

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03885

研究課題名（和文）表面凹凸と物質・熱移動特性のばらつきが裸地表面 - 大気間の水分・熱交換に与える影響

研究課題名（英文）Effect of surface structure and variability in soil hydraulic and thermal properties on moisture and heat exchange between the bare surface and the atmosphere

研究代表者

齋藤 広隆 (Saio, Hirotaka)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：70447514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では裸地表面構造が地表面 - 大気間の水および熱の交換過程に与える影響を明らかにするため、水分移動特性値の推定、土中蒸発量推定のためのセンサー開発、地表面凹凸下の土中水分・熱動態の把握、地形を考慮可能な土中水分・熱移動解析手法の開発に取り組んだ。機械学習により水分保持特性と土性の関連を明らかにし、顕熱収支法に基づくヒートパルスプローブによって二次元で土中蒸発量を定量化することができた。また、圃場モニタリングによって、地表面構造が土中水分・熱移動に与える影響を明らかにし、拡張二次元土中液状水・水蒸気・熱同時移動解析モデルによって、地形を考慮した解析が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原位置での土中物質・エネルギーの動態は、土の性質だけでなく地形などの地表面の条件や気象条件など様々な外的要因に依存している。このような外的要因の影響を正しく定量的に評価するためには、その目的に適した土壌特性の計測機器・手法に加えて、解析ツールが必要となる。本研究では、これら地形による影響を評価するために、二次元で土中の水・熱の動態を追跡できるセンサーを開発し、空の状態から日射量を予測することを可能とし、それらを取り入れるため汎用土中液状水・水蒸気・熱同時移動解析ツールの拡張を進めた。本研究で得られた技術や知見を持続可能な農業のための土・水管理に活用すること可能である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the effect of the bare surface structure on the process of water and heat exchange between the soil surface and the atmosphere was investigated. We have developed a methodology for estimating water retention characteristics and a sensor for estimating soil evaporation. We investigated the moisture and heat dynamics in the soil under the inclined ground surface and modified the soil water and heat transport model to account for external factors, such as inclined surface.

This study demonstrated that the soil water retention parameters can be classified appropriately into soil classes by machine learning, and the soil water evaporation in two dimensions were quantified by the heat pulse probe developed. In addition, the effect of ground surface structure on soil moisture and heat transfer was evaluated by field monitoring, and the numerical analysis considering the topography became possible by the extended soil liquid water, water vapor and heat transport model.

研究分野：地域環境工学，土壤物理学

キーワード：土中水分・熱同時移動 水分蒸発 数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

地域の微気象のみならず地球全体の気象を決定する制御因子の一つである地中(土壌)と大気との境界である地表面を介した水分や熱エネルギーの交換過程の正確な予測は、ほ場の水収支を理解する上でも欠くことができない(Seneviratne, et al., 2006)。しかし、正確な予測はいまだ至難で、Wang and Dickinson (2012)によると蒸発が全蒸発散に占める割合の推定値は、用いられるモデルによりばらつきが大きく不確実性が高い。地表面からの水分蒸発を決定する主な要因は、気温、湿度、空気流れ、放射などの気象条件と、土性、土中の水分分布、給水の有無などで決まる土がもつ水分供給能力である。地表面 - 大気間の水分の交換つまり蒸発速度の予測は、土中の液状水・水蒸気・空気・熱エネルギーの地表面までの移動と、地表面から大気への水蒸気および熱の移動を考慮した物理モデルが必要である。しかし、地表面境界において水分および熱フラックスがきわめて動的で、気象条件や土の水分供給能力によってその向きや大きさが劇的に影響を受けるため、水分・熱交換過程の予測は実用上も理論上も限られてきた。たとえば計算の容易さから、水蒸気と熱の移動を考慮せず、土中の液状水の移動のみを考慮したりチャーズ式に対して、最小圧力水頭概念を導入し蒸発速度の変化を評価する方法が普及している(Simunek, et al., 2008)。また、一般に蒸発進行時は物質・熱の移動は鉛直方向の移動が卓越するとして、鉛直次元モデルが多用されている。しかし近年、土の物質移動特性の違いや初期水分の違いから、地表面蒸発過程に土中で物質・熱が横方向に移動することにより、地表面蒸発が一部で卓越するなどして地表面の乾燥が均一に進行しない現象についての研究が進められている(たとえば Lehmann and Or, 2009)。また多くの解析は地表面が平らであると仮定しているが、裸地であっても地表面には凹凸構造が発達し、そのことを検討できていないことが少なくない。また、土の物質移動特性のばらつき以外にも、地表面が平らでないことで、構付近の空気の風速や乱流エネルギーの違い、あるいは地表面蒸発に伴う局所的な空気湿度の違いなどが地表面からの蒸発の進行に影響を与えることも示唆されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、(1) 地表面の凹凸構造の発達および土中の水分・熱移動特性のばらつきが、裸地表面 - 大気間の水分・熱交換過程に与える影響を実験的に明らかにし、(2) 地表面凹凸や物質移動特性のばらつきを考慮可能な、土中液状水・水蒸気・熱移動予測モデルを構築することを目的とする。

本目的達成のために、室内および裸地ほ場において、水分・熱の動態を記録し、地表面凹凸の影響を考慮可能な土中物質移動モデルを連結したモデルおよび簡便な水分移動特性パラメータの推定方法を開発した。また、室内実験では、地表面凹凸や土の物性値がばらつく条件下で蒸発実験を実施し、土中の横方向の液状水・水蒸気・熱移動の実態を明らかにした。また、そのために、二次元的な水分・水蒸気・熱移動の測定が可能な顕熱収支法に基づくヒートパルスプローブ(HPP)を開発した。ほ場実験では、地表面の凹凸をほ場で再現し、裸地条件下において土壌の乾燥がどのように進行するのかを明らかにし、計測では、熱源である太陽からの短波放射を空の状態から予測するための方法を開発した。

## 3. 研究の方法

### (1) モデル解析に必要な土の不飽和水理特性パラメータの推定

正確で信頼のおける土中物質移動解析のためには、適切な不飽和土水理特性パラメータの同定が不可欠である。本研究では、土の粒度分布から土の水分保持曲線パラメータを推定するため、機械学習に基づいて、土性と水分保持特性との関係を明らかにした。また、汎用的に用いられる蒸発法において、データの解析方法の違いが水分移動特性パラメータ(水分保持曲線および不飽和透水係数関数のパラメータ)の同定に与える影響を明らかにした。

Tangential モデル(以降 TANMOD)は、正の土中水圧力から負の土中水圧力まで、不飽和と飽和の両方に適用できる数少ない土壌水分保持曲線(SWRC)モデルの1つであり、封入空気の体積変化の影響も考慮可能である(Kohgo et al., 2008)。TANMODは、砂のような比較的粗い土壌ではよく用いられその有効性は検証されているが、さまざまな土性の土壌に対してこれまで十分に適用されていない。そこで、ここでは1)さまざまな土性の土壌に対してTANMODパラメータを決定すること、さらには2)TANMODパラメータと土性の間の基本的な関係を明らかにすることを目的とした。この目的のために、UNSODA土壌データベース(Nemes et al., 2001)内10のUSDA土性クラスから399個のSWRCに対してTANMODをフィッティングし、パラメータを得た。モデルパラメータは、曲線に沿った3つの座標( $S_{re}$ ,  $s_e$ ), ( $S_{rm}$ ,  $s_m$ ), および( $S_{rf}$ ,  $s_f$ ), 3つの接線勾配,  $c_e$ ,  $c_m$ , および  $c_f$ で構成される。多変量解析といくつかの機械学習アルゴリズムをそれぞれ使用して、各土性クラスのモデルパラメータを評価し、モデルパラメータと土性クラスとの関係を明らかにした。

蒸発法とは、飽和させた試料からの蒸発による質量変化と、試料内の土中水圧力の変化から水分保持曲線と不飽和透水係数などの不飽和水分移動特性値や各特性値のモデルパラメータを求める方法である。試料の下端は閉鎖され、上端から水分蒸発が進行する。実験では、試料を電子天秤に設置して質量変化を記録し、試料内に挿入したテンシオメータで土中水圧力の変化を記録していく。本研究では、METER社のHYPROP(水分保持曲線・不飽和透水係数測定装置)を用いて実験を行った。不飽和水分移動特性値やモデルパラメータについて、簡易的に求める方法と数値モデルによる逆解析の結果を比較した。

## (2) 顕熱収支法による二次元地中蒸発量の定量化

粗度などの地表面状態や日射量のばらつき、土壌中の不均質な熱物質移動特性などにより、地表面下の蒸発機構はより複雑になると考えられる。よって本研究では、Heitman et al. (2008)が提案した土壌中の顕熱収支に基づく地中蒸発量推定法を応用し、二次元での地中蒸発量の定量化のために、鉛直・水平方向に複数本の温度計およびヒーター線を配列したヒートパルスプローブ(HPP)を開発し、地温、熱伝導率( ), 体積熱容量(C)の測定および地中蒸発量分布の推定を行った。

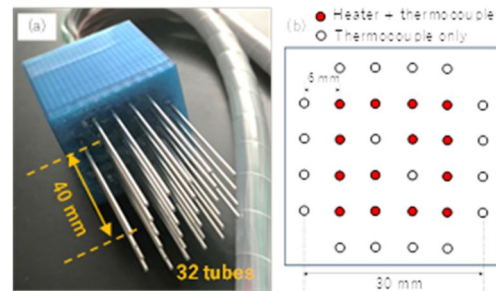


図1 開発したヒートパルスプローブの写真(a)と熱電対およびヒーター線の配置図(b)

図1に本研究で開発したHPPの写真および配置図を示す。HPPは長さ40mmのステンレスチューブ

32本で構成されており、チューブには熱電対のみ、もしくは熱電対とヒーター線両方が内装されている。これより、2次元的な温度分布を測定でき、さらに各チューブ間とのCもヒートパルス法によって測定でき、二次元での地中蒸発量が推定できる。二次元地中蒸発量推定のため簡易的な蒸発実験を行った。幅42mm、奥行50mm、高さ60mmの容積を持つ容器に左半分に黒ボク土を、右半分に豊浦砂を充填し、容器側面からHPPを挿入し、容器底部から注水し土壌を飽和させた。その後、容器上端を白熱電球で照射し、5日間乾燥させた。乾燥期間中各チューブの温度を15分毎に、ヒートパルス法によりチューブ間とのCを4時間ごとに測定した。得られた温度と熱特性分布より、地中蒸発量を計算した。

## (3) 地表面凹凸下の土中水分および熱の動態

本研究では、自然条件下で地表面凹凸や土中水分・熱移動特性のばらつきが地表面からの水分蒸発に与える影響を把握することが目的の一つである。そこで、東京農工大学FSセンター試験ほ場の一部区画に、高さ約20cmの畝を東西・南北にそれぞれ3本ずつ、畝間間隔が60cmになるように設置し(図2)、土壌水分センサー・土中水ポテンシャルセンサー、熱電対、熱流板、HPPを畝の斜面近くと内部等に埋設し、体積含水率・温度・土中水ポテンシャル、水蒸気量等を連続的に測定した。実験期間中は、地表面は裸地を維持し、植生の影響を排除した。

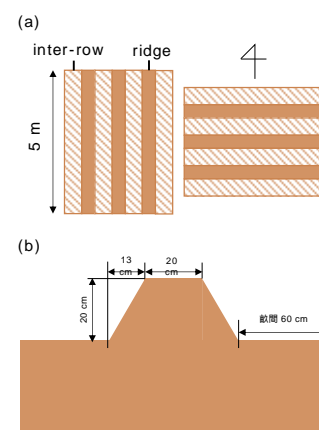


図2 (a)畝の向きおよび設置状況を示す平面図と(b)畝断面図

また、土中の水・熱エネルギーの動態を決定づける要素の一つである、放射源について、全天カメラによって得られた全天画像を解析し、雲量、太陽出現率、天空の相対的明るさを求め、10分値全天日射量を推定した。さらには畝の地上2mには放射収支計を設置し、放射収支の揭示変化を測定した。

## (4) 地形を考慮可能な水分・熱移動解析手法開発

本研究では、汎用土中水分・溶質・熱移動解析モデルHYDRUS 2Dに対して、Saito et al., (2006)に倣って、非等温条件下で温度勾配による液状水・水蒸気の移動を考慮した二次元拡張リチャーズ式を用い液状水・水蒸気・熱の同時移動解析ならびに地表面での熱収支式から熱移動の境界条件を導き、地形および地形があることによる影の影響、つまり入力放射への影響を考慮できるよう改良を加えた。具体的には、マトリックポテンシャルと重力ポテンシャルによる液状水の移動のみを考慮したりチャーズ式に対し、温度勾配による液状水の移動を考慮可能とし、さらに非等温条件下ならびに等温条件下での水蒸気の移動を含めた拡張リチャーズ式を用いた解析

を可能とした。そのうえで、熱移動に関して、地表面での境界条件を、熱収支式より導出することを可能とし、太陽放射や純放射を入力として、地中熱フラックスを求めることとした。このとき、熱収支式の成分である顕熱フラックスや潜熱フラックスは地表面土壌の温度や水分量に依存するもので、水分および熱の同時移動解析によって導かれる。

さらに、本研究では、HYDRUS 2D に対して地表面が受ける太陽放射が地表面の勾配およびその向きによって異なることを考慮可能とする改良を加えた。その結果、地表面の凹凸に伴う影の影響を考慮した土中液状水・水蒸気・熱移動解析が可能となった。

#### 4. 研究成果

##### (1) モデル解析に必要な土の不飽和水理特性パラメータの推定

TANMOD および UNSODA 土壌データベースのデータを用いた解析の結果、TANMOD が粗粒土から細粒土までよく適合していることを示すことができ、各 USDA 区分による 10 の土性にたいして、それぞれ固有のモデルパラメータとその不確実性のセットを提案することができた。教師なし学習アルゴリズムである階層クラスター分析および k 平均クラスタリングでは TANMOD パラメータの分類はうまくいかなかったものの、教師付き機械学習手法の一つであるランダムフォレストを用いたところ、TANMOD パラメータを USDA 土性クラスに適切に分類することができ、その精度は 62.6% となった(図 3)。解析の結果最大接線勾配  $c_m$  は、土性クラスとの関連で最も重要なパラメータであることがわかった。本研究の結果、TANMOD パラメータはそれぞれ独自の物理的な意味を持つだけでなく、さまざまな USDA 土性クラスに適用できることがわかった。

蒸発法による水理特性のパラメータの推定については、二点の異なる深度に挿入したテンシオメータによる土中水圧力の差からフラックス等を直接求める簡易直接法と、HYDRUS-1D により圧力変化から逆解析によってパラメータを求める方法の比較を行ったところ、シルトでは砂やガラスビーズのような粗粒土と比べて簡易法と逆解析の結果がほぼ一致した。一方、粗粒土では特に不飽和透水係数の結果が簡易法と逆解析法では大きく乖離した。シルトと他の試料では保水性に大きな違いがあり、シルトでは蒸発が続いてもカラム内で水の連続性が維持できるのに対し、粗粒土では表層部の乾燥の進行が速く、表層において不飽和透水係数の低下が著しく、その結果、簡易法では特にフラックスの推定において正確に評価できていないことが示唆された。

##### (2) 顕熱収支法による二次元地中蒸発量の定量化

図 4 に、本研究で新たに開発した HPP による地中蒸発量の二次元的な推移を示す。開発した HPP により土中蒸発量を定量化できることを示した。また、土壌中の蒸発前線が時間と共に下方へ発達してゆく様子や、間隙径の大きな豊浦砂から支配的に蒸発現象が起きる様子が確認できた。推定精度の検証が必要だが、今後様々な土壌条件、地表面条件下での測定により、二次元的な地中蒸発現象の理解、モデルの開発等に貢献できると考えられる。

##### (3) 地表面凹凸下での土中水分および熱の動態

図 5 にある晴れた日の、南北方向に設置した畝内の畝天端から深さ 12 cm の地点における温度変化を示す。気温からの遅れや温度振幅は、同じ天端からの深さであっても、東西どちらの斜面に近いかによって異なり、東側斜面において温度上昇が早く、斜面から離れてい

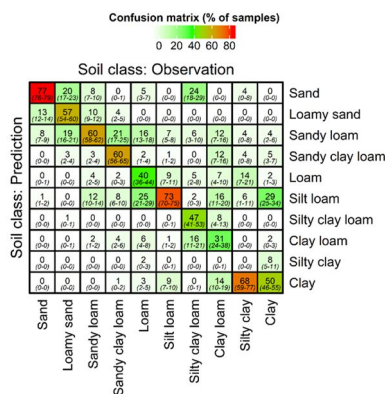


図 3：ランダムフォレストによる TANMOD パラメータの USDA 土性への分類結果の混同行列。

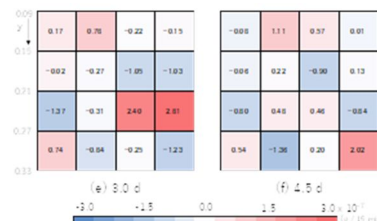


図 4：蒸発開始 3 日後と 4.5 日後の土壌断面中の蒸発量の推移。各断面の左半分が黒ボク土で、右半分が豊浦砂。

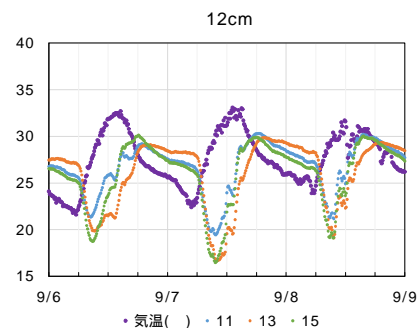


図 5：南北畝内深さ 12 cm での畝斜面付近および中央部での温度変化と気温変化(紫)。

る畝中心付近ではその立ち上がりが遅く、低下のタイミングも遅れ、斜面付近で同時に計測した熱流板の結果とも整合した。同様に、土壌水分の変化についても畝の向きや畝内の位置によって変化に違いが表れた。

図 6 に 1 年間の画像解析により得られた空の状態変化から推定した 10 分値全天日射量とその観測値との季節ごとの比較を示す。全体に直線にはよく乗っているが、特に夏季に直線からのずれが大きくなる(過大評価)が見られ、実測値との誤差 (RMSE) を季節ごとに求めたところ、夏季に誤差が大きく、冬に誤差が小さくなった。夏季の日中の雲の発生と消滅の短時間変化が原因と考えられる。全天画像から太陽の出現有無を識別でき直達日射の有無を把握できるため、ほ場表面の凹凸により斜面が受ける短波放射の解析が可能となる。

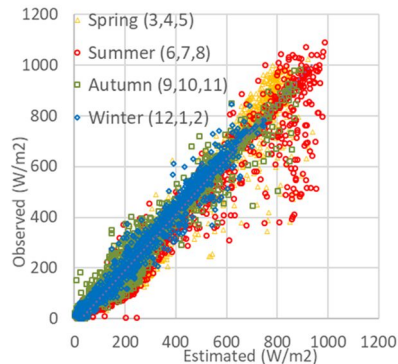


図 6：空の状態から予測した 10 分値全天日射量と観測の季節ごとの比較

#### (4) 地形を考慮可能な水分・熱移動解析手法開発

液状水・水蒸気・熱同時移動解析が可能となるように拡張し、地表面の傾斜とその向きを考慮した新たな境界条件を導入した HYDRUS 2D によって、畝の形状およびその向きの違いを考慮した、土中水分・熱同時移動解析が可能となった。図 7 は東西・南北それぞれに畝がある場合の畝斜面において、修正した HYDRUS 2D を用いて純放射および温度変化を計算したものである。ここに示すように、南斜面では日射量が大きく、東西の斜面ではピーク到達時間に違いが生じ、その結果として土中水分・温度変化も斜面の向きによって異なる結果となった。本手法を用いることで、畝の場合その向きだけでなく、傾斜の違いが土中水分・熱の動態に与える影響を定量的に示すことが可能となった。

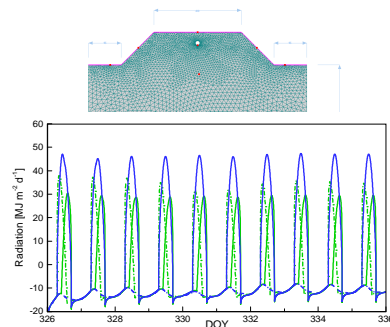


図 7：計算に用いた畝の形状と、拡張 HYDRUS 2D により求めた、畝斜面における純放射の時間変化

#### < 引用文献 >

- 1) Seneviratne, et al., Nature, 443:205-209, 2006.
- 2) Wang and Dickinson, Reviews of Geophysics, 50:1-54, 2012.
- 3) Simunek, et al., The HYDRUS-1D software package, 2008.
- 4) Lehman and Or, Physical Review E, 80, 046318, 2009.
- 5) Kohgo, et al., Soils and Foundation, 48(5), 633-640, 2008
- 6) Heitman et al., Water Resources Research, 44: W00D05, 2009
- 7) Saito et al., Vadose Zone Journal, 5:784-800, 2006.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Yamashita and M. Yoshimura	4. 巻 11
2. 論文標題 Estimation of Global and Diffuse Photosynthetic Photon Flux Density under Various Sky Conditions Using Ground-Based Whole-Sky Images	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 932
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs11080932	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thiam, M., D.Q., Thuyet, H., Saito, and Y. Kohgo	4. 巻 337
2. 論文標題 Performance of the tangential model of soil water retention curves for various soil texture classes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 514-523
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geoderma.2018.10.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saefuddin, R., H. Saito, and J. Simunek	4. 巻 211
2. 論文標題 Experimental and numerical evaluation of a ring-shaped emitter for subsurface irrigation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Agricultural Water Management	6. 最初と最後の頁 111-122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agwat.2018.09.039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小島 悠揮, 斎藤 広隆
2. 発表標題 顕熱収支法による二次元地中蒸発量の定量化
3. 学会等名 2018年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Kojima, Hirotaka Saito, Joshua L. Heitman, and Robert Horton
2. 発表標題 Quantifying Two-Dimensional Subsurface Evaporation Rates from Sensible Heat Balance
3. 学会等名 2018-2019 International Soils Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴原良樹, 辰己賢一
2. 発表標題 地形による光環境の差異が 水稻の生長・収量に及ぼす影響
3. 学会等名 農業気象学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saito, H., Simunek, J., and Brunetti, G.,
2. 発表標題 Numerical Analysis of Mass and Energy Transport in Subsurface and at the Soil-atmosphere Interface using HYDRUS
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Annual Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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	辰己 賢一  (Tatsumi Kenichi)  (40505781)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授   (12605)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	山下 恵 (Yamashita Megumi) (70523596)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・講師  (12605)	
研究分担者	小島 悠揮 (Kojima Yuki) (70767475)	岐阜大学・工学部・助教  (13701)	