

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01668

研究課題名(和文) 地下水管理と干潟形成機構の応用による沿岸熱帯泥炭地崩壊抑制方法の提案

研究課題名(英文) Proposal of suppression method of the coastal tropical peatland collapse by application of groundwater management and tidal flat formation mechanism

研究代表者

山本 浩一 (Koichi, Yamamoto)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：50355955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,300,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸熱帯泥炭地は極めて著しい浸食にさらされており、申請者らは衛星画像の解析によりリアウ州全体で1980年代から2010年代にかけて平均150ha/年の浸食が発生していることを確認した。熱帯泥炭地の海岸において泥炭地崩壊現象が発生していることを明らかにし、かつ熱帯泥炭地における泥炭地崩壊現象は高緯度地方の泥炭地と同様に降雨が要因となっており、降水量に従って発生数が増大することが明らかになった。地下水位の上昇が泥炭地盤の崩壊をもたらすことを示した。また、沿岸域における泥炭粒子の輸送について世界で初めて観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯泥炭地における海岸侵食はインドネシアでは大きな問題となっており、2019年5月からインドネシア中央政府では海岸侵食の防止の検討が行われた。この検討の際に本研究グループの研究が注目を集め、報道された。泥炭地崩壊の防止は喫緊の課題であり、本研究で得られた知見が実際に現地の環境保全に役立つことが期待される。また、泥炭粒子という学術的に輸送・堆積の力学が未解明な粒子の輸送に対する知見が得られた。炭素クレジットの獲得が課題になっている中、泥炭地海岸の保全・懸濁粒子の堆積によってマングローブが成長することからブルーカーボンの獲得に結びつくような成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The coastal tropical peatlands have been exposed to extremely significant erosion, and the applicants confirmed by satellite image analysis that the average erosion was 150 ha/year in the entire Riau province from the 1980s to the 2010s. It has been clarified that a peatland collapse phenomenon has occurred on the coast of a tropical peatland, and the peatland collapse phenomenon in a tropical peatland is caused by rainfall, similar to the peatlands in high latitudes, and it occurs according to the amount of precipitation. It became clear that the number increased. It is shown that the rise of groundwater level causes collapse of peat ground. We also made the world's first observation of the transportation of peat particles in coastal areas.

研究分野：環境工学

キーワード：泥炭地 海岸 泥炭地崩壊 地下水 泥炭堆積物

1. 研究開始当初の背景

泥炭火災防止や生物酸化による CO₂ 排出量削減の見地から熱帯泥炭地の保全が叫ばれており、インドネシア共和国は 2015 年に泥炭復興庁を設立した。インドネシアの泥炭地は内陸泥炭地と沿岸泥炭地に大別できる。スマトラ島リアウ州には沿岸泥炭地からなる島嶼が分布している。沿岸熱帯泥炭地は極めて著しい浸食にさらされており、申請者らは衛星画像の解析によりリアウ州全体で 1980 年代から 2010 年代にかけて平均 150ha/年の浸食が発生していることを確認した。

Page et al.(2002)の研究を契機として泥炭地では生物的酸化が盛んに研究されているが、泥炭地の海岸浸食については殆ど注目されておらず、泥炭の水平輸送に言及した研究は世界的に見ても珍しい。泥炭を河川流域に有するヨーロッパでは斜面における泥炭の崩壊現象(peat slides)は古くから良く知られている(A.P.Dykes and Jeff Warburton, 2007)。しかし、泥炭地が海岸となって直接波浪に暴露されることは熱帯泥炭地の形成過程の上で考えられなかった。

泥炭地海岸浸食・炭素流出のメカニズムは、まず、海面上昇やマングローブが伐採される等の影響によりマングローブ林が後退・消失したと考えられる。マングローブ林を失った粘土地盤は波浪によって容易に浸食され、海岸線が後退する。ついには泥炭地が海岸に露出するようになる。雨季には泥炭地崩壊が発生して自ら崩壊し、これが波浪や潮流により輸送されることにより海域には懸濁した泥炭屑が浮遊、海岸線が後退する。崩壊面から地下水位が低下するため排水が進行して泥炭は酸化分解する。一方浮遊した泥炭屑の一部は海岸に漂着するが、その多くは海底に堆積するとみられる。よって泥炭地崩壊を放置しておくとも国土が縮小するばかりか CO₂ の大気中への放出や粒子状の有機炭素の損失を招くことになる。

ブンカリス島北部の Selatbaru 海岸では消波工が 2014 年に設置されてから背後にマングローブの幼木が順調に生育している。波浪が減衰される条件さえ整えばマングローブ林は復活することを示している。さらにブンカリス島西部では北部で崩壊した泥炭屑による泥炭の砂嘴が形成され、その背後に 1.4km² のマングローブが新規に形成されている。これに着想を得れば、崩壊した泥炭と海水中の粘土粒子を効率的に沈殿・集積する、波浪や潮流を減ずるような何らかの工作物を配置することにより効率的に泥炭や粘土を堆積させることができればマングローブ林が復活すると予想される。さらに 30m/年に達するブンカリス島北部の浸食を抑制する方法であるが、現在の申請者の研究により、地下水位の制御によって泥炭地崩壊を抑制できる可能性が示唆されていた。

2. 研究の目的

本研究では 1) 海岸泥炭崩壊メカニズムの実態解明および抑制方法の提案、2) 地下水の制御に基づく泥炭崩壊の抑止方法の確立、3) 泥炭砂嘴・干潟形成機構を応用したマングローブ再生手法の確立、4) 泥炭崩壊ハザードマップの考案を目的とした。

3. 研究の方法

1) 海岸泥炭崩壊メカニズムの実態解明および抑制方法の提案

Malacca 海峡と Sumatra 本島に挟まれたインドネシア共和国リアウ州島嶼域を研究対象地域とした。主な研究対象は、Bengkalis 島である。Bengkalis 島の北西部の Meskom 村では広くアブラヤシ畑が展開されており、アブラヤシ畑の北部では、海岸侵食と泥炭地崩壊現象が顕著に見られる。UAV による空中写真測量、RTK-GPS による地形測量等の現地調査については、Meskom 村を調査対象とした。UAV による空撮画像から作成したオルソ画像を用いて、泥炭地崩壊現象の崩壊跡の亀裂及び流出跡の抽出を行った。崩壊跡の抽出については、目視によるマニュアル操作でポリゴンを GIS 上に作成した。抽出

の際には、植生が無い亀裂、流出跡を描画することによって抽出した、異なる形状の泥炭地崩壊跡をすべり面の傾斜角及び、崩壊域面積と崩壊域の海岸線の距離をもとに作成したアスペクト比によって分別した。

2) 地下水の制御に基づく泥炭崩壊の抑止方法の確立

地下水位と泥炭地の地盤安全率について検討を行うため、泥炭地崩壊が起こった個所周辺で地下水流動計算ソフト(HYDRUS3D)を用いて、地下水再現計算を行った。地下水の再現を行う地形は、UAV による空撮から得られた DEM データを用いた。水路については、深さ3m、幅4mとした。解析に用いたパラメータ、境界条件は現地の実測値に基づき、サクシオン-体積含水率の関係は、van Genuchten 式に近似した。水路には、水位標高 7.0m から 9.0m まで 0.2m 間隔で水位を段階的に変化させて計算を行った。モデルはガラキン有限要素法を用いて解いた。地下水再現計算を行った後に、地盤安全率の計算を行った。地盤安全率の計算に用いた各値は現地実験に基づいた。また、地下水の流向流速を、山口大学で開発されたペーパーディスク型地下水流向流速計を用いて測定した。

3) 泥炭砂嘴・干潟形成機構を応用したマングローブ再生手法の確立

崩壊域の海岸では粘土の基盤の上に波に洗われた泥炭デブリが海岸を形成しており、潮位によっては海面下にデブリが水没して海水中に泥炭粒子が懸濁する。マングローブ再生手法の検討のためには泥炭の輸送機構を明らかにする必要がある。そこで泥炭地海岸侵食や泥炭地崩壊(島北西部)によって海洋に流出した泥炭によって拡幅している新規堆積干潟(島西部)付近で現地調査を行った。現地沈降試験は 2015 年 1 月 13 日、ブンカリス島北西部のマングローブ湿地付近のラグーン(北緯 1° 34' 54.42" 東経 101° 59' 54.07")で、さらに係留観測を 2018 年 3 月 10 日から 25 日にかけて、また 2019 年 3 月から 2020 年 1 月までの長期にわたりブンカリス島北西部沿岸から沖合 500 m 付近にて計測を行った。係留観測においては海底に超音波流向流速プロファイラー Nortek Aquadopp 2MHz、マクロレンズ改造型水中カメラ JFE Advantec UCW、濁度計、水温塩分計、波高計を埋設した。また、リアウ大学にて水理実験水路を用いて泥炭粒子の再懸濁実験を行った。

4) 泥炭崩壊ハザードマップ

ブンカリス島における現状の浸食速度(1988-2013)から将来の海岸線を予測した。海岸線の予測年代は 2020 年、2030 年、2040 年、2050 年とした。

4. 研究成果

1) 海岸泥炭崩壊メカニズムの実態解明および抑制方法の提案

泥炭地崩壊形状の観察結果、当地域では崩壊が 2 種類あることが判明した。A 形態は bog burst と言って良いと考えられる。一方で、B 形態はスラリー状の流動性が高い泥炭地崩壊であるので peat flow ないしは bog flow に近い。A 形態、B 形態ともに内陸の泥炭地(raised bog, blanket)で発生する bog burst や bog flow と類似の現象である。これまで、海岸でこのような bog burst や bog flow の発生が報告されたことはない。海岸侵食による海洋中への粒子状炭素輸送量の推定の結果、リアウ州では、約 820 万 m³ の泥炭が海洋中へ輸送していることがわかった。この有機物である泥炭の海洋中への輸送は、炭素の海洋中への輸送を意味し、リアウ州における粒子状炭素輸送量の推定結果、年間約 31 万 t の炭素が海洋中へ輸送されていることが推定された。この推定年間炭素輸送量は、全てが二酸化炭素となって大気に排出された場合、約 114 万 t の二酸化炭素に換算することができる。また、インドネシア共和国の泥炭地総面積 2250 万 ha での泥炭火災によって排出される二酸化炭素 14 億 t の 0.08%に相当する。また、熱帯泥炭地の沿岸で確認されていた陸域面積の拡張現象の実態を衛星画像の解析と現地調査で明らかにした。陸域拡張現象の実態はボグバーストに伴う一時泥炭扇状地の発生であった。

一時泥炭扇状地の面積減少速度は最初に発生が確認されてから 50 日以内で一日当たり 1.5%程度であったが、その後 0.1%に減少した。面積の減少傾向は線形であり、海岸浸食によるものと考えられた。一時泥炭扇状地の発生個数と期間降水量を比較したところ、扇状地の発生が新たに確認された場合においては高い降水量により発生する一時泥炭扇状地の数が増加することが確認された。従って熱帯泥炭地におけるbogバーストは高緯度地方の泥炭地と同様に降雨が要因となっており、降水量に従って発生数が増大することが明らかになった。一時泥炭扇状地の消失は陸域からのbogバーストにより海域に泥炭が移動し、海底または他の海岸に泥炭が輸送されることを意味しているため、陸域の炭素の輸送の観点から海洋中に泥炭粒子が放出された後の泥炭の挙動についても明らかにしていく必要がある。

2) 地下水の制御に基づく泥炭崩壊の抑止方法の確立

2015 年 11 月に水路の決壊によって Coastal bog flow が発生した Meskom 村北部の箇所において、2017 年 3 月 4 日にも水路の決壊によって Coastal bog flow が発生していることが確認できた。この Coastal bog flow 発生箇所の地盤安全率の計算を行った。地盤安全率の計算を行うにあたって、地下水位再現計算を行った。地下水流動モデルにより地下水位を求め、Coastal bog flow の発生箇所における地盤安全率を算出した。水位は水路付近で高いため、地盤安全率は水路付近で低くなり、水路より北西部の標高が低くなっている範囲で、水路水位に関係なく地盤安全率は低くなった。そのため、一度崩壊して地形が変化したことが地盤安全率に大きく影響しているのではないかと考えられる。また、一度崩壊現象が発生すると水路水位に関係なく滑りやすい状態になり、将来的に崩壊現象は発生し続けるのではないかと考えられる。Coastal bog flow は、激しい降雨などにより水路の決壊が起こると発生しやすい現象であり、一度崩壊が発生した箇所は、再び発生する恐れがある現象であると考えられる。

3) 泥炭砂嘴・干潟形成機構を応用したマングローブ再生手法の確立

沿岸を輸送される懸濁物質は泥炭と粘着性底泥からなり、それらが潮流によって輸送されている。懸濁物質は通年では海岸から沖合方向に、マラッカ海峡からブンカリス海峡に向けて、すなわち泥炭崩壊域から堆積域に輸送されていることが明らかになった。その量は通年でマラッカ海峡からブンカリス海峡方向に約 1500t/m、海岸線から沖合方向に約 300t/m となった。特に波の高い 11 月～12 月にかけて活発な懸濁物質輸送があった。泥炭デブリの存在も水中カメラで明らかになった。水中カメラの解析を行い、沈降速度解析を進めている。懸濁態泥炭は粘着性底泥と全く異なる性質を持つことから基本的性質についてさらに明らかにする必要がある。このことについて JSPS 二国間共同研究「泥炭堆積物の輸送力学の確立」(2020-2022 年, JSPS) で引き続き研究を進める予定である。

4) 泥炭崩壊ハザードマップ

侵食速度が一定の条件下での崩壊予測はできたが、ハザードマップの確立にはまだ至っていない。今後は何年でその土地が侵食される確率が何パーセントかという確率を用いてマッピングすることを予定している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sutikno Sigit, Nasrul Besri, Gunawan Haris, Jayadi Rachmad, Rinaldi, Saputra Eka, Yamamoto Koichi	4. 巻 276
2. 論文標題 The effectiveness of canal blocking for hydrological restoration in tropical peatland	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06003 ~ 06003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1051/matecconf/201927606003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamamoto Koichi, Basir Noerdin, Sutikno Sigit, Kanno Ariyo, Kagawa Hiroki, Suzuki Motoyuki, Akamatsu Yoshihisa, Koyama Atsushi	4. 巻 276
2. 論文標題 Tropical peat debris storage in the tidal flat in northern part of the Bengkalis island, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06002 ~ 06002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1051/matecconf/201927606002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Mubarak, Sutikno Sigit, Defarian Alvin, Murakami Keisuke, Yamamoto Koichi	4. 巻 276
2. 論文標題 Numerical simulation of detached breakwaters for mangrove restoration in Bengkalis Island, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 04005 ~ 04005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1051/matecconf/201927604005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 香川 拓輝, 山本 浩一, Muhammad HAIDAR, 神野 有生, 赤松 良久, 鈴木 素之, Sigit Sutikno, Noerdin BASIR, 関根 雅彦	4. 巻 73 巻 (2017) 7 号
2. 論文標題 インドネシア共和国リアウ州島嶼域における海岸侵食の現状	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 環境工学研究論文集 第54巻	6. 最初と最後の頁 111_213, 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejer.73.111_213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 山本 浩一, 宮良 工, 小林 大真, 赤松 良久, 神野 有生, Noerdin BASIR, 香川 拓輝, Sigit SUTIKNO	4. 巻 73 巻 (2017) 2 号
2. 論文標題 泥炭砂州の背後に形成されたマングローブの形成過程と有機炭素現存量	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1573,1578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/kaigan.73.I_1573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 2件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 山本浩一, 赤松良久, 神野有生, 佐々木翔太, 登尾恒太郎, 神山淳, BASIR Noerdin, STIKUNO Sigit
2. 発表標題 熱帯泥炭地沿岸水域における懸濁態泥炭粒子の連続観測
3. 学会等名 日本水環境学会シンポジウム講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香川拓輝, 山本浩一, 浜崎大地, 関根雅彦, 神野有生
2. 発表標題 干潟内部に堆積した泥炭粒子における酸化分解の抑制機構に関する研究
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神山淳, 山本浩一, SUTIKNO Sigit, BASIR Noerdin, 鈴木素之
2. 発表標題 インドネシア・ブンカリス島における泥炭地盤崩壊に関する調査報告
3. 学会等名 地盤工学研究発表会発表講演集(CD-ROM)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamamoto Koichi, Basir Noerdin, Sutikno Sigit, Kanno Ariyo, Kagawa Hiroki, Suzuki Motoyuki, Akamatsu Yoshihisa, Koyama Atsushi
2. 発表標題 Tropical peat debris storage in the tidal flat in northern part of the Bengkalis island, Indonesia
3. 学会等名 ICANCEE2018, Bali (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本浩一
2. 発表標題 熱帯泥炭地の泥炭屑が堆積して 形成された干潟底質の分解度
3. 学会等名 第28回日本熱帯生態学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Yamamoto, Noedin Basir, Muhammad Haidar, Sigit Sutikno, Ari Sandhyavitri, Ariyo Kanno, Motoyuki Suzuki and Yoshihisa Akamatsu
2. 発表標題 Massive bog burst in coastal oil palm plantation on tropical peatland and the importance of groundwater management
3. 学会等名 International Peat Society annual convention, Aberdeen, Scotland (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本浩一
2. 発表標題 沿岸熱帯泥炭地の崩壊による有機炭素の海洋への流出
3. 学会等名 熱帯生態学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 香川拓輝, 山本 浩一, Muhammad Haidar
2. 発表標題 インドネシア共和国リアウ州島嶼域における海岸侵食の現状
3. 学会等名 土木学会平成29年度全国大会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koichi Yamamoto, Yoshihisa Akamatsu, Kotaro Noborio, Sigit Sutikno, Noerdin Basir
2. 発表標題 Suspended peat material transportation in the coastal water related to the coastal bog burst
3. 学会等名 The International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering, Bali, Indonesia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Yamamoto, Noerdin Basir, Sigit Sutikno, Kotaro Noborio, Yoshihisa Akamatsu, Atsushi Koyama
2. 発表標題 Suspended peat particle flux at the northern part of the Bengkalis Island
3. 学会等名 WET2018, Matsuyama, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 素之 (Suzuki Motoyuki) (00304494)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	赤松 良久 (Akamatsu Yoshihisa) (30448584)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	神野 有生 (Kanno Ariyo) (30583760)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	神山 惇 (Koyama Atsushi) (90816266)	宮崎大学・工学部・助教 (17601)	
連携研究者	森 啓年 (Mori Hirotohi) (20355803)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	