

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.60 No.1 June 2021

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 波の遡上域における海浜地形変化に及ぼす潮汐変動の影響に関する検討
伴野 雅之・栗山 善昭
2. 2019年台風15号による横浜港に襲来したうねり性の波浪
田村 仁・川口 浩二・岩本 匠夢・藤木 峻
3. 富山湾・寄り回り波の力学機構
田村 仁・川口 浩二・藤木 峻
4. 仮設被覆工の耐波安定性について
鈴木 高二朗・久保田 博貴・田中 敦
5. パラペット後退型護岸に働く波圧に関する検討
鈴木 高二朗・久保田 博貴・鶴田 修己
6. プレート境界断層デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムに関する研究
杉山 友理・橋 伸也・森川 嘉之
7. MPM-剛体シミュレーションのための最小二乗法を用いた摩擦接触アルゴリズムの開発と開端杭の地盤への貫入挙動への適用
中村 圭太・松村 聡・水谷 崇亮

波の遡上域における海浜地形変化に及ぼす 潮汐変動の影響に関する検討

伴野 雅之*・栗山 善昭**

要 旨

本稿はGeophysical Research Lettersで出版された論文「Supermoon Drives Beach Morphological Changes in the Swash Zone」の日本語訳版であり、より詳細な記述や追加の図面を付与したものである。

海浜地形は波浪を主外力として変動するけれども、その応答は様々な要因によって変化し、海面水位の変動もその要因の一つである。しかしながら、既存の地形変化モデルにおいて、潮汐変動、特に潮差の影響については、ほとんど考慮されていない。満月や新月の際に生じる大潮に月の近地点が同期するとking tideと呼ばれる大きな潮差が観測される。この大きな潮差に伴った高い海面水位は沿岸域の浸水リスクを高めることが知られている。なお、天体現象としてこの月の近地点の満月はスーパームーンとして一般に知られている。

本論文では、これまで未知であった大潮に伴った地形変化とking tideに伴った地形変化を波崎海岸の25年間の長期観測データをもとに明らかにした。スペクトル解析から、波の遡上域の地形変化は満月・新月周期及び月の近地点周期で変動していることが明らかとなった。潮差との位相差から、潮差が大きくなった際に上部遡上域(平均海面よりも上部)において侵食が生じ、下部遡上域に堆積が生じていることが示され、土砂の沖方向への移動が明らかとなった。統計解析から、大潮やking tideの際には上部遡上域において有意な侵食が生じていることが明らかとなり、波浪に対する地形応答に影響を与えている可能性も示された。この潮差の変動に伴った地形変化プロセスは次のように考えられた。汀線付近の地下水位が海面変動に伴って変化するが、特に高い海面水位が記録された後の下げ潮の際に、海面水位の低下に対して地下水位の低下が遅いため、地下水位が高いままとなり、地下水の滲出によって戻り流れが強められ、侵食が生じやすくなると考えられる。

今後の海岸管理においては、スーパームーンの際に高波浪の来襲が重なる場合には、大規模な侵食が起こる可能性があることから、事前の十分な注意が必要であると考えられる。また、本研究で明らかとなった海浜地形変化プロセスは、海面の変動によって生じる地形変化の一つであり、長期的な海面の変化によって生じる地形変化を明らかにする上で、重要なものであると考えられる。

キーワード：砂浜，地形変化，波の遡上域，潮差，大潮，近地点大潮，king tide

* 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 主任研究官
** (国研)海上・港湾・航空技術研究所 理事長
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5045 Fax：046-844-1274 E-mail:banno-m@p.mpat.go.jp

Cyclic Beach Morphological Changes in the Swash Zone due to Tidal Range Fluctuations

Masayuki BANNO*

Yoshiaki KURIYAMA**

Synopsis

This paper is a Japanese translation of the article "Supermoon Drives Beach Morphological Changes in the Swash Zone" published in Geophysical Research Letters, with more detailed description and additional drawings for Japanese professionals engaged in coastal management.

The effect of the supermoon, which appears much larger than a normal full moon, on the morphological changes of a sandy beach was investigated by analyzing a 25-year daily observation data set of beach morphology in the swash zone. The beach morphology fluctuated in two cycles related to the supermoon: the semisynodic month cycle (from full moon to new moon, and vice versa) and the anomalistic month cycle (from perigee to perigee). The supermoon makes the erosion of the upper swash zone more likely by generating a larger tidal range. The high-water-level contour positions observed during supermoons retreated significantly, although there were no trends in the change for all the observations. Erosion due to high waves coincident with a supermoon can be expected to be more severe in the upper swash zone; including the supermoon effect in beach morphodynamic models can improve coastal management.

Key Words: sandy beach, beach morphology, tidal range, spring tide, king tide, supermoon

* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environmenta Field
** President, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5045 Fax: +81-46-844-1274 e-mail:banno-m@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	6
2. データ	7
3. 手法	9
3.1 スペクトル解析	9
3.2 統計解析	10
4. 結果	11
4.1 潮差に関連した地形変化の周期性	11
4.2 満月・新月及びスーパームーンに伴った侵食	15
5. 考察	16
5.1 地形変化における潮汐変動の影響	16
5.2 海浜地形変化の複雑性	17
6. 結論	18
謝辞	18
参考文献	18

1. はじめに

海浜地形が大きく侵食を受けると、浜幅の減少によって砂浜背後への越波や浸水リスクが増大する。また、海岸構造物前面の土砂が洗掘されることで、海岸構造物それ自体の安定性や機能が損なわれる可能性もある。このようなことから、海浜地形は沿岸域における災害リスクと極めて密接に関連しており、その変動を考慮した沿岸災害リスクの評価を行うことが重要である。近年では、地球温暖化に伴った海面上昇や極端気象による沿岸災害リスクの増大が懸念されており、このような将来の沿岸災害リスクの変化を精緻に予測するためには、海面や波浪の変動に対する地形応答を十分に理解する必要がある。特に、実際の海浜地形変化は様々な外力の変動に応答する複雑なプロセスの重合によって生じるものであり、個々の地形変化プロセスを詳細に明らかにしていくことが地形変化予測において重要となる。

海浜地形の変動を引き起こす主要因は波浪であるが、その応答は様々な要因によって変化し、海面水位の変動も海浜応答に影響を与える要因の一つである。海面水位の変動に伴った地形変化に関しても、いくつかの先行研究があり、様々な時間スケールの海面変動に対する海浜変動が知られている。

長期的な海面水位の上昇に伴った地形変化として、Bruun則(Bruun, 1962)と呼ばれる概念モデルがよく知られている。このモデルは、海浜地形の平衡状態を仮定したものであり、海面の上昇によって海浜地形断面が新たな平衡状態(平衡断面)へと遷移することで生じる汀線の後退量を概算することができる。このモデルによると、海面上昇によって汀線付近の地形は侵食され、汀線は大きく後退することが予測されている。それよりもやや短い10年程度の時間スケールにおいては、月の公転軌道面と地球の赤道面の周期的変動に伴った18.6年周期の潮汐振幅の変動によって、沿岸域の地形が影響を受けていることが示されている(Gratiot et al., 2008; Levoy et al., 2017)。数ヶ月から数年スケールの水位変動による地形変化としては、エルニーニョ・南方振動(ENSO)に起因した水位や波浪に変化が生じ、冬季の侵食量がそれらの影響を受けていることが示唆されている(Barnard et al., 2015; Barnard et al., 2017)。例えばカリフォルニア州沿岸の冬季の海浜地形はENSO発生時に侵食されやすい傾向にあることが示されている。

さらに短い時間スケールについては、1日の間に生じる潮汐変動と関連する地形変化プロセスについても、定性的な理解が進んでいる。一潮汐間における上げ潮と下

げ潮による海面水位の変動に対して、前浜付近の地下水位が遅れて追従することで、結果として波の遡上端付近での上げ潮時の堆積、下げ潮時の侵食が生じることが知られている(Duncan, 1964)。このような前浜付近の地下水位が前浜の侵食や堆積に影響を及ぼすことは、茨城県波崎海岸での観測結果でも示されており(加藤・柳嶋, 1992)、このプロセスに基づいて前浜の地下水位の上昇を軽減することで海浜の安定性を高める透水層埋設工法(例えば、柳嶋ら, 2007)は山口県虹ヶ浜海岸や静岡県松崎海岸などいくつかの海岸で現地施工がなされている。

また、非常に限られた観測結果からの推察ではあるが、大潮・小潮に伴った地形変化もいくつかの観測事例が報告されており(Aubrey et al., 1976; Clarke et al., 1984; LaFond, 1939)、大潮時には満潮位付近の地盤高が低下する定性的な傾向が示唆されている。このような潮汐変動が海浜地形変化に及ぼす影響について、定量的に評価するためには、高頻度な観測データや長期間の観測データによって、波浪の影響を取り除いて検討する必要があるが、上述の研究は特定のイベントを捉えた限られた観測データに基づくものであり、潮汐変動に対する海浜変動プロセスについて明確に説明できておらず、定量的な評価にも至っていない。そこで本研究では、特に大潮・小潮に伴った地形変化プロセスに注目した。

ここで、大潮は月、地球、太陽の三つの天体が一直線に並んだ満月と新月の時に、それぞれの引力のベクトルの向きが一直線となり、起潮力が大きくなることで大きな干満差(潮差)が生じる現象である。満月は29.5日周期(朔望周期)で起こることから、満月と新月で生じる大潮は14.77日周期(半朔望周期)で生じることになる。一方で、月の公転軌道は完全な円ではなく、離心率0.055の楕円であることから、地球と月の距離は27.55日周期(近地点周期)で変動する。これに伴って、月が地球に最も近くなる近地点では、起潮力が大きくなり、より大きな干満差が生じる。つまり、14.77日周期の大潮と27.55日周期の近地点が同期した場合、通常の大潮よりも大きな干満差が生じ、満潮時には高い海面水位が記録される。この高潮位は"king tide"(近地点大潮)と呼ばれ(Flick, 2016; NOAA, 2019)、沿岸域の浸水リスクが増大することが知られている(Román-Rivera & Ellis, 2018)。特に、king tideと同時に高波浪や高潮が生じる場合には、浸水リスクは大きく高まる(Gallien et al., 2013)。

一般に、近地点の満月(広義では近地点の新月も含む)はスーパームーンと呼ばれ、通常の間月よりも大きく見える。地球と月との距離は約406,000 kmから約357,000 kmまで変化し、実際に2020年4月8日のスーパームーンは、

その年の最も小さく見えた2020年10月31日の満月と比較して直径で約14%大きく見えた(国立天文台, 2020). なお, 実際に満月と近地点が完全に時間的に一致することはほぼないが, おおよそ1日以内の同期をスーパームーンと定義すると, スーパームーン及びそれに伴ったking tideは年に3~4回程度の頻度で生じる(図-1).

月の位相やスーパームーンは心理的な影響を有するだけではなく, 実際に地球物理学的な様々な現象(例えば, 気象や生物活動など)にも影響を与えることが知られている(Balling & Cerveny, 1995; Pertsev & Dalin, 2010; Portugal et al., 2019). この内, いくつかの現象は, 潮汐への影響を通じて生じていると考えられており(Carpenter et al., 1972; Cochran et al., 2004), 上述した大潮に伴った地形変化が観測されていることから, king tideによる大きな干満差が地形変化に影響を及ぼしている可能性は十分にある.

これまで, 大潮・小潮によって生じる潮汐変動が海浜地形変化に及ぼす影響は定性的な観測結果が示されているだけであり, 十分に明らかにされているとは到底言い難い. 同様に, より干満差が大きな大潮であるking tideが海浜地形変化に及ぼす影響について検討した研究事例はこれまで一つもなかった. このように解明が進んでいなかった原因は, 波浪の影響を取り除いて解析するための高頻度かつ長期の海浜地形観測データを入手することが困難であったためである. そこで本研究では, 世界的に見ても最も良質な海浜地形観測データセットである茨城県波崎海岸における約25年間の海浜地形変化データを用

い, スペクトル解析と統計解析を行うことで, king tideを含め大潮・小潮が波の遡上域の海浜地形変化に及ぼす影響について検討し, その影響を定量的に把握することとした.

なお, 本稿の内容はGeophysical Research Lettersに掲載された論文"Supermoon Drives Beach Morphological Changes in the Swash Zone"(Banno & Kuriyama, 2020a)を日本語としてまとめたものであり, 国内の海岸管理者にとって有用な資料となるように説明等を追加したものである. 本研究で明らかにした周期的な潮差の変動が有する影響は, 既存の地形変化モデルには考慮されていないものである. このような未解明の地形変化プロセスをモデルにおいて考慮することで, 短期的な海浜地形変化の予測精度の向上が見込まれるだけでなく, 短期的な地形変化の積分となる長期的な地形変化の再現性も向上することが期待される. さらには, 長期的な海面上昇を踏まえた海浜地形予測にも与するものであると考えられる. 単に地球物理学的な現象の解明にとどまらず, これまで見落とされていた地形変動要因の一つとして, 広く実務への応用も期待できる.

2. データ

本研究では, 茨城県波崎海岸で観測された1986年3月12日から2010年12月31日までの海浜地形を解析に供した. 波崎海岸は鹿島灘南部に位置する延長約16 kmの砂浜海岸であり(図-2(a)), 前浜付近の底質粒径は約0.18 mm,

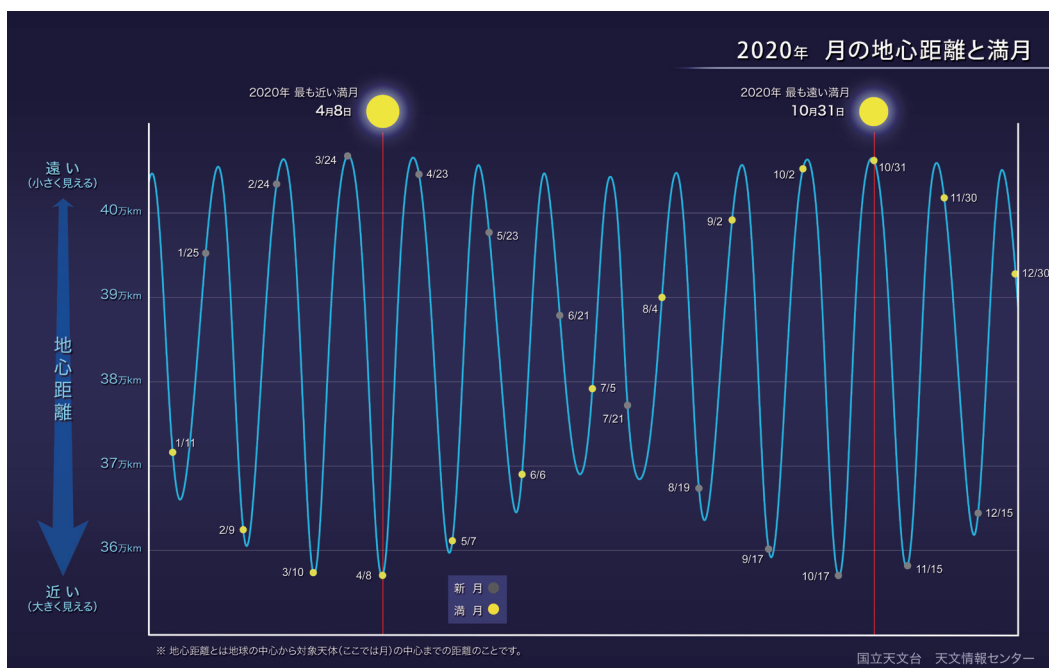


図-1 2020年の月の地心距離と満月及び新月の日(国立天文台, 2020)

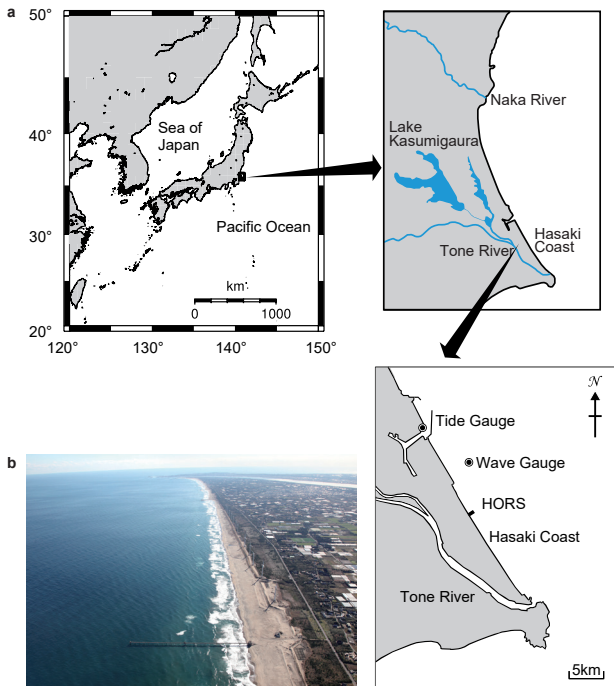


図-2 (a)波崎海岸の位置, (b)波崎海岸の沿岸状況(2018年12月19日撮影)

空隙率は約39.5%である(Katoh & Yanagishima, 1995). 海岸北端・南端部の構造物周辺や海岸南部のヘッドランド周辺においては局所的な土砂の堆積や侵食が見られるけれども, 海岸の形状は沿岸方向に比較的一様であり(図-2(b)), 後述の観測地点において沿岸漂砂が海浜地形断面変化に及ぼす影響は比較的小さい(Kuriyama, 2002).

地形観測は波崎海岸の北端から約4 km南に位置する波崎海洋研究施設(Hazaki Oceanographical Research Station: HORS, 港湾空港技術研究所)の観測栈橋に沿って実施されている. 観測栈橋の座標は35° 50' 27"N, 140° 45' 41"Eである. 観測栈橋は延長約400 mであり, 汀線にほぼ直角に伸びている(図-3(a)). 計測範囲は岸沖方向に500 mの区間(後述の岸沖座標-115 mから+385 mまで)であり, 陸域115 m区間はレベルとスタッフを用いた水準測量によって5 m間隔で地盤高が計測され, 栈橋領域385 m区間(水中部)はレッド測深によって同じく5 m間隔で海底地盤高が計測されている(図-3(b)). おおよその計測範囲の目安としては, 陸上部の砂丘付近から水深約6 mの範囲に該当する(図-4). 地形観測は1986年3月12日より開始され, 2011年3月31日まで, 毎日1回(休日は除く)の頻度で実施された. なお, 本研究では取り扱わないデータであるが, 2011年4月以降に関しては, 観測頻度が週1回に変更されている.

本研究においては, 観測された海浜地形から得られるコンター位置を海浜地形のプロキシとした. 具体的には, 高さ-1.0 mから+2.0 mまでの範囲において, 5 cm毎

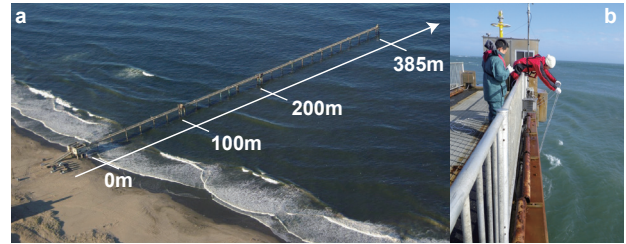


図-3 (a)波崎海洋研究施設の観測栈橋, (b)レッド測深

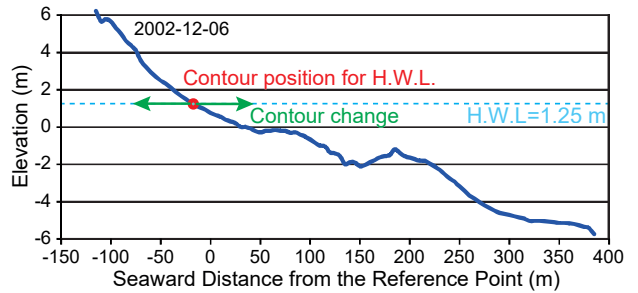


図-4 観測された地形断面の一例とH.W.L.のコンター位置とその変化の方向

に定めた61の基準高さごとにコンター位置の時系列データを求め, それぞれを解析に供した. 本研究における高さの基準面は波崎港工事用基準面(T.P.-0.687 m)であり, 波崎海岸における朔望平均満潮面(H.W.L.), 平均海面(M.W.L.), 朔望平均干潮面(L.W.L.)は, それぞれ1.25 m, 0.65 m, -0.20 mである. つまり, 本研究で対象とした高さ-1.0 mから+2.0 mまでの地形変化は, 潮間帯よりも広い波の遡上域を十分に包含する. コンター位置は, 栈橋基部付近を原点とした沖向き座標で表され, 例えばコンター位置の変化が負である場合は, 侵食に伴った地形の後退(岸方向への変化)を意味する.

一例として, M.W.L.及びH.W.L.のコンター位置の4年間の時系列データ(図-5(a))においては, 夏季の低波浪(図-6)に伴ったコンターの前進と春季の低気圧や秋季の台風による高波浪(図-6)に伴ったコンターの後退といった季節的な地形変化が見られる.

海面水位については, 鹿島港内の験潮所(フロート式)で1時間間隔で観測されたものを用いた. 波浪データについては, NOWPHAS(全国港湾海洋波浪情報網)の観測点「鹿島」(水深約24 m)において超音波式波高計で観測されたものを用いた. 波浪観測の時間間隔は, 2時間間隔(1986年から2007年), 1時間間隔(2007年から2009年), 20分間隔(2010年以降)である. 海面水位及び波浪の観測点は, いずれも波崎海岸からやや北に位置するが, 過去の波崎海岸に関連した多くの論文において, その代表性が確認されている.

本研究での解析においては, 日地形変化量(コンター変

化：61の時系列)，日潮差，日平均海面水位，日平均沖波エネルギーフラックスを用いた。以降においては，「日」や「日平均」を省略することがあり，例えば単に「潮差」といった場合には，「日潮差」を指す。そこで，大部分の海浜地形の観測が午前8時前後に実施されていることから，解析におけるデータの基準時刻を午前8時とし，翌午前7時までの24時間に生じた地形変化を日地形変化量とし，単位としてm/dayを用いた。同様に，潮差については，同24時間に観測された最高水位と最低水位の差として定義した(図-5(b))。日平均海面水位についても，同24時間の算術平均値として定義した(図-5(b))。沖波エネルギーフラックスについては，式(1)により観測時間ごとに求めた同時間内のものを算術平均し，日平均値とした(図-5(c))。

$$E_f = \rho g H_s^2 c_{g,s,0} / 16 \quad (1)$$

ここで， E_f ：沖波エネルギーフラックス， ρ ：海水密度， H_s ：有義波高， g ：重力加速度， $c_{g,s}$ ：有義波周期 T_s に対応する群速度である。添字の0は沖波を表す。

後述するスペクトル解析においては，休日等に伴った欠測データを近傍のデータからの線形内挿によって補間し，日間隔のデータセット($n = 9,060$)としたものを用いた。後述する統計解析においては，補間によってデータの質が均一とならず，結果に影響を与えることが懸念されるため，補間したデータは解析に用いていない。それ故，統計解析を行ったデータ数は解析に用いたデータの組み合わせによって異なる。

3. 手法

3.1 スペクトル解析

海浜地形変化の周期的な変化を検討するために，各コンター変化のパワースペクトルを求めた。本研究では，パワースペクトルの算出法として，FFT(Fast Fourier Transform)法とAR(Autoregressive)法の二つの手法を用いた。

FFT法においては，時系列データ数 $n = 9,060$ に対し，ゼロパディングを行うことで， $n = 16,384$ として，フーリエ変換を行い，パワースペクトルを得た。ゼロパディングにより低減したパワーは，元のパワーレベルまで増幅させた後，周波数領域に三角形フィルターで5回の平滑化を行った。

一方で，FFT法はクロススペクトルから位相差などの情報を求めやすい利点があるものの，使用できるデータ数が 2^n 個に制約されることに加え，スペクトルの分解能

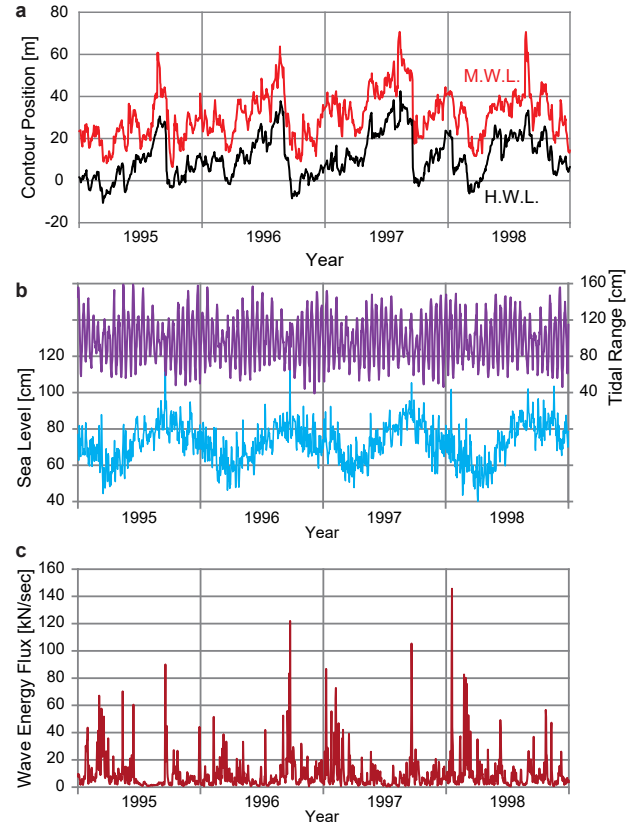


図-5 本研究の解析に用いた時系列データの一例。(a) H.W.L.及びM.W.L.のコンター位置，(b)潮差及び平均海面水位，(c)沖波エネルギーフラックス

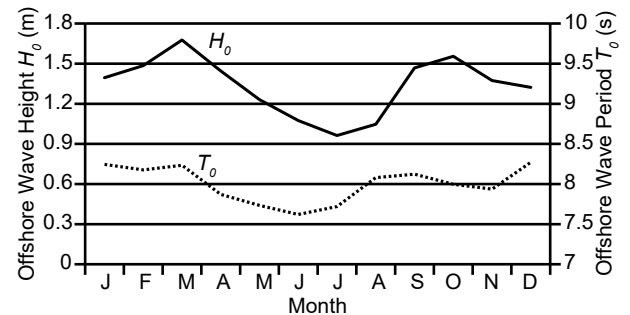


図-6 波崎海岸における月別平均有義波高及び有義波周期(1986年から2010年までのデータを使用)

はデータ数に依存する。また，FFT法によって得られたパワースペクトルは一致推定量の性質を欠くことが証明されており，推定誤差が大きく，しばしば激しく振動する。このため，スペクトルの平滑化やアンサンブル平均を必要とする(日野，1977)。そこでFFT法よりも安定したスペクトルが得られるAR法も併用してパワースペクトルを求めた。FFT法が直接法と呼ばれるのに対し，AR法はARモデルのパラメータをもとにスペクトルを求めることから間接法と呼ばれる。AR法は使用するデータ数に制約がなく，分解能が良いことが知られている。本研究では，よりパラメータ数が多い高次なモデルである式(2)の

MARモデル(Multiple Autoregressive Model)を用いることとした。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) x_j(t-m) + e_i(t) \quad (2)$$

ここで、 $x_i(t)$:時系列データ、 $a_{ij}(m)$:モデルパラメータ(係数)、 $e_i(t)$:ホワイトノイズ、 t :時刻、 m :時間遅れである。モデルに用いる変数はある高さのコンター変化、ある高さのコンター位置、潮差、平均海面水位、沖波エネルギーフラックスであり、 $k=5$ とした。モデルパラメータ $a_{ij}(m)$ とモデルで考慮する最大時間遅れ M は、コンターの基準高さごとに算出した。 $a_{ij}(m)$ はLevinson-Durbinのアルゴリズムを用い、Yule-Walker方程式を解くことで求めた。考慮する最大時間遅れ M は、赤池情報量基準(AIC; Akaike, 1973)が最小となる最適次数として決定した。なお、次数 M が小さくなることはモデルが単純になることを意味し、それに伴って得られるスペクトルも単純化される。つまり、次数 M が小さくなると、細かいパワースペクトルの振動が抑えられ、FFTから得られたパワースペクトルに平滑化を施すことと似た効果を生む。ただし、あまり次数 M が小さすぎると小さなスペクトルのピークを十分に捉えることができなくなる。

推定されたMARモデルの係数を用い、式(3)及び式(4)によりパワースペクトルを求める(Gangopadhyay et al., 1989)。

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |A(f)^{-1}_{ij}|^2 \sigma_j^2 \quad (3)$$

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=0}^M a_{ij}(m) e^{-2\pi i f m} \quad (4)$$

ここで、 $p_{ii}(f)$:時系列データ $x_i(t)$ のパワースペクトル、 $A(f)$:成分 $a_{ij}(f)$ を要素とする行列、 σ_j^2 :イノベーションの分散である。 $a_{ij}(f)$ は $a_{ij}(m)$ のフーリエ変換によって求められる。なお、参考として式(3)から周波数ごとにその周波数におけるパワースペクトル密度に占める各変数の寄与率が得られる。MARモデルでの現象の再現性を確認するために、本研究で対象とした潮差による地形変化への影響が顕著に見られたH.W.L.のコンター変化(結果は後述)を対象に、各周波数においてパワースペクトルに占める各変数の寄与率を求めた。

得られたパワースペクトルから、満月・新月の周期である半朔望周期である14.77日周期と近地点周期である27.55日周期における海浜地形変化の周期性を検討した。この二つの周期において、起潮力が大きくなり、大きな潮差が生じる。本研究では、これらの周期性を判定するために、ピーク強度という指標を導入した。ピーク強度

はその周波数におけるパワースペクトル密度を全平均パワーで標準化したものである。例えば、ピーク強度が10というのは、その周波数において平均の10倍のパワーを有しており、強い周期性を有していると判断できる。実際には、ピーク強度の有意検定は、ゼロパディングや周波数領域でのフィルターによる平滑化の影響を考慮した等価自由度を有した χ^2 分布を用いて、スペクトルのピークはホワイトノイズからランダムに生成されたものであるとした帰無仮説を有意水準5%で棄却することで行った(Koopmans, 1974; Priestley, 1981; Von Storch & Zwiers, 2001)。FFT法、AR法ともに同じ方法により検定した。

ピーク強度はコンターごとの全体のパワーが異なることから、基準高さ間での大小比較ができない。そのため、周波数領域における振幅をパワースペクトル密度の絶対値として式(5)により求めた。

$$Ampl. = 2 |X(f)| \cdot df \quad (5)$$

ここで、 $X(f)$:周波数 f におけるスペクトル成分、 df :周波数間隔である。

また、潮差、平均海面水位、沖波エネルギーフラックスのパワースペクトルも同様に求めた。各高さのコンター変化の位相については、FFT法による潮差とのクロススペクトルから潮差に対する位相差として整理した。また、参考として、各高さのコンター変化と潮差のコヒーレンスについても求めた。なお、クロススペクトルのコスプレクトル、クォドスペクトルについても三角フィルターで5回の平滑化を行った。

3.2 統計解析

満月及び新月に伴った大潮とスーパームーンに伴ったking tideによる潮差の増大を評価した。なお、本研究ではスーパームーンを近地点となった時刻から24時間以内の満月および新月と定義した。ここで、波崎海岸では大潮が満月及び新月の後、0日から2日遅れて生じることから、満月・新月及びスーパームーンの当日の潮差は必ずしも完全に大潮を迎えていないと考えられる。そのため、潮差の増大についての評価は、大潮よりも少し前のタイミングでの比較となってしまふことから、実際の増大と比較すると過小評価された値であることに注意が必要である。

また、満月・新月及びスーパームーンと同じ日に観測された地形変化を対象に統計解析した。地形変化に対する解析については、以下の理由により上述の大潮の時間的な遅れは無視できる。スペクトル解析で得られた位相関係において、潮差が最大となるよりも数日前に地形変

化が最大となる結果(後述)が示されていることから、結果的に満月・新月及びスーパームーンと同じ日の地形変化が最も顕著であり、本研究で対象する現象の解析においては、同日の地形変化を用いることが合理的となる。

具体的には、各イベント時(満月・新月及びスーパームーンとなる日)における観測された潮差及びコンター変化の平均値と全観測データの平均値と比較した。ここでイベント時の平均値が全観測データの平均値と同じであるという帰無仮説に対して、統計的仮説検定のt検定を行い、p値0.05で棄却した。また、イベントによる影響をより詳細に評価するため、H.W.L.のコンター変化の超過確率をそれぞれ求めた。

さらに、14.77日周期と27.55日周期での潮差の増大が波浪に対する海浜地形変化の応答に及ぼす影響を検討するために、H.W.L.のコンター変化と沖波エネルギーフラックスの線形回帰式を求めた。全観測データを対象とした回帰式とスーパームーンのイベント時を対象とした回帰式を比較することで、スーパームーンに伴った海浜地形応答の変化を議論した。

4. 結果

4.1 潮差に関連した地形変化の周期性

FFT法によるコンター変化(H.W.L.及びM.W.L.)のパワースペクトルは1年周期と半年周期においてピークを示す(図-7(a))。この1年周期と半年周期のピークは本研究で対象とした高さ全体で見られ(図-8(a))、波の遡上域における海浜地形が波浪の季節変動によって変化していること(Eichentopf et al., 2020)を示すものである。これに対応して沖波エネルギーフラックスのパワースペクトル(図-9)も1年周期と半年周期を示すが、それ以外の周期帯においては有意なピークは確認できなかった。このことから、波浪成分は潮差に関連した14.77日周期及び27.55日周期における周期性を有しておらず、これら二つの周期における地形変化に波浪の変動は大きな影響を与えていないと考えられる。

FFT法によるH.W.L.のコンター変化のパワースペクトルにおいて、最も鋭いピークは14.77日周期(半朔望周期)で見られる。これは14.77日周期の地形変化がH.W.L.において最も支配的な地形変化プロセスであることを示すものである。この14.77日周期における大きなピーク強度

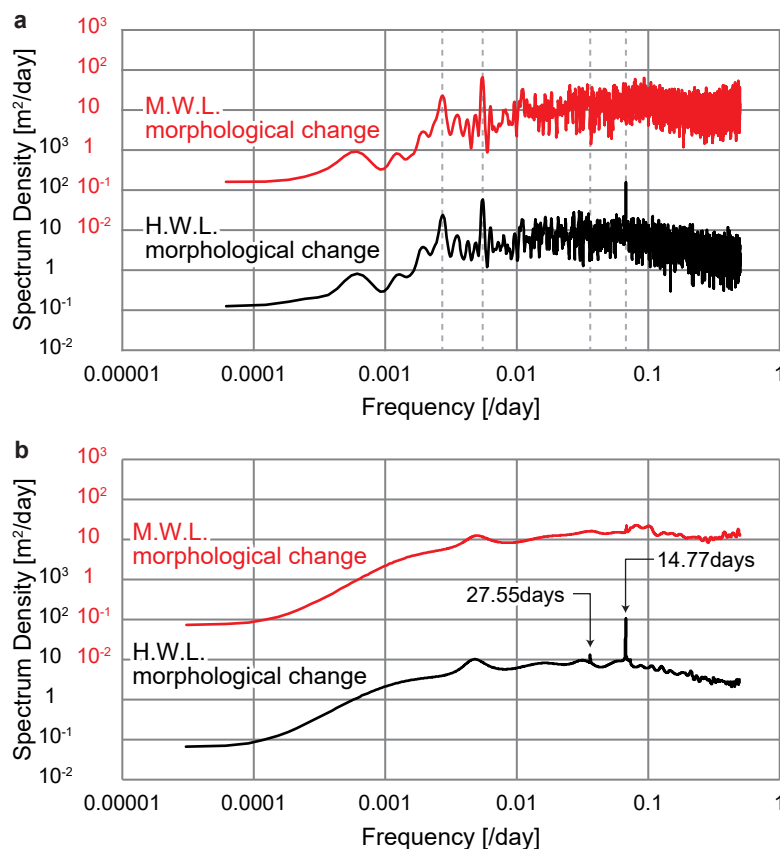


図-7 H.W.L.及びM.W.L.のコンター変化のパワースペクトル。(a)FFT法による推定結果、(b)AR法による推定結果。点線は左から1年周期、半年周期、27.55日周期、14.77日周期を表す。

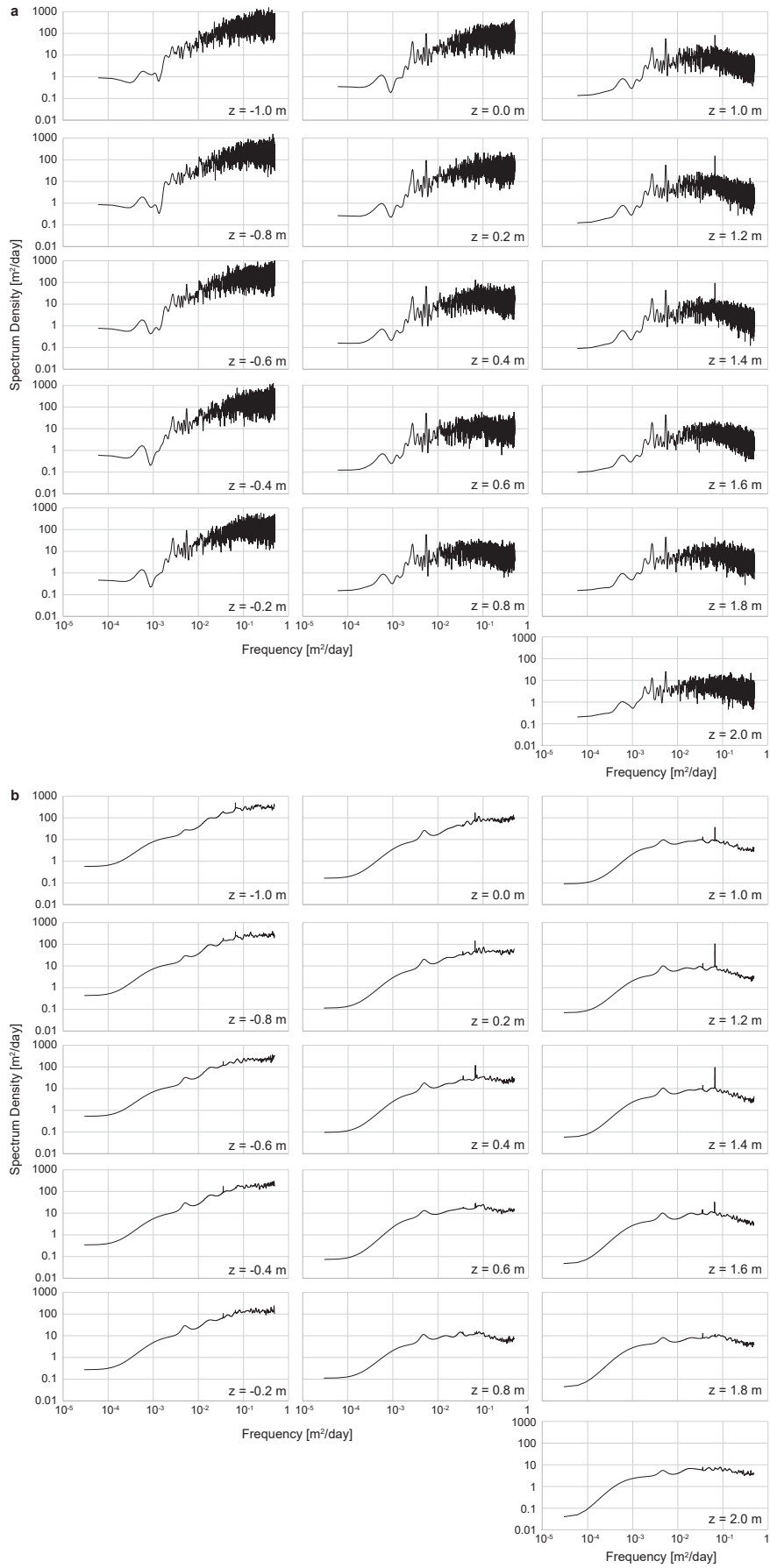


図-8 各高さのコンター変化のパワースペクトル(高さ0.2 m刻み)。(a)FFT法による推定結果, (b)AR法による推定結果。

は、H.W.L.を中心に見られ、H.W.L.±0.5 mの高さの範囲でH.W.L.から離れるに従ってピーク強度が小さくなっている(図-10(a)). この高さの範囲を以降では上部遡上域と呼ぶ. 同様に、上部遡上域よりも低い場所(L.W.L.付近まで)でも14.77日周期において大きなピーク強度が見られることから(図-10(a)), この高さの範囲を以降では下部遡上域と呼ぶ. なお、これらの14.77日周期のピークは、広範囲の高さにおいて統計的に有意な結果($\alpha = 0.05$)であるとともに、全ての周期帯の中で最も大きなものである. 以上をまとめると、波の遡上域における地形変化は、上部と下部の二つの領域で14.77日周期の強い周期性を有して変動していることが示された.

この14.77日周期の地形変化の振幅は、上部遡上域と下部遡上域でおおよそ同程度の大きさである(図-10(b)). 一方で、当該周波数におけるコンター変化のスペクトル成分の位相は、上部遡上域と下部遡上域の境界においておおよそ逆位相(位相差: 約 0.8π)となっている(図-10(c)). また、潮差との位相差(図-10(c))によると、上

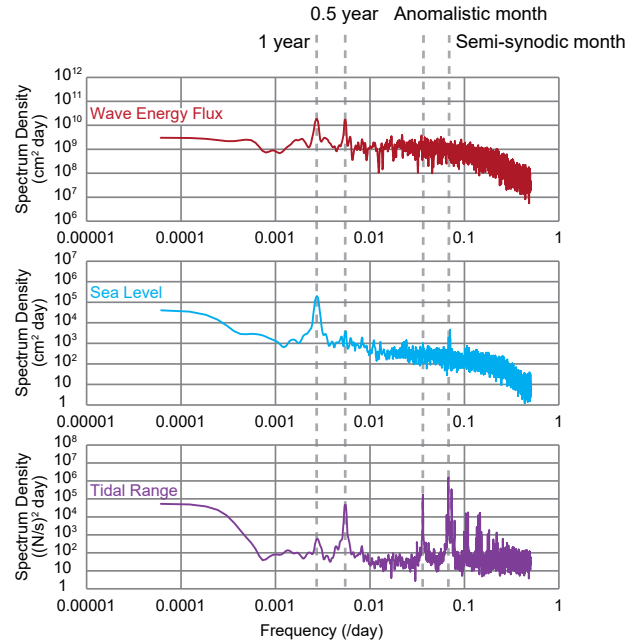


図-9 沖波エネルギーフラックス、平均海面水位、潮差のパワースペクトル

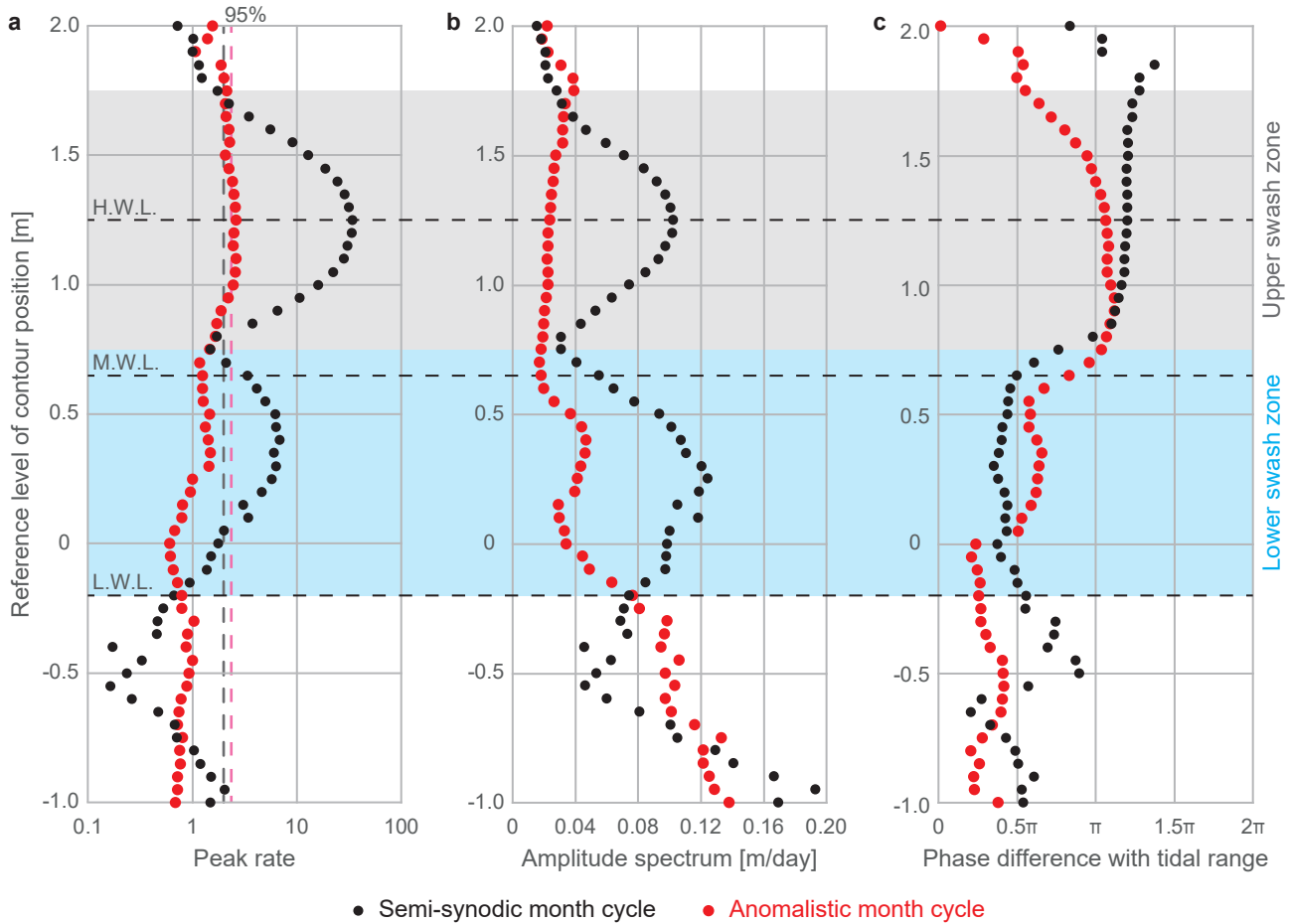


図-10 各高さのコンター変化における半朔望周期(14.77日周期)と近地点周期(27.55日周期)のスペクトル成分の指標. (a)ピーク強度, (b)振幅, (c)潮差に対するコンター変化の位相差. 黒丸: 14.77日周期, 赤丸: 27.55日周期, 縦破線: 5%有意水準. 14.77日周期成分はFFT法による推定値, 27.55日周期成分についてはAR法による推定値, (c)についてはいずれの周期成分についてもFFT法によって推定した.

部遡上域においては潮差が最大となる大潮の約1.5日前にコンターの後退量(侵食量)が最大となる。それに対応して、ほぼ同程度のコンターの前進(堆積)が大潮の数日前に下部遡上域で生じる。以上のように、14.77日周期におけるパワースペクトルのピークと潮差との位相関係から、14.77日周期での潮差の増大に伴って上部遡上域では周期的に侵食が生じやすくなり、逆に下部遡上域では周期的な堆積が生じやすくなる事が明らかとなった。

次に、27.55日周期(近地点周期)については、FFT法によるパワースペクトルではピークを十分に確認できなかったものの(図-7(a), 図-8(a)), AR法によって得られたパワースペクトルでは上部遡上域を中心に有意なピーク($\alpha = 0.05$)が認められた(図-7(b), 図-8(b), 図-10(a))。有意なスペクトルのピークを示す領域は、14.77日周期における周期的な地形変化で定義した上部遡上域とほぼ一致する。一方で、下部遡上域においては有意なピークが確認できず、一部の領域ではピーク強度が1を下回っている。各高さのパワースペクトル(図-8(b))においては、27.55日周期でのピークが確認できることから、下部遡上域においても27.55日周期の周期的な地形変化が存在すると思われるものの、他の周期帯のスペクトル密度と比較して小さく、このような非常に小さい現象を統計解析で評価することは難しいと考えられる。このため、下部遡上域については、27.55日周期の地形変化を議論せず、次節の統計解析においては上部遡上域を中心に議論することとした。H.W.L.のコンター変化の27.55日周期におけるパワースペクトル密度は、14.77日周期のパワースペクトル密度の11%しかないものの、ピーク強度は2.6であり、平均パワーと比較すると十分に大きく、全ての周期帯の中で2番目に大きなピークである(図-7(b))。つまり、上部遡上域の地形変化を考える上で、14.77日周期と27.55日

周期の周期性は無視できない影響を有していることを意味する。

27.55日周期におけるH.W.L.のコンター変化と潮差の位相差によると、潮差が最大となる0.8日前に後退量が最大となる(図-10(c))。この結果は、14.77日周期における地形変化とも同様の結果であることから、27.55日周期での潮差の増大によっても上部遡上域で周期的に侵食が生じ

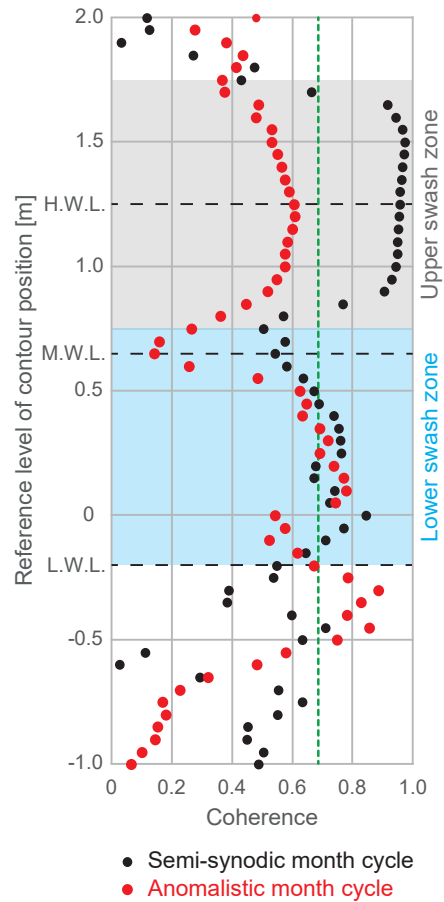


図-11 各高さのコンター変化と潮差のコヒーレンス

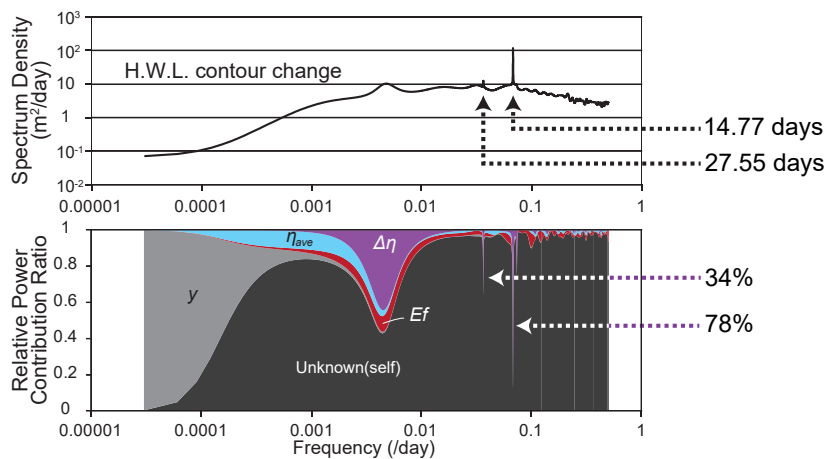


図-12 H.W.L.のコンター変化のパワースペクトルにおける各変数の寄与率。潮差($\Delta\eta$)の寄与率は14.77日周期において78%、27.55日周期において34%。

やすくなることが明らかとなった。

なお、スペクトル解析によって示された14.77日周期と27.55日周期の周期的な地形変化は、潮差の周期性と完全に一致しており、すでに上述しているように、これらの周期的な地形変化は潮差の変動によって生じているものと見做した。実際に、潮差とのコヒーレンス(図-11)やMARモデルにおけるH.W.L.のコンター変化のパワースペクトルへの寄与率(図-12)においても、遡上域の地形変化において潮差との高い相関性や潮差の大きな寄与が認められ、潮差の関与を裏付けている。

4.2 満月・新月及びスーパームーンに伴った侵食

スペクトル解析では、満月及び新月や月の近地点に伴った潮差の増大によって上部遡上域において侵食が生じやすくなることが示された。満月及び新月による潮差の増大は大潮であり、近地点が重なったスーパームーンによる

潮差の増大はking tideである。波崎海岸における潮差の全平均値は1.04 m ($n = 9,060$)であったのに対し、満月及び新月の日の潮差の平均値は1.30 m ($n = 613$)であり、スーパームーンの日潮差の平均値は1.43 m ($n = 91$)であった。これらの潮差の増大は統計的に有意な増大($\alpha = 0.05$)であり、実際の大潮は満月や新月の数日後となることを考慮すると、大潮及びking tideにおける潮差はさらに大きいと考えられる。

コンター変化の全平均値は、いずれの高さにおいてもおおよそ0 m/dayであった(図-13(a))。これは本研究で対象とした範囲において長期的な地形変化が生じていないことを意味する。これに対して、満月・新月及びスーパームーンのイベント時の上部遡上域におけるコンター変化の平均値はいずれも負の値を示した。この結果は、スペクトル解析において明らかとなった14.77日周期と27.55日周期での潮差の増大に伴って上部遡上域の侵食が生じ

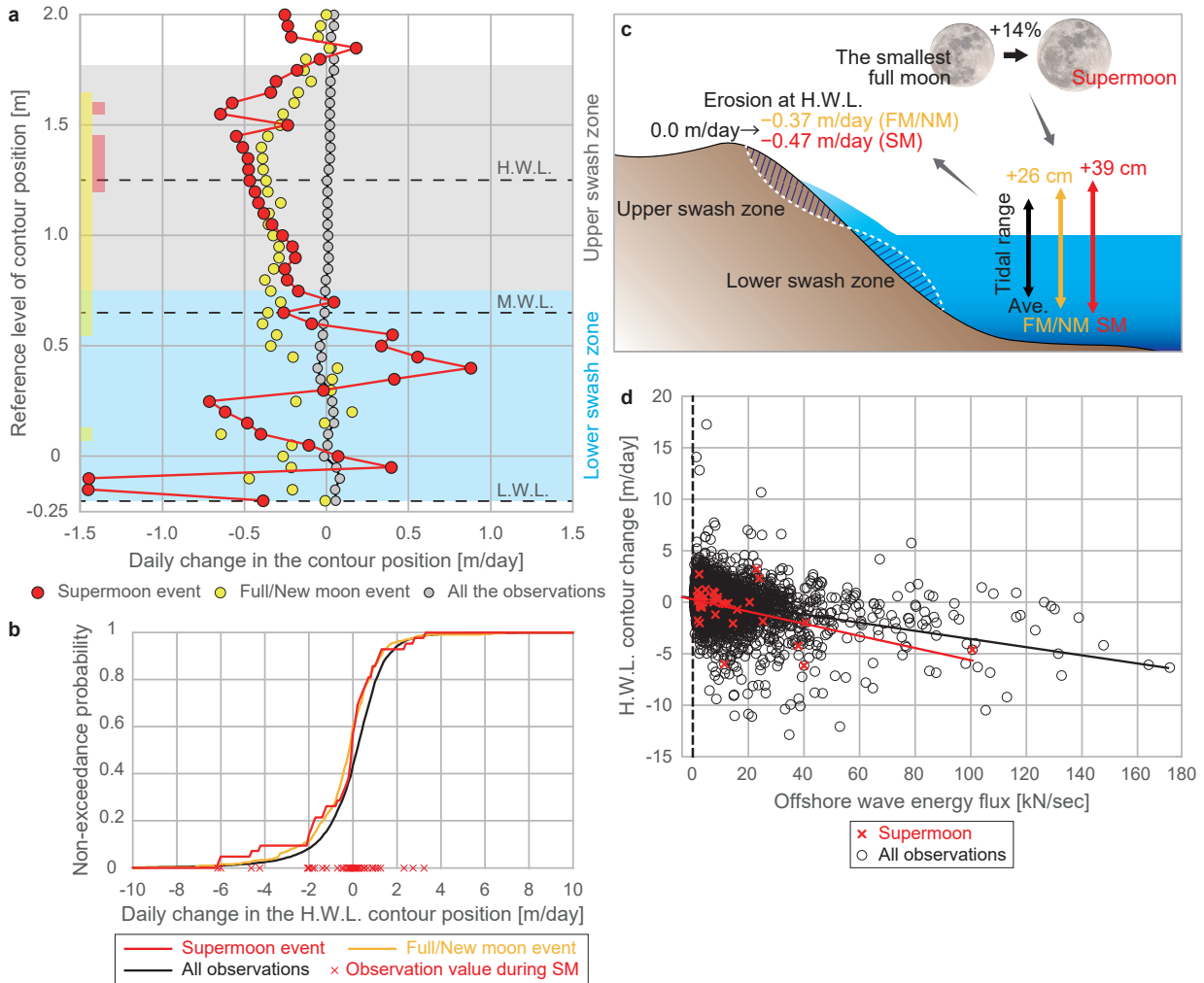


図-13 (a)各高さにおけるコンター変化量の平均値。縦軸部分の黄・赤のバーは統計的有意(5%)な範囲。(b)H.W.L.のコンター変化の非超過確率。最下部分における赤の×はスーパームーンイベント時における観測値。(c)スーパームーンに伴う潮差の増大及びH.W.L.での侵食の増大の概略図。(d)H.W.L.のコンター変化と沖波エネルギーフラックスの相関関係。

やすくなることと一致する結果である。なお、満月・新月時においては、おおよそ上部遡上域全体で統計的に有意なコンターの後退傾向が認められたが、スーパームーン時においては、H.W.L.周辺のみでしか統計的に有意な傾向が認められなかった。これは全観測データ数に対して、スーパームーンのイベント数が少ないことも一因であると考えられる。H.W.L.のコンター変化の平均値 \pm 1S.D.(標準偏差)は、全ての観測データを対象とすると 0.0 ± 1.71 m/day ($n = 4,905$)であったのに対し、満月・新月時では -0.37 ± 1.75 m/day ($n = 325$)、スーパームーン時では -0.47 ± 1.93 m/day ($n = 42$)であった(図-13(b), 図-13(c))。なお、対象とした有義波高の平均値にはイベント間で有意な差($\alpha = 0.05$)はなく、それぞれ1.34 m(全観測データ)、1.37 m(満月・新月)、1.43 m(スーパームーン)であった。

下部遡上域については、満月・新月及びスーパームーンのイベント時におけるコンター変化は大きくばらついており、有意な傾向もほとんどの高さで見られなかった。スペクトル解析の結果によると、潮差の増大に伴って下部遡上域におけるコンターが前進しやすくなること示されており、その周波数成分の振幅は上部遡上域における前進の振幅と同程度であった(図-10(b))。しかしながら、下部遡上域の地形変化は上部遡上域の地形変化と比べて変動が大きく、他の周波数成分における地形変化プロセスが相対的に大きな変動として現れることから、14.77日周期と27.55日周期での潮差の増大に伴った堆積プロセスを実際の地形変化からは明確に見出しにくいものと考えられる。これは、下部遡上域のピーク強度(図-10(a))が上部遡上域と比較して小さいことから推察される。

H.W.L.のコンター変化と沖波エネルギーフラックスの線形回帰式においては、波浪が大きくなるにつれてコンターの後退量(つまり、侵食量)が大きくなる傾向が見られた(図-13(d))。これは定性的にも理解できる結果である。また、全観測データを対象とした線形回帰式の切片は $+0.39$ m/dayであり、傾きは -0.040 (m s)/(kN day)であった。一方で、スーパームーンのイベントを対象とした線形回帰式の切片は $+0.27$ m/dayであり、全観測データを対象としたものよりもわずかに小さく、傾きは -0.059 (m s)/(kN day)であり、全観測データを対象としたものと比べ1.49倍の傾きであった(図-13(d))。つまり、H.W.L.のコンター変化において、スーパームーンに伴った潮差の増大は、低波浪時のコンターの前進を小さくし、高波浪時のコンターの後退を大きくすると考えられる。このスーパームーン時のコンターの後退は、通常時と比較して、同じ

波浪条件下で49%以上大きくなることが推測される。この潮差の増大に伴った地形応答の変化は有意水準18.2%で有意なものであり、必ずしも統計的に高い有意性を持ったものではない。沖波エネルギーフラックスに対する海浜応答は単純な線形回帰に従わないと考えられることから、本検討はスーパームーンに伴った潮差の増大が波浪に対する海浜地形の応答感度に及ぼす影響を概略的に把握するためのものである点に注意されたい。

5. 考察

5.1 海浜地形変化における潮汐変動の影響

以上のように、上部遡上域の海浜は潮差の増大によって、より侵食が生じやすい状態となることが示された。逆の効果として、小潮のように潮差が小さい場合には、より堆積が生じやすくなるものと考えられる。ここでは、潮差の大小に応じて地形変化が影響を受けるのは、潮汐に伴った海面変動に対応した前浜の地下水位の応答が関連したものであると仮説を示す。

既存の研究において、前浜への海水浸透や前浜での地下水滲出が土砂移動に影響を与えていることが示されている(Clarke & Eliot, 1987; Coco et al., 2004; Duncan, 1964; Masselink & Li, 2001)。例えば、上げ潮時においては、波の遡上は前浜の地下水位よりも高い位置まで到達し、遡上した海水は海浜に浸透する(図-14)。それによって引き波が弱められることで、より多くの土砂が上部遡上域に取り残され、堆積が生じる。逆に、下げ潮時においては、

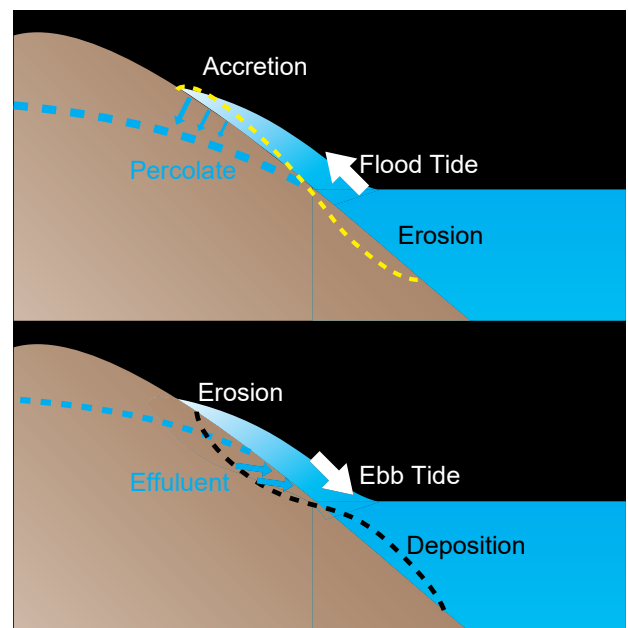


図-14 潮汐変動に伴った海水の浸透と地下水の滲出による地形応答

地下水位は海面水位の低下に追従して低下するものの、地下水位の低下速度は海面の低下速度と比較すると遅い (Emery & Foster, 1948) ことから、相対的に高い位置になった地下水が前浜の表面から滲出し(図-14)、引き波を強くするとともに、前浜が緩い状態となる。それにより、より多くの土砂が上部遡上域から下部遡上域へと移動しやすくなる。このような既存の研究で知られている地形変化は一潮汐間に生じる地形変化プロセスのみを説明したものである。

本研究で明らかとなった潮差の増大によって生じる地形変化プロセスを考慮すると、一潮汐間に生じる地形変化プロセスにおける侵食量と堆積量が潮差によって影響を受けているのではないかと考えられる。地下水の滲出が生じる下げ潮時において、地下水位の低下速度は海面水位と比べて遅いことから、大きな潮差はより大きな海面水位と地下水位の差を生じさせる。一方で、上げ潮時においては、海水の浸透は速く、海面の上昇に伴って地下水位も急速に上昇する (Turner et al., 1997) ことから、海面水位と地下水位に大きな差は生じにくい。つまり、上げ潮時の上部遡上域での堆積は潮差の大きさに関わらず、大きく変化しないのに対し、潮差が大きい場合には、下げ潮時に上部遡上域での侵食がより顕著となる。その結果、潮差が大きい場合には相対的に下げ潮時の侵食が支配的なプロセスとなり、潮差が小さい場合には上げ潮時の堆積が支配的なプロセスとなるものと考えられる。以上のプロセスが14.77日周期(半朔望周期)と27.55日周期(近地点周期)の地形変化が生じる原因の仮説として本研究で提案するものである。

海水の浸透と地下水の滲出に伴った土砂移動は、堆積物の有効重量や土砂移動が生じる境界層の厚さの影響を受けることから (Butt et al., 2001)、本研究で得られた潮差の増大に伴った地形変化の大きさは、その海岸の潮差や海水の透水性に関連した底質粒径 (Kulkarni et al., 2004; Masselink & Li, 2001) によって変化すると考えられる。周期的な地形変化の要因の詳細な解明と他の海岸における影響の大きさについては、さらなる検討が必要である。

5.2 海浜地形変化の複雑性

海浜応答は様々な影響が複雑に作用して生じるものである。本研究で得られた結果においても、そのような地形変化の複雑性として考慮すべき種々の要因による影響が見受けられた。以下に、考察として記述する。

14.77日周期及び27.55日周期のスペクトル成分において、上部遡上域における侵食の最大時と潮差の最大時が完全には一致せず、それぞれ1.5日、0.8日のずれ(潮差の

最大時よりも侵食の最大時の方が早い)が生じていた(図-10(c))。この時間的なずれは、海浜地形変化に及ぼす地形形状そのものの影響 (Eichentopf et al., 2020) によるものが一因と考えられる。具体的には、既に侵食が生じた状態の海浜は、侵食を起こした波浪と同程度の波浪が再び作用しても、侵食量は小さくなりやすい。逆に、堆積が続いていた状態の海浜は、小さな波浪でも侵食が生じやすい。このように事前の海浜の状態によって海浜地形変化は影響を受けることから、周期的に生じる地形変化においても地形変化が最大となるタイミングは必ずしもその影響因子が最大となるタイミングとは一致しないと考えられる。また、14.77日周期で潮差が変動するが、満潮位と干潮位の変動の大きさが非対称であるため、平均海面水位も14.77日周期でわずかに変動する(図-9)。海面水位の変動は海浜地形変化にも影響すると考えられており (Barnard et al., 2015)、14.77日周期での海面水位の変動が海浜地形の応答に影響を及ぼし、時間的なずれが生じる可能性が考えられる。

14.77日周期における上部遡上域と下部遡上域の海浜地形変化はおおよそ逆位相(位相差: 約 0.8π)であり、潮差の増大に伴って上部遡上域が侵食される際に、下部遡上域では堆積が生じる(図-10(c))。しかしながら、完全に逆位相ではないことから、下部遡上域の地形変化は波の遡上域よりも沖側の海浜地形の影響を受け、本研究で十分に検討できていない波の遡上域外との相互作用によるものである可能性が考えられる。

本研究では、波浪に対する海浜地形の応答(図-13(d))についてもスーパームーンに伴った潮差の増大の影響を受けていることが示唆されたが、前述したように地形応答は単純な線形回帰式で表すことは難しい。実際の海浜応答は長周期波などの影響も受けると考えられ、波浪も地形の影響を受けて変形することから事前の海浜の状態による影響も考慮しなければならない。潮差の変動が波浪に対する海浜応答感度に及ぼす影響については、さらなる検討によって明らかにする必要がある。

以上のように、海浜地形変化は複数のプロセスによって生じる複雑な現象ではあるが、本研究で明らかにされた14.77日周期と27.55日周期の地形変化プロセスは、その中でも最大規模の周期的変動を有するプロセスの一つである。実際に、H.W.L.の地形変化において、14.77日周期の地形変化は全ての周期成分の中で最も大きな変動成分であり、27.55日周期の地形変化が2番目に大きな変動成分であった。このように、潮差の増大に伴う地形変化プロセスは、最も重要な周期的変動であると言える。一方で、この地形変化プロセスは、周期的な現象であることから、

侵食と堆積を周期的に繰り返し、基本的には長期的な地形変化には影響を及ぼさない。しかしながら、周期的な潮差の増大が波浪に対する海浜応答感度にも影響を与え、高波浪時にはより大きな侵食を招く可能性が示唆されていることから、潮差の増大と高波浪が重なった場合には、極めて大規模な侵食が生じる可能性がある。このような短期的に生じる大規模な地形変化は、回復するまでに長い時間を要したり、場合によっては海浜の地形変化特性を変えるもの(レジームシフト: Kuriyama & Yanagishima, 2018)となったりすることで、長期的な地形変化にも影響を与えることから、長期的な地形の変動を考える上でも潮差の変動に伴う周期的な地形変化プロセスは重要な現象であると考えられる。

6. 結論

本研究では、25年間の海浜地形観測データに対しスペクトル解析と統計解析を行うことで、月の位相と月と地球の距離に関連した周期での潮差の増大によって、波の遡上域の海浜地形が周期的に変化していることを明らかにした。満月及び新月による潮差の増大である大潮は14.77日周期で起き、27.55日周期で起こる近地点によっても潮差は増大する。遡上域の地形変化は14.77日の半朔望周期と27.55日の近地点周期で変動しており、二つの周期が同期したスーパームーンによる潮差の増大であるking tideによって上部遡上域が侵食されやすくなることが示された(スーパームーンエフェクト)。これまでking tideに伴った高い海面水位によって沿岸域の浸水リスクが高まることが知られていたものの、本研究ではそれだけではなく海岸侵食リスクも高まることを明らかにした。スーパームーンによって生じるking tideは天体周期であり、事前に発生日を正確に予測できることから、スーパームーンと同時に高波浪が生じることが予測される場合には事前の十分な注意が必要である。

本研究で明らかにした地形変化プロセスは、既存の地形変化モデルにおいて、ほとんど考慮されていなかったものであり、この地形変化プロセスを新たに数値モデルにおいても考慮することで、特に短期的な地形変化の精度が大きく改善されることが期待される。高波浪に伴った一時的な侵食を正確に推定できることは沿岸域防災を考える上で非常に重要である。必要な浜幅の確保などの長期的な海岸管理においても有用な情報として活用されることが期待される。また、この地形変化プロセスは、海面の変動によって生じる地形変化の一つであり、長期的な海面の変化によって生じる地形変化を明らかにする

上でも重要なものである。将来の海面上昇や波候の変化(Hemer et al., 2013)によって深刻な海岸侵食や汀線の後退が生じる(Vitousek et al., 2017)ことが予測されている中で、スーパームーンエフェクトを新たに考慮した数値モデルの開発を進展させることにより、より精緻な沿岸域のリスク管理が実施できると考えられる。

(2021年6月4日受付)

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費(課題番号: 19K15106, 17H03315)の助成を受けたものである。また、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラムのもとで実施された。

海面水位データ及び波浪データは、国土交通省から提供を受けたものである。ここに記し、感謝の意を表す。また、長期の海浜地形データは波崎海洋研究施設に携わった全てのメンバーによる多大な寄与で取得されたものである。ここに深い謝意を表す。なお、本研究で使用したデータセットは、Banno & Kuriyama(2020b)において公開されている。

本原稿作成にあたり、港湾空港技術研究所の奥谷丈特別研究主幹にも多くの指摘を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 加藤一正, 柳嶋慎一(1992). 長周期波によるバームの侵食. 土木学会論文集, 452, 41–50. https://doi.org/10.2208/jscej.1992.452_41
- 2) 国立天文台(2020). 地球に最も近い満月. <https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2020/04-topics01.html>
- 3) 日野幹雄(1977). スペクトル解析. 朝倉書店.
- 4) 柳嶋慎一, 加藤一正, 長谷川 巖, 岩佐 直人(2007). 透水層埋設による海浜の安定化. 土木学会論文集B, 63(1), 73–91. <https://doi.org/10.2208/jscejb.63.73>
- 5) Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In *2nd International Symposium on Information Theory* (pp. 267–281). Budapest: Akademiai Kiado.
- 6) Aubrey, D. G., Inman, D. L., & Nordstrom, C. E. (1976). Beach profiles at Torrey Pines, California. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 15, 1297–1311. <https://doi.org/10.9753/icce.v15.75>
- 7) Balling, R. C. Jr., & Cervený, R. S. (1995). Influence of lunar phase on daily global temperatures. *Science*,

- 267(5203), 1481–1483. <https://doi.org/10.1126/science.267.5203.1481>
- 8) Banno, M., & Kuriyama, Y. (2020a). Supermoon drives beach morphological changes in the swash zone. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089745. <https://doi.org/10.1029/2020GL089745>
- 9) Banno, M., & Kuriyama, Y. (2020b). Dataset for manuscript “Supermoon drives beach morphological changes in the swash zone” [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4054577>
- 10) Barnard, P., Hoover, D., Hubbard, D. M., Snyder, A., Ludka, B. C., Allan, J., Kaminsky, G. M., Ruggiero, P., Gallien, T. W., Gabel, L., McCandless, D., Weiner, H. M., Cohn, N., Anderson, D. L., & Serafin, K. A. (2017). Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015–2016 El Niño. *Nature Communications*, 8, 14365. <https://doi.org/10.1038/ncomms14365>
- 11) Barnard, P. L., Short, A. D., Harley, M. D., Splinter, K. D., Vitousek, S., Turner, I. L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K. R., Doria, A., Hansen, J. E., Kato, S., Kuriyama, Y., Randall - Goodwin, E., Ruggiero, P., Walker, I. J., & Heathfield, D. K. (2015). Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 8(10), 801–807. <https://doi.org/10.1038/ngeo2539>
- 12) Bruun, P. (1965) : Sea level rise as a cause of shoreline erosion, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, Proc. ASCE, Vol. 88, WW1, 117–130.
- 13) Butt, T., Russell, P., & Turner, I. (2001). The influence of swash infiltration - exfiltration on beach face sediment transport: Onshore or offshore? *Coastal Engineering*, 42(1), 35–52. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00046-6)
- 14) Carpenter, T. H., Holle, R. D., & Fernandez-Partagas, J. J. (1972). Observed relationships between lunar tidal cycles and formation of hurricanes and tropical storms. *Monthly Weather Review*, 100(6), 451– 460. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0451:orbltc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0451:orbltc>2.3.co;2)
- 15) Clarke, D. J., & Eliot, I. G. (1987). Ground water-level changes in a coastal dune, sea-level fluctuations and shoreline movement on a sandy beach. *Marine Geology*, 77, 319–326. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(87\)90120-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(87)90120-4)
- 16) Clarke, D. J., Eliot, I. G., & Frew, J. R. (1984). Variation in subaerial beach sediment volume on a small sandy beach over a monthly lunar tidal cycle. *Marine Geology*, 58, 319–344. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90207-x](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90207-x)
- 17) Cochran, E. S., Vidale, J. E., & Tanaka, S. (2004). Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, 306(5699), 1164–1166. <https://doi.org/10.1126/science.1103961>
- 18) Coco, G., Burnet, T. K., Werner, B. T., & Elgar, S. (2004). The role of tides in beach cusp development. *Journal of Geophysical Research*, 109, C04011. <https://doi.org/10.1029/2003JC002154>
- 19) Duncan, U. S. (1964). The effect of water table and tide cycle on swash - backwash sediment distribution and beach profile development. *Marine Geology*, 2, 117–130. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(64\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(64)90039-8)
- 20) Eichertopf, S., Alsina, J. M., Christou, M., Kuriyama, Y., & Karunarathna, H. (2020). Storm sequencing and beach profile variability at Hasaki, Japan. *Marine Geology*, 424, 106153. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106153>
- 21) Emery, K. O., & Foster, J. F. (1948). Water tables in marine beaches. *Journal of Marine Research*, 7, 644–654.
- 22) Flick, R. E. (2016). California tides, sea level, and waves— Winter 2015–2016. *Shore and Beach*, 84, 25–30.
- 23) Gallien, T. W., Barnard, P. L., van Ormondt, M., Foxgrover, A. C., & Sanders, B. F. (2013). A parcel-scale coastal flood forecasting prototype for a Southern California urbanized embayment. *Journal of Coastal Research*, 29(3), 642–656. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-12-00114.1>
- 24) Gangopadhyay, A., Cornillon, P., & Jackson, L. B. (1989). Autoregressive modeling for the spectral analysis of oceanographic data. *Journal of Geophysical Research*, 94(C11), 16,215–16,226. <https://doi.org/10.1029/jc094ic11p16215>
- 25) Gratiot, N., Anthony, E. J., Gardel, A., Gauchere, C., Proisy, C., & Wells, J. T. (2008). Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience*, 1(3), 169–172. <https://doi.org/10.1038/ngeo127>
- 26) Hemer, M., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3(5), 471–476. <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
- 27) Katoh, K., & Yanagishima, S. (1995). Changes of sand grain distribution in the surf zone. *Proceeding Coastal Dynamic '95*, 410, 355–364.

- 28) Koopmans, L. H. (1974). *The spectral analysis of time series*. New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-07407-5>
- 29) Kulkarni, C. D., Levoy, F., Monfort, O., & Miles, J. (2004). Morphological variations of a mixed sediment beachface (Teignmouth, UK). *Continental Shelf Research*, 24, 1203–1218. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.005>
- 30) Kuriyama, Y. (2002). Medium - term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 107(C9), 3132. <https://doi.org/10.1029/2001JC000899>
- 31) Kuriyama, Y., & Yanagishima, S. (2018). Regime shifts in the multi - annual evolution of a sandy beach profile. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 3133–3141. <https://doi.org/10.1002/esp.4475>
- 32) LaFond, E. C. (1939). Sand movement near the beach in relation to tides and waves. *Proceeding of 6th Pacific Science Congress*, 8, 795–799.
- 33) Levoy, F., Anthony, E.J., Dronkers, J., Monfort, O., Izabel, G. & Larssonneur, C. (2017). Influence of the 18.6-year lunar nodal tidal cycle on tidal flats: Mont-Saint-Michel Bay, France. *Marine Geology*, 387, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.03.009>.
- 34) Masselink, G., & Li, L. (2001). The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: A numerical study. *Marine Geology*, 176(1–4), 139–156. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00161-X)
- 35) NOAA (2019). What is a king tide? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/kingtide.html>
- 36) Pertsev, N., & Dalin, P. (2010). Lunar semimonthly signal in cloudiness: Lunar-phase or lunar-declination effect? *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 72, 713–717. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.013>
- 37) Portugal, S. J., White, C. R., Frappell, P. B., Green, J. A., & Butler, P. J. (2019). Impacts of “supermoon” events on the physiology of a wild bird. *Ecology and Evolution*, 9(14), 7974–7984. <https://doi.org/10.1002/ece3.5311>
- 38) Priestley, M. B. (1981). *Spectral analysis and time series*. Vol. 1: Univariate series. Vol. 2: Multivariate series, prediction and control. London: Academic Press.
- 39) Román-Rivera, M. A., & Ellis, J. T. (2018). The king tide conundrum. *Journal of Coastal Research*, 34, 769–771. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-18a-00001.1>
- 40) Turner, I. L., Coates, B. P., & Acworth, R. I. (1997). Tides, waves and the super-elevation of groundwater at the coast. *Journal of Coastal Research*, 13, 46–60.
- 41) Vitousek, S., Barnard, P. L., Limber, P., Erikson, L., & Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>
- 42) Von Storch, H., & Zwiers, F. W. (2001). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511612336>

港湾空港技術研究所報告 第60巻 第1号

2021.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Cyclic Beach Morphological Changes in the Swash Zone
due to Tidal Range Fluctuations
Masayuki BANNŌ · Yoshiaki KURIYAMA
2. Ocean swells induced by the Typhoon Faxai hit Port of Yokohama in 2019
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takumu IWAMOTO · Takashi FUJIKI
3. Dynamics of ocean swells in Toyama Bay
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takashi FUJIKI
4. Study on Stability of Temporary Armor Units against Waves
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Tsutomu TANAKA
5. Study on Wave Pressure acting on Receding Parapet type Seawall
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Naoki TSURUTA
6. Study of slow slip mechanism on plate boundary fault decollement zone
Yuri SUGIYAMA · Shinya TACHIBANA · Yoshiyuki MORIKAWA
7. Development of frictional contact algorithm using weighted least squares for MPM-rigid body
simulation and its application to behavior of open-ended pile driven into the ground
Keita NAKAMURA · Satoshi MATSUMURA · Takaaki MIZUTANI