

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Multi-Satellite Remote Sensing Techniques For Grassland Biomass Monitoring in Mongolia (マルチ衛星リモートセンシング技術による モンゴルの草原バイオマス監視)
氏 名 (Name)	Margad-Erdene Jargalsaikhan
モンゴルの国土の 71.8%（1 億 1200 万ヘクタール）は草原で覆われており、7100 万頭の家畜を支えることで国家 GDP の 30%を占める牧畜経済に貢献しています。国家報告では、これらの草原の 60%が劣化し、75%が過放牧・気候変動・インフラ開発により砂漠化の影響を受けているとされています。しかし、これらの数値を裏付ける研究に基づいた評価は存在しません。従来のモニタリング手法は定性的な観察と限定的な現地調査に頼っており、効果的な土地管理に必要な精度、空間的カバー、時間的頻度が不足しています。本論文では、高解像度 PlanetScope (3.125m) と低解像度 VIIRS (375m) の画像を統合し、モンゴルの多様な草原における正確かつ拡張可能な週次バイオマスモニタリングを可能にする、新しいマルチ衛星リモートセンシング手法を開発しました。研究は砂漠、乾燥草原、山地草原に焦点を当て、スペクトル調和により衛星データの整合性を確保し、持続可能な管理に資する堅牢なソリューションを提供します。 研究の主な目的は以下の通りです： - PlanetScope 画像を用いたバイオマス推定モデルの開発 - Spectral Band Adjustment Factor (SBAF) によるスペクトル調和を通じてモデルを VIIRS 画像に適応 - 放牧と非放牧草地の比較による放牧影響の評価 - モンゴル全土の草原における大規模な週次バイオスマッピングの実現 研究は、モンゴル科学アカデミー植物園研究所 (BGRI-MAS) および山口大学との協力により選定された代表的な 3 地点で実施されました：ダランジャルガラン郡のオロンオヴォー（砂漠）、トゥメンツォグト郡のルフンブ（乾燥草原）、ムンゴンモリト郡のジャルガラント（山地草原）。これらの地点はモンゴルの草原面積の 83%を代表しています。 2020～2023 年の現地調査では、85 地点（1m²）において標準的な刈り取り・乾燥手法で地上部バイオマスを収集し、ASD FieldSpec による分光反射率データと GPS 位置情報を取得しました。衛星データには、343 枚の PlanetScope 画像、VIIRS SDR データ（表面反射率へ変換済み）、Hyperion EO-1 画像が使用されました。	

PlanetScope の NDVI とフィールドデータを用いた線形回帰モデルにより、砂漠・乾燥・山地草原におけるバイオマス推定モデルを個別に構築し、 R^2 値はそれぞれ 0.65、0.82、0.80、RMSE は 35.28 g/m^2 でした。回帰式 ($y = 309.72x + 8.5032$) は、生態系の違いを反映し、統合モデルよりも高い精度を示しました。

このモデルを VIIRS の解像度に適応させるため、Hyperion データに基づく SBAF を導入し、VIIRS の 600–680nm と PlanetScope の 650–680nm の赤バンドのスペクトル差を調整しました。その結果、赤バンドの反射率差は 6.2%から 4.8%に低下し、375m 解像度の VIIRS データ (P375) によるバイオマス推定が可能になりました。

2020～2024 年のバイオスマッピングにより、PlanetScope の平均バイオマスは、砂漠で 49 g/m^2 、乾燥で 110 g/m^2 、山地で 136 g/m^2 でした。VIIRS はそれぞれ 54 g/m^2 (+10.5%)、 122 g/m^2 (+9.6%)、 134 g/m^2 (-1.9%) と推定し、RMSE は 11.6 g/m^2 、 R^2 は 0.92、平均差は 10.74%でした。特に山地草原での一致が顕著でした。全国平均バイオマスは 71.4 g/m^2 で、2024 年に 78 g/m^2 のピークを記録し、季節変動および地域差を反映しています。

2020～2023 年の時系列分析により、砂漠草原では 62 g/m^2 から 33 g/m^2 にバイオマスが減少し、放牧の影響が顕著であることが示されました（傾き=0.12）。一方、乾燥および山地草原では傾きがそれぞれ 0.06、0.03 と小さく、より安定した傾向を示しました。

本フレームワークの強みは、PlanetScope の空間解像度と VIIRS の時間解像度を統合することで、草原の大規模かつ高頻度のモニタリングを可能にした点にあります。牧畜家の 26%を支える放牧地管理や、草原劣化対策の政策立案にも活用できます。さらに、草原は地球陸域の 38%を占めており、本研究は炭素収支の観測にも貢献します。

NDVI の土壌背景の影響、VIIRS の粗解像度（特に砂漠での 10.5%の誤差）、85 プロットの調査数の制約といった限界もあります。将来的には、高分解能ハイパースペクトルや AIを活用した調和精度の向上、クラウドおよびモバイルアプリによる週次モニタリングプラットフォームの構築、中央アジアの他地域への展開を目指します。

本研究の新規性は、高解像度 PlanetScope モデルを低解像度 VIIRS に適応させる手法を SBAF で実現し、解像度とスペクトルのギャップを克服した点にあります。この手法は拡張性が高く、費用対効果にも優れ、他の半乾燥草原地域にも応用可能であり、持続可能な土地管理のモデルを提供します。モンゴル草原の劣化対策に貢献しつつ、リモートセンシング技術の進展と草原生態系の保全、経済的レジリエンスの向上に寄与します。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Multi-Satellite Remote Sensing Techniques For Grassland Biomass Monitoring in Mongolia (マルチ衛星リモートセンシング技術による モンゴルの草原バイオマス監視)
氏 名 (Name)	Margad-Erdene Jargalsaikhan
Grasslands cover 71.8% of Mongolia’s territory (112 million hectares), supporting 71 million livestock and contributing 30% to the national GDP through pastoral economies. National reports indicate that 60% of these grasslands are degraded, with 75% affected by desertification due to overgrazing, climate change, and infrastructure development. However, there is no specific research-based assessment to verify these estimates. Traditional monitoring methods, which rely on qualitative observations and limited field surveys, lack the precision, spatial coverage, and temporal frequency needed for effective land management. This dissertation addresses these challenges by developing a novel multi-satellite remote sensing framework that integrates high-resolution PlanetScope (3.125 m) and low-resolution Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) (375 m) imagery to enable accurate, scalable, and weekly biomass monitoring across Mongolia’s diverse grasslands. The research focuses on desert, dry steppe, and mountain grasslands, using spectral harmonization to align satellite data, offering a robust solution for sustainable management. The primary objectives are to: (1) Develop a biomass estimation model using PlanetScope imagery. (2) Adapt the model to VIIRS imagery utilizing Spectral Harmonization with Spectral Band Adjustment Factors (SBAFs). (3) Estimate and monitor grazing impacts by comparing grazed and ungrazed grasslands. (4) Enable large-scale, weekly biomass mapping across Mongolian grassland. The study was conducted in three representative sites: Olon-Ovoo Bag (desert, Dalanjargalan Soum), Lkhumbe Bag (dry steppe, Tumentsogt Soum), and Jargalant Bag (mountain, Mungunmorit Soum). These sites, selected in collaboration with Yamaguchi University and the Botanic Garden and Research Institute, Mongolian Academy of Sciences (BGRI-MAS), span Mongolia’s ecological diversity, 83% of Mongolian grassland area.	

The methodology integrates field and satellite data. Field campaigns (2020–2023) collected aboveground dry biomass (ADB) from 85 plots (1 m²) using standardized clipping and drying protocols, alongside surface reflectance (ASD FieldSpec) and geolocation (Garmin Etrex). Satellite data included 343 PlanetScope images (geometrically corrected using ground control points and radiometrically corrected), VIIRS SDR data (converted to surface reflectance), and Hyperion EO-1 imagery for spectral harmonization. Preprocessing made the data more reliable by fixing location errors, converting it to surface reflectance, and adjusting the values for grassland areas.

The biomass estimation model used PlanetScope’s normalized difference vegetation index (NDVI) through linear regression with field data. Separate models for desert, dry, and mountain grasslands yielded R² values of 0.65, 0.82, and 0.80, respectively, with a combined R² of 0.62 and root mean square error (RMSE) of 35.28 g/m². The regression equation, $y = 309.72x + 8.5032$ (y = biomass, x = NDVI), outperformed a combined model, reflecting ecological variability. To extend this to VIIRS’s coarser resolution, SBAFs, derived from Hyperion data, aligned spectral bands (e.g., red: 600–680 nm for PlanetScope vs. 650–680 nm for VIIRS), reducing red-band discrepancies from 6.2% to 4.8%. This enabled the adaptation of the model to harmonized VIIRS data (P375, 375 m resolution), allowing biomass estimation at a national scale.

Biomass mapping revealed ecological insights. PlanetScope estimated mean ADB (2020–2024) as 49 g/m² (desert), 110 g/m² (dry), and 136 g/m² (mountain). Harmonized VIIRS estimates were 54 g/m² (+10.5%), 122 g/m² (+9.6%), and 134 g/m² (–1.9%), with an overall RMSE of 11.6 g/m², R² of 0.92, and mean difference of 10.74%. Bag-level comparisons showed strong agreement, especially in mountain grasslands. Weekly five-year mapping indicated a national mean biomass of 71.4 g/m², peaking at 78 g/m² in 2024, reflecting seasonal and regional trends.

Time-series analysis (2020–2023) quantified grazing impacts. Desert grasslands exhibited severe degradation, with biomass declining from 62 g/m² to 33 g/m² and an increasing grazed–ungrazed gap (trend slope = 0.12), indicating overgrazing. Dry and mountain grasslands were more stable (slopes = 0.06 and 0.03), suggesting resilience. These trends align with national reports of 60% grassland degradation, underscoring the need for targeted management.

The framework’s strengths include combining PlanetScope’s high resolution with VIIRS’s frequent coverage, enabling scalable monitoring across the Mongolian

grassland. It supports Mongolia’s 26% pastoral households by optimizing grazing and informs policies to combat degradation. Globally, it contributes to carbon monitoring, as grasslands cover 38% of the terrestrial land. Limitations include NDVI’s sensitivity to soil background, VIIRS’s coarser resolution (10.5% error in desert), and limited ground surveys (85 plots). Future work will focus on advanced harmonization using alternative hyperspectral sources or AI-driven methods, developing a weekly cloud-based and mobile monitoring platform, and extending the framework to other Central Asian grasslands.

This dissertation’s novelty lies in its pioneering integration of high-resolution PlanetScope and low-resolution VIIRS for grassland biomass, using SBAFs to overcome spectral and resolution disparities. The proposed methodology is scalable, cost-effective, and transferable to other semi-arid grassland regions, offering a blueprint for sustainable land management. By addressing the Mongolian grassland degradation crisis, this research will advance satellite remote sensing technology and support grassland ecosystem sustainability and economic resilience.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Margad-Erdene Jargalsaikhan
審 査 委 員	主 査： 長井 正彦
	副 査： 今井 剛
	副 査： 今岡 啓治
	副 査： 佐村 俊和
	副 査： 坂口 和敏
	副 査： 江口 毅
論 文 題 目	Multi-Satellite Remote Sensing Techniques For Grassland Biomass Monitoring in Mongolia (マルチ衛星リモートセンシング技術によるモンゴルの草原バイオマス監視)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 モンゴルの国土の 71.8% (1 億 1,200 万ヘクタール) は草原で占められており、7,100 万頭の家畜が飼育され、牧畜業が国内総生産 (GDP) の 30%を占めている。モンゴル国自然環境・観光省の報告書によると、これらの草原の 60%は劣化しており、75%は過放牧、気候変動、インフラ開発による砂漠化の影響を受けている。しかし、これらの影響を検証する具体的な観測と、観測に基づく評価研究はなされていない。つまり、定性的な観察と限られた現地調査に頼る従来のモニタリング方法では、広大なモンゴルの草原に対し効果的な土地管理に必要な精度、空間的範囲、時間的頻度が不足している。本研究では、高解像度の PlanetScope (3.125 m) 画像と低解像度の VIIRS (375 m) 画像を統合し、モンゴルの多様な草原全体で正確でスケーラブルな週次バイオマスモニタリングを可能にする新しいマルチ衛星リモートセンシング利用のフレームワークを開発した。この研究は砂漠、乾燥帯、山岳地帯の草原に焦点を当てており、in-situ データ観測による評価データの取得と、複数の衛星データを利用するためのスペクトルデータのハーモナイゼーション処理により衛星データを調整し、持続可能な草原管理のための衛星データ利用手法を開発した。 本論文は 8 章から構成されており、第 1 章では社会的な背景、研究課題と目的、既存研究に対する本研究の位置づけ、論文の全体構成について述べた。 第 2 章では本研究を実施するための研究手法と in-situ データと衛星データ取得手法について述べた。 第 3 章ではモンゴルにおける研究対象地域や現地調査を行う観測サイトについて述べた。 第 4 章では衛星データの取得方法および衛星データの前処理手法について述べた。大気補正や幾何補正の手法や、ハイパースペクトルデータの利用についても紹介した。	

(様式 9 号)

第 5 章では衛星データを利用したバイオマス推定モデルについて述べた。衛星データ利用に関しては、スペクトルデータのハーモナイゼーションを行った。

第 6 章ではバイオマス推定モデルの実装と解析処理について述べた。

第 7 章ではバイオマス推定モデルの解析結果と可視化について述べた。

第 8 章では本研究の結論を総括し、展望を述べた。主な成果は以下の通り。

- 1) マルチ衛星データの利用を可能とし、PlanetScope 画像の詳細観測と VIIRS の広域観測の統合によるモンゴルのバイオマスモニタリングを行った。
- 2) PlanetScope 画像解析を拡張し、VIIRS 画像を利用することで、高精度な週次バイオマスモニタリングを可能とした。
- 3) PlanetScope 画像を利用したモンゴルのバイオマス推定は初めての試みである。
- 4) スペクトルデータのハーモナイゼーションを行うことにより、バイオマス推定モデルの最適化ができた。
- 5) 砂漠草原地帯における放牧は、山岳草原地帯と比較して大きな影響があることが分かった。

公聴会には、29 名の参加があった。公聴会での主な質問は、①ハーモナイゼーションについて、バンド毎に別のモデルを使わずに同じモデルを使った理由について、②スペクトルの高い箇所ではハーモナイゼーションが上手くいっていない理由について、③本研究の成果の主となるユーザは誰で、社会実装においてはどんな役に立つのかについて、④最適な時間分解能と地上分解能について、⑤VIIRS 衛星データ解析結果は信頼できる精度であるかどうかについて、であり、活発な質疑応答が行われ、いずれの質問に対しても発表者からは適切な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する回答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 計 3 編）

- 1) Margad-Erdene Jargalsaikhan, Dorj Ichikawa, Masahiko Nagai, Tuvshintogtokh Indree, Vaibhav Katiyar, Davaagerel Munkhtur, Erdenebaatar Dashdondog, Aboveground Biomass Estimation and Time Series Analyses in Mongolian Grasslands Utilizing PlanetScope Imagery, Remote Sensing (MDPI), 16(5), 869, February 2024.
- 2) Margad-Erdene Jargalsaikhan, Dorj Ichikawa, Masahiko Nagai, Tuvshintogtokh Indree and Vaibhav Katiyar, Analyzing Grazing-Induced Changes in Mongolian Grasslands using PlanetScope Imagery, IGARSS 2024, IEEE, 2024, pp. 3127 – 3131, September 2024.
- 3) Margad-Erdene Jargalsaikhan, Masahiko Nagai, Begzsuren Tumendemberel, Erdenebaatar Dashdondog, Vaibhav Katiyar, and Dorj Ichikawa, Adapting the High-Resolution PlanetScope Biomass Model to Low-Resolution VIIRS Imagery Using Spectral Harmonization: A Case of Grassland Monitoring in Mongolia, Remote Sensing (MDPI), 17(8), 1428, April 2025.