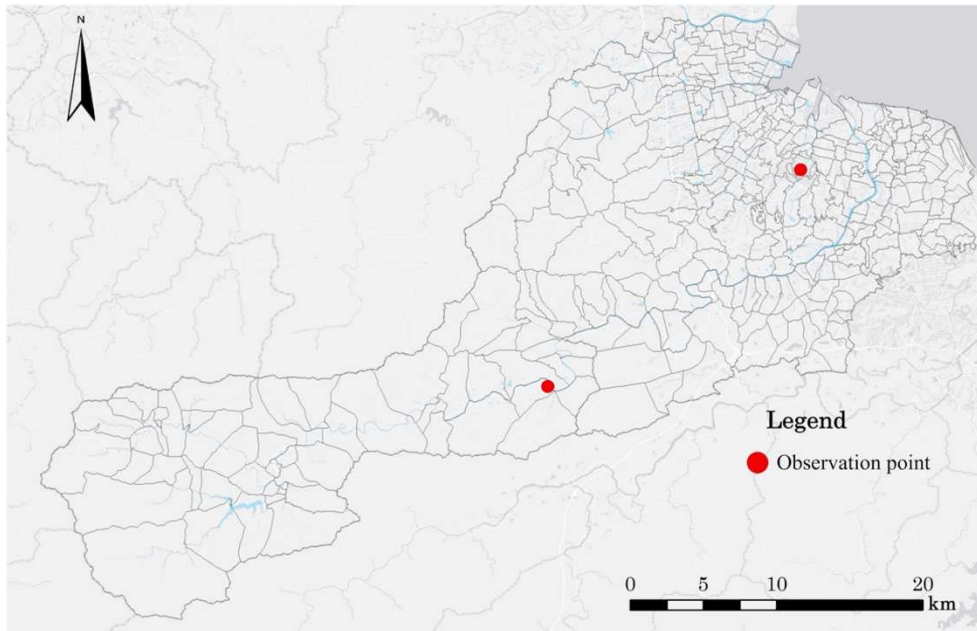


図 3-6 結果検証用データの観測所位置

### 3. 2. 2. 2 地表面温度 (LST) 及び地表面温度差 (LSTD) の変化

2014 年から 2023 年にかけての榑田川流域における年間平均 LST の変化は、図 3-7 および図 3-8 に示す。2014 年から 2017 年の間、都市部の LST の分布は比較的均一だが、2018 年以降、LST の高い地域が市内に集中していることが観察される。これは、市中心部での集中的な都市開発と関連していると考えられる。また、2014 年から 2023 年の間に調査地域の平均 LST は  $19.79^{\circ}\text{C}$  から  $20.76^{\circ}\text{C}$  に上昇し、平均で  $0.97^{\circ}\text{C}$  の増加が見られ、特に冬の平均気温が  $7.23^{\circ}\text{C}$  から  $9.56^{\circ}\text{C}$  に上昇した点が注目される。

計算結果の検証について、 $3\sigma$ -Hampel 法を使用して外れ値を除去した後、全体の検証結果では、KGG 観測地点における計算値と実測値の誤差範囲は  $-1.1^{\circ}\text{C}$  から  $1.6^{\circ}\text{C}$  以内、KYM では  $-1.4^{\circ}\text{C}$  から  $2.1^{\circ}\text{C}$  以内であったことが示された (図 3-9)。検証結果は、両地点で実際の気温とシミュレーションされた LST (地表面温度) の間に小さな偏差があることを示しており、特に山間部に位置する KYM 観測地点では極端な値が見られ、KGG

に比べて全体的な適合度がやや低くなっている。数値的には、KGG の RMSE（平方根平均二乗誤差）は 2、KYM では 3.2 でした。気温と地表温度の差を考慮すると、本研究で計算によって得られた LST データは信頼性が高く、高精度であったといえる。

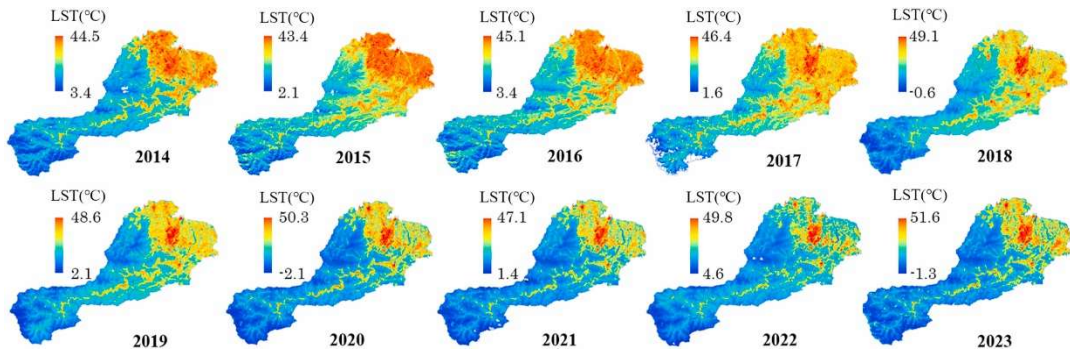


図 3-7 櫛田川流域の年間 LST

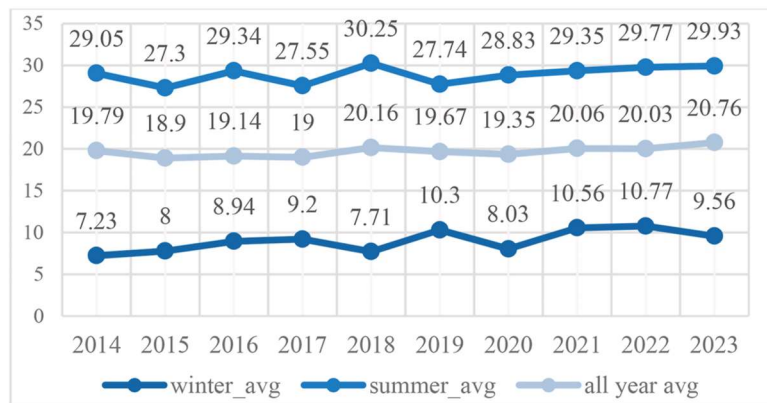


図 3-8 櫛田川流域年間 LST の平均値

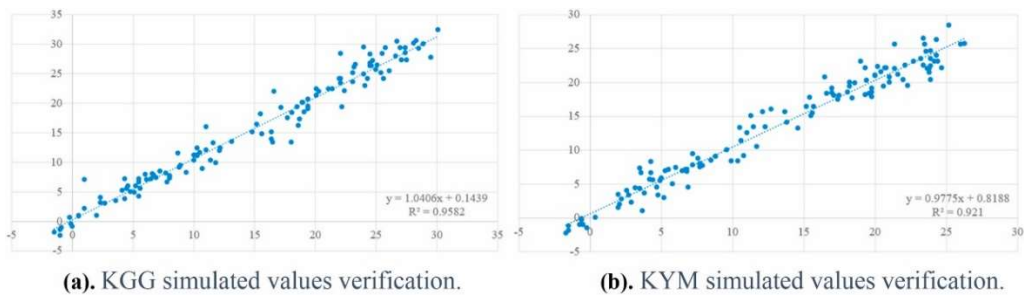


図 3-9 両観測所における観測値と計算値の検証

次に、2014年から2023年のLST（地表面温度）データを、ArcGISでラスタ計算を行い、2014年と2023年の地表面温度差（LSTD）のマップを作成した（図3-10）。櫛田川流域におけるこの2つの期間のLSTDは、 $10.09^{\circ}\text{C}$ から $-4.26^{\circ}\text{C}$ に達し、地域における10年間の平均年間LSTDは $1.65^{\circ}\text{C}$ であった。季節ごとの平均LSTDを見てみると、最も大きな増加が見られたのは春で、 $2.65^{\circ}\text{C}$ に達した。対照的に、最も少ない増加は秋で、 $0.5^{\circ}\text{C}$ だった。夏と冬のLSTDはそれぞれ $1.98^{\circ}\text{C}$ と $1.42^{\circ}\text{C}$ の増加が見られた。

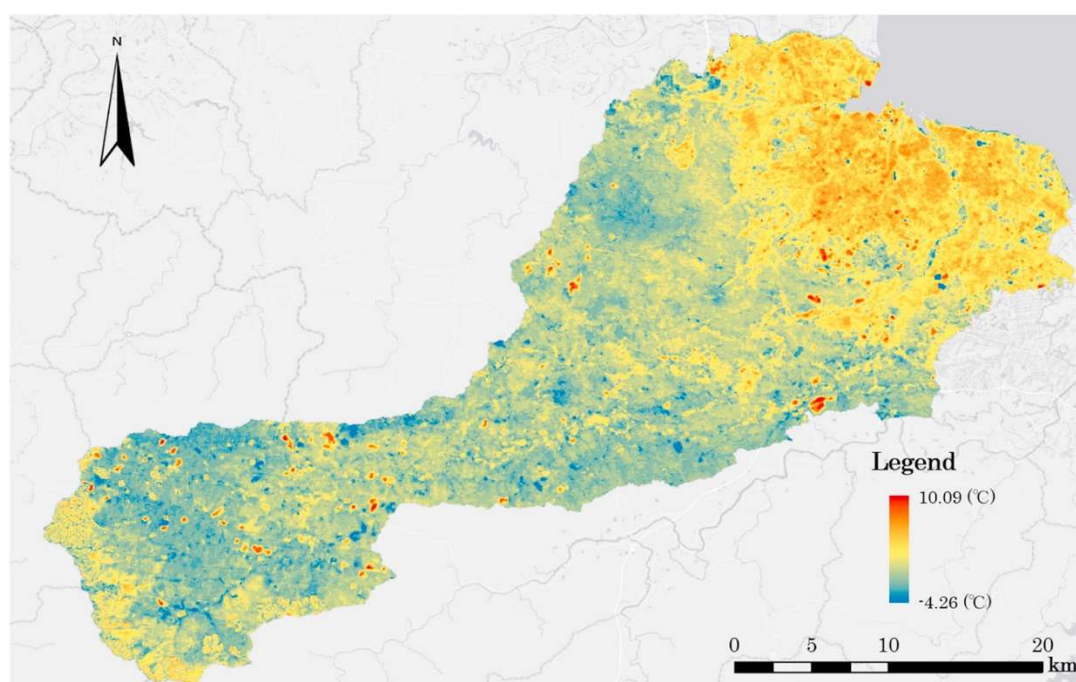


図3-10 2014-2023年における櫛田川流域のLSTD（地表面温度差）

その後、LSTD（地表面温度差）とPVの位置情報を用いて、PVがLSTに与える影響分析を行った。PVに対して計算された温度差は、各PVのポリゴン範囲内でのLSTDの平均値と設定した。その結果、PVが設置されている場所では、10年間での平均温度上昇は $2.85^{\circ}\text{C}$ で、最大で $9.44^{\circ}\text{C}$ 、最小で $0.07^{\circ}\text{C}$ だった。特に、温度の大幅な上昇が見ら

れた PV は、都市平野の北東部に集中している。更に、PV ポリゴン内の LSTD が、その周辺よりも高いことが判明し、この現象は小規模なヒートアイランド効果として解釈できると考えられる（図 3-11）。

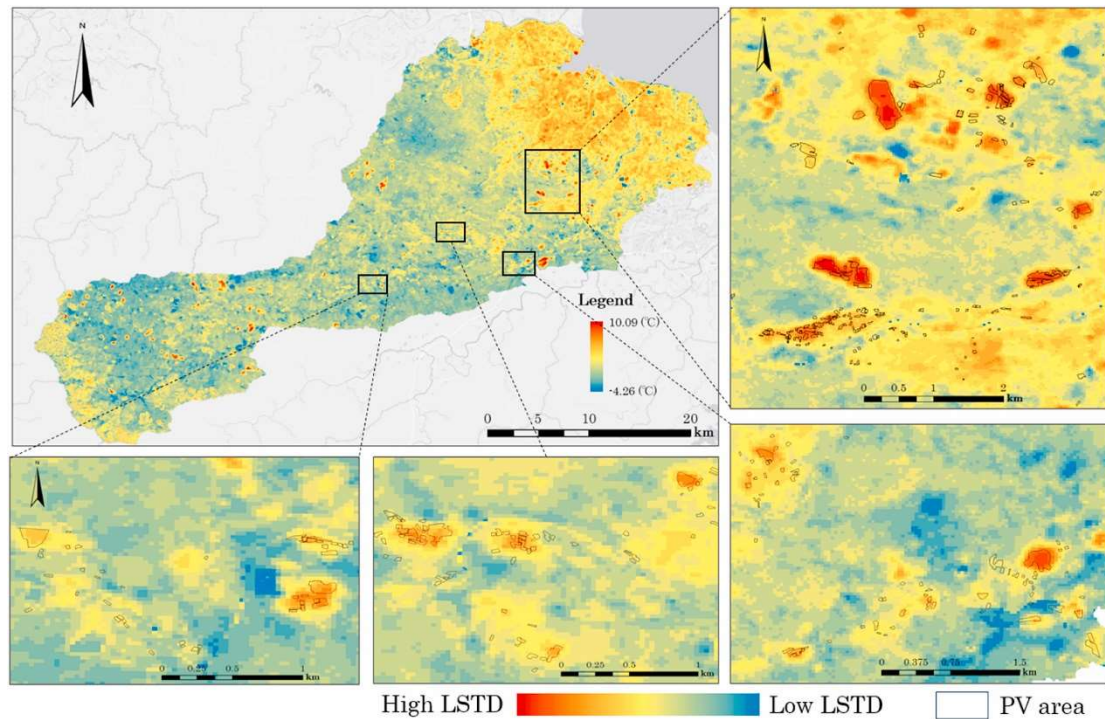


図 3-11 PV ポリゴン内の LSTD

次に、2014 年から 2018 年と 2019 年から 2023 年の 2 つの期間にわたって、異なる季節における PV の温度上昇効果を分析した（図 3-12）。比較対象となった 2 つのサンプルは、それぞれ 2014～2018 年の期間に建設された PV とその期間中の LSTD、19～23 年の期間に建設された PV とその期間中の LSTD であった。結果は、13～18 年の期間における年間平均の温度上昇が、19～23 年の期間よりもわずかに低いことを示した。この違いは、春に最も顕著で（ $-0.85^{\circ}\text{C}$ ）、秋ではほとんど無視できる程度の差（ $-0.04^{\circ}\text{C}$ ）であった。

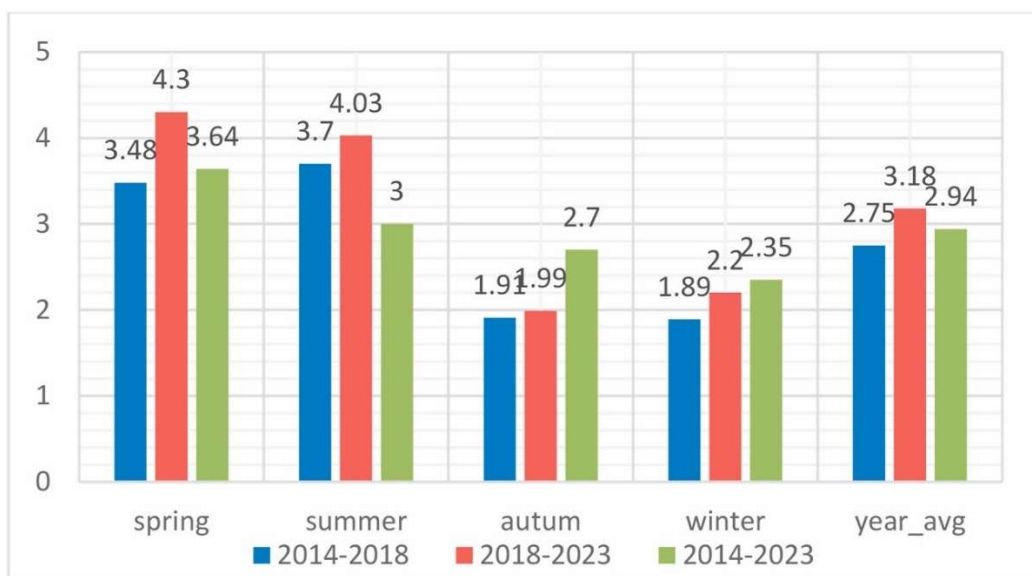


図 3-12 2 時期の各季節にわたる PV が起こした LSTD 分析

そして、2014 年から 2023 年の間に、この河川流域地区に設置されたすべての PV における LSTD 地表面温度差を分析した。PV の温度上昇効果は春に最も高く、 $3.6^{\circ}\text{C}$  に達し、冬は最も低く、 $2.3^{\circ}\text{C}$  の上昇となり、平均では  $2.85^{\circ}\text{C}$  の上昇を示した。2014 年から 2023 年の季節ごとの温度変化は、以前の 2 つの期間と比較して、比較的安定していると思われる。特に、春と夏に最も大きな温度上昇を示した PV 設置箇所は、沿岸の港湾地域に集中しており、一方で秋と冬に高い温度上昇を示す箇所は、より分散していた。

### 3. 3 PVによって形成されるLSTDに影響を与える要因

空間分布の観点から、PVによって形成されるLSTD（地表面温度差）の変動性に影響を与える可能性のある地理的・空間的要因を分析した。LSTに関する先行研究によると、研究地域の緑地面積や人間の活動がLSTに影響を与える可能性があるため、独立変数としてまず単位面積内の平均植生指数（NDVI）、建物密度（BLD）、および人口（POP）の3つの要因を考慮した。そして、地域が流域であるという特性を考慮し、地形の違いもLSTの変化に寄与する可能性があるため、「河川からの距離（WA）」と「標高（DEM）」も選定した。最後に、PVが熱源としての特性を持つことを考慮し、PVの面積（PV）も独立変数に含めた。これらの指標の500mのメッシュ単位で独立変数として使用し（図3-13）、PVのLSTD平均値を従属変数とした場合、OLS線形モデルとGWR（地理的に加重された回帰モデル）を比較した。最終的に、モデルの結果に基づき、PVのLSTD変動に影響を与える指標の分析を行った。

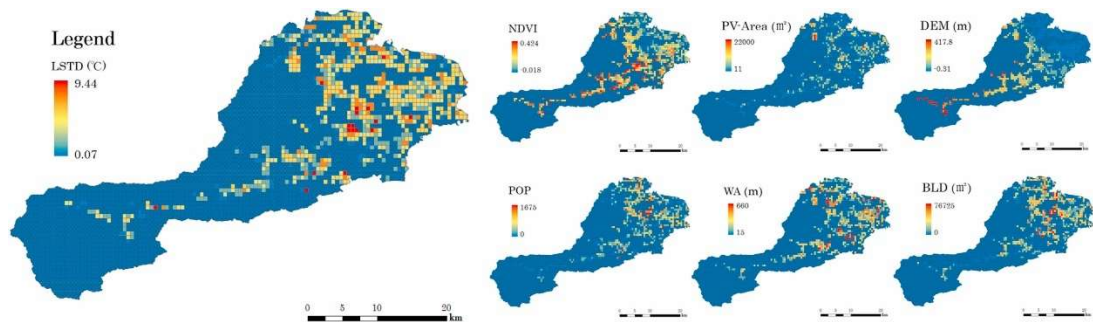


図3-13 LSTD及び各変数の空間分布状況（500mメッシュ）

	PV-Area (㎡)	DEM (m)	NDVI	POP	WA (m)	BLD (㎡)	LSTD (°C)
<b>MAX</b>	22,000	417.8	0.424	1675	660	76,725	9.44
<b>MIN</b>	11	-0.31	-0.018	0	15	0	0.07
<b>MEAN</b>	781.13	62.8	0.241	137.8	150.5	13879.7	3.06
<b>Std</b>	1859.6	77.7	0.08	203.4	114.8	14052.3	1.18

図3-14 各変数の統計情報（500mメッシュ）

本研究では、LSTD（地表面温度差）に対する PV の影響を調べるため、OLS モデルに加えて GWR モデルを使用して変数を適合させ、異なる独立変数とその影響に空間的変動を示すかどうかを検討した。OLS（最小二乗法）は、線形回帰モデルに基づく分析手法であった。独立変数と従属変数をすべて 1 つの回帰方程式に統合し、それらの線形関係を解ける。公式は以下の通り：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{式 3-4}$$

ここで、Y は従属変数を表し、本研究では PV の LSTD を指す。X1 から Xk は独立変数であり、本研究で考慮された各地理的指標を表す。 $\beta$  は各指標の係数を示し、特定の独立変数と従属変数との相関、 $\varepsilon$  はモデル内の誤差を考慮するための定数であった。本研究では、ArcGIS 内の OLS モデルで分析を行った。このモデルは、各適合された独立変数に対する係数  $\beta$  を出力でき、異なる独立変数が従属変数にどの程度影響を与えるかを理解することができる。

通常、地理空間の分析を行う場合、従属変数と独立変数の関係は、空間的に異なる係数の空間的不均一性を伴う。しかし、従来の OLS のような線形モデルでは、平均的な係数しか計算できない。地理的加重回帰（GWR）モデルは、各サンプルに対して個別の回帰方程式を分析し、異なる場所における各独立変数の空間的相関を捉えることができる。GWR の公式は次の通り：

$$y_i = \beta_0 (u_i, v_i) + \sum_k \beta_k (u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad \text{式 3-5}$$

ここで、 $(u_i, v_i)$  は地点  $i$  の地理座標であり、この位置に応じた係数の滑らかな地理的変異が想定されている。ただし、各地点固有のパラメーターを推定するには、自由度が足りないため、GWR では地点  $i$  の係数  $\{\beta_k(u_i, v_i)\}$  を推定するために、地点  $i$  のみならずその周辺の地点データを含めたサンプルのサブセットを利用して回帰分析を行う。より詳細には、地点  $i$  で最大値をとり、地点  $i$  から離れるほど値が小さくなるカーネル関数を利用した重み  $w_{ij}$  を利用した重み付き最小二乗法により、地点  $i$  のローカルな係数を求める。すなわち、次のような最小化問題の解となる係数を求める。その結果、GWR は地理的な位置情報からモデルの全体的な相関を計算し、モデルの空間的な相関をより正確に解明することができる。本研究では、ArcGIS 内で OLS と GWR モデルを利用してデータの分析を行った。両モデルの性能を比較するために AICc を使用し、その値が低いほど、観測データに近いモデルであったことを示す。

結果は、両モデルとも統計的に有意だが、OLS の AICc は 1991.24 であったのに対し、GWR では 1327.51 だった。また、OLS と GWR の全体的な  $R^2$  はそれぞれ 0.399 と 0.609 であり、本研究では GWR モデルの方が OLS モデルよりも精確性・適合性が高いと考えられる（表 3-1・2・3・4）。さらに、OLS の結果では、説明変数の DEM（標高）と NDVI（正規化植生指数）が PV の温度上昇効果に対して負の相関を示した。モデル化の過程で、POP（人口）変数に多重共線性があることが判明し（VIF=24.419）、これにより最終分析から POP 変数を除外した。

表 3-1 OLS モデルの結果

AIC	AICc	R2	AdjR2	F-Stat	F-Prob	Wald	Wald-Prob	K(BP)	JB-Prob	Sigma <sup>2</sup>
1991.24	1991.5	0.399	0.38927	20.4651	0	126.149	0	58.9603	0	2566.7
2	5	9	6	7		5		7		9

表 3-2 OLS モデルにおける各変数の詳細

Variable	Coef	StdError	t_Stat	Prob	Robust_ SE	Robust_ t	Robust_ Pr	StdCoef
Intercept	3.43017	0.26557	12.916	0	0.25035	13.7013	0	0
PV_AR	0.19304	2.359E-05	8.18262	1.6E-12	5.253E-05	3.67683	0.00026	0.30341
DEM	-0.5113	0.10351	-4.939	1.6E-06	0.00107	-	3.397E-06	-0.335
NDVI	-0.29178	1.04683	-2.189	0.0289	1.03040	-	0.02646	-0.155
DISTA_VG	-1.47E-05	7.4E-05	-0.199	0.8419	6.56E-05	-0.22512	0.82195	-0.07

表 3-3 GWR モデルの結果

Neighbors	Residual Squares	Effective Number	Sigma	AICc	R2	R2Adjusted
94	262.0206	89.99	0.6732	1327.51	0.609	0.509

表 3-4 両モデルの結果比較

	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	AICc
OLS	0.399	0.389	1991.576912
GWR	0.609	0.509994	1327.519343

GWR モデルは、各独立変数が空間的に郊外地域で PV の LSTD と最も高い相関を示した（図 3-15）。ただし、標高（DEM）と単位面積当たりの PV 面積（PA）は複数の地域で高い相関を示した。特に、DEM は郊外地域だけでなく、山岳地域の上流部分でも高い相関を示し、沿岸部や北部の森林地域では負の相関を示した。PA（PV 面積）は沿岸部の低地で高い相関であったが、北部の港湾工業地域では負の相関を示した。BLD（周囲の建築密度）は郊外地域で正の相関であったが、いくつかの山岳地域では負の相関を示し、標高が高くなるにつれてその傾向が強まりであった。NDVI（植生指数）と WD（水域までの距離）は郊外地域で高い相関を示したが、他の地域では低いまたは負の相関であった。た

だし、WD の高相関地域は NDVI よりも川に近い場所に位置していることが分かった。

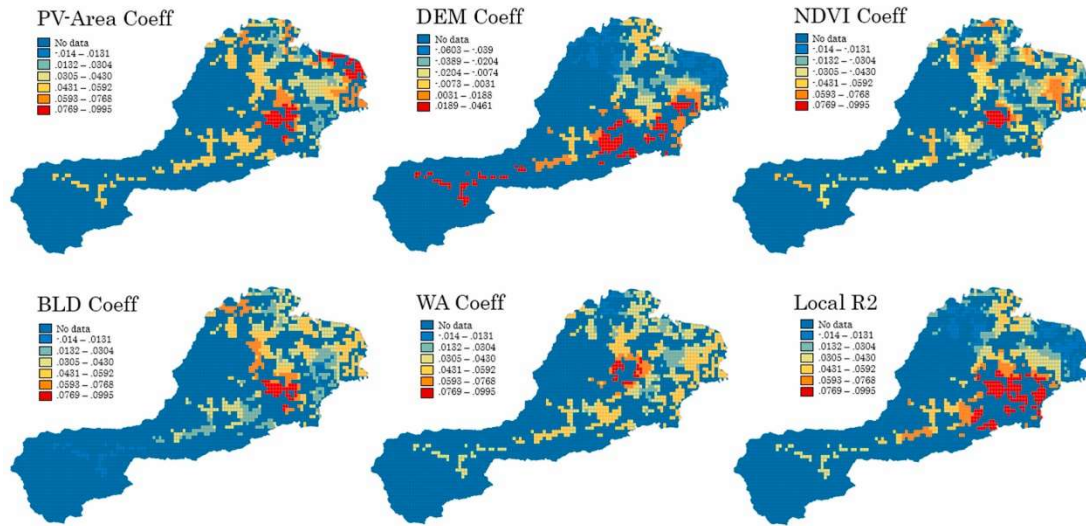


図 3-15 GWR モデルにおける各変数の結果及び相関係数

### 3. 4 本章の結論

#### 3. 4. 1 PV 建設状況の変化

本章は、研究地域内での PV 建設の急速な増加が 2019 年以前に集中しており、特に 2019 年に最も多くの新規設置数と面積が見られたことを明らかにした。これは、2019 年に日本の三重県自治体によって制定された景観条例の改正が原因と考えられる。この条例では、特定の面積を超える PV 建設に対して厳格な審査を求めており、その結果、2019 年以降に新しい PV 建設の数が大幅に減少することはなかったものの、新たに追加された面積は急激に減少した。これは、2019 年以降の新しい PV 建設が小規模なものを中心としたことを示し、政府による規制が新規 PV 設置の増加を抑制する効果を発揮したことを考えられる。PV の分布に関する統計データ（表 3-5）でも、2019 年以降の新規追加面積が減少傾向にあることが示されている。

空間分布の視点からでは、2013 年から 2019 年までの PV 建設は流域の中下流（郊外地域）に集中したが、2019 年以降は上流域（農村地域）に集中した。川からの距離に関しては、PV 設置は概して川から 420 m 以内に位置しており、特に 2021 年の新規追加は川の近くに集中していることが分かった。さらに、2017 年以降、農地を PV に転用するケースが顕著に増加しており（第 2 章）、そのため、PV の増加はエネルギー需要や二酸化炭素排出削減に関連しているだけでなく、社会の人口構造とも密接に関連していると考えられる。

表 3-5 年間新設 PV 地理的特徴

	~2013	2015	2017	2019	2021	2023	MEAN
DEM (m)	49.05	34.94	60.9	53.43	103.46	33.26	58.33
SLOPE	2.64	2.68	3.32	3.42	4.79	2.87	3.39
MEAN Area (m <sup>2</sup> )	1705.4	5645.47	3667.5	4822.54	1491.11	1947.71	3225.82
WA (m)	437.81	516.47	491.63	407.59	284.56	304.74	413.19

表 3-6 年間新設 PV の統計情報

	2015	2017	2019	2021	2023	TOTAL
Add Number	96	359	227	289	274	1245
Add Area (m <sup>2</sup> )	122032	317184	106682	157287	148231	851416

### 3. 4. 2 PVによるLST変化及び周囲環境との関係性

シミュレーションとモデル計算の結果から、河川流域におけるPV建設がLSTに大きな影響を与えていることが観察された。しかし、中山間部である上流域ではその影響は比較的小さくなっている。土地利用の観点から、多くの研究（Caiら、2016年; Sahaら、2021年; Wengら、2004年）が、緑地で覆われた地域に比べて、都市域のLSTが高いことを示しており、本研究の結果もこれらの知見と一致している。都市域における10年間のLSTDは $2.56^{\circ}\text{C}$ であり、郊外部の $1.32^{\circ}\text{C}$ よりも高く、平均で $1.24^{\circ}\text{C}$ の差がある。しかし、PVに焦点を当てると、500mの空間スケールにおける都市域のPVの平均LSTDは $2.95^{\circ}\text{C}$ で、高い植生被覆（500m範囲内のNDVIが0.3以上）を持つ地域の $2.54^{\circ}\text{C}$ と比較して、わずかに $0.41^{\circ}\text{C}$ 高いだけであった。これは、建設済み地域のPV設置が高層建築物に囲まれており、1日を通して受ける太陽放射量が少なく、その結果、機械的な熱エネルギー生成が少ないためと考えられる。郊外のPVは遮るものがなく、より多くの太陽放射を受け、そのため多くの熱を生成している。それでも、異なる環境温度により、都市域のPVは依然として比較的高いLSTDを示す。これは、PVの温度上昇効果が通常のLSTとは異なることを示しており、緑地のような土地被覆が決定的な要因ではないことを示唆している。

また、季節ごとでの分析結果では、流域圏におけるPVの温暖化効果は春に最も高く、冬に最も低いことがわかった。この結果は、Barron-Gaffordら（2016年）が砂漠地域で得た結果と一致しており、PVの温暖化効果は季節レベルでも一貫していることを示した。

これにより、PVの設置が流域の温熱環境に影響を与えることは否定できず、その影響の大きさはPVの周囲環境によって異なることを結論付けられる。全体的に見ると、PVの標高と面積が他の要因よりLSTDに最も大きな影響を与られている。流域内では、PV設置の標高が高いほど、LSTDへの影響は小さくなっていく。また、PV周辺の建築密度や植生状況もLSTDに顕著な影響を与えるが、主要な要因ではないと考えられる。都市

部や近郊部では、PV 設置の周囲にある植生より、建物密度が LSTD に影響を与えるが、一方里地里山では、周囲の植生がより重要な影響を持っている。

また、地球温暖化の視点から本研究の計算結果に対する影響についても分析した。日本では、100 年につき 1.3°C 上昇しており、21 世紀末の三重県は、気温がさらに上昇すると予想されている<sup>25</sup>。橿田川流域における観測所の年平均気温は、粥見地方で 30 年あたり 1.04°C、津地方で 30 年あたり 0.5°C 上昇した<sup>26</sup>。そこで温暖化の上昇が線性的だと考えると、その平均値を取る場合、橿田川流域の 10 年間平均上昇気温（温度差）は 0.2°C であった。しかし、本研究で観測された温度差の平均値は 2.5~2.9°C であったため、その影響は微小であったことが考えられる。

太陽光発電の建設が地域環境に与える間接的な影響も無視できない。温熱環境に関しては、地表温度の上昇は生態系に不安定な変化を引き起こし、土壌水分や微量元素に変化をもたらすことを意味している。環境に敏感な農作物は、この地域での栽培が難しくなると考えられ、地域環境の安定に大きく依存して発展している農業地域であるこの橿田流域では、このような温度変動は大きなリスクを伴うと考えられる。

## 参考文献

1. IRENA, 2021. Renewable Energy Statistics 2021. URL <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021> (accessed 1.25.24).
2. IEA, 2022a. Global Energy Review 2021. IEA. URL <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/renewables> (accessed 1.25.24).
3. IEA, 2022b. World Energy Outlook 2022 – Analysis . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (accessed 1.25.24).
4. Jiayu, C., Jiefu, X., Kang, G., Yiwu, W., 2024. Balancing urban expansion with ecological integrity: An ESP framework for rapidly urbanizing small and medium-sized cities, with insights from Suizhou, China. *Ecological Informatics* 102508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102508>
5. Wu, X., Zhang, Y., 2023. Coupling analysis of ecological environment evaluation and urbanization using projection pursuit model in Xi'an, China. *Ecological Indicators* 156, 111078. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111078>
6. Zhang, X., Fan, H., Sun, L., Liu, W., Wang, C., Wu, Z., Lv, T., 2024. Identifying regional eco-environment quality and its influencing factors: A case study of an ecological civilization pilot zone in China. *Journal of Cleaner Production* 435, 140308. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140308>
7. Adeh, E.H., Selker, J.S., Higgins, C.W., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE* 13, e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
8. Walston, L.J., Rollins, K.E., LaGory, K.E., Smith, K.P., Meyers, S.A., 2016. A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy* 92, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>
9. Zheng, J., Luo, Y., Chang, R., Gao, X., 2023. STUDY ON IMPACT OF LARGE-SCALED PHOTOVOLTAIC DEVELOPMENT ON LOCAL CLIMATE AND ECOSYSTEM. *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica* 44, 253–265. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0530>
10. Armstrong, A., Ostle, N.J., Whitaker, J., 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ. Res. Lett.* 11, 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>

11. Millstein, D., Menon, S., 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *Environ. Res. Lett.* 6, 034001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034001>
12. Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M.S., Said, Z., 2023. Recent technical approaches for improving energy efficiency and sustainability of PV and PV-T systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56, 103026. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103026>
13. Gürtürk, M., Benli, H., Ertürk, N.K., 2018. Effects of different parameters on energy – Exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92, 426–439. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.117>
14. Tian, Y., Zhao, C.Y., 2013. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy* 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
15. Yang, L., Gao, X., Lü, F., Hui, X., Ma, L., Hou, X., Li, H., 2015. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of golmud 36, 2160–2166.
16. Barron-Gafford, G.A., Minor, R.L., Allen, N.A., Cronin, A.D., Brooks, A.E., Pavao-Zuckerman, M.A., 2016. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Sci Rep* 6, 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
17. Chang, R., Shen, Y., Luo, Y., Wang, B., Yang, Z., Guo, P., 2018. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable Energy* 118, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.007>
18. Ermida, S.L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., Trigo, I.F., 2020. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing* 12, 1471. <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
19. Kirschner, V., Moravec, D., Macků, K., Kozhoridze, G., Komárek, J., 2024. Comparing the Effects of Green and Blue Bodies and Urban Morphology on Land Surface Temperatures Close to Rivers and Large Lakes. *Land* 13, 162. <https://doi.org/10.3390/land13020162>
20. Prihodko, L., Goward, S.N., 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment* 60, 335–346. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00216-7)
21. Tang, R., Li, Z.-L., Tang, B., 2010. An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment* 114, 540–551. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.012>

22. Malakar, N.K., Hulley, G.C., Hook, S.J., Laraby, K., Cook, M., Schott, J.R., 2018. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 56, 5717–5735. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2824828>
23. Borbas, E.E., Menzel, W.P., Moller, C., 2015. Collection 6.1 Change Document TERRA MOD07 Atmospheric Profile Products.
24. Martins, J.P.A., Trigo, I.F., Bento, V.A., Da Camara, C., 2016. A Physically Constrained Calibration Database for Land Surface Temperature Using Infrared Retrieval Algorithms. *Remote Sensing* 8, 808. <https://doi.org/10.3390/rs8100808>
25. 気象庁 (2018) , 「三重県の気候変化」 , 気候変化レポート-関東・北陸・東海地方-, [https://www.data.jma.go.jp/tokyo/shosai/chiiki/kikouhenka/leaflet/mie\\_O.pdf](https://www.data.jma.go.jp/tokyo/shosai/chiiki/kikouhenka/leaflet/mie_O.pdf)  
(Accessed by 2024.12)
26. 三重県 (2023) , 「三重県気候変動影響レポート 2023」 , <https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/001138342.pdf> (Accessed by 2024.12)

## 第四章

### 将来土地利用変化後における 生態系サービスのトレードオフ・シナジー

#### 4. 1 研究背景

##### 4. 1. 1 生態系サービス (ES) に関する近年の議論

近年、急速な経済発展と都市化の加速に伴い、都市の規模は拡大を続け、さまざまな生態系サービス (Ecosystem Services) を提供できる水源・緑地などの生態地が大量に占有・破壊された。その結果、生態系の脆弱性が増し、生態機能の均衡が崩れ、生態的安全性に大きな課題が生じている<sup>1) 2)</sup>。国連は「2030 Agenda for Sustainable Development」において、17 の持続可能な開発目標 (SDGs) を提案しており<sup>3) 4)</sup>、その多くは生態系の構築に密接に関連している。生態系の構築は、持続可能な発展を「グリーン開発」の観点にまで高めることを目的としており、すなわち、生態系を保護・回復し、自然資源を合理的に利用し、環境への影響を低減することによって、持続可能な発展の目標をよりよく達成し、生態系の持続可能な発展を促進することができるのである<sup>5) 6)</sup>。

生態系サービスに関する議論は、世界中で重要なテーマとなっており、特に土地利用や気候変動、生物多様性の減少といったグローバルな問題に深く関わっている。日本では、生態系サービス (ES) を人間が自然環境から得る恩恵の総称として、食料や水の供給、気候の調整、生物多様性の保全、さらには精神的な安らぎやレクリエーションといった文化的サービスも含まれる<sup>7) 8) 9)</sup>。具体的には、以下の三つのカテゴリーに分類される：①「供給サービス」は、食料や水、木材などの直接的な資源供給に関連する。②「調整サービス」は、気候調整、炭素隔離、水質浄化、土壌保持など、環境を安定化させるサービスであった。③「文化的サービス」は、観光や文化遺産へのアクセス、レクリエーションなど、人間の精神的満足を提供する役割を果たすものであった。ES の健全な機能は、人類の持続可能な発展に不可欠である一方で、これらのサービスは人間活動によって脅かされている。

現代における都市拡張や森林伐採などの急速な土地利用の変化は、生態系の機能とそれに依存するサービスに深刻な影響を及ぼしている。これらの変化は、しばしば人間社会に対する利益と損失を引き起こし、その結果として、異なる生態系サービス間でのトレード

オフ（相互に利益を犠牲にし合う関係）やシナジー（共に利益をもたらす関係）が生まれる。

近年日本では、ES の経済価値を評価する試みが盛んになっている。代表的な手法として、ES を維持・保全を評価する生態系サービスへの支払い（PES）という管理システムを 1990 年代から導入している。ES の保全に有効な手法として、既に世界中で約 300 以上の導入例が報告されている。しかし、人口減少期に突入する今後の社会に対して、管理者不足による土地利用変化に対する ES へのシミュレーションと評価手法は、未だに見られていない。

これまでの研究では、土地利用の変化によって引き起こされる ES 間のトレードオフに注目が集まっていた。特に、第二次産業の増加と炭素隔離、生物多様性保全、水資源管理との対立が議論され、長時間の土地利用変化を分析し、一つの土地利用可能性に対する ES 評価の研究が多かった。一方で、複数の土地利用シナリオの可能性については、まだ十分に解明されていない。たとえば、適切な土地管理によって農業生産と生物多様性の両方を維持できるかどうか、再生可能エネルギーの導入が他の ES に与える好影響など、シナジーを活用した持続可能な土地利用の方向性についての議論は増加している。科学技術の進歩も生態系サービスの未来に大きな影響を与えると考えられる。リモートセンシングやモデリング技術を活用した生態系シミュレーション、より効果的な生態系保護が実現されると考えられる。

#### 4. 1. 2 研究の目的と流れ

本研究における櫛田川流域では、人口減少、気候変動といったグローバルな問題があり、これらは土地利用パターンを大きく変え、ES の提供能力に直接影響を及ぼしている。特に、農業の生産性向上や都市開発は、短期的な経済的利益をもたらす一方で、長期的な生態系の持続可能性を損なうリスクが高い。このような背景の中で、持続可能な社会（SDGs）

の達成に向けて、土地利用の最適化と ES の維持が重要な課題となっている。そこで、本研究では、土地利用の変化が ES に与える影響を明確にし、将来人口減少期における複数の土地利用シナリオを予測し、異なるサービス間のトレードオフとシナジーに焦点を当てて分析を行う。前章で解明された農地転用の特徴と太陽光発電の温熱障害を考慮しつつ、将来人口減少期における土地利用計画をシミュレーションすることで、各 ES 間のシナジー効果を達成することを目的とする。

研究の流れは図 4-1 の通りであった。

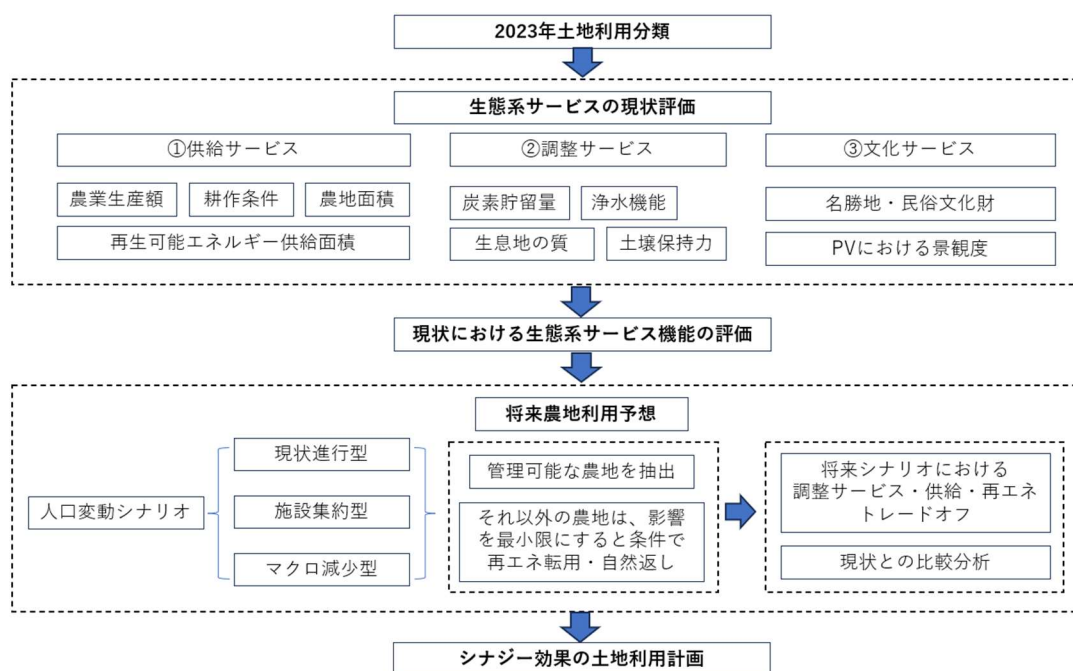


図 4-1 本章の研究フロー

まず、リモートセンシング技術を用いて、オープンデータより高精度な土地利用分類を行う。土地利用現状より、InVEST モデルと ArcGIS を用いて現在における櫛田川流域の生態系サービス評価を行う。そして将来人口減少に対して最も変化を発生する農地の生態系サービス機能を評価し、現状のトレードオフ&シナジー関係を解明する。更に、将来の人口密度を 3 パターンで予測し、農地についてそれぞれ具体的な土地利用変化のシナリオ

を設定し、それに基づいて各種 ES の変化を定量的に評価する。供給サービス（農業生産、農地面積、生産性）、調整サービス（炭素貯留、水質浄化、土壌保持、生息地の質）、文化的サービス（観光スポットや文化遺産へのアクセスビリティ）に対して、緑地の土地利用変化がどのような影響を与えるかを分析する。最後は、異なるサービス間のトレードオフとシナジーを特定し、どのような土地利用計画が複数の ES をバランスよく維持できるかを明らかにする。各サービス間のトレードオフを緩和する手法、または再生可能エネルギーの導入が供給サービスや文化的サービスに与える好影響を検討する。

本研究では、人口変動を考慮した土地利用管理のシナリオも検討することより、管理可能な農地面積が減少する場合、余った土地を再生可能エネルギーに転換するか、自然回復に委ねるかの選択が生まれる。これらのシナリオを通じて、生態系サービスの持続可能性と社会的価値の調和を探り、政策的示唆を提供することを目指す。生態系サービスのトレードオフとシナジーを理解し、持続可能な土地利用のための戦略を提案することにより、地域社会と自然環境の共生を促進することを目指している。特に、グローバルな視点からだけでなく、地域固有の状況に適した土地利用計画を策定し、人口減少期の将来における長期的な生態系の健康と人間の福祉の両立を図るための基盤を築くことを目標とする。

## 4. 2 リモートセンシングによる流域圏の土地利用分類

### 4. 2. 1 土地利用分類モデル

本章の研究地域は依然として三重県の橿田川流域であった。Sentinel-2 のリモートセンシングデータをベースとして、Google Earth Engine (GEE) で Random Forest (RF) モデル<sup>7</sup>を用いて土地利用の分類を行った。

RF モデルは、他のモデルと比較して優れた性能を持つため、バイオマス予測<sup>8</sup>、エコトープマッピング<sup>9</sup>、樹冠被覆予測<sup>10</sup>、土壌有機炭素のマッピングと予測<sup>11</sup>、土地利用・土地被覆 (LULC) 分類<sup>12</sup>など、さまざまな生態系モデリングタスクで注目を集めている。RF 分類では、2つのパラメーター、*ntree* と *mtry* が最も重要であった。*Mtry* は各ノードで選択される予測変数の数を指し、デフォルト値 (予測変数全体の平方根) がより良い結果をもたらす。*ntree* では、これは独立した木の総数を制御し、多くの木を持つことは、変数の重要性や変数の相互作用の安定化に有利であった。そのため、LULC 分類には *mtry* のデフォルト値と 1000 の *ntree* を使用した。学習モデルであるため、目視確認で9種類の土地利用を 120 個のサンプルポイントを特定し、すべてのサンプリングポイントはランダムに2つのセットに分割され、70%がトレーニング用に、残りの30%が検証用に割り当てられた。LULC の精度を評価するために、全体精度、カッパ係数を使用して混同行列 (CM) を作成した。

本章で使用したリモートセンシングのデータベースは Sentinel-2 であり、最小 10m 解像度の各バンドデータを提供し、それを組み合わせることで異なる自然指標を計算できる。Sentinel-2 は A・B・C の 3 シリーズが運用中であり (D シリーズは 2028 年打ち上げ予定)、Sentinel-2A は 2015 年に打ち上げ、European Space Agency が管理と運用を担当している。搭載したセンサーは Multi Spectral Instrument (MSI) と呼ばれ、10 日という高回帰期間を持ち (同一場所を 10 日に 1 回で観測)、観測幅は 290km に達する。各バンドの詳細は表 4-1 に示す<sup>13</sup>。

表 4-1 Sentinel-2A 各バンドの詳細

バンド	波長	中心波長	解像度	観測項目
B1	indigo	443nm	60m	エアロゾル
B2	Blue	490 nm	10m	エアロゾル / 陸域情報
B3	Green	560 nm	10m	
B4	Red	665 nm	10m	陸域情報
B5	VNIR	705 nm	20m	
B6	VNIR	740 nm	20m	
B7	VNIR	783 nm	20m	
B8	NIR	842 nm	20m	水蒸気補正 / 陸域情報
B8a	NIR	865 nm	10m	
B9	NIR	945 nm	20m	水蒸気補正
B10	SWIR	1375 nm	60m	巻雲の検知
B11	SWIR	1610 nm	20m	陸域情報
B12	SWIR	2190 nm	20m	エアロゾル / 陸域情報

本章におけるモデルの計算指標はそれぞれ、NDVI、NDBI、EVI、BSI、MNDWI、NDSI、MSAVI、SVVI の 8 種類であり、表 4-1 で記載されたバンドを用いて GEE にて合成した。これらの自然指標を独立変数として RF モデルにインプットし、機械学習で櫛田川流域全体の LULC を分類した。また、雲の影響を最小限にするため、今回使用したリモートセンシングデータはすべて曇り遮蔽 20%以下のものとする。計算に使用したコードは Java script がベースであり、本章の最後にあげる。

#### 4. 2. 2 土地利用分類の結果

2023 年における櫛田川流域の LULC 分類結果は図 4-2 に示す。本章では、生態系サービスの評価を行うため、機械学習における LULC の分類はそれぞれ①水域、②建築、③水田、④畑、⑤草地、⑥森林、⑦荒地、⑧太陽光パネル、⑨湿地とする。そして、第 2 章で分類した農地種類、第 3 章に Deep Learning で AI 学習によって検出された太陽光発電システム (PA) も含めて、流域の土地を全部 9 種類の LULC に分類した。各種類の LULC 分布状況及び面積は表 4-2 に示す。

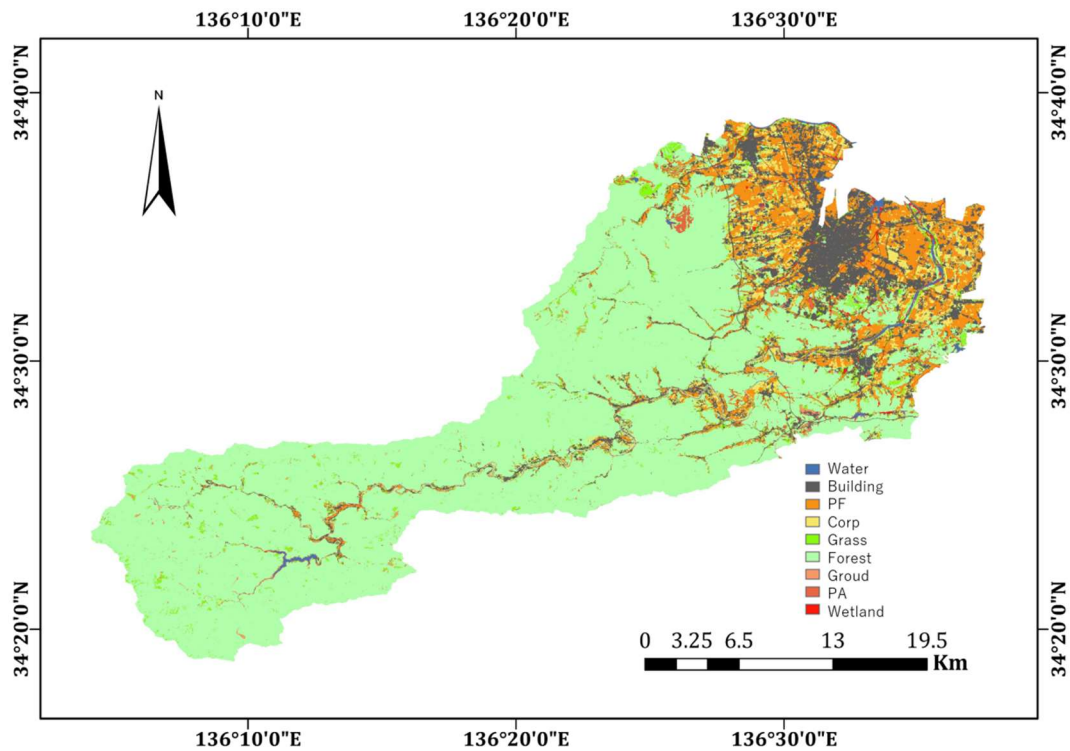


図 4-2 櫛田川流域における 2023 年 LULC

表 4-2 各 LULC の面積

Code	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LULC	水域	建築	水田	畑	草地	森林	空地	PA	湿地
Area (km <sup>2</sup> )	6.58	103.4	96.46	25.66	33.69	723.6	12.24	6.07	16.98

また、本研究における LULC 分類モデルの精度について、混同行列 (CM) を使用して検証を行った。CM は機械学習において、構築したモデルの性能を評価する手段のひとつであった。本章では、Python を用いて、Scikit-learn モジュールに CM を算出し、この分類モデルの最終精度 (overall accuracy) は 89.37% であり、モデルと考えられる。

#### 4. 3 現状における ES 分析

##### 4. 3. 1 各種 ES の計算手法

本研究における ES の評価は、ArcGIS 及び InVEST モデルで、土地利用分類の結果をもとに計算を行った。生態系サービスの指標について、①供給サービスは農地の経済価値、農地面積、農地の生産便利性的（標高・傾斜）、再生可能エネルギーの提供性の四種類、②調整サービスは炭素貯留、水源水質、土壌保持、生息地の質の四種類、③文化的サービスは観光スポットや文化遺産へのアクセスビリティ、景観評価の二種類、全文合計 10 種類から評価する（表 4-3）。

表 4-3 本章における計算する 8 種類 ES

サービス種類	サービス名	計算単位	計算ツール
供給サービス	農地面積	筆ポリゴン	ArcGIS
	農地の経済価値	筆ポリゴン	ArcGIS
	生産便利性的	筆ポリゴン	ArcGIS
	再生可能エネルギー提供	筆ポリゴン	ArcGIS
調整サービス	炭素貯留	メッシュ（10m）	InVEST
	水源水質	メッシュ（10m）	InVEST
	土壌保持	メッシュ（10m）	InVEST
	生息地の質	流域メッシュ（10m）	InVEST
文化的サービス	アクセスビリティ	筆ポリゴン	ArcGIS
	PA における景観評価	筆ポリゴン	ArcGIS

供給サービスについては、以下の手順で算出する：

- ① 農地面積は、農林水産省が行う農林業センサス調査より公開した筆ポリゴンデータ（2022）から、ArcGIS で面積計算を行い、小地域単位で統計を行った。
- ② 農地の経済価値は、第 2 章で分類した「水田」「麦畑」「豆類畑」「茶畑」の 4 種類農地の面積データをもとに、農林水産省の農林業センサスでの櫛田川流域各自治体の農業年間産出額から割り算して、各農地の年間産出額（円/m<sup>2</sup>）を計算できる（表 4-4）。そして筆ポリゴンデータにインプットし、ArcGIS で一筆一筆の農地年間産出額を統計した（表 4-4）。
- ③ 生産便利性は、農地の耕作条件と強く関係する標高・傾斜の 2 つ地理的特徴から、数値を標準化して小地域単位で統計を行った。
- ④ 再生可能エネルギー提供は、太陽光発電システム（PA）の発電量を意味する指標であり、本研究においては、個々の PA 面積をその発電量（ポテンシャル）として換算する。

表 4-4 各種類農地の経済価値

農地種類	総面積 (ha)	総産出額 (万円)	単位価値 (円/m <sup>2</sup> )
水田	9646	876,821	90.9
麦畑	1019	317,92	31.2
茶畑	393	164,116	417.6
豆類畑 (野菜)	1177	233,516	198.4

調整サービスについては、以下の手順で算出する：

- ① 炭素貯留機能は、計算した LULC 種類をもとに、InVEST モデルで計算を行った。

炭素貯留は各種類の LULC の炭素貯留量は以下の式で計算する：

$$C_i = C_{ia} + C_{ib} + C_{is} + C_{id}$$

式 4-1

ここで、 $C_i$  は  $i$  タイプの LULC における炭素貯留量、 $C_{ia}$  は  $i$  の地上炭素貯留量、 $C_{ib}$  は  $i$  の地下炭素貯留量、 $C_{is}$  は  $i$  の土壌炭素貯留量、 $C_{id}$  は  $i$  の枯死有機物炭素貯留量とする。そして結果を ArcGIS で地理空間分析を行い、小地域単位で統計計算を行う。

また、インプットデータである各土地利用に関する炭素貯留機能の閾値設定は、IPCC の 2003 年、2006 年、2014 年ガイドライン及び環境省の「カーボン・オフセットガイドライン」(<https://www.env.go.jp/content/000209289.pdf>) と林野庁の「木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/mokusan/attach/pdf/mieruka-1.pdf>) をもとに計算した。

- ② 水源水質機能は InVEST モデルの Water Yield Module で計算した。このモジュールは、グリッドマップと水収支の原則 [年間降水量 (P) から実際の蒸発散量 (AET) を引いたもの] を使用して、各ピクセル (x) における年間の水量水質 (Y) を決定する。このモデルでは、地表水と地下水を区別せず、年間の終わりには、蒸発したものを除いた全ての水が流域を離れると仮定している。土地利用や土壌特性、地域ごとの Z 値をもとに、空間的に水の流出や貯留・浄化がどのように分布するかを推定できる。

このモジュールの必須インプットデータとして、LULC データ・年間降水量データ (Precipitation)・蒸発散係数データ (Evapotranspiration Coefficient, kc)・土壌の深さデータ (Soil Depth)・植物利用率データ (Plant Available Water Content, PAWC) の 5 種類であった (図 4-3)。その中、年間降水量は流域の観測所データか

ら作成され、蒸発散係数及び植物利用率データは ISRIC data hub (<https://data.isric.org/>) からの公開データで、土壌の深さデータは European Soil Data Centre (ESDAC) からの 7Level データから合成したものである。最後は、これらのデータを Water Yield Module にインプットし、年間水質水収量の空間分布の推定結果を得られた。

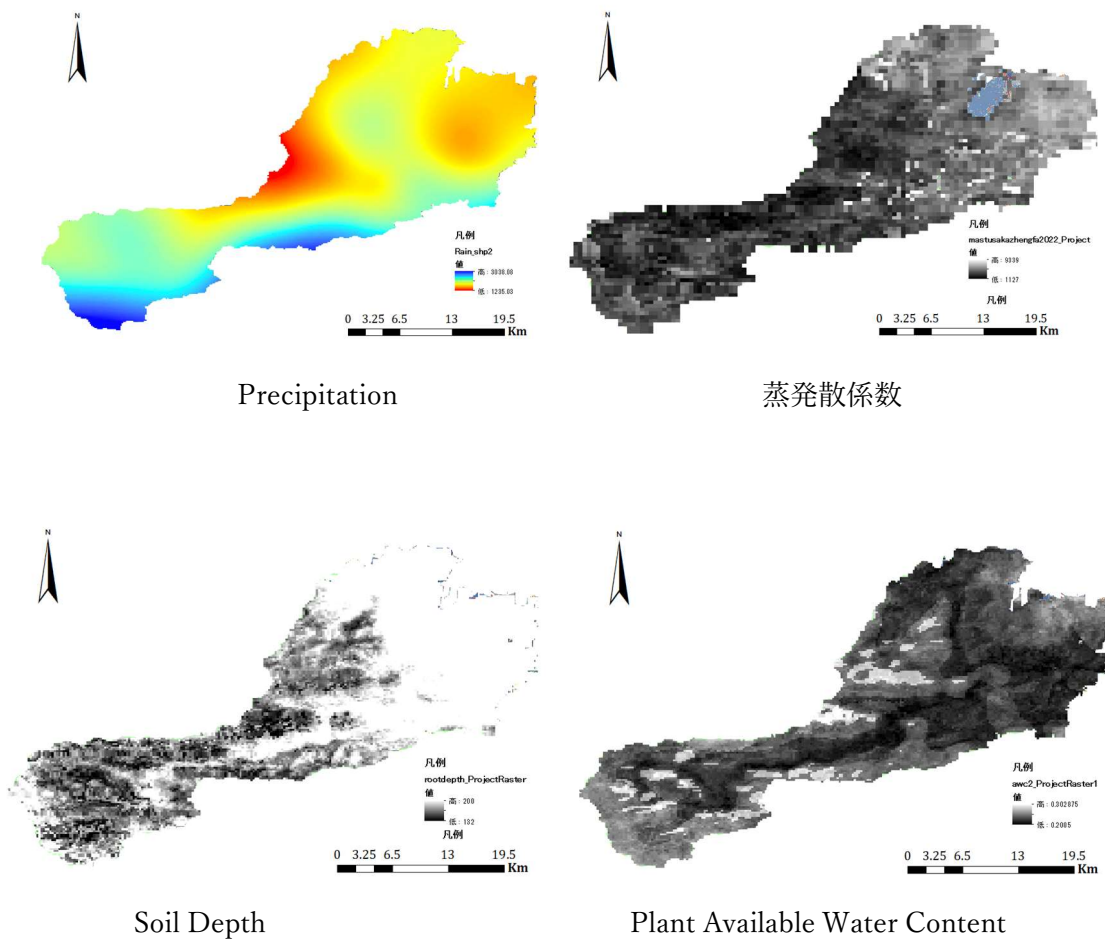
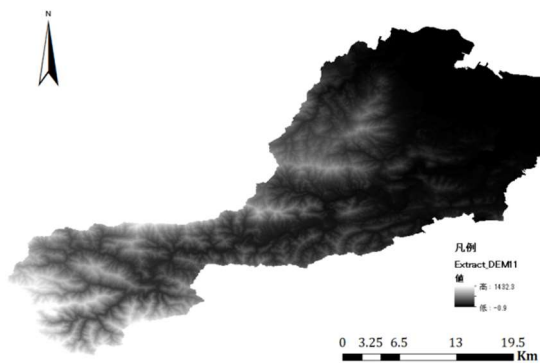


図 4-3 水源水質機能におけるインプットデータ

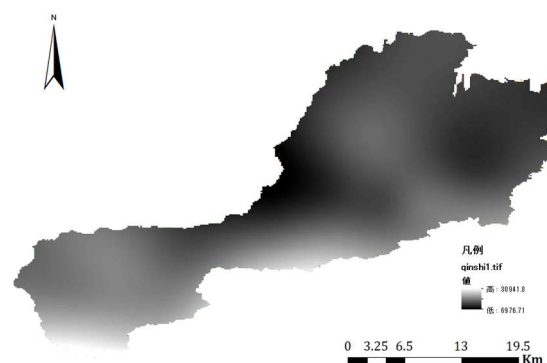
- ③ 土壌保持は水源水質機能と同じ、InVEST モデルで計算した。土壌保持 (Sediment Delivery Ratio, SDR) モジュールは、土地利用が土壌浸食とその結果生じる土壌流

出にどのように影響するかを評価できる。具体的には、土地の異なる場所でどれだけの土壌が侵食されるか、そしてどれだけの土壌が水路に運ばれずに保持されるかを推定できる。

このモジュールの必須インプットデータとして、LULC データ・デジタル標高モデル (DEM)・土壌侵食性データ (RUSLE 因子)・土壌侵食抵抗性データ (Soil Erodibility, K)・水路・小流域データの5種類であった。その中、DEM データは国土地理院からの 10 m 公開データ、RUSLE データは ISRIC データベース (<https://soilgrids.org/>) から獲得、Soil Erodibility は Wischmeier and Smith らで開発された計算モデル<sup>14</sup>で、Raster calculator tool で計算し、水路・小流域データは ArcGIS で DEM データをもとに独自で作成したデータであった。



DEM



RUSLE

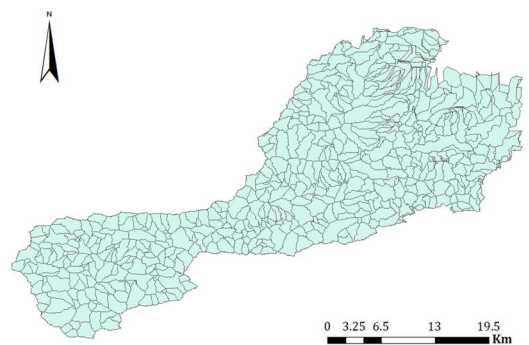
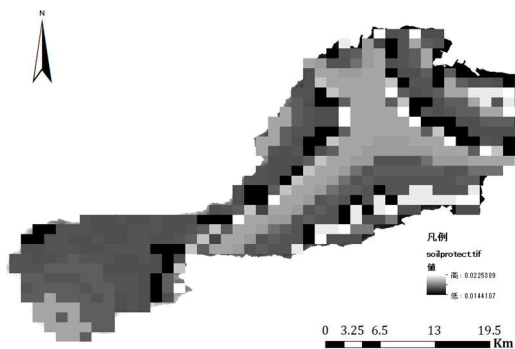


図 4-4 土壌保持機能におけるインプットデータ

- ④ 生息地の質は InVEST モデルの生息地の質 (Habitat Quality) モジュールで計算を行った。生息地の質は、地域の生物多様性の維持や生態系サービスの提供において非常に重要であり、土地利用の変化や脅威の分布が生態系の質にどのように影響するかを評価できる。このモジュールは、各土地利用タイプがどれだけの生息地価値を提供するか、またどれだけ脅威にさらされているかを分析し、生息地の「質」と「劣化」を定量化ができる。

このモジュールの必須インプットデータとして、LULC データ・脅威性データ (Threat Data) (表 4-5)・生息地の敏感性データ (Habitat Sensitivity) (表 4-6) の 3 つである。その中、Threat Data と Habitat Sensitivity は InVEST モデルのデフォルトファイルによって作成した。また、脅威性を持つ LULC 類型として、先行研究から建築 (Building)、空地 (Ground)、太陽光発電システム (Solar)、畑 (Crop)、水田 (PF) の五つと設定した。ここで、THREAT は脅威源とする土地利用種類、MAX\_DIST は影響できる最大距離 (km)、WEIGHT は脅威の重み、DECAY は脅威が距離の長さによる衰退パターンとする。

表 4-5 生息地の質における Threat Data

THREAT	MAX_DIST	WEIGHT	DECAY
Building	2.1	0.85	exponential
Ground	1.2	0.5	exponential
Solor	1.5	0.68	exponential
Crop	0.51	0.2	exponential
PF	0.3	0.4	exponential

表 4-6 脅威源が各種類 LULC に与える脅威性 (Habitat Sensitivity)

lucode	NAME	HABITAT	Building	Ground	Solor	Crop	PF
1	Water	0.7	0.7	0.2	0.7	0.6	0.4
2	Building	0.2	0	0.1	0.1	0	0
3	PF	0.4	0.7	0.4	0.7	1	0
4	Crop	0.5	0.8	0.3	0.5	0	1
5	Grass	0.8	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6
6	Forest	0.97	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6
7	Ground	0.3	0.1	0	0.2	0	0
8	Solor	0	0	0	0	0	0
9	Wetland	0.67	0.8	0.7	1	0.9	0.8

文化的サービスについてのアクセシビリティは、国土数値情報のポイントデータから ArcGIS でユークリッド距離 (Euclidean Distance) を用いて計算した。ここで使用したポイントデータは先行研究により<sup>15)</sup>、①名勝地・民俗文化財、②森林スポーツパック施設、③遊歩道数、④有形文化財の 4 種類に設定した。

また、本研究における PA の景観評価とは、太陽光発電システムが地元の景観をどれだけ影響及ぼしている評価であった。新潟県の太陽光発電システムゾーニング計画を参照し、個々の PA から最寄りの道路までの直線距離 (視覚的距離) をその影響度とする。

#### 4. 3. 2 各種 ES の計算結果及び現状分析

上記の計算手法により、現状の LULC における各種類 ES の空間分布状況を解明できた。これらの結果を小地域単位で統計し、ArcGIS で可視化を行った。

まずは供給サービスの農地面積について (図 4-5)、小地域における農地の総面積は 0 から 1.3 km<sup>2</sup>に渡り、高密度の小地域は主に中流域に集中していることが分かった。一方、農地の経済性 (図 4-6) については面積と違い、中流南部と下流部の小地域が高いと見られ

る。最後は生産便利性（図 4-7）が高い小地域では、平坦地の下流部だけに集中しており、中流と上流部は少ないことが分かった。太陽光発電システムの発電量は各エリアに分散的にみられるが、高発電量エリアは北南側に集中しているとともに、山間部にも数か所がみられる。（図 4-8）

次に、調整サービスの炭素貯留機能の平均値から見ると、都市開発が進む下流部が低いが、上流部のダムが所有する流域周辺もやや低めであった（図 4-9）。水源水質機能では、中流の北側及び下流部の南側が低いが、上流部の南側、特に山間部が高い（図 4-10）。土壌保持機能は、都市部と郊外部にかかわらず、下流の海岸線付近小地域が低い値を示し、全体的西南方向の地域が高いことが分かった（図 4-11）。生息地の質では、全体的に里地里山エリアが高く、下流部、特に工業エリアが低かった（図 4-12）。

最後は文化的サービス、アクセシビリティの視点からでは距離が近いほど（数値的には低い）良いとされるため、都市化が進んでいた小地域の評価が高いと分かった（図 4-13）。また、PV における景観評価では中流・上流域は全体的に高いが、下流平地における郊外部」が低い結果となった（図 4-14）。

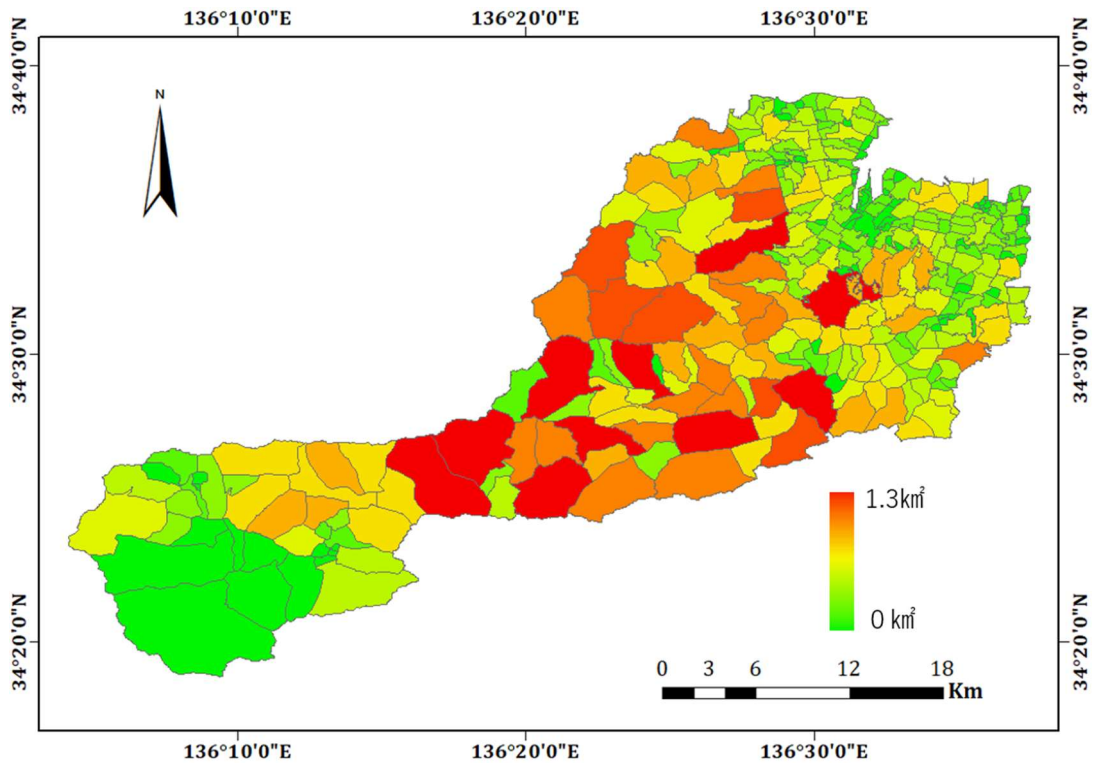


図 4-5 供給サービス①農地面積

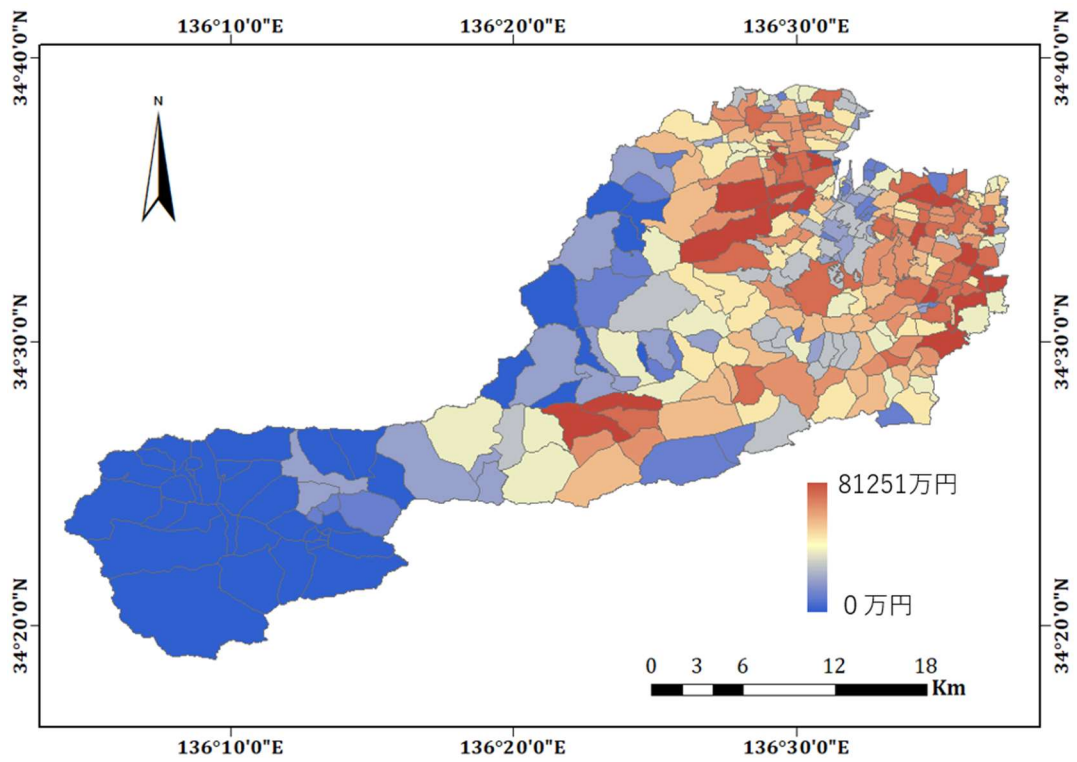


図 4-6 供給サービス②経済的価値

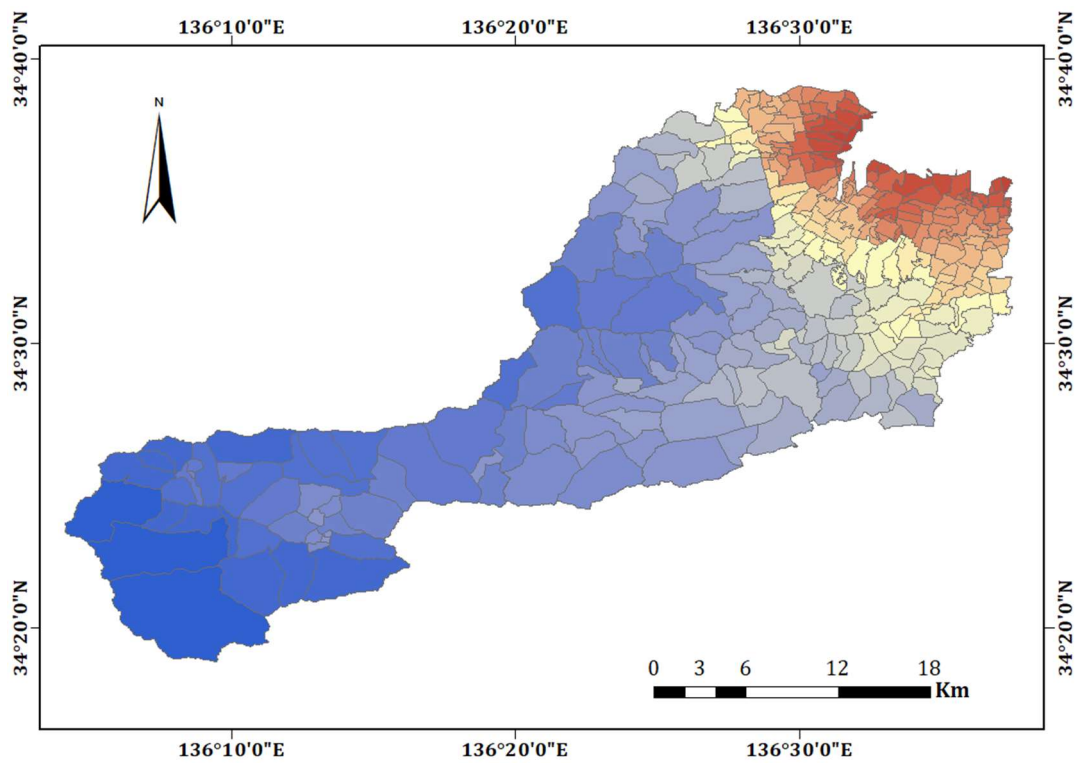


図 4-7 供給サービス③生産便利性

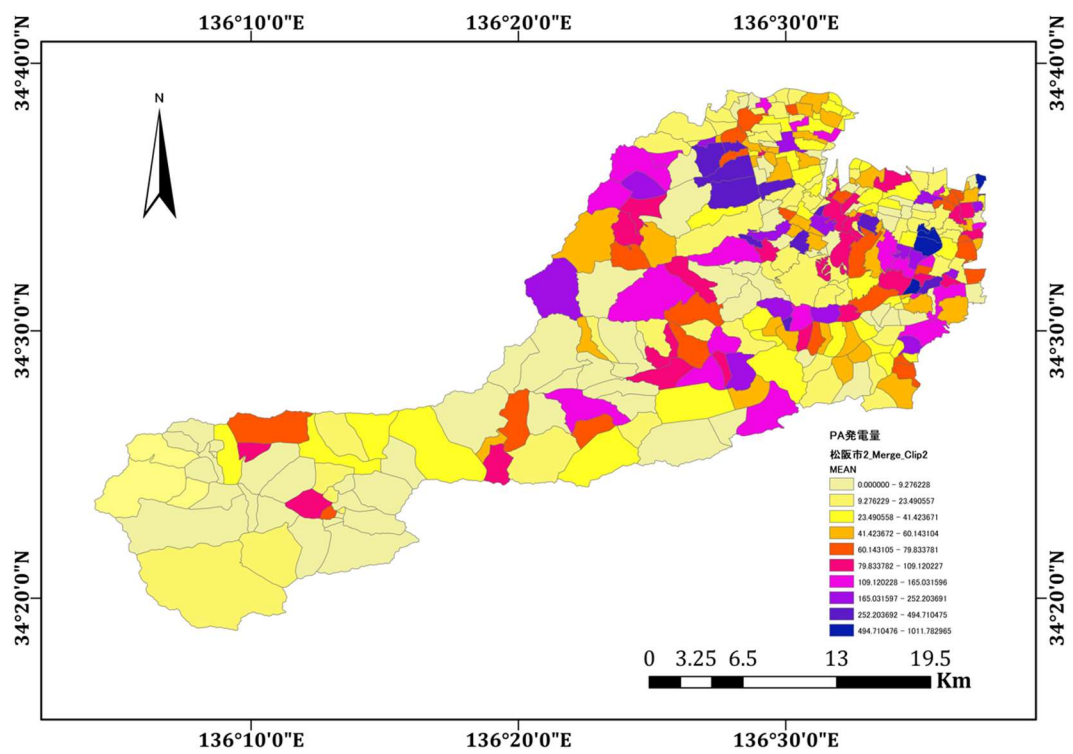


図 4-8 供給サービス④再生可能エネルギー発電量

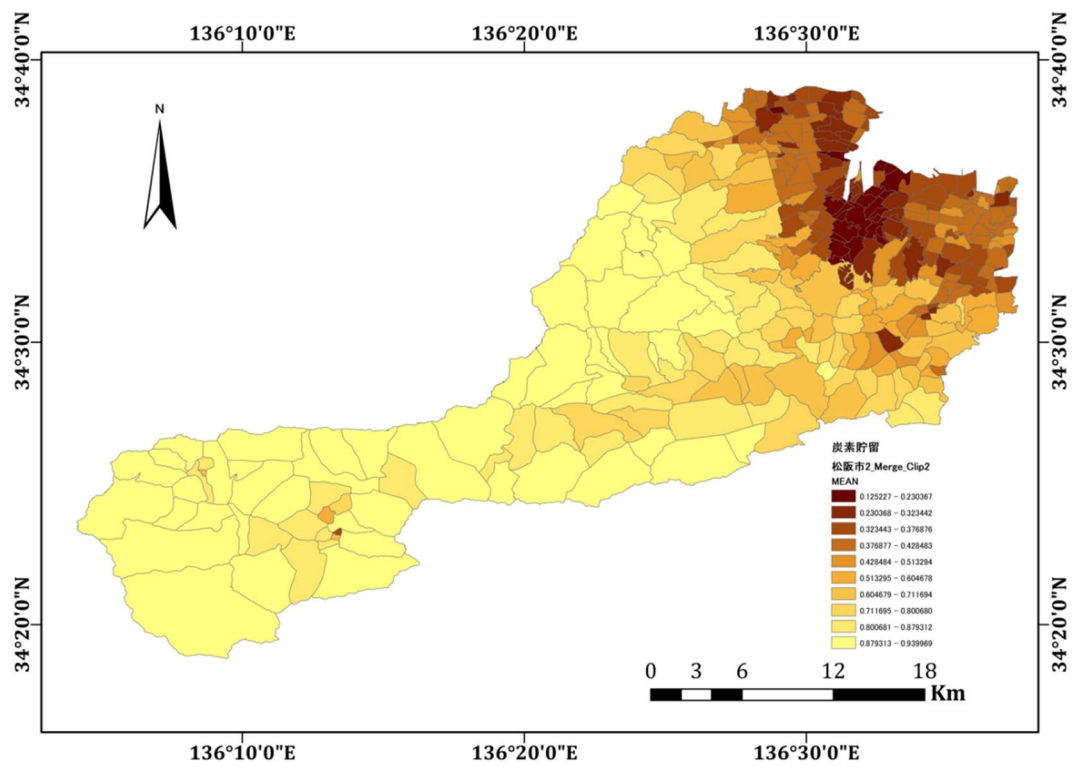


図 4-9 調整サービス①炭素貯留機能

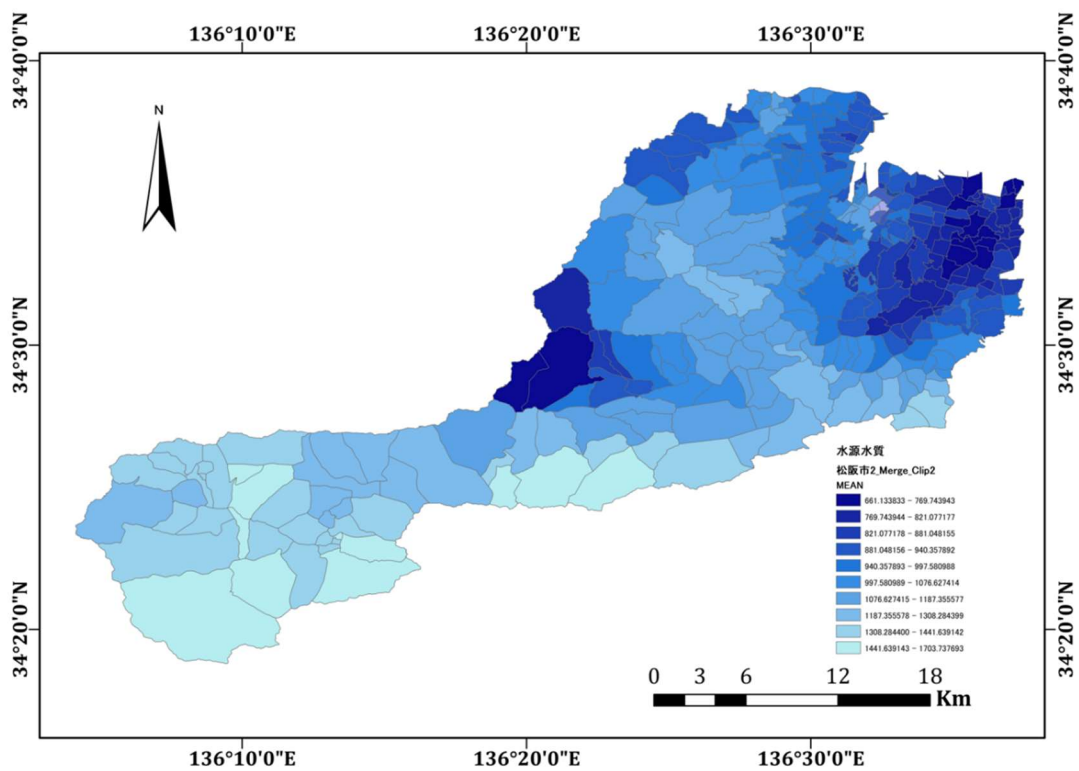


図 4-10 調整サービス②水源水質

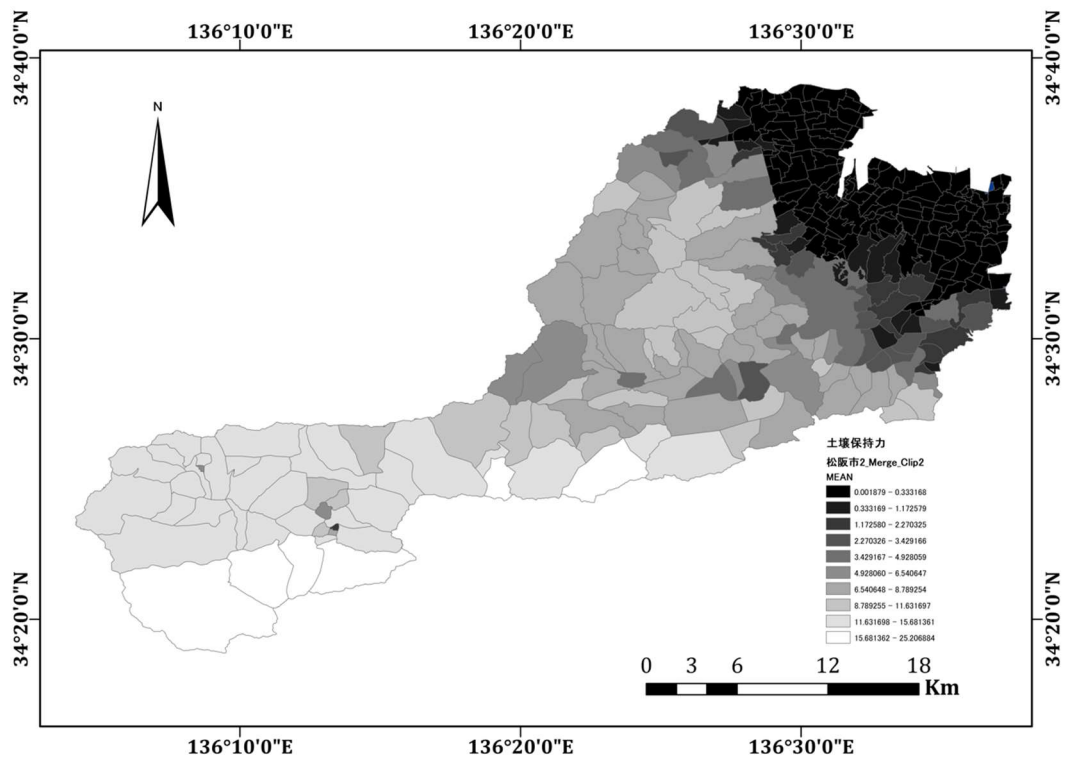


図 4-11 調整サービス③土壌保持

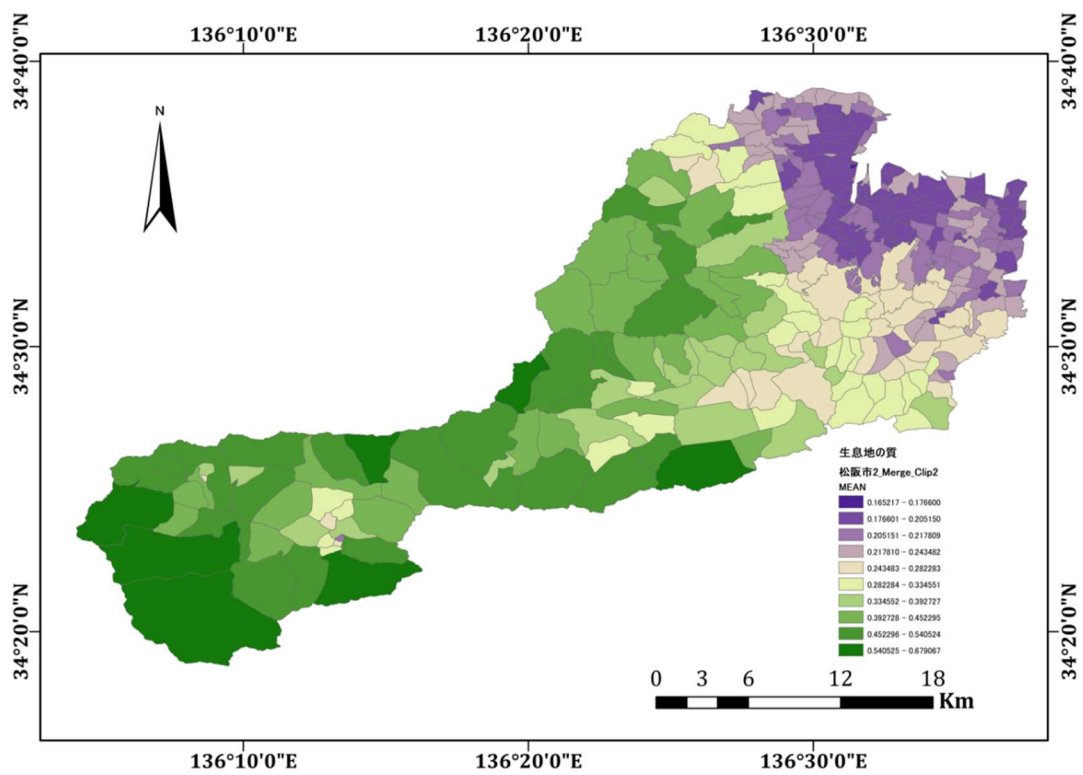


図 4-12 調整サービス④生息地の質

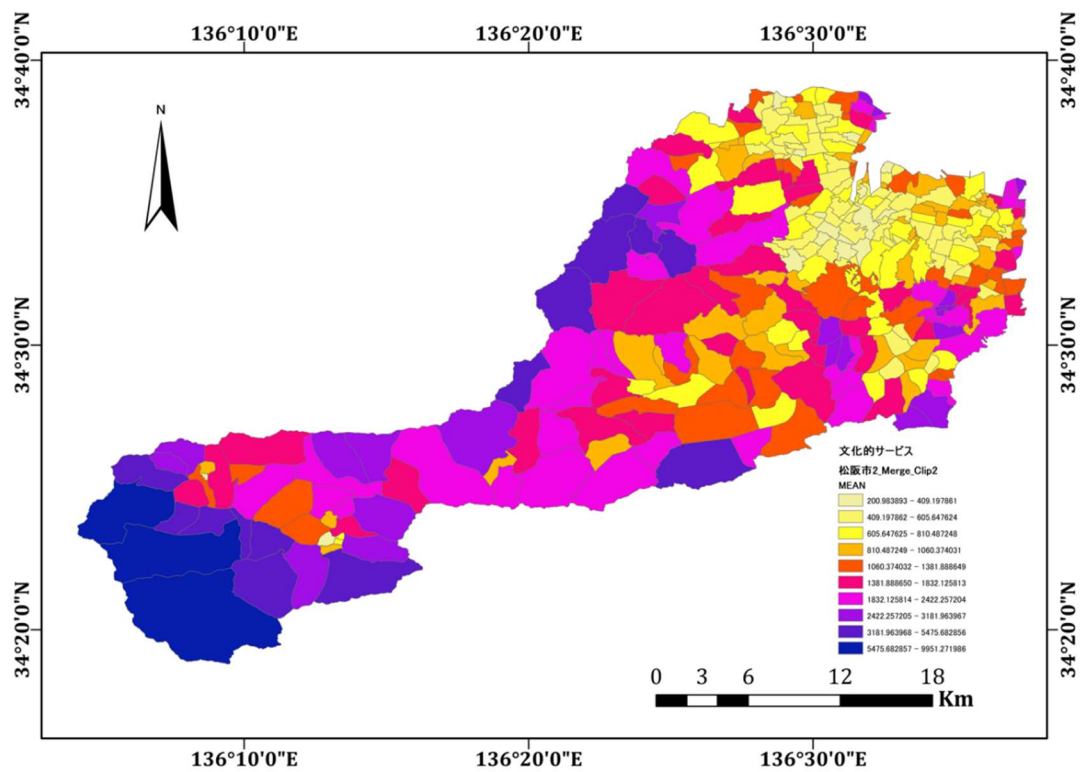


図 4-13 文化的サービス①アクセスビリティ

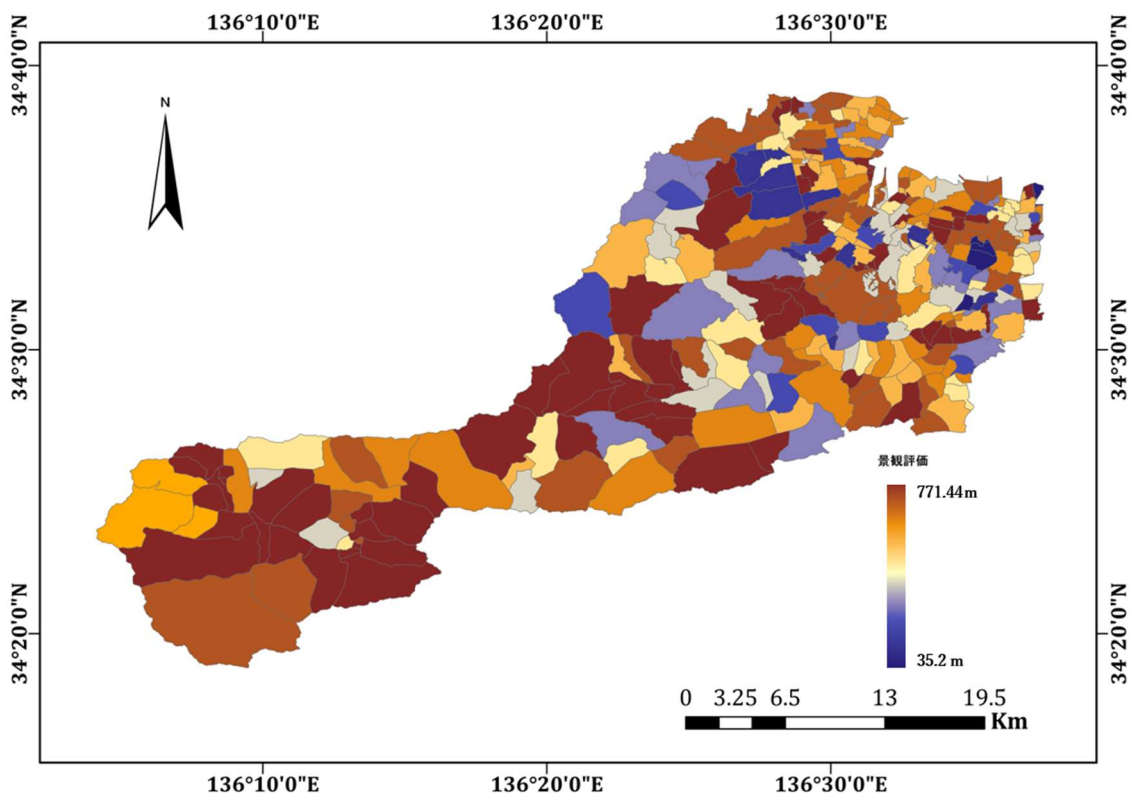


図 4-14 文化的サービス②PAにおける景観評価

#### 4. 4 将来農地利用シナリオにおける ES 評価

##### 4. 4. 1 将来農地利用のシナリオ設定

##### 4. 4. 1. 1 人口減少シナリオの設定

少子高齢化による影響で、将来の流域圏における人口密度は下がると予想されるが、具体的な数については、様々な研究が行われている。本研究は、自治体と地域住民と開かれたワークショップで議論された結果と、国土交通省で発表した人口推測データをもとに、2050年櫛田川流域における三つの将来人口分布シナリオを設定した。現状人口のデータについて、本研究は国土数値情報から500mメッシュ単位の人口データ（平成30年調査）を用いて、まずはフィッシュネットツールで人口メッシュを100mのポイントデータに転換し（平均値で割り当てる）、ArcGISで分割流域境界線データ（小地域）と空間結合を行う。そしてテーブル統計ツールで個々の分割流域内のポイントデータを統計し、分割流域における現在の人口をGISデータとして試算した。

そして将来人口のシナリオの作成については：

まずは、①流域の将来人口は現在の分布状況と減少速度を維持していくことを想定した現状進行型シナリオ。そして、②人口の分布（移住）は変わらないが、人口減少と過疎化が進行していく、マクロ減少シナリオ。最後は、③人口の数は①と変わらないが、住民は地域のインフラ施設（役場・道の駅・販売店・集会所）近くに移住・集約するコンパクト型シナリオ（図4-15）。

- ① 現状進行型シナリオは、国土交通省・国土数値情報で公開された500mメッシュ単位の人口データをもとに、ArcGISで座標系転換と地理空間補正を行った。2050年人口の予測値計算は、総務省「平成27年国勢調査」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口（平成29年1月推計）」の推計値、「日本の地域別将来推計人口（平成30年3月推計）」の推計値及び仮定値（生残率、子ども女性比、純移動率）によって計算された。

( [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/mesh500\\_1000\\_h30.pdf](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/mesh500_1000_h30.pdf) ) これにより、現状進行型シナリオにおける櫛田川流域の 2050 年人口は、221678 人とする。

② マクロ減少型シナリオは、国立環境研究所（NIES）による人口減少速度を「強」と設定し（ <https://www.nies.go.jp/pances/map/webmap/pop/index.html> ）、2050 年全国人口分布将来推計データをもとに ArcGIS で作成した。これにより、マクロ減少型シナリオにおける櫛田川流域の 2050 年人口は、205496 人とする。

③ コンパクト型シナリオは、将来人口の総人数を①と同じ 221678 人と設定し、生活圏をコンパクト化にすることを目標とする。地域住民と自治体へのヒヤリングとワークショップを通じて、将来人口減少期における居住エリアは役場・道の駅・販売店・集会所・病院の五つを設定し、小地域で人口を集約する。人口を集約する範囲は施設の中心点から 2.5km 内のメッシュに集中し（1.5km x 1.5km）、密度の変動範囲は現状（2015 年）を目安として設定した。また、以上の施設のない小地域は、他の小地域への移住を想定する。

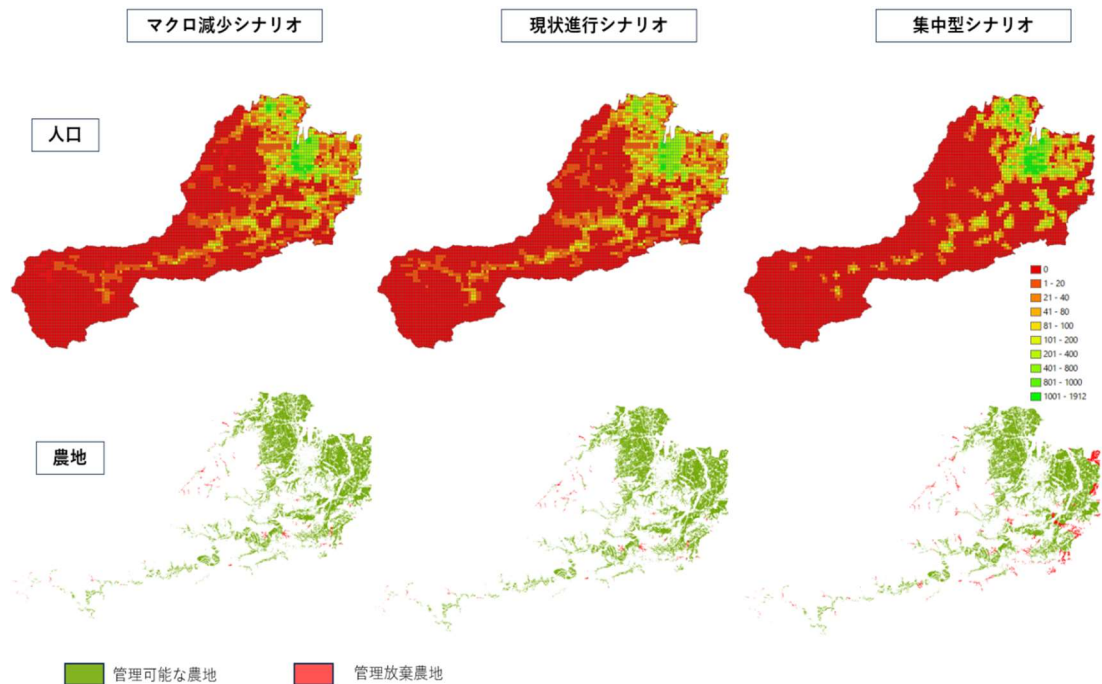


図 4-15 各シナリオの人口密度と農地管理範囲

3つの人口減少シナリオのうち、どれも過疎化による空き地空き家が増えるため、現状存在しているすべての農地の管理は難しいと考えられる。里地里山の空洞化が進み、将来農地における管理可能な範囲も変化するであろう。そのため、将来管理可能な農地を将来居住エリアメッシュ（1人以上）の中心点から1kmバッファと設定し、それ以外の農地は管理不能と判断する。その結果、現存する12237haの農地から、現状進行型シナリオの管理可能範囲内の農地は11626ha、マクロ減少型シナリオは10893ha、コンパクト型シナリオは9746haであった。

#### 4. 4. 1. 2 人口減少における農地管理シナリオ

ここで、農地が必要とする管理作業量と地理的条件により、将来農地の管理を三つの枝分かれてた管理方法と設定する（図4-16）。まずは①可能な管理労働力（人口数）を全て投下し、農地の生産をできるだけ維持していく生産性優先シナリオ。次に②再生可能エネルギーを優先し、管理不可の農地を地理的条件から可能な限りPAに転用するエネルギー優先シナリオ。最後は、③氾濫リスクと生物多様性を重視する、管理不可の農地を自然に返すことを優先する生態系保護優先シナリオ。人口減少シナリオに、それぞれ以上の3種類管理シナリオを導入し、その結果における農地利用計画をマッピングする。

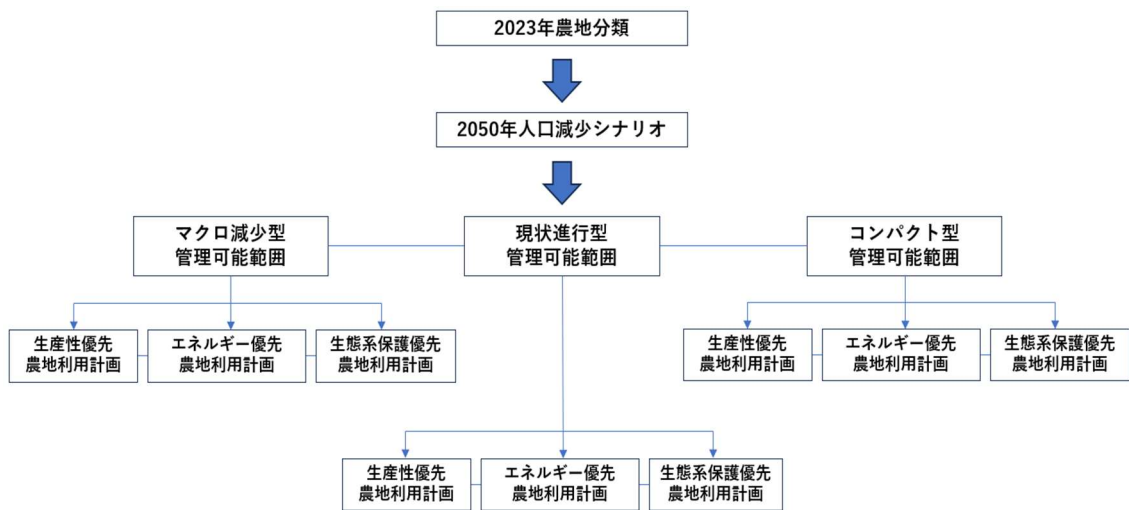


図 4-16 人口減少における農地管理シナリオ

各シナリオの具体的設定は以下に示す：

- ① 生産性優先シナリオでは、管理可能な範囲内の農地では、第 2 章で分類した 4 種類の作物から研究範囲内の農地の管理作業量（TLA）<sup>20</sup> を先行研究により計算し、小地域単位で将来人口における管理可能な農地面積を算出し、今後も持続する農地とする。それ以外の管理不能な農地は、第 3 章第 1 節で計算した PV の地理的条件とポテンシャルによって、優先的に太陽光発電システムへの転用と（最小限の管理）、自然に返す農地（管理放棄）。
- ② エネルギー優先シナリオでは、管理作業量（TLA）による管理可能な農地の 80% を保留し、持続する農地とする。それ以外の農地は日射量解析と第 3 章第 1 節で計算した PV の地理的条件平均値をもとに、PV への転用を優先とする。日射量と地理的条件は現存 PV の最小値より低い農地は、自然に返す（管理放棄）と分ける。
- ③ 生態系優先シナリオでの持続農地については、②エネルギー優先シナリオと同じ、管理作業量（TLA）による管理可能な農地の 80% を保留し、現存 PV の年間日射量（収集量）平均値の 1.5 倍以上の場所だけ転用し、それ以外の農地はすべて自然に返す（管理放棄）土地とする。

以上の条件を用いて、ArcGIS で空間分析を行い、それぞれのシナリオにおける持続農地の面積・PAへ転用の面積・自然に返す農地の面積を表4-7にまとめた。

表 4-7 各種農地管理シナリオにおける面積

人口減少 シナリオ	農地 利用計画	将来農地 面積 (ha)	PA 転用 面積 (ha)	自然に返す 面積 (ha)	総面積 (ha)
マクロ 減少型	生産性優先	8832	1283	778	10893
	エネルギー優先	7065	3430	398	
	生態系保護優先	7065	670	3158	
現状進行型	生産性優先	9217	998	1411	11626
	エネルギー優先	7373	3760	493	
	生態系保護優先	7373	931	3044	
コンパクト 型	生産性優先	8766	642	338	9746
	エネルギー優先	7012	2110	624	
	生態系保護優先	7012	894	1840	

#### 4. 4. 2 将来農地利用における ES 評価

##### 4. 4. 2. 1 ES 評価における設定

以上の人口減少における農地管理シナリオ（9種類）の土地利用計画から、それぞれ4.3節のESシミュレーション手法を繰り返し計算する。小地域の土地面積の影響を排除するため、小地域単位における各種類ESの平均値で相関性分析を行い、トレードオフ&シナジー関係を分析する。また、性質の異なるデータを比較するために、項目ごとに最大値を1として標準化した。顕著なマイナスの相関関係が検出された場合には、その生態系サービスの組み合わせにはトレードオフが、一方で、顕著なプラスの相関関係が検出された場合には、シナジーと見なす傾向があると考えられる。本研究におけるトレードオフ&シ

ナジー関係の分析は、コーディングソフトウェア Jupyter Notebook を使用して、Python の seaborn で分析を行った。

#### 4. 4. 2. 2 マクロ減少型における ES 評価

マクロ減少型は将来人口を顕著に減少と予想されるシナリオである。まずは生産性優先計画では、全体的にトレードオフとシナジー効果両方が見られ、特に農地の経済的価値と生産便利性的についての相関性は 0.63 に達し、強いシナジー関係を表している。一方で農地面積と生息地の質、生産便利性和水源水質など、供給サービスと調整サービスの間にはマイナスの相関性が見られ、トレードオフ関係が考えられる。文化的サービスは、炭素貯留と水源水質とマイナス相関であったが、土壌保持と経済的価値にプラス相関関係を表し、防災や農作業とはシナジー効果と考えられる。

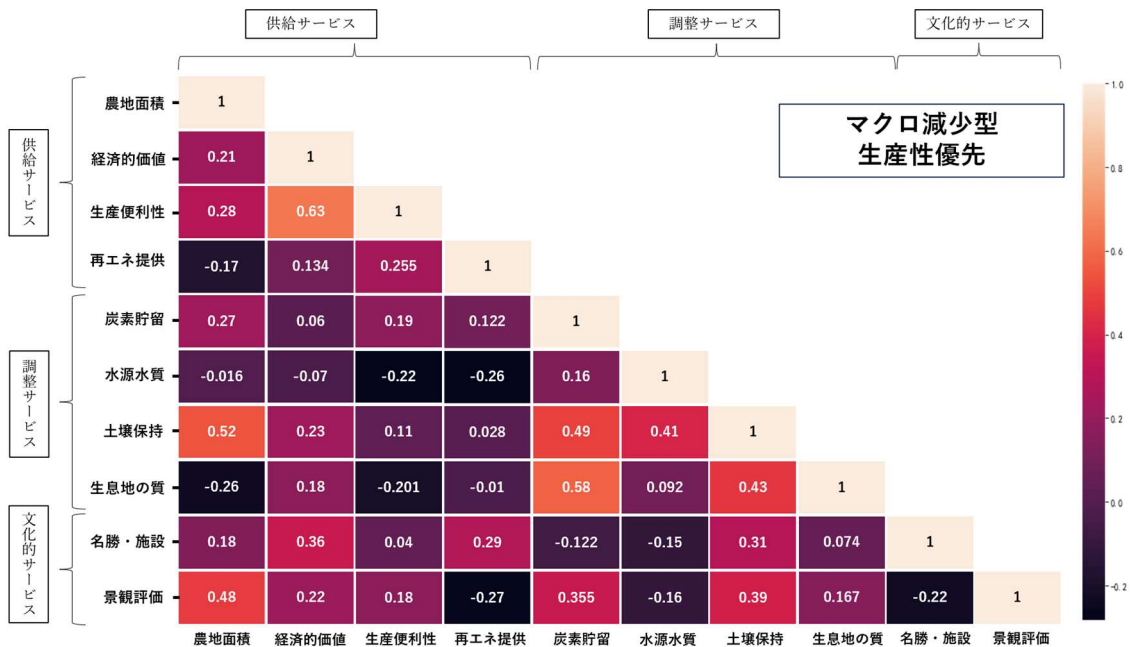


図 4-17 マクロ減少型 生産性優先

マクロ減少型におけるエネルギー優先シナリオでは、供給サービス内の各 ES はシナジ

一効果が生産性優先シナリオより少し低下しているが、全体的にプラスの相関と見られる。水源水質と生息地の質、生産便利性と文化的サービスの間は-0.2以上の相関性が見られ、トレードオフ関係と考えられる。

マクロ減少型における生態系保護優先シナリオでは、全体的にプラス相関があり、供給サービス内の各ESはエネルギー優先シナリオと同じ数値であったことが分かった。これは、持続管理する農地は一致しているためと考えられる。また、調整サービス内の各ESの間は0.38以上の相関性があり、高いシナジー効果が見られる。一方で、文化的サービスは供給サービスにおける農地面積と生産便利性はマイナスの相関を表している。

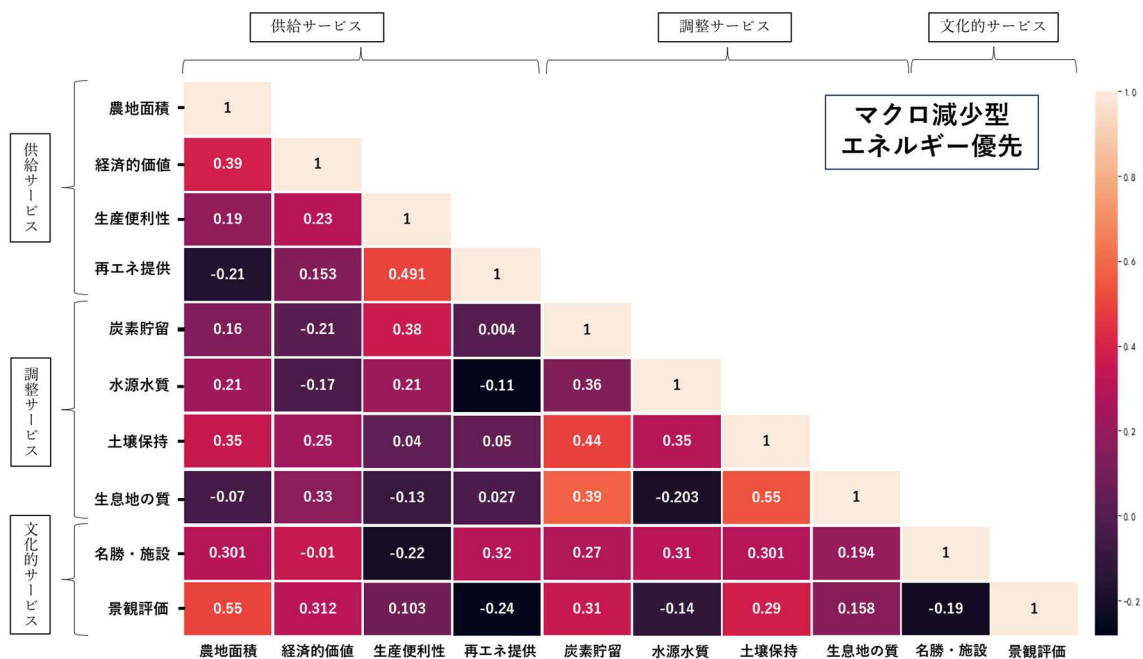


図 4-18 マクロ減少型 エネルギー優先

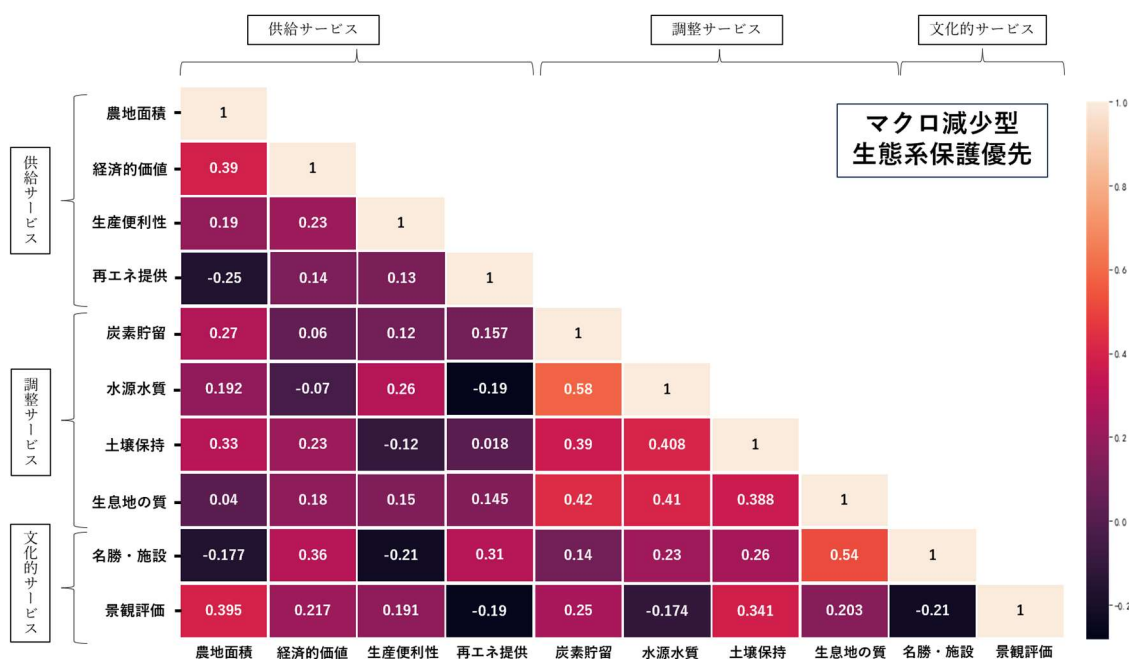


図 4-19 マクロ減少型 生態系保護優先

#### 4. 4. 2. 3 現状進行型における ES 評価

現状進行型は、将来人口が現在の減少速度で進むシナリオであるため、管理可能な農地の面積と範囲はマクロ減少型より多めであった。現状進行型における生産性優先シナリオでは、供給サービス内における農地の生産便利性と経済的価値のシナジー効果が最も高い、次に炭素貯留と生息地の質という調整サービス内の間に 0.49 の相関性が見られる。一方で、供給サービスと調整サービスの間では、農地面積と土壌保持以外の項目は相関性が弱い、もしくはマイナス相関のトレードオフ効果が見られる。最も低いのは文化的サービスと調整サービスの炭素貯留の間、マイナス 0.2 の相関であったことが分かった。

現状進行型におけるエネルギー優先シナリオでは、相関性が最も高いと低い項目は、供給サービスと調整サービスの間にある。水源水質は、農地の経済的価値と土壌保持両方に 0.5 以上の高い相関性が見られ、それに対してのシナジー効果があると考えられる。一方で、水源水質は生産便利性と生息地の質と高いマイナス相関性があり、それに対してのト

トレードオフ効果が確認される。ほかに、生息地の質と農地の経済的価値も - 0.174 のマイナスの相関性が表している。

現状進行型における生態系保護優先シナリオでは、農地が自然にもとる面積が多いため、調整サービス内の間には 0.44 以上の非常に高い相関性がもち、特に炭素貯留と水源水質は 0.62 に達した。一方で、生産便利性和生息地の質の間に-0.1 以上のマイナスの相関性が見られ、このシナリオではこの両項目しかトレードオフ効果がないことがわかった。それ以外の ES の間は強いプラスの相関性、もしくは弱いことを確認した。

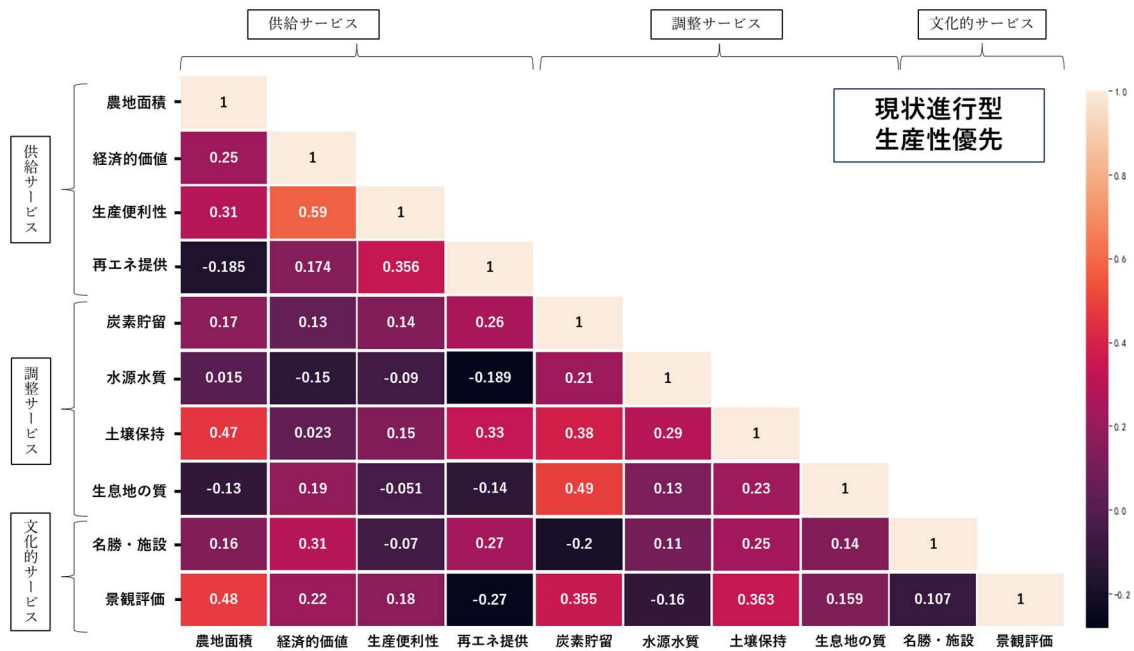


図 4-20 現状進行型 生産性優先

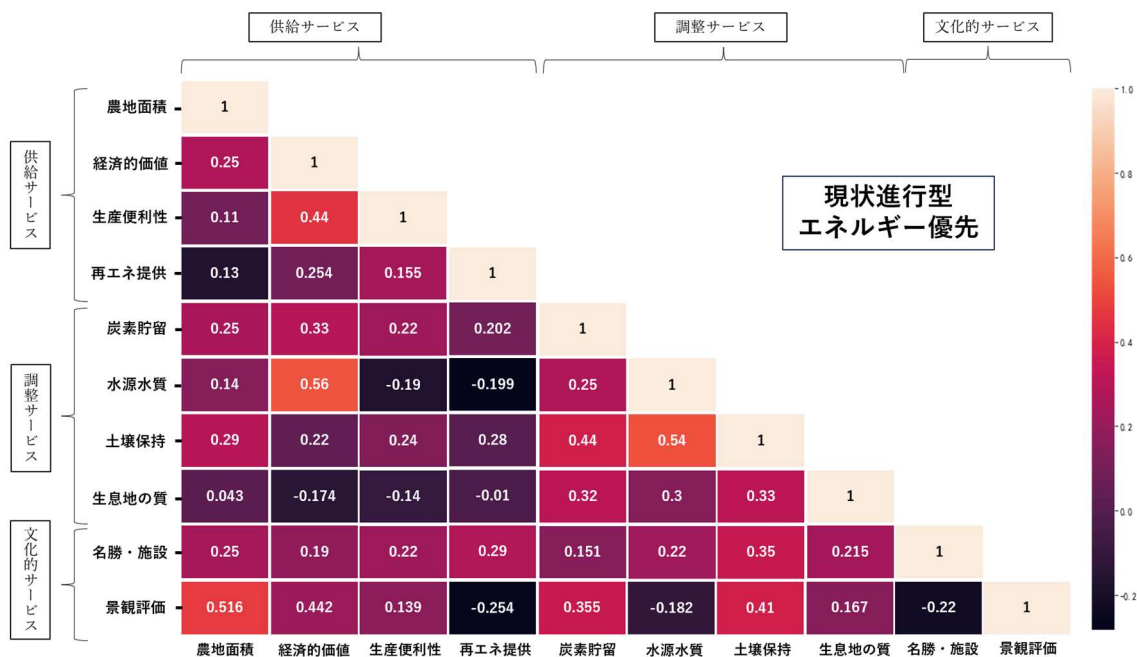


図 4-21 現状進行型 エネルギー優先

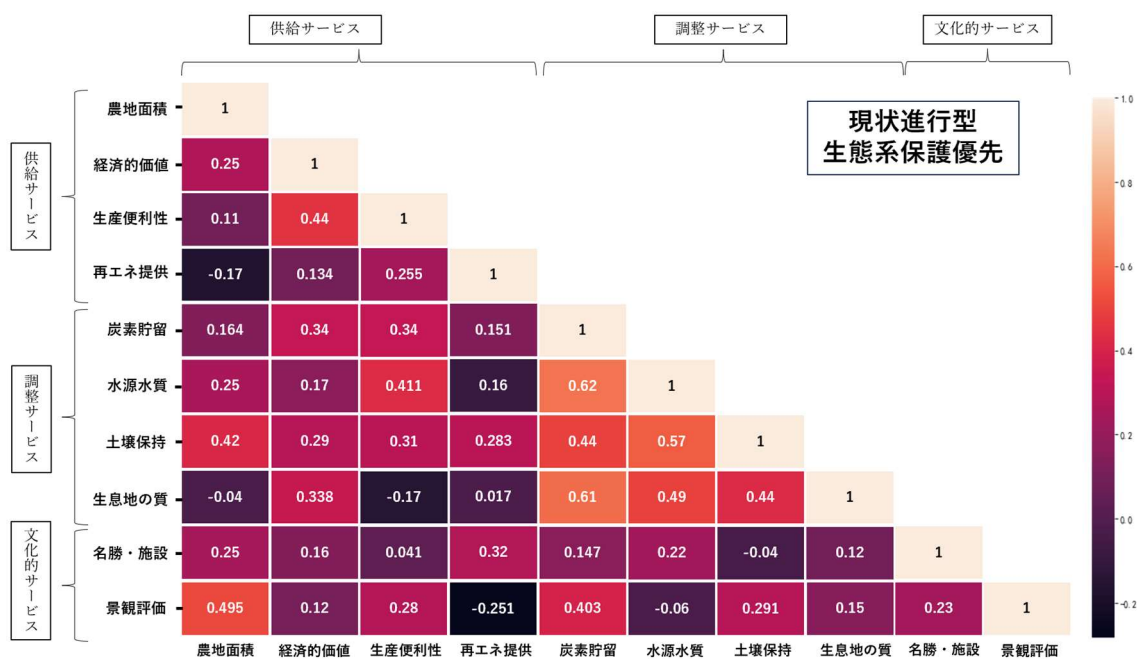


図 4-22 現状進行型 生態系保護優先

#### 4. 4. 2. 4 コンパクト型における ES 評価

コンパクト型は、将来人口の空間分布を特定の公営施設・インフラ施設などの周辺に集中することを予想し、人口の数は現状進行型と変わらないシナリオであった。コンパクト型における生産性優先シナリオでは、供給サービス内の各項目は平均 0.5 の非常に高い相関性を持ち、強いシナジー効果があると考えられる。一方で、生息地の質は、炭素貯留と水源水質以外の各 ES にマイナスな相関性があり、それについてのトレードオフ現象を考える必要がある。他に、名勝・施設の項目では、炭素貯留と水源水質に強いマイナスな相関を持ち、文化的サービスと調整サービス間のトレードオフも表している。

コンパクト型におけるエネルギー優先シナリオでは、全体的に相関性係数が低く、0.5 を超える項目が見当たらない。生息地の質は、生産性優先シナリオと同じ、他の ES とはマイナスな相関が多く、調整サービスにおける全体的にトレードオフ効果があると考えられる。また、生息地の質と供給サービスの各 ES の間では、すべてマイナスの相関を表し、両者のトレードオフ関係があると考えられる。最も高い相関は炭素貯留と農地面積であったが、相関係数が 0.5 を超えず 0.48 にと留まった。これにより、コンパクト型のエネルギー優先シナリオでは、全体的にシナジー効果が低めであったことが考えられる。

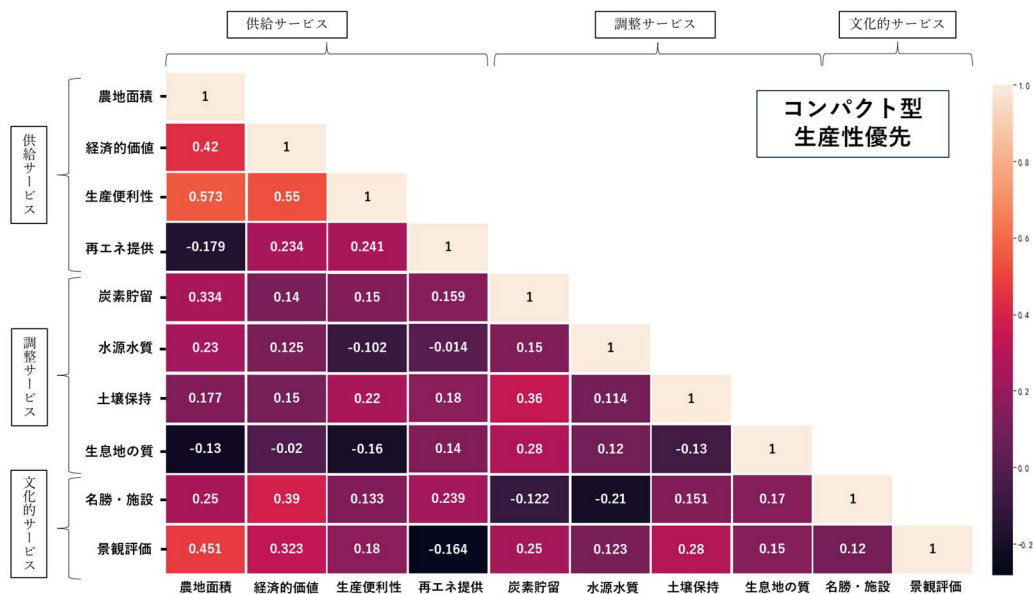


図 4-23 コンパクト型 生産性優先

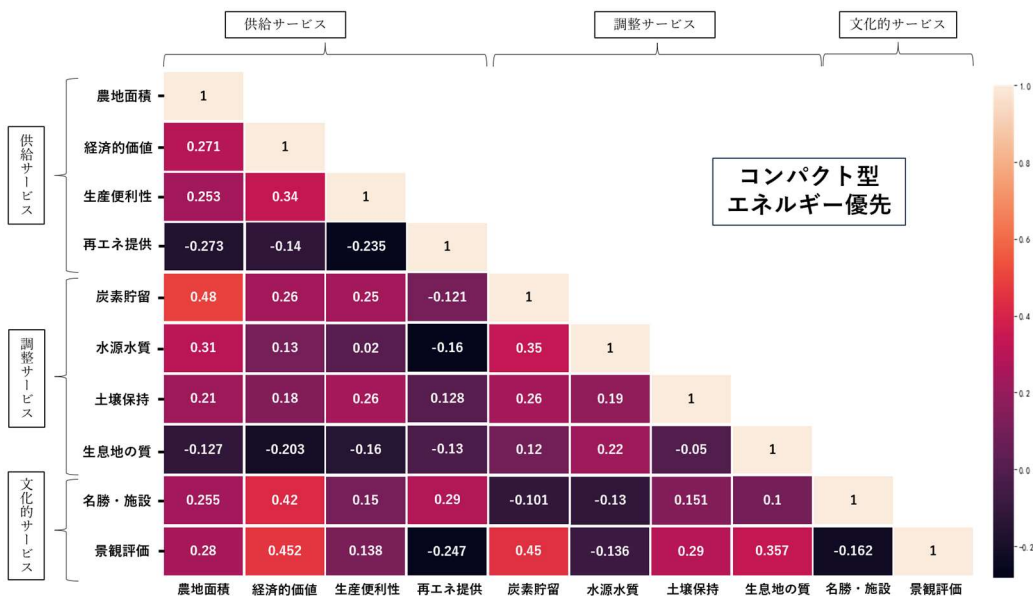


図 4-24 コンパクト型 エネルギー優先

コンパクト型における生態系保護優先では、他のシナリオにおける生態系保護優先計画と同じ、調整サービス内の各 ES は全体的に高い相関性を持ち、シナジー効果があると考えられる。また、生息地の質は供給サービスの各 ES の間に依然としてマイナスに相関しているが、経済的価値とのマイナス関係は緩和する傾向があることが分かった。文化的サー

ビスと調整サービスの間も、相関性が上昇する傾向が見られる。

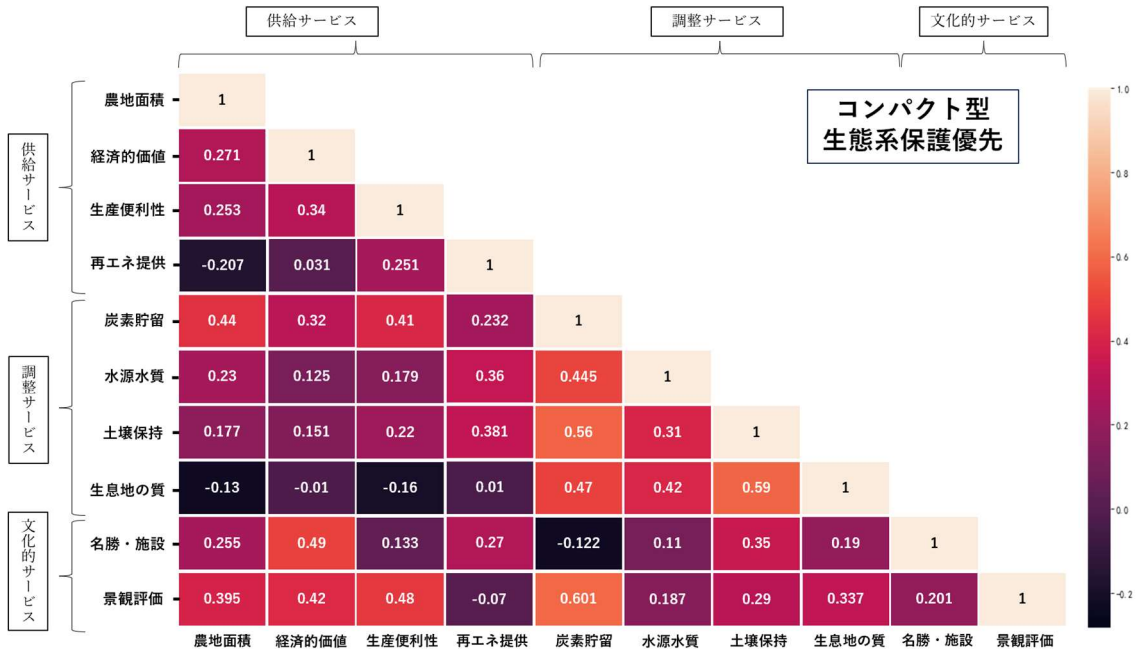


図 4-25 コンパクト型 生態系保護優先

また、各シナリオの間で比較すると、生産性優先計画の場合では、コンパクト型シナリオの供給サービスの相関性が平均的に高いが、一部調整サービスとの相関性がマイナス的な効果が存在している。マクロ減少型の生産便利性和経済的価値の間に高い相関性があるが、供給サービスと調整サービスの間には-0.2 を超える複数のトレードオフ現象が表している。一方で、現状進行型では、他の 2 種類シナリオに比べると、各サービスの間には平均的な相関関係が見られた。

次に、エネルギー優先計画の場合では、供給サービスと調整サービスは全体的に低い相関性を表し、特に 0.6 を超える相関関係が見当たらなかった。しかし、他のどのシナリオにも文化的サービスとの相関関係がマイナスの項目が存在しているが、現状進行型だけ、文化的サービスに対しての各種 ES が比較的高い相関関係が存在している。

最後は、生態系保護優先計画の場合、全体的に調整サービス内の ES が非常に高い相関

関係が表しているが、特に現状進行型の場合、0.6 を超える相関性が複数存在している。これにより、調整サービスにおいてのシナジー効果が期待できると考えられる。一方で、すべてのシナリオにおいて、生態系保護優先の場合は供給サービスと調整サービス、特に生息地の質とマイナスな相関性が存在し、トレードオフ現象が存在していると考えられる。

#### 4. 5 本章の結論

ミレニアム生態系評価 (MA, 2005) で提示された「生態系サービス」という概念は、学術界と保全の実践の双方から大きな反響があった。本研究から、流域圏における将来人口減少下の農地配置をもとに、複数のシナリオを予想し、それに対して各種生態系サービスの間におけるトレードオフ&シナジー効果を分析した。

まずはリモートセンシングを利用した土地利用分類の結果からでは、2023年の櫛田川流域は森林と農地の面積が最も多く、合わせて総面積の86%までに達しているものの、建築や太陽光発電システムなどの人工物は全域の10.7%しかない。また、この機械学習をもとにした分類モデルの結果精度は89.37%があり、流域の土地利用分類において信頼できるモデルと考えられる。

また、土地利用の分類結果をもとに、現状における9種類の生態系サービス機能について、InVESTモデルとArcGISを用いて流域単位で評価した。現状における櫛田川流域の各種生態系サービスについて、その空間分布の特徴を解明した。まずは供給サービスについて、ES評価が高いエリアは主に中流と下流部に分布している。一方で、調整サービスについては、炭素貯留機能が山間部に集中し、水源水質は都市部と山間部両方に分布している。また、土壌保持と生息地の質の分布状況は先行研究の結論と一致し、主に森林、または自然の多い場所に集中していることが分かった。文化的サービスでは、ArcGISを用いて計算し各ポイントデータのユークリッド距離を分析した。その結果、山間部も分布しているが、主に都市域周辺の郊外部に高い評価があることが分かった。

最後は、人口減少が進む将来のシナリオに基づき、生産性優先、エネルギー優先、生態系保護優先という異なる管理戦略が、生態系サービスの供給、調整、文化的な各サービスにどのような影響を与えるかを分析した。将来の人口減少シナリオに基づく評価からは、以下の点が特に重要であったことが示された：

- ①供給サービスと調整サービスのトレードオフ: 現状進行型およびマクロ減少型のシナ

リオにおいて、農地面積の拡大と炭素貯留、水源水質などの調整サービスとの間に明確なトレードオフが存在した。農地の生産性を優先することが短期的には利益をもたらす一方で、長期的な生態系の持続可能性を損なうリスクが示された。

②生態系保護優先シナリオのシナジー効果: 生態系保護を優先するシナリオでは、調整サービス間のシナジー効果が最も高く、持続可能な土地利用管理の方向性として最も適していることが示された。炭素貯留、水源水質、生息地の質の向上により、環境保全と生態系の健全性が促進された。

③文化的サービスと調整サービスの相関関係: 文化的サービスと調整サービスの間における相関関係もシナリオにより異なり、人口減少や土地利用管理の方法が観光や文化遺産へのアクセスに影響を及ぼす可能性が示唆された。

本研究の結果から、生態系サービスのトレードオフとシナジーに関する新たな知見が得られた。人口減少が進む中で、農地や森林の管理が持続可能な形で行われなければ、生態系サービスのバランスが崩れる可能性があることが明確になった。特に、供給サービス（農地の生産性など）を優先する場合、調整サービス（炭素貯留や水源の保全など）とのトレードオフが顕著に現れた点については、地域の短期的な経済的利益と長期的な生態系保全の均衡を慎重に考える必要がある。一方で、生態系保護を優先したシナリオでは、各調整サービスのシナジー効果が確認され、持続可能な社会を目指すうえで有望な戦略であったことが示された。特に、炭素貯留と水源水質の間に強いプラスの相関関係が見られたことは、土地利用管理を適切に行うことで、複数の生態系サービスが相互に強化し合うことが可能であったことを示した。

しかし、本研究にはいくつかの限界が存在している。社会経済的要因や政策の影響については十分に考慮していないため、実際の土地利用計画における実行性を評価するためには、さらなる研究が必要であった。また、異なる気候変動シナリオを考慮に入れた生態系サービスの評価も行うことで、気候変動に対するレジリエンスを高める土地利用戦略を検

討することが今後の課題として挙げられる。また、本研究におけるシナリオの判断基準間の評価と優先順位についての議論は、地域の住民と関係者の合意形成が不可欠であった。本研究の結論は、持続可能な土地利用計画を立案するための基礎的な知見を提供し、地域社会と自然環境の共生を目指す上での重要な示唆を与えている。今後は、地域住民や行政との連携を強化し、具体的な実行計画を策定することで、研究成果を社会に還元していくことが求められる。

## 参考文献

1. Himlal Baral, Rodney J. Keenan, Sunil K. Sharma, Nigel E. Stork, Sabine Kasel (2014) , “Spatial assessment and mapping of biodiversity and conservation priorities in a heavily modified and fragmented production landscape in north-central Victoria, Australia”, *Ecological Indicators*, 36, pp.552-562, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.022>
2. Lu Sui, Zhiming Yan, Kaifang Li, Chengwu Wang, Yan Shi, Yongjun Du (2024), “Prediction of ecological security network in Northeast China based on landscape ecological risk”, *Ecological Indicators*, 160, p.111783, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111783>
3. Suzanna ElMassaha, Mahmoud Mohieldin (2020), “Digital transformation and localizing the Sustainable Development Goals (SDGs)”, *Ecological Indicators*, 169, p.106490, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106490>
4. Maria E. Mondejar, Ram Avtar, Heyker Lellani Baños Diaz, Rama Kant Dubey , Jesús Esteban, Abigail Gómez-Morales, Brett Hallam, Nsilulu Tresor Mbungu , Chukwuebuka Christopher Okolo, Kumar Arun Prasad, Qianhong She, Sergi Garcia-Segura (2021), “Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart Green Planet”, *Science of the Total Environment*, 106490, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148539>
5. Hua-li Tong, Pei-ji Shi (2020), “Using ecosystem service supply and ecosystem sensitivity to identify landscape ecology security patterns in the Lanzhou-Xining urban agglomeration, China”, *Journal of Mountain Science*, 17, pp.2758-2773, <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6283-0>
6. Behnaz Aminzadeh, Mahdi Khansefid (2010), “A case study of urban ecological networks and a sustainable city: Tehran’s metropolitan area”, *Urban Ecosystems*, 13, pp.23-36, <https://doi.org/10.1007/s11252-009-0101-3>
7. Leo Breiman (2001), “Random Forests”, *Machine Learning*, 45, pp.5-23, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
8. Leyre Torre-Tojal, Aitor Bastarrika, Ana Boyano, Jose Manuel Lopez-Guede, Manuel Grana (2022), “Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms”, *Journal of Computational Science*, 58, p.101517, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>
9. Jonathan Cheung-Wai Chan, Desiré Paelinckx (2008), “Evaluation of Random Forest and Adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery”, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp.2999-3011, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.011>
10. Elizabeth A. Freeman, Gretchen G. Moisen, John W. Coulston, and Barry T. Wilson

- (2014), “Random forests and stochastic gradient boosting for predicting tree canopy cover: comparing tuning processes and model performance”, *Can. J. For. Res*, 46, pp.323-339, <https://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2014-0562>
11. Angelica Sofia Moreno Munoz, Angela In es Guzman Alvis, Ivan Felipe Benavides Martínez (2024), “A random forest model to predict soil organic carbon storage in mangroves from Southern Colombian Pacific coast”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36, pp.552-562, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.022>
  12. Birhan Getachew Tikuye, Milos Rusnak, Busnur R. Manjunatha, and Jithin Jose (2023), “Land Use and Land Cover Change Detection Using the Random Forest Approach: The Case of The Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia”, *Global Challenges*, 7, p.2300155, <https://dx.doi.org/10.1002/gch2.202300155>
  13. リモートセンシング技術センター（一般財団法人），衛星情報データベース，Sentinel-2A / 2B / 2C / 2D, [https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/sentinel\\_2a](https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/sentinel_2a)
  14. Wischmeier, W. H., and Smith, D.D. (1978) , “PREDICTIN GRAINFALL EROSION LOSSES-A GUIDE TO CONSERVATION PLANNING”, Science and Education Administration, Chapter Soli erodibility factor.
  15. 神山千恵, 橋本禅, 香坂玲, 斉藤修 (2016), “社会生態学的生産ランドスケープにおける生態系サービス間のシナジーとトレードオフ解析：石川県下の基礎自治体を事例として”, *土木学会論文集 G*, 72 (6) , *環境システム研究論文集* 44 巻, pp.289-297

第5章  
まとめと考察

## 5. 1 本論文におけるまとめ

環境保全に関わる分野横断的かつ代表的な国際目標として持続可能な開発目標 (SDGs : Sustainable Development Goals) があるが、その中で比較的頻繁に言及される「生態系サービス」は、再生可能エネルギー、持続可能な生産・消費の文脈で言及されている。しかし、異なる環境、社会・経済的コンテキストを有する世界の各地域が連携して生態系サービスの悪化に対応していくためには、その枠組み自体を、科学的・理論的な観点から再帰的に検討することも必要であった。本研究ではこのような背景をもとに、流域圏における農地の実態と変化パターンを分析し、更に再生可能エネルギーにおけるマイナスな環境影響を可視化・数値化した。これらの知見をもとに、流域圏の将来人口減少期における複数の土地利用計画を検討し、その上で各種の生態系サービス間の関係を総合的に理解し、トレードオフ&シナジー効果を示した。

第二章では、櫛田川流域内の農地を分析し、これらの農地が太陽光発電システム (PV システム) に転換される要因が農地の種類によって異なることを明らかにした。計算結果によると、5年間で合計 77.93ha (全体の 0.64%) の農地が PV システムに転換されており、その多くは河川や小川の近くに集中していることがわかった。これは、農地の立地条件や周囲の環境が転換の主要な要因であったことを示唆している。特に、道路への距離や年間の日照量が、ほぼすべての農地タイプにおいて転換の重要な要因として機能していることが確認された。さらに、農地タイプごとに異なる転換傾向も明らかにした。PF (水田) が全体的に最も多く転換されたが、面積比で見ると WF (麦畑) の転換率が約 1%と高く、これが最も大きな割合であったことがわかった。この違いは、作物の種類に応じた地理的条件や栽培環境が、農地の転換に与える影響を反映していると考えられる。

第二章の研究では、PV システムへの農地転換に影響を与える要因が、地理的条件と社会的要因の組み合わせによって複雑に絡み合っていることが示された。特に、道路への近

接性や年間の太陽放射量といった地理的要因が、農地転換の主要な駆動要因として浮上した。道路に近い農地は、アクセスのしやすさやメンテナンスの利便性が高いため、より高い転換率を示していると考えられる。これは、農地所有者が経済的な利益を考慮し、農業から再生可能エネルギーの利用へとシフトする傾向があることを示唆している。しかしながら、人口の変化が PV システムへの農地転換に与える影響はほとんど見られなかった。これは、農業経営者の年齢構成や農業経済の変化が直接的に農地の転換に影響を与えていない可能性を示している。つまり、農地所有者が複数の農地を所有し、その中の一部のみを PV システムに転換しているため、人口動態の変化が農地転換率に反映されにくいという現象が考えられる。

これにより、ランダムフォレスト (RF) モデルと一元配置分散分析 (ANOVA) 法を組み合わせて、異なる農地タイプの変化を分析した。これにより、農地転換に関与するさまざまな駆動要因が明らかにされ、流域における土地利用変化の複雑な因果関係が示された。特に、地形や気候条件に応じた農地の転換パターンが浮き彫りにされ、それが異なる地理的文脈での土地利用変化にどのように影響を与えるかを明らかにした。多様な地形ゾーンにおける影響要因の比較分析を通じて、地域ごとの土地利用変化のアルゴリズムが解明された。

第三章では、土地利用変化における温熱環境への影響を評価し、特に太陽光発電システム (PV) の設置による地表面温度 (LST) の変化について詳細に分析した。櫛田川流域を対象とし、2013 年から 2023 年の 10 年間にわたり、リモートセンシング技術と機械学習を用いて、PV 設置の増加と、それが地域の温度に与える影響を定量化し、地理的特徴に基づく温度変化要因の特定を行った。

Deep Learning モデルを用いた分析によると、2013 年から 2023 年の間に、櫛田川流域では PV 設置が顕著に増加し、特に 2019 年以前に集中していた。2019 年には最も多くの新規 PV 設置が見られたが、それ以降は新設の数や面積が減少傾向であった。これは、2019 年に自治体が改正した景観条例が、一定面積を超える PV 設置に対して厳しい規制を課したためと考えられます。PV 設置の空間分布を見ると、2013 年から 2019 年にかけては中・下流域（郊外地域）に集中しており、2019 年以降は上流域（農村地域）に拡大していることが分かった。

また、PV の設置が LST に与える影響も明らかにした。PV 設置地点では、特に春季に地表温度の上昇が顕著であり、平均して  $2.85^{\circ}\text{C}$  の上昇が観察された。さらに、PV による温度上昇効果は地理的条件に依存しており、標高、建物密度、植生指数などの要因が影響を与えることが確認された。標高が高い場所では温度上昇効果が小さく、都市部では高層建物による日照遮蔽の影響で PV の温度上昇は抑えられる傾向があった。これに対し、郊外の PV 設置箇所は遮るものが少なく、太陽光を多く受けるため、温度上昇が大きくなっている。季節ごとの分析では、PV による温暖化効果が春に最も高く、冬に最も低いことがわかった。これは、PV が太陽光を受ける量に季節的な違いがあるためと考えられた。この結果は、他の地域での PV 設置による温度上昇の研究結果とも一致した。

第四章では、農地の土地利用変化が生態系サービス（ES）に及ぼす影響、特にトレードオフとシナジーに注目して分析した。現代社会における都市化と経済発展の進展に伴い、緑地や水源地が急速に失われ、生態系の機能が損なわれつつであった。これにより、ES の提供能力の低下により、自然環境と社会の均衡が揺らぎ、そのリスクが高まる。そこで、将来の土地利用シナリオを設定し、それぞれの ES がどのような影響を受けるかを定量的に評価することが第四章の目的であった。

生態系サービスは、①「供給サービス」、②「調整サービス」、③「文化的サービス」に分類され、これらのサービスは、人間の活動によって変化しやすく、特に土地利用の変化によってトレードオフ（利益の対立）やシナジー（利益の共生）が生じる。そこで、将来人口減少期における土地利用変化の複数シナリオをつくり、それぞれがどのように ES に影響を与えるかの分析を行った。

まず、リモートセンシング技術を用いて、流域全体の土地利用を詳細に分類した。その後、ArcGIS や InVEST モデルを使用して、各種生態系サービスの現状を評価し、将来の人口減少シナリオを想定した土地利用シミュレーションを行った。これにより、ES 間のトレードオフやシナジー関係を特定し、将来の土地利用計画に役立つ知見を得ることを目指した。

現状における ES として、①供給サービスでは、農業生産や農地面積の分布状況が特徴的であり、特に中流域と下流域においてハイスコアが得られた。一方で、上流域では農業生産の経済価値が低く、生産便利性も限られている。②調整サービスでは、炭素貯留と水源水質、土壌保持及び生息地の質の評価を行った。炭素貯留は主に山間部で高く、水源水質も山間部で優れた結果が得られた。土壌保持に関しても、自然豊かな地域ほど高い値を示したが、都市部や工業地域では低下が見られている。文化的サービスでは、観光スポットや文化遺産へのアクセスの評価が行われた。都市部に近い郊外エリアが高い評価を得ている一方で、山間部では文化的サービスの提供が限定的であった。

また、将来の人口減少シナリオを 3 つ設定し（現状進行型、マクロ減少型、コンパクト型）、それぞれのシナリオに基づいた土地利用管理戦略（生産性優先、エネルギー優先、生態系保護優先）を提案し、どの戦略が最も効果的かを分析した。供給サービス（農地面積や経済価値）の拡大は、短期的には経済的利益をもたらすものの、炭素貯留や水源保全

といった調整サービスの機能を損なうリスクがあることが確認された。特に、生産性優先シナリオでは、このトレードオフが顕著に表れ、農地の拡大が生息地の質や水質改善に対して負の影響を与えることが示された。生態系保護を優先する戦略では、各種人口シナリオで調整サービス（炭素貯留、水源保全、生息地の質）間で強いシナジーが見られ、持続可能な土地利用管理の観点から最も有効であったことが示された。特に、炭素貯留と水源水質の改善は、環境保護に重要な役割を果たすことが分かった。文化的サービス（観光資源や文化遺産へのアクセス）と調整サービスの間にもシナジーやトレードオフが見られ、特に観光資源の保護が調整サービスに与える影響が強いことが分かった。コンパクト型シナリオでは、観光スポットへのアクセスを重視しつつ、調整サービスの改善を図ることが可能であったことが示された。

## 5. 2 考察

本論文は、農地転換における地理的要因と社会的要因の影響をより詳細に理解することで、政策立案者は、将来の人口減少期においてどの地域で再生可能エネルギーの導入を促進すべきかを判断できるようになる。さらに、この研究は、農地転換が地域の環境や経済にどのような影響を与えるかについても、生産持続と環境保全の両立に向けた将来的な研究や政策立案に対する洞察を提供する。

また、PV 設置が土地の温熱環境に及ぼす影響を科学的に解明した。PV による温度上昇効果は、地域の地理的特徴に強く依存しており、都市部や郊外、農村部でその影響の程度が異なる。標高や植生の違いが LST に与える影響も大きく、特に郊外や農村部では PV 設置による温度上昇が顕著であったことが確認された。これにより、再生可能エネルギーの普及に伴う環境への影響を考慮した持続可能な土地利用計画の必要性が示唆される。更に、PV 設置が農業地域に与える影響についても注意が必要であった。温度上昇が農作物の生育環境に悪影響を与える可能性があるため、特に櫛田川流域のような農業が主要な経済活動となっている地域では、温暖化対策とエネルギー政策の均衡を慎重に保つことが重要であった。今後、土地利用の変化に伴う温熱環境の変動を定量的に評価し、地域の環境保全とエネルギー需要を両立させるための科学的な指針を提供することが重要であった。

さらに、PV 設置が地域環境に与える間接的な影響も無視できない。地表温度の上昇は土壤水分や微量元素の変化を引き起こし、特に農業地域においては、農作物の生育に悪影響を及ぼす可能性がある。櫛田川流域は農業が重要な経済活動であるため、温暖化による農業生産へのリスクも高まると推察される。

今後さらに導入量の増加が見込まれる太陽光発電事業において、自然環境や地域住民との共生は喫緊の課題であったことが推察される。共生を目指すにあたって、事業者・住民・行政といった各関係者の合意結成は大きな役割を担う。

本研究における意義は、特定の流域に限らず、より広範な農地転換のメカニズムに対する洞察を提供する点にある。研究で使用されたデータの多くが公共のウェブサイトから取得されたものであったため、本論文における研究手法は、他の地域や国でも適用可能であったと推察される。将来の土地利用計画においては、供給サービスと調整サービス間のバランスを取ることが重要であり、特に生態系保護を重視した戦略が求められる。本研究の結果は、今後の政策立案や地域計画に対して重要な示唆を与えるものであった。このような手法は、持続可能な土地管理や再生可能エネルギーの統合を目指した政策立案においても有益な指針となり得ると考えられる。

### 5. 3 本研究における限界および今後の展望

本研究は、日本中部に位置する櫛田川流域の土地利用の変容プロセスを読み解く新たな視点を提供し、将来土地利用変化における生態系サービスのトレードオフ&シナジーの変化メカニズムを明らかにした。しかし、より詳細な都市・流域データの不足により、研究は行政区画パターンに限定され、詳細な建築・街路空間パターンとの相互影響についての考慮が不十分となった。特にヒートアイランド効果を研究する時、都市形態と繋がる建築や街路空間の変化は、都市環境と密接に関連している。また、政府主導の都市計画と、地域住民と太陽光発電業者による大規模土地利用の自主性が共存する中で、異なる管理主体間の均衡を図るとともに、直面する課題のさらなる明確化が求められている。したがって、今後の研究では以下の課題に取り組む必要がある。

#### (1) 流域・都市形態の変容と生態系サービスの相互影響

第4章で述べた変化パターンによれば、どれも今後数十年の間に人口減少せざるを得ないという前提に立って、人口増加や工業地帯・都市域の拡張を想定していなかった。また、土地利用計画も集水域（行政区画）単位だけしか考慮していない。ミクロの視点からは、建築・街路・公共緑地の変化と異なる組み合わせが多様な空間を構成し、より下流部の生態系サービスに影響を与える可能性がある。このため、農地だけではなく、建築・森林・都市緑地を含めた流域全体の土地利用変化を考慮するとともに、高精度な予測モデルを利用し、より詳細な将来土地利用シナリオを構築し、都市の変化・自然の変化と生態系サービスの相互影響を明確化する必要かつ価値がある。

#### (2) 政府主導の計画と自主性を持つ住民・業者の合意形成

本研究は、客観的な物理的特徴を基にして、統計学で環境影響の解析を行っていたが、地域の土地利用の在り方と住民への影響、また地域の土地利用に関する文化や伝統についての議論は少ない。特に、視覚的影響の評価については、環境省の技術ガイド<sup>1</sup>は網羅的

に記述されているが、評価手法を明確に義務付けていないなどの課題が見られる<sup>2)</sup>。これからは評価の方法論に限らず、合意形成のための課題について行政・業者・住民で議論を深める必要があり、視距離・騒音・周囲景観の影響など、地域特性を考慮した評価手法を明確化する必要がある。再生可能エネルギーの導入がさらに増える今後に対して、多様な関連主体が、将来的に持続可能な共有を行いながらビジョンを描くことを期待する。

### (3) 自然共生に繋がる植生・動物の生息域変化

土地利用の変化から影響を受けるのは人間だけでなく、動物と植生も同様であった。本研究は、InVEST モデルを用いて生態系サービスに関する定量的な分析を行ったが、自然共生を目標とする場合、土地利用変化に関するより詳細な樹種分布状況や野生動物の生活圏の変化を考慮すべきであった。特に生物多様性の維持と獣害防止の間の調和は、農山漁村の課題となっている<sup>3) 4)</sup>。これからは自治体主導で収集した調査データと GIS を合わせて、地域で実際に存在する特定の希少種群集を保護する一方、外来種の生息数増加や生息域拡大を防止する計画を作成することで、地域住民に情報共有できるシステムを構築する。これにより、自然共生を考慮したより詳細な土地利用ゾーニングが可能となるだろう。

## 参考文献

- 環境省（2008）「環境影響評価—技術ガイド—景観」, 環境省
- 内田正紀, 宮脇勝, 香坂玲（2024）「人口減少期の農林地管理と合意形成・第3章・風車の視覚的影響評価」ナカニシヤ出版, pp.75-106
- 環境省（2015）「特定鳥獣保護・管理計画作成のためのガイドライン（平成27年度）」  
<https://www.env.go.jp/nature/choju/plan/plan3.html> （Access by 2024.12.17）
- 環境省（2023）「野生鳥獣の保護及び管理に係る計画制度」  
<https://www.env.go.jp/nature/choju/plan/plan3-1a.html> （Access by 2024.12.17）

## 謝辞

この博士論文を完成させるにあたり、多くの方々からご指導、ご支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

まず、研究を進めるにあたり、絶えず適切な助言と温かいご指導をくださった高取千佳先生、朝廣和夫先生、包清博之先生に深く感謝申し上げます。論文執筆の過程で、学術的な視点のみならず、研究者としての姿勢や探究心について多くを学ぶことができました。また、研究課題に対する的確なアドバイスと継続的な励ましにより、困難を乗り越え、論文を完成することができました。

次に、共同研究者である ULLAH SM ASIK 先生と東京大学の香坂玲先生には、貴重な知識やアイデアを共有していただき、研究内容を深めることができました。また、高取研の仲間たちにも、実験やディスカッションを通じて多くの刺激を受け、研究における新たな視点を得ることができました。

本研究の研究資金を提供し、基盤を支えてくださった九州大学次世代挑戦的研究プロジェクトにも心より感謝申し上げます。

さらに、長きにわたり支えてくれた家族や友人たちにも感謝の意を表します。彼らの励ましと理解があったからこそ、学びを続けることができました。

最後に、この研究に関わるすべての方々に、心より感謝申し上げます。本論文が少しでも学術的な貢献を果たし、社会の発展に寄与することを願っております。

## 用語集

**櫛田川流域**：本論文では経済圏・文化圏・生活圏視点の流域定義から、櫛田川が流下した松阪市・明和町・多気町の三つの行政区画を櫛田川流域と呼ぶ。

**太陽光発電（太陽光発電システム・PV）**：本論文の太陽光発電（太陽光発電システム）は、主に太陽光を直接電気に変換する地上設置型の太陽光発電システムシステムを指す、PV（Photovoltaic）と略称する。

**土地利用（土地被覆）**：土地利用は、人間が土地をどのように使用しているか、またはその目的を指す。本研究ではLULC（LAND-USE and LAND-COVER）と略称する。

**単位流域（分割流域 or 小流域）**：特定の地理的または水文的特性に基づいて区分された比較的小さな集水域を指す。小流域は地形的に明確な分水嶺で区切られ、水が一つの出口に集まるエリアであり。日本の国土交通省や地方自治体は、小流域単位で治水計画や水質管理を行うことが多い。

**標高（DEM）**：デジタル標高（DEM）は、地形の標高データをデジタル形式で表現したものの。本研究における標高データは、国土地理院の基盤情報公開データ（10m 解像度）より作成している。

**傾斜角度（SLOPE）**：傾斜角度（SLOPE）は、地表面の傾き具合を示す角度、単位は「度（°）」で表す。DEMデータから計算し、隣接するグリッド間の標高差と距離を計算して傾斜角度を求める。

**傾斜方向（DIRECTION）**：傾斜方向（DIRECTION）は、地形の傾斜面がどの方向を向いているかを示す地理的パラメーター。方位角として表現され、は0°（北）から時計回りに360°までの範囲で記録する。

**地上開度（OPENNESS）**：地上開度（OPENNESS）は、地表面から見た空の開放度を表す指標。数値は0から1の範囲で表され、1は完全開放、0は完全遮蔽である。

**機械学習（ML）**：機械学習（ML）とは、大量のデータを利用して特定のタスクを遂行する方法やモデルを学習し、そのタスクを繰り返し改善する技術のことである。本研究で使

う統計分析・ディープラーニングなどの手法の総称でもある。

**ランダムフォレスト (RF)**：ランダムフォレストはアンサンブル機械学習アルゴリズムである。データの線形性を前提とせず、複雑なパターンも学習可能。本研究においては、土地利用の分類で使うモデルである。

**Deep Lab**：DeepLab は、Google によって開発されたディープラーニングベースのアルゴリズムで、画像内の各ピクセルを特定のカテゴリ（例：道路、建物、空など）に分類する技術である。本研究において、太陽光発電システムの抽出に使う。

**一元配置分散分析 (ANOVA)**：は、統計学で使用される手法の一つで、複数のグループ間で平均値が統計的に有意に異なるかどうかを検定するための方法である。

**GWR モデル**：GWR は、空間データを分析するための統計モデルで、地理的な位置ごとに異なる関係性を推定する手法である。本研究は、異なる地理的条件が温熱環境の変化に与える影響を分析し、地域特有の要因を深く理解するために使う。

**OLS モデル**：OLS は最小二乗法モデルも呼ばれ、目的変数（従属変数）と説明変数（独立変数）との線形関係をモデル化し、その関係を表す回帰係数を推定するモデルである。

**人口減少シナリオ**：人口減少シナリオは、地域の人口が減少していく状況を予測・分析するための仮想的なシナリオであり、移住や移民の減少など、人口動態の要因を基に構築される。

**土地利用シナリオ**：土地利用シナリオは、将来の人口変動に基づいて、土地利用の在り方を複数パターンに予測する仮想的なシナリオである。本研究において、2050 年の三種類人口変動シナリオから、さらにそれぞれ 3 種類に分けて、総計 9 種類のシナリオを作成している。

**農地転用**：農地を本来の農業目的以外に利用するために転用すること。本研究は、農地から太陽光発電 (PV) への転用を指す。

**農業従事者**：農業活動に従事する人々を指し、農作物の栽培、収穫、管理、販売などを行う。本研究における農業従事者数は、農林業センサス (2020) の調査データから計算する。

**管理作業量**：農地や農作物の維持・管理に必要な作業時間や労力を指す。

**水田 (PF)**：水田 (Paddy Field) は、水を満たした状態で稲を栽培する農地。櫛田川流域における主な農地である。

**茶畑 (TF)**：茶畑 (Tea Plantation) は、茶の葉を栽培する農地。櫛田川流域における主な経済作物 (Economic Crops) であり、中山間地域に分布している。

**豆畑 (BF)**：豆畑 (Legume Field) は、大豆やエダマメ、小豆などの豆類を栽培する農地。

**麦畑 (WF)**：麦畑 (Wheat Field) は、小麦、大麦、ライ麦などの穀物を栽培する農地。

**リモートセンシング**：リモートセンシングとは、地上に設置した機器や人工衛星、航空機などを利用して、地球や他の天体の表面に関する情報を遠隔的に取得する技術や方法を指す。本研究では、主に Landsat シリーズおよび Sentinel シリーズのリモートセンシングデータを使用する。

**GIS (Geographic Information System・地理空間情報システム)**：GIS は、一般的に地理的データ (空間データ) を収集・管理・解析・表示するためのシステムや技術のことを指すが、本論文における GIS では、特に空間情報処理ソフトウェア「ArcGIS」を指す。

**NDVI (Normalized Difference Vegetation Index・正規化植生指数)**：NDVI は、リモートセンシングデータを用いて、地表における植生の成長状況や健康状態を評価するための指標である。

**MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index・修正正規化水指数)**：MNDWI は、衛星リモートセンシングデータを利用して水体を検出するための指標です。従来の NDWI を改良したもので、都市地域や建造物に隣接する水体の検出精度を向上させる目的で設計されている。

**NDBI (Normalized Difference Built-up Index・都市化指数)**：NDBI は、リモートセンシングデータを用いて地表の建造物や都市化地域を特定するための指標であり、建物や都市構造物は短波赤外線を強く反射し、植生や水体よりも高い反射率を持つ特性を利用して計算される。

**EVI (拡張植生指数)**：EVI は、リモートセンシングデータを利用して植生の密度や健康状

態を評価する指標であり、濃密な植生や大気の影響をより正確に評価するための指標である。

**NDSI (Normalized Difference Soil Index・正規化土壌指数)**：NDSIは、リモートセンシングデータを用いて地表の土壌状況を評価するための指標である。

**MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index・土壌調整植生指数)**：MSAVIは、リモートセンシングデータを利用して植生の状態を評価する指標の一つで、土壌の反射の影響を最小限に抑えるように設計されている。

**地表面温度 (LST)**：LSTは、地球の地表が放射する温度を指し、地表の熱特性を反映する重要な環境パラメータで、本研究ではリモートセンシング技術を用いて観測する。

**地表面温度差 (LSTD)**：LSTDとは、異なる地域や時間帯における地表面温度 (LST) の差異を指す。特定の場所や条件での温度変化を比較するために用いられる指標であり、環境の変化や地域特性を評価する際に重要である。

**生態系サービス (Ecosystem Services: ES)**：生態系サービスとは、自然環境が人間社会に提供する恩恵や基本的な生活の基盤から文化的な豊かさのことを指す。本研究では、生態系サービスを資源や作物における供給サービス、自然がもたらすさまざまな貢献における調整サービス、人間や社会における文化的サービスの三つのサービスに分けられる。

**InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) モデル**：InVEST (統合生態系サービス評価とトレードオフ分析) は、生態系サービスを定量化し、それらの価値を評価するためのソフトウェアツール群である。

## 図表リスト

図表番号	図表名	ページ
<b>図面</b>		
第 1 章		
図 1-1	日本全国耕作放棄・転用面積推移	11
図 1-2	土砂災害リスク地区に設置された太陽光発電設備	14
図 1-3	本研究の流れ	24
第 2 章		
図 2-1	櫛田川流域の位置情報	31
図 2-2	研究における単位流域（分割流域）の設定	33
図 2-3	櫛田川流域における中流域の定義	33
図 2-4	本章での研究フロー	34
図 2-5	MNDVI の変化（一部のエリア）	36
図 2-6(a)	学習サンプルにおける 3 種類農地の NDVI 変化	37
図 2-6(b)	RF モデル分類結果の NDVI 変化	37
図 2-7	農地分類の結果及び異なるタイプの農地の密度	38
図 2-8	農地転用 PV の抽出手順	39
図 2-9	PV に転用された農地の分布状況	40
図 2-10	農地と転用地における各地理的特徴の平均値	44
図 2-11	各分割流域における農業従事者人口の変化率	47
第 3 章		
図 3-1	櫛田川流域における土地利用現状（6 種類）	55
図 3-2	PV における地表面温度変化の評価モデル	59
図 3-3	PV 位置情報特定モデルの input&output	60
図 3-4	PV の設置密度と分布状況	61
図 3-5	PV の面積と数量の変化状況	61
図 3-6	結果検証用データの観測所位置	65
図 3-7	櫛田川流域の年間 LST	66
図 3-8	櫛田川流域年間 LST の平均値	66
図 3-9	両観測所における観測値と計算値の検証	66
図 3-10	2014-2023 年における櫛田川流域の LSTD（地表面温度差）	67
図 3-11	PV ポリゴン内の LSTD	68
図 3-12	2 時期の各季節にわたる PV が起こした LSTD 分析	69

図 3-13	LSTD 及び各変数の空間分布状況 (500m メッシュ)	70
図 3-14	各変数の統計情報 (500m メッシュ)	70
図 3-15	GWR モデルにおける各変数の結果及び相関係数	74
第 4 章		
図 4-1	本章の研究フロー	84
図 4-2	櫛田川流域における 2023 年 LULC	88
図 4-3	水源水質機能におけるインプットデータ	93
図 4-4	土壌保持機能におけるインプットデータ	94
図 4-5	供給サービス①農地面積	98
図 4-6	供給サービス②経済的価値	98
図 4-7	供給サービス③生産便利性	99
図 4-8	供給サービス④再生可能エネルギー発電量	99
図 4-9	調整サービス①炭素貯留機能	100
図 4-10	調整サービス②水源水質	100
図 4-11	調整サービス③土壌保持	101
図 4-12	調整サービス④生息地の質	101
図 4-13	文化的サービス①アクセスビリティ	102
図 4-14	文化的サービス②PA における景観評価	102
図 4-15	各シナリオの人口密度と農地管理範囲	104
図 4-16	人口減少における農地管理シナリオ	106
図 4-17	マクロ減少型・生産性優先評価	108
図 4-18	マクロ減少型・エネルギー優先評価	109
図 4-19	マクロ減少型・生態系保護優先評価	110
図 4-20	現状進行型・生産性優先評価	111
図 4-21	現状進行型・エネルギー優先評価	112
図 4-22	現状進行型・生態系保護優先評価	112
図 4-23	コンパクト型・生産性優先評価	113
図 4-24	コンパクト型・エネルギー優先評価	114
図 4-25	コンパクト型・生態系保護優先評価	115
表		
第 1 章		
表 1-1	太陽光発電の買取価格 2012-2016	15
表 1-2	太陽光発電の買取価格 2016-2022	15
第 2 章		
表 2-1	本章で使用した公開データ情報	32

表 2-2	混同行列 (Confusion Matrix)	37
表 2-3	農地分類の結果	38
表 2-4	PV の細分枚数と面積	41
表 2-5	各種農地の転用状況の統計	41
表 2-6	農地と転用地における各地理的特徴の平均値	42
表 2-7	一元配置分散分析の結果	45
表 2-8	農地転用における要因	45
表 2-9	回帰分析の結果	47
第 3 章		
表 3-1	OLS モデルの結果	72
表 3-2	OLS モデルにおける各変数の詳細	73
表 3-3	GWR モデルの結果	73
表 3-4	両モデルの結果比較	73
表 3-5	年間新設 PV 地理的特徴	75
表 3-6	年間新設 PV の統計情報	75
第 4 章		
表 4-1	Sentinel-2A 各バンドの詳細	87
表 4-2	各 LULC の面積	88
表 4-3	本章における計算する 8 種類 ES	90
表 4-4	各種農地の経済価値	91
表 4-5	生息地の質における Threat Data	95
表 4-6	脅威源が各 LULC に与える脅威性 (Habitat Sensitivity)	96
表 4-7	各種農地管理シナリオにおける面積	107

## 付録

## 付録1 プログラム

### A. 土地利用分類のプログラム (based on Google earth engine)

```
Map.addLayer(table2)
var aoi = table2
var empty = ee.Image().toByte();
var outline = empty.paint({
  featureCollection:aoi,
  color:0,
  width:3
});
Map.addLayer(outline, {palette: "ff0000"}, "outline");
//Function to mask the clouds in Sentinel-2
function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');
  // Bits 10 and 11 are clouds and cirrus, respectively.
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));
  return image.updateMask(mask).divide(10000);
}
//Build the Sentinel 2 collection, filtered by date, bounds and percentage of cloud cover
var dataset = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterDate('2022-12-01','2023-12-31')
  .filterBounds(aoi)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',))
  .map(maskS2clouds);
print("Sentinel 2 Image Collection",dataset);
var dem = ee.Image("NASA/NASADEM_HGT/001")
// Construct Classification Dataset
// RS Index Cacluate(NDVI¥NDWI¥EVI¥BSI)
var add_RS_index = function(img){
```

```

var ndvi = img.normalizedDifference(['B8',
'B4']).rename('NDVI').copyProperties(img,['system:time_start']);
var ndwi = img.normalizedDifference(['B3',
'B8']).rename('NDWI').copyProperties(img,['system:time_start']);
var evi = img.expression('2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1))',
{
  'NIR': img.select('B8'),
  'RED': img.select('B4'),
  'BLUE': img.select('B2')
}).rename('EVI').copyProperties(img,['system:time_start']);
var bsi = img.expression('((RED + SWIR1) - (NIR + BLUE)) / ((RED + SWIR1) + (NIR
+ BLUE)) ',
{
  'RED': img.select('B4'),
  'BLUE': img.select('B2'),
  'NIR': img.select('B8'),
  'SWIR1': img.select('B11'),

}).rename('BSI').copyProperties(img,['system:time_start']);

var ibi = img.expression('(2 * SWIR1 / (SWIR1 + NIR) - (NIR / (NIR + RED) + GREEN
/ (GREEN + SWIR1))) / (2 * SWIR1 / (SWIR1 + NIR) + (NIR / (NIR + RED) + GREEN
/ (GREEN + SWIR1)))', {
  'SWIR1': img.select('B11'),
  'NIR': img.select('B8'),
  'RED': img.select('B4'),
  'GREEN': img.select('B3')
}).rename('IBI').copyProperties(img,['system:time_start']);
return img.addBands([ndvi, ndwi, evi, bsi, ibi]);
};

var dataset = dataset.map(add_RS_index);
var bands = ['B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8','B8A','B11','NDVI','NDWI','BSI'];
var imgcol_median = dataset.select(bands).median();
var aoi_dem = dem.select('elevation').clip(aoi).rename('DEM');
var construct_img = imgcol_median.addBands(aoi_dem).clip(aoi);

```

```

var train_points = ground.merge(grass).merge(building).merge(tree).merge(water);
var train_data= construct_img.sampleRegions({
  collection: train_points,
  properties: ['landcover'],
  scale: 10
});

var withRandom = train_data.randomColumn('random');
var split = 0.7;
var trainingPartition = withRandom.filter(ee.Filter.lt('random', split));
var testingPartition = withRandom.filter(ee.Filter.gte('random', split));
var rf = ee.Classifier.smileRandomForest({
  numberOfTrees: 20,
  bagFraction: 0.8
}).train({
  features: trainingPartition,
  classProperty: 'landcover',
  inputProperties: bands
});

var img_classification = construct_img.classify(rf);
var test = testingPartition.classify(rf);
var confusionMatrix = test.errorMatrix('landcover', 'classification');
print('confusionMatrix',confusionMatrix);
print('overall accuracy', confusionMatrix.accuracy());
print('kappa accuracy', confusionMatrix.kappa());
Map.centerObject(aoi)
Map.addLayer(aoi);
Map.addLayer(img_classification.clip(aoi), {min: 1, max: 4, palette: ['orange', 'blue',
'green','yellow']});
var class1=img_classification.clip(aoi)

Export.image.toDrive({
  image: class1,
  description: 'rfclass',
  fileNamePrefix: 'rf',

```

```
folder: "class",  
scale: 10,  
region: aoi,  
maxPixels: 1e13,  
crs: "EPSG:4326"  
});
```

## B. 地表面温度計算のプログラム (based on Google earth engine)

```
//smw algorithm
var SMWcoef = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/SMW_coefficients.js');

// Function to create a lookup between two columns in a
// feature collection
var get_lookup_table = function(fc, prop_1, prop_2) {
  var reducer = ee.Reducer.toList().repeat(2);
  var lookup = fc.reduceColumns(reducer, [prop_1, prop_2]);
  return ee.List(lookup.get('list'));
};

exports.addBand = function(landsat){

  var wrap = function(image){

    // Select algorithm coefficients
    var coeff_SMW =
ee.FeatureCollection(ee.Algorithms.If(landsat==='L4',SMWcoef.coeff_SMW_L4,
    ee.Algorithms.If(landsat==='L5',SMWcoef.coeff_SMW_L5,
    ee.Algorithms.If(landsat==='L7',SMWcoef.coeff_SMW_L7,
    ee.Algorithms.If(landsat==='L8',SMWcoef.coeff_SMW_L8,
    SMWcoef.coeff_SMW_L9)))));

    // Create lookups for the algorithm coefficients
    var A_lookup = get_lookup_table(coeff_SMW, 'TPWpos', 'A');
    var B_lookup = get_lookup_table(coeff_SMW, 'TPWpos', 'B');
    var C_lookup = get_lookup_table(coeff_SMW, 'TPWpos', 'C');

    // Map coefficients to the image using the TPW bin position
    var A_img = image.remap(A_lookup.get(0),
A_lookup.get(1),0.0,'TPWpos').resample('bilinear');
    var B_img = image.remap(B_lookup.get(0),
B_lookup.get(1),0.0,'TPWpos').resample('bilinear');
```

```

    var C_img = image.remap(C_lookup.get(0),
C_lookup.get(1),0.0,'TPWpos').resample('bilinear');

    // select TIR band
    var tir = ee.String(ee.Algorithms.If(landsat==='L9','B10',
        ee.Algorithms.If(landsat==='L8','B10',
            ee.Algorithms.If(landsat==='L7','B6_VCID_1',
                'B6'))));
    // compute the LST
    var lst = image.expression(
        'A*Tb1/em1 + B/em1 + C',
        {'A': A_img,
        'B': B_img,
        'C': C_img,
        'em1': image.select('EM'),
        'Tb1': image.select(tir)
    }).updateMask(image.select('TPW').lt(0).not());

    return image.addBands(lst.rename('LST'))
};
return wrap
}

//broadband_emiss
var ASTERGED =
require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/ASTER_bare_emiss.js')

exports.addBand = function(dynamic){
    var wrap = function(image){

        // get ASTER emissivity
        var aster = ee.Image("NASA/ASTER_GED/AG100_003")
            .clip(image.geometry());

        var orig = aster.select('emissivity_band10').multiply(0.001);

```

```

var dynam = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',{
  'fvc':image.select('FVC'),
  'em_bare':ASTERGED.emiss_bare_band10(image)});
var em10 = ee.Image(ee.Algorithms.If(dynamic,dynam,orig));

orig = aster.select('emissivity_band11').multiply(0.001);
dynam = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',{
  'fvc':image.select('FVC'),
  'em_bare':ASTERGED.emiss_bare_band11(image)});
var em11 = ee.Image(ee.Algorithms.If(dynamic,dynam,orig));

orig = aster.select('emissivity_band12').multiply(0.001);
dynam = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',{
  'fvc':image.select('FVC'),
  'em_bare':ASTERGED.emiss_bare_band12(image)});
var em12 = ee.Image(ee.Algorithms.If(dynamic,dynam,orig));

orig = aster.select('emissivity_band13').multiply(0.001);
dynam = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',{
  'fvc':image.select('FVC'),
  'em_bare':ASTERGED.emiss_bare_band13(image)});
var em13 = ee.Image(ee.Algorithms.If(dynamic,dynam,orig));

orig = aster.select('emissivity_band14').multiply(0.001);
dynam = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',{
  'fvc':image.select('FVC'),
  'em_bare':ASTERGED.emiss_bare_band14(image)});
var em14 = ee.Image(ee.Algorithms.If(dynamic,dynam,orig));

var bbe = image.expression('0.128 + 0.014*em10 + 0.145*em11 + 0.241*em12 +
0.467*em13 + 0.004*em14',
  {'em10':em10,'em11':em11,'em12':em12,'em13':em13,'em14':em14});

return image.addBands(bbe.rename('BBE'))
}

```

```

    return wrap
  }

  //compute FVC
  var FVCfun = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/compute_FVC.js')
  var ImagewithFVC = FVCfun.addBand(landsat)(image)

  exports.addBand = function(landsat){
    var wrap = function(image){

      var ndvi = image.select('NDVI')

      // Compute FVC
      var fvc = image.expression('((ndvi-ndvi_bg)/(ndvi_vg - ndvi_bg))**2',
        {'ndvi':ndvi,'ndvi_bg':0.2,'ndvi_vg':0.86});
      fvc = fvc.where(fvc.lt(0.0),0.0);
      fvc = fvc.where(fvc.gt(1.0),1.0);

      return image.addBands(fvc.rename('FVC'));
    }
    return wrap
  };

  //compute LST
  // Total Precipitable Water
  var NCEP_TPW = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/NCEP_TPW.js')
  //cloud mask
  var cloudmask = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/cloudmask.js')
  //Normalized Difference Vegetation Index
  var NDVI = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/compute_NDVI.js')
  //Fraction of Vegetation cover
  var FVC = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/compute_FVC.js')
  //surface emissivity
  var EM = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/compute_emissivity.js')
  // land surface temperature
  var LST = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/SMWalgorithm.js')

```

```

// -----

var COLLECTION = ee.Dictionary({
  'L4': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LT04/C02/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LT04/C02/T1_L2'),
    'TIR': ['B6',],
    'VISW': ['SR_B1','SR_B2','SR_B3','SR_B4','SR_B5','SR_B7','QA_PIXEL']
  },
  'L5': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2'),
    'TIR': ['B6',],
    'VISW': ['SR_B1','SR_B2','SR_B3','SR_B4','SR_B5','SR_B7','QA_PIXEL']
  },
  'L7': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2'),
    'TIR': ['B6_VCID_1','B6_VCID_2'],
    'VISW': ['SR_B1','SR_B2','SR_B3','SR_B4','SR_B5','SR_B7','QA_PIXEL']
  },
  'L8': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2'),
    'TIR': ['B10','B11'],
    'VISW': ['SR_B1','SR_B2','SR_B3','SR_B4','SR_B5','SR_B6','SR_B7','QA_PIXEL']
  },
  'L9': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2'),
    'TIR': ['B10','B11'],
    'VISW': ['SR_B1','SR_B2','SR_B3','SR_B4','SR_B5','SR_B6','SR_B7','QA_PIXEL']
  }
});

exports.collection = function(landsat, date_start, date_end, geometry, use_ndvi){

```

```

// load TOA Radiance/Reflectance
var collection_dict = ee.Dictionary(COLLECTION.get(landsat));

var landsatTOA = ee.ImageCollection(collection_dict.get('TOA'))
    .filter(ee.Filter.date(date_start, date_end))
    .filterBounds(geometry)
    // .map(cloudmask.toa);

// load Surface Reflectance collection for NDVI
var landsatSR = ee.ImageCollection(collection_dict.get('SR'))
    .filter(ee.Filter.date(date_start, date_end))
    .filterBounds(geometry)
    .map(cloudmask.sr)
    .map(NDVI.addBand(landsat))
    .map(FVC.addBand(landsat))
    .map(NCEP_TPW.addBand)
    .map(EM.addBand(landsat, use_ndvi));

// combine collections
// all channels from surface reflectance collection
// except tir channels: from TOA collection
// select TIR bands
var tir = ee.List(collection_dict.get('TIR'));
var visw = ee.List(collection_dict.get('VISW'))
    .add('NDVI')
    .add('FVC')
    .add('TPW')
    .add('TPWpos')
    .add('EM');
var landsatALL = (landsatSR.select(visw).combine(landsatTOA.select(tir), true));

// compute the LST
var landsatLST = landsatALL.map(LST.addBand(landsat));

```

```
    return landsatLST;
};
```

↓

付録2 図表一覧  
図面

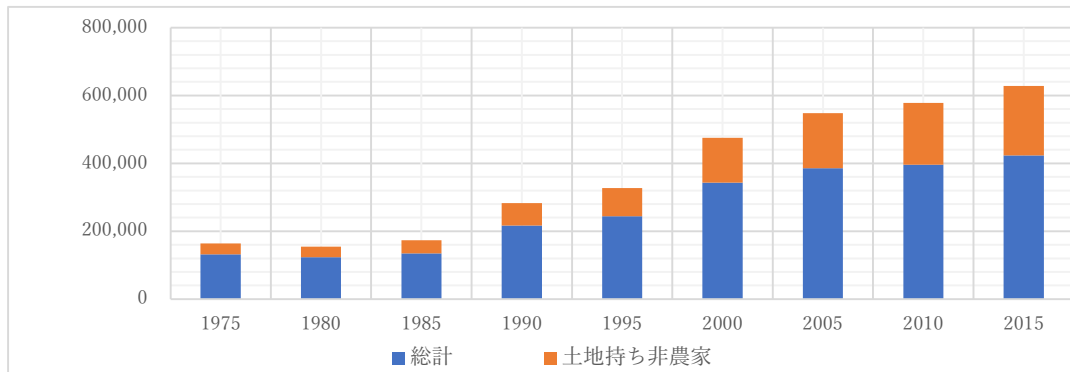


図 1-1 日本全国耕作放棄・転用面積推移 (ha) 「農林水産省 2020 農林業センサス」より作成

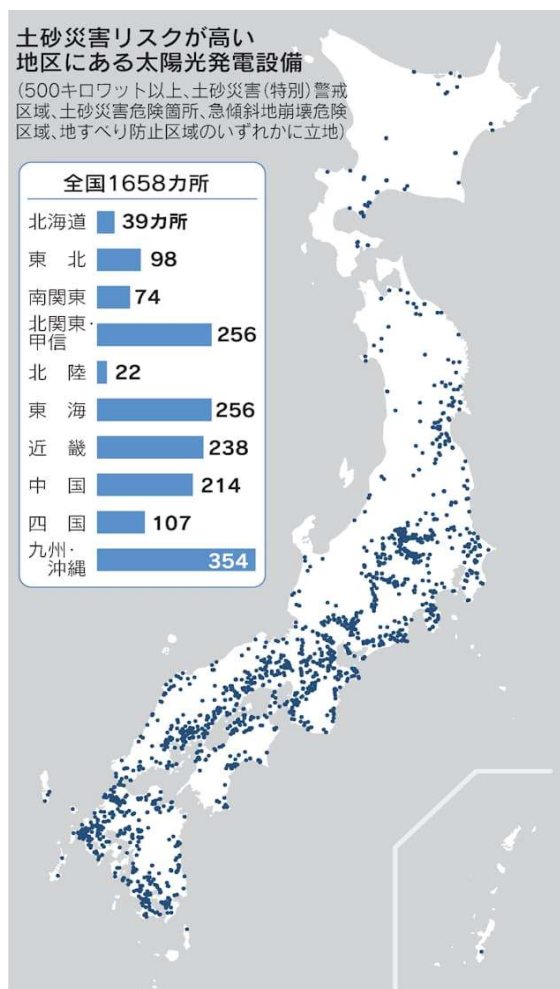


図 1-2 土砂災害リスク地区に設置された太陽光発電設備 (日本経済新聞より)

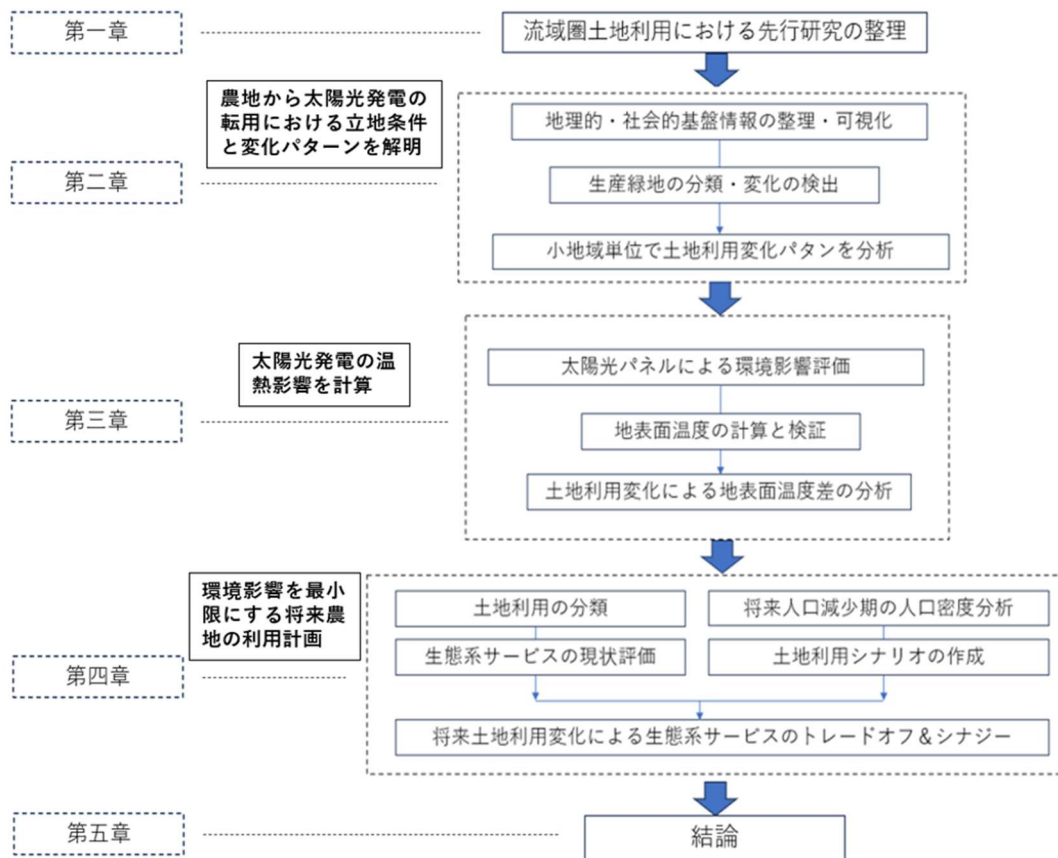


図 1-3 本研究の流れ

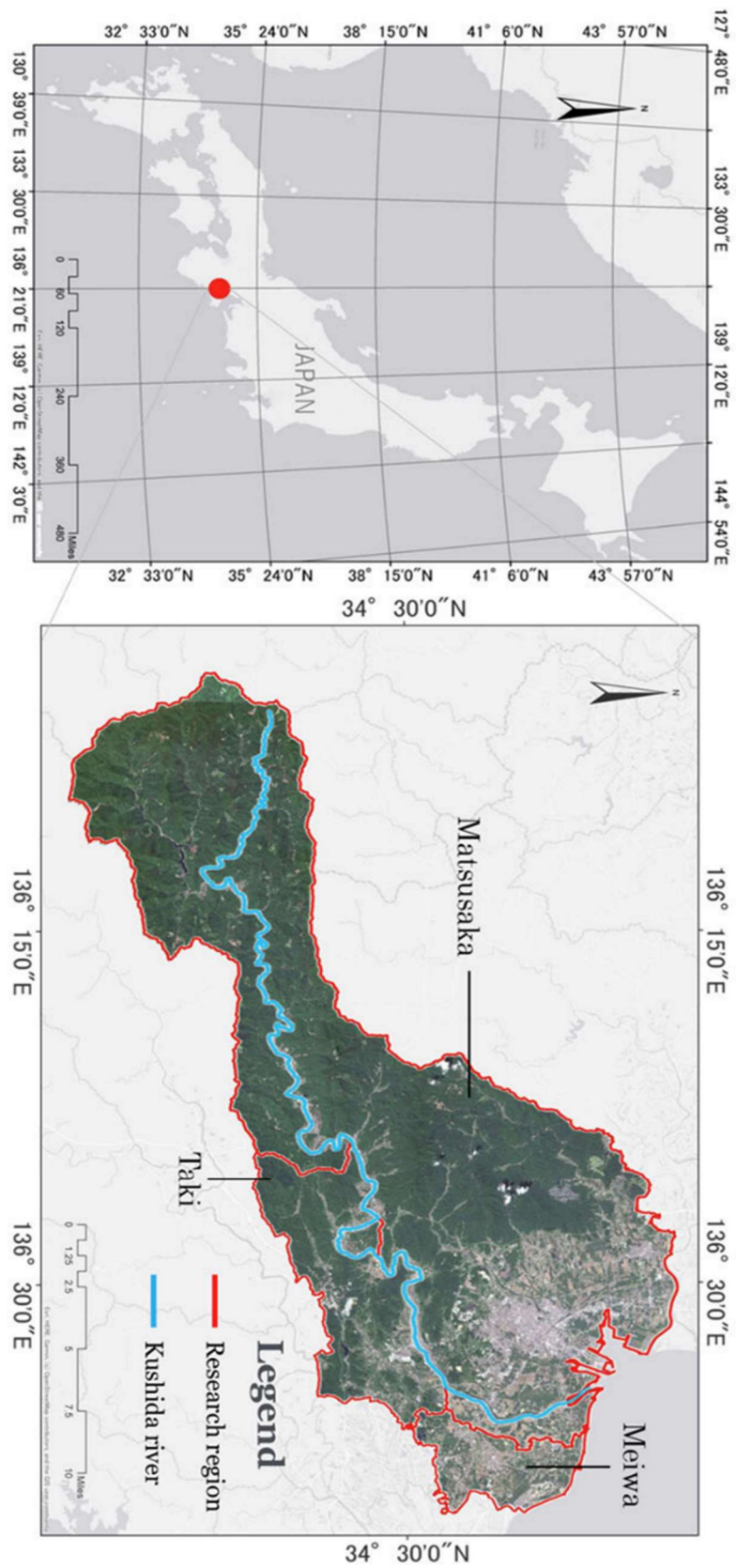


図 2-1 櫛田川流域の位置情報

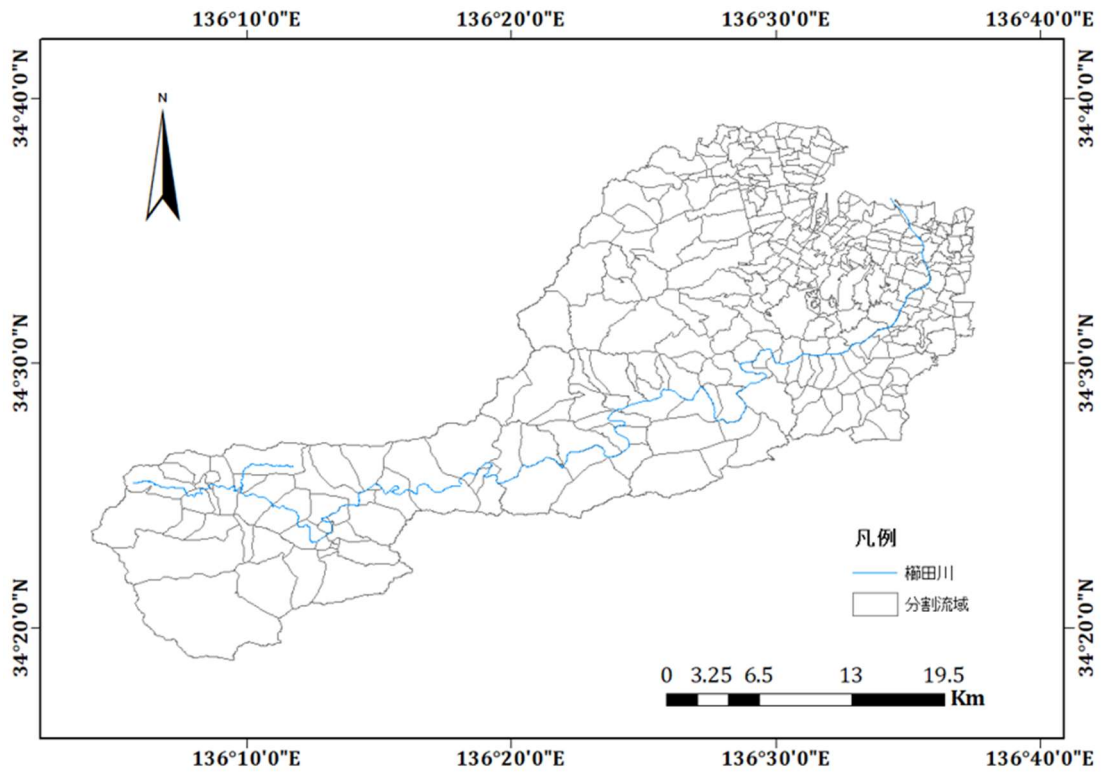


図 2-2 本研究における単位流域（分割流域）の設定

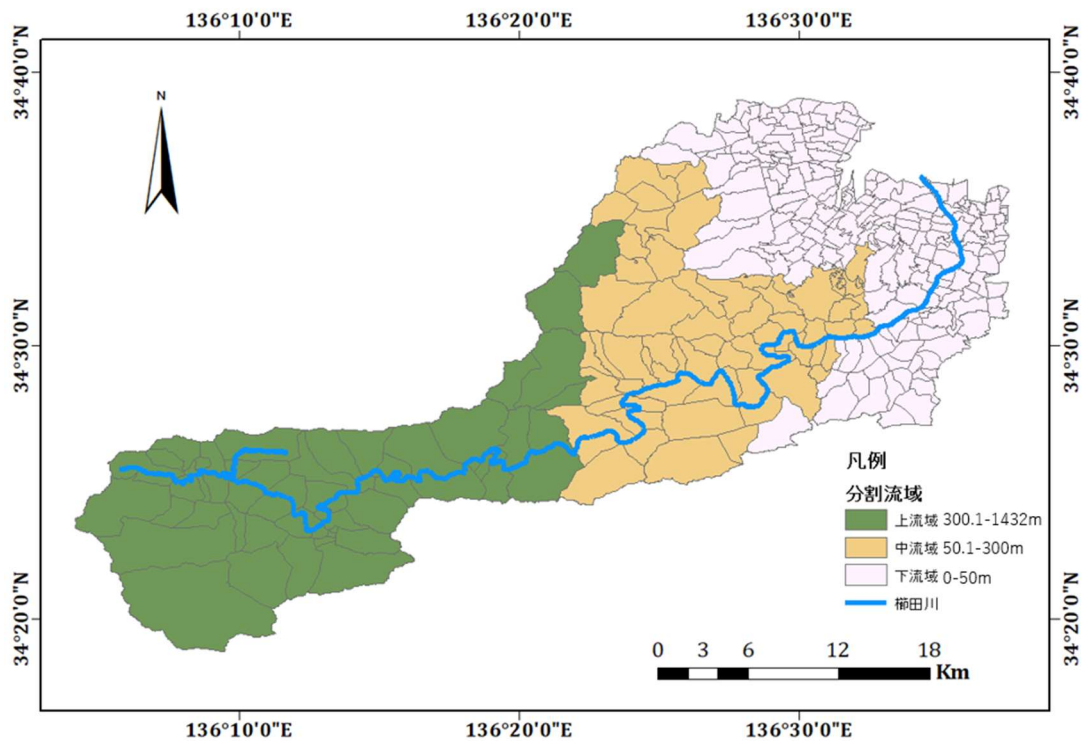


図 2-3 榑田川流域における中流域の定義

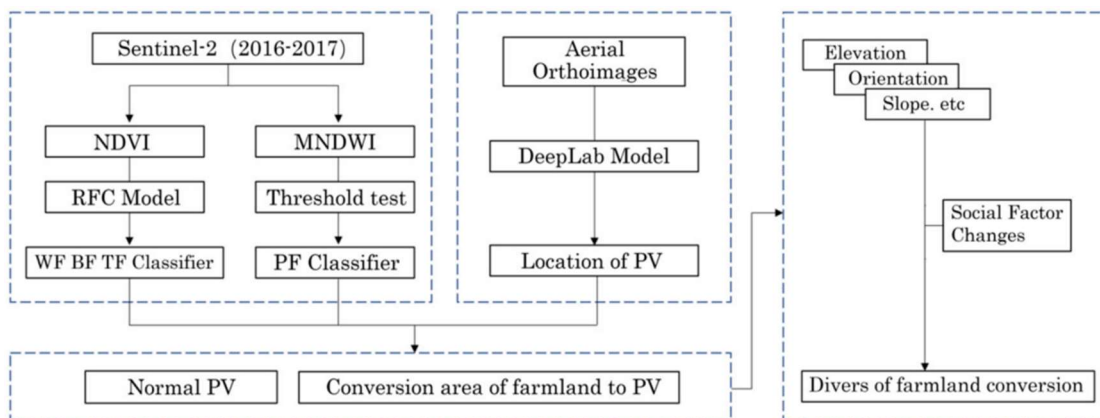
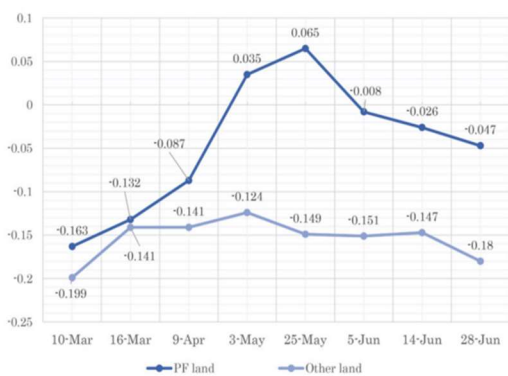
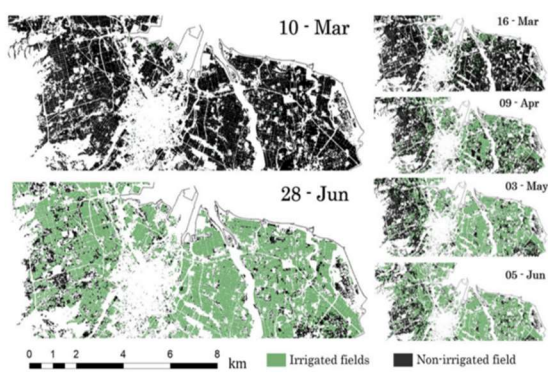


図 2-4 本章 (第二章) 研究フロー



(a)



(b)

図 2-5 MNDWI の変化



(a)



(b)

図 2-6(a) 学習サンプルにおける 3 種類農地の NDVI 変化。

図 2-6 (b) RF モデル分類結果の NDVI 変化。

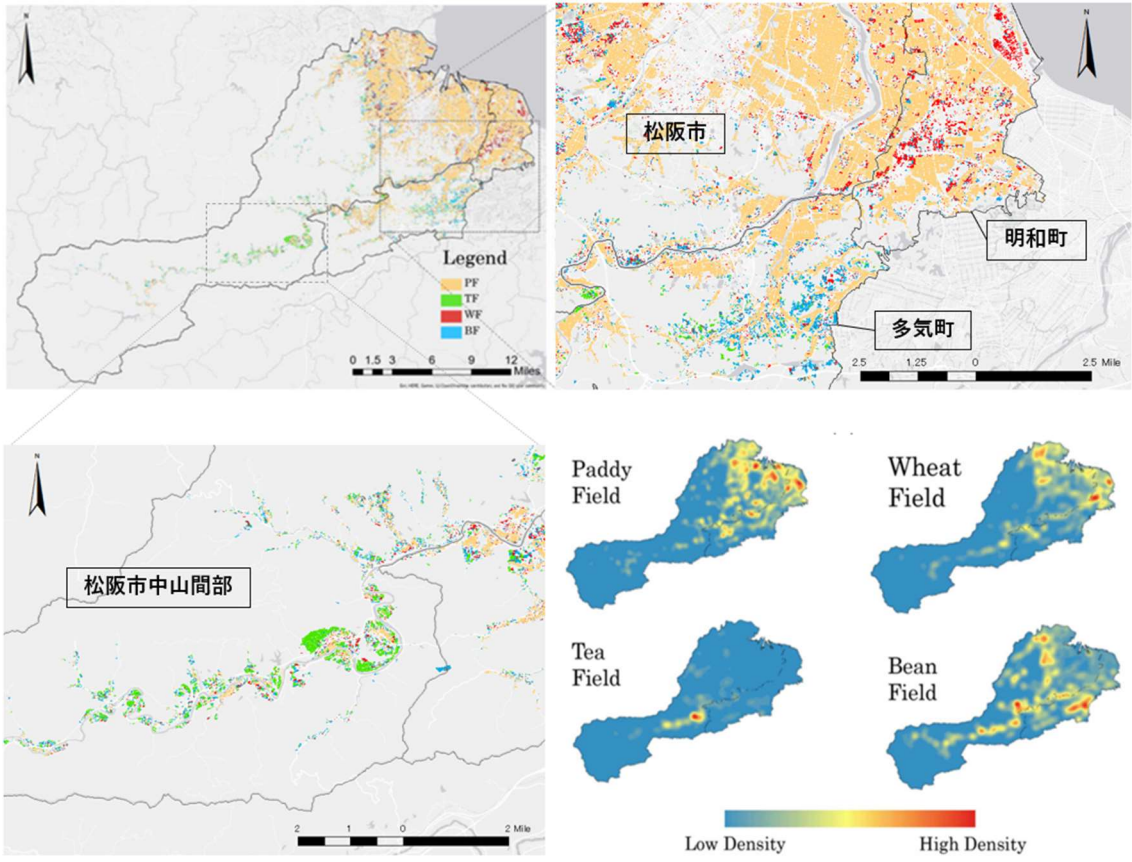


図 2-7 農地分類の空間分布と密度状況。

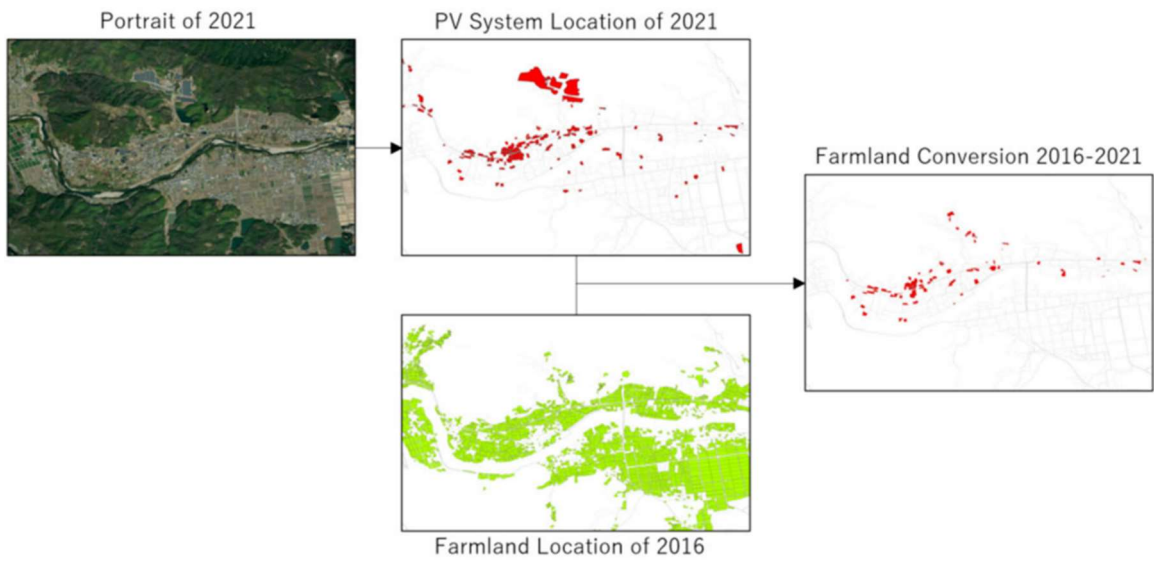
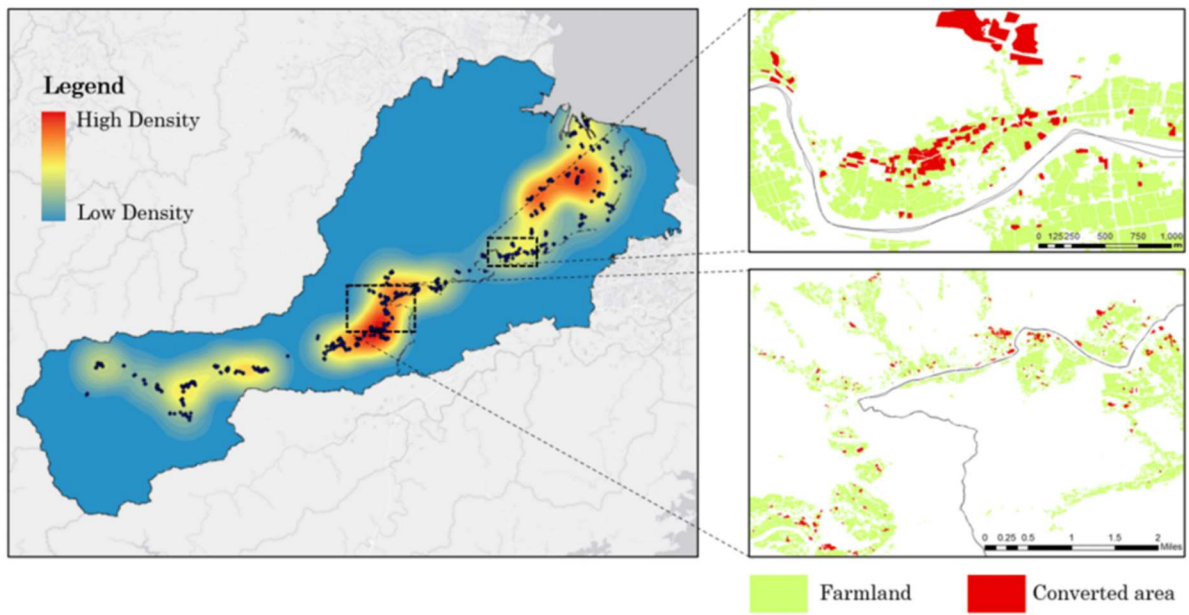
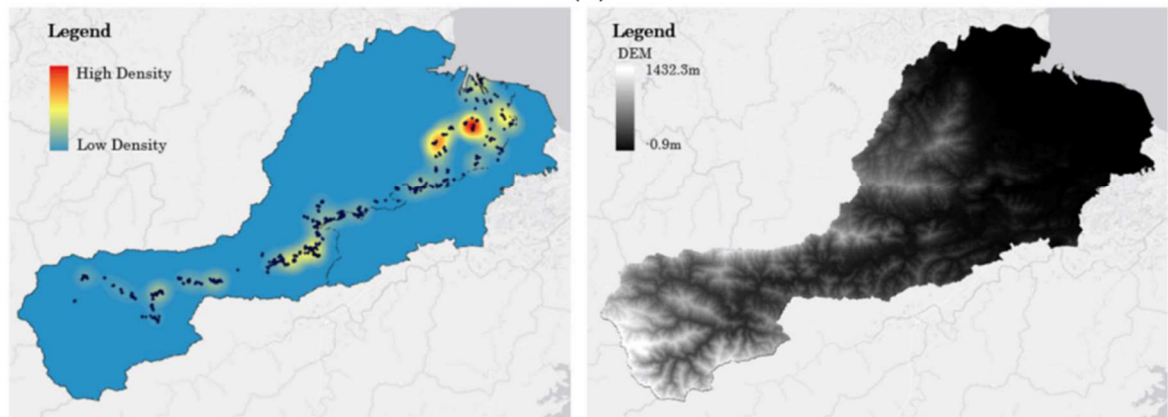


図 2-8 農地転用 PV の抽出手順



(a)



(b)

図 2-9 PV に転用された農地の分布状況

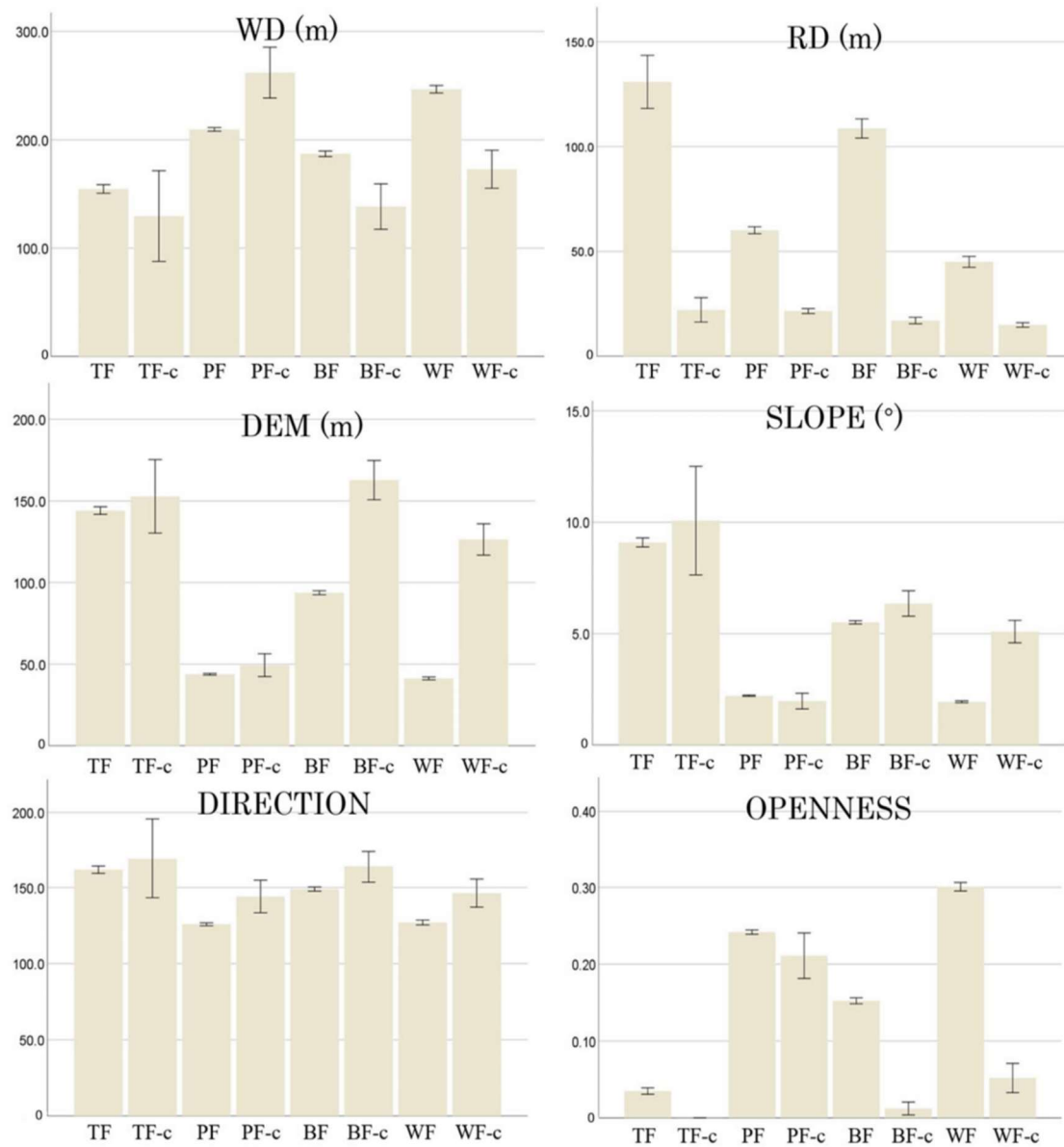


図 2-10 農地と転用地における各地理的特徴の平均値

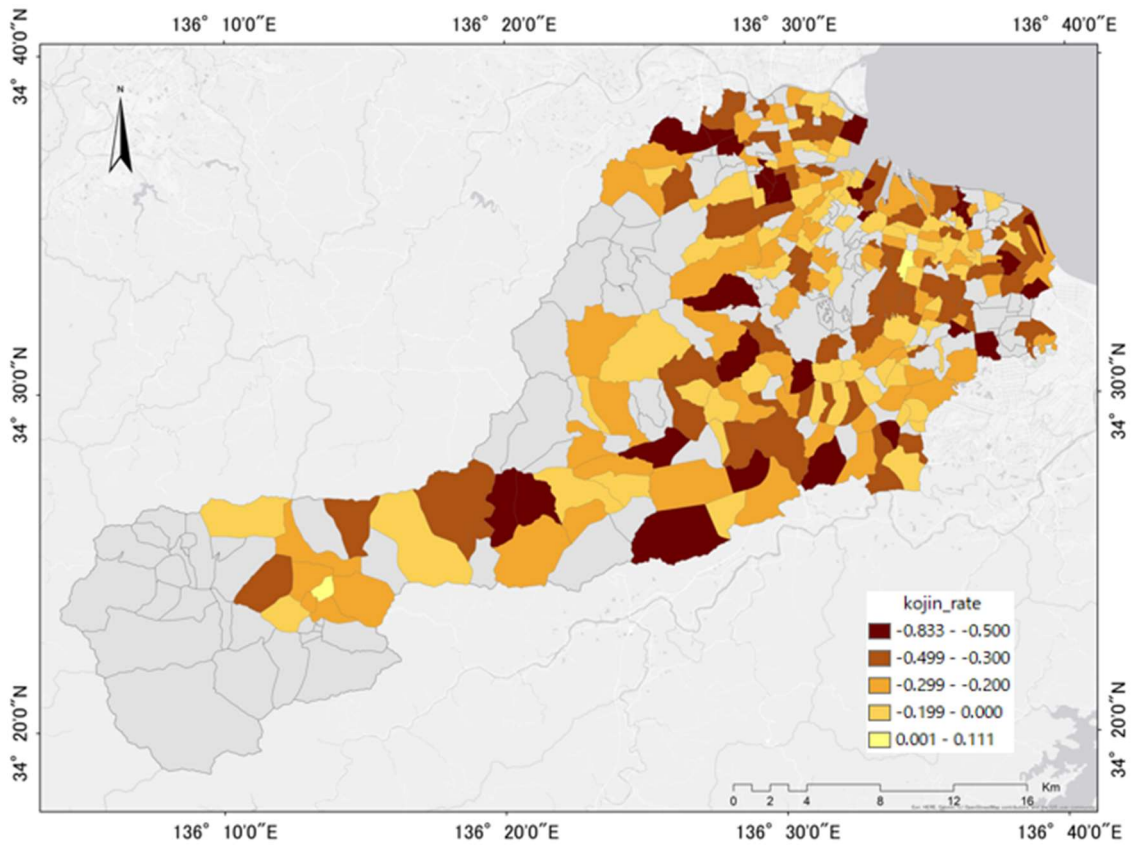


図 2-11 各分割流域における農業従事者人口の変化率(PFR)

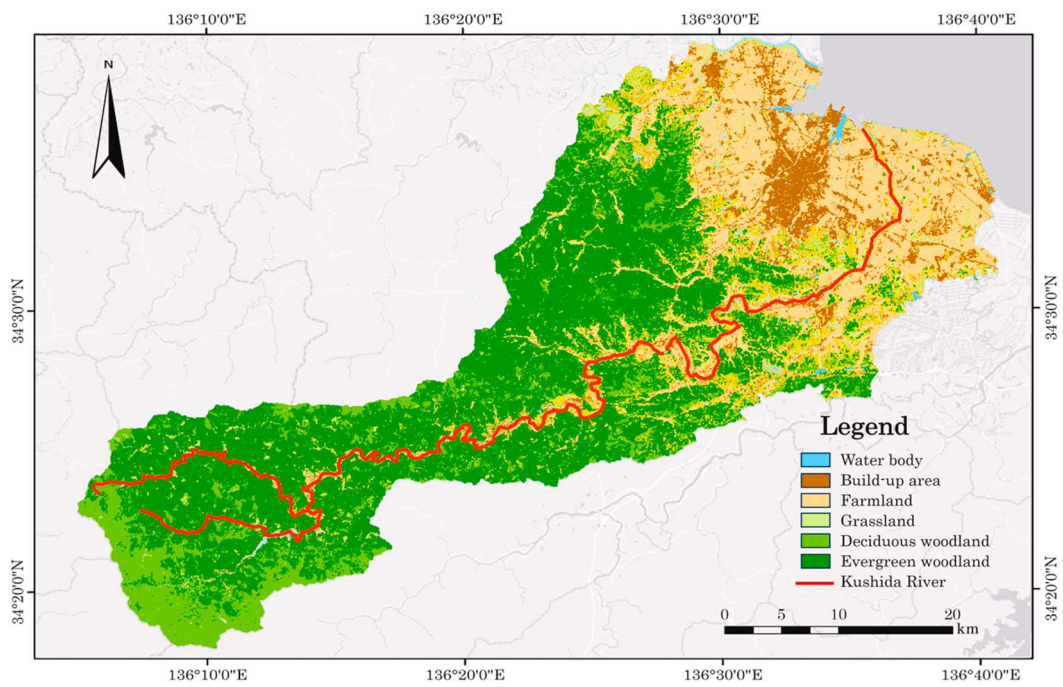


図 3-1 櫛田川流域における土地利用現状 (6 種類)

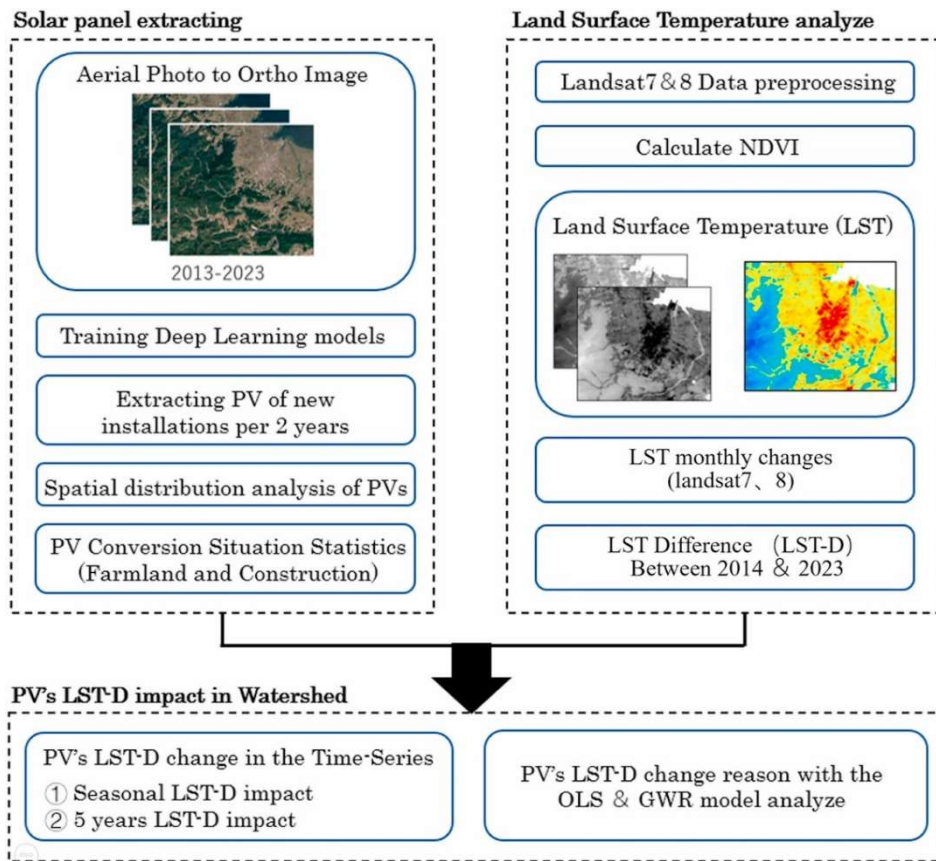


図 3-2 PV における地表面温度変化の評価モデル

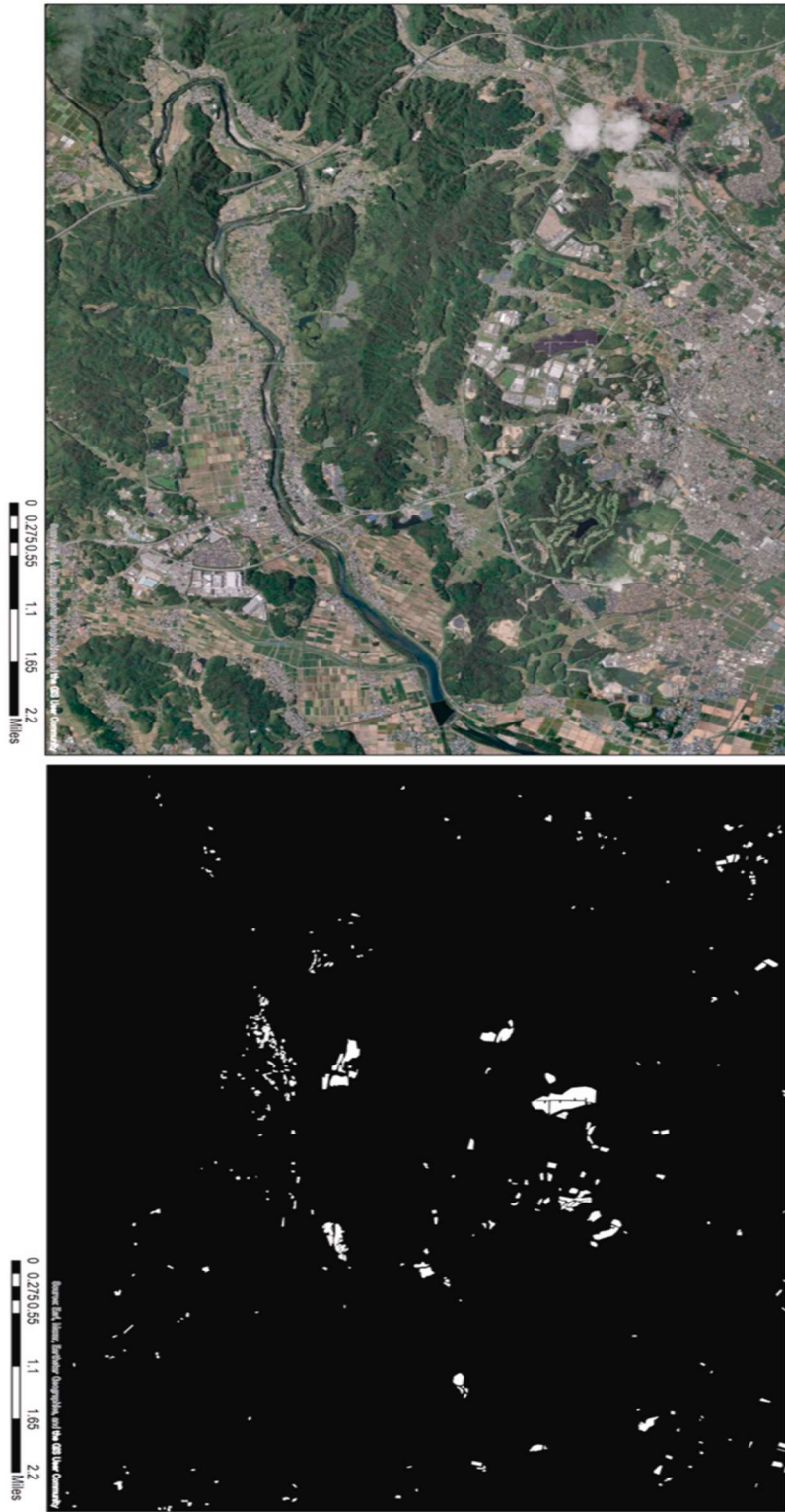


図 3-3 PV 位置情報特定モデルの input & output

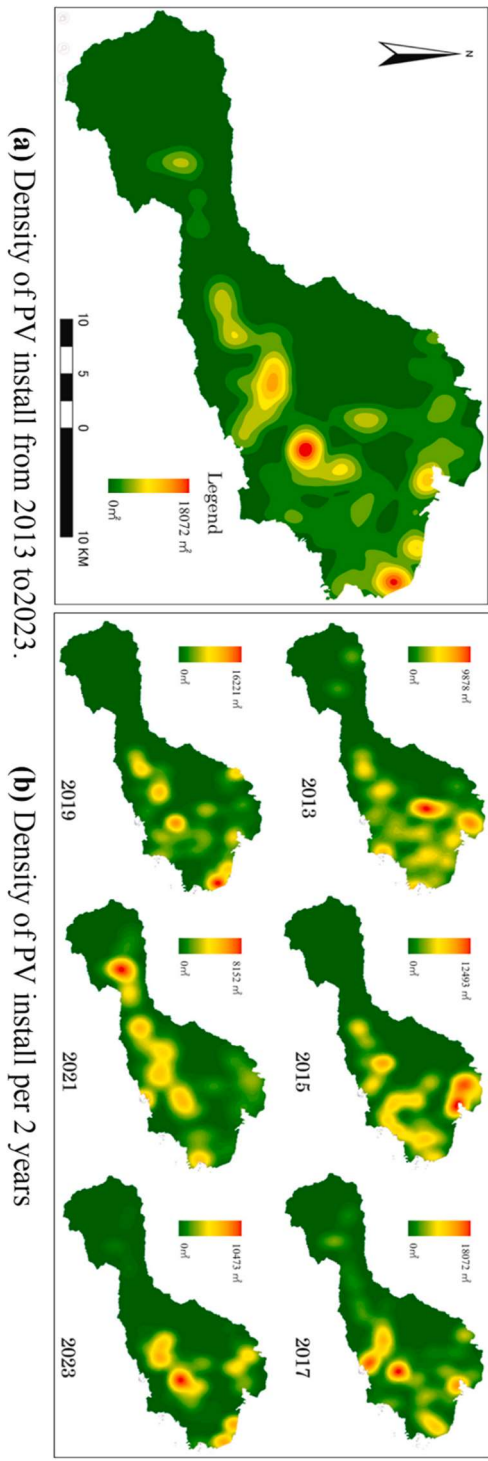
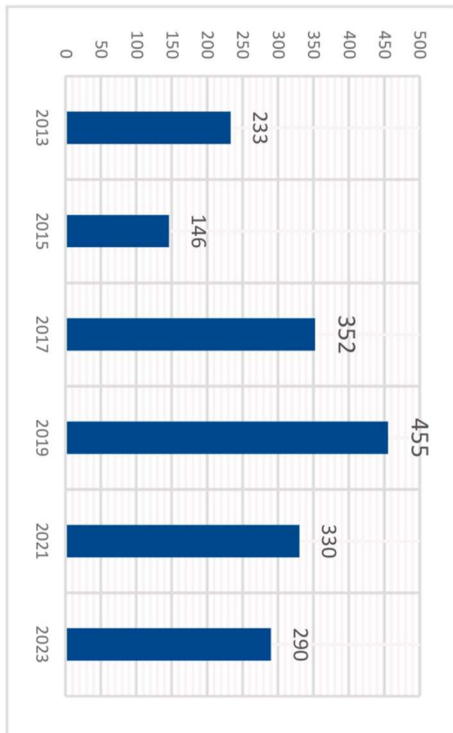
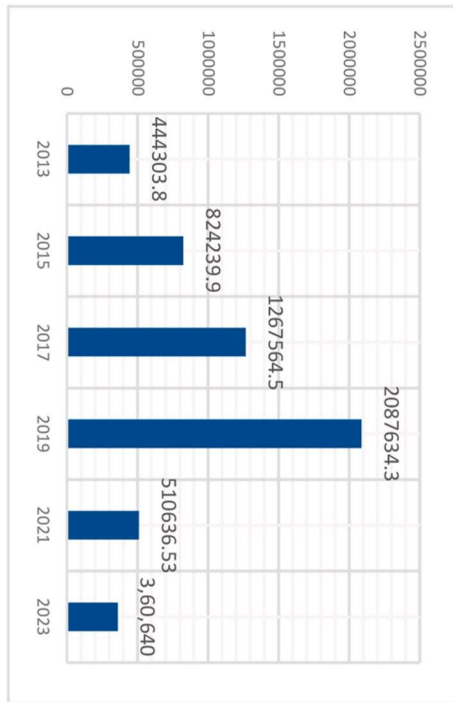


図 3-4 PV の設置密度分布状況



(a) Install PV area (m<sup>2</sup>) per 2 years. (b) Install PV number per 2 years

図 3-5 PV の面積と数量の変化状況

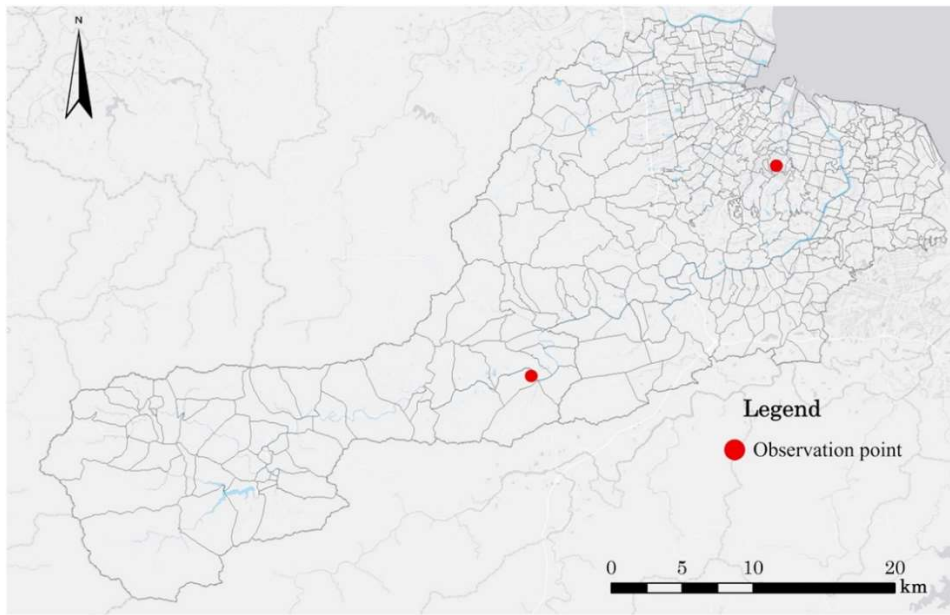


図 3-6 結果検証用データの観測所位置

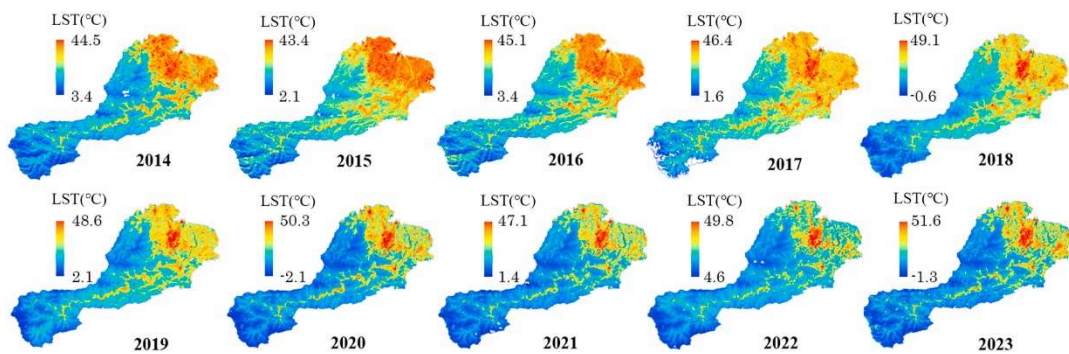


図 3-7 櫛田川流域の年間 LST

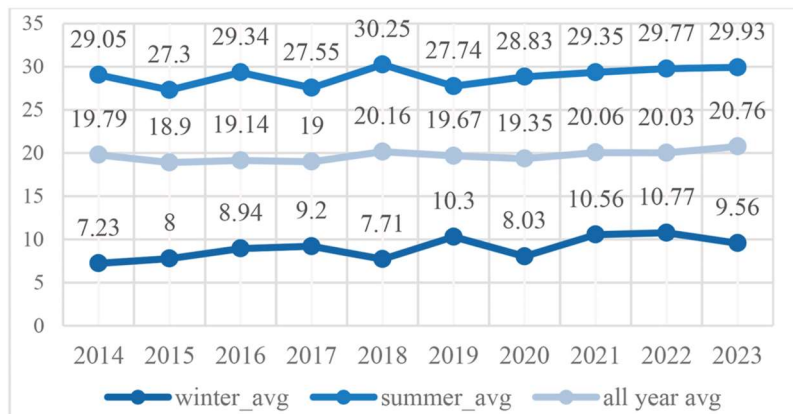


図 3-8 櫛田川流域年間 LST の平均値

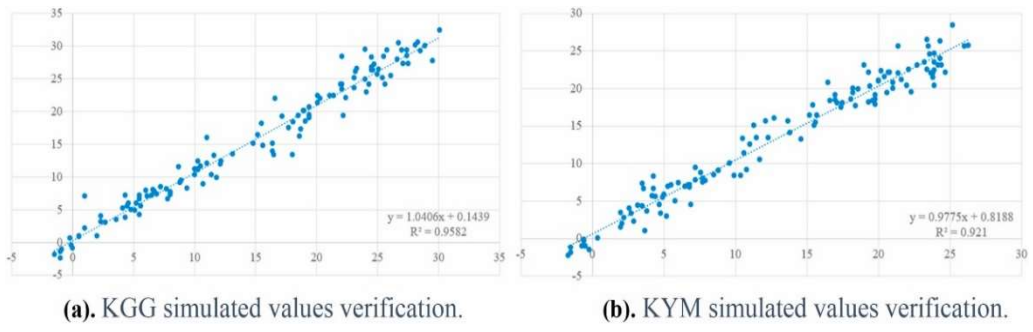


図 3-9 両観測所における観測値と計算値の検証

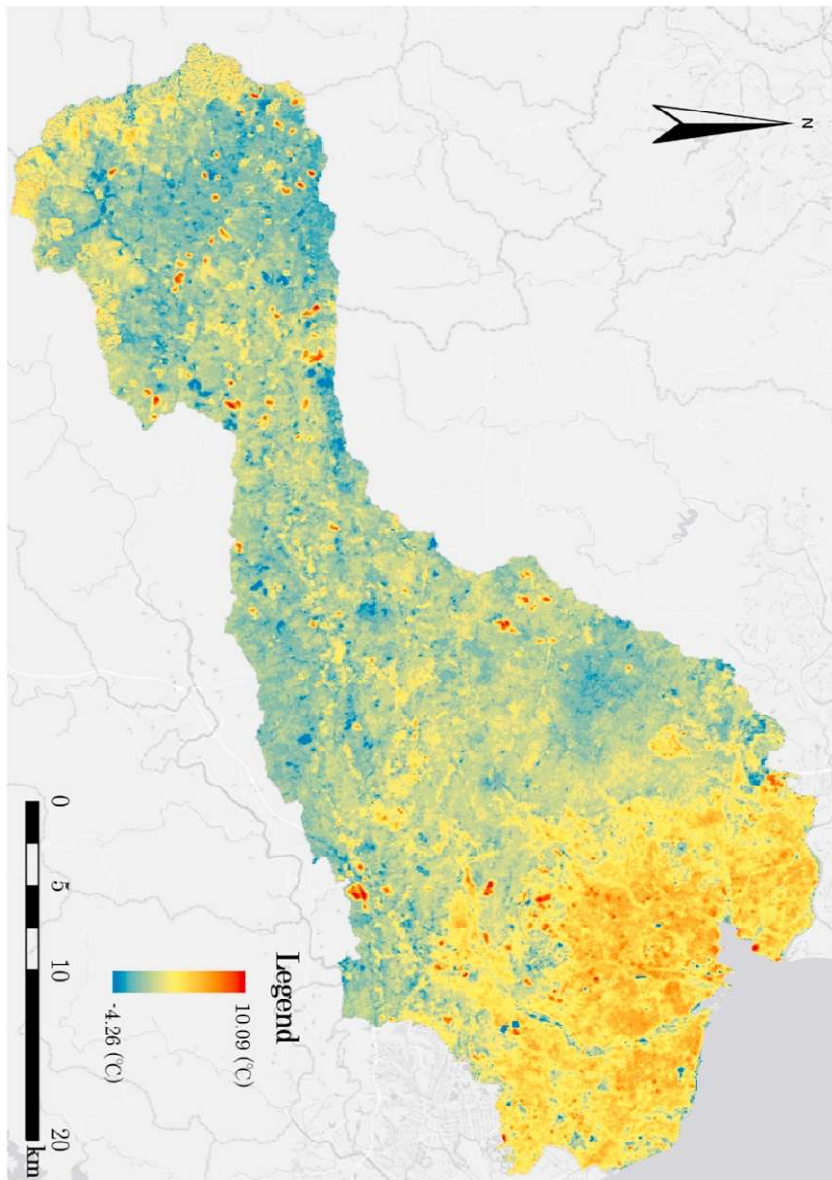


図 3-10 2014-2023 年における櫛田川流域の LSTD (地表面温度差)

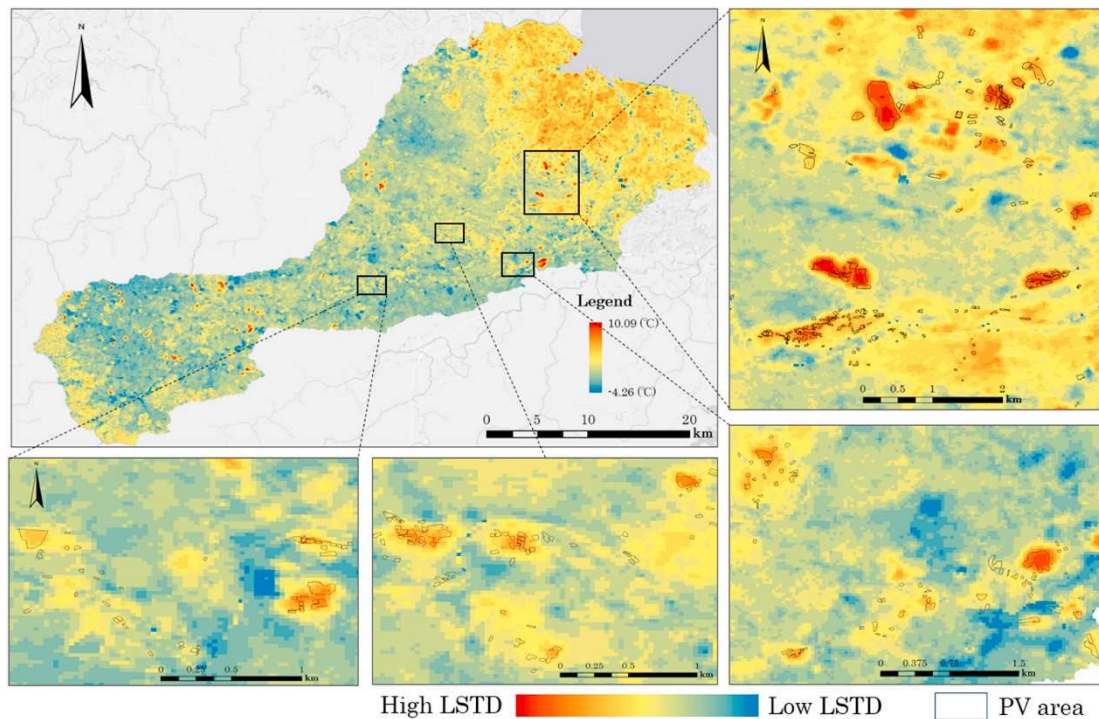


図 3-11 PV ポリゴン内の LSTD

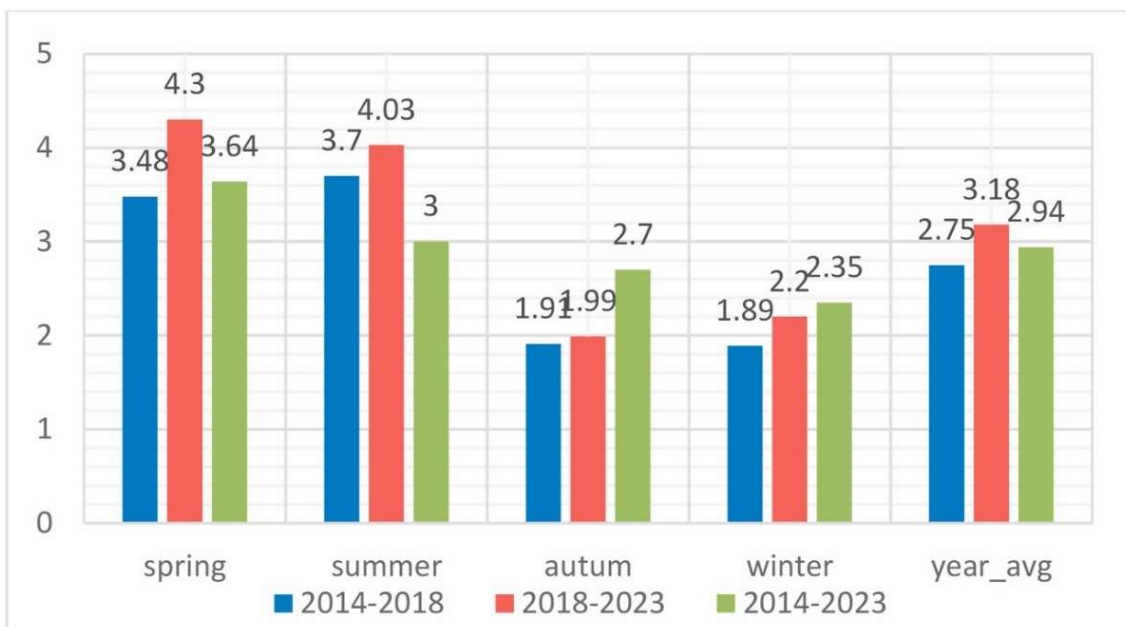


図 3-12 2 時期の各季節にわたる PV が起こした LSTD 分析

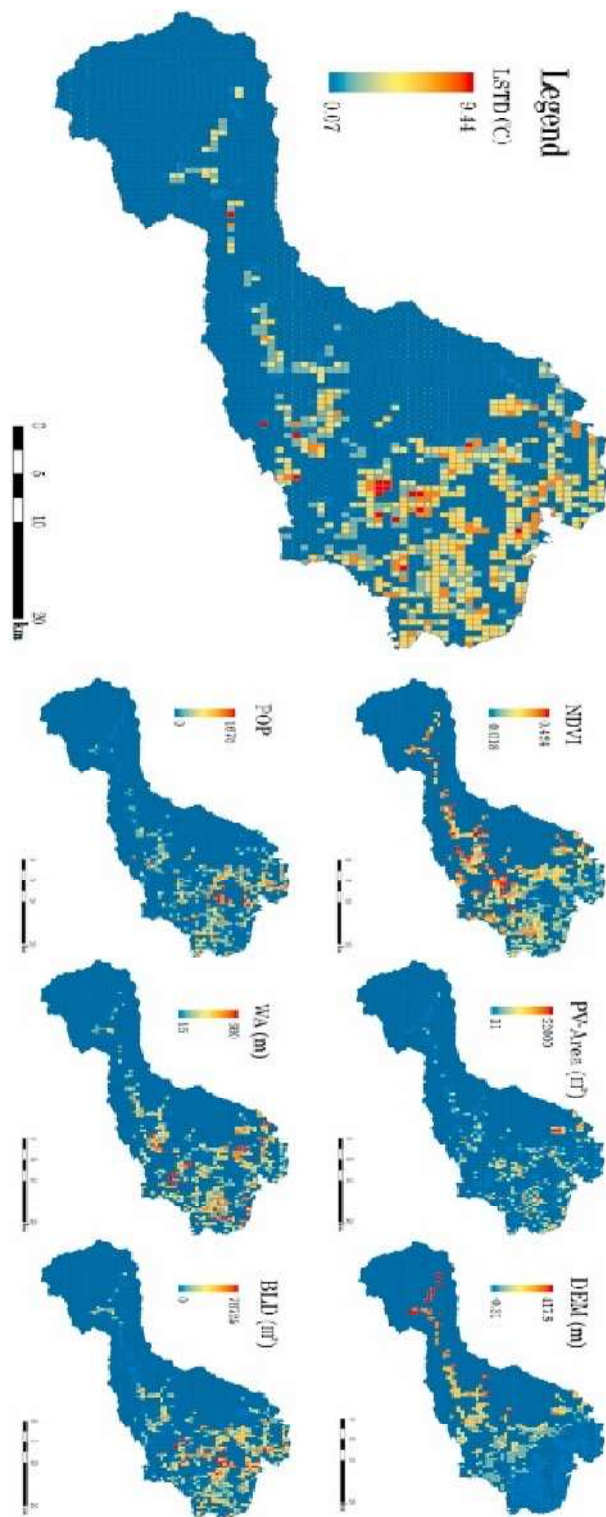


図 3-13 LSTD 及び各変数の空間分布状況 (500m メッシュ)

	PV-Area (㎡)	DEM (m)	NDVI	POP	WA (m)	BLD (㎡)	LSTD (°C)
<b>MAX</b>	22,000	417.8	0.424	1675	660	76,725	9.44
<b>MIN</b>	11	-0.31	-0.018	0	15	0	0.07
<b>MEAN</b>	781.13	62.8	0.241	137.8	150.5	13879.7	3.06
<b>Std</b>	1859.6	77.7	0.08	203.4	114.8	14052.3	1.18

図 3-14 各変数の統計情報 (500m メッシュ)

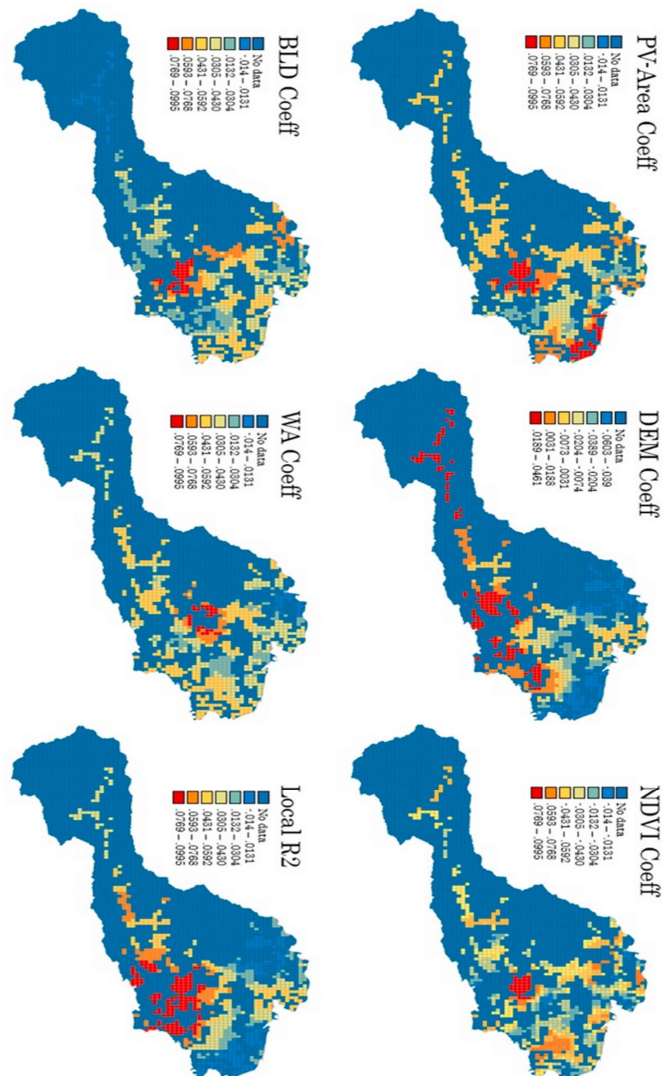


図 3-15 GWR モデルにおける各変数の結果及び相関係数

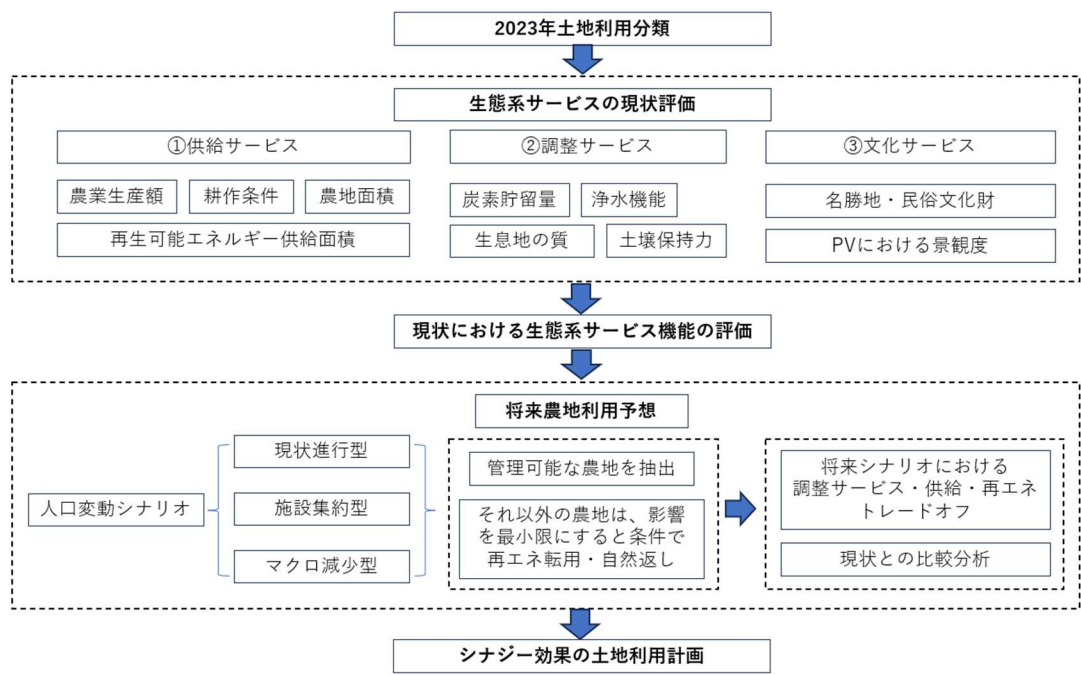


図 4-1 本章（第三章）の研究フロー

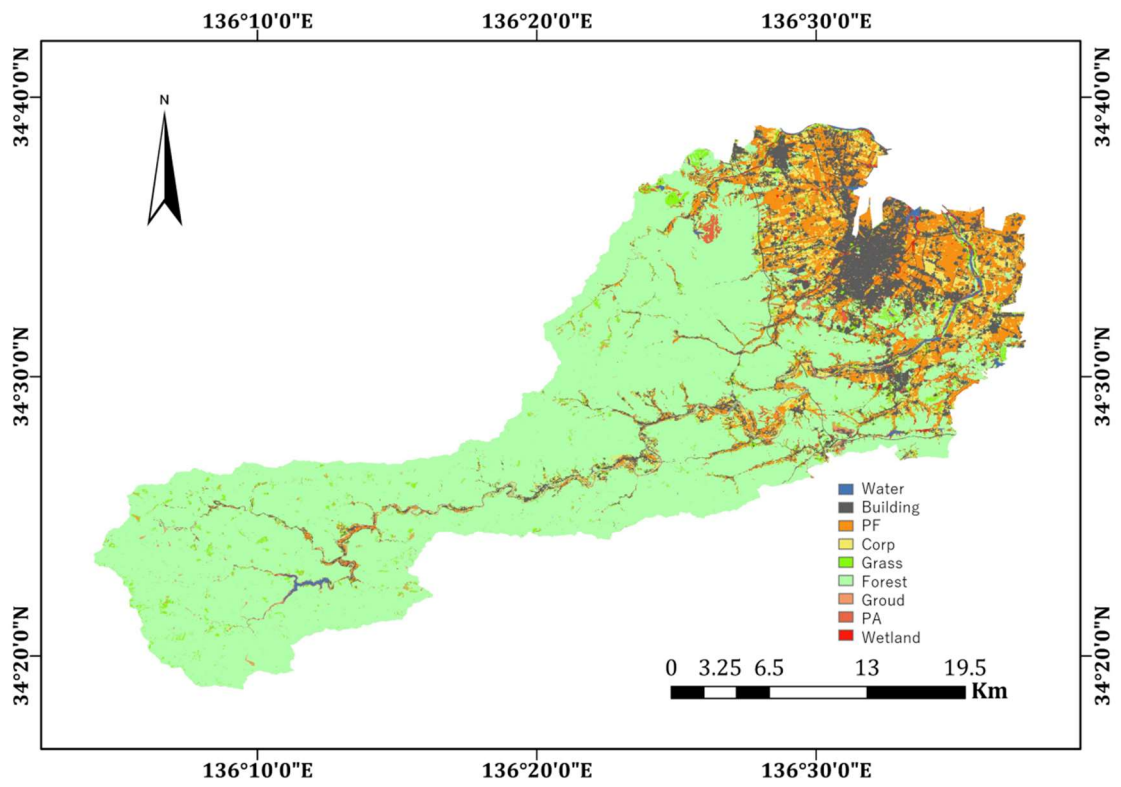
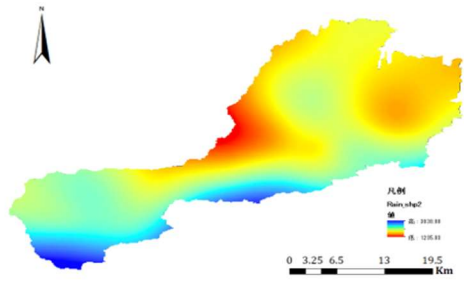
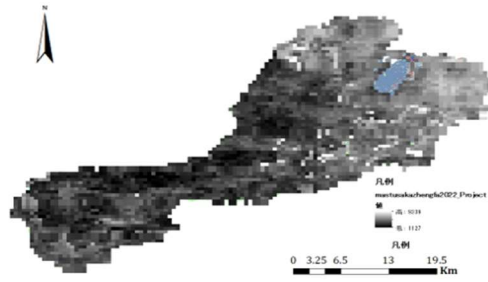


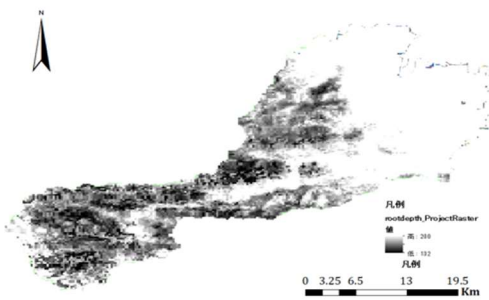
図 4-2 櫛田川流域における 2023 年 LULC



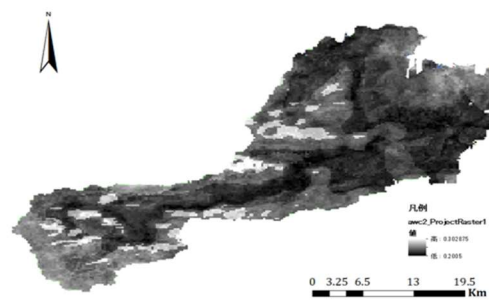
Precipitation



蒸発散係数

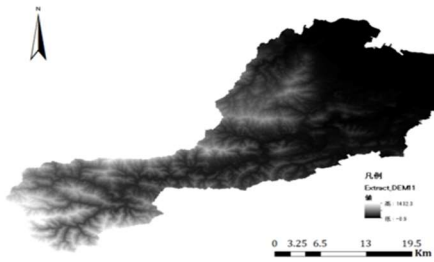


Soil Depth

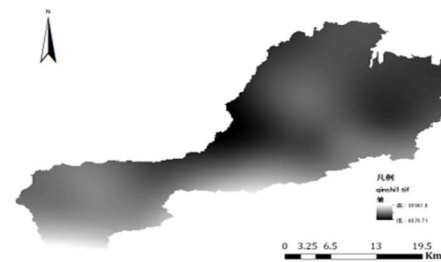


Plant Available Water Content

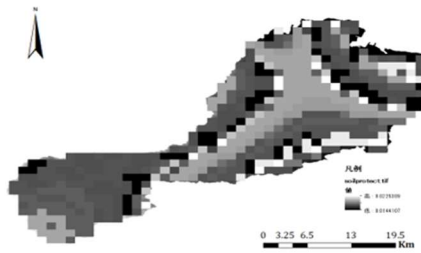
図 4-3 水源水質機能におけるインプットデータ



DEM



RUSLE



Soil Erodibility



小流域

図 4-4 土壌保持機能におけるインプットデータ

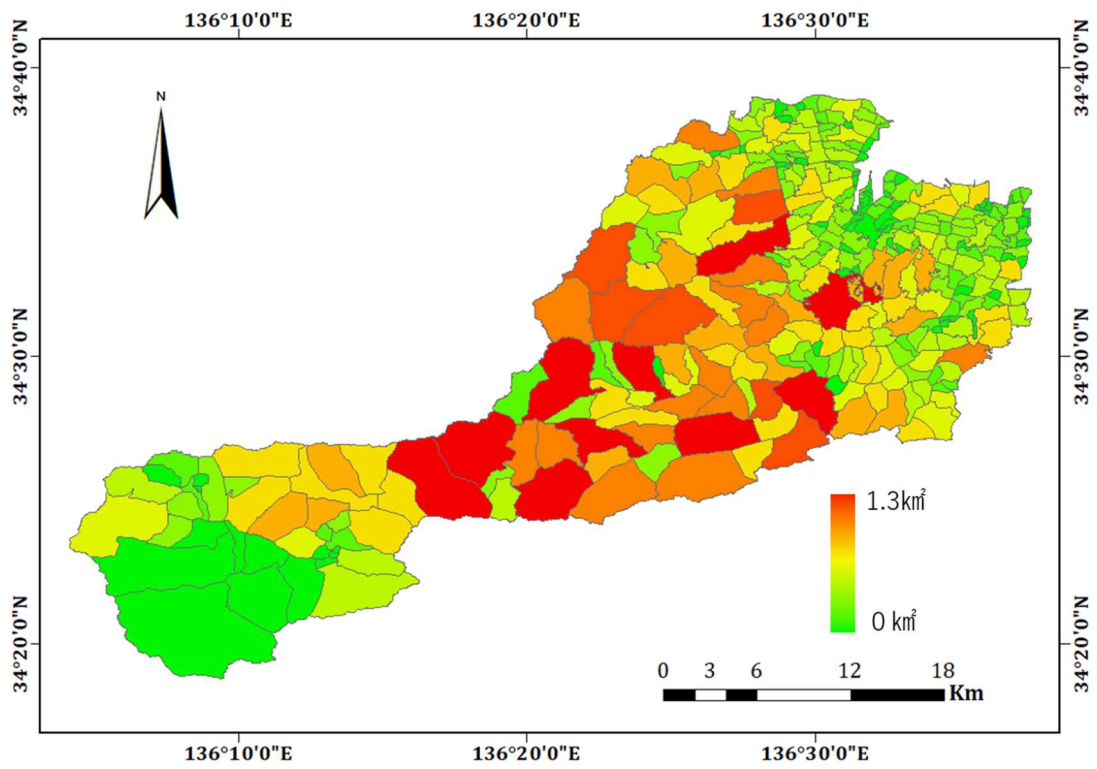


図 4-5 供給サービス①農地面積

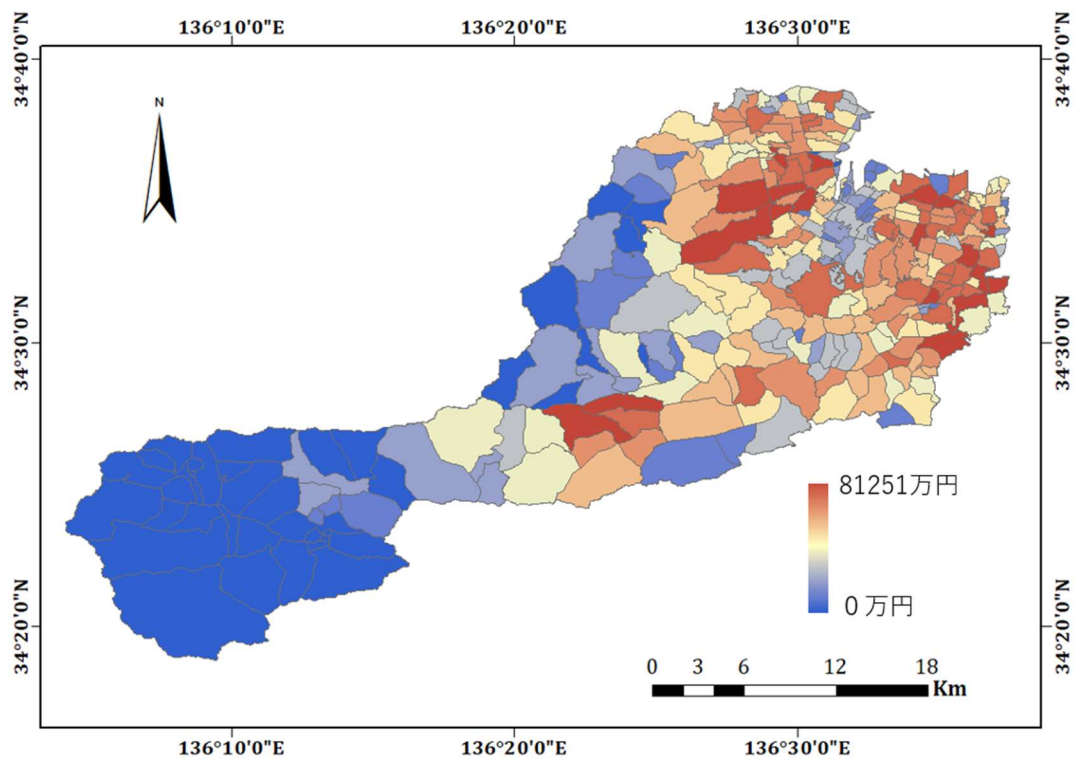


図 4-6 供給サービス②経済的価値

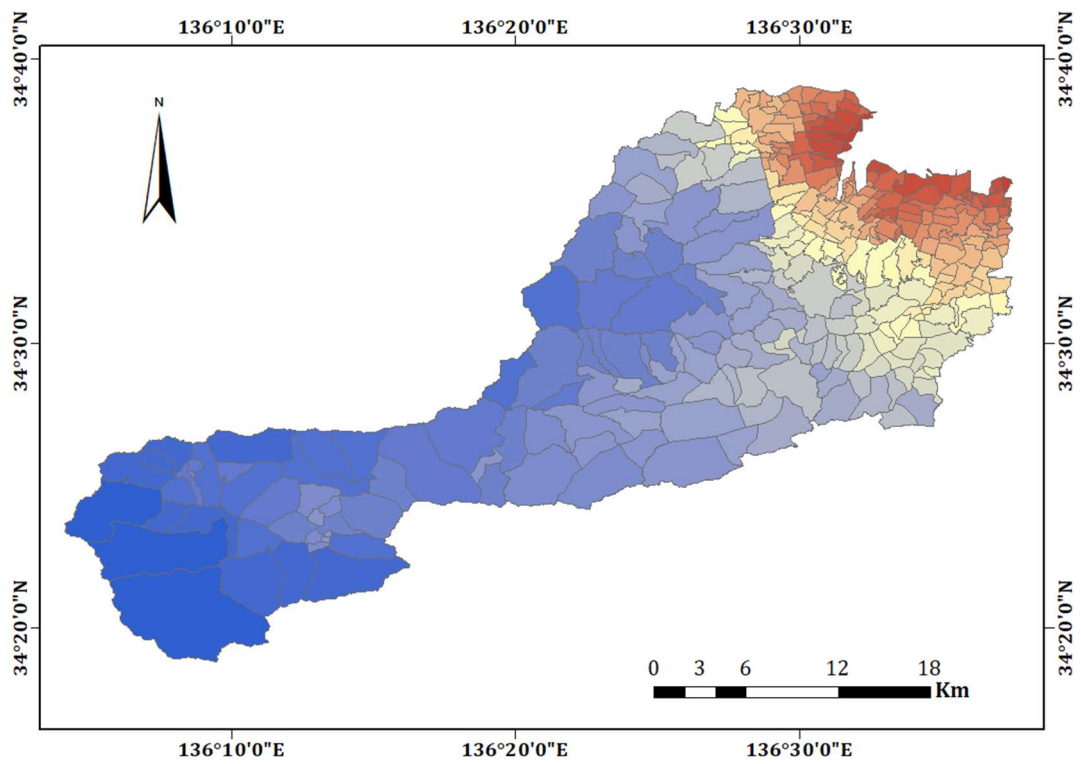


図 4-7 供給サービス③生産便利性

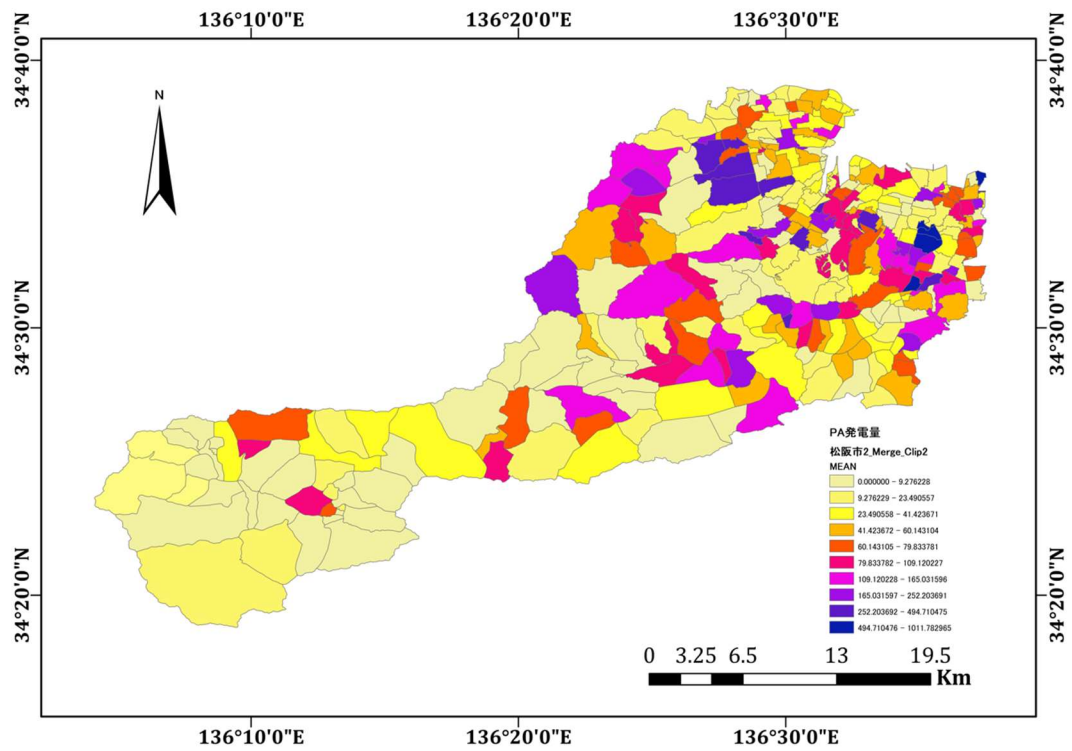


図 4-8 供給サービス④再生可能エネルギー発電量

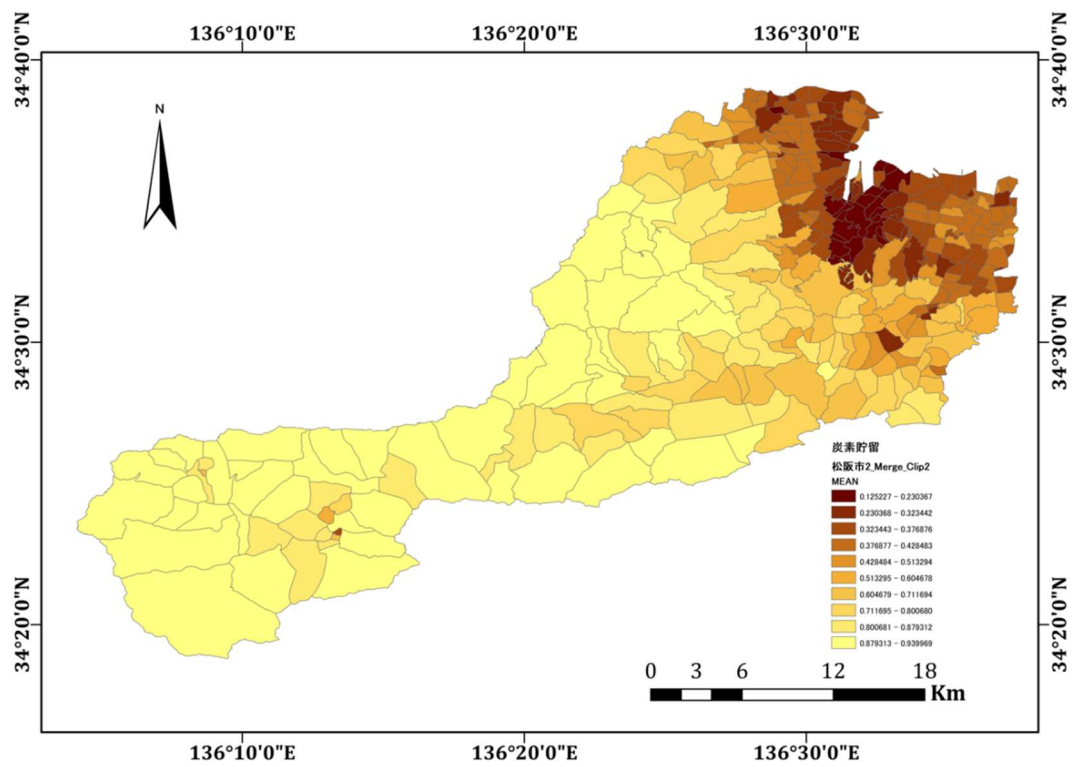


図 4-9 調整サービス①炭素貯留機能

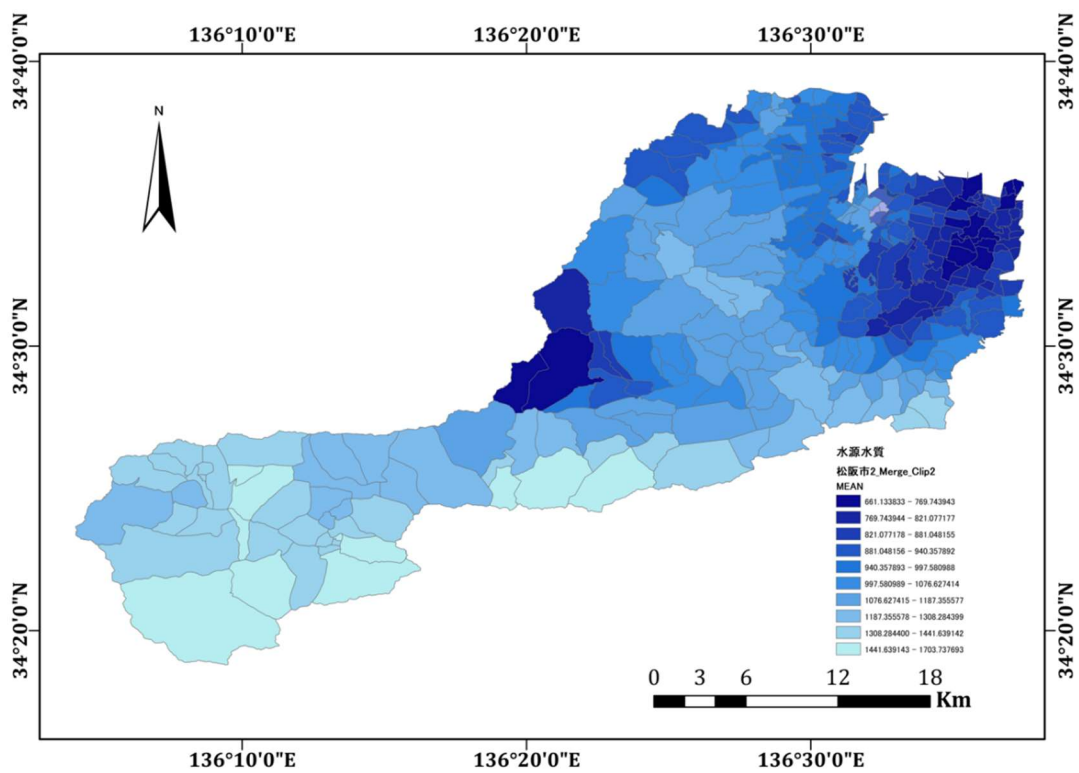


図 4-10 調整サービス②水源水質

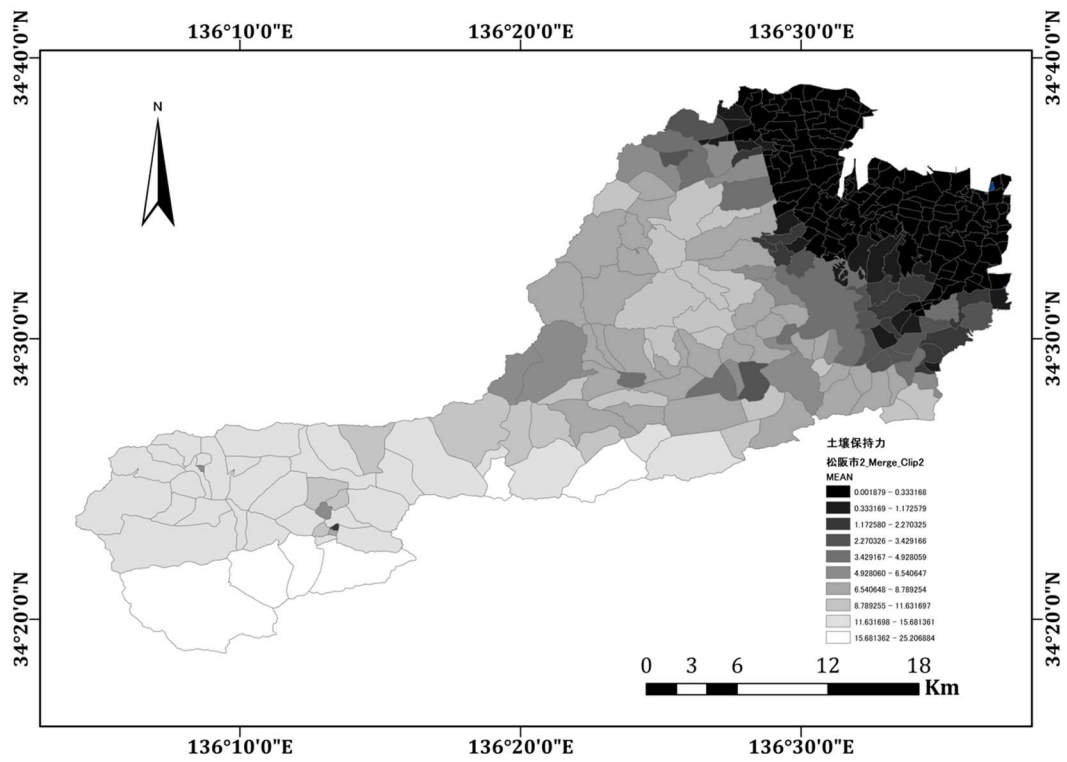


図 4-11 調整サービス③土壤保持

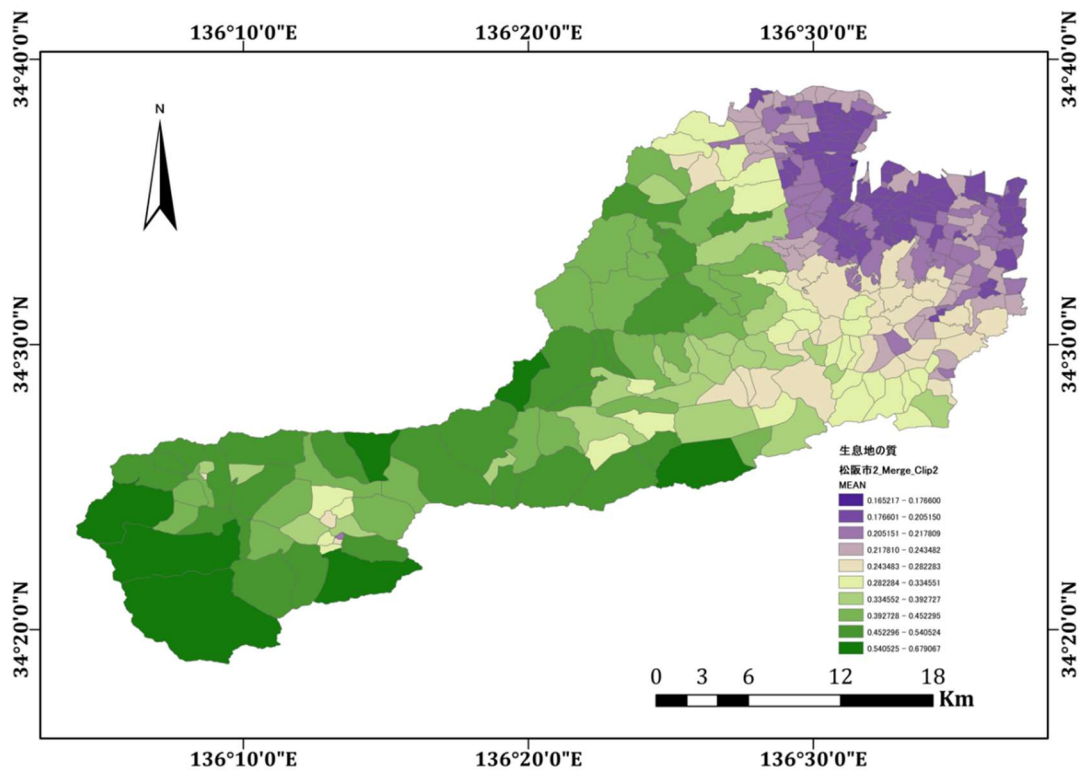


図 4-12 調整サービス④生息地の質

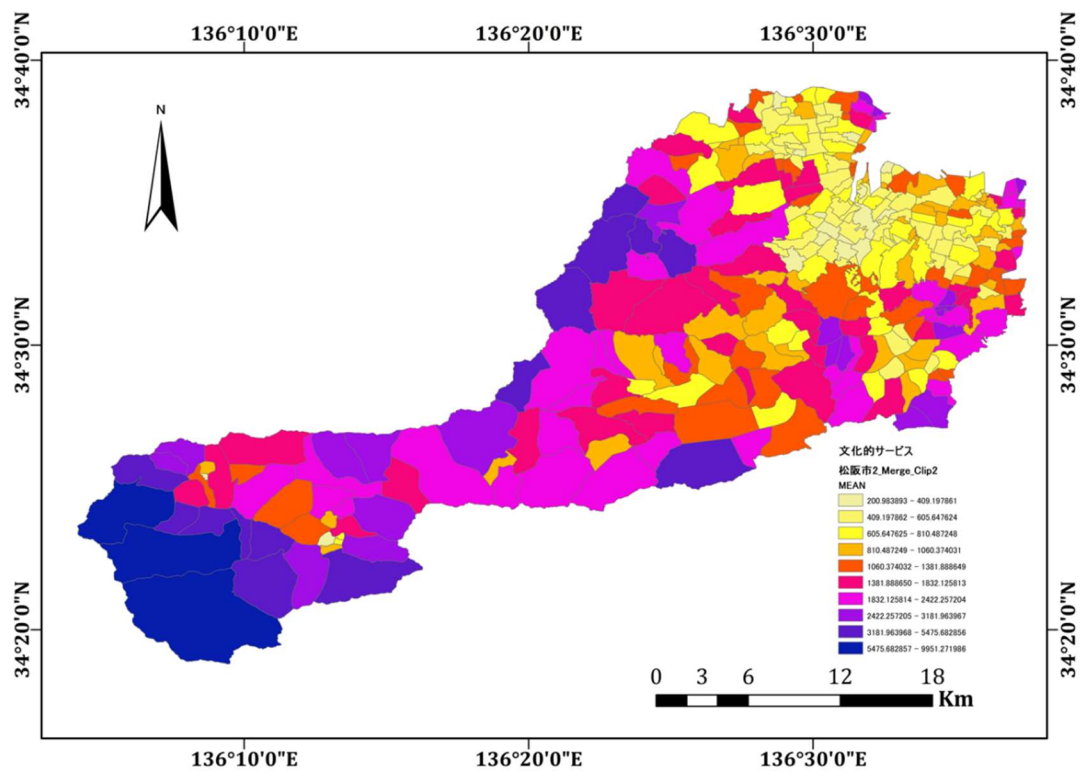


図 4-13 文化的サービス①アクセスビリティ

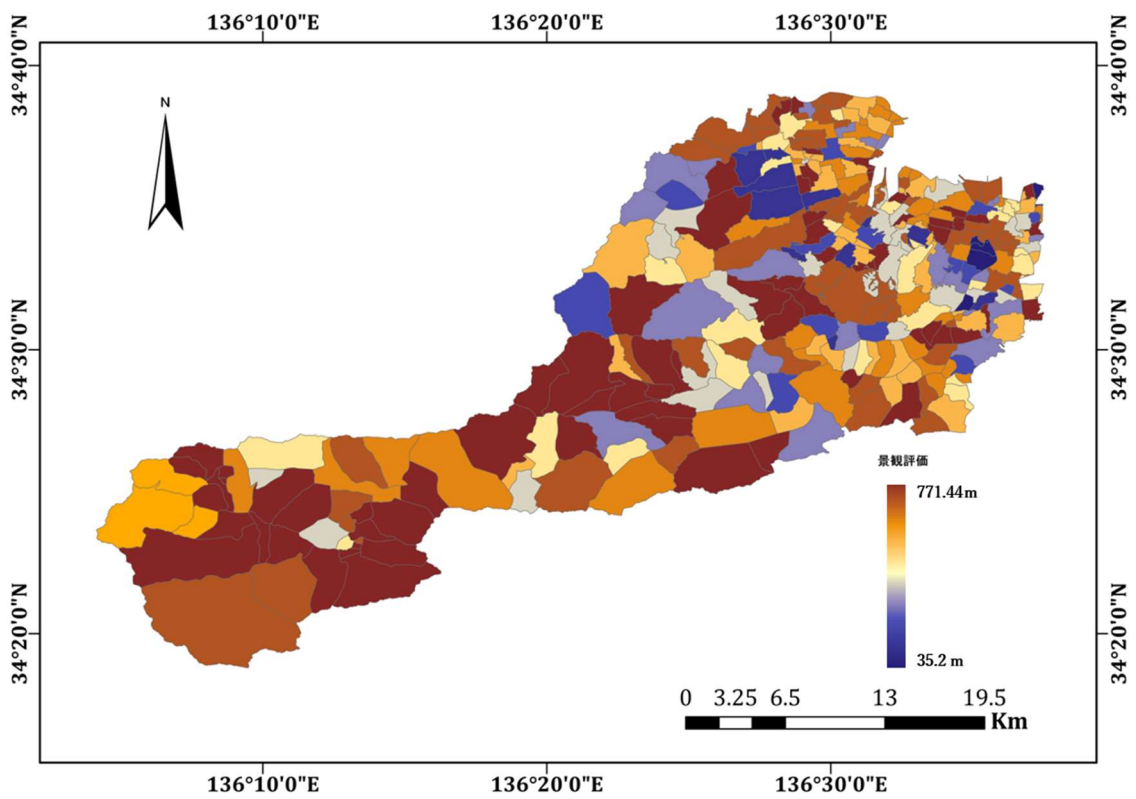


図 4-14 文化的サービス②PA における景観評価

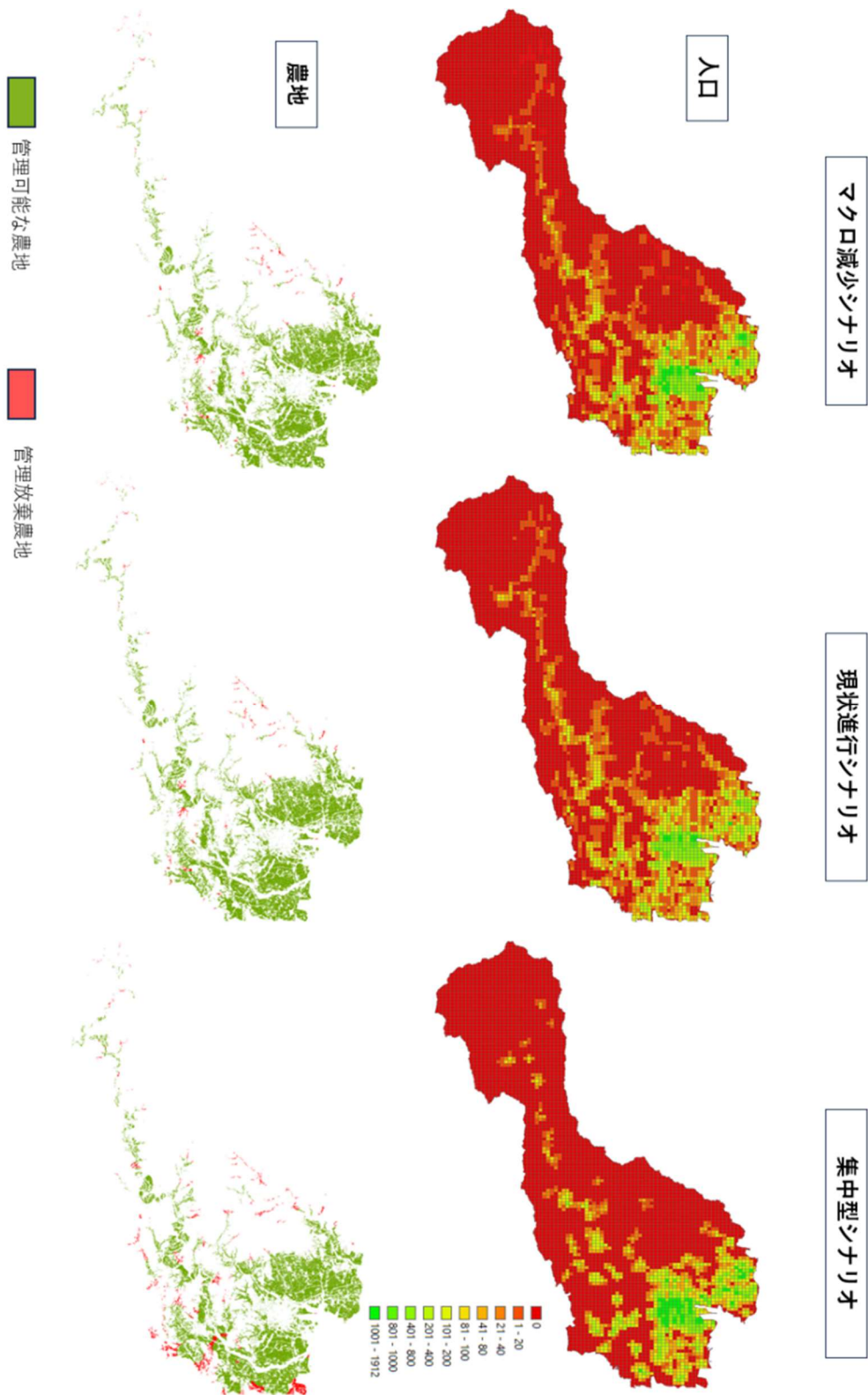


図 4-15 各シナリオの人口密度と農地管理範囲

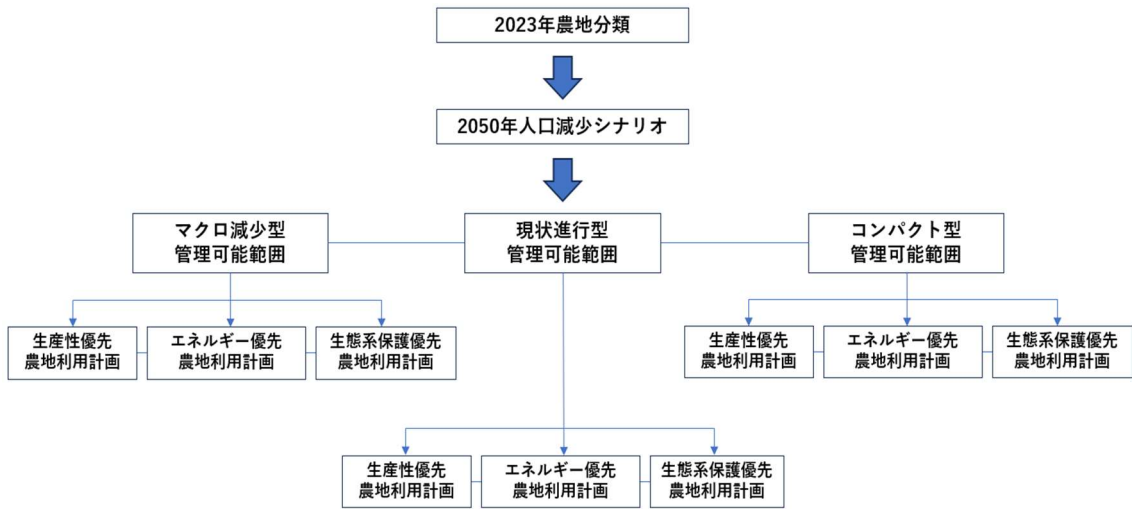


図 4-16 人口減少における農地管理シナリオ

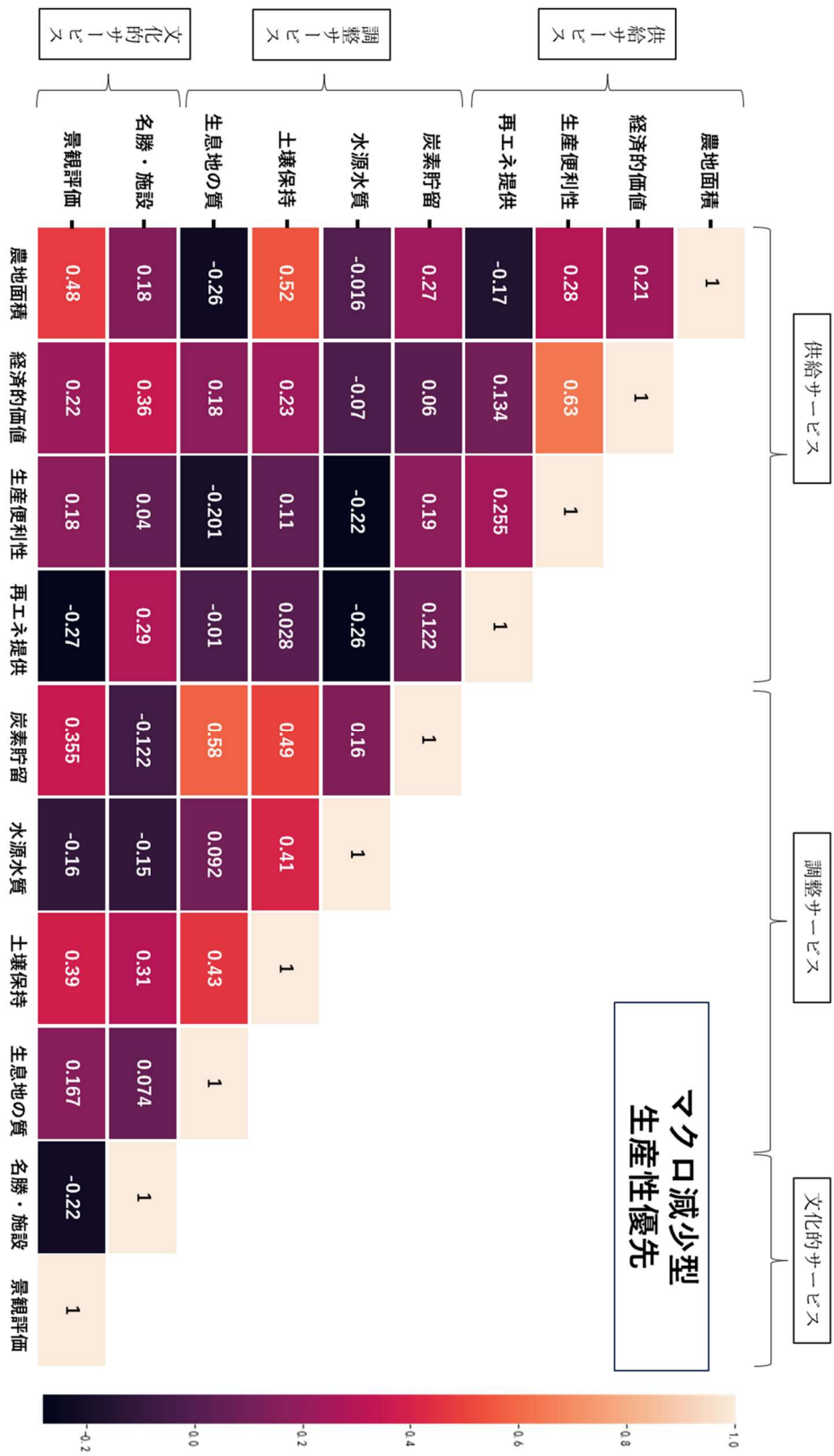


図 4-17 マクロ減少型 生産性優先

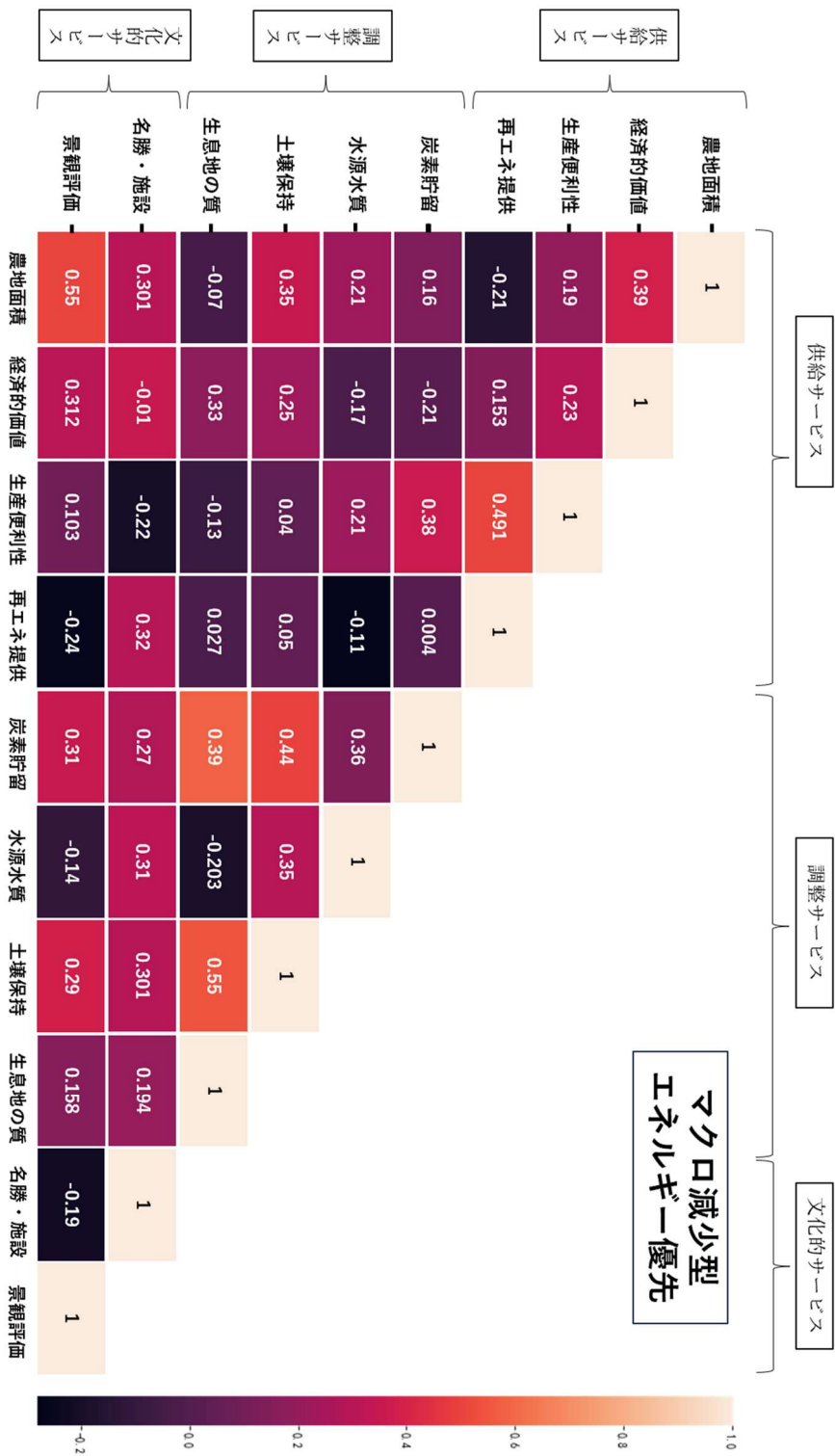


図 4-18 マクロ減少型 エネルギー優先

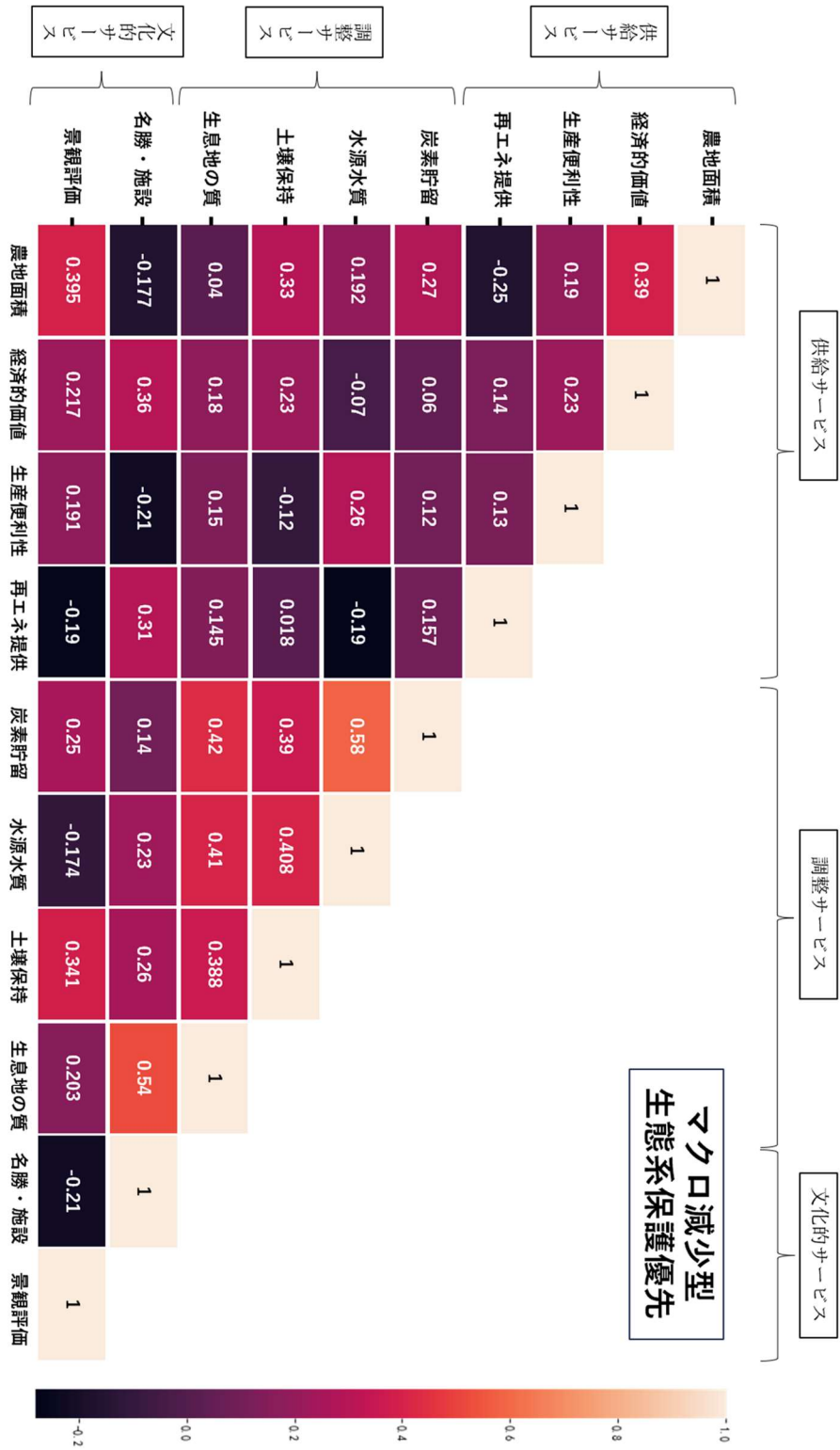


図 4-19 マクロ減少型 生態系保護優先

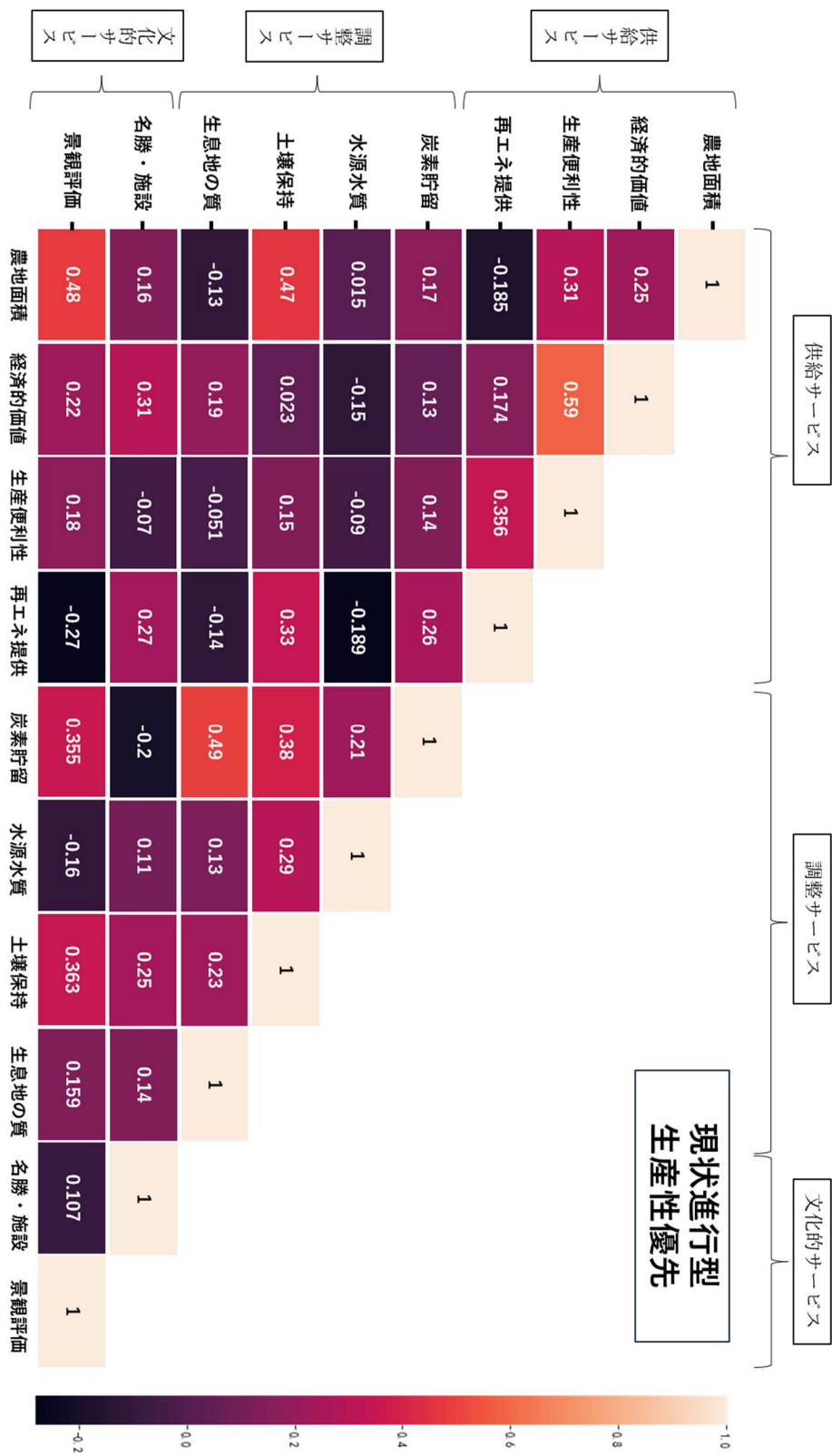


図 4-20 現状進行型 生産性優先

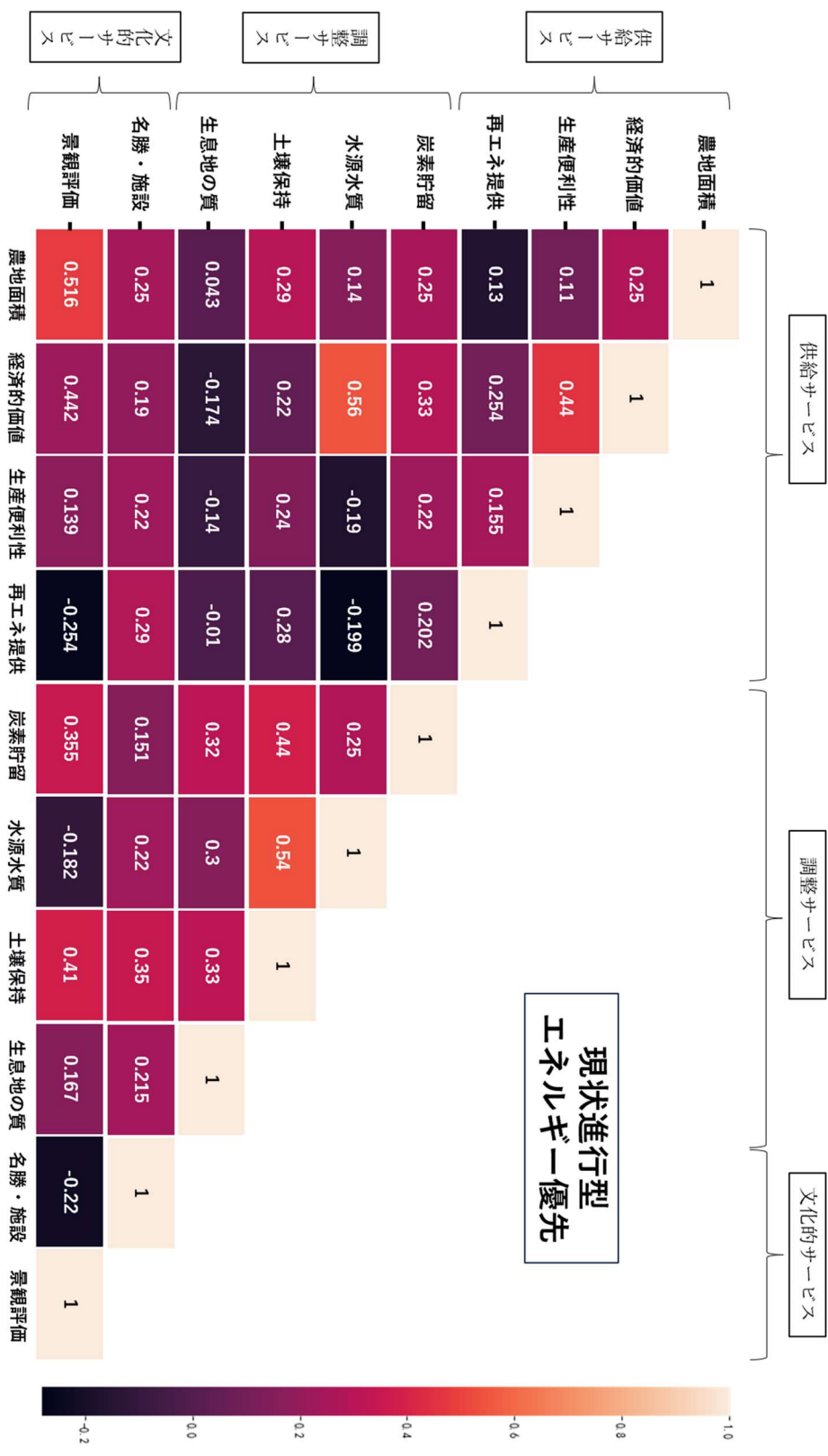


図 4-21 現状進行型 エネルギー優先

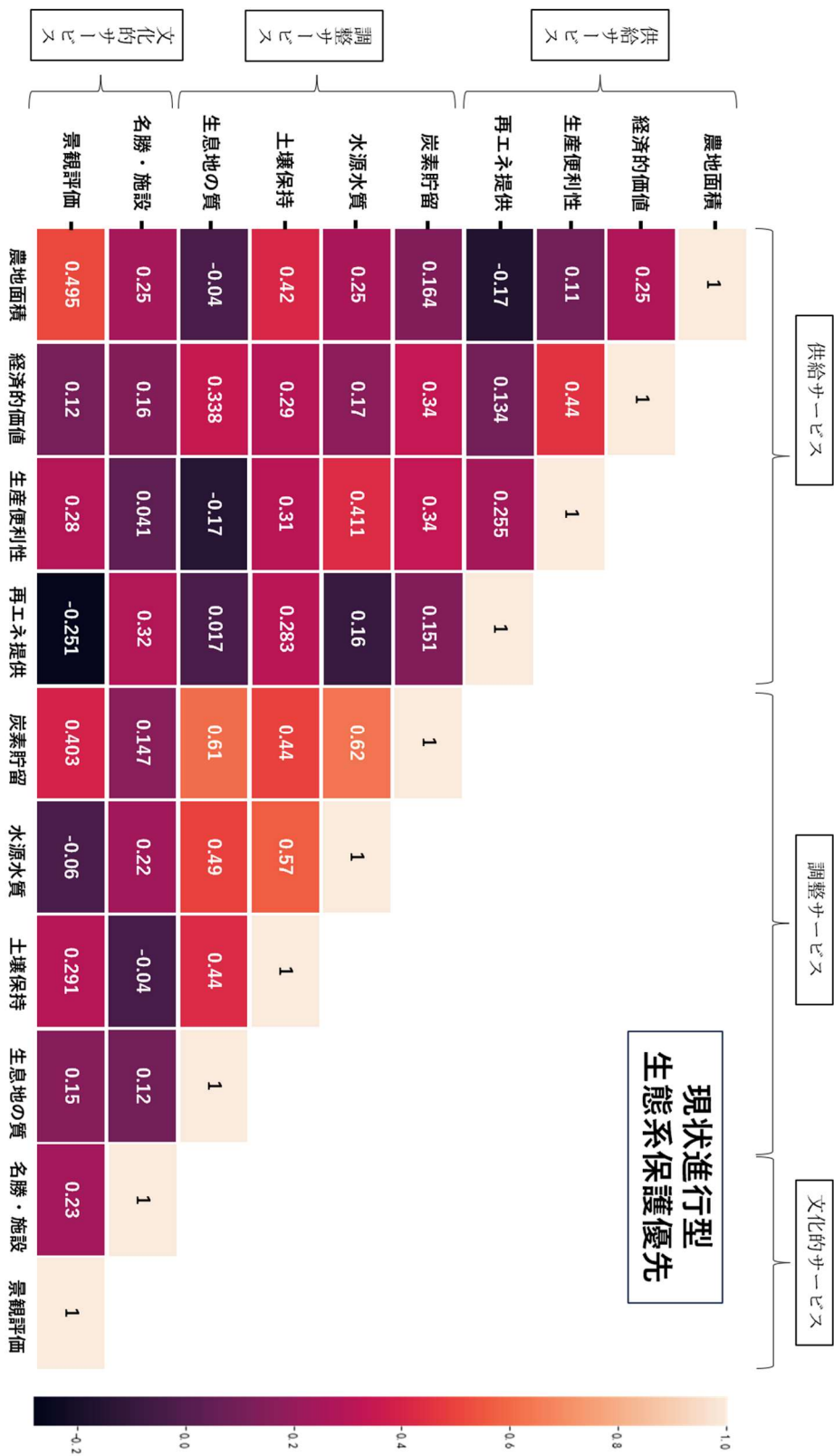


図 4-22 現状進行型 生態系保護優先

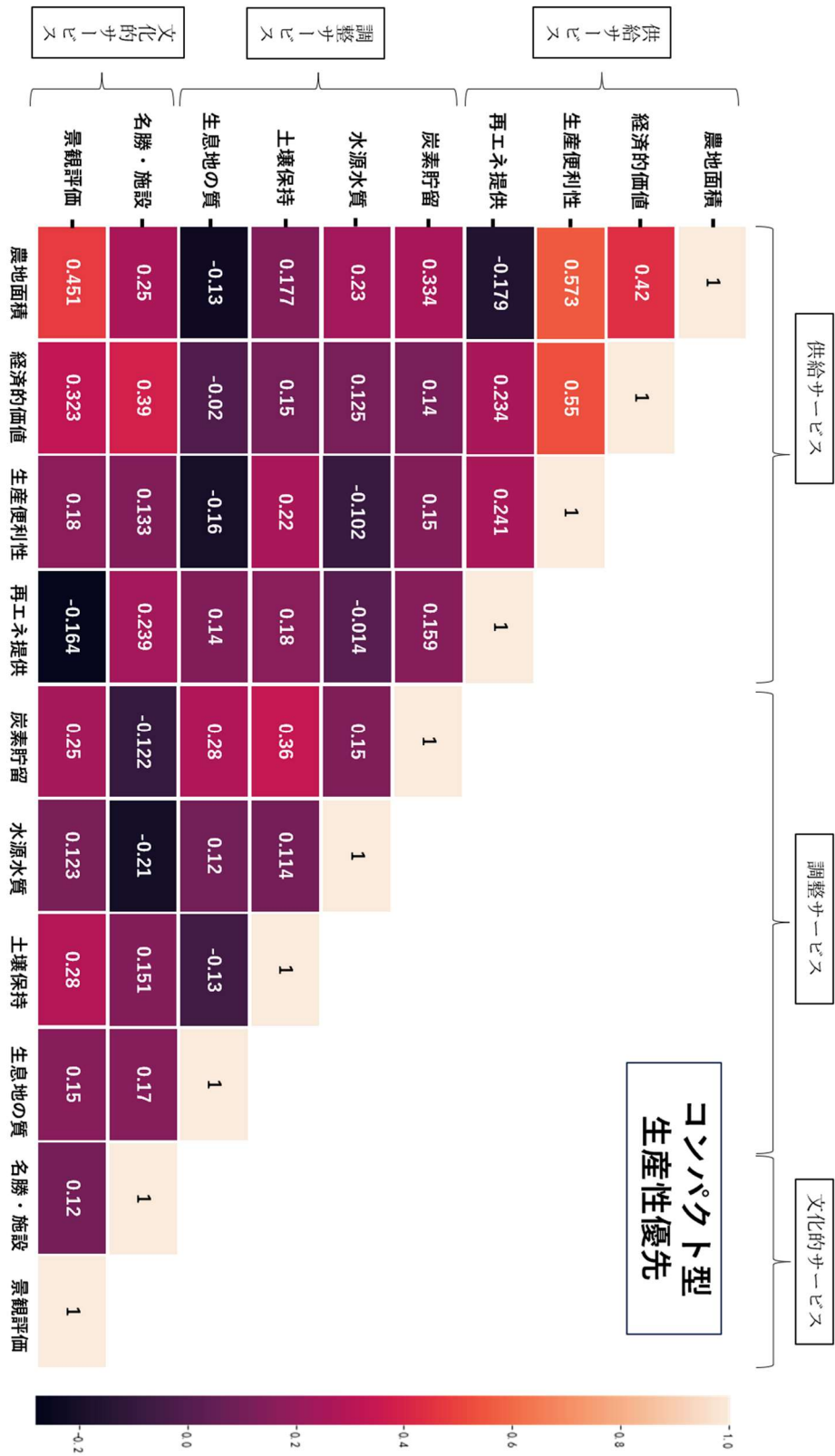


図 4-23 コンパクト型 生産性優先



図 4-24 コンパクト型 エネルギー優先

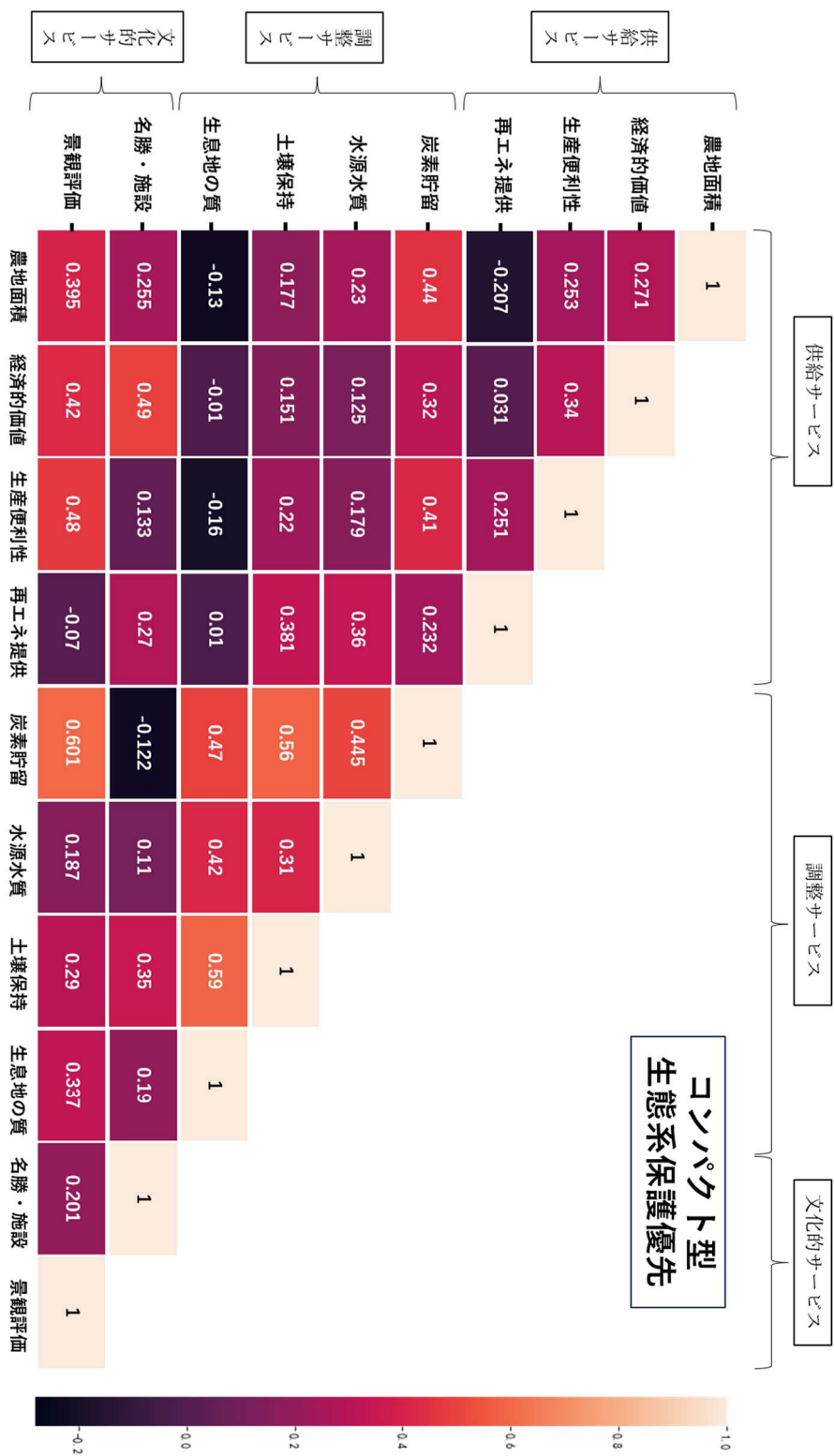


図 4-25 コンパクト型 生態系保護優先

## 表

	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
10kW未満	42円	38円	37円	27～33円	25～31 円
10～50kW	40円+税	36円+税	32円+税	27～29円	24円
50kW以上	40円+税	36円+税	32円+税	27円	24円

表 1-1 太陽光発電の買取価格 2012-2016

	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
10kW未満	25～30円	25～27円	24円	21円	19円	17円
10～50kW	21円+税	18円+税	14円+税	13円+税	11～12円	11円
50kW以上	入札制度決定	制度決定	制度決定	制度決定	制度決定	10円

表 1-1 太陽光発電の買取価格 2017-2022

NAME	FORMAT	SOURCE
Digital Elevation Model	Tiff	Geospatial Information Authority
River Network	Shapefile	Geospatial Information Authority
Aerial photographs	Jpg	Geospatial Information Authority
Road Network	Shapefile	Open Street Map
Farmland	Shapefile	Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries
Administrative Boundaries	Shapefile	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
Sentinel-2 images	Remote sensing	European Space Agency
Population	Shapefile	e-Stat

表 2-1 本章（第二章）で使用した公開データ情報

		Predicted		
		TF	BF	WF
Actual	TF	44	2	0
	BF	5	47	2
	WF	1	4	48

表 2-2 混同行列（Confusion Matrix）

	PF	TF	BF	WF	Total
Num（放棄・休耕地を除く）	63888 (61785)	4875 (4838)	24902 (21134)	21513 (19137)	115187 (106894)
Area(ha)	9646.8	393.3	1177.7	1019.7	12237.5
%	54.6%	4.6%	22.6%	18%	100%

表 2-3 農地分類の結果

	松阪市	明和町	多気町	総計
PV 数 (細分枚数)	1210	342	254	1806
PV 面積 (ha)	220.3	117.4	57.1	394.8

表 2-4 PV の細分枚数と面積

	PF	TF	BF	WF	Total
Num (放棄・休 耕地を除く)	63888 (61785)	4875 (4838)	24902 (21134)	21513 (19137)	115187 (106894)
Area(ha)	9646.8	393.3	1177.7	1019.7	12237.5
Conv Num	431	32	247	340	1052
Conv Area(ha)	45.52	2.13	9.56	20.72	77.93
Conv Num%	0.67%	0.65%	0.99%	1.58%	0.98%
Conv Area%	0.47%	0.54%	0.81%	0.93%	0.64%

表 2-5 各種農地の転用状況の統計

		WD (m)	RD (m)	DEM (m)	SLOPE	OPEN	DIRECTION
PF	PF	209.6	60.1	43.8	2.21	0.241	125.8
	PF-conv	262	21.5	49.3	1.96	0.211	144.1
WF	WF	246.7	45	41.2	1.93	0.3	127
	WF-conv	172.8	14.9	126.4	5.08	0.051	146.3
BF	BF	187.1	108.6	93.7	5.5	0.152	149
	BF-conv	138.4	17	162.7	6.35	0.012	163.9
TF	TF	154.6	130.9	144	9.1	0.034	161.7
	TF-conv	129.7	22.1	152.8	10	<0.001	169.5

表 2-6 農地と転用地における各地理的特徴の平均値

	WD	RD	DEM	SLOPE	OPEN	DIRECTION
PF - PFC_Sig	<0.001	0	0.972	0.996	0.709	0.025
WF - WFC_Sig	<0.001	0	0	0	0	0.02
BF - BFC_Sig	<0.001	0	0	0.106	0	0.144
TF - TFC_Sig	0.998	0	0.498	1	0	1
F	184.16	159.1	2380.92	3096.87	568.67	159.71
DF	7	7	7	7	7	7

表 2-7 一元配置分散分析の結果

	WD	RD	DEM	SLOPE	OPEN	DIRECTION
PFs	NGT	PST	/	/	/	/
WFs	PST	PST	NGT	NGT	NGT	/
BFs	PST	PST	NGT	/	NGT	/
TFs	/	PST	/	/	NGT	/

表 2-8 農地転用における要因

	Direction	Openness	DEM	Angle	WD	RD	PFR
P	0.014	0.316	0	0.05	0.613	0.084	0.517
B	0.005	0.002	0.016	-0.007	-0.001	-0.003	0.001
Beta	0.180	0.069	0.578	-0.244	-0.034	-0.112	0.040

P represents significance probability of each factor, B and Beta represents extent to which the factor influences the model.

表 2-9 回帰分析の結果

AIC	AICc	R2	AdjR2	F-Stat	F-Pro	Wald	Wald - Prob	K(BP)	JB-Pro	Sigma 2
1991.24	1991.2	0.39	0.38927	20.4651	0	126.149	0	58.9603	0	2566.7
2	5	9	6	7	0	5	0	7	0	9

表 3-1 OLS モデルの結果

Variable	Coef	StdError	t_Stat	Prob	Robust_S E	Robust_ t	Robust_ Pr	StdCo ef
Intercep t	3.43017 71	0.265573 1	12.916	0	0.250353 7	13.7013	0	0
PV_AR EA	0.19304	2.359E- 05	8.1826 2	1.6E- 12	5.253E- 05	3.67683 7	0.00026 7	0.3034 1
DEM	-0.5113	0.103513	-4.939	1.6E- 06	0.001072 5	4.76760 7	3.397E- 06	-0.335
NDVI	- 0.29178	1.046831	-2.189	0.0289	1.030409	2.22414 9	0.02646 1	-0.155
DISTA VG	-1.47E- 05	7.4E-05	-0.199	0.8419	6.56E-05	- 0.22512	0.82195 52	-0.07

表 3-2 OLS モデルにおける各変数の詳細

Neighbors	Residual Squares	Effective Number	Sigma	AICc	R2	R2Adjusted
94	262.0206	89.99	0.6732	1327.51	0.609	0.509

表 3-3 GWR モデルの結果

	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	AICc
OLS	0.399	0.389	1991.576912
GWR	0.609	0.509994	1327.519343

表 3-4 両モデルの結果比較

	~2013	2015	2017	2019	2021	2023	MEAN
DEM (m)	49.05	34.94	60.9	53.43	103.46	33.26	58.33
SLOPE	2.64	2.68	3.32	3.42	4.79	2.87	3.39
MEAN Area (m <sup>2</sup> )	1705.4	5645.47	3667.5	4822.54	1491.11	1947.71	3225.82
WA (m)	437.81	516.47	491.63	407.59	284.56	304.74	413.19

表 3-5 年間新設 PV 地理的特徴

	2015	2017	2019	2021	2023	TOTAL
Add Number	96	359	227	289	274	1245
Add Area (m <sup>2</sup> )	122032	317184	106682	157287	148231	851416

表 3-6 年間新設 PV の統計情報

バンド	波長	中心波長	解像度	観測項目
B1	indigo	443nm	60m	エアロゾル
B2	Blue	490 nm	10m	エアロゾル / 陸域情報
B3	Green	560 nm	10m	
B4	Red	665 nm	10m	
B5	VNIR	705 nm	20m	陸域情報
B6	VNIR	740 nm	20m	
B7	VNIR	783 nm	20m	
B8	NIR	842 nm	20m	水蒸気補正 / 陸域情報
B8a	NIR	865 nm	10m	
B9	NIR	945 nm	20m	水蒸気補正
B10	SWIR	1375 nm	60m	巻雲の検知
B11	SWIR	1610 nm	20m	陸域情報
B12	SWIR	2190 nm	20m	エアロゾル / 陸域情報

表 4-1 Sentinel-2A 各バンドの詳細

Code	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LULC	水域	建築	水田	畑	草地	森林	空地	PA	湿地
Area (km <sup>2</sup> )	6.58	103.4	96.46	25.66	33.69	723.6	12.24	6.07	16.98

表 4-2 各 LULC の面積

サービス種類	サービス名	計算単位	計算ツール
供給サービス	農地面積	筆ポリゴン	ArcGIS
	農地の経済価値	筆ポリゴン	ArcGIS
	生産便利性	筆ポリゴン	ArcGIS
	再生可能エネルギー提供	筆ポリゴン	ArcGIS
調整サービス	炭素貯留	メッシュ (10m)	InVEST
	水源水質	メッシュ (10m)	InVEST
	土壌保持	メッシュ (10m)	InVEST
文化的サービス	生息地の質	流域メッシュ (10m)	InVEST
	アクセスビリティ	筆ポリゴン	ArcGIS
	PAにおける景観評価	筆ポリゴン	ArcGIS

表 4-3 本章における計算する 8 種類 ES

農地種類	総面積 (ha)	総産出額 (万円)	単位価値 (円/m <sup>2</sup> )
水田	9646	876,821	90.9
麦畑	1019	317,92	31.2
茶畑	393	164,116	417.6
豆類畑 (野菜)	1177	233,516	198.4

表 4-4 各種類農地の経済価値

THREAT	MAX_DIST	WEIGHT	DECAY
Building	2.1	0.85	exponential
Ground	1.2	0.5	exponential
Solor	1.5	0.68	exponential
Crop	0.51	0.2	exponential
PF	0.3	0.4	exponential

表 4-5 生息地の質における Threat Data

lucode	NAME	HABITAT	Building	Ground	Solor	Crop	PF
1	Water	0.7	0.7	0.2	0.7	0.6	0.4
2	Building	0.2	0	0.1	0.1	0	0
3	PF	0.4	0.7	0.4	0.7	1	0
4	Crop	0.5	0.8	0.3	0.5	0	1
5	Grass	0.8	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6
6	Forest	0.97	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6
7	Ground	0.3	0.1	0	0.2	0	0
8	Solor	0	0	0	0	0	0
9	Wetland	0.67	0.8	0.7	1	0.9	0.8

表 4-6 脅威源が各種類 LULC に与える脅威性 (Habitat Sensitivity)

人口減少 シナリオ	農地 利用計画	将来農地 面積 (ha)	PA 転用 面積 (ha)	自然に返す 面積 (ha)	総面積 (ha)
マクロ 減少型	生産性優先	8832	1283	778	10893
	エネルギー優先	7065	3430	398	
	生態系保護優先	7065	670	3158	
現状進行型	生産性優先	9217	998	1411	11626
	エネルギー優先	7373	3760	493	
	生態系保護優先	7373	931	3044	
コンパクト 型	生産性優先	8766	642	338	9746
	エネルギー優先	7012	2110	624	
	生態系保護優先	7012	894	1840	

表 4-7 各種農地管理シナリオにおける面積