

# 農地の太陽光パネルへの転用が環境にもたらす影響評価

九州大学大学院 芸術工学研究院 准教授 高取 千佳  
たかとり ちか  
九州大学大学院 芸術工学府 博士後期課程 謝 知秋  
シヤ チシュウ

## 1. はじめに

国内の農村の多くでは、都市への人口流出・高齢化による一次産業従事者の急速な減少に伴い、農地や森林管理放棄が進行している。そうした状況下で、再生可能エネルギーの提供を目的に、管理放棄地はソーラーパネル（以下、PV）建設地として多く転用されるようになった。確かに、マクロの視点では、再生可能エネルギーを供給できるPVは、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ものの、地域のレベルで見ると、里山における農地・森林の緑地がPV設置のために人工地へと転用された場合、里山が有する生物多様性、景観、土壌保持や水源涵養機能等の多面的機能を損なうリスクを孕んでいる<sup>1)</sup>。このように、単一の機能のみに焦点を当てた急速な土地利用変化は、地域の気候バランスを崩すだけでなく、自然の有する多様な恩恵の深刻な損失を生じることにもなりかねない。流域圏における土地利用への要請が多様化している中、都市および農村を統合的に捉え、そのバランスをどう取るかについての土地利用計画論の知見はまだ少ない。気候変動や循環経済、自然再興(Nature Positive)を統合する経済社会の変革により持続可能な社会

を目指すためには、多様な自然資本からの恩恵(生態系サービス:ES)のトレードオフおよびシナジーを定量的に捉えた、都市農村の統合的な土地利用計画が必要とされていると言えよう。

そこで、本稿では、都市部から田園・森林部までを含み、一級河川・櫛田川流域が市の中心に有する三重県松阪市(図-1)を対象とし、以下4点の研究成果を報告する。第一に、流域全体での農地のPVへの近年の転用実態を分析する。第二に、流域単位での都市-農村の人口減少および農地管理の将来シナリオを複数設定する。第三に、太陽光発電施設の設置により、温熱環境に与えた影響を明らかとする。第四に、各人口減少・農地管理シナリオがESのシナジーおよびトレードオフに及ぼす影響の可視化を行う。以上により、太陽光発電施設の設置拡大に対する統合的な土地利用計画に向けた知見の一つを提供することを試みる。

## 2. 櫛田川流域におけるPVへの農地転用の実態把握

### (1) 10年間におけるPVの設置状況の変化

まず、櫛田川流域を対象に、地上設置型PVの特定のために、国土地理院データベースとGoogle Earth APIを利用し、2013年2月から2023年8月までの10年間の調査地域の解像度0.5mのGES

<sup>1)</sup> Amro, Z., Aly Mousaad, A. (2024), "A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability", *sustainability*, 16, p. 8271, <https://doi.org/10.3390/su16188271>

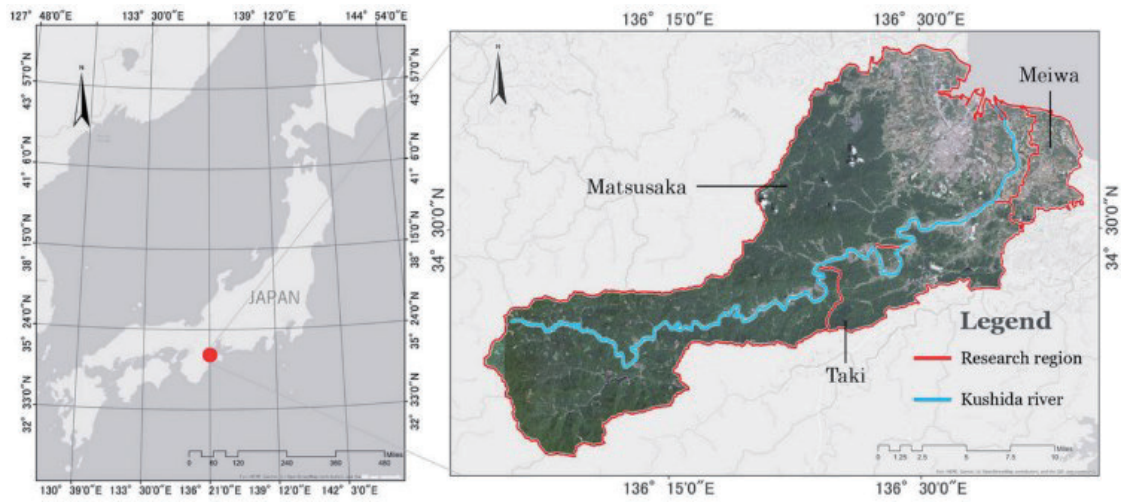
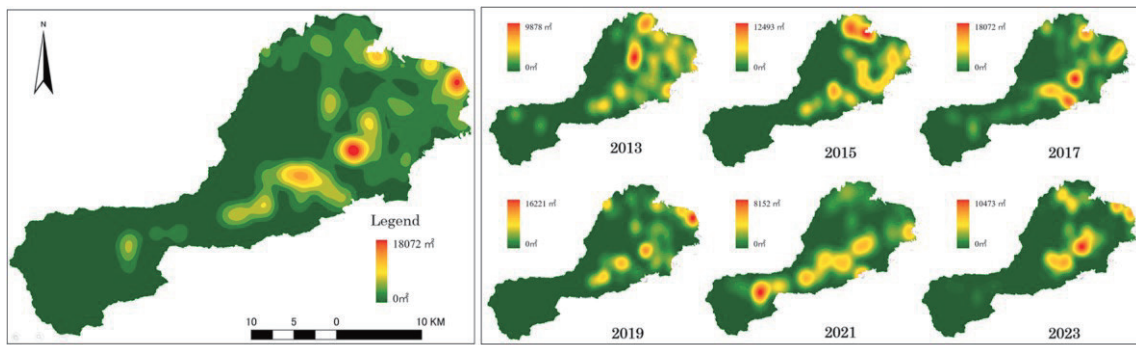


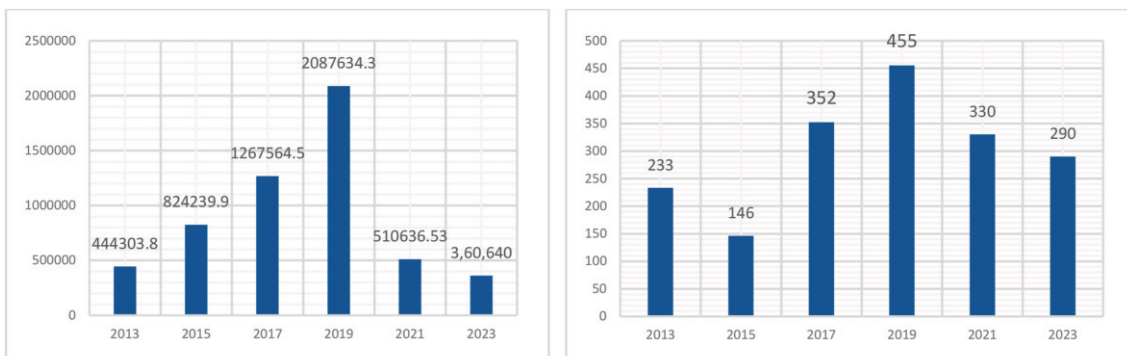
図-1. 対象地：三重県松阪市



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

(b) Density of PV install per 2 years

図-2. 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. PV の面積と数量の変化状況

画像を収集した。ArcGIS で航空写真のオルソ補正を行い、ArcGIS Pro の Deep Lab V3 モデルを用いて PV データの特定と抽出を行った。

PV 分布の分析結果 (図-2, 図-3) 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く。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ながらも、流域全体に比較的均等に分布していたが、2015 年には、沿岸の港湾地域で集中的に増加し、また郊外の平坦な農業地帯にも増加が見られた。2017 年から 2023 年にかけて設置された PV は、殆どが榊田川流域に沿って分布しており、2021 年には特に中上流の農村地域で見られた (図-3)。

#### (2) 5 年間における農地の作物別 PV 転用の要因分析

そこで次に、中上流において PV の分布が広がった 2016~2021 年を対象に、農地の作物別の PV 転用の実態把握とその要因分析を行った。具体的には、衛星画像 (Sentinel-2) を使用して、2016 年から 2017 年にかけての毎月の NDVI (正規化植生指数) と MNDWI (修正化正規化水体指数) を計算し、それらを独立変数として、機械学習モデルを用いて地域内の農地を水田、小麦田、茶畑、豆畑の 4 つのタイプに分類した。さらに、ArcGIS Pro の深層学習を用いて、2021 年に撮影された航空写真を基に PV の位置情報を計算し、その分布状況を可視化し、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、社会的要因や地理的要因を組み合わせ、各作物タイプの PA 転用パターンを導き出した。結果、図-4 のように約 78 ヘクタールの農地が 5 年間で PV に転換され、主に榊田川の近接地に広がったことが分かった。異なる種類の農地の転換傾向を見ると、麦畑の転換率が最も高く (1.7%)、茶畑の転換率が最も低かった (0.66%)。主要な作物とされる水田や茶畑の PV への転換率は低い傾向が見られ、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。その中でも、水田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、これは水田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。高付加価値作物である茶畑の転換は地上開度とも関連していることが分かった。また、道路に近い農地は転換される可能性が高かったが、主要道路に沿った送電線への近接性および PV 維持管理のしやすさが要因と考えられる<sup>2)</sup>。

### 3. 太陽光発電施設の設置による温熱環境への影響評価

次に、PV の設置が地域の環境にもたらす影響について、特に温熱環境に与える影響の視点から分析を行った。詳細は、Xie (2024)<sup>3)</sup> に詳しいが、本章ではその概略を説明する。まず、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した。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の分析を行った。具体的には、航空写真と GIS で調査地域の PV を特定し、2 年ごとの統計結果をまとめ、Google Earth Engine (GEE) 上で Landsat を使用し、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。

結果、2014 年から 2023 年にかけての榊田川流域における年間平均 LST の変化を、図-5 および図-6 に示す。2014 年から 2017 年の間、都市部の LST

<sup>2)</sup> Xie, Z., Ullah, A., Takatori, C. (2024), "From Crops to Kilowatts: An Empirical Study on Farmland Conversion to Solar Photovoltaic Systems in Kushida River Basin, Japan", *Geographies*, 4(2), pp. 216-230. <https://doi.org/10.3390/geographies4020014>

<sup>3)</sup> Xie, Z., Ullah, A., Takatori, C. (2024), Evaluating the Thermal Environmental Alterations Due to Photovoltaic Installations in the Kushida River Basin, Japan", *Environmental and Sustainability Indicators*, 100397-100397. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100397>

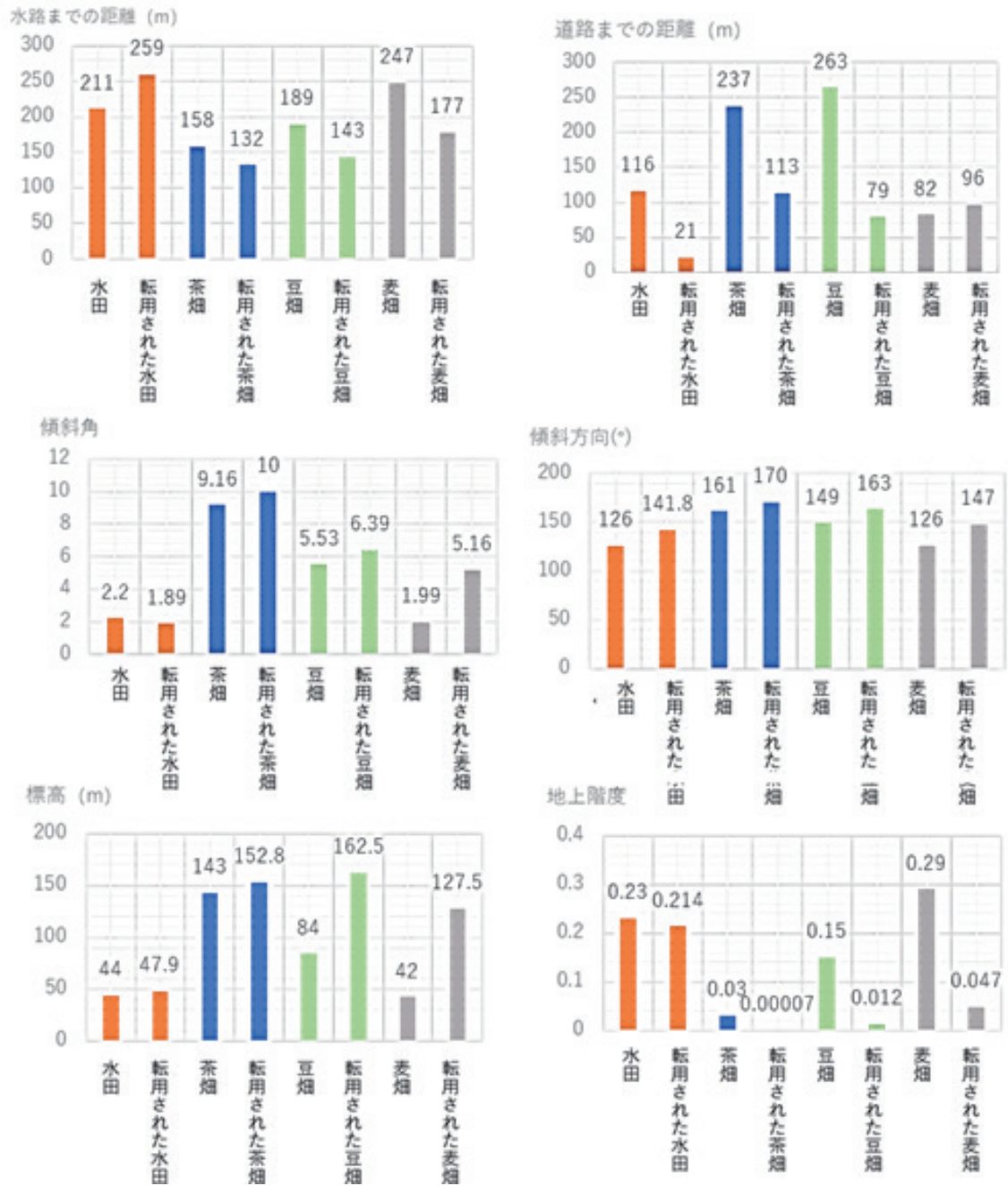


図-4. 地理的条件から見る作物別のPVへの転用実態



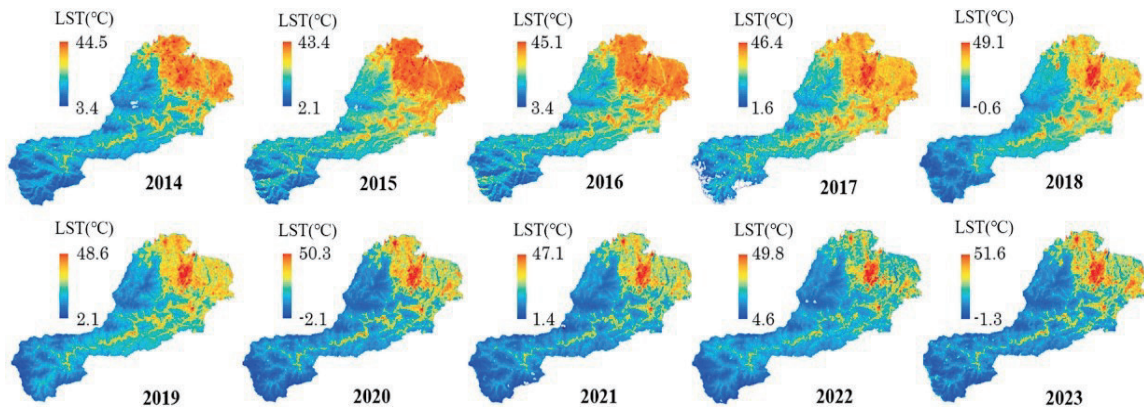


図-5 榎田川流域の年間LST

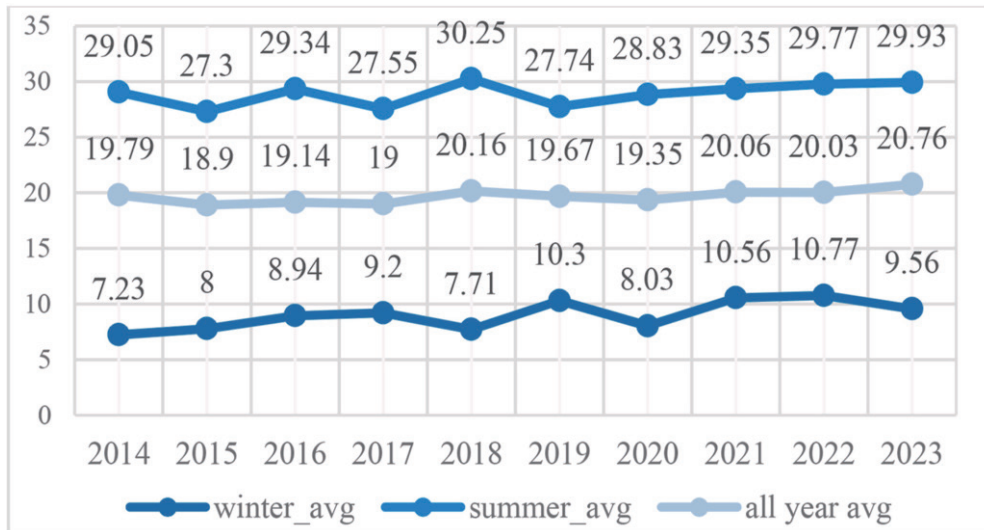
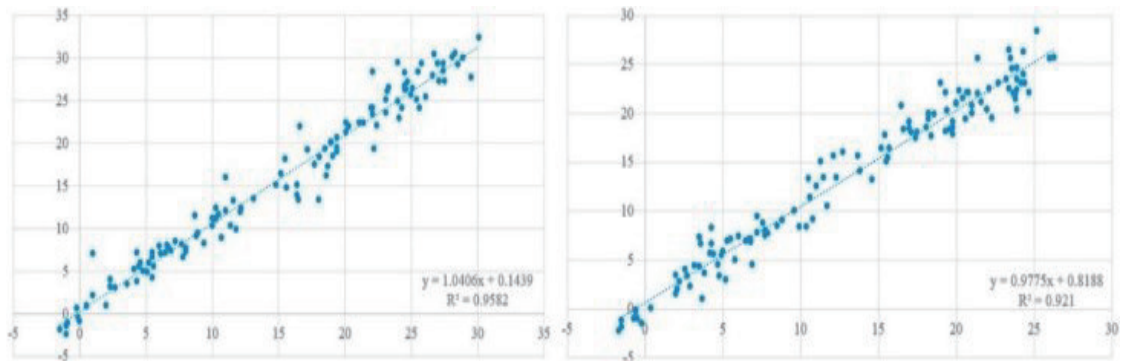


図-6 榎田川流域年間LSTの平均値



(a). KGG simulated values verification.

(b). KYM simulated values verification.

図-7 両観測所における観測値と計算値の検証

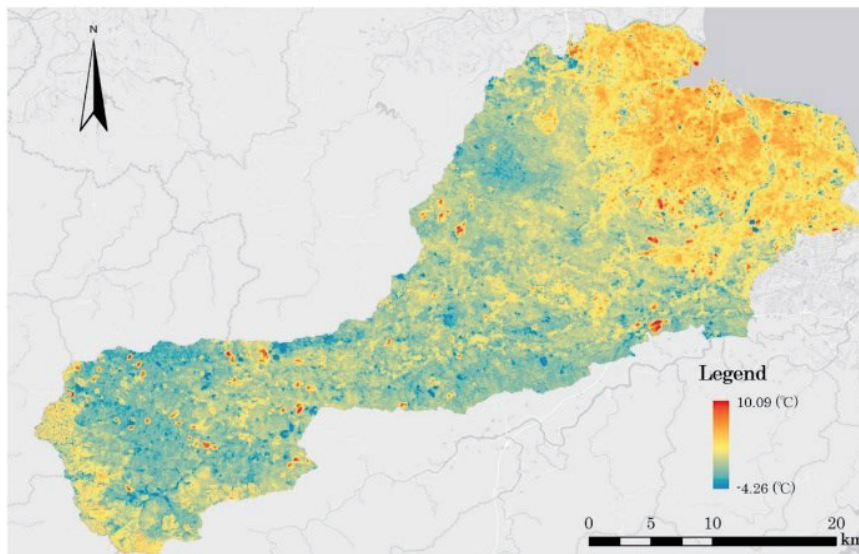


図-8 2014-2023年における櫛田川流域のLSTD（地表面温度差）

の分布は比較的均一だったが、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た。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℃から20.76℃に上昇し、平均で0.97℃の増加が見られ、特に冬の平均気温が7.23℃から9.56℃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℃から1.6℃以内、KYMでは-1.4℃から2.1℃以内であることが示された（図-7）。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であった。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いといえる。

次に、2014年から2023年のLST（地表面温度）データを、ArcGISでラスター計算を行い、2014年と2023年の地表面温度差（LSTD）のマップを作

成した（図-8）。櫛田川流域におけるこの2つの期間のLSTDは、10.09℃から-4.26℃に達し、地域における10年間の平均年間LSTDは1.65℃だった。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℃に達した。対照的に、最も少ない増加は秋で、0.5℃であった。夏と冬のLSTDはそれぞれ1.98℃と1.42℃増加していた。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℃で、最大で9.44℃、最小で0.07℃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た。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-9）。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-10）。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である。結果は、13～18年の期間における年間平均

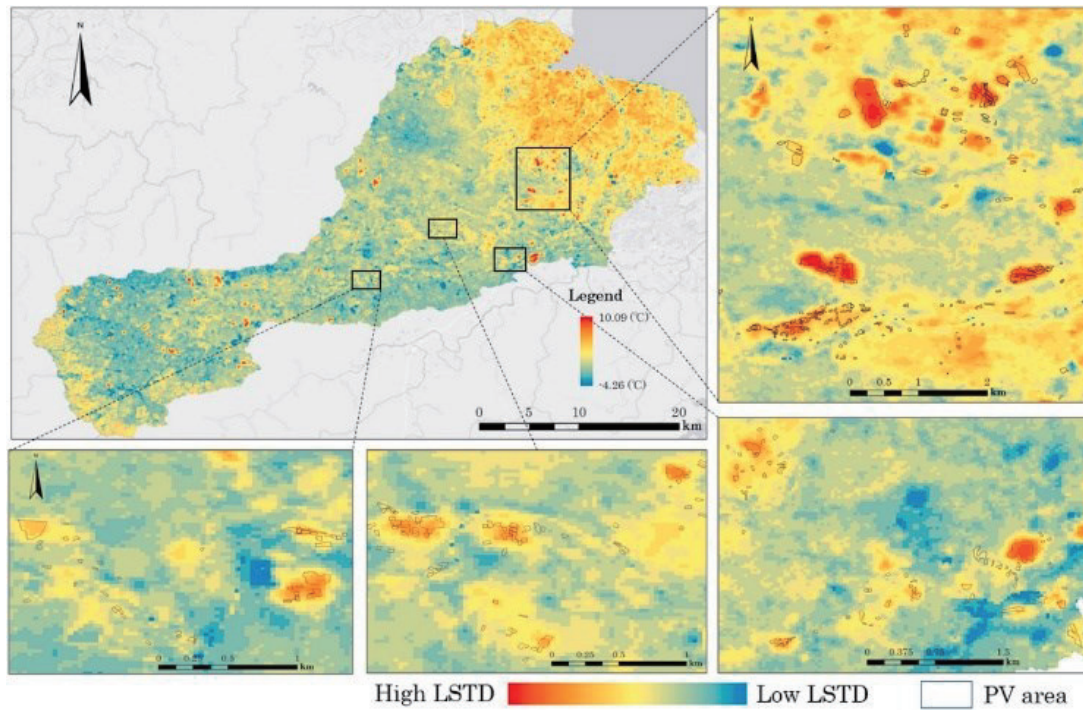


図-9 PV ポリゴン内の LSTD

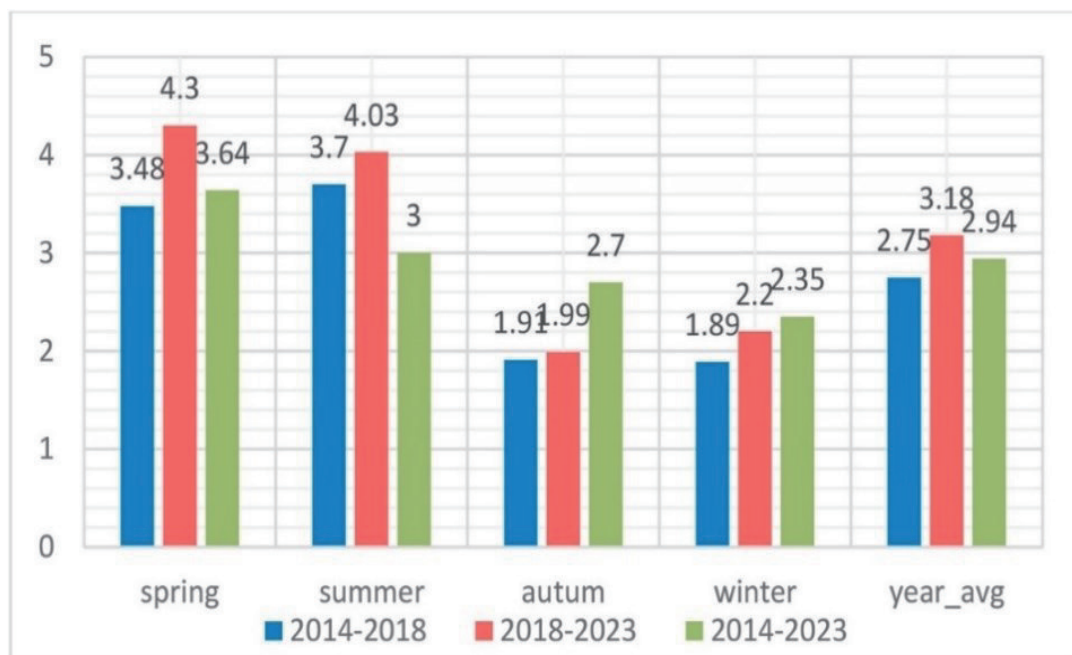


図-10 2時期の各季節にわたるPVが起こしたLSTD分析



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℃）、秋ではほとんど無視できる程度の差（-0.04℃）であった。

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℃に達し、冬は最も低く、2.3℃の上昇となり、平均では2.85℃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見られる。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。

シミュレーションとモデル計算の結果から、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った。都市域における10年間のLSTDは2.56℃であり、郊外部の1.32℃よりも高く、平均で1.24℃の差があった。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℃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℃と比較して、わずかに0.41℃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た。

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を示した。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。

#### 4. 将来人口減少下における農地管理シナリオ

##### (1) 人口減少下シナリオの設定

以上の農地のPV転用の実態を踏まえ、人口減少下における流域単位での都市農村の土地利用・農地管理将来シナリオを設定した。まず、将来の人口減少シナリオとして、次の3つを設定した（図-11）。

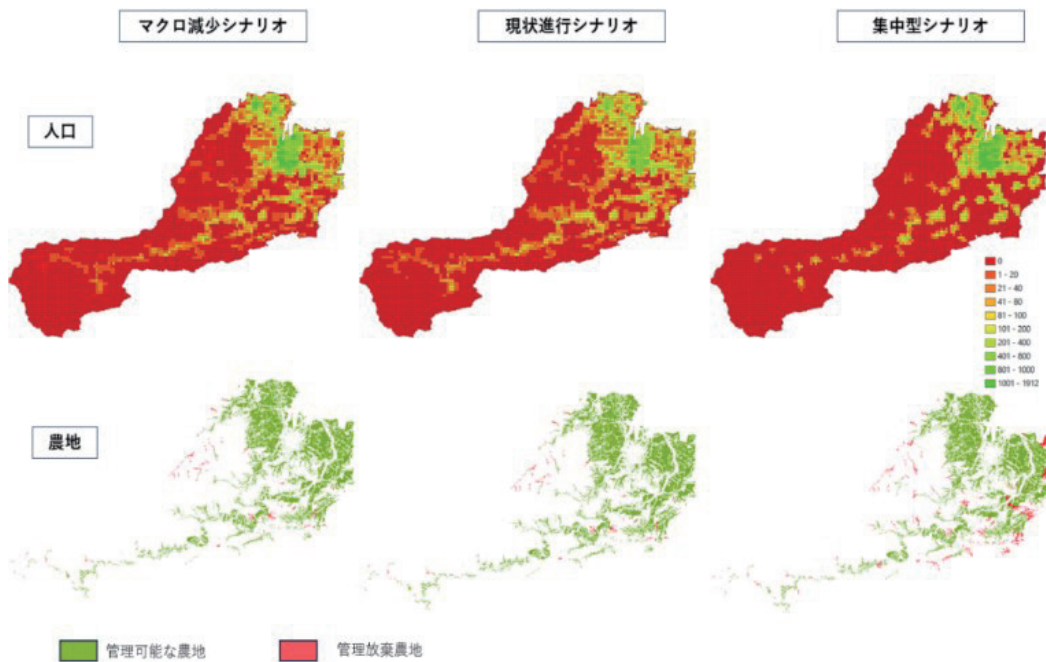


図-11. 各シナリオの人口密度と農地管理範囲



表-1. 人口減少—農地管理シナリオにおける面積

人口減少シナリオ	農地管理シナリオ	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	8,832	1283	778	10,893
	エネルギー優先	7,065	3430	398	
	生態系保全優先	7,065	670	3,158	
現状進行型	生産性優先	9,217	998	1,411	11,626
	エネルギー優先	7,373	3,760	493	
	生態系保全優先	7,373	931	3,044	
コンパクト型	生産性優先	8,766	642	338	9,746
	エネルギー優先	7,012	2,110	624	
	生態系保全優先	7,012	894	1,840	

## A. マクロ減少型シナリオ：

国立環境研究所による人口減少速度を「強」と設定した 2050 年全国人口分布将来推計データに基づくシナリオ（2050 年人口は、205,496 人）。

## B. 現状進行型シナリオ：

国土数値情報における 2050 年人口予測値に基づくシナリオ（櫛田川流域の 2050 年人口は、221,678 人）。

## C. コンパクト型シナリオ：

将来人口の総人数を①と同じ 221,678 人と設定し、居住エリアは、地域の拠点施設である役場・道の駅・販売店・集会所・病院を含む小地域で人口を集約するシナリオ。ここで、人口を集約する範囲は施設の中心点から 2.5km 内のメッシュとし、密度の変動範囲は現状（2015 年）を目安に設定した。また、以上の拠点的施設を含まない小地域の人口は、他の小地域へ移住するとして設定を行った。

## (2) 人口減少シナリオごとの農地管理シナリオ

次に 3 シナリオにおいて、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した。さらに、上記 3 タイプの人口減少シナリオに対し、地理的条件により、農地管理シナリオをそれぞれ 3 つのパターンに分けた。

## 1) 生産性優先シナリオ：

管理可能な範囲内の農地では、4 種類の作物の単位面積あたり年間で必要な管理作業時間を計算し、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た上で、今後も維持する農地とした。それ以外の管理不能な農地は、PV の日射量解析と 2 章で計算した PV の地理的条件平均値に応じて、優先的に PV へ転用する農地、それ以外は自然に返す農地とした。

## 2) エネルギー優先シナリオ：

管理可能な農地の 80% を維持する農地とし、それ以外の農地は日射量解析と 2 章で計算した PV の地理的条件平均値をもとに、PV への転用を優先した。それ以外は自然に返す農地とした。

## 3) 生態系保全優先シナリオ：

今後も維持する農地についてはエネルギー優先シナリオと同じとした上で、年間の管理作業時間を踏まえ、管理可能な農地の 80% を保留し、現在の PV の年間日射量（収集量）平均値の 1.5 倍以上の場所のみ転用し、それ以外の農地はすべて自然に返す（管理放棄）土地とした。

以上の条件を用いて、維持する農地面積・PA へ転用する農地面積・自然に返す農地面積をまとめると、表-1 のようになった。

### 5. 各シナリオのESへのシナジー・トレードオフの影響

まず、現状の土地利用・農地管理状況に対し、榎田川流域のESの空間分布の特徴を解明した。ArcGIS及びInVESTモデルを活用したES評価を行った。生態系サービスの指標について、①供給サービス：農地面積、農地の経済価値、農地の生産面での利便性（標高・傾斜）、再生可能エネルギーの生産可能性、②調整サービス：炭素貯留、水源水質、土壌保持、生息地の質、③文化的サービス：観光スポットや文化遺産へのアクセス性、主要道路からのPVの距離による景観評価、の合計10種類から評価した。結果、①供給サービスは、主に中流および下流部にESが高い値が分布していた。②調整サービスは、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する一方、土壌保持と生息地の質の分布状況は主に森林、または自然の多い場所に集中していた。③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（図-12）。

さらに、人口減少が進む将来の9シナリオに基づき、生産性優先、エネルギー優先、生態系保全優先という異なる農地管理が、ES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。ES間の相関を取ることで、そのシナジーとトレードオフの分布を分析した（図-13）。結果、以下の点が特に重要であった。第一に、コンパクト型エネルギー優先シナリオでは、ES間のトレードオフが最大となった。特に、供給サービス（農地の面積・生産性・再エネ発電量等）と調整サービス（水源水質・生息地の質）とのトレードオフが顕著に現れ、生態系サービスのバランスが崩れることが明らかとなった。また、マクロ減少型・現状進行型の生産性優先シナリオでも、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、長期的な調整サービス（水源水質や生息地の質）の低下等、生態系の持続可能性を損なうリスクが示された。それらのバランスを慎重に考える必要がある。第二に、生態系保全を優先するシナリオは、調整サービスのシナジー効

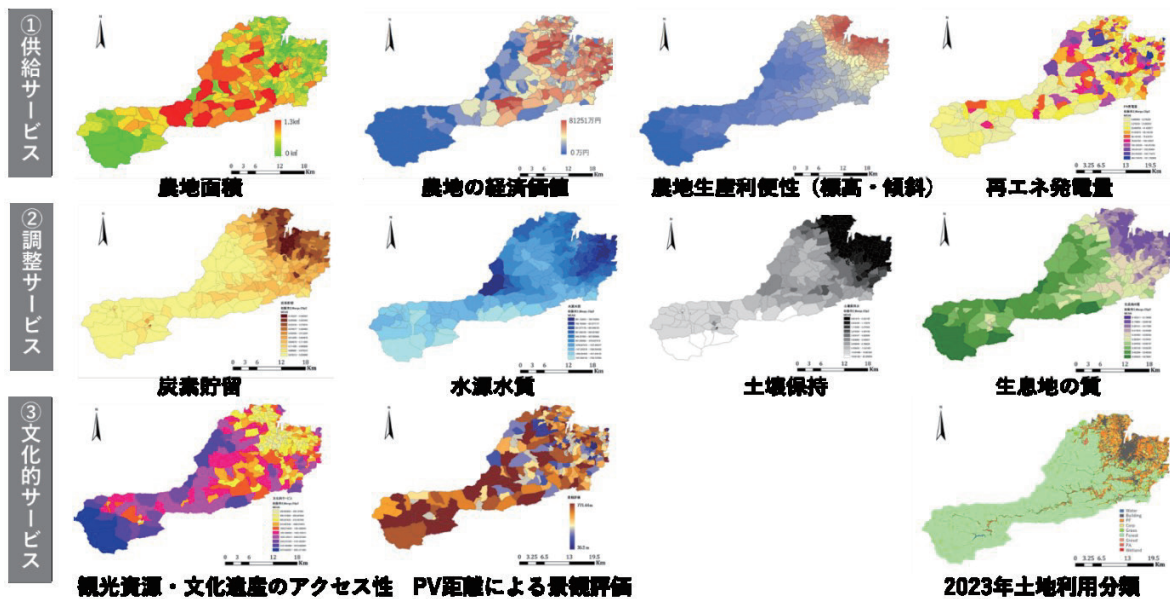


図-12. 2023年現在の生態系サービス（小地域）評価

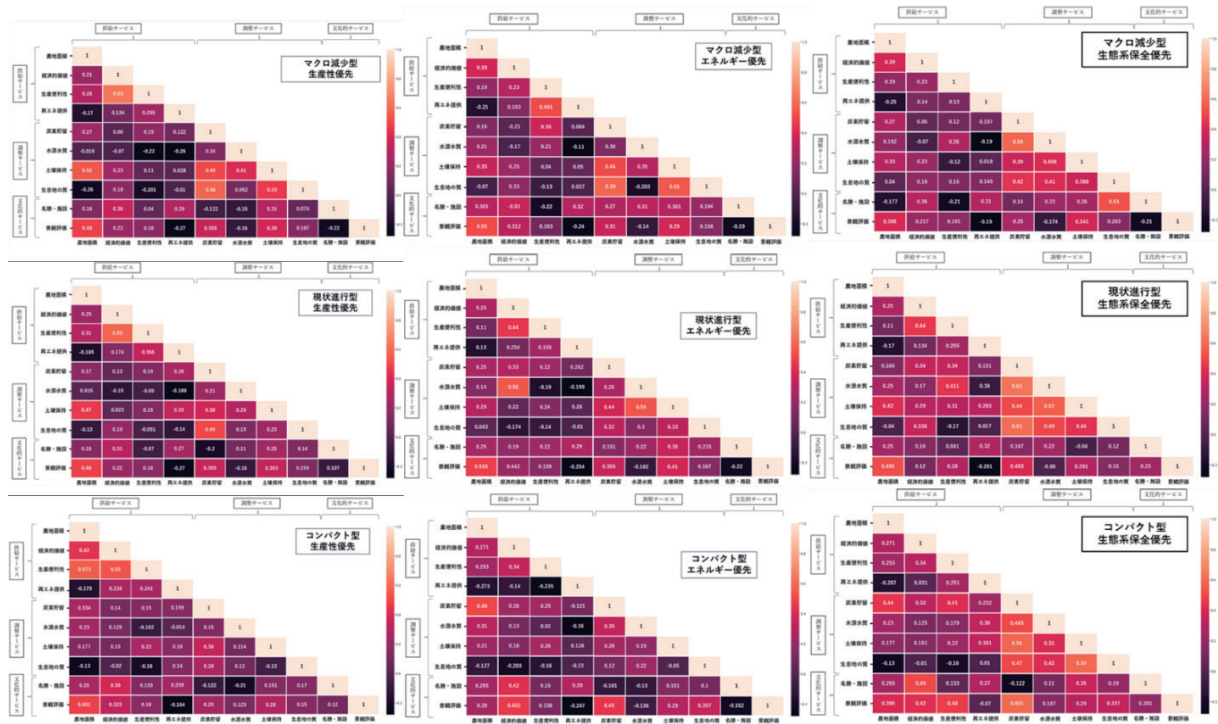


図-13. シナリオ別の生態系サービス間のトレードオフとシナジー

果が確認され、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。特に、コンパクト型生態系保全シナリオは、ES間でトレードオフがある項目が最小かつシナジーの項目が最大となり、また文化的サービスと供給・調整サービス間のシナジーも最大となり、持続可能な社会を目指すうえで有望な戦略であることが示された。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を相互に強化することが可能であると示唆された。

本研究は、脱炭素や人口減少という多くの課題に直面する都市・農村に対し、ES間のトレードオフ及びシナジーを踏まえ、持続可能な土地利用計画を立案するための基礎的な枠組みを提供することを目指している。今後は、ESの評価手法の精度向上や、将来の気候変動シナリオを考慮に入れたより精緻な土地利用計画を検討することが課題として挙げられる。また、以上の成果について、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、持続可能な社会に還元する

在り方が必要とされている<sup>4)</sup>。

<sup>4)</sup> 高取千佳, 謝知秋(2025), “都市農村の統合的な計画体系—脱炭素および生態系サービスのトレードオフ・シナジーを踏まえた流域単位の土地利用計画”, 都市計画 Vol. 74, No. 1, pp. 66-69.



## &lt;参考文献&gt;

- 1) Amro, Z., Aly Mousaad, A. (2024), “A Review of Agrivoltaic Systems: Addressing Challenges and Enhancing Sustainability”, *sustainability*, 16, p. 8271, <https://doi.org/10.3390/su16188271>
- 2) Xie, Z., Ullah, A., Takatori, C. (2024), “From Crops to Kilowatts: An Empirical Study on Farmland Conversion to Solar Photovoltaic Systems in Kushida River Basin, Japan”, *Geographies*, 4(2), pp. 216-230.  
<https://doi.org/10.3390/geographies4020014>
- 3) Xie, Z., Ullah, A., Takatori, C. (2024), “Evaluating the Thermal Environmental Alterations Due to Photovoltaic Installations in the Kushida River Basin, Japan”, *Environmental and Sustainability Indicators*, 100397-100397.  
<https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100397>
- 4) 高取千佳, 謝知秋(2025), “都市農村の統合的な計画体系—脱炭素および生態系サービスのトレードオフ・シナジーを踏まえた流域単位の土地利用計画”, *都市計画* Vol. 74, No. 1, pp. 66-69.