

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目

(Dissertation Title)

SPATIAL ANALYSIS OF COASTLINE CHANGE AND VULNERABILITY
ASSESSMENT TO ENHANCED SEA LEVEL RISE

(海岸線変化の空間分析と海面上昇に対する脆弱性評価に関する研究)

氏 名(Name)

AMANDANGI WAHYUNING HASTUTI

Climate change, with its associated rising sea level and possible increases in the frequency and/or intensity of storms and changes in wave climate, can be expected to significantly increase the risk of coastal erosion and flooding in most coastal locations, especially in low-lying areas. Bali Province is a well-known tourist destination dependent on sun-and-beach recreation activities. However, about 86 km or 20% of the length of the existing beaches has been eroded, and environmental degradation has occurred due to natural factors and human activities. As a natural coastal defense system, beaches are important in reducing coastal erosion risks. Thus, their retreat and eventual disappearance increase their vulnerability to hazardous events. In addition, beach narrowing threatens beach environmental services critical to tourist destinations' economy since recreational activities depend on the beach backshore. Considering the threat of sea-level rise in coastal areas and on small islands, it is necessary to conduct a study to determine the degree of vulnerability experienced by a coast since measuring vulnerability is a fundamental phase towards effective risk reduction.

Therefore, the main finding of this study is to investigate and assess the vulnerability of the Bali Province coast to the effect of rising sea levels through remote sensing and Geographic Information System (GIS) technology, considering the geological and physical characteristics of coastal processes. Remote sensing is the science and art of obtaining information about an object on the Earth's surface through analyzing data acquired without directly contacting the object. Considering its low cost and extensive coverage, this advanced technology is frequently used in environmental and natural resources monitoring. The combination of remote sensing and GIS technology will provide valuable spatial information to evaluate environmental changes and has proved its effectiveness in providing accurate information for monitoring coastal areas.

Assessing coastal vulnerability is one of the methods generally used to measure the degree of coastal vulnerability. This study considered six parameters in creating the Coastal Vulnerability Index (CVI): geomorphology, shoreline change rate, coastal elevation, sea-level change rate, tidal range, and significant wave height. The study revealed that about 138 km (22%) of the mapped shoreline is classified as very high vulnerability, and 164 km (26%) of the shoreline is highly vulnerable. Of the remaining shoreline, 168 km (26%) and 169 km (26%) are moderately vulnerable categories and low vulnerable categories, respectively. The data analysis found that the

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

geological variables, which are geomorphology, shoreline change, elevation, and significant wave height, are the major factors that determine the risk level of coastal vulnerability since the physical variables (sea-level change rate and tidal range) were given the same risk level along the coast. Moreover, it is verified that the method applied agrees well with the Kappa coefficient value of 0.80.

Additionally, the rise in sea level-induced intensification of coastal floods is a serious threat to Bali's coastal areas near the ocean. Although severe flood events are rare, they can entail enormous damage costs, especially when built-up areas and/or agricultural fields are inundated. To address the gap and analyze the regional impacts of climate change and sea level rise on the coastal areas of Bali Province, we simulated coastal inundation due to rising sea levels in multiple scenarios of projected sea level height in 2025, 2030, 2070, and 2100. This assessment aims to identify the area submergence in different sea level scenarios based on the derived annual SLR rates and estimate the potential impacts of coastal inundation on land use. At the current rising rate, 7077.42 ha of Bali Province will be below the water level in 2100.

As one of the main parameters to determine coastal vulnerability, shoreline change must be monitored continuously to understand how the sediment moves in a coastal compartment. This study also presents an application of satellite remote sensing techniques to detect and analyze the dynamic changes in shoreline position. This study uses high-resolution PlanetScope imagery data. Multitemporal shorelines were extracted using the Normalized Difference Water Index (NDWI) to delineate seawater from distinct land-cover types. The end point rate (EPR) model was then used to statistically quantify the shoreline change rates. The results revealed variations in the positions of the shorelines over the duration of the study, with rapid erosion emerging as a major concern in Bali Province, primarily driven by human activities and/or coastal hydrodynamics. During the study period, the shoreline in Bali Province decreased from 668.64 km to 662.59 km at an average rate of -1.21 m/yr due to continuous erosion, with the most significant retreat occurring at Klungkung Regency. The method applied has been verified with an overall accuracy of 78.38%.

Addressing the issues provided by shoreline changes is essential to protecting the coastal ecosystem, supporting economic growth, and preserving the cultural significance of the region for future generations. Moreover, a comprehensive analysis of studies on sea level rise, including a detailed assessment of the cost and benefit associated with potential adaptations and mitigation, should be undertaken to evaluate the possible actions for coastal protection strategies.

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	SPATIAL ANALYSIS OF COASTLINE CHANGE AND VULNERABILITY ASSESSMENT TO ENHANCED SEA LEVEL RISE (海岸線変化の空間分析と海面上昇に対する脆弱性評価に関する研究)
氏 名(Name)	AMANDANGI WAHYUNING HASTUTI

気候変動は、それに伴う海面上昇、暴風雨の頻度や強度の増加、波候の変化の可能性を伴い、多くの沿岸地域において、海岸浸食や洪水リスクを著しく増大させることが予想されている。インドネシアのバリ州は、経済のほとんどを観光業に依存している世界的リゾート地である。一方で、バリ州全体の海岸線の20%にあたる約86kmで沿岸浸食が発生し、自然要因や人間活動によって環境の悪化が起きている。自然の海岸防御システムにおいて、砂浜は海岸浸食のリスクを軽減する上で重要な役割を果たしているが、海岸線の後退と消滅は、災害等のリスクに対する脆弱性を増大させる。さらに、リゾート地としての浜辺の役割は大きく、浜辺の狭小化は、観光地の経済にとって大きな問題となる。沿岸地域や小島における海面上昇の脅威に対する脆弱性の評価は、効果的なリスク軽減に向けた基本的な政策策定の段階であるため、沿岸域の脆弱性の程度を決定するための研究を実施することは大きな意義がある。

本研究の目的は、リモートセンシングと地理情報システム(GIS)技術を用い、沿岸プロセスの地質学的・物理学的特性を考慮し、海面上昇の影響に対するバリ州沿岸の脆弱性を調査・評価することである。リモートセンシングとは、地球表面の対象物に直接触れることなく、取得したデータを分析することによって、その対象物に関する情報を得ることができる技術である。低コストで広範囲をカバーできることから、この先端技術は環境や天然資源のモニタリングに頻繁に利用されている。リモートセンシングとGIS技術の組み合わせは、生態系の変化を評価するための重要な空間情報を提供し、沿岸地域のモニタリングに正確な情報を提供する上で有効である。

沿岸の脆弱性の評価は、沿岸の脆弱性の程度を測定するために一般的に用いられている方法の一つである。本研究では、「沿岸脆弱性指数(CVI)」を作成するにあたり、地形、海岸線の変化率、沿岸の標高、海面水位の変化率、潮差、有義波高の6つのパラメータを考慮した。調査の結果、バリ州の海岸線のうち約138km(22%)が非常に高い脆弱性に分類され、164km(26%)が高い脆弱性に分類された。残りの海岸線のうち、168km(26%)と169km(26%)は、それぞれ中程度と低い脆弱性のカテゴリーである。データ分析の結果、物理的変数(海面水位の変化率と潮差)が海岸に沿って同じリスクレベルを与えられていることから、地形、海岸線の変化、標高、有義波高である地質学的変数が、海岸の脆弱性のリスクレベルを決定する主要な要因であることがわかった。さらに、カップ係数が0.80であり、適用した手法がよく一致することが確認された。

海面上昇による沿岸洪水の激化は、海に近接するバリ州の沿岸地域にとって深刻な脅

威である。深刻な洪水が発生することはまれであるが、特に市街地や農地が浸水した場合、莫大な損害が発生する可能性がある。気候変動と海面上昇がバリ州の沿岸地域に及ぼす地域的影響を分析するために、2025 年、2030 年、2070 年、2100 年の海面高さの予測に関する複数のシナリオで、海面上昇による沿岸浸水のシミュレーションを行った。この評価の目的は、導き出された年間海面上昇率に基づき、異なる海面シナリオにおける浸水面積を特定し、沿岸浸水が土地利用に及ぼす潜在的な影響を推定することである。現在の上昇率がそのまま推移すると、2100 年にはバリ州の 7077.42ha が水面下に沈むことになる。

さらに本研究では、衛星画像から海岸線の位置の動的な変化を分析した。高解像度の PlanetScope 画像データを使用し、正規化水指数 (NDWI) から多時期の海岸線を抽出し、異なる土地被覆タイプから海域を分類した。次に、エンドポイントレート (EPR) モデルを用いて、海岸線の変化率を統計的に定量化した。その結果、調査期間中の海岸線の位置の変動が明らかになり、バリ州では、主に人間活動や沿岸流体力学に起因する急速な浸食が主要な懸念事項として浮上した。調査期間中、バリ州の海岸線は 668.64km から 662.59km に減少し、継続的な浸食により平均-1.21m/年の速度で、最も顕著な後退はクルンクン県で発生した。適用された方法は、78.38%の全体的な精度で検証された。

海岸線の変化によってもたらされる問題に対処することは、沿岸生態系を保護し、経済成長を支え、地域の文化的意義を将来の世代に残すために不可欠である。さらに、可能性のある適応策と緩和策に関連する費用と便益の詳細な評価を含む、海面上昇に関する包括的な分析を行い、沿岸保護戦略のために必要な行動に着手するべきである。

(様式 9 号)

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	AMANDANGI WAHYUNING HASTUTI
審査委員	主 査： 長井 正彦
	副 査： 今井 剛
	副 査： 朝位 孝二
	副 査： 大澤 高浩
	副 査： 佐村 俊和
論文題目	SPATIAL ANALYSIS OF COASTLINE CHANGE AND VULNERABILITY ASSESSMENT TO ENHANCED SEA LEVEL RISE (海岸線変化の空間分析と海面上昇に対する脆弱性評価に関する研究)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>気候変動やそれに伴う海面上昇等により、多くの沿岸地域においてリスクが著しく増大しており、年々変化するリスクを時系列で把握することは、被害の軽減や緊急対応・復旧にとって非常に重要である。本研究では、リモートセンシングと地理情報システム (GIS) 技術を用い、沿岸域の地質学的・物理学的特性を考慮し、海面上昇の影響に対するバリ州沿岸の脆弱性を調査・評価することを研究の目的とした。特に、インドネシア等の海洋国は、非常に長い海岸線を有しており、低コストで広範囲を観測し、沿岸の脆弱性の程度を評価するための手法が求められている。高解像度の PlanetScope 画像を使用し、正規化水指数 (NDWI) から多時期の海岸線を抽出した。異なる土地被覆タイプの境界線を検出することで海岸線の位置の動的な変化を分析した。沿岸脆弱性指数 (CVI) を求めるにあたっては、地形、海岸線の変化率、沿岸の標高、海面水位の変化率、潮差、有義波高の 6 つのパラメータを利用した。本研究の結果、バリ州の海岸線のうち約 138km (22%) が非常に高い脆弱性に分類され、164km (26%) が高い脆弱性に分類された。</p> <p>本論文は 7 章から構成されており、1 章では社会的な背景、研究課題と目的、論文の全体構成について述べた。</p> <p>第 2 章では本研究の基礎となる沿岸地域のリスクの考え方や沿岸域の脆弱性の評価手法等に関する既存技術について述べた。</p> <p>第 3 章では、時系列の衛星データを用いた海岸線の検出手法について述べた。PlanetScope 画像を使用し、正規化水指数 (NDWI) からバリ島全域の多時期の海岸線を抽出した。</p> <p>第 4 章では、沿岸地域における洪水のリスクについて述べた。地球温暖化に伴う海面上昇のリスクについて評価した。</p> <p>第 5 章では、バリ島における沿岸域の脆弱性について述べた。地形、海岸線の変化率、沿岸の標高、海面水位の変化率、潮差、有義波高の 6 つのパラメータを構築し、沿岸脆弱性指数 (CVI) の空間解析を行った。</p> <p>第 6 章では、海岸線検出や脆弱性マップの精度評価を行い、バリ島の海岸線の脆弱性マップを構築した。</p> <p>第 7 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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 高頻度の観測が可能な PlanetScope 画像を用い、正規化水指数 (NDWI) から海岸線を抽出した。 2) Sentinel-1 画像を用いることで、長期間の海岸線の変化検出を行った。 	

(様式 9 号)

- 3) 沿岸脆弱性指数 (CVI) に必要なパラメータを多角的に検証し、地形、海岸線の変化率、沿岸の標高、海面水位の変化率、潮差、有義波高の 6 つのパラメータを決定した。
- 4) バリ州の海岸線の脆弱性評価を行い、約 138km (22%) を非常に高い脆弱性に分類し、164km (26%) を高い脆弱性に分類した。
- 5) 最終成果としてバリ島の沿岸域全域の脆弱性マップを構築した。

公聴会には、38 名の参加があった。公聴会での主な質問は、①脆弱性評価における人工構造物の影響と評価方法について、②CVI に必要なパラメータについて重み付けの必要があるかについて、③パラメータをどの様にして 5 つのカテゴリーに分類したかについて、④衛星データによる海岸線の検出と Tide Gauge データの関係について、⑤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、⑥CVI からどの様にして脆弱性マップを構築したのかについて、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) Amandangi Wahyuning Hastuti, Masahiko Nagai, and Komang Iwan Suniada, Coastal Vulnerability Assessment of Bali Province, Indonesia Using Remote Sensing and GIS Approaches, *Remote Sens.* 2022, 14(17), 4490; <https://doi.org/10.3390/rs14174409>
- 2) A W Hastuti, K I Suniada, and M Nagai, Detection of Coastline Changes using Multi-Temporal Satellite Images: A case study of Gianyar and Klungkung Regency, Bali, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ Sci.* 1095 (2022) 102003 DOI: 10.1088/1755-1315/1095/1/012003
- 3) Amandangi Wahyuning HASTUTI, Masahiko NAGAI, and Komang Iwan SUNIADA, Coastline Change Detection Based on Sentinel-2 Imagery Data in Jembrana, *Journal of Evolving Space Activities*, Vol. 1, Article No. 23, 2023 DOI: 10.57350/jesa.23