

令和元年6月21日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02856

研究課題名（和文）地球観測データ統融合のための高次標準化理論の構築および手法の開発

研究課題名（英文）Toward a theory of higher-order standardization for combinatorial use of earth observation data

研究代表者

吉岡 博貴（Yoshioka, Hiroki）

愛知県立大学・情報科学部・教授

研究者番号：40332944

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地球観測結果のセンサ間相対誤差を引き起こす3つの要因（解像度依存性、角度依存性、波長依存性）について論考した。観測結果から導出される付加価値の高いデータを対象に、そのセンサ間における関係性解明が目的である。課題実施期間の前半では関係性導出に必要な反射率間の関係式に着目し、解析的手法による導出およびその高精度化を実現した。課題後半では、陸域観測結果の代表例として植生指数データを対象に、センサ間関係式の導出および関係性導出に関する理論の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工衛星による地球観測手法は地球全体の環境を長期にわたり把握し、気候変動メカニズムの解明に資する情報を得る手段の1つである。各国研究機関が進めてきた観測プロジェクトは、膨大な量と種類のデータセットの蓄積に繋がった。一方、これらのデータセットは仕様の異なるセンサで観測されたものであり、90年代後半にはデータセット間の連続性および一貫性の重要性が指摘され始めた。本研究の学術的な意義はこれらセンサ仕様差に起因するデータセット間のギャップを埋め蓄積データ全体の精度を高めることに貢献する点にある。観測データの一貫性を高めることは、健全な地球環境の維持に資する取り組みの1つである。

研究成果の概要（英文）：This study discusses three fundamental factors that induce relative errors in data from Earth observation satellites: spatial resolution, observation geometry, and observation wavelength. The study sought to clarify how these factors influence the intersensor relationship of data products at higher processing levels. In the first half of this study, relationships between two reflectances of different wavelengths were derived. In the second half, the derived relationships were refined to relate spectral vegetation indices (VIs) obtained from two distinct satellite sensors. As a result, a set of analytical formulae were obtained that can be used for standardizing VI data between pairs of sensors.

研究分野：自然共生システム

キーワード：リモートセンシング 地球観測 Himawari8 AHI MODIS

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星による地球観測データは環境モニタリングが役立つ様々な局面で活用されてきた。これらのデータは複数の国々がそれぞれの研究機関により計画・実行された結果であり、複数世代にわたる種々のデータセットとして提供されている。90年代後半になると、それらデータセットの統融合化が議論されはじめた。データ統融合の際には、衛星センサの仕様差に起因する相対誤差がデータ全体の精度に影響する。そのため、地球観測データセットを作成するための国際的な枠組みである統合地球観測戦略において、データ全体における一貫性の重要性が指摘された（引用文献1）。2007年からは全球地球観測システム（GEOSS）10年計画が始まり（引用文献2）、センサの仕様差が引き起こす系統誤差低減への関心はさらに高まった（引用文献3）。また、本課題実施当初の2015年は、次世代型の静止気象衛星（GEO: Geosynchronous Equatorial Orbit）Himawari 8号の運用開始時期とも重なり、静止衛星と低軌道を通るこれまでの地球観測衛星（LEO: Low-Earth Orbit）との観測結果の一貫性についての関心が高まった時期でもある。そこで、本研究でもこれまでのLEO衛星間におけるデータ統融合に加え、GEO衛星とLEO衛星間のデータ融合にも役立つ成果を視野に入れながら研究を実施した。

### 2. 研究の目的

本研究ではセンサ間の相互校正時に考慮すべき3つの依存性（解像度依存性、角度依存性、波長依存性）と、それらの相互作用について、解析的アプローチによる解明を試みた。具体的には、観測された輝度や反射率から生成される高次データプロダクトについて、そのセンサ間関係式を導出するという試みである。課題前半では導出のもととなる反射率間関係式について、2つの異なる要因に着目した導出および精度の向上を目指した。後半では、反射率から求められる陸域のデータプロダクトの1つである植生指数に対し、異なるセンサ間関係式の導出を進めた。解像度依存性については超解像度手法の実装および実データによる実験を通して検討を行った。最後に、静止衛星Himawari8/AHI（GEO）とTerra/MODIS（LEO）を対象にした角度依存性と波長依存性の間の相互作用の解明を進め、高次標準化理論の構築に取り組んだ。目的は下記4項目に大別される。

- (1) アイソライン方程式の導出と高精度化および依存性発生メカニズムの解明
- (2) 空間解像度向上手法の実装および数値実験（実データによる検証実験）
- (3) GEO-LEO観測結果の比較（中緯度の森林領域を対象とした検証実験）
- (4) 高次標準化理論の構築（植生指数のセンサ間関係式の導出および要因間相互作用メカニズムの解明）

### 3. 研究の方法

- (1) アイソライン方程式の導出と高精度化および依存性発生メカニズムの解明

高次データプロダクトのセンサ間における関係性を解明するためには、演算結果のもととなる観測結果すなわち反射率スペクトルのバンド間における関係性を明らかにする必要がある。本研究では解析的方法によって2種類の反射率間関係式（土壌と植生の等値線、アイソライン）の導出および高精度化を試みた。

- (2) 空間解像度向上手法の実装および数値実験（実データによる検証実験）

解像度依存性の発生メカニズムを解明するために、パンクロマティック画像を用いたマルチスペクトル画像の解像度向上の手法（パンシャープン手法）を用いた。空間解像度の向上手法は、マルチスペクトル画像の観測波長に依存性を有するため、連続的な観測波長をもつハイパースペクトルデータを用いて解析した。

- (3) GEO-LEO観測結果の比較

GEO衛星とLEO衛星の観測結果を融合する場合、観測幾何条件の異なるデータを融合することになる。その場合、角度依存性と波長依存性が顕著になると予想される。また、解像度依存性を考えると、幾何精度を把握しておく必要がある。そこで、まずはGEO衛星の幾何精度について、中緯度森林地帯を対象とした精度評価の方法を試みた。次に、LEO衛星との比較方法を採用することで、反射率スペクトルにおよぼす影響を明らかにした。具体的には、太陽天頂角の影響や、センサと太陽の相対的な方位角の変化の反射率スペクトルにおよぼす影響について実データを用いた検証方法を採用した。

- (4) 高次標準化理論の構築

上で導出したアイソライン方程式にもとづき、標準的なデータプロダクトの1つである植生指数について、センサ間における関係式を解析的に導出し、放射伝達モデルを用いて導出結果の検証およびセンサ間関係性における誤差要因を解明した。解析方法と数値モデルを用いて、観測波長等の仕様差による関係性の変化メカニズムの解明を試みた。

### 4. 研究成果

- (1) アイソライン方程式の導出と高精度化および依存性発生メカニズムの解明

高次データプロダクトのセンサ間相対誤差低減を考える場合、異なる波長帯で観測された反

射率の関係式（アイソライン方程式）が、相対誤差の低減に対して重要な意味を持つ。そこで本研究では反射率間関係式の高精度化を試みた。

反射率間関係式は2種類（植生アイソライン（図1）、土壌アイソライン（図2））を研究対象に設定し、多重反射効果の考慮および解析的モデルの高度化を行うことで、打ち切り誤差の影響を抑えることに成功した（図3）。図1では、これまでに導出されていた関係式（黒の実線）と比較して、本研究の導出結果（赤の実線）の方が真の反射率スペクトル（○）に近くなっていることから、誤差が低減されていることがわかる。さらに本研究では反射率間関係式の誤差が、実在するセンサの信号対雑音比と同程度まで低減できることを示すとともに、誤差低減メカニズムを解明した（図4）。

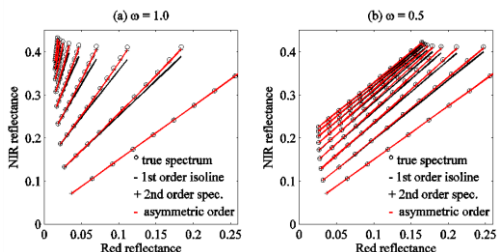


Figure 1 植生アイソラインの高精度化  
(本研究による改善を赤の実線で表示)

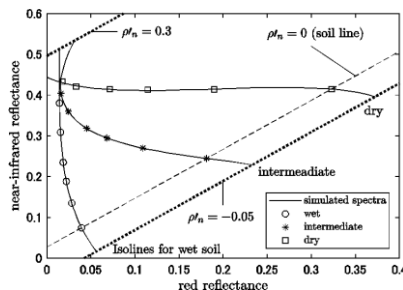


Figure 2 土壌アイソラインの模式図

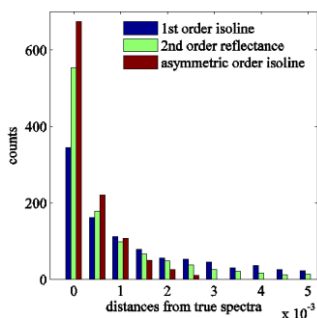


Figure 3 打ち切り項数による誤差低減傾向

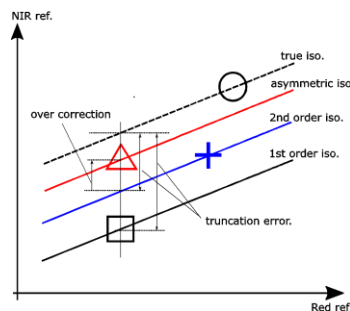


Figure 4 導出結果の誤差低減メカニズム

## (2) 空間解像度向上手法の実装および数値実験

空間解像度については、様々な空間解像度向上手法（図5）を比較評価するため、ハイパースペクトルデータを用いたフレームワークを開発し、複数の空間解像度向上手法の評価を行なった。これにより、異なる解像度のデータを融合させる際に、波長の違いによる融合結果の精度を定量的に評価することが可能となった。

角度依存性を解析するため、静止軌道衛星の1つ「Himawari 8号」の時系列データとカーネル型の二方向性反射モデルを用いて太陽—地球—衛星の位置関係の違いによる反射率の変動をモデル化した。その結果、山地によって複雑な地形を有する日本では、既存の二方向性反射モデルに地形の影響が大きく現れ、モデルの改善の必要性が明らかとなった。特に静止軌道である GEO に対しては、これまでの LEO とは、観測幾何条件が全く異なるため、新たな視点に基づいたモデルが必要であることが示唆された。

本研究がHimawari 8号の運用開始時期と重なっていたことから、日本域データの幾何精度（図6）を向上させる手法を開発した。その結果、縦方向に0.3から0.4画素、横方向に0.9から1.1画素程度であった誤差を、縦方向に0.07画素、横方向に0.15画素程度にまで低減できることを示した（図7）。これにより、続けて実施したHimawari 8号の時系列データを用いた方向性反射の解析において、より高精度な解析を実施することができた。

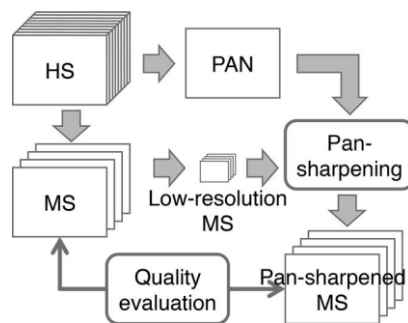


Figure 5 空間解像度向上手法

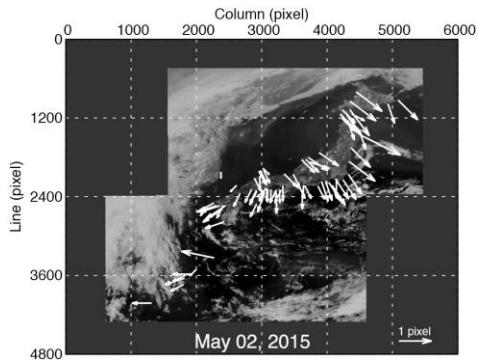


Figure 6 AHI 平面座標の誤差ベクトル

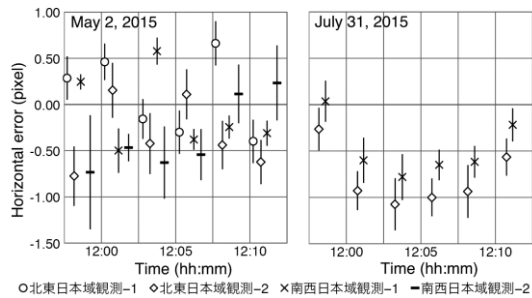


Figure 7 AHI の推定幾何精度と改善結果

(3) GEO-LEO 観測結果の比較

波長応答関数の差（波長依存性）や観測幾何条件の違い（角度依存性）に起因する反射率のセンサ間相対誤差の定量を試みた。次世代型静止衛星Himawari8/AHIと低軌道衛星Terra/MODISを比較対象に選定し、角度・解像度・波長の各要因間の相互作用および分離可能性について説明を進めた。その結果、太陽およびセンサ間の相対方位角に着目すると、ある幾何的条件が成り立つ場合にセンサ間の差が減少することを見出した。また、緑色波長帯（バンド 2）の反射率を時系列で比較し、波長依存性は地表面被覆状態と密接に関係することを明らかにした。

(4) 高次標準化理論の構築

植生指数におけるセンサ間の関係式を導出した。図 8 にアイソライン方程式を用いた導出手順をまとめた。これら導出結果は、アイソライン方程式における複数回の相互作用項（高次項）をどの次数で打ち切るかによってその精度が決まる。図 9 は打ち切り項数と精度の関係を示す数値実験の結果である。次数（X 軸）が高くなるにしたがって本手法による誤差（青の棒グラフ）が低減していることが分かる。

さらに、提案手法の妥当性を評価するために、ハイパースペクトルデータにもとづく数値実験を実施した。その結果からは、ピクセル毎に推定する土壌面の反射率が、植生指数のセンサ間関係を決定する上で有効な指標であるとの知見を得ている（図 10）。

本研究課題の成果はすでに他の研究論文に引用され当該分野の成果として認知されている。その 1 つ植生指数の相互校正に関する Fan らの論文（引用文献 4）では 本研究成果の一部が “Physically Based Method” として紹介されている。

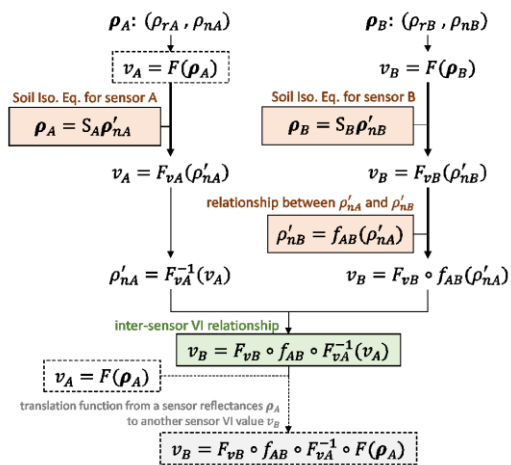


Figure 8 植生指数間関係式の導出手順

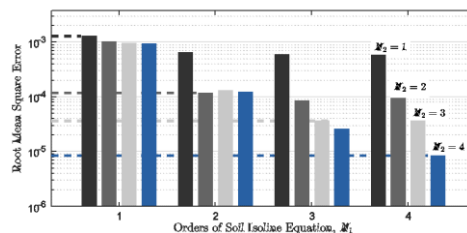


Figure 9 関係式の打ち切り項数と相対誤差

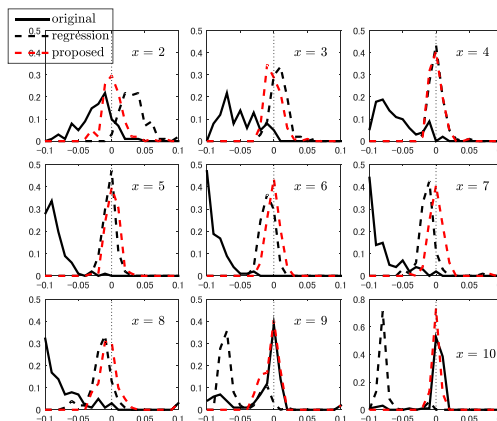


Figure 10 NDVI を対象とした提案手法による相対誤差低減結果

<引用文献>

- ① 辻野照久, 利用ニーズ主導の統合された地球観測システムの構築—エビアン G8 サミットに始まりグレンイーグルズサミットでも言及された「GEOSS」の推進—, 科学技術動向 2005 年 9 月号.
- ② Battrick, B. (Ed.), Global Earth Observation System of Systems GEOSS: 10-year Implementation Plan Reference Document, Ad-Hoc Group on Earth Observations, Final Draft. ESA Publ. Division, 2005.
- ③ Overpeck, J. T., Meehl, G. A., Bony, S., and Easterling, D. R., Climate data challenges in the 21st century. *science*, 331(6018), 2011, pp. 700-702.
- ④ Fan, X., and Liu, Y., Multisensor Normalized Difference Vegetation Index Intercalibration: A Comprehensive Overview of the Causes of and Solutions for Multisensor Differences, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 6(4), 2018, pp. 23-45.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Adachi, Y., Kikuchi, R., Obata, K., & Yoshioka, H. (2019). Relative Azimuthal-Angle Matching (RAM): A Screening Method for GEO-LEO Reflectance Comparison in Middle Latitude Forests. *Remote Sensing*, 11(9), 1095. (査読有)
- ② Miura, M., Obata, K., Taniguchi, K., & Yoshioka, H. (2017). Improved Accuracy of the Asymmetric Second-Order Vegetation Isoline Equation over the RED-NIR Reflectance Space. *Sensors*, 17(3), 450. (査読有)
- ③ Matsuoka, M., Tadono, T., & Yoshioka, H. (2016). Effects of the spectral properties of a panchromatic image on pan-sharpening simulated using hyperspectral data. *International Journal of Image and Data Fusion*, 7(4), 339-359. (査読有)
- ④ Obata, K., Miura, T., Yoshioka, H., Huete, A., & Vargas, M. (2016). Spectral cross-calibration of VIIRS enhanced vegetation index with MODIS: A case study using year-long global data. *Remote Sensing*, 8(1), 34. (査読有)
- ⑤ Obata, K., Taniguchi, K., & Yoshioka, H. (2016). Soil isoline equations in the red-NIR reflectance subspace describe a heterogeneous canopy. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(1), 016013. (査読有)
- ⑥ 松岡真如, 本田理恵, 野々村敦子, 守屋均, 赤塚慎, 吉岡博貴, & 高木方隆. (2016). ひまわり 8 号「日本域」データの幾何精度向上の一手法. *写真測量とリモートセンシング*, 54(6), 280-289. (査読有)
- ⑦ Matsuoka, M., Takagi, M., Akatsuka, S., Honda, R., Nonomura, A., Moriya, H., & Yoshioka, H. (2016). Bidirectional reflectance modeling of the geostationary sensor HIMAWARI-8/AHI using a kernel-driven BRDF model. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 3. (査読有)
- ⑧ Miura, M., Obata, K., & Yoshioka, H. (2015). Vegetation isoline equations with first-and second-order interaction terms for modeling a canopy-soil system of layers in the red and near-infrared reflectance space. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 095987. (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① Taniguchi, K., Adachi, Y., Obata, K., & Yoshioka, H. (2018, July). Influences of Soil Line Parameters on Soil Brightness Estimation with Soil Isoline Equations in Red-Nir Reflectance Subspace. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 8255-8258). IEEE.
- ② Adachi, Y., Kikuchi, R., Matsuoka, M., Ichii, K., & Yoshioka, H. (2018, October). Reflectance comparison between Himawari-8 AHI and Terra MODIS over a forest of Shikoku region. In *Land Surface and Cryosphere Remote Sensing IV* (Vol. 10777, p. 1077715). International Society for Optics and Photonics.
- ③ Obata, K., Tsuchida, S., & Yoshioka, H. (2018, October). Evaluating radiometric calibration of ASTER VNIR band with Terra MODIS, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8 OLI. In *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization V* (Vol. 10781, p. 107810X). International Society for Optics and Photonics.
- ④ Taniguchi, K., Miura, M., Obata, K., & Yoshioka, H. (2017, July). Analysis of the scaling effect present in the relative differences between NDVIs obtained from multiple sensors, based on the soil isoline equation. In *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 3401-3404). IEEE.
- ⑤ Miura, M., Obata, K., Taniguchi, K., & Yoshioka, H. (2017, July). Optimization

technique of asymmetric-order vegetation isoline equations. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 2923-2926). IEEE.

- ⑥ Okuda, K., Taniguchi, K., Miura, M., Obata, K., & Yoshioka, H. (2016, September). Application of vegetation isoline equations for simultaneous retrieval of leaf area index and leaf chlorophyll content using reflectance of red edge band. In Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIII (Vol. 9975, p. 99750C). International Society for Optics and Photonics.
- ⑦ Taniguchi, K., Obata, K., Matsuoka, M., & Yoshioka, H. (2016, September). Soil isoline equation for the range of visible to shortwave infrared in a context of hyperspectral data analysis. In Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIII (Vol. 9975, p. 99750D). International Society for Optics and Photonics.
- ⑧ Taniguchi, K., Obata, K., & Yoshioka, H. (2015, July). Evaluation of bias reduction in cross-calibration of NDVI based on soil isoline equations: Comparison with error estimated from signal-to-noise ratio. In 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 625-628). IEEE.
- ⑨ 菊池瞭汰, 安達勇介, 小畑建太, 吉岡博貴, 中緯度森林地域を対象とした GEO-LEO 反射率間比較における相対方位角の影響に関する研究, 計測自動制御学会 第 44 回リモートセンシングシンポジウム, 2019 年 3 月 7 日.
- ⑩ 谷口健太, 三浦宗徳, 吉岡博貴, 小畑建太, ソイルアイソライン方程式にもとづく植生指数 NDVI の波長依存性に関する研究, 第 42 回リモートセンシングシンポジウム論文集, pp.21-22, 2017 年 3 月 8 日.

[図書] (計 2 件)

- ① Miura, T., Obata, K., Azuma, J. T., Huete, A., & Yoshioka, H. (2018). Inter-and Intrasensor Spectral Compatibility and Calibration of the Enhanced Vegetation Indices. In Remote Sensing Handbook-Three Volume Set (pp. 189-208). CRC Press.
- ② Miura, T., & Yoshioka, H. (2016). Hyperspectral data in long-term, cross-sensor continuity studies. In Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation (pp. 646-669). CRC Press.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：松岡 真如  
ローマ字氏名：(MATSUOKA Masayuki)  
所属研究機関名：高知大学  
部局名：教育研究部自然科学系農学部門  
職名：准教授  
研究者番号：50399325

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：小畑 建太  
ローマ字氏名：(OBATA Kenta)

研究協力者氏名：谷口 健太  
ローマ字氏名：(TANIGUCHI Kenta)

研究協力者氏名：三浦 宗徳  
ローマ字氏名：(MIURA Munenori)

研究協力者氏名：安達 勇介  
ローマ字氏名：(ADACHI Yusuke)

研究協力者氏名：菊池 瞭汰  
ローマ字氏名：(KIKUCHI Ryota)

※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。