

熱帯泥炭地海岸における限界崩壊距離の推定

香川 拓輝¹⁾・小田 辰海²⁾・山本 浩一¹⁾・
Muhamad YUSA³⁾・神山 惇⁴⁾・鈴木 素之¹⁾

¹⁾山口大学大学院創成科学研究科

²⁾山口大学工学部社会建設工学科

³⁾リアウ大学工学部

⁴⁾宮崎大学工学教育研究部土木環境工学プログラム

1. はじめに

泥炭地崩壊は、イングランド北部やアイルランドの北方泥炭地で16世紀以降に多く報告されてきた泥炭地での地すべり現象である¹⁾。熱帯泥炭地ではあまり報告例²⁾がなかったものの、熱帯泥炭地のインドネシア国ブンカリス島北部海岸で頻発している。ブンカリス島での泥炭地崩壊の被災状況は深刻化しており、地元メディアは、2021年12月30日にはSesai Panjang海岸での被災を取り上げた³⁾。インドネシア国ブンカリス島北部海岸は海岸侵食を伴い泥炭地崩壊が発生している。海岸侵食によって泥炭地の崖が形成されている。

インドネシア国ブンカリス島北部海岸の泥炭地崩壊の深刻化に伴って、対策と同時にハザードマップの作成が急務である。本研究では、海岸からの累積の地盤安全率が1.0, 1.3, 1.5を下回る海岸からの距離を推定し、この距離を限界崩壊距離と定義した。ブンカリス島北部海岸を対象として、泥炭地崩壊を伴った海岸侵食を考慮した現地の海岸地形の進展に適応したハザードマップの作成のために、ブンカリス島北部海岸における限界崩壊距離を推定することを研究目的とした。

2. 研究方法

2.1. 衛星画像 (DEMNAS・Landsat data)

泥炭地盤断面の地盤高は、インドネシア国家数値標高モデル (DEMNAS: National Digital Elevation Model in Indonesia) を使用した。DEMNASの空間分解能は0.27秒角で、ジオイドモデルの鉛直データをもとに補正されている。DEMNASは、IFSAR (分解能5m), TERRASAR-X (分解能5m), ALOS PALSAR (分解能11.25m) の標高データを統合したものである。海岸線上の100m間隔の位置の海岸に対して法線方向の測線を作成し、法線のDEMNASの標高をGIS上で取得した。DEMNASの元データには、植生の影響が考えられたため、植生の影響を除去した⁴⁾。

1988年から2013年間に撮影されたLandsat5の衛星画像を使用して海岸侵食速度を算出した。Landsat5は解像度30mである。GIS上で1988年と2013年の画像の海岸線を100m間隔でプロットし、海岸に対して岸沖方向に進行する海岸侵食距離を計測し、年単位の撮影期間で除すことで海岸侵食速度とした。また、海岸の方位角と海岸侵食速度を一般化した。

Google Earth Engine (GEE) 上で、Landsat8の全バンドを使用して機械学習 (SVM) で2014年から2024年までの崩壊域を特定した。Landsat8の解像度も30mである。

2.2. アブラヤシの形態・バイオメトリクス調査

2024年8月31日、9月1日にブンカリス島北西部のMeskom村、9月4日にMeskom村の東部に位置するSimpang Ayam村で現地のアブラヤシの地上部・地下部の形態・バイオメトリクス調査を実施した。地上部については、樹高 ($n=15$)、幹部の胸高直径 ($n=15$)、断面積 ($n=15$)、胸高部のコアの湿潤単位体積重量 ($n=15$)、乾燥単位体積重量 ($n=15$)、含水率 ($n=15$)、含水比 ($n=15$)

及び葉部については葉軸長 ($n=10$)、葉軸の先端から 170 cm 位置の葉軸コア 5 cm ($n=10$)、コアの断面積 ($n=10$)、湿潤単位体積重量 ($n=10$)、乾燥単位体積重量 ($n=10$)、含水率 ($n=10$)、含水比 ($n=10$) を計測した。幹部の胸高部のコアのサンプリングについては、インクリメントボア (Haglof 社製のコア長：400 mm、直径：5.15 mm、スレッド：3 (刃数/枚) 用) を用いて採取し、採取後にファルコンチューブに入れ、コンパクト天秤 (AND 社製の EW-150i) を使用して計量した。乾燥重量については、9 月 16 日までファルコンチューブに格納した後に 9 月 16 日から 2 日間 105°C で乾燥させ、同様に計量した。アブラヤシの果実については、収穫された直後の果実の湿潤重量を計測した ($n=9$)。地下部については、海岸部において根の成長範囲の計測を行った ($n=7$)。

2.3. 植生の荷重の算出方法

現地の植生は、アブラヤシと泥炭湿地林が主に支配している。そこで、本研究の地盤安全率は、アブラヤシと泥炭湿地林の荷重を考慮した。アブラヤシの荷重については、アブラヤシの形態・バイオメトリクス調査とアロメトリック方程式⁵⁾を使用して、地上部の各部位の重量を算出した後に荷重を計算した。Landsat 画像より、現地のアブラヤシプランテーションは 2003 年～2005 年にかけて建設されたものと考えられ、現地のアブラヤシは樹齢 19 年から 20 年程度であると想定される。アブラヤシは樹齢 25 年程度まで成長するため、現地のアブラヤシの生産性はピークに近づいているものと考えられる。この際に、アブラヤシの果実は、20 から 30 房であると仮定し、葉部は 40 から 50 枚であると仮定した。2017 年 3 月 4 日に UAV に Meskom 村の沿岸部約 68 ha の空中写真測量を実施し、空中写真測量の結果からオルソ画像を作成し、オルソ画像からランダムにアブラヤシを選択し、50 サンプルの樹冠投影面積を算出した。

泥炭湿地林については、現地で調査することが不可能であったため、文献値を使用した。中央カリマンタンにて 1998 年から 1999 年にかけて調査された泥炭湿地林の乾燥バイオマス⁶⁾と西カリマンタンにて 1993 年と 1994 年に調査された泥炭湿地林の含水比⁷⁾を使用して重量を算出した後に荷重を計算した。植生の荷重は、平均値・平均値±標準偏差で個体差・計測誤差を評価した。

2.4. 現地地盤の物理的性質及び強度特性の一般化

現地地盤の深度別の湿潤密度を調査するために、2014 年 8 月 20 日から 24 日にかけて Meskom 村にてオランダ式ピートサンプラー (大起理化学工業社製の DIK-105A) 使用してコアサンプリングを実施した。コアサンプリングは 50 cm ピッチで深度 6 m まで実施した。採取したコアの深度 1 m 間隔で平均することによって、地盤安全率の計算に使用する湿潤密度を算出した。

現地地盤の強度特性の粘着力と内部摩擦角については、2015 年から 2021 年に土層強度検査棒を使用して深度別に調査された文献値⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を用いて一般化した。2015 年から 2021 年までの調査結果の 1 m 刻みで同一深度の垂直応力とせん断応力の散布図を作成し、近似直線を求めることでブンカリス島北部海岸の深度別の粘着力と内部摩擦角とした。

2.5. 現地の植生及び地盤特性を考慮した地盤安全率の算出方法

植生の影響を考慮した地盤安全率の計算は盛んに研究されている。その多くは植生の根系の斜面崩壊の抑止効果によって安定するものである¹¹⁾。本研究では、今井の地盤安全率の式¹¹⁾を使用した。海岸から内陸に向かって 1,000 m の平坦な 2 次元地形モデルを仮定し、地盤高は 2 m から 10 m まで変動させ、一様に裸地、アブラヤシの影響、泥炭湿地林の影響があるモデルを計算した。各モデルにおいてすべり面の角度は 0° から 20° まで 0.1° 刻みで変動させて計算した。また、地盤は表面まで飽和の条件とした。植生を考慮した地盤安全率の式を式(1)に示す。本研究では、現

地の沿岸部の状況から泥炭地の植生の根は浅く抑止効果がないものと考えた。

$$F_s = \frac{c' + (\gamma z + W_V - h\gamma_w z) \cos^2 \beta \tan \phi'}{(\gamma z + W_V) \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

ここで、 c' (kN m^{-2})は粘着力、 γ (kN m^{-3})は泥炭土塊の湿潤単位体積重量、 z (m)はすべり面までの深度、 W_V (kN m^{-2})は植生の単位面積当たりの重量、 h (-)はすべり面から地下水位までの割合、 γ_w (kN m^{-3})は水の単位体積重量、 β ($^\circ$)はすべり面の角度、 ϕ' は内部摩擦角 ($^\circ$)である。

さらに、植生の影響を考慮した上で現地地盤の深度別の物理特性及び強度特性を考慮した地盤安全率の計算を行った。植生と深度別の物理特性及び強度特性を考慮した地盤安全率の式を式(2)に示す。

$$F_s = \frac{c' + (\sum (\gamma z - h\gamma_w z) + W_V) \cos^2 \beta \tan \phi'}{(\sum (\gamma z) + W_V) \sin \beta \cos \beta} \quad (2)$$

そして、式(3)を用いて海岸線から内陸に向かって水平方向と鉛直方向の累積の地盤安全率を計算した。

$$\sum F_s = \frac{\sum (c' + (\sum (\gamma z - h\gamma_w z) + W_V) \cos^2 \beta \tan \phi')}{\sum ((\sum (\gamma z) + W_V) \sin \beta \cos \beta)} \quad (3)$$

地盤高は2 m から 10 m まで変動させ、それぞれの地盤高において式(3)の $\Sigma F_s=1.0$ を下回る海岸からの距離を限界崩壊距離とした。

2.6. 限界崩壊距離のマッピング及び評価方法

GIS 上で DEMNAS を使用して、ブンカリス島北部沿岸部 (2,782 ha) の海岸地形断面を 100 m 間隔で $n=288$ 測線取得した。GEE で土地被覆の分類を行った結果から、各画像時期の海岸線から1年後の限界崩壊距離を推定した。各方位角の海岸侵食速度で海岸侵食が進行するものと仮定し、1年間で想定される侵食距離の中で、地盤安全率 $\Sigma F_s=1.0$ を下回る地盤高がある場合、その地点から泥炭地崩壊がそれぞれの限界崩壊距離に応じた崩壊が発生するものとして、 $n=288$ の測線において推定した。崩壊が発生しないと推定された地点においては、方位角に応じた海岸侵食速度で海岸侵食が進行するものとした。その後、GIS 上でマッピングし、GEE の土地被覆の分類で得られた泥炭地崩壊が発生した領域と比較した。比較は混同行列を計算することによって推定精度を評価した。

3. 研究結果と考察

地盤安全率は植生の有無で大きな変化はなかった。そのため、植生が崩壊限界距離に与える影響は最小限であった。崩壊限界距離が最も長かったのは裸地条件で、最大距離は標高 10m で発生した。この裸地条件では、崩壊限界距離は $\Sigma F_s=1.0$ で 555 m、 $\Sigma F_s=1.3$ で 559 m、 $\Sigma F_s=1.5$ で 560 m と算出された。2014 年から 2024 年までの崩壊域は、GEE 上での機械学習により Landsat 8 衛星画像を使用して特定された。推定された崩壊限界距離のマッピング結果を GIS 上の図-1 に示す。表-1 は、 $\Sigma F_s=1.0$ の場合の現地の地盤条件を反映した本研究の推定精度を示している。2014 年から 2024 年までの崩壊域の推定面積は、GEE で分類された崩壊域と 28%の重なり率であった。泥炭地崩壊リスクの予測には前例が少なく、比較基準の設定が難しいため、この重なり率を評価することは困難である。しかし、GEE の解析期間を短縮し、実際の降雨条件下での地盤の地下水位

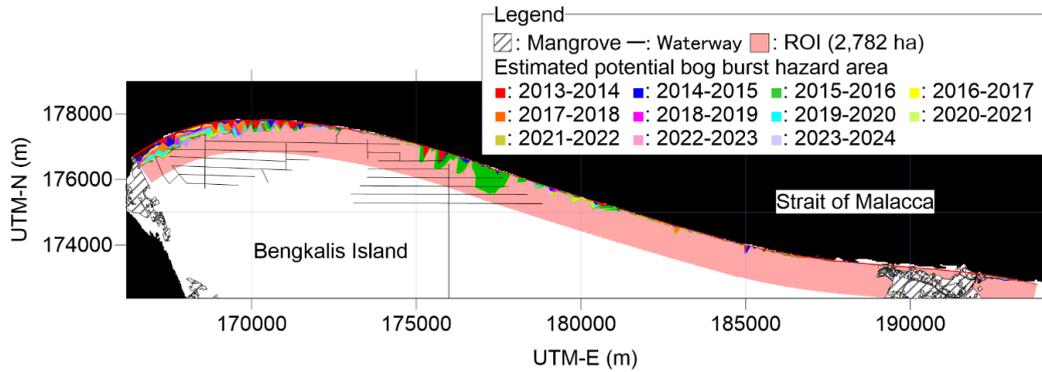


図-1 限界崩壊距離のマッピング結果

表-1 限界崩壊距離のマッピング結果と GEE による崩壊履歴の比較結果

	Overlap Ratio Precision	Intersection over Union (IoU)	True Positive Rate (TPR)	False Positive Rate (FPR)	Accuracy	F1 Score
2014	0.2637	0.1495	0.2566	0.0174	0.0237	0.2601
2015	0.5073	0.0901	0.0988	0.0129	0.1184	0.1653
2016	0.3589	0.1636	0.2312	0.0481	0.1044	0.2812
2017	0.1890	0.1328	0.3087	0.0591	0.0427	0.2345
2018	0.2637	0.2087	0.5000	0.0362	0.0253	0.3453
2019	0.2334	0.1892	0.5000	0.0322	0.0192	0.3182
2020	0.2418	0.1637	0.3365	0.0363	0.0332	0.2814
2021	0.2373	0.1619	0.3375	0.0360	0.0321	0.2787
2022	0.2388	0.1602	0.3273	0.0385	0.0356	0.2761
2023	0.2578	0.1826	0.3851	0.0391	0.0341	0.3089
2024	0.2340	0.1678	0.3724	0.0411	0.0326	0.2874
Total Area (2014-2024)	0.6618	0.3782	0.4689	0.0628	0.2076	0.5489
Average	0.2751	0.1609	0.3322	0.0361	0.0456	0.2761

を明らかにすることで、精度が向上する可能性がある。

4. 結論

熱帯泥炭海岸における泥炭地崩壊の発生するポテンシャルのある領域を推定するために、崩壊限界距離が提案された。その結果、最大 560 メートルの大規模崩壊が発生する可能性があり、高位泥炭地のピートドームの頂部に近づくにつれて崩壊の危険性・規模が増加する可能性がある。

謝辞

本研究は、令和 6 年度 若手研究者による研究プロジェクトに対する支援事業によって、山口大学基金の支援を得て実施した。

参考文献

- 1) Dykes P, A. and Warburton, J.: Mass movements in peat: A formal classification scheme, *Geomorphology* 86, pp.73-93, 2007.
- 2) Wilford, G. E.: Peat landslide in Sarawak, Malaysia, and its significance in relation to washouts in coal seams, *Journal of sedimentary Research*, 36(1), pp.244-247, 1966.
- 3) RiauOnline, Impact Of Abrasion In Simpang Ayam Vil-lage, Bengkalis Island Threatened To Be Washed Away (Review: 09022025)<https://www.riauonline.co.id/riau-pesisir/read/2022/12/14/dampak-abrasi-di-desa-simpang-ayam-pulau-bengkalis-terancam-hanyut>
- 4) Kagawa, H. et al.: Estimation of particulate organic carbon export to the ocean from lateral degradations of tropical peatland coasts, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3547>, 2024.
- 5) Lewis, K., Rumpang, E., Kho, L.K. et al. An assessment of oil palm plantation aboveground biomass stocks on tropical peat using destructive and non-destructive methods. *Sci Rep* 10, 2230, 2020.
- 6) Oski, M. and Tsuji, N.: *Tropical Peatland Ecosystems Chapter10*, Springer, pp.159, 2016.
- 7) Suzuki, E.: Diversity in specific gravity and water content of wood among Bornean tropical rainforest trees, *Ecological Research*, 14, pp.211-224, 1999.
- 8) Suzuki, M. et al.: Peat Soil Investigaiton in Indonesia Bengkalis Island by Sounding Test, in: *Proceedings of 51rd Geotechnical Engineering Research Meeting* (Okayama City), 2016.
- 9) Koyama, A. et al.: Investigaiton of Peat Landslide in Indonesia Bengkalis Island by Sounding Test, in: *Proceedings of 53rd Geotechnical Engineering Research Meeting* (Takamatsu City), 2018.
- 10) Yusa, M., et al.: Geotechnical Characterization Of Bengkalis' Peat Using Portable Tools, *International Journal of GEOMATE*, Vol.20, Issue 80, pp. 113-120, 2021
- 11) Imai, H.: Study on the Slope Failure Prevention Effect of Tree Root Systems. Hazama Research Annual Report, pp.34-52, 2008.