

海面上昇による汀線変化の簡易推定方法

渡邊国広・加藤史訓

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（以下「IPCC」という。）による第5次評価報告書¹⁾では、既に全世界の平均海面水位は上昇しており、今後も上昇が続くと予測が報告されている。さらにIPCC第51回総会（2019年9月）では、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書（海洋・雪氷圏特別報告書）」²⁾が受諾され、21世紀末（2081～2100年）における全世界の平均海面水位の上昇量予測は、現在（1986～2005年）と比べて、RCP2.6シナリオでは0.39m（0.26～0.53m）、RCP8.5シナリオでは0.71m（0.51～0.92）と第5次評価報告書から上方修正された。2020年12月に文部科学省と気象庁により公表された「日本の気候変動2020」³⁾では、日本沿岸における上昇量もほぼ同程度とされている。

海岸行政においても将来の気候変動に対する適応が課題と認識されており、2019年10月に「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会」（事務局：国土交通省水管理・国土保全局海岸室）が設置された。2020年7月には提言「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方」⁴⁾が公表され、パリ協定の目標と整合するRCP2.6シナリオを前提に、影響予測を海岸保全の方針や計画に反映し、整備を推進していくことが求められた。この提言を踏まえて11月には海岸保全基本方針⁵⁾が変更されており、今後は、この新たな基本方針に基づき、各沿岸の海岸保全基本計画が各都道府県によって変更されていくことになる。

気候変動が海岸に及ぼす影響の1つとして、海面上昇による砂浜の消失が懸念されており、海岸侵食対策についても、海岸保全事業が予算化されていない海岸も含む膨大な数の海岸について、計画の見直しが必要となる。筆者らは、各海岸管理者が所管する海岸の中から優先的に対策を実施する海岸を選定する際に活用できる、海面上昇によ

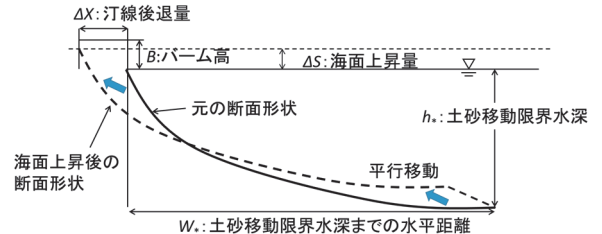


図-1 Bruun則による汀線変化の模式図

る汀線変化の簡便な推定方法の検討⁶⁾を進めており、本稿ではその内容を紹介します。

2. 海面上昇による汀線変化の簡易推定手法

2.1 Bruun則による汀線変化予測

海面上昇による砂浜の汀線変化を予測する手法としてはBruun則による方法が世界中で広く使われており、国内77海岸を対象とした簡易予測では、最も厳しいRCP8.5シナリオで2081～2100年には83%の砂浜が消失すると指摘されている⁷⁾。

Bruun則とは岸沖方向の海浜断面形状に着目し、海面水位の上昇量に応じて平衡断面形状を保つように岸沖方向の土砂移動が起こるとした簡易的なモデルであり（図-1）、岸沖方向の海浜断面内の土砂量に変化しないことを前提としている。全国規模で影響を見積もる場合には1つの砂浜（地先海岸）につき代表断面を1つ決めて推定するので問題とならないが、現実には沿岸方向に土砂が移動する沿岸漂砂が存在し、地先海岸内にも断面内の土砂が増加傾向の箇所と減少傾向の箇所が混在する。そのため、海岸管理者が各地先海岸内の具体的な要対策箇所を抽出するための将来予測においては適用が難しい。

2.2 土砂量変化を考慮した推定方法

上記の課題に対応するため、最近では、沿岸漂砂や養浜等による土砂量変化を考慮できる方法（以下「修正Bruun則」という。）⁸⁾も提案されている。式（1）の右辺第1項までが通常 Bruun則であり、右辺第2項以降を追加することで、沿

岸漂砂や養浜等による土砂量変化も考慮できるように改良されている。

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{dS}{dt} \left(\frac{W_*}{h_* + B} \right) + \frac{\emptyset}{(h_* + B)} - \frac{1}{L(h_* + B)} \frac{dV_{sink}}{dt} + \frac{1}{L(h_* + B)} \frac{dV_{source}}{dt} - \frac{1}{(h_* + B)} \frac{dQ}{dy} \quad (1)$$

ここで、 X ：汀線の変化量 (m)、 S ：海面上昇量 (m)、 W_* ：土砂の移動限界水深までの水平距離 (m)、 h_* ：移動限界水深 (m)、 B ：バーム高 (m)、 L ：海岸延長 (m)、 \emptyset ：移動限界水深より沖からの土砂供給量 (m^3)、 V_{sink} ：漂砂系からの土砂損失量 (m^3)、 V_{source} ：漂砂系への土砂供給量 (m^3)、 dQ/dy ：沿岸漂砂量の沿岸方向の変化量 ($m^3/year/m$)。

岸沖断面内の土砂量が変化する海岸については本手法を用いることが望ましいと思われるが、海面上昇を伴う汀線変化は観測例が乏しい現象であるため、我が国の海岸に適用した場合に得られる精度が不明である。そこで本研究では、相対的な海面上昇を経験しており、測量成果が存在する国内の海岸において本手法の適用性を検証した。

3. 海面上昇を経験した海岸における検証

3.1 日本の海岸における相対的な海面上昇

平均海面水位は、全球平均では2006年から2015年までの10年間で3.6mm/年のペースで上昇していることが報告されており²⁾、我が国の沿岸においても同程度であることが報告されている³⁾。

この規模の上昇量では、これまでに経験してきた海面水位の上昇が海浜地形変化に与えてきた影響を検証することは難しいが、我が国の海岸には地殻変動や地盤沈下（以下「地殻変動等」という。）によって地盤高が低下することで、相対的により大きな海面水位の上昇を経験している海岸が存在する。

本研究では、それらの海岸で生じた海浜地形変化を分析することとし、5海岸に着目した（図-2）。

近傍の潮位観測所で海岸昇降検知センターが公表している地盤変動量の推定値によれば、地盤高の低下は新潟西港で最も大きく9.1mm/年（1989～2005年）、最も小さい胆振海岸で1.8mm/年であった（図-3）。九十九里海岸については九十九里浜侵食対策検討委員会によって15.0mm/年（1968～2012年）であることが示されている⁹⁾。



図-2 対象海岸の位置

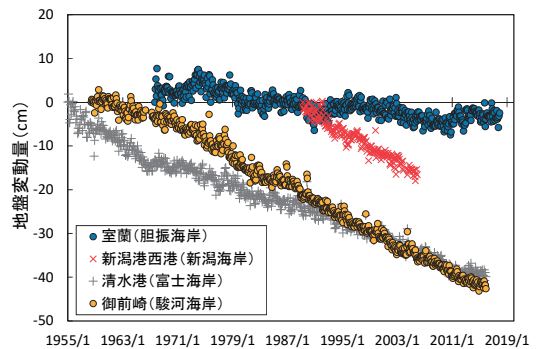


図-3 海岸近傍における地殻変動量

3.2 土砂量変化が既知の海岸における精度検証

式（1）で示した修正Bruun則のうち土砂量変化による影響分である右边第2項以下の合計は、断面内の土砂量変化として観測されるので、式（2）のとおり置き換えることができる。

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{dS}{dt} \left(\frac{W_*}{h_* + B} \right) + \frac{1}{(h_* + B)} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

ここで、 V ：断面内の土砂量の変化 (m^3/m)。

5海岸34測線における2時期の深浅測量結果から各測線における土砂量変化を算出して式（2）の右边第2項に代入することで、汀線変化速度を算定して、測量によって得られた値と比較した。

式（2）による算定結果は、測量による実測値よりも汀線後退が大きくなる傾向となったが、離岸堤や突堤等が存在しない測線では実測値に近い値となっていた（図-4）。地形変化の限界水深までの水平距離が750mを超える遠浅の海岸を除けば、算定値と実測値の差は構造物の設置状況によらず概ね±1.0m/年程度の差に収まっていた。

算定結果のうち、相対的な海面上昇による影響を表す式（2）の右边第1項によるものは第2項の断面内の土砂量変化によるものに比べて小さく、九十九里海岸以外の4海岸では、ほとんどの測線における汀線変化は土砂量変化が卓越していた

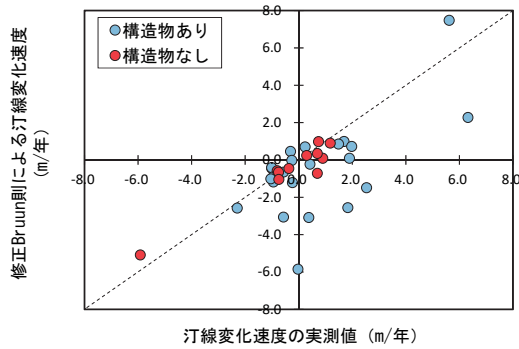


図-4 汀線変化速度の算定結果と実測値

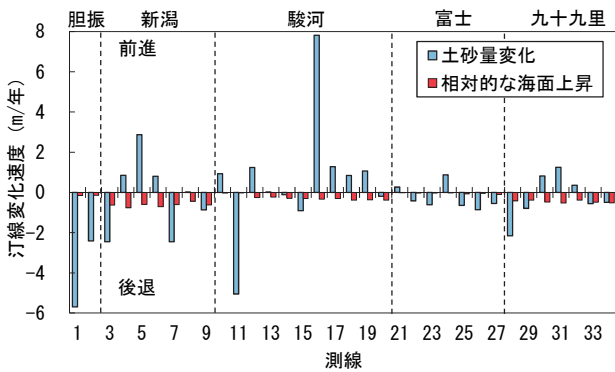


図-5 土砂量変化と海面上昇による汀線変化

(図-5)。

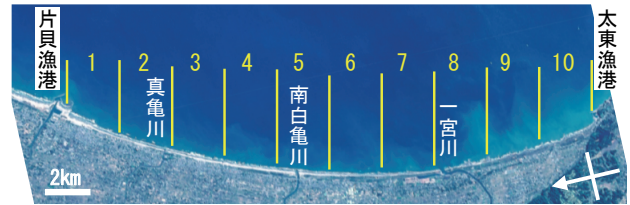
3.3 長大海岸における汀線変化予測の試行

海岸内に堆積域と侵食域が混在する長大な海岸における適用性を確認するため、南九十九里海岸(片貝漁港～太東漁港)に着目し、1977～2015年までの38年間に観測された汀線変化の再現を式(1)により試みた。式(1)を用いたのは養浜実績が既知であり、沿岸漂砂量も数値計算により推定可能であることによる。

算定にあたっては、対象沿岸約23.1kmを沿岸方向に約2.3kmずつ10区画(図-6)に分割することで、場所による汀線変化の違いに対応できるようにした。相対的な海面上昇量は、1977年から2012年までの平均値で設定し、対象期間中に区域6から区域9で実施された計約27.5万 m^3 の養浜の全体積を土砂供給量として反映させた。

式(1)の右辺第5項に用いる沿岸漂砂量の沿岸方向分布は、代表波毎にエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を実施することで求めたものをCase1とし、大木ら¹⁰⁾が提示した地盤沈下量補正後の漂砂量分布を用いたものをCase2とした。

修正Bruun則によって予測された38年間の汀線変化量は、Case1では海岸全体で平均18.5mの後退と算定され、このうち相対的な海面水位の上



地理院タイル(全国ランドサットモザイク画像「データソース:Landsat8画像(GSI,TSIC,GEO Grid/AIST), Landsat8画像(courtesy of the U.S. Geological Survey), 海底地形(GEBCO)」)を加工して作成

図-6 南九十九里海岸における区域分割位置

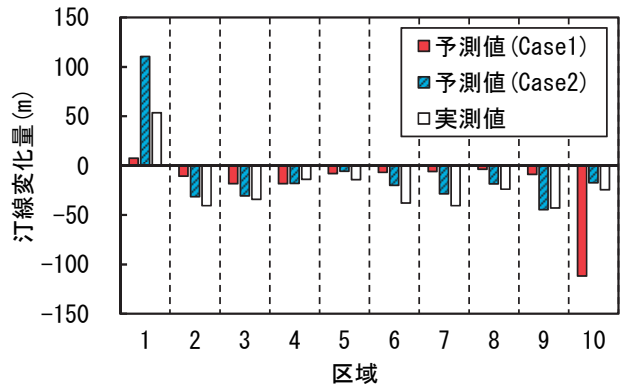


図-7 修正Bruun則で予測された汀線変化量

昇による汀線後退量は17.1mであった。同時期に撮影された空中写真からの判読結果と比較すると、区域4及び区域5については良く一致していたが、区域2から区域9にかけての汀線後退量は実測では平均31.0mであったのに対して予測値は平均10.0mとなった(図-7)。南白亀川以南においては砂浜幅が既に50m未満の箇所が多いことを考えれば、平均で約21mの差は無視できない差である。

大木ら¹⁰⁾の沿岸漂砂量分布を用いたCase2では実測値に近い値が得られたことから、上記の差は沿岸漂砂量の設定に起因するものと考えられた。

一宮川の河口周辺とその北側を含む区域7は護岸の前面にほとんど砂浜がなく、一宮川以南の区域8及び区域9にはヘッドランド群が設置されている。大木ら¹⁰⁾の沿岸漂砂量分布ではこれらによる沿岸漂砂量の低減が見込んでいるものの、本研究の設定では十分に見込めていないことの影響が大きかったと考えられた。

4. 修正Bruun則を活用する上での留意点

5海岸における精度検証結果から、多くの海岸では海面水位の上昇に加えて土砂量変化が汀線変化に与える影響も無視できず、沿岸漂砂による土砂収支をいかに精度高く予測できるかが重要であることが示唆された。

しかし、沿岸漂砂を発生させる波浪に対する気候変動の影響については海面上昇に比べて研究例が乏しく、現時点では不確実性が高い。想定し得る複数パターンの沿岸漂砂量分布について感度分析を行い、予測結果の幅を把握した上で対策検討に用いるなどの工夫が必要と考えられた。

汀線変化の大部分が断面内の土砂量変化で説明されるという結果は、本研究で取り上げた海岸が侵食傾向にある海岸であることも影響しているが、そのような海岸にしか十分な測量成果が無いのが実態である。海岸保全事業が実施されていない海岸においても、概略検討に必要な水深10m以浅の海底地形のデータが整備されることが望まれる。

ただし、断面内の土砂量変化が重要という結果は、将来予測される海面水位の上昇を考慮した場合でも、優先的に対策を実施すべき箇所は、土砂収支の不均衡が生じている箇所であることを意味する。現在の侵食対策を着実に進めていくことが重要であり、その上で、海面水位の上昇により新たに必要浜幅が確保されなくなる砂浜を見落とさないよう、修正Bruun則などの簡易手法による広域での概略調査を実施することが求められる。

5. おわりに

本稿では、海面上昇を考慮した汀線変化の簡易予測手法として修正Bruun則をとりあげ、国内5海岸を対象として実施した適用性検証の内容を紹介した。将来の土砂変化量の精度高い予測方法など課題はあるものの、海岸行政に携わる担当者が自ら試行錯誤しながら概略検討できるという点では、有効な手法と考えている。現在、海岸侵食対策が事業化された段階での活用を想定した、より詳細な将来予測の方法についても検討を進めており、今回紹介した簡易予測手法とあわせて、海岸管理者等に対して情報提供できるようにとりまとめていきたいと考えている。

謝 辞

本研究の実施にあたっては、千葉県より南九十九里海岸における測量成果を提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

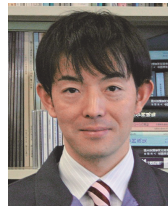
参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science

Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324, 2013

- 2) IPCC: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Portner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press, 2019
- 3) 文部科学省、気象庁：日本の気候変動2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—（詳細版）、2020
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>、参照2020-12-28
- 4) 気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会：気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 提言、2020
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/index.html、参照2020-12-28
- 5) 農林水産大臣、国土交通大臣：海岸保全区域に係る海岸の保全に関する基本的な方針、2020
<https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/coastplan/index.html>、参照2020-12-28
- 6) 渡邊国広、加藤史訓、高木利光、和山千帆、花田昌幸、竹内由衣：相対的な海面上昇を経験した海岸における修正Bruun則による汀線変化予測、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.76、No.2、I_529~534、2020
- 7) Udo, K. and Takeda, Y.: Projections of Future Beach Loss in Japan Due to Sea-Level Rise and Uncertainties in Projected Beach Loss, *Coastal Engineering Journal*, 59:2, 1740006-16, DOI: 10.1142/S051856341740006X, 2017
- 8) Dean, R.G. and Houston, J.R.: Determining shoreline response to sea level rise, *Coastal Engineering*, 114, 1-8, 2016
- 9) 千葉県：九十九里浜侵食対策検討会議資料、2017
<https://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/shingikai/sinnsyoku/kentoukaigi-kekka.html>、参照2020-12-28
- 10) 大木康弘、宇多高明、大谷靖郎、五十嵐竜行、三波俊郎：九十九里浜全域における地盤沈下を考慮した沿岸漂砂量分布の算定、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 72、No.2、pp.I_775~I_780、2016

渡邊国広



国土交通省国土技術政策
 総合研究所河川研究部海
 岸研究室 主任研究官、
 博士（農学）
 Dr. WATANABE Kunihiko

加藤史訓



国土交通省国土技術政策
 総合研究所河川研究部海
 岸研究室長、博士（工
 学）
 Dr. KATO Fuminori