

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Estimation of Internal Solitary Waves Parameters and Effects of Long-term Variations using Satellite Data in the Indonesian Seas (インドネシア海域における衛星データを用いた内部波の推定とその長期変動の影響について)
氏名(Name)	チョナニア
<p>本論文は、インドネシア海域、特にロンボク海峡における海洋内部波（Internal Solitary Waves: ISWs）の長期的な変動、空間的分布、及び気候変動との関連性を、リモートセンシングデータを用いて包括的に研究を行ったものである。ISWsは、海洋内部で発生する非線形波であり、海洋混合、栄養塩輸送、堆積物の再分布などに重要な役割を果たしている。従来、ISWsは主に海中の現象と考えられてきたが、内部波が海面の粗さ、海面温度（SST）、光学特性に影響を与えることで衛星データから検出可能である。第一の研究では、可視域衛星データであるGCOM-C衛星のSGLIセンサーを用いて、ISWsが光学画像上で交互に明暗の帯として現れることを明らかにした。これは、海面粗さの変化が太陽光の反射に影響を与えるため、大気上端放射、海色、海面温度など複数のスペクトルに一貫して現れており、ISWsが海面上層の熱力学や大気海洋間のエネルギー交換にも影響を与えていることを示している。ISWsは、海表面に影響を及ぼさないという従来の前提から、大規模な気候解析や生物地球化学的分析においてもISWsの影響を考慮する必要性が示された。第二の研究として、合成開口レーダー（SAR）、Sentinel-1の画像を用いて、9年間にわたるISWの伝播特性と長期変動の定量化と海面粗度から、季節・年次を通じた安定的なISWの検出が可能となった。又、潮汐モデルとの統合により、ISWsの伝播速度と発生頻度を推定し、インド洋ダイポールモード（TOD）との正の相関（$r=0.365$）、エルニーニョ・南方振動（ENSO）との負の相関（$r=-0.30$）が示された。これらの結果は、気候変動が海洋成層構造や躍層の深さがISW生成に影響を与えることを示している。また、スペクトル解析の結果から、約12ヶ月と54ヶ月の周期的変動が確認され、季節的及び気候的要因がISW活動に寄与していることが明らかになった。第三の研究として、Sentinel-1、GCOM-C/SGLI、及び、Terra/MODISの光学・レーダー観測を統合することで、季節間のISWs特性の違いを詳細に解析し、北西モンスーン期にはISWsの発生頻度が高く、1つの波群に複数のソリトンが含まれることが多くなり、一方、南東モンスーン期には、より長い波長、遅い位相速度、2波構造の波群が多く観測された。ケーディーブイ（KdV）方程式による理論計算と衛星観測に基づく推定では、北西モンスーン期における伝播速度が速いことが示され、これは浅い躍層と強い密度勾配によるものであることが分かった。また、同時期にはクロロフィルa濃度と濁度が増加し、ISWsによる混合や堆積懸濁物が表層の生物地球化学に影響を与えている可能性が示唆された。</p> <p>本研究の独自性は、複数の衛星データ（光学・熱赤外・レーダー）を長期間にわたり解析と統合により、ISWsの検出、定量化、変動解析を実施した点にあり、ISWsが大気海洋結合系の大きな構成要素として捉える新たな視点を提供しISWsの影響を考慮する必要性を提唱し、インドネシア海域、特にロンボク海峡におけるISWsの力学的特性、季節的・気候的変動への応答性を明らかにした。又、本研究は、今後のAIやデータ駆動型モデリングを用いたISWsの検出・予測精度の向上に向けた基盤を築く研究成果であり、内部波と気候の相互作用に関する海洋リモートセンシングの重要な貢献を示した。</p>	

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Estimation of Internal Solitary Waves Parameters and Effects of Long-term Variations using Satellite Data in the Indonesian Seas (インドネシア海域における衛星データを用いた内部波の推定とその長期変動の影響について)
氏名(Name)	CHONNANIYAH
<p>Internal Solitary Waves (ISWs) are nonlinear internal wave phenomena that propagate within the ocean interior and play a critical role in ocean mixing, nutrient transport, and sediment redistribution. Although they exist primarily below the sea surface, ISWs can significantly influence upper-ocean conditions by modulating surface roughness, temperature, and optical properties. These surface expressions enable their detection using satellite remote sensing. The Indonesian Seas, characterized by strong tidal forcing, complex bathymetry, and pronounced monsoonal variability, represent one of the most active regions globally for ISW generation. Despite their frequent occurrence and large amplitudes, the long-term variability, spatial distribution, and connections between ISWs and large-scale climate oscillations in this region remain insufficiently characterized. This dissertation addresses these gaps through an integrated multi-satellite remote sensing framework to detect, characterize, and quantify ISW properties, with the Lombok Strait as a focal region of intense activity. The originality of this study is based on the integration of optical, thermal, and radar satellite observations spanning nearly a decade to examine ISW surface expressions, propagation characteristics, and seasonal to interannual variability. This long-term, multi-sensor approach provides the first comprehensive assessment of ISW dynamics in the Indonesian Seas and advances understanding of their behavior in a complex tropical environment.</p> <p>The study first investigates how ISWs manifest at the sea surface and become observable in optical satellite imagery. Using data from the Global Change Observation Mission–Climate (GCOM-C) Second-generation Global Imager (SGLI), ISWs are shown to appear as quasi-linear, alternating bright and dark bands resulting from modulations of surface roughness that affect sunlight reflection. Consistent ISW signatures are identified across multiple spectral products, including top-of-atmosphere radiance, ocean color, and sea surface temperature (SST). This consistency demonstrates that ISWs exert a measurable influence on both optical and thermal satellite-derived parameters. These findings challenge the traditional assumption that internal waves are purely subsurface processes with negligible surface impact. Instead, they demonstrate that ISWs influence upper-ocean thermodynamics and air–sea energy exchange. Consequently, this study underscores the importance of accounting for ISW-related anomalies in ocean color and SST datasets to prevent misinterpretation in large-scale climatological and biogeochemical analyses, particularly in regions of strong internal wave activity.</p> <p>Building on the characterization of ISW surface manifestations, the dissertation quantifies their</p>	

propagation characteristics and long-term variability using a nine-year archive of Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) imagery. The all-weather capability and sensitivity of SAR to surface roughness enable consistent monitoring of ISWs across seasons and years. By integrating SAR detections with tidal model outputs, ISW propagation speeds and occurrence frequencies are estimated. Statistical analyses reveal a moderate positive correlation between ISW activity and the Indian Ocean Dipole (IOD) ($r = 0.365$) and a moderate negative correlation with the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) ($r = -0.30$). These relationships indicate that large-scale climate oscillations modulate ISW generation through variations in ocean stratification and thermocline depth. Spectral analysis further identifies dominant variability at approximately 12- and 54-month periods, corresponding to monsoonal and interannual climate variability, respectively. This provides the first long-term observational evidence that ISW dynamics in the Lombok Strait are influenced by both regional monsoon systems and global climate modes.

To further resolve seasonal contrasts, this study integrates radar and optical observations from Sentinel-1, GCOM-C/SGLI, and Terra/MODIS satellites. Results show that ISWs occur more frequently during the northwest monsoon, often forming multiple solitons within a single wave packet, reflecting enhanced generation under stronger stratification and intensified tidal forcing. During the southeast monsoon, ISWs exhibit longer wavelengths, slower phase speeds, and a higher frequency of double-wave packets. Phase speed estimates derived from satellite observations and theoretical calculations based on the Korteweg–de Vries (KdV) equation consistently indicate faster propagation during the northwest monsoon. This seasonal acceleration is associated with a shallower thermocline and stronger density gradients. Concurrently, optical satellite observations reveal higher chlorophyll-a concentrations and increased turbidity during this season, suggesting that ISW-driven mixing and sediment resuspension significantly modulate surface biogeochemical conditions.

Collectively, these results provide a comprehensive understanding of ISW manifestation, propagation, and variability across multiple spatial and temporal scales. The novelty of this dissertation lies not only in its methodological integration of multiple satellite platforms but also in its conceptual contribution to viewing ISWs as dynamic components of the coupled ocean–atmosphere system. The study provides empirical evidence that ISWs influence satellite-derived environmental parameters, emphasizing the need to consider internal wave effects in ocean color and SST climatology. In summary, this dissertation advances understanding of ISW dynamics in the Indonesian Seas by demonstrating their detectability, quantifiable characteristics, and responsiveness to seasonal and climatic drivers. It highlights the Lombok Strait as a critical region for investigating interactions between internal waves and large-scale ocean–climate processes. The integration of multi-sensor satellite observations and long-term datasets also establishes a foundation for future studies using artificial intelligence and data-driven modeling to improve the detection, characterization, and prediction of ISWs. Through its multidisciplinary approach, this research makes a substantial contribution to the field of ocean remote sensing, particularly in the study of internal wave–climate interactions.

(様式 14 号)

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Chonnaniyah
審査委員	主 査：大澤 高浩
	副 査：望月 信介
	副 査：朝位 孝二
	副 査：今岡 啓治
	副 査：新銀 秀徳
論文題目	Estimation of Internal Solitary Waves Parameters and Effects of Long-term Variations using Satellite Data in the Indonesian Seas (インドネシア海域における衛星データを用いた内部波の推定とその長期変動の影響について)
<p>【論文審査の結果及び試験，試問の結果】</p> <p>本研究は、インドネシア海域、特にロンボク海峡における内部波 (Internal Solitary Waves: ISWs) の発生・伝播特性および長期変動を解明することを目的とする。内部波は、海洋内部密度界面に沿って伝播し、鉛直混合、エネルギー輸送、生物地球化学的物質輸送に重要な役割を果たす。しかし、全球的に最も力学的に複雑な海洋ゲートウェイの一つであるインドネシア群島域における時空間変動特性は、未だ十分に理解されていない。本研究では、複数の衛星リモートセンシングデータ、長期時系列解析、数値モデルを統合し、ISWs の定量的パラメータ推定及び環境・気候要因による変動要因解析を行った。</p> <p>具体的には、Sentinel-1 SAR、GCOM-C/SGLI、MODIS、Landsat-8、Himawari-8 等の衛星データを用いて、ISWs 表層シグナルの抽出、伝播速度・方向、波峰長、ソリトン数等を算出し、さらに成層構造、潮汐、インドネシア通過流 (ITF) のデータ及び数値シミュレーションと併用を行った。</p> <p>まず、GCOM-C/SGLI 画像より、光学センサによる内部波表層粗度構造の観測可能性を示した。次に、長期の Sentinel-1 SAR データ系列を用いて、ロンボク海峡における ISWs 発生頻度・伝播速度の季節変動および経年変動を明らかにした。続いて、複数の衛星観測に基づき、モンスーン季節風に伴う成層変化、ITF の強度、インド洋ダイポール (IOD) およびエルニーニョ・南方振動 (ENSO) などの大規模気候変動による内部波変動特性を評価した。</p> <p>結果として、ロンボク海峡における内部波は、主に潮汐と複雑地形の相互作用 (特に海底鞍部) により励起され、ITF の変動により強く影響されることが示された。また、季節的モンスーン循環は、成層深度と流速を変化させ、内部波の振幅・頻度・伝播方向に顕著な違いをもたらし、経年変動は、これらの変動を増幅または抑制し、インド太平洋間の気候変動に影響をすることが示された。</p>	

(様式 14 号)

本研究の科学的貢献は以下の 3 点である。

1. インドネシア海域における長期の複合的な衛星データによる内部波観測記録の構築
2. SAR および光学画像を用いた海洋内部波抽出・パラメータ推定手法の開発
3. 内部波ダイナミクスと ITF・モンスーン変動の結合に関する新たな知見の提示

本論文で構築した解析の枠組みとデータセットは、衛星観測、数値モデル、人工知能の統合による熱帯海域の内部波研究の高度化に貢献するものである。公聴会においても、発表者自身が現段階で明確な研究結果や考察を有するかどうかを明らかにした上で、適切な回答がなされたと考える。

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（学術）の論文に十分値するものと判断した。

試験および試問として、3 名の副査から以下の内容の課題が課された。1. 気象における波動（大気重力波）と研究対象とした海洋における内部重力波について、それぞれの特性と発生機構および影響を、共通点と相違点に注意して解説すること。2. SGLI プロダクト中の ISW パターンの有無とその理由に関する再整理。3. 一次元 Korteweg-de Vries (KdV) 方程式を導出し、その孤立解を求めよ。これらの試問に対し、丁寧なレポート形式での解答がなされ、また口頭試問に対しても満足のいく回答がなされた。さらに、語学については著者単名の英文論文が発表されており、その内容から判断して、十分な外国語能力を有するものと判断された。また、論文内容および審査会、公聴会での試問応答など総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主な関係論文の発表状況は下記の通りである。

- 1) Chonnaniyah, Takahiro Osawa, Abd Rahman As-Syakur, I Wayan Gede Astawa Karang, and Jose C.B. da Silva, On the distinction of seasonal internal solitary waves characteristics in the Lombok Strait based on multi-satellite data
International Journal of Remote Sensing Vol. 45, Issue 23, Pages 8742–8757, August 2023
- 2) Chonnaniyah, Eko Siswanto, Abd. Rahman As-Syakur, and Takahiro Osawa, Surface manifestation characteristics of internal solitary waves observed by GCOM-C/SGLI imagery Journal of Sea Research Volume 202 (102541) ,Pages 1-12, September 2024
- 3) Chonnaniyah, Abd Rahman As-Syakur, I Made Dharma Raharja, and Takahiro Osawa, Estimation of Internal Solitary Waves Propagation Speeds and Occurrence Using Long-term Sentinel-1 SAR Data in the Lombok Strait, Indonesia
IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing Vol. 18, Pages 13770 –13777, May 2025