インドネシア国ブンカリス島における泥炭海岸侵食の実態と 地下水流量への影響

Peat Coast Erosion of the Bengkalis Island and its Effect on the Groundwater Discharge

山本浩一¹・渡部 剛²・奥山裕文³・Muhammad HAIDAR⁴
Noerdin BASIR⁵・神野有生⁶・関根雅彦⁷

Koichi YAMAMOTO, Tsuyoshi WATANABE, Hirofumi OKUYAMA, Muhammad HAIDAR
Noerdin BASIR, Ariyo KANNO and Masahiko SEKINE

Erosion area, volume and particulate organic carbon emission to the ocean were calculated by the coastal erosion of the Bengkalis Island, Indonesia. In the Bengkalis Island, total of 741 ha peatland has lost from 1998 to 2013. The erosion rate of the coast is almost double in recent 5 years. Annual total of 2.6 Mm³ of the peat and 1.2 Mm³ of the clay have been eroded to the ocean. Annual particulate organic carbon loss from the Bengkalis Island was at the maximum of 0.13 Tg. Also, groundwater emission to the coastal area was enhanced by making constructed water way.

1. はじめに

インドネシア国リアウ州ブンカリス (Bengkalis) 島 (図-1) の北岸では、現在急速に海岸侵食が進行している。海岸には最大約6 mの泥炭からなる崖があり、高さ30 mにもおよぶ泥炭林の植生ごと崩落が進んでいる (図-2)。

泥炭の崩落や地すべり現象自体は一般的であって、冷帯・温帯湿原においては多数の報告例 (例えばDykes, 2007など) がある。しかし熱帯泥炭林が海岸に露出するのは従来考えられなかった事象であるためにほとんど報告例がない。それは泥炭地の成因に関係している。

熱帯泥炭地の成因を説明するモデルはAnderson (1964) のものが知られている。本モデルでは最初にマングローブ林が発達して沿岸部にシルト・粘土など鉱物質の土砂が堆積し、後背地が次第に排水不良・湿潤となって混交林に遷移し、未分解の泥炭が堆積する。最終的に沿岸部にシルト・粘土の自然堤防を伴ったマングローブ林が発達し、内陸部には混交林が発達したドーム状の地形 (泥炭ドーム) が発達する。したがって、これによれば、海岸となるのはマングローブ林であり、熱帯泥炭林が海岸になることはない。しかし、ブンカリス島の場合、1950年代にはマラッカ海峡に面する島北西部の海岸にマングローブが存在していた (USArmy Map Service, 1955) が、LANDSAT画像によれば1988年までにマングローブ帯は

何らかの原因により縮小・消滅しておりその結果、内陸部に存在していた泥炭湿地林が海岸に露出することになった。泥炭地は陸域における炭素の最も大きな貯留源であり、熱帯泥炭地はその8%を占め、さらにその70%-80% (33-49Mha) がインドネシア・マレーシアに存在している (Maltby・Immirzi, 1993)。インドネシアでは55Gt程度の炭素が貯留されていると言われている (Jaenickeら, 2008)。泥炭は植物遺体が完全に分解されないまま堆積したものであり、有機物の含有量が高い。泥炭地は生物的酸化や火災によって直接二酸化炭素が発生するため、泥炭地の保全が国際的な課題となっている。

インドネシアの二酸化炭素排出量は泥炭地の劣化や森林の伐採など土地利用変化を含むと2007年現在で世界第3位であると推計されている。泥炭地の二酸化炭素排出

図-1 ブンカリス島

1 正会員	博(工)	山口大学大学院理工学研究科	准教授
2 学生会員		山口大学大学院理工学研究科	
3		岡山県 新見地域事務所	
4		山口大学大学院理工学研究科	
5		ブンカリス高専 講師	
6 正会員	博(環境学)	山口大学大学院理工学研究科	助教
7 正会員	工博	山口大学大学院理工学研究科	教授

図-2 泥炭海岸露出の状況(ブンカリス島北岸)

表-1 侵食速度解析に用いられた衛星画像一覧

画像取得年月日	衛星	センサ	バンドおよび波長(μm)
1988.8.3	Landsat 5	TM	5 (1.65), 4 (0.83), 2 (0.56)
1997.7.7	Landsat 5	TM	5 (1.65), 4 (0.83), 2 (0.56)
2008.8.1	Landsat 7	ETM+	5 (1.65), 4 (0.84), 2 (0.56)
2013.8.21	Landsat 8	OLI	6 (1.61), 5 (0.87), 3 (0.56)

量は泥炭地表面の酸化速度から推計されているが、泥炭地の海岸侵食については現在考慮されていない。

さらに、2000年以降、現地では泥炭湿地林の開発による、パームオイルプランテーションへの転用が著しく進行しており、オイルパームの果実の運搬や地下水位管理のための水路が縦横に巡らされている。ブンカリス島北岸の場合、侵食が進行している海岸から僅か200 mの位置にあり、非常に近い位置にある。かつ水位が水路においてほぼ一定に保たれているため、周囲の地下水面よりも異常に高められる現象が生じる可能性があり、海岸からの地下水の流出が懸念される状態にある。地下水流出量の増加は泥炭地の乾燥化をもたらし、地下水位の局所的な上昇および集中により泥炭地すべりの素因となることが予想される。

本研究ではブンカリス島の泥炭侵食速度および侵食泥炭土量を衛星画像解析及び現地調査から明らかにし、造成された水路による地下水流出量への影響を地下水流動モデルを援用して推定することを目的としている。

2. 研究方法

(1) 研究対象地域

研究対象地域はインドネシア国リアウ州ブンカリス県に属するブンカリス島である。ブンカリス島は北はマラッカ海峡、南はブンカリス海峡に挟まれた面積514km²の島である。ブンカリス市は北緯1度付近、東経102度付近に位置しており、ほぼ赤道直下の熱帯地域である。地質は全域泥炭質であり、近年スマトラ島と同様に泥炭火災が頻発している。

(2) 衛星画像解析方法

衛星画像から地理情報システム(ArcGIS)を用いて侵食面積を測定した。解析には1988年8月3日、1997年7月7日、2008年8月1日、2013年8月21日のLandsat画像を用いた。表-1に、用いた画像の詳細を示す。1988年、1997年、2008年、2013年それぞれの海岸線をプロットしてポリゴンを作成し、1998-1997年、1997-2008年、2008年-2013年の差分を取ることで各年代における侵食・堆積面積を算出した。

(3) 最近15年間の侵食土量の推定方法

侵食体積を算出するために海岸侵食が顕著なブンカリス島北西部の面積約700haを対象に解析を行った。現地における過去の広域的な地形測量データは2000年に測量されたShuttle Radar Topography Mission (SRTM) データが存在するのみである。解析に用いたSRTM-3は30秒メッシュ(約90m角)である。SRTMデータはDSM(Digital Surface Model)であるので樹木の高さが含まれており、海岸線も明瞭ではないことから、撮影時期が最も近く、かつ撮影条件の良い1998年のLandsat画像から、裸地と推定できる座標や海岸線の水平座標を抽出し、DEM(Digital Elevation Model)を作成した。これをもって1998年のDEMとした。同様に、2013年のLandsat画像を用いてDEMを作成した。2013年のDEMは、作成した1998年のDEMに対して2013年の海岸線が侵食されている海域の部分については、音響測深により作成した海底面の地形データと結合させ1998年と2013年のデータの差分の土量に算出した。侵食土量を見積もる際には崖線が直立していると仮定した。

泥炭侵食域において流出する有機炭素の推定については、侵食によって流出する粒子状炭素量 Mc を下式で推定した。算出式は以下に示す式(1)とした。

$$Mc = \alpha \rho_d V \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_d :乾燥密度(t/m³)、 α :有機炭素含有率、 V :侵食体積(m³)である。ブンカリス島における泥炭の乾燥密度 ρ_d は0.07~0.09(t/m³)、炭素含有率 α は0.49~0.56である(Pageら、2011)。

(4) 現地調査方法

a) 潮位観測方法

ブンカリス市内の港(1°27'57"N, 102°6'26"E)に水圧式水位計(Onset HOBO U-20)を設置し、2013年6月11日~8月22日の間、10分間隔で計測した。別途気圧を測定し、水圧に換算した。

この期間の平均水位を暫定的に平均海水面(標高=0m)とした。水位は2014年3月現在も計測中であり、今後は通年計測した値をもって平均海水面の標高を補正する必要がある。

図-3 ブンカリス島における測線とモデル解析範囲

表-2 地下水解析のためのモデルの境界条件

境界	境界条件	備考
A	大気	
B~E	浸出面	圧力水頭が正のとき浸出面から排水される
F	水位固定	水路水位と同じ
側面および底面	フラックスなし	
水路	水位固定	3条件

図-4 地下水解析のためのモデル

b) 深浅測量方法

ブンカリス島北部のMeskom村沿岸部において、超音波流向流速計の曳航観測を行った。これは専ら浅海域の地形を調べるための深浅測量として実施した。ADCPは音響ドップラー流向流速計 (Sontek, River Surveyor M9, 1MHz/3MHz) のボトムトラックデータを用いた。

c) 陸地測量方法

ブンカリス島の主要な測点においてスタティックGPS (Trimble 5700/5800シリーズ) で精密に測量を行った。基準点の鉛直座標は暫定平均水面を基準とした。これらの

測定点を基準としてRTK-GPSによる縦横断測量を行った。スタティックGPS, RTK-GPSによる調査は2013年8月19日~26日, 2014年3月6日~3月16日に行った。測量を行った測線を図-3に示す。

d) 3次元地下水流動計算方法

パームオイルプランテーションによって造成された水路による地下水流出の影響を考察するため、現実の海岸地形をもとにモデル化した。モデルの地形は2013年8月にメスコム村付近で行われた地形測量で得られた地形データを元に2013年における海岸とそれに直交する水路に単純化した。岸沖方向1600m, 沿岸方向1500mの三次元メッシュを作成した。モデルは水路が存在している場合と、存在していない場合とでそれぞれ作成した。また、水位を2013年8月, 2013年1月, 2014年3月のものでそれぞれ設定し数値計算を行った。

本研究では米国農務省塩類研究所において開発された土中水分・溶質移動予測汎用プログラムであるHYDRUS3D (Šejna・Šimůnek, 2007) を用いて数値計算を実施した。本プログラムは水の流れについてRichards式により、ガラーキン有限要素法により計算される。用いたモデルの計算領域を図-3に示す。水路の形状については深さ2mの三角形として作成した。地表面標高は測量結果を元に、9mとしパームオイルプランテーション内は整地されているため、一律とした。

使用したモデルの計算範囲は図-3に示す測線の北岸付近の周辺を抜き出して簡略化したモデル (図-4) であり、境界A~F及び底面, 側面, 水路底面にそれぞれ表-2に示す境界条件を与えた。メッシュサイズは水平40 m, 鉛直50 cmとした。境界Fには3種類の水位を与えたが、乾季を想定した2013年8月の水位8m (実測値), 雨季を想定した2013年1月の水位8.8m (推定値), 2014年3月の水位7.5m (実測値) をそれぞれ与えた。また、水路底面に関しても同様の水位を与えた。土壌は2014年3月に測定したデータをもとに粘土層を標高0.38m以下, それより上の層を泥炭層とした。泥炭の透水係数は2014年3月に現地で行った透水性試験によって得られたデータを元に, $1.38 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ とした。海岸の水位は0mで固定とした。したがって今回は潮汐の影響は考慮していない。

3. 研究結果

(1) 侵食・堆積面積の経年変化

ブンカリス北西部の侵食域・堆積域における各年代の海岸線の比較を図-5に示す。1988年から2013年の25年間で、最大約1km海岸線が南に移動しており、北岸域で著しく侵食が進んでいることが分かる。侵食・堆積面積の算出結果を表-3に示す。1988-1997年 (28.16ha/r), 1997-2008 (19.62ha/yr) 年の期間は概ね同じ割合で侵食が進ん

図-5 衛星画像の解析から算出したブンカリス島侵食域(Erosion)・堆積域(Sedimentation)

表-3 侵食・堆積面積および速度の算定結果

期間	侵食		堆積	
	面積ha	平均速度 ha/year	面積ha	平均速度 ha/year
1988-1997	253.46	28.16	63.93	7.1
1997-2008	215.81	19.62	58.21	5.29
2008-2013	212.14	42.43	36.38	7.28

でいるということが分かる。しかし2008年-2013年の期間(42.43ha/yr)は、上記の2つの期間の10年間にに対して侵食速度が倍加している。

(2) 侵食された泥炭の体積および炭素流出量

2013年における地形の測定結果(標高>0mの部分はSRTMによる推定値)を図-6(上)に示す。RTK-GPSによる測定から得られた測線の標高データとSRTM画像と、作成した地形データとの標高の比較を行い、作成した地形データと現地の実測の標高を整合させるために、標高の補正を行った。SRTM画像は現地の標高よりも1.6m高かったのでSRTMのデータから高さのデータに関して一律1.6m差し引いて現地の標高に整合させた。次に、侵食土量および有機炭素量の算定結果を表-4に示す。図-6(下)に侵食深の分布を示した。図-5の侵食領域を合計すると、1998年から2013年の15年間で泥炭39Mm³が海域に流出したと計算された。この侵食により、泥炭由来の炭素として最大2Tg程度が海域に流出したと推定された。粘土の炭素分析はデータがないため、計算対象から外している。

(3) 海岸付近の人工水路による地下水流出量への影響

図-7に海岸付近に人工水路がある状態とない状態の地表面の圧力水頭の鳥瞰図を示した。圧力水頭がマイナスになっているのは、不飽和であることを示しており、圧力水頭が低いほどより乾燥していることを示している。人工水路がある状態よりもない状態の方が海岸は乾燥し

表-4 侵食土量および有機炭素量の算定結果

層	土砂		有機炭素	
	全侵食量 Mm ³	侵食速度 Mm ³ /yr	全流出量 Tg	流出速度 Tg/yr
泥炭層	39	2.6	1.3~2.0	0.09~0.13
粘土層	18	1.2	—	—

ているが、水路で強制的に水位を与えられる状態になると、水路付近で不自然に圧力水頭が上昇、湿潤状態になることがわかる。図には示していないが水路の海岸端を中心に地下水が流出する傾向になる。

人工水路があると泥炭を涵養する効果があるものの、不自然に水位が上昇する。このため、泥炭地盤の安全率が低下し、地すべりにつながることが予想される。実際に2014年3月には計測した測線の北部、すなわち計算領域で水路沿いに泥炭が崩壊したことがわかっている。

このとき、クラックが海岸線沿いに入っていた。

表-5に計算された地下水の単位海岸長あたりの流出フラックスを示した。岸沖方向の水路がある場合、地下水の流出フラックスは3から4倍程度になることがわかる。沿岸方向の水路がある場合、より地下水の流出フラックスは増えることが予想される。

従って泥炭海岸近くで人工水路を建設して水位を高く保つことは火災防止になる可能性はあるが、陸域から海

図-6 2013年における地形の測定・推定結果(上)および1998年から2013年にかけての侵食深の推定結果(下)

図-7 地表面における圧力水頭の鳥瞰図
(左：水路なし，右：水路有り，境界Fの水位：8.0m)

表-5 海岸線の単位長あたりの地下水流出フラックス算定結果

水路	水路水位m	地下水流出フラックス $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{day})$
あり	7.5	0.089
	8.0	0.101
	8.8	0.124
なし	7.5	0.032
	8.0	0.035
	8.8	0.039

域に流出する地下水の漏出を増やし，広域的には乾燥化を招く要因になることになる。

4. 結論

近年海岸侵食が著しいインドネシアブンカリス島を対象にその海岸侵食速度を調べ，海域への有機炭素排出負荷量を調べた。また，海岸近くまで建設された人工水路の地下水位および地下水流出量に与える影響を調べた。その結果，下記の結論を得た。

- 何らかの原因により沿岸のマングローブ帯が失われた後，1988年から2013年までにブンカリス島北部の741 haが侵食された。また，最近（2008年～2013年）の侵食

速度は，以前の20年間（1998年～2008年）にかけての侵食速度の約1.8倍であり，侵食速度は加速している。

- 最近15年間（1998年～2013年）におけるブンカリス島北部における平均侵食土量は泥炭 $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ ，粘土 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ に達し，合計の年間侵食土量は東京ドーム3個分に相当する。
- 海岸侵食による有機炭素の海域への流出量は懸濁態有機炭素として $0.9 \sim 1.3 \times 10^5 \text{ t}/\text{年}$ と推定された。
- 泥炭海岸に隣接するパームオイルプランテーションにおける水路の造成は少なくとも海岸からの地下水の漏出フラックスを3～4倍にし，地下水の賦存量を減少させて泥炭を乾燥化させることにつながる。また，不自然に水位を上昇させることによって，泥炭地すべりの素因となる。

参 考 文 献

- Anderson, J. A. R. (1964) : The Structure and Development of the Peat Swamps of Sarawak and Brunei. Journ. of Trop. Geo. 18, pp.7-16
- Dykes, A. P. and Warburton, J. (2007) : Mass movements in peat: A formal classification scheme, Geomorphology, vol. 86, pp. 73-93.
- Jaenicke, J., Rieley, J.O, Mott, C., Kimman, P. and Siegert., F. (2008) : Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands, Geoderma 147, pp. 151-158.
- Maltby, E., Immirzi, P., (1993) : Carbon dynamics in peatlands and other wetlands- regional and global perspective. Chemosphere 27, 147-154.
- Šejna, M., and J. Šimůnek (2007) : HYDRUS (2D/3D) : Graphical User Interface for the HYDRUS Software Package Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, published online at www.pc-progress.cz, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Page, S., Rieley, J.O., Banks., C.T.J (2011) Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool, Global Change Biology, 17, pp.798-818.
- U.S. Army Map Service (1955) : Bengkalis, Series T503,NA48-9.