

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06338

研究課題名（和文）営農型太陽光発電のシステムおよび作型の最適化アルゴリズムの構築

研究課題名（英文）Development of optimization algorithm for agrivoltaics system and cropping type

研究代表者

霧村 雅昭（KIRIMURA, Masaaki）

宮崎大学・農学部・助教

研究者番号：40433065

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：営農型太陽光発電設備設置による影響を調査し、食料生産とエネルギー生産の両立について実現可能性を検討した。発電設備下では、日射量、気温、地温および作物の成長速度は低くなったが、栽培期間を延長することで、出荷規格を満たし、十分な収量を得られることが示された。また、全気候太陽スペクトルモデルを使用した日射量データに基づく太陽光パネル下の光合成光子束密度を推定する計算モデルを作成した。さらに宮崎県のサトイモ栽培をモデルケースにして、日射量データを使用して特定の地域で設備を導入した場合の具体的な効果を算出するモデルを作成した。結果から食料生産とエネルギー生産を両立した農業システムの実現可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

営農型太陽光発電は農地保全や農家所得の向上、エネルギーの地産地消、太陽光発電用地確保などの観点から期待されているが、発電設備が農地を遮光するため、作物の収量低下などの悪影響が懸念されていた。本研究では営農型太陽光発電設備が栽培環境や作物の生育に及ぼす影響を調査し、営農型太陽光発電に適した作物や品種、作付け方法を明らかにし、農業と太陽光発電事業を同時に行うための栽培管理方法を確立した。本研究成果により、営農型太陽光発電の導入可能性や適した作物についての検討が可能となり、再生可能エネルギーを活用した持続可能な農業システムの構築に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated the feasibility of combining food and energy production into a single field by examining the effects of installing photovoltaic equipment above land used for farming. Both the amount of solar radiation, the air and soil temperature and growth rate were lower under the photovoltaics than those under the open field. However, yields and qualities sufficient to meet market demands remained possible with extension of the cultivation periods. In addition, we employed an all-climate solar spectrum model to calculate the photosynthetic photon flux density accurately on farmland partially shaded by solar panels and supporting tubes. Finally, established a model that calculates the quantitative effect of the introducing the system in any area with solar irradiation data based on taro cultivation in Miyazaki Prefecture as a model case. Therefore, providing a novel opportunity to realize an integrated agricultural system with parallel production of food and energy.

研究分野：施設園芸学

キーワード：営農型太陽光発電 食料生産 エネルギー生産 光合成有効光量子束密度 日射量

1. 研究開始当初の背景

営農型太陽光発電は、農地に支柱を立てて上部空間に太陽光発電設備を設置し、農業と発電事業を同時に行う新しい産業形態であり、農業所得の向上、新規就農の促進、日本の農業の発展、さらには国家の食料およびエネルギーの安全保障への寄与が期待される。一方で、営農型太陽光発電設備の設置には支柱部分の一時転用申請が必要であり、設置許可を得るためには当該設備を設置していない周辺農地の収量に対して80%以上を維持し、適切な営農を継続することが必要である(農林水産省の2013年3月31日付けの通知(平成30年5月改正))。しかし、支柱を立てて営農を継続する太陽光発電設備等についての農地転用申請に必要な「生育に適した条件等(日照特性等)及び設計上生育に支障が生じない理由」を裏付ける科学的なデータは少なく、設置許可の審査が難航しており、客観的な評価システムの構築が望まれている。一方で、農林水産省からは営農型太陽光発電の優良事例としてブルーベリーやサツマイモ、ダイズ、米、茶が公表され、成功事例も増えてきている。しかしながら、これらの事例は太陽光発電パネルの設置密度が小さいものや当該設備の投影面積などが不明であるものが多く、設置密度の異なる条件での気象や収量についての比較データもない。また特定の地域で特定の時期に特定の作物のみ栽培した事例であり、事例の汎用性は低く、農地の利用期間も限定的である。したがって、当該施設が農地環境や農作物に及ぼす影響や設置許可条件である収量80%以上の維持が可能なパネル密度の閾値、周年的な農地活用が可能な作型は明らかにされていない。

2. 研究の目的

農地に設置した営農型太陽光発電設備が栽培環境へ及ぼす影響の調査や栽培試験による営農型太陽光発電に適した作目や品種、作型の検討により、農業と太陽光発電事業を両立させる管理法の確立を目的とした。具体的には、課題1) 実際の栽培現場から得られるビッグデータを利用した発電量や収量の予測モデルを構築・統合、課題2) 非線形計画法を用いて説明変数に営農型発電の設備や面積、地域、作物、品種、栽培時期などを設定し、目的変数には発電量や収量、農家所得の最大化条件、エネルギーの地産地消が実現可能な設備と規模の条件などを設定することで、課題3) 営農型太陽光発電の導入目的に応じた解が得られるアルゴリズムを構築、検証することであった(図1)。

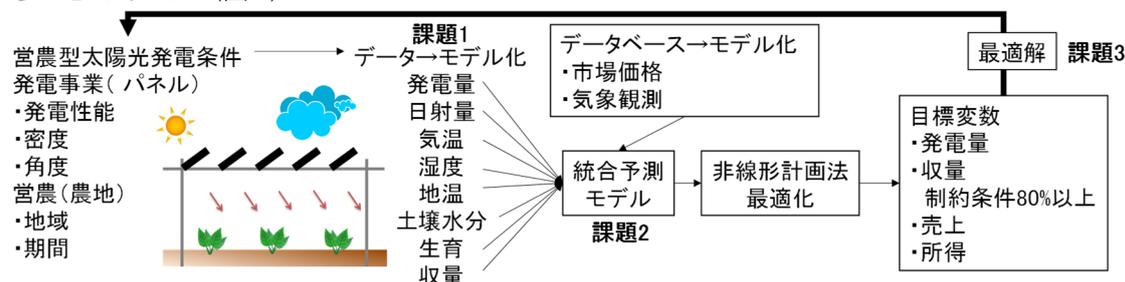


図1 本研究課題の研究スキーム。

3. 研究の方法

1) 設備下で数種類の作物を栽培する試験

営農型太陽光発電設備が作物の生育および栽培環境に及ぼす影響を調査するため、宮崎大学農学部研究圃場にパネル角度を調節可能な営農型太陽光発電設備(MY発電所キット・ソラシェア、株式会社Loop)を2台設置し、下部の農地において栽培試験を実施した(図2)。1台あたりの発電容量は約12kWp、設置面積は約1a、農地に対するパネルの被覆率は62%であった。営農型太陽光発電設備下(以下、設備区)と設備による遮光の影響を受けない農地(対照区)で、葉菜類、果菜類および根菜類の多様な作物を栽培した(表1)。

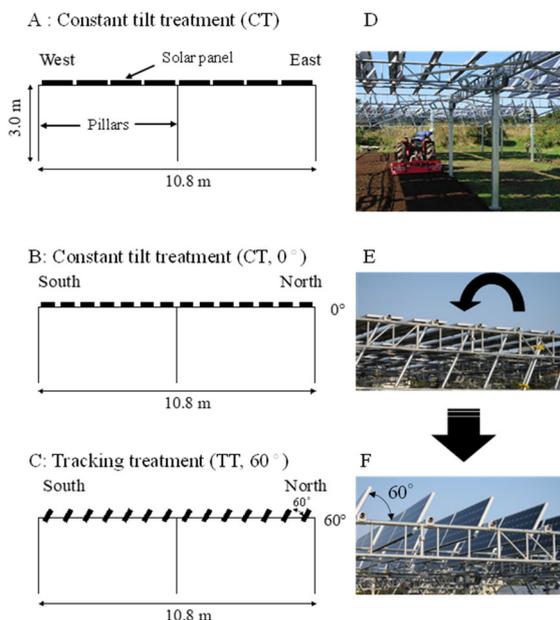


図2 実験に使用した営農型太陽光発電設備の側面図(A, B, C)。設備下でトラクターを使用している様子(D)。太陽光発電パネルは角度調整が可能仕様(B, C, E, F)。パネル角度が水平状態0°(B, E)と60°(C, F)の様子。

表 1 太陽光パネル角度と調整日.

栽培年度	栽培作物					
2014	コマツナ	カブ	ミズナ	ホウレンソウ	コムギ	ナタネ
2015	サツマイモ	イネ	コマツナ	ダイコン	ミズナ	ブロッコリー
2016	コマツナ	ハクサイ	シシトウ	ホウレンソウ	ダイコン	ハクサイ シュンギク ニンジン
2017	サトイモ	サツマイモ	エダマメ	オクラ	ズッキーニ	コマツナ ホウレンソウ ジャガイモ
2018	ジャガイモ	サトイモ	サツマイモ	エダマメ	ジャガイモ	ホウレンソウ
2019	ジャガイモ	サトイモ	サツマイモ	ダイコン	ホウレンソウ	
2020	サトイモ					

調査は、発電量のほか、栽培環境として日射量、光合成有効光量子束密度 (PPFD)、気温、湿度、地温および土壌水分、植物の生育として草高、生体重、SPAD 値、Fv/Fm 値について実施した。

栽培事例として 2014 年 11 月から 2015 年 3 月にかけて栽培したコマツナ (*Brassica rapa* L. var. *Perviridis* Group cv. *Naturakuten*)、ミズナ (*Brassica rapa* L. *Japonica* Group cv. *Kyoshigure*)、カブ (*Brassica rapa* L. *Rapifera* Group cv. *CR Yukibana*) およびホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L. cv. *Bentenmaru*) の結果を主に報告する。設備区では太陽光発電パネルでの発電量が最大となるようにパネル角度を太陽と垂直に毎月調節した区 (可変区, TT) と、地面への直達光が最大となるようにパネル角度を水平に固定した区 (固定区, CT) を設けた (表 2)。また、春から秋の栽培では、TT と CT のパネル角度がほぼ同じになるため、発電優先区と南中時の遮光面積が半分となるようパネルを 60° 傾けた発電半量区を設けた。

表 2 太陽光パネル角度と調整日.

Adjusted date	Constant tilt treatment		Tracking treatment	
	Adjusted tilt (°)	Optimum tilt (°)	Optimum tilt (°)	Adjusted tilt (°)
Nov. 11, 2014	0	52.0	52.0	50
Dec. 17, 2014	0	58.7	58.7	60
Jan. 8, 2015	0	56.4	56.4	60
Feb. 5, 2015	0	46.4	46.4	50
Mar. 1, 2015	0	31.5	31.5	30

Optimum tilts followed the "MONSOLA-11" (NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan) database. <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (Accessed 11 March 2021).

2) 設備下に到達する光量を推定するモデルの作成

設備下の PPFD を計算するためには、パネルと支柱などの構造物によって遮光された直達光と散乱光が異なるスペクトルを持つため、別々に計算することが不可欠である。そこで、パネルとその支持管による遮光を、太陽の移動に伴う直達光と散乱光で定量化する方法を検討した。太陽の動きと、パネルとその支持管の位置を観測点からの仰角と方位角で定義し、計算式を作成した。

3) 太陽光発電と農業生産の両立し、最大化する農業システムの評価モデルの作成

文献からサトイモの成長モデルを作成し、課題 2 で作成した計算式と統合することで、公開されている日射量データから最適なサトイモの植え付け時期を検討した。最適な収穫時期はサトイモの卸売価格が高い時期とした。

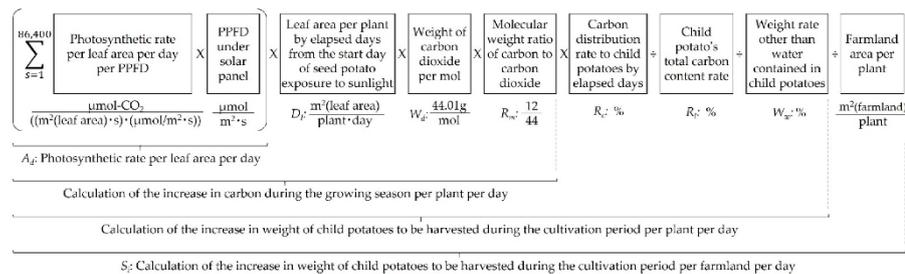


図 2 サトイモの成長モデル.

4. 研究成果

1) 設備下で数種類の作物を栽培する試験

2014 年の栽培環境は設備下では日射量が減少し (図 3)、最高気温は低く、最低気温は高くなり、気温の日較差が小さかった (図 4)。設備下ではいずれの作物も成長が遅かったが、ホウレンソウ以外の作物は栽培期間を長くすることで出荷規格を満たし、CT では収量も対照区と同等に得ることができた (図 5)。栽培期間中の収入を試算した結果、農業収入は対照区のコマツナで 2 回目の収穫、発電収入はカブの 3 回目の収穫で最大であった (表 3)。農業収入と発電収入を合計した総収入は対照区のコマツナの 2 回目の収穫であったが、対照区の 2、3 回目の収穫は出荷規格のサイズを超えたため実際には出荷できず、TT 区のコマツナの 3 回目のが最大であった。

栽培試験の結果、コマツナやミズナ、カブ、ホウレンソウ、ハクサイ、シュンギク、ダイコンなどの秋冬作においては対照区よりも設備区で生育が遅延し、出荷基準を満たすまでの栽培期間は長くなったが、最終的には出荷基準を満たし、十分な収量が得られた。また、ミズナやハクサイ、シュンギク、ダイコンは、温暖な気候である宮崎では 3 月に抽だいて商品価値がなくな

るため、収穫時期を逃さないように注意が必要であり、さらに栽培時期を早めることで、抽だいのリスク軽減や生産性の向上が期待できる。一方で、コマツナの夏作においては対照区よりも設備区で生育が早かった。これは遮光によって過剰な日射が遮られ、強光や土壌乾燥によるストレスが軽減されたためと推察される。

オクラとズッキーニは複数の品種を供試したが、いずれの品種においても設備区で大幅な減収が認められた。春から夏秋にかけて栽培される果菜類は一般的に多くの光を必要とすることから、営農型発電での栽培は不適であり、パネル密度を減らすなどの対策が必要と考えられる。

ジャガイモは秋作に‘デジマ’と‘ニシユタカ’を、春作には‘男爵薯’、‘メークイン’、‘キタアカリ’、‘インカのめざめ’を栽培した。秋作では設備区の減収は認められなかったが、春作では‘インカのめざめ’以外の品種は設備区で2~3割の減収が認められた。したがって、営農型発電におけるジャガイモ栽培は春作よりも秋作が適しており、また春作においては、設備区の減収割合が2割以内であった‘インカのめざめ’が適した品種といえる。

サトイモでは設備区で収量の減少はみられず、特に発電半両区では対照区よりも収量が増加した年もあった。収量の年次変化は大きく、台風の影響が多い年では地上部の倒伏などの被害もあり、すべての区で収量は少なかったが、区間に差がみられなかった。一方で、天候に恵まれた年にはすべての区で収量が多く、発電半両区で最大となった。天候に恵まれた年の対照区は土壌水分が低く、乾燥していたことから、土壌水分が生育の制限因子になったと推察される。したがって、サトイモは営農型発電に適した作物をいえる。

経済性評価の試算として、農業収入を宮崎中央青果株式会社野菜青果物市況の高値を基に売上を算出し、売電収入は発電量と売電価格(32円/kWh)から算出した(図6)。栽培期間中の同面積当たりの売電収入は対照区の農業収入よりも1.2~6倍大きかった。サトイモの売電収入は2017年よりも2018年で小さいが、これは栽培期間が2017年は215日、2018年は159日と異なるためである。栽培していない期間でも発電しており、同じ期間であれば発電量に大きな差はみられない。発電量の年次変化は小さく発電事業からは安定した収入を得られるが、農業収入は天候や作物の種類、品種や出荷時期の違いによって大きく異なる。つまり、営農型太陽光発電に適した作物や品種、作期を選択することで、減収のリスクを低減でき、増収も期待できる。

以上のことから、営農型太陽光発電のメリットとして以下のことがあげられる。①農業収入は収穫時のみに得られるが、太陽光発電による売電収入は一年を通じて毎月得られる。②単位面積当たりの売電収入は農業収入よりも多く(システムコストとFITの買取価格に依存)、農家所得向上が期待できる。③発電設備下では日射量が減少するものの、土壌水分、気温、地温などの栽培環境要因の変動が小さく、減収の回避や増収が期待できる。④単位面積当たりの増収が期待できることから、農地の有効利用や自給率向上が期待できる。

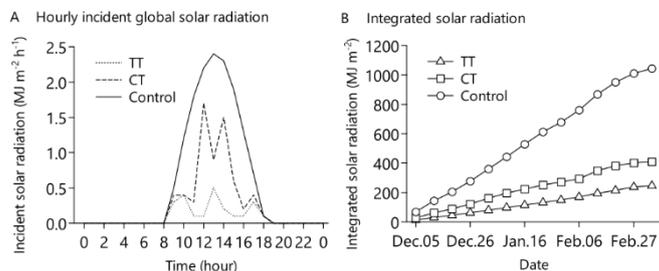


図3 日射量の経時変化 (A)と積算日射量の推移 (B).

Control : 対照区, CT :

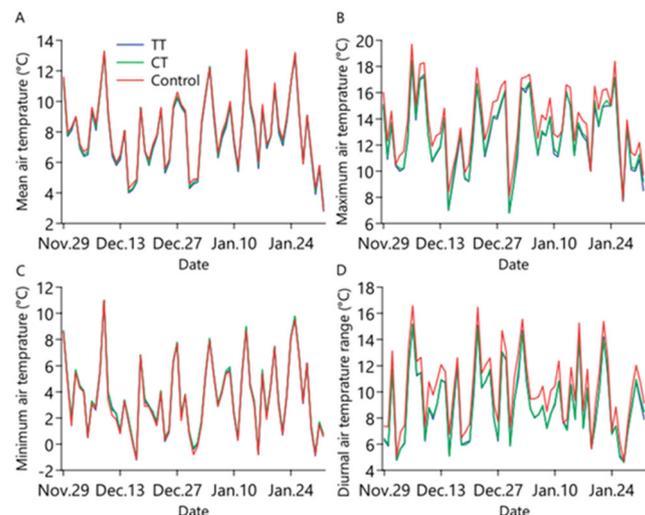


図4 日平均気温 (A), 日最高気温 (B), 日最低気温 (C) および日較差 (D) の推移.

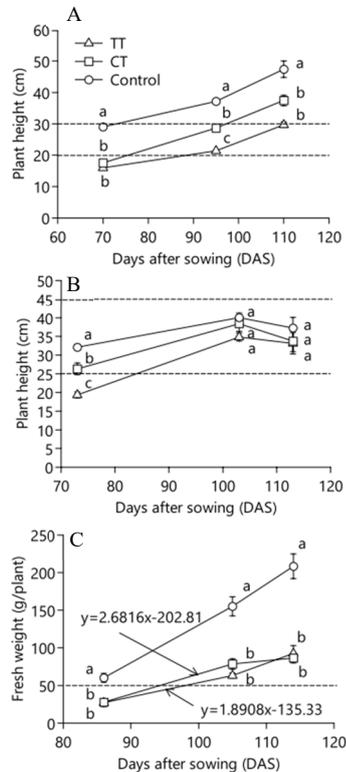


図5 コマツナの草高 (A), ミズナの草高 (B) およびコカブの根重 (C). 図中の破線は出荷規格を示す。○: 対照区, □: CT, △: TT. 図中の異なる文字間に有意差有り (Tukey-Kramer test, $P < 0.05$, $n = 5$). バーは標準誤差.

表3 太陽光パネルによる遮光が農業収入、発電収入および総収入に及ぼす影響。

Crop	Number of harvests	Market price (yen/kg)	Crop sales income (yen/system)			Electricity sales income (yen/system)			Total income (yen/system)		
			TT	CT	Control	TT	CT	TT	CT	Control	
Komatsuna	1st	469	43,778	37,962	202,471	109,349	79,190	153,127	117,152	202,471	
	2nd	431	66,783	113,047	461,230	132,996	98,857	199,780	211,903	461,230	
	3rd	329	139,806	206,206	411,041	167,851	131,987	307,658	338,193	411,041	
Mizuna	1st	443	6,436	6,320	28,710	112,241	81,956	118,678	88,276	28,710	
	2nd	412	28,714	54,668	92,761	156,466	121,125	185,179	175,793	92,761	
	3rd	320	25,738	65,068	48,353	174,093	138,238	199,831	203,306	48,353	
Kabu shoot	1st	437	22,257	22,864	33,690	134,130	100,041	156,387	122,905	33,690	
	2nd	366	31,090	31,937	44,528	158,591	123,267	189,681	155,204	44,528	
	3rd	309	30,828	26,890	49,057	174,280	138,436	205,108	165,326	49,057	
Kabu root	1st	126	5,940	6,053	13,085	134,130	100,041	140,070	106,095	13,085	
	2nd	144	15,728	19,596	38,598	158,591	123,267	174,319	142,863	38,598	
	3rd	141	22,574	21,105	50,747	174,280	138,436	196,855	159,541	50,747	
Kabu shoot and root	1st							162,327	128,959	46,775	
	2nd							205,409	174,800	83,126	
	3rd							227,683	186,430	99,804	
Spinach	1st	443	2,457	12,975	70,080	162,348	126,846	164,805	139,821	70,080	

Market prices according to the “Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries Wholesale Market Survey of Fruits and Vegetables (Daily Survey).”

https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/seika_oroosi/ (Accessed 11 March 2021).

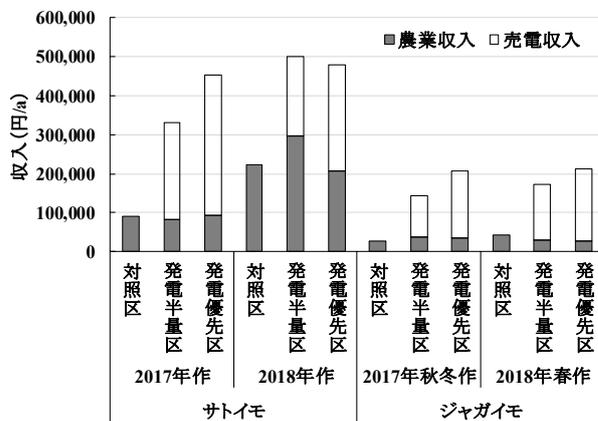


図6 農業収入と栽培期間中の売電収入。サトイモの栽培期間：2017年作215日，2018年作159日。ジャガイモの栽培期間：2017年秋冬作114日，2018年春作97日

2) 設備下に到達する光量を推定するモデルの作成

作成した計算式に公表されている近隣の日射量データを導入することでPPFDを算出し、実測値と比較したところ高い精度が得られ、パネル角度の違いも表現することができた。本研究の結果、対象農地の日射量測定データを用いることで営農型太陽光発電システムの導入前に農業生産への遮光の影響の評価と経済性の検討が可能となった。

3) 太陽光発電と農業生産の両立し、最大化する農業システムの評価モデルの作成

本研究で作成した評価モデルにより、営農型太陽光発電システムのパネルの条件から農地に到達するPPFDやサトイモの栽培期間と収量を導くことができ、さらにサトイモの卸売価格や売電収入から経済性を評価することができ、様々なケースを比較することで営農型太陽光発電の経営戦略を容易に検討することが可能となった。

本研究の結果、設備下のPPFD、生育および経済性のモデルを統合することで営農型太陽光発電の経済性を総合的に評価することが可能となった。またこの評価方法は地域が限定されず、汎用性が高く、システム導入前に適正な営農の実現可能性や持続可能性を評価できる新しい事例として位置づけられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 KIRIMURA Masaaki, TAKESHITA Shinichi, MATSUO Mitsuhiro, ZUSHI Kazufumi, GEJIMA Yoshinori, HONSHO Chitose, NAGAOKA Akira, NISHIOKA Kensuke	4. 巻 60
2. 論文標題 Effects of Agrivoltaics (Photovoltaic Power Generation Facilities on Farmland) on Growing Condition and Yield of Komatsuna, Mizuna, Kabu, and Spinach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 117 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2525/ecb.60.117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 霧村雅昭	4. 巻 96
2. 論文標題 栽培と太陽光発電を組み合わせたソーラーシェアリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業および園芸	6. 最初と最後の頁 129-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yajima Daisuke, Toyoda Teruya, Kirimura Masaaki, Araki Kenji, Ota Yasuyuki, Nishioka Kensuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Agrivoltaic system: Estimation of photosynthetic photon flux density under solar panels based on solar irradiation data using all-climate solar spectrum model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cleaner Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 100594 ~ 100594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clet.2022.100594	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yajima Daisuke, Toyoda Teruya, Kirimura Masaaki, Araki Kenji, Ota Yasuyuki, Nishioka Kensuke	4. 巻 16
2. 論文標題 Estimation Model of Agrivoltaic Systems Maximizing for Both Photovoltaic Electricity Generation and Agricultural Production	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3261 ~ 3261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en16073261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本みどり, 津々木寛, 松井保裕, 松浦桃香, 霧村雅昭
2. 発表標題 営農型太陽光発電におけるイモ類の生産性と経済性の評価
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年千葉大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霧村雅昭
2. 発表標題 エネルギーと食料を生産する営農型太陽光発電
3. 学会等名 宮崎大学第84回イブニングセミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 霧村雅昭
2. 発表標題 営農型太陽光発電（ソーラーシェアリング）に適した農業形態について
3. 学会等名 みやざき新産業創出研究会次世代エネルギー活用技術分科会第2回太陽光発電利活用の多様性に関する技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------