

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03755

研究課題名(和文) 群落表面温度の連続計測を基盤とした非定常状態における大豆の群落光合成モデルの開発

研究課題名(英文) Development of non-steady state canopy photosynthesis model for soybean based on continuous measurement of canopy surface temperature

研究代表者

本間 香貴 (Homma, Koki)

東北大学・農学研究科・教授

研究者番号：60397560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：群落表面温度計測を基盤とする非定常状態における大豆の群落光合成方法について検討を行った。そのために(1)非定常状態における個葉光合成速度のモデル化、(2)群落表面温度計測に基づく群落抵抗値評価、(3)葉群の垂直分布動態評価、(4)茎熱収支法による蒸散流計測を行った。各項目についてそれぞれ論文等による公表を行うとともに、応用的展開も行った。例えば葉群の垂直分布動態評価においては、追加の計測を行うことにより混植群落の葉群垂直分布を非破壊で簡易に計測できることを示した。(1)～(4)の結果をもとに群落光合成モデルを作成した。今後同化箱法による炭素収支と比較検討を行い、改良を目指す予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個葉光合成速度がそのままでは群落光合成を反映しないことは古くから知られており、Monsi and Saekiによるモデルを基にした群落光合成評価が行われてきた。窒素の垂直分布を導入したモデルなどへ発展してきてはいるものの、核となる個葉光合成速度は定常状態で得られた光 光合成曲線が用いられている。しかしながら作物は光に対して常に一定のパフォーマンスを示すわけではなく、飽差の増大や日射の急激な変動により光合成速度を低下させる。本研究で得られた知見は現実の栽培群落での適用を想定しており、品種や栽培法の開発に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We studied the canopy photosynthesis of soybean under unsteady state condition based on the measurement of surface temperature. For the purpose, following topics were conducted: (1) modeling of leaf photosynthetic rate under unsteady state condition, (2) evaluation of canopy resistance based on canopy surface temperature measurement, (3) evaluation of vertical distribution dynamics of canopy, (4) evaluation of transpiration rate by stem heat balance method. The results of each topic were published in journals or presented in society conferences, etc. The further applications have also been established. For example, the evaluation method for the dynamics of the vertical distribution of canopy was applied to cultivar mixed cultivation of soybean. Based on the results of (1) to (4), a canopy photosynthesis model was developed. The model will be improved by validation with carbon balance by the assimilation box method.

研究分野：作物

キーワード：大豆 群落光合成 非定常状態 シミュレーションモデル 群落表面温度 リモートセンシング 葉群
動態 蒸散速度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

個葉光合成速度がそのままでは群落光合成を反映しないことは古くから知られており、Monsi and Saeki (1953)によるモデルを基にした群落光合成評価が行われてきた。窒素の垂直分布を導入したモデルなどへ発展してきてはいるものの (Hikosaka et al., 2016), 核となる個葉光合成速度は定常状態で得られた光合成曲線が用いられている。しかしながら作物は光に対して常に一定のパフォーマンスを示すわけではなく、飽差の増大や日射の急激な変動により光合成速度を低下させる。さらによく晴れた日の日中には強日射にもかかわらず気孔を閉じ、昼寝現象とも呼ばれる光合成の日中低下現象を示すことなども良く知られている。申請者らは変動光下の光合成速度計測や、クロロフィル蛍光による光阻害程度の評価、茎熱収支法による蒸散速度の日変化計測などにより、光合成低下程度の評価とその要因解明を行ってきた。こうした光合成低下が群落光合成に与える影響は大きいと考えられるが、群落状態での評価手法が不十分であり、圃場生産性の改善や育種利用への道筋も明らかとはなっていない。

圃場で群落状態の植物体の反応をモニターする手法としてリモートセンシングがあげられる。これまでに申請者らは熱赤外を利用した群落表面温度の計測を行い、蒸散速度の推定や水ストレス状態の評価などを行ってきた。群落表面温度は微気象要素とともに解析することにより、蒸散速度の推定を介して気孔抵抗の群落レベルでの合成値である群落抵抗の評価を行うことができる。そのための基礎となる群落における熱収支モデルはエネルギー収支が釣り合った定常状態を対象としているが、群落表面温度を毎秒間隔で計測し大量のデータを用意することにより統計的に非定常状態の解析が可能である。さらに群落抵抗をモデル化することにより、群落表面温度のシミュレートも可能になると考えられる。

2. 研究の目的

以上のことを背景に、申請者らは熱赤外撮影装置による群落表面温度の連続計測に基づく非定常状態の群落光合成モデルの構築を計画した。このモデルでは非定常状態における個葉光合成速度のモデルを導入し、群落表面温度に基づく群落抵抗値を入力することにより、群落光合成を計算することを目的とする。これにより、刻一刻と変わる環境や植物体要因に基づいた群落光合成評価ができるものと考えられる。作物としてはこれまでに申請者らの研究蓄積のある大豆を選択し、個葉光合成のモデル化、群落抵抗値の動態評価を行うことを目的とした。さらに葉群の垂直分布動態評価と茎熱収支法による蒸散流計測を組み合わせることにより、群落光合成モデルの構築をめざした。

3. 研究の方法

研究は以下の5項目により構成される

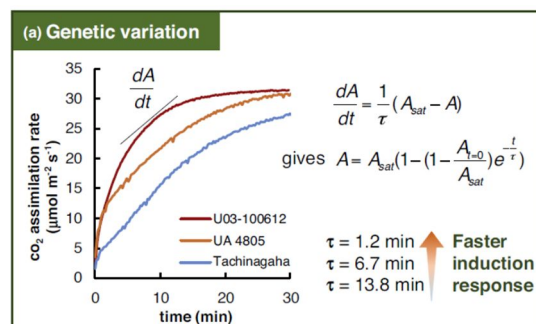
- (1) 比定常状態における個葉光合成速度のモデル化
- (2) 群落表面温度計測に基づく群落抵抗値評価
- (3) 葉群の垂直分布動態評価
- (4) 茎熱収支法による蒸散流計測
- (5) 群落光合成モデルの構築

中心となる圃場実験を京都大学大学院農学研究科附属京都農場にて行い、それを補助し、応用を狙った圃場実験を東北大学大学院農学研究科植物実験フィールドならびに同川渡フィールドセンターにて行った。

4. 研究成果

(1) 非定常状態における個葉光合成速度のモデル化

畑で育った植物は、雲の動きと自己被陰のために、数秒から数時間に及ぶ期間、光の強度が変動する。光の強度が日陰後に完全に戻ると、葉の正味のCO₂同化率はすぐに最大値に到達しないものの、数分かけて徐々に上昇し、新しい定常状態に近づく。この現象は、光合成誘導と呼ばれ、炭素固定の効率、ひいては作物の生産に実質的に影響を及ぼす。種間だけでなく種内にも誘導反応速度の有意な自然変動が存在する。分子分析とハイスループット測定技術の最近の進歩により、光合成誘導反応で観察された遺伝的変動の遺伝的および生態生理学的基盤が明らかになりつつあり、今後の研究の進展が期待されている。本研究では既発表データを用いて大豆品種の光合成速度のモデル化を行った(第1図)。



第1図 非定常状態における個葉光合成速度のモデル化 (Tanaka et al., 2019)。

(2) 群落表面温度計測に基づく群落抵抗値評価

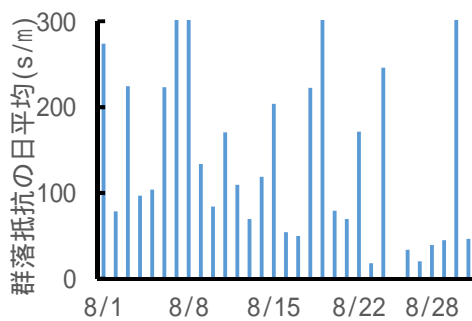
群落表面温度の計測値と気温や風速、日射等の微気象データを熱収支モデル (Monteith et al. 1973) に組み込むことによって、群落蒸散抵抗 (以下 r_c) を推定することができる。しかし、

rc の推定に必要な空気力学的抵抗 (以下 ra) の算出式は風速に大きく依存しており、群落表面温度の連続撮影から rc を継続的に推定しようとした場合、弱風時に異常値が発生する。そのため、群落蒸散の状態を長期的に把握することは難しい。そこで純放射のほとんどない夜間において無風に近い状態のイネおよびダイズ群落を再現し、そこにヒーターによる人工的な熱照射を行うことで、無風時の ra (以下 ra*) を実測した。得られた ra* の値をもとに、風速と ra の関係を補正し、弱風時を含め rc の推定精度の改善を行った。

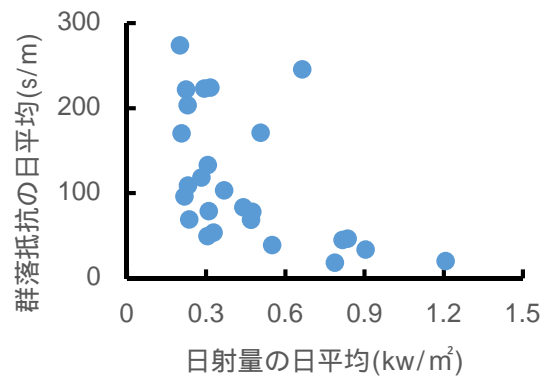
熱照射開始から数分間、群落表面温度は上昇したのち平衡に達した。この時、ヒーターからの純放射 (Rn) と群落からの顕熱フラックス (H) は等しいと考えられ、この関係から無風時の ra すなわち ra* を算出した。ra* の値は 25.1 s m^{-1} であった。得られた ra* の値から風速と空気力学的抵抗の関係を補正した。補正後の ra の値は特に弱風速域において従来法と比べ低い値を示した。この結果は、イネ群落において日射を一時遮蔽することで ra を実測した Horie ら (2006) の結果とおおむね一致していた。このことから、補正後の ra は従来法よりも実験圃場の空気力学的状態を良く表していると考えられた。

以上の結果をもとに簡易群落拡散抵抗値評価システムを開発し、rc 評価を行った。第 2 図に計測結果の一部を示す。計測日の天候により大きな変動を示すものの日射量の平均値と rc 平均値間には反比例の関係が確認でき、計測値は妥当であると考えられた。これらのデータを rc の気象反応性に関するモデル化を行った。

本内容に関しては先行して研究を行っていた水稲群落を対象に再解析を行い、論文発表も行った (岩橋ら 2020)。



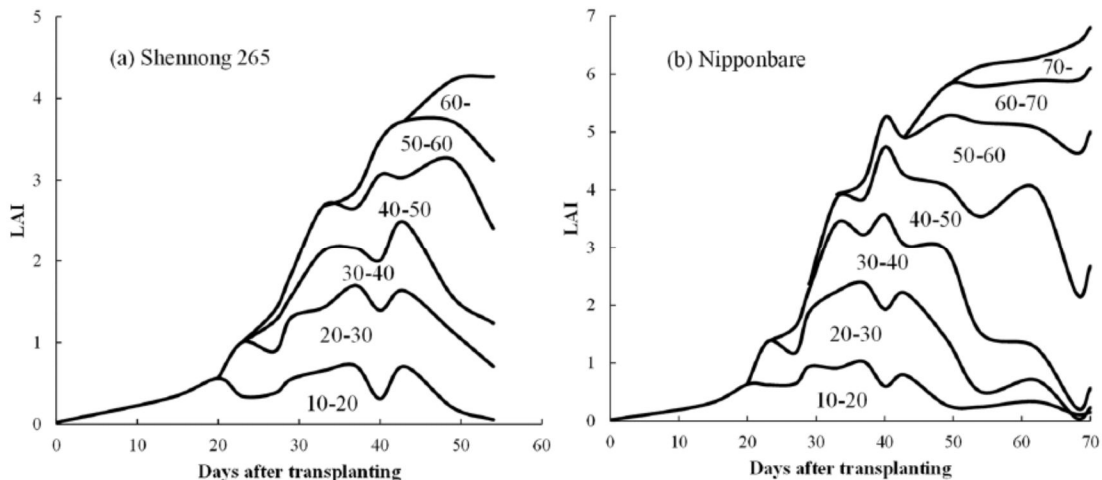
第2図 群落抵抗の測定例。東北大学農学研究科植物実験フィールドにて2018年8月に行った (石森ら 2018)。



第3図 第2図の計測値は日射量と反比例の関係にあることが確認された (石森ら 2018)。

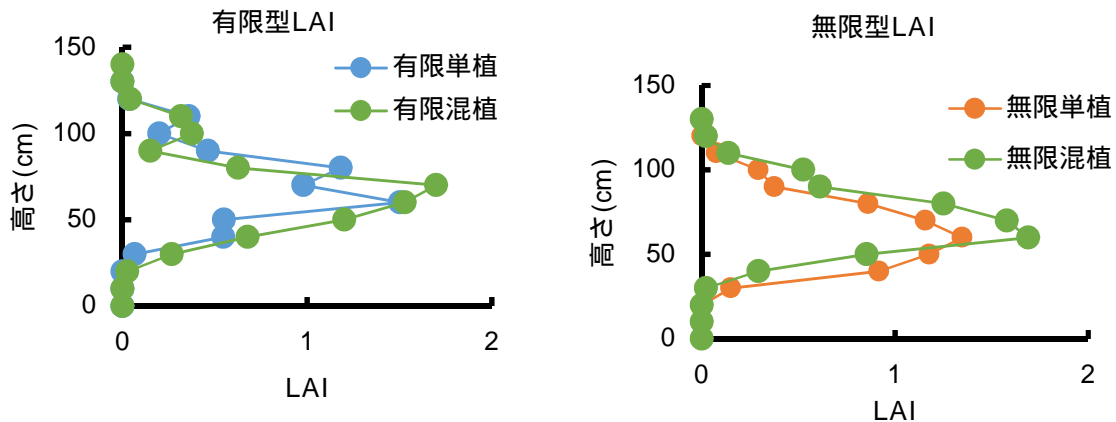
(3) 葉群の垂直分布動態評価

葉群の垂直分布は作物の群落光合成速度や乾物生産にとって重要であることが知られている。しかしながら、葉群の垂直分布の調査において、層別刈り取りなど非常に労力がかかる作業が多いため、これらの経時的な推移に関する研究はほとんど行われていない。そこで、葉群に関する指標を簡易的に測定することができるプラントキャノピーアナライザーを用いて、葉群の垂直分布の非破壊簡易評価法の開発を行った。本研究では第一に先行して測定を行っていた水稲群落を対象に解析を行い、手法の完成を目指すとともに論文文化により公表を行った (Hirooka et al. 2018)。それにより測定における精度の検証ができ、異なる品種や環境による葉群の垂直分布の経時的モニタリングが可能であることを示した (第 4 図)。



第 4 図 葉群垂直分布動態計測例。(b) の日本晴では移植後 50 日過ぎたあたりで群落高さ 10-40cm に位置する葉面積 (LAI) の低下が顕著であるのに対し、(a) の瀋陽 265 号では一定の LAI が維持されているのがわかる (Hirooka et al. 2018)。

さらに本手法を用いてダイズにおける葉群の垂直分布動態評価を行うとともに、その発展型の一つとして、ダイズの品種混植における適用も行った。混植群落においても追加の計測によりそれぞれの構成品種の葉面積の垂直分布を非破壊で評価することができ（第5図）、生産性の改善に資することができると考えられた。本研究では葉群の垂直分布をもとに、受光日射量の垂直分布を計算し、子実生産効率を求め、生産性改善策について検討を行った。



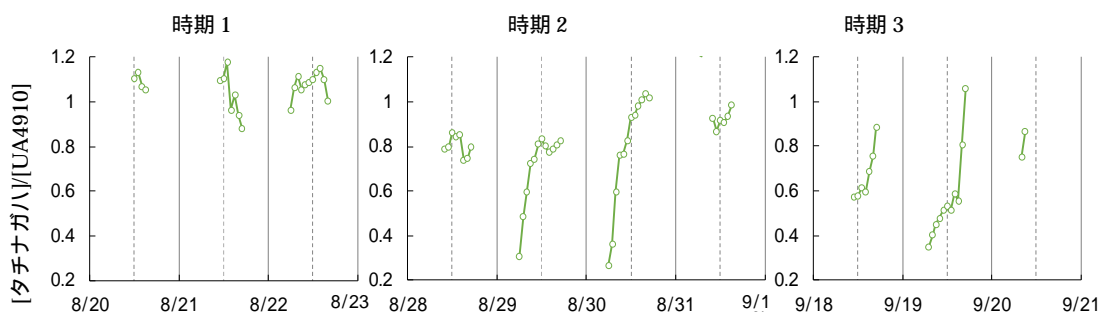
第5図 混植群落における葉群垂直分布評価。大豆の有限伸育型と無限伸育型を用いて単植と混植栽培を行い、葉群垂直分布の変化を評価した（川村ら 2018, 2019）。

(4) 茎熱収支法による蒸散流計測

日本のダイズ収量が低い要因として、日本品種の収量性の低さが指摘されている。日本品種と米国の多収品種との比較では、子実肥大始期までの日射利用効率に日米品種間で明確な差はみられなかったが、節数および莢数の違いによって収量の差異が生じていた（中野, 2018）。莢の形成には子実肥大期間における乾物生産が重要となるが、子実肥大始期後は落葉が生じるため、乾物重から日射利用効率を算出することが困難となる。そこで本研究では、子実肥大始期後における日米品種間の乾物生産特性の違いを評価するために、茎内流量計測から群落条件における蒸散速度と群落コンダクタンスを算出し、日米品種間でのガス交換活性の比較を行った。さらに、開放系同化箱を用いて群落光合成速度を測定し、茎内流量計測から算出したガス交換活性と群落光合成速度との対応関係を検討した。

時期1（8月20-22日）の群落蒸散速度は「タチナガハ」が「UA4910」より大きな値を示した（第6図）。しかし、時期2（8月28-31日）では「タチナガハ」の群落蒸散速度は「UA4910」を下回るようになり、特に午前中の蒸散速度において両者の差は顕著であった。さらに、時期3（9月18-20日）では「タチナガハ」の蒸散速度は「UA4910」より40%程度低い値となった。「タチナガハ」の蒸散速度の低下は、子実肥大にともなう葉の老化が「UA4910」より早いことが要因であると考えられた。

群落光合成速度は群落蒸散速度よりも群落コンダクタンスと良い対応関係を示した。「UA4910」では群落コンダクタンスの増加に従い群落光合成速度が直線的に増加したが、「タチナガハ」では群落コンダクタンスの高い時に群落光合成速度の増加が頭打ちとなった。その結果、群落コンダクタンスの値が高い時に「タチナガハ」と「UA4910」の群落光合成速度に差がみられ、このような光合成速度の品種間差が収量の差異に結びついた可能性が示唆された。

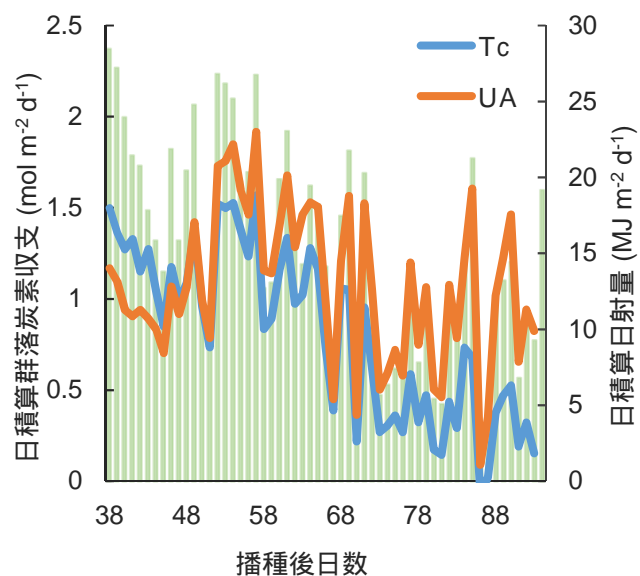


第6図「UA4910」の蒸散速度に対する「タチナガハ」の蒸散速度の比の推移（中野ら 2019）

(5) 群落光合成モデルの構築

(1)~(4)の結果に基づき群落光合成モデル構築にあたり、同化箱法による群落光合成速度の評価を行った。同化箱法による群落光合成速度は日射量との対応が見られ、群落表面温度計測に基づく群落抵抗値評価と対応すると考えられた。また、日積算群落炭素収支は実測の乾物

増加量と強い相関を示し、測定値は妥当であると考えられた。品種比較を行ったところ群落炭素収支に時期による変動と品種間差が観測された（第7図）。今後群落表面温度計測に基づく群落光合成速度を加味して解析を進める予定である。



第7図 群落光合成（群落炭素収支）におけるタチナガハ（Tc）と UA4910（UA）の品種間差異ならびに日射量（緑棒）変動との関係（伊藤ら 2019）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 岩橋優・田中佑・本間香貴・齊藤大樹・奥本裕・白岩立彦	4. 巻 89
2. 論文標題 イネ出穂期遺伝子hd3a変異系統を用いた個葉および群落蒸散に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本作物学会紀事	6. 最初と最後の頁 -
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 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 橋本直之・山本修平・牧雅康・本間香貴	4. 巻 88
2. 論文標題 ダイズ圃場における湿害発生予測に向けた UAV リモートセンシングによる土壌含水率推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本作物学会紀事	6. 最初と最後の頁 52-53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1626/jcs.89.52	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 Nakano, S., Purcell, L. C., Homma, K., Shiraiwa, T.	4. 巻 23
2. 論文標題 Modeling leaf area development in soybean (<i>Glycine max</i> L.) based on the branch growth and leaf elongation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1080/1343943X.2019.1702468	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 山本修平・本間香貴・橋本直之・牧雅康	4. 巻 88
2. 論文標題 UAVリモートセンシングに基づく農家圃場におけるダイズ湿害の評価．2017年仙台沿岸部における観測例	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本作物学会紀事	6. 最初と最後の頁 48-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1626/jcs.88.48	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 石森駿・本間香貴・中嶋孝幸・中村貞二・菅野均志	4. 巻 61
2. 論文標題 東北大学農学研究科植物実験フィールドの生産性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本作物学会東北支部会報	6. 最初と最後の頁 35-36
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirooka Yoshihiro, Homma Koki, Shiraiwa Tatsuhiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Parameterization of the vertical distribution of leaf area index (LAI) in rice (<i>Oryza sativa</i> L.) using a plant canopy analyzer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.1038/s41598-018-24369-0	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16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 山本修平, 本間香貴, 橋本直之, 牧雅康, 本郷千春
2. 発表標題 水収支モデル適用によるダイズ農家圃場の土壌水分特性の評価 - 第2報 - リモートセンシングを併用した黒根腐病害の評価
3. 学会等名 第249回日本作物学会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本修平, 本間香貴, 牧雅康, 本郷千春
2. 発表標題 シミュレーションモデルとリモートセンシングを用いた作物生産量推定法の検討. 第3報 仙台市沿岸部農家圃場におけるダイズ生産量の圃場内変動評価.
3. 学会等名 第22回環境リモートセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石森駿，斎藤大暉，川村一成，本間香貴，中嶋孝幸，田島亮介
2. 発表標題 ダイズの生産性の向上を目指した無限伸育型と有限伸育型の混植栽培．第4報 2016～2018年の栽培試験および2018年の倒伏の影響報告
3. 学会等名 第248回日本作物学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村一成，斎藤大暉，本間香貴，中嶋孝幸，田島亮介
2. 発表標題 ダイズの生産性の向上を目指した無限伸育型と有限伸育型の混植栽培．第5報 非破壊的簡易推定した葉面積分布に基づく子実生産効率の算出．
3. 学会等名 第248回日本作物学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野聡史，田中佑，本間香貴
2. 発表標題 莖内流量計測による群落条件でのダイズ蒸散速度の動態評価
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 妃菜花，田中 佑，白岩 立彦
2. 発表標題 群落の炭素収支からみたダイズ多収品種UA 4910の物質生産性
3. 学会等名 第247回日本作物学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村一成・斎藤大暉・定池歩美・本間香貴・中嶋孝幸・陶山佳久・伊藤豊彰
2. 発表標題 ダイズの生産性の向上を目指した無限伸育型と有限伸育型の混植栽培．第三報 葉面積垂直分布の非破壊的簡易推定
3. 学会等名 第246回日本作物学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石森駿・本間香貴・中嶋孝幸・中村貞二・菅野均志
2. 発表標題 東北大学農学研究科附属青葉山圃場の生産性評価
3. 学会等名 第61回日本作物学会東北支部講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kondo, R., Katayama, H., Tanaka, Y., Shiraiwa, T.
2. 発表標題 Continuous estimation of rice canopy transpiration based on thermal imaging
3. 学会等名 5th International Rice Congress, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, Y., Kobayashi, S., Tanaka, K., Kondo, R.
2. 発表標題 Natural Variations of the Non-Steady State Photosynthesis among Rice and Soybean Varieties
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koki Homma
2. 発表標題 Trials to simulate soybean production under tropical environments
3. 学会等名 第245回日本作物学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuriyama, K., Manago, N., Homma, K., Muramatsu, K., Yoshimura, K., Kominami, Y., Kuze, H.
2. 発表標題 Stand-off measurement of solar induced fluorescence from vegetation canopies: Application to field and forest
3. 学会等名 International Symposium on Remote Sensing 2017.（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤琳太郎・田中佑・本間香貴・白岩立彦
2. 発表標題 イネ群落蒸散の継続的推定およびそれに基づく物質生産の評価
3. 学会等名 第245回日本作物学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kawamura, I., Saito, D., Sadaike, A., Nakajima, T., Ito, T., Suyama, Y., Homma, K.
2. 発表標題 Effect of mix cropping of determinate and indeterminate soybean lines on canopy structure in Kawatabi Field Center in 2017
3. 学会等名 15th International Symposium on Integrated Field Science "Biological Interactions for Sustainable Agriculture"（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本修平, 橋本直之, 斎藤祐樹, 牧雅康, 本間香貴
2. 発表標題 シミュレーションモデルとリモートセンシングを用いた作物生産量推定法の検討
3. 学会等名 第20回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Tanaka, Hiroto Katayama, Rintaro Kondo, Koki Homma, Tatsuhiko Shiraiwa
2. 発表標題 Continuous monitoring of the canopy gas exchange of rice and soybean based on the aerodynamic analysis of the plant canopy
3. 学会等名 The 9th Asian Crop Science Association Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>熱赤外リモートセンシングによる群落機能評価 http://www.agri.tohoku.ac.jp/jp/research/seeds/img/L_08.jpg</p>

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	田中 佑 (Tanaka Yu) (50634474)	京都大学・農学研究科・助教 (14301)	

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	中野 聡史 (Nakano Satoshi) (80414621)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環 境変動研究センター・主任研究員 (82111)	