

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06305

研究課題名(和文) UAVハイパースペクトルリモートセンシングによる水稲の生育診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of diagnostic technique for paddy rice growth using UAV-based hyperspectral remote sensing

研究代表者

栗原 純一 (Kurihara, Junichi)

北海道大学・理学研究院・特任准教授

研究者番号：00578479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ドローンからの多波長(ハイパースペクトル)観測を用い、水稲の反射率スペクトルから正規化分光指数を求め、その収量に対する単回帰分析によって、収量の予測モデルを構築した。その結果、穂ばらみ期における可視から近赤外域にかけての波長帯を使ったモデルの収量予測精度が最も高く、これは過去の多くの研究とも一致していた。さらに、穂ばらみ期よりも出穂期のほうが異なる生育環境に対する汎用性は高かった。この出穂期のモデルによって、気象データを用いることなく、異なる生育環境に対する十分な収量予測精度が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボット技術やリモートセンシング技術、ICTを活用した農業のスマート化が日本の稲作でも進められている。本研究では、ドローンを使った多波長(ハイパースペクトル)観測を行って、水稲の収量を予測するモデルを編み出した。その結果、出穂期のたった一回の観測だけで、特定の波長から簡単な計算式を使って水稲の収量を高精度で予測することができることがわかった。これを応用すれば、スマート農業に貢献できるような機材やサービスを低コストで提供できるようになると期待される。

研究成果の概要(英文)：Normalized spectral index was derived from the canopy reflectance spectra of paddy rice using UAV-based hyperspectral imaging and a yield prediction model was constructed by simple linear regression analysis of the index. The measured yield has the highest prediction accuracy in the spectral bands corresponding to the visible-to-near-infrared region in the booting stage which correlates with previous studies. In addition, the generalization ability for the different growth environments in the heading stage was higher than that in the booting stage. The model using the index at the heading stage provided sufficient yield prediction accuracy for different growth environments without using meteorological data.

研究分野：農業情報工学

キーワード：精密農業 リモートセンシング ドローン

### 1. 研究開始当初の背景

ロボット技術やリモートセンシング技術、ICT を活用した農業のスマート化が日本の稲作でも進められている。実際、青森県初の特 A 米「青天の霹靂」のように、人工衛星によるリモートセンシングを利用して水稻の生産管理を行うことでブランド化に繋がった成功例も出てきた。しかし、衛星観測データは観測の頻度や空間分解能が必ずしも十分ではない。そこで、観測自由度の高い小型の無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) を利用した水稻の生育診断に期待が集まっている。これまでの研究では、UAV に搭載した数バンドの広帯域マルチスペクトルカメラによる反射率の観測から正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) を導出し、収量やタンパク含有率との相関が調べられてきた (例えば、濱ほか、2016 など)。しかしながら、UAV が発達する以前から行われてきた、有人航空機に搭載された数十バンド以上の狭帯域ハイパースペクトルセンサによる観測から、NDVI はタンパク含有率とは相関が著しく低いことがすでに知られている (井上ほか、2008)。したがって、NDVI の導出を目的としたマルチスペクトル観測では、診断精度に限界があると考えられる。その一方で、ハイパースペクトルセンサを UAV に搭載することは容易ではなかった。衛星・航空機リモートセンシングで従来採用されてきたプッシュブルーム型のハイパースペクトルセンサは、UAV 搭載に対しては装置が大型であるうえ、地理座標での位置合わせ (ジオリファレンス) の精度が UAV の慣性計測装置の性能に強く依存するという問題があった。

このような背景のもと、研究代表者は UAV に搭載可能な小型のハイパースペクトルカメラを開発し、その観測技術に関して特許を取得した (特許第 6321895 号)。このカメラは液晶波長可変フィルター (Liquid Crystal Tunable Filter; LCTF) 技術を応用し、可視域から近赤外域にわたる 460-780 nm の波長範囲において任意の波長での 2 次元画像を取得することができる。この手法では最初から 2 次元画像が得られるため、ジオリファレンスも格段に高精度になる。これにより、プッシュブルーム型では極めて困難であった UAV によるハイパースペクトル観測が高精度かつ効率的に実施できるようになった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、UAV を用いた水稻のハイパースペクトル観測によって、生育ステージごとの反射率スペクトルと生育状態との関係を明らかにし、高精度の生育診断技術を確立することである。具体的には、以下の 3 つのサブテーマに分かれている。

- (1) 北海道立総合研究機構・中央農業試験場・岩見沢試験地の栽培技術開発試験圃場において、区画ごとに栽培される品種・育苗様式・栽植密度・施肥の異なる水稻を UAV から高頻度・高空間分解能でハイパースペクトル観測する手法を確立する。
- (2) 観測された水稻の反射率スペクトルと、計測された水稻の肥料吸収率、収量および食味 (タンパク含有率) 等との相関を調査し、その関係を明らかにする。
- (3) 3 年間の生育診断結果を比較検討することで、各年の気象要因などによる推定のばらつきについて評価し、高精度の推定式を導出する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試験圃場と地上調査

本研究は、北海道岩見沢市にある北海道立総合研究機構・農業研究本部・中央農業試験場・岩見沢試験地の栽培技術開発試験圃場 (43° 10' 37"N, 141° 43' 12"E) において、2020 年と 2021 年に実施した。各年とも、隣接する 2 つの圃場 F1 および F2 を使用し、水稻 (*Oryza sativa* L.) の苗を 10 日以上の間隔を空けて 2 つの圃場に移植した (表 1)。各圃場は、品種・育苗・施肥量の組み合わせの異なる区画に分かれている。1 区画の大きさは、横が 8-12 m、縦は 2 m であり、区画の設計は年によって異なる。品種は北海道で主要な品種である「ななつぼし」および「ゆめぴりか」の 2 種を栽培した。苗の生育ステージは本葉の数が 5-6 枚の成苗および 3-4 枚の中苗の 2 種に分けて移植した。施肥量は移植前に与えた窒素量で 0-17 kg/10a である。

表 1. 各年の圃場ごとの区画数と移植日

年	圃場	区画数 (行×列)	移植日
2020	F1	80 (10×8)	2020/5/22
	F2	42 (7×6)	2020/6/3
2021	F1	42 (7×6)	2021/5/20
	F2	42 (7×6)	2021/5/31

栽培期間中に生育ステージごとの生育調査を行い、収穫後に収量等の調査を実施した。本研究では、収量および収量の構成要素に関する項目に絞って解析する。対象となる項目は、収量に対応する単位面積当たりの精玄米重と、収量を構成する要素である単位面積当たり穂数、一穂粒数、登熟歩合、および千粒重である。収量は実測によって求められるだけでなく、収量構成要素の実測値から以下の式によって推定することもできる。

$$Y' = D \times N \times R \div 100 \times W \div 1000$$

ここで  $Y'$  は単位面積当たりの推定収量 ( $g\ m^{-2}$ )、 $D$  は単位面積当たり穂数 ( $m^{-2}$ )、 $N$  は一穂粒数、 $R$  は登熟歩合 (%)、 $W$  は千粒重 ( $g$ ) である。

#### (2) UAV ハイパースペクトル撮像

UAV ハイパースペクトル撮像には、液晶波長可変フィルター技術を用いた逐次的二次元撮像装置 (株式会社ジェネシア製) を使用した。この装置は 460-780 nm において最小 1 nm 間隔で波長を変更可能であり、バンド幅は 460 nm における 6 nm から 780 nm における 23 nm まで直線的に増加する。本研究では、装置の波長走査は 10 nm 間隔で行い、合計 33 バンドを撮影した。各バンドの撮像に要する時間は 0.5-1 秒であり、33 バンドでは 30-40 秒程度である。視野角は対角で 90 度である。

この撮像装置をジンバル RONIN-MX (DJI 製) に取り付け安定させ、ジンバルとともにヘキサコプター型 UAV Matrice 600 Pro (DJI 製) に搭載した。UAV を手動で操縦して各圃場の中央付近上空の高さ約 70 m の空中で停止し、撮像装置を直下に向けて連続的に撮像した。地上視野は約 112 m × 84 m で、地上空間分解能は 0.17 m である。撮像の際には反射率が既知の標準反射板を視野内の地上に置き、各バンドにおける輝度の反射率への変換に使用した。

UAV 撮像は、2020 年は幼穂形成期の直後から収穫期にかけて 9 回、2021 年は幼穂形成期から収穫期にかけて 10 回、各年とも平均 7 日に 1 回の頻度で行った。撮像時間帯は午前 10:30-11:30 で、F1 と F2 の圃場を合わせた飛行時間は 10-15 分である。雨や強風の状況では UAV の飛行ができないが、それ以外の状況であれば、雲量にかかわらず撮像を行った。ただし、1 シーケンス 33 バンドの撮像中に雲の移動などの影響によって短時間に日射量に変化したシーケンスは除外し、最も品質の良いシーケンスのみを解析に使用した。

#### (3) 画像処理

取得したハイパースペクトル画像から、放射量補正、歪曲補正、バンド間の位置合わせ、および反射率変換の 4 つのステップを経て、反射率のハイパースペクトルキューブを作成した。さらに、ハイパースペクトルキューブから合成カラー画像を作成した。従来の前処理と異なる点は、バンド間の位置合わせのステップである。撮像画像における輝度の不均質性の高い森林などの場合はバンド間の位置合わせに特徴量マッチングを使用していたが、輝度の不均質性の低い水稲圃場の場合には得られる特徴点の数が十分ではないという問題があった。また、この方法は隣り合うバンド間の位置合わせを逐次的に繰り返すことによって、位置合わせの誤差が拡大していくという問題もあった。そこで本研究では、圃場の外側の四隅に対空標識を置き、それらの位置を利用して単一のバンドに対して位置合わせを行った。これにより、すべてのバンドにおいて位置合わせの誤差は 1 ピクセル以内に収まった。

各区画の平均反射率を導出するにあたり、各区画全体を使用するのではなく、区画の部分的な画素を抽出した。その理由は、圃場の外周にある土壌や隣り合う区画からの混入を避けることと、生育調査のためのサンプル採取によって空いた隙間を避けるためである。

#### (4) 回帰分析

ハイパースペクトルデータのような多変量の解析には様々な手法が存在するが、PLS 回帰分析のように全バンドの反射率を用いたモデルが、最適な 2 バンドのみを用いて正規化した分光反射指数に比べて、汎用性の面で必ずしも優れてはいないことが知られている。これは反射率の絶対値がセンサーの特性や測定条件、大気状態の影響を受けやすく、正規化によってそれらの影響が相殺されるためと考えられている。本研究のハイパースペクトルデータも時期や雲量によって入射光が大きく異なる条件の下で測定しており、正規化した分光反射指数を採用することが妥当である。そこで本研究では、区画ごとに平均した分光反射率に対して、任意の 2 バンドの組み合わせから次式の正規化スペクトル指数 (normalized difference spectral index; NDSI) を算出した。

$$NDSI(\lambda_i, \lambda_j) = (R_j - R_i) / (R_j + R_i)$$

ここで、 $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ  $i$  番目と  $j$  番目のバンドにおける中心波長  $\lambda_i$  と  $\lambda_j$  における分光反射率である。この NDSI を説明変数、収量等の地上調査項目を目的変数として単回帰分析を行い、決定係数  $R_2$  によってモデルの予測精度評価を行った。

#### (5) 日射量データ

日射量データには農研機構メッシュ農業気象データ (The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO) の全天日射量を利用した。このデータベースでは、日本国内における多様な気象観測データを補間して 1 km × 1 km のメッシュでデータが用意されている。全天日射量とは、太陽から直接到達する直接日射と太陽光が大気中で散乱・反射されて到達する散乱日射とを足し合わせた、地表面が受ける全ての日射量のことである。メッシュ農業気象データでは、1 日ごとに積算された全天日射量 [ $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ] が提供されている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 反射率スペクトルと NDSI

反射率スペクトルは水稻の生育とともに変化するが、特に近赤外域 (750-780 nm) での変化の幅が大きい。近赤外域の反射率は幼穂形成期から出穂期にかけて急激に上昇し、登熟期にピークを迎え、その後は変化が小さくなっている。それに対して、可視域の反射率は幼穂形成期から出穂期にかけて減少し、出穂期以降は継続的に上昇している。また、同時期で比較すると移植の早い F1 圃場の反射率が F2 圃場よりも近赤外の反射率が高く、2021 年の近赤外反射率が 2020 年よりも高い傾向にある。

同一の品種・育苗・施肥量の区画に対して NDSI の値を比較したところ、出穂期と比較して、登熟期では、可視域を  $\lambda_i$ 、近赤外域を  $\lambda_j$  とした組み合わせの NDSI の値が下がっている。一方、同一日であっても、F1 圃場と比較して、移植の遅い F2 圃場では、近赤外域を  $\lambda_j$  とした組み合わせで NDSI の値が低い。しかし、同じく出穂期で 2020 年と 2021 年を比較すると、近赤外域を  $\lambda_j$  とした組み合わせで NDSI の値は同程度か、2021 年のほうがやや小さい。このように、近赤外反射率と 2 つの反射率を用いる NDSI とでは傾向が異なっていることに注意が必要である。

##### (2) 収量および収量構成要素

年度や圃場によらず、生育ステージを通じて決定係数の高い項目は実測収量であった ( $R^2=0.6-0.9$ )。一方、推定収量は実測収量と比べて決定係数が低く ( $R^2 < 0.7$ )、年度や圃場による差も大きい。収量の構成要素の一つである単位面積当たりの穂数 ( $R^2=0.4-0.8$ ) は、穂ばらみ期から出穂期までは決定係数が高かった ( $R^2 > 0.6$ ) が、それ以降は低下する傾向があった。それ以外の収量構成要素である一穂粒数、登熟歩合、および千粒重は決定係数が相対的に低かった ( $R^2 < 0.6$ )。これは穂数が施肥量に強く依存することから、同じく施肥量に依存する葉面積指数 (LAI) やクロロフィル含有量などの葉や茎の生育量と相関があり、これらの生育量が植生指数に反映されるためと考えられる。一方で、出穂期以降に穂数に対する決定係数が下がる傾向は、穂自体の反射率が及ぼす影響に起因する可能性が高い。子実が成熟した穂は緑色域から近赤外域にかけて高い反射率を持つため、水稻群落の反射率に大きな影響がある。また、収量構成要素から推定した収量が実測した収量よりも予測精度が低いのは、個々の構成要素の測定誤差が影響している可能性が高い。

##### (3) 予測精度の高い波長帯

実測収量に対する予測精度の高いバンドの組み合わせは、近赤外の 750-780 nm を  $\lambda_j$ 、レッドエッジの 700-720 nm を  $\lambda_i$  とした波長帯の組み合わせが最も高く、近赤外の 750-780 nm を  $\lambda_j$ 、緑の 530-570 nm を  $\lambda_i$  とした組み合わせがそれに続いていた。これらの組み合わせをマルチスペクトル観測で用いられる植生指数と照らし合わせると、NDRE は正規化レッドエッジ指数 (normalized difference red edge index; NDRE)、GNDVI は緑正規化植生指数 (green normalized difference vegetation index; GNDVI) にほぼ対応している。一方、植生のリモートセンシングで最も広く用いられている正規化植生指数 (normalized difference vegetation index; NDVI) に相当する、近赤外の 750-780 nm を  $\lambda_j$ 、赤の 650-680 nm を  $\lambda_i$  とする波長帯の組み合わせは、および  $\lambda_i$  と比べると相対的に予測精度が低かった。例として、図 1 に 2020 年の圃場 F1 において最も予測精度の高かった 2020 年 7 月 17 日における NDSI の実測収量に対する決定係数のヒートマップを示す。ヒートマップ上で NDRE、GNDVI、NDVI の 3 つの植生指数に対応する領域中における決定係数のばらつきはいずれも比較的小さい。そこで、本研究では以下において簡略化のために、3 つの領域を代表するバンドの組み合わせとして、NDRE=NDSI (710 nm, 770 nm)、GNDVI=NDSI (550 nm, 770 nm)、および NDVI = NDSI (670 nm, 770 nm) と定義する。図 1 に NDRE と実測収量の関係を示す。すべての区画に対する回帰直線のほかに品種と育苗様式の組み合わせの異なる区画に対する回帰直線も示したが、どの直線もほぼ一致している。

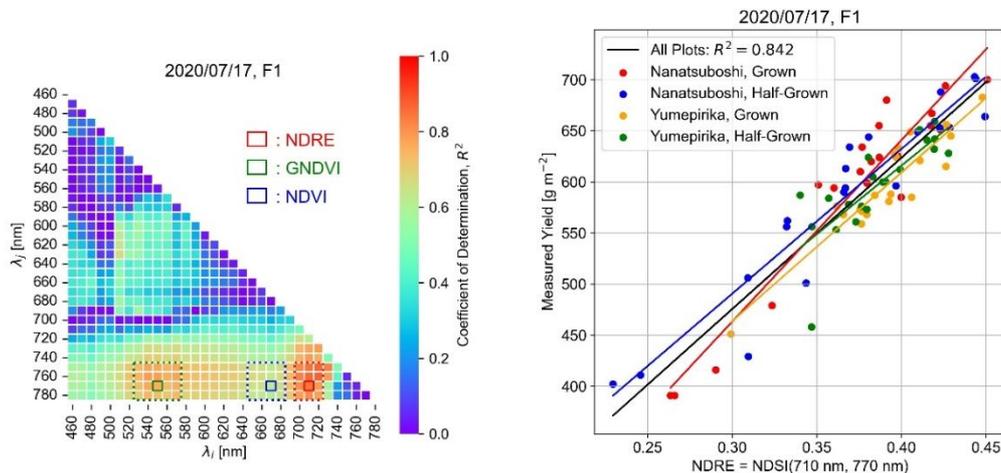


図 1. (左)圃場 F1 の 2020 年 7 月 17 日における NDSI の収量に対する決定係数のヒートマップ。(右) 実測収量と NDRE の関係。黒線はすべての区画のデータに対する回帰直線で、色付きの線は品種と育苗様式の組み合わせの異なる区画に対するそれぞれの回帰直線。

#### (4) 時系列変化

2020年のF2圃場を除いて、NDREおよびGNDVIによる実測収量に対して予測精度が最も高くなる時期は幼穂形成期と出穂期間の穂ばらみ期であった。NDVIは予測精度のピークが2回あり、最初のピークの穂ばらみ期に続く出穂期に一旦低下した後、登熟期に再び予測精度が向上する。それに対して、2020年のF2圃場では出穂期の直前に最初のピークがあるが、天候の影響で穂ばらみ期の中央付近における計測間隔が10日間空いているため、この期間に本来のピークがあった可能性もある。

NDSIの値の時系列変化については、数値としてはNDVI、GNDVI、およびNDREの順に大きい。いずれの指数も幼穂形成期から出穂期にかけて数値が増加し、出穂期および出穂後7-10日にかけて数値のピークを持ち、その後、登熟期に徐々に減少していく傾向がある。穂ばらみ期におけるNDREに対応する波長帯の収量予測精度が最も高いという結果は、ハイパースペクトルを用いた過去の多くの研究とも一致している。

#### (5) 異なる生育環境の比較

最も予測精度の高かったNDREを用いたモデルについて、穂ばらみ期と出穂期で異なる生育環境を比較したところ、穂ばらみ期は特定の生育環境での予測精度は高いが、異なる生育環境に対する汎用性は下がった(図2)。これは穂ばらみ期では葉や茎の生育速度が大きいことに起因してNDREの値の時系列変化が大きいいため、異なる生育環境に対するわずかな計測時期の違いが生育状態に大きな違いを生じているためと考えられる。それとは対照的に、出穂期では、特定の生育環境での予測精度は穂ばらみ期には劣る場合が多いが、異なる生育環境に対する汎用性は穂ばらみ期と同じか、穂ばらみ期よりも高い。これは出穂期では葉や茎の生育が頭打ちになり、葉や茎における光合成生産物が穂の成長に使われるようになる結果、NDREがピークに達して時系列変化が小さくなることによると考えられる。したがって、異なる生育環境における収量を予測する場合には、穂ばらみ期よりも出穂期のほうが適していると言える。

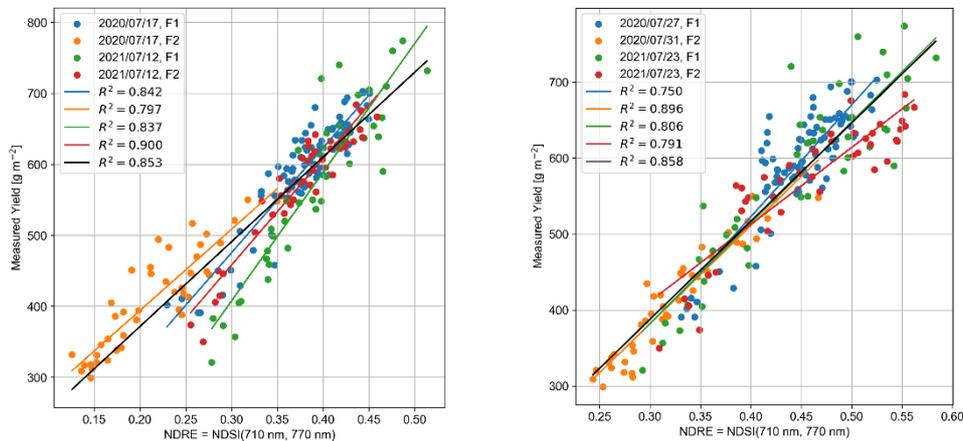


図2. 穂ばらみ期(左)および出穂期(右)におけるNDREと実測収量の関係。

Hama et al. (2020)で提案された、出穂後20日間の平均全天日射量(mGSR)を使ってNDREを補正した。NDREに(mGSR)を乗算することで回帰直線の傾きが変わり、穂ばらみ期については各年の圃場ごとのデータはほぼ同じ傾きを持つようになったが、出穂期については傾きの違いがなくなって大きくなった。どちらの生育ステージにおいても、全データに対する回帰モデルでは決定係数が大きく下がった。この原因として、Hama et al.では移植日が最大で2か月近く異なる水稻を解析しているため、出穂後の日射量による補正の効果が大きかったと考えられる。それに比べて、本研究では年度は異なるものの移植日は最大でも2週間程度しか離れていないため、日射量による補正の効果は限定的で、むしろ日射量の誤差の影響のほうが大きかったと考えられる。このことは同一生育環境で比較すると、日射量の補正によって精度が下がっていることから明らかである。

#### (6) 結論

本研究では、UAVハイパースペクトル撮像を用いた水稻群落の反射率スペクトルからNDSIを求め、NDSIの収量に対する単回帰分析による収量予測モデルを構築した。収量構成要素の中では出穂期までの単位面積あたりの穂数に対する予測精度が高かったが、これは穂数が施肥量に強く依存することに起因すると考えられる。出穂期以降は穂の反射率が相対的に増加することの影響で予測精度が下がると推測される。実測収量は穂ばらみ期におけるNDREに対応する波長帯の収量予測精度が最も高く、これは過去の多くの研究とも一致している。NDREを用いたモデルについて、穂ばらみ期と出穂期で異なる生育環境を比較したところ、穂ばらみ期よりも出穂期のほうが異なる生育環境に対する汎用性は高かった。これはNDREの値が出穂期にピークを迎えるため、より安定した予測ができることによる。出穂期後の日射量による補正も試みたが、補正の効果は得られなかった。出穂期におけるNDREを使用したモデルによって、気象データを用いることなく、異なる生育環境に対する十分な収量予測精度が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗原純一、長田亨
2. 発表標題 UAVハイパースペクトルリモートセンシングによる複数年の水稻生育診断
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗原純一、長田亨、富山博之
2. 発表標題 時系列UAVハイパースペクトルリモートセンシングデータによる水稻生育診断
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会
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	長田 亨  (Nagata Toru)  (70462380)	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・農業研究本部 中央農業試験場・研究主任   (80122)	
研究分担者	富山 博之  (Tomiya Hiroyuki)  (30912852)	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・農業研究本部 中央農業試験場・研究職員   (80122)	

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