

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06313

研究課題名（和文）機械学習を活用した分光反射特性からの茶樹生葉の品質・ストレス評価

研究課題名（英文）Quality evaluation of tea leaves using machine learning and hyperspectral reflectance

研究代表者

園部 礼（Sonobe, Rei）

静岡大学・農学部・助教

研究者番号：40755352

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）：茶樹に遮光処理を施すことは、チャの品質に影響を与えるクロロフィルやテアニン含量を向上させるのに有効である。したがって、弱光下におけるクロロフィル及びテアニン含量のモニタリングは茶樹を管理し、高品質の茶を生産する上で重要である。ハイパースペクトルリモートセンシングは植物の特性を評価する上で効果的な手法となっている。そこで、我々はクロロフィルやテアニン含量推定におけるハイパースペクトルデータの利用可能性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

品質の向上と安定的な収量の維持のトレードオフ関係への解を得るうえで有効となる茶葉の生葉段階における品質とストレスの同時評価手法の確立を、分光反射特性と機械学習アルゴリズムを用いることによって実現する。現在まで茶樹の適切な管理には、経験を積んで培われてきたプロのスキルが必要であった。しかし、高齢化、後継者不足によりこれらの技術の消失が危惧されている。本研究では、分光反射特性という客観的なデータを用いて同等の成果の達成を試みる研究であり、将来における高付加価値農作物の安定的な産出に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Tea trees are kept in shaded locations to increase their chlorophyll content and theanine, which influence green tea quality. Therefore, monitoring changes in chlorophyll and theanine content under low light conditions is important for managing tea trees and producing high-quality green tea.

Hyperspectral remote sensing offers an efficient way to monitor biochemical properties. Thus we examined the potential of hyperspectral data for estimating chlorophyll and theanine content.

研究分野：農業情報工学

キーワード：分光反射特性 チャノキ 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

収穫前の一定期間において直がけ被覆を行うことは茶葉に含まれるクロロフィル a およびテアニン含有量の増加に有効である。そのため、茶葉の高付加価値化のため本技術が広く活用されている。しかし、直がけ被覆に伴う光環境ストレスは光合成量の低下すなわち収量の低下をもたらし、さらに、茶樹の寿命を大幅に短くしうる。よって、バランスを考えた被覆のタイミングや程度などの微妙な制御を実施するため、収穫前の生葉段階での品質およびストレスの有効な評価手法の開発が望まれている。しかし、茶葉の品質やストレスを正確に評価するには葉内成分の抽出といった破壊的な試験を行う必要があり、労力とコストがかかる。加えて、同じ葉の生化学・生理特性が遮光処理下においてどのように変化するかを追跡・管理することは非常に難しい。一方、分光反射特性を用いたリモートセンシングは植物の構造や生化学、生理特性を評価するために広く活用されており、茶葉の光合成色素含量評価などに活用されてきた。分光反射特性を用いた代表的な手法に分光反射指数、放射伝達モデルおよび機械学習アルゴリズムに基づく方法がある。本研究では、これらの手法を活用することで、プロの経験に頼ることなく、非破壊で簡便な茶葉の品質やストレスの評価手法の提案を目的とした。また、圃場単位で生葉段階における茶葉の品質を評価する上で、広域データである人工衛星やドローンの活用を検討する必要がある。これらによって取得したデータを活用した評価手法の検討も実施した。

2. 研究の目的

本研究では最も品質が高い一番茶新芽に着眼し、品質の向上と安定的な収量の維持のトレードオフ関係への解を得るうえで有効となる茶葉の生葉段階における品質とストレスの同時評価手法の確立を、分光反射特性を用いることによって試みた。

現在まで茶樹の適切な管理には、経験を積んで培われてきたプロのスキルが必要であった。しかし、高齢化、後継者不足によりこれらの技術の消失が危惧されている。また、クロロフィル含量やテアニン含量といった品質に関する指標や、クロロフィル・カロテノイド含量比といった枯死のリスクを評価する上で有効な指標を評価するには破壊的な試験を行う必要があるうえ、1度の計測に多くの生葉を要するという課題が存在した。本研究では、現場での測定が可能な分光反射特性という客観的なデータを用いて同等の成果の達成を試みる研究であり、将来における高付加価値農作物の安定的な産出に貢献できると考えられる。

3. 研究の方法

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構果樹茶業研究部門金谷茶業研究拠点(静岡県島田市)が所有する圃場に定植されていたチャノキ(*Camellia sinensis*)を用いた。ダイオ化成の黒色カラミ織のダイオネットを使用した直がけ被覆栽培および露地で栽培を行い、品質および光環境ストレス、そして、分光反射特性に与える違いを評価した。

サンプリングした茶葉からリーフパンチ(藤原製作所製)を用いて、直径 8.0mm のリーフデスクを作成した。この後、N,N-ジメチルホルムアミドを用い葉内の成分を溶かし、紫外可視分光光度計(UV-1280, Shimadzu, Japan)による出力結果に Wellburn 式 (Wellburn, 1994)を適用することによって、クロロフィル a, b およびカロテノイド含量を計測した。また、手鋏みで前年秋整枝面より 5 mm 程度上で 20 cm 四方の枠摘みをし、オルトフタルアルデヒドを用いた高速液体クロマトグラフィーによってテアニンの定量を行った。分光反射特性の計測にはリーフクリップを接続した FieldSpec 4 (Analytical Spectral Devices Inc., USA)を用い、波長 350 から 2500nm における反射率を取得した。

外観は緑茶の品質を評価する上で重要な因子であり、色調が明るく光沢があるものが良好とされる傾向があり(和田ら, 1988), 茶芽のクロロフィル含量と密接な関係がある(橘・庄山, 1976)。また、特に、クロロフィル a 含量は抹茶加工品の着色に有効とされる。よって、本研究ではクロロフィル a もしくはクロロフィル含量を品質の評価指標として扱った。さらに、高価な緑茶にはアミノ酸の一種で緑茶の旨味成分とされているテアニンが多く含まれていることから、テアニン含量は最高級品の序列を決定する重要な指標となっている。そして、テアニンは太陽光に照射されると緑茶の渋み成分であるカテキンに変化することが知られており(Meng et al. 2017), 遮光処理は高テアニン・低カテキンの茶葉を生産する上で有効とされている。そこで、テアニン含量も品質を評価する指標として検討した。一方で、全クロロフィルとカロテノイドの含量比は光環境ストレスを評価するうえで活用されていることから、枯死のリスクを評価する指標として扱った。分光反射特性からこれらの評価を実施する上で、分光反射指数、放射伝達モデルおよび機械学習アルゴリズムに基づく方法を検討した。

また、遮光率が生理的特性および構造にも変化を与えることに加え、個葉スケールから圃場スケールへと拡大していくため、ドローンデータや合成開口レーダデータの活用を検討し、作物の構造の違いを識別する際に活用できるかを評価した。

4. 研究成果

本研究では、400~780nmにおける分光反射率を用いて、遮光処理が実施された茶葉のクロロフィル a, b およびカロテノイド含量の推定を試みた。分光反射率からこれらの葉内含量を推定する上では Kernel-based Extreme Learning Machine (KELM), Deep Belief Network (DBN), Random Forests (RF) および Support Vector Machine (SVM) といった機械学習アルゴリズムを使用し、これらの推定精度の比較を実施した。なお、推定モデルをロバストかつシンプルなものとするために、遺伝的アルゴリズムによる変数選択を行うことによって、分光反射特性の冗長性を下げた。加えて、機械学習アルゴリズムのハイパーパラメータをチューニングする際にベイズ最適化を用いることによって、自動的に各機械学習アルゴリズムに対して最適なハイパーパラメータの組み合わせを決定した。各アルゴリズムによる推定モデルを評価用データセットに対する推定精度をもとに評価すると、すべての色素含量の推定において KELM が最も優れていた。

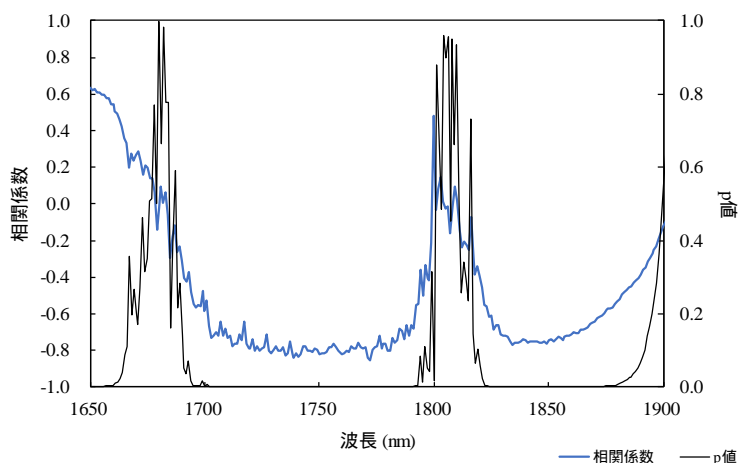


図1 .1750 nm 付近における 1 次微分値とテアニン含有量との相関係数

テアニンの含量を評価する上では、1735 nm における反射率と 1755 nm における反射率の差(D (1735, 1755))を使用すると、推定モデルとして十分な精度を達成することができた。また、選択された 2 波長の差が 20 nm しかなかったことから、当該波長域における微分処理がテアニン含量評価に有効であることが示唆された。そこで、1750 nm 付近における反射率の 1 次微分値を算出し、テアニン含量との相関分析を行った。図 1 に示すように、分光反射率を用いた場合よりも強い負の相関 ($r < -0.8, p < 0.001$) を確認することができた。PROSPECT-D がリーフスケールにおける茶葉のクロロフィルおよびカロテノイド含量を推定する上で有効な放射伝達モデルであることを明らかにすることができた。そこで、ドローン搭載のハイパースペクトルセンサによって取得したデータを用いて PROSPECT-D をキャノピースケールに拡張した PROSPECT-D + SAIL による逆推定を行った。結果として、圃場スケールでの葉面積指数やクロロフィルおよびカロテノイド含量の分布状況を推定することができた (図 2)。

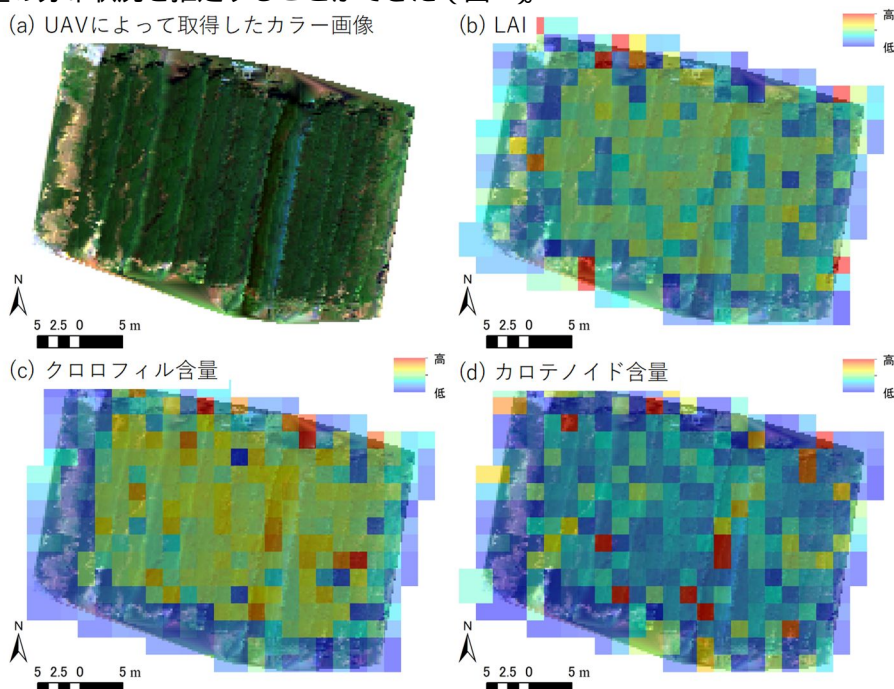


図2. ドローンによって取得した画像および PROSPECT-D + SAIL による逆推定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Sonobe Rei, Yamashita Hiroto, Nofrizal Adenan Yandra, Seki Haruyuki, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 online published
2. 論文標題 Use of spectral reflectance from a compact spectrometer to assess chlorophyll content in <i>Zizania latifolia</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geocarto International	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/10106049.2021.1914747	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 Sonobe Rei, Sugimoto Yudai, Kondo Ryohei, Seki Haruyuki, Sugiyama Erika, Kiriiwa Yoshikazu, Suzuki Katsumi	4. 巻 54
2. 論文標題 Hyperspectral wavelength selection for estimating chlorophyll content of muskmelon leaves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 513~524
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/22797254.2021.1964383	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 Sonobe Rei, Hirono Yuhei, Oi Ayako	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantifying chlorophyll-a and b content in tea leaves using hyperspectral reflectance and deep learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Remote Sensing Letters	6. 最初と最後の頁 933~942
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/2150704X.2020.1795294	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 Sonobe Rei, Yamashita Hiroto, Mihara Harumi, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Estimation of Leaf Chlorophyll a, b and Carotenoid Contents and Their Ratios Using Hyperspectral Reflectance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3265~3265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs12193265	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 Yamashita Hiroto, Sonobe Rei, Hirono Yuhei, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Dissection of hyperspectral reflectance to estimate nitrogen and chlorophyll contents in tea leaves based on machine learning algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-73745-2	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 Sonobe Rei, Yamashita Hiroto, Mihara Harumi, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 42
2. 論文標題 Hyperspectral reflectance sensing for quantifying leaf chlorophyll content in wasabi leaves using spectral pre-processing techniques and machine learning algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1311 ~ 1329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01431161.2020.1826065	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 Yamashita Hiroto, Sonobe Rei, Hirono Yuhei, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Potential of spectroscopic analyses for non-destructive estimation of tea quality-related metabolites in fresh new leaves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-83847-0	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 -

1. 著者名 Sonobe Rei, Yamashita Hiroto, Adenan Yandra Nofrizal, Seki Haruyuki, Morita Akio, Ikka Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Use of spectral reflectance from a compact spectrometer to assess chlorophyll content in <i>Zizania latifolia</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geocarto International	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) 10.1080/10106049.2021.1914747	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 Sonobe Rei, Hirono Yuhei, Oi Ayako	4. 巻 9
2. 論文標題 Non-Destructive Detection of Tea Leaf Chlorophyll Content Using Hyperspectral Reflectance and Machine Learning Algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plants	6. 最初と最後の頁 368 ~ 368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plants9030368	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 Sonobe Rei	4. 巻 11
2. 論文標題 Parcel-Based Crop Classification Using Multi-Temporal TerraSAR-X Dual Polarimetric Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1148 ~ 1148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11101148	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 Sonobe Rei	4. 巻 11
2. 論文標題 Combining ASAR0-2 XSAR HH and Sentinel-1 C-SAR VH/VV Polarization Data for Improved Crop Mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1920 ~ 1920
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11161920	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 林明日香、園部礼、佐野智人、堀江秀樹	4. 巻 58
2. 論文標題 PROSPECTを用いた茶葉におけるクロロフィル含量の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 写真測量とリモートセンシング	6. 最初と最後の頁 260 ~ 264
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 園部礼、佐野智人、堀江秀樹	4. 巻 58
2. 論文標題 分光反射特性による茶葉に含まれるテアニン含量推定能力の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 写真測量とリモートセンシング	6. 最初と最後の頁 265 ~ 269
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 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Rei Sonobe, Haruyuki Seki, Shogo Kodama, Takuma Okitsu, Yudai Sugimoto, Yoshikazu Kiriwa, Katsumi Suzuki
2. 発表標題 Quantification of chlorophyll content in tomato leaves using a compact spectrometer.
3. 学会等名 International Symposium on Remote Sensing 2021(ISRS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Adenan Yandra Nofrizal, Rei Sonobe, Hiroto Yamashita, Akio Morita, Takashi Ikka
2. 発表標題 Retrieval of Silica Content from Hyperspectral Reflectance.
3. 学会等名 International Symposium on Remote Sensing 2021(ISRS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Adenan Yandra Nofrizal, Rei Sonobe, Hiroto Yamashita, Akio Morita, Takashi Ikka
2. 発表標題 Prediction Chlorophyll Content of Zizania Latifolia Using Hyperspectral data and Machine Learning.
3. 学会等名 The second Intercontinental Geoinformation Days (IGD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園部 礼・山下寛人・三原春美・森田明雄・一家崇志
2. 発表標題 分光反射特性を用いたワサビ葉のクロロフィル/カロテノイド含量比の評価
3. 学会等名 日本写真測量学会令和3年度年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園部礼, 廣野祐平, 大井彩子
2. 発表標題 分光反射指数を用いた被覆茶のカロテノイド含量推定
3. 学会等名 日本写真測量学会令和2年度年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下寛人, 園部礼, 廣野祐平, 森田明雄, 一家崇志
2. 発表標題 機械学習を用いた茶葉の窒素とクロロフィル濃度を推定するハイパースペクトルデータの解剖
3. 学会等名 2020年度日本土壤肥料学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園部礼, 廣野祐平, 大井彩子
2. 発表標題 連続体除去を用いた分光反射特性による被覆茶のクロロフィル含量推定
3. 学会等名 日本写真測量学会令和2年度秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Shirai, Rei Sonobe, Haruyuki Seki, Akiyoshi Tominaga, Kan-ichiro Mochizuki, Genya Saito
2. 発表標題 Estimating chlorophyll content in leaves using UAV-mounted spectroscopic sensor
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rei Sonobe, Haruyuki Seki, Ryohei Kondo, Yudai Sugimoto, Yoshikazu Kiriwa, Katsumi Suzuki
2. 発表標題 Assessment of the PROSPECT-PRO model capabilities using hyperspectral reflectance of melon leaves
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園部礼、廣野祐平、大井彩子
2. 発表標題 放射伝達モデルに基づく被覆茶のクロロフィル含量評価
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 近藤凌平、関晴之、園部礼、齋藤元也、小杉幸夫
2. 発表標題 ミニ分光器を活用したブドウ葉のクロロフィル含量評価
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 白井達也、関晴之、菌部礼、富永晃好、王権、齋藤元也、望月貴一郎
2. 発表標題 UAV搭載ハイパースペクトルセンサを用いたヤーコンのクロロフィル含量測定
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 菌部礼、佐野智人、堀江秀樹
2. 発表標題 KELMによる分光反射特性からの茶葉内光合成色素含量推定
3. 学会等名 日本写真測量学会令和元年度年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菌部礼、王権
2. 発表標題 クロロフィル含量推定を目的とした分光反射指数の評価
3. 学会等名 日本写真測量学会令和元年度年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菌部礼、小林真也、王権
2. 発表標題 iPLSを用いた分光反射特性によるブナの蒸散速度評価
3. 学会等名 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 蘭部 礼	4. 発行年 2021年
2. 出版社 文永堂出版	5. 総ページ数 320
3. 書名 農業気象学入門(鮫島良次編集) 第4章 衛星リモートセンシング	

1. 著者名 蘭部 礼	4. 発行年 2020年
2. 出版社 古今書院	5. 総ページ数 127
3. 書名 山岳科学(松岡 憲知、泉山 茂之、楢本 正明、松本 潔編集) 第10章山岳リモートセンシング	

〔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	廣野 祐平 (Hirono Yuhei) (10391418)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・果樹茶業研究部門・上級研究員 (82111)	

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