

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2018～2021

課題番号：18KT0087

研究課題名（和文）農業生態系における野草・雑草群集の役割の見直しと適応的管理

研究課題名（英文）Reassessment of the role of wild grass and weed species in the agro-ecosystem services for adaptive crop and natural resource management

研究代表者

加藤 洋一郎（KATO, YOICHIRO）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：50463881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ドローンによる耕地／草地生態系の自動モニタリングを想定し、実生あるいは栄養成長器官の画像について植物種の自動認識システムの開発を目指した。この開発は、トレーニングデータ準備と植物種の自動識別のための深層学習アルゴリズム開発からなる。準備した画像データベースを用いて深層学習モデルを構築したところ、種の識別率が95%を超える高い正答率が得られた。更なる正答率改善にはトレーニングデータ量を劇的に増やす必要があると予想されたため、Generative Adversarial Networkを用いた植物画像データ合成法を検討、平均91%の同定精度を持つアルゴリズムの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

作物生産と生態系保全が高度に両立した農業システムを確立するには、耕地・草地における生物多様性の高精度モニタリング技術の確立が不可欠である。植物種の自動認識技術は、環境に優しい局所雑草管理（必要な箇所にスポット状に適切な除草剤を散布）の確立にも貢献する。本研究は、農耕地の主要な雑草種を極めて高い精度で自動識別する技術を開発した。それだけでなく、現実世界の実生画像とほぼ変わらない精度の合成画像データを深層学習によって人為的に作出することに成功した。大量のトレーニングデータ取得の困難さゆえに深層学習技術を適用しづらかった野外植物学の現状の突破につながる画期的な発見である。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop an automatic plant species identification system for images of seedlings or vegetative organs. The development processes consisted of preparing a database of training data and developing a deep learning algorithm for automatic plant species identification. Using the prepared image database, a deep learning model was constructed, and a species identification rate of over 95% was obtained. Since it was anticipated that further improvement of the identification rate would require a dramatic increase in the amount of training data, we tried to develop the plant image synthesis using Generative Adversarial Network, and a practical algorithm with an average identification accuracy of 91% was successfully prepared.

研究分野：作物生産科学

キーワード：雑草

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

「持続可能な開発目標」を考慮し行われる農業は、作物生産性と生態系保全が高度に両立した持続的なシステムを目指さなければならない。耕地においては、栽培対象作物以外の植物は雑草とみなされ、水分、養分および光を巡って作物と競合し、作物収量を低下させる存在とされる。温帯モンスーン気候帯の農業では夏季に雑草が繁茂するため、雑草管理方法の確立は重要である。一方で草地生態系においては、多様な植物種の混在が維持管理の形として妥当であろう。ところで、野草・雑草は未利用の半栽培植物を含むだけでなく、耕地/草地生態系の物質循環に寄与する意味で本来的には資源植物である。さらに今日では、耕地生態系においても、生物多様性の評価およびその損失リスク管理が重要になってきており、雑草を全て駆除すればよいとは必ずしも言えない。

本研究は、野草ないし雑草として扱われる植物種について、耕地生態系フィールド内での動態と役割・意義を明らかにする必要があると考えた。また、半自然草地生態系フィールド内でのこれらの植物種の個体群動態と役割・意義と比較することで、雑草・野草の新たな機能、環境適応やそれを利用した農資源生産システムの在り方を検討することも必要であると考えた。

そこで、本研究では、農業情報工学的解析による耕地/草地生態系内の雑草・野草群集の自動認識システムを確立し、野草・雑草・作物の個体群動態と関与する環境適応能について明らかにすることを最終目標とした。この最終目標のため、本研究では、作物栽培・環境保全・植物進化・情報科学を専門とする異分野の若手研究者が連携して異なる農業生態系における資源植物(特に雑草・野草に注目した)の解析を進めた。

### 2. 研究の目的

本申請課題の具体的な研究目的は、耕地・草地生態系内の雑草・野草群集の自動識別システム開発と、野草・雑草・作物の環境適応能と物質循環能の解析の2つに分けられる。

#### 課題1：耕地・草地生態系内の雑草・野草群集の自動識別システム開発

植物群集の種レベルでの動態把握は生態系管理(防除・保護)のファーストステップである。現在、専門家の目視判定によって定量されているが、解析に多大な時間を要する。そこで、植物生態保全・作物栽培の専門知識と農業情報科学を融合させ、無人航空機(ドローン)によるフィールド空撮と画像自動解析システムの確立を目指した。具体的には、分担者の(農業情報工学)が確立した、半教師あり深層学習による植物パターン認識の原理を、作物・雑草混合フィールド、半自然草地フィールドに応用することで、世界で初の種レベルでの雑草・野草識別解析システムを確立することを目的とした。

#### 課題2：野草・雑草・作物の環境適応能と物質循環能の解析

耕地生態系と草地生態系は、光競合・攪乱強度・養水分条件の全てにおいて大きく異なる。課題2では、課題1と並行して、主要な植物種や、特異的な生態環境応答を示す種・半栽培植物種を取り上げ、その環境適応能の解明を目指した。具体的には、作物とその近縁の野草・雑草種の成長形質を網羅的に解析することで、生態系内での作物・野草・雑草の共存あるいは競合の実態を解明することを目的とした。

耕地生態系では、雑草管理には化学的防除(除草剤)および物理的防除(耕起)が用いられる。持続可能な食料生産システムの確立のためには、各種管理手法が作物および雑草群集の成長に及ぼす影響、および作物・雑草競合のメカニズムの解明が必要である。そこで、作物栽培において、異なる管理が雑草群集成長および雑草種構成に及ぼす影響を明らかにすること、および雑草量と雑草種構成が作物収量に及ぼす影響を明らかにすることも合わせて目的とした。

### 3. 研究の方法

#### 課題1：耕地・草地生態系内の雑草・野草群集の自動識別システム開発

本小課題は、雑草の芽生えの自動識別のための深層学習アルゴリズム開発と雑草識別のためのトレーニングデータのデータベース構築からなる。アルゴリズム開発では、VGGNet-16Dモデルなどいくつかのモデル、または異なる成長ステージの実生画像でモデルを作り性能の比較を行った。雑草画像のデータベース構築では、耕地雑草を中心に30種以上の多様な植物種を温室内で栽培し、実生の画像を大量に取得した。そして、それらの画像を、深層学習のためのデータセットとして加工・生成するパイプラインを整備した。

#### 課題2：野草・雑草・作物の環境適応能と物質循環能の解析

本小課題では、稲作および畑作物栽培(トウモロコシ)の耕地生態系および半自然草地生態系

を対象に、作物・野草・雑草の関係を分析した。いずれの作物においても、雑草の密度や種・除草タイミングの異なる処理区を設定し、作物と雑草がどのように資源を巡って競争をするか、またどの雑草種がどのような競争的能力を持つかを詳細に分析した。フィールド試験は、東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構（東京都西東京市）にて実施した。

#### 4. 研究成果

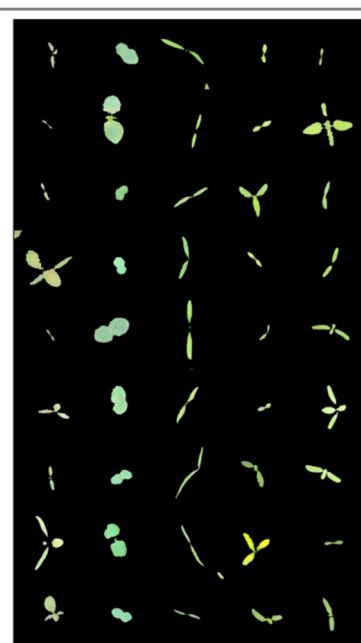
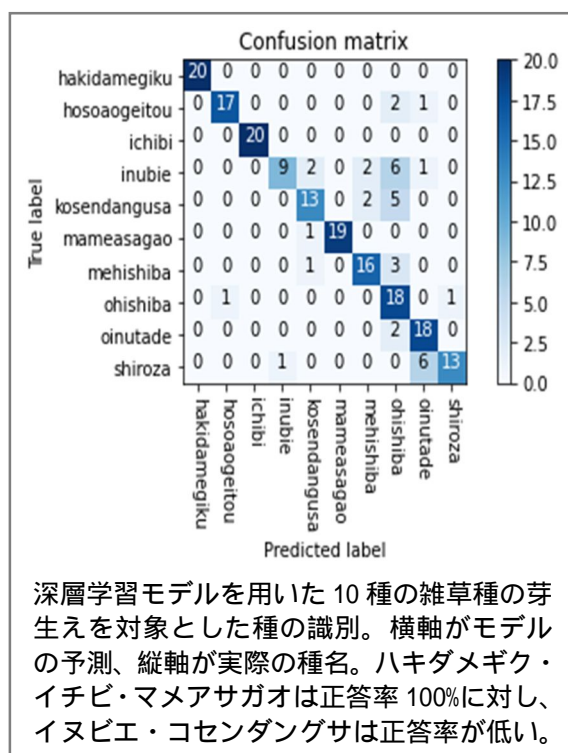
##### 課題1：耕地・草地生態系内の雑草・野草群集の自動識別システム開発

研究期間を通じて、膨大な雑草の実生画像を撮影した。20種の作物・雑草種を対象に、合計30000枚以上を撮影した。撮影システムに関しても研究期間を通じて大きく改善できた。当初は手動で雑草を栽培し、一眼レフカメラを用いて手動で実生を撮影していたが、研究期間途中より自動栽培・撮影装置（ファームポット）を温室内に導入することで、多種類の作物・雑草種の実生を自動で栽培し、芽生えの画像データ収集の大部分を自動化することに成功した。このことによって大量データ取得システムを構築することができた。同時に、撮影した大量の画像を学習用の画像に変換させるパイプラインも整備できた。これらのハード（植物自動栽培[土耕]+植物画像自動撮影装置）・ソフトの整備により、雑草種の自動識別システムを開発する下準備（大量のトレーニングデータの作出基盤）が十分に整ったといえる。

得られたデータセットを用いて、簡易的な深層学習モデルを構築したところ、種の識別率が95%を超える高い正答率が得られた（右図）。実生の成長ステージによる違いを検証したところ、葉の枚数が2-3枚の実生期のデータセットの方が、4-5葉期のデータセットを用いたときよりも高い正答率を示した。また雑草種の分類群が正答率に与える影響を調べたところ、同じ科の分類群は正答率が低くなる傾向が得られた。

これらの成果は、深層学習モデルを植物種の分類に当てはめた研究としては価値があるかもしれないが、実際の耕地あるいは自然生態系のフィールド調査で用いるには単純すぎる。例えば、このモデルでは、すべて実生を個体ごとに切り抜いて、かつ同じ成長ステージのデータセットを用いてモデルを構築しているが、野外環境では様々な成長ステージの種が入り混じっている。つまり撮影画像の中に多様な種が混在し、かつ同じ種であっても異なる成長ステージ・異なる形態を示すため、識別の難易度ははるかに高くなる。この問題を解決するためには、様々な種の様々な生育ステージのデータセットをすべての組み合わせで取得する必要があるが、そのようなデータセットを準備するのは現実的に不可能である。

そこでわれわれは、Generative Adversarial Network (GAN) を用いて（深層学習によって）データ生成を行い、生成モデルの原理の雑草識別への応用可能性を検討した（右図）。これは、「深層学習によって出来上がる自動分類器（研究開発目的）の識別精度が高くなるのであれば、そのトレーニングデータとして実際に撮影された画像を使おうとも、深層学習で自動生成された疑似個体画像を使おうとも、どちらでも問題は無い」という割り切りの発想に依拠する。SNGANとACGANの組み合わせにより、異なる雑草種を条件とする合成雑草画像を生成した。その結果、GANによる合成データの雑草種の同定精度を評価したところ、平均91%の同定精度を達成し、現在の最先端ネットワークより優れた生成結果を得ることができた。さらに、この生成モデルを拡張し、異なる雑草種の雑草画像の生成だけでなく、異なる生育ステージの画像を生成す



GANによって生成した疑似的な雑草の個体。

る手法を開発中である。

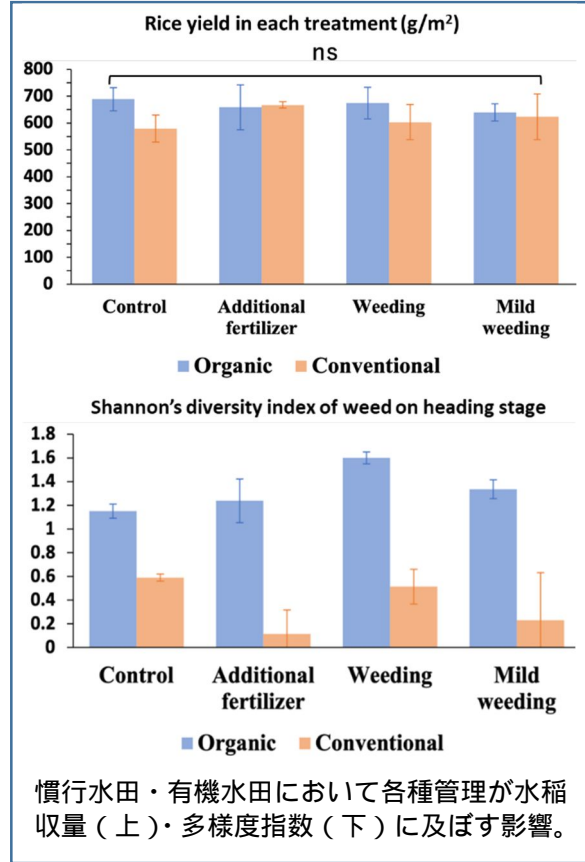
課題 2：野草・雑草・作物の環境適応能と物質循環能の解析

水田生態系(水稲):異なる雑草管理と施肥を組み合わせ、イネ(品種・コシヒカリ)を栽培し、雑草量や種類が水稲収量や希少な植物種の出現に与える影響を調べた(右上図)。その結果、予想に反して、除草剤を使わなかった有機水田では雑草バイオマスが約150g/m<sup>2</sup>(出穂期)まで上昇したが収量への影響はなかった。その一方で多様度指数は顕著に上昇し、かつ希少な植物種(アブノメ・ヒメミソハギ)の出現頻度が増えた。現在、この原因を調査するため追試を進めている。

畑地生態系(トウモロコシ):異なる雑草種の組み合わせが、トウモロコシの成長や収量に与える影響を調査した(右下表)。その結果、特定の種が特に強くトウモロコシの成長を抑制することがわかり、雑草害を種レベルの解像度で定量化することができた。さらに一部の雑草種の出現はトウモロコシの成長と統計的に正の相関が認められた。現在、この試験の再試を行うとともに、雑草がトウモロコシの成長を抑制する・促進するメカニズムに関して詳細に調査をおこなっている。

半自然草地生態系:周囲に農地が散在する半自然草地において、野草種・雑草種の環境適応能として生育場所や開花期間を調べた。その結果、野草種・雑草種は住宅地や林縁を含む草地環境に同所的に生育するものの、ニッチの規定要因や開花期間が異なることが分かった。このような雑草種がもつ環境適応能の理解は、耕地生態系で作物種と競合する雑草種の管理手法の検討につながる。

課題 1 と課題 2 の成果の統合と本研究プロジェクトの研究成果のアウトリーチ活動を意識して、2022年3月に行われた第69回日本生態学会にて、シンポジウムを企画・開催した。ここでは、『農業と生物多様性の新しい融合：生産性と多様性のトレードオフをICTで乗り越える』と題して、作物学・農業情報学・雑草学から若手研究者を招待し、耕地で多様性保全を行う生態学者とともに、各分野から見た現状と未来、今後必要になる研究課題と技術・研究成果の社会実装への課題を議論した。シンポジウムには180名を超える参加者が参加し、重要な議論を行うことができた。



異なる耕起法で栽培したトウモロコシ畑において優先する雑草種。

優先する雑草種	通常耕起	部分最小耕起
スベリヒユ		
シロツメクサ		
シロザ		
クormaバザクロソウ		
ヒメムカシヨモギ		
スベリヒユ		
シロザ		
クormaバザクロソウ		
ヒメムカシヨモギ		
ハキダメギク		
ヒメムカシヨモギ		

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小柳知代、小山明日香
2. 発表標題 絶滅の負債を抱えた草原性植物の過去10年間の变化
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koyama A, Egawa C, Taki H, Yasuda M, Kanzaki N, Ide T, Okabe K
2. 発表標題 Non-native plants act as a seasonal pollen source for native honeybees in suburban ecosystems in Japan
3. 学会等名 International Association for Vegetation Science (IAVS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小倉梨央奈, 小山明日香, 大黒俊哉
2. 発表標題 住宅団地内の空地は草原性植物のレフュージアになるか？
3. 学会等名 第66回日本生態学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 郭威
2. 発表標題 農地と自然生態系で使える植物フェノタイピング技術
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤洋一郎
2. 発表標題 生産農学からみた農地の生物多様性の現状と未来
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深野祐也
2. 発表標題 農業と生物多様性の新しい融合：生産性と多様性のトレードオフをICTで乗り越える
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang, H., Li, T., Nishida, E., Fukano, Y., Kato, T., Guo, W.,.
2. 発表標題 Cost-efficient broccoli head phenotyping using aerial imagery and SfM-based weakly supervised learning.
3. 学会等名 The 8th International Horticulture Research Conference. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li, T., Fukano, Y., Kato, Y., Guo, W.,
2. 発表標題 Synthesis of Weed Images using Generative Adversarial Networks.
3. 学会等名 MLCAS2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王浩舟, 加藤 洋一郎, 郭 威 .
2. 発表標題 Procedural Geometric Modeling for Plant Phenomics by Blender: Case Study of Maize .
3. 学会等名 農業情報学会2022年度年次大会 .
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tang Li , Yoichiro Kato , Yuya Fukano , Wei Guo.
2. 発表標題 Channel Attention-GAN based Synthetic Weed Generation for precise Weed identification.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting(JpGU)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Li T., Fukano Y., Kato Y., Guo W.,
2. 発表標題 Synthesis of Weed Images using Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 農業情報学会 JSAI 2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li T., Fukano Y., Kato Y., Guo W.,
2. 発表標題 Synthesis of Weed Images using Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 超分野植物科学研究会の第1回研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ata-Ul-Karim S.T., Zhou W., Moritsuka N., Kato Y.
2. 発表標題 Long-term crop response to discontinuation of fertilizer input in a wheat-maize cropping system.
3. 学会等名 10th Asian Crop Science Association Conference
4. 発表年 2021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
研究分担者	深野 祐也 (FUKANO YUYA) (70713535)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・助教  (12601)	
研究分担者	郭 威 (GUO WEI) (70745455)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・特任准教授  (12601)	
研究分担者	小山 明日香 (KOYAMA ASUKA) (90812462)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等  (82105)	

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
---------	---------