

気候変動がもたらす沿岸域災害と海岸工学

松原 雄平

概要 地球の気候システムが温暖化の進展とともに大きく揺らぎ始めている。その長期的かつ地球規模の変化は、今後、気温上昇、台風の巨大化、暴風、暴浪などの極端気象事象や海面上昇などを引き起こすとされている。特に沿岸域は、その災禍に見舞われる最前線となり、沿岸域での防御あるいはそこからの撤退などの事態に遭遇するデッドラインが近づいている。この小論では、我が国の沿岸域で今後どのような問題が発生し、我々に脅威となってくるのかについて述べ、一方で筆者が携わった海岸工学の視点から沿岸域の災害にどのように適応するかについて述べる。

キーワード ； 気候変動、海面上昇、海岸防御、ハード、ソフトエンジニアリング

1. はじめに

大気中の炭酸ガス CO_2 が地球温暖化をもたらすことを初めて定量化したのはスウェーデンの科学者 Svante Arrhenius(スヴァンテ・アレニウス)であり 1896 年のことである¹⁾。さらに、彼は温室効果が長期的な気候変動の原因となることを警告した。以来 127 年、人類はその警告された道をたどり温暖化が進展、いまや“地球沸騰化”とまで形容されるようになった。そのことを証明するかのようにより我が国の 7、8 月期は、人間の体温を越える猛暑日が続き、連日のように熱中症警戒アラートが発表されていた。皮膚感として日射の異常な強さを感じていた 9 月、気象庁は今夏（2023 年 6～8 月）の平均気温が平年値を 1.76°C 上回り、1898 年の統計開始から 125 年で最も高くなったと発表している。このことは世界においても同様で、2023 年 7 月の世界の平均気温が史上最高の 16.95 度以上となったと報告があり上記の“地球沸騰化”の根拠とされている。図 1 は NOAA が観測した海水面温度の日変化を年毎に比較したものである。1982 年～2011 年の約 30 年間の平均値が 20.5°C 以下であるのに比べ、2023 年のそれは約 1°C 高いこと、特に 4 月以降の変動パターンは例年の傾向を逸脱し際立って高水温に上振れしていることがわかる。これらの資料だけでなく、地球上で様々な高温化現象が頻発して

おり、今まさに地球上ではアレニウスが予見した状況がおきているのである。

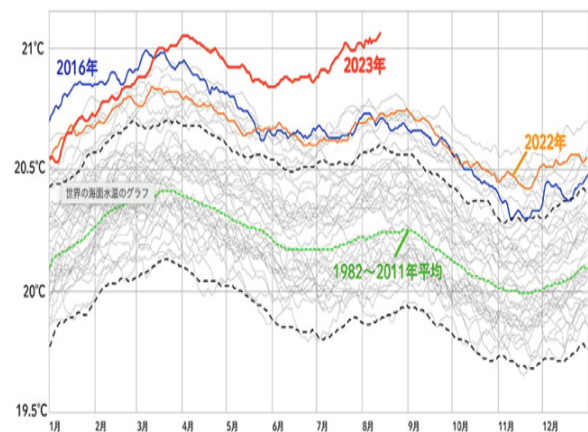


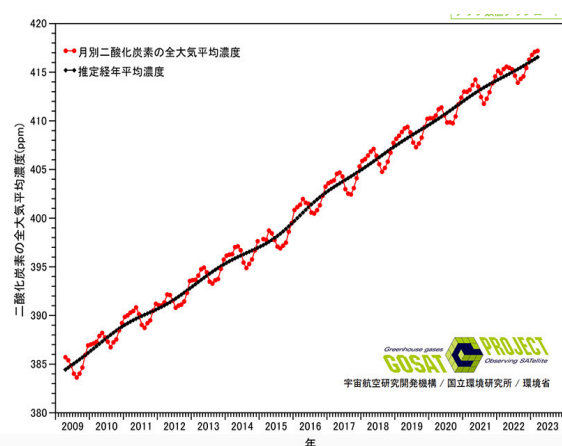
図 1 NOAA による年度別海水面温度変

(1) 地球温暖化と気候変動

地球温暖化と気候変動は、しばしば同義的に言及されるが両者の違いを確認しておきたい。図 2 は、温室効果ガス



松原 雄平

図 2 CO_2 濃度の月別平均値と年平均値

観測技術衛星「いぶき」で測定された地球大気の上層から地表面までの CO₂ 濃度の平均値を月別に示した時系列データである²⁾。これより全大気中 CO₂ 濃度は、規則的な季節変化を繰り返しつつ、経年的にゆっくりと増加を続けていることがわかる。また同図から、夏季に CO₂ 濃度が減少し冬季に増大する季節変化も確認される。この季節変化は、夏期の陸域植生の光合成活性化によって CO₂ が吸収されたり冬季の植物の分解活動により CO₂ 増大や人為の CO₂ 排出などに起因している³⁾。このような長期的にゆっくりと変化する現象に季節毎に変化する短期的変動が重なって起きる現象に対して、森は「気候変動（変化）とは、地球温暖化のような右肩上がりにゆっくりと変化する現象（図2の直線部）に、CO₂ ガス濃度変動のような季節的に上下する振動（図2の変動部）が重なり合った現象」と説明している⁴⁾。地球温暖化は気候変動をもたらす一因であり、気候パターンに及ぼす環境因子は他にも数多くあり、それらの因子の関わり合い、変化で気候変動が生じているということになる。

2. 気候変動と温暖化シナリオ

(1) 温暖化シナリオ

IPCC（国際連合気候変動に関する政府間パネル：Intergovernmental Panel on Climate Change）では気候変動に関する最新の科学的知識をまとめ、その影響や対策についてシナリオを設定して、その内容に関する報告書を定期的に発表している。報告書では、地球温暖化に関する幾つかのシナリオで温暖化 4℃ 上昇シナリオ（RCP8.5）と 2℃ 上昇シナリオ（RCP2.6）が対比されることが多い。4℃ シナリオは高排出トレンドのままで温室効果ガスの削減策をとらず温暖化が急速に進行する状況を想定するもので、日本の沿岸域において数十 cm から 1m メートル以上の海面上昇が予測されている。他方、2℃ 上昇シナリオは、温室効果ガスの削減策が適切に実施された場合のシナリオであり、気温上昇が 2 度未満に抑えられた状態を想定して予測を行うものである。海面上昇量は地域によって異なるが、数十センチからおおよそ 1 メートル以内の値が予測されている。この 2℃ 上昇シナリオは IPCC のパリ協定の目標に合致している。

図3は、二つのシナリオでの地上気温の上昇を予測した例である。これより、いずれのシナリオも、200 年半ば頃

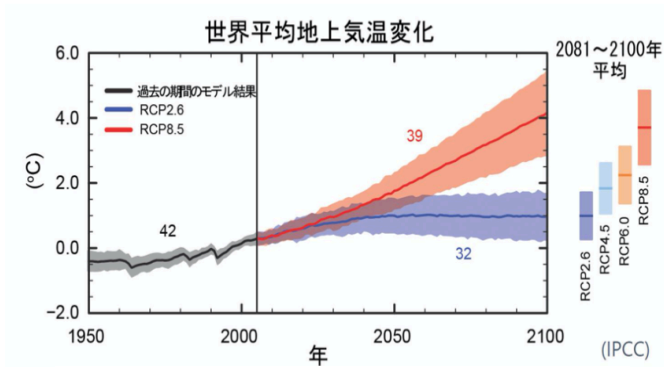


図3 2℃、4℃シナリオと地上気温の予測

までは有意な差は見られないが、2030 年以降は時間と共に、両者の差異が広がることがわかる。これら気候モデルにおける 2℃ 上昇シナリオや 4℃ 上昇シナリオの予測結果は、IPCC から世界各国に報告され各国の気候政策や適応策の法制化、具体の政策立案に役立てられている。しかし、そうした対応が取られず 4℃ 上昇シナリオのような高い温暖化が進行する場合、沿岸域での影響は大きくなり、浸水、海岸侵食、生態系への悪影響などが顕著になる可能性が高まることになる。

3 沿岸域で何がおきるのか

文部科学省と気象庁は、日本周辺での気候変動が顕在化しつつあることから、過去の観測結果や研究グループの資料をとりまとめて「日本の気候変動 2020」として公表している⁶⁾。同資料の中から二つの温暖化シナリオに対する将来予測の一部を示すと表1のようになる。

表1 日本の気候変動のデータまとめ

将来予測		
	2℃上昇シナリオによる予測	4℃上昇シナリオによる予測
年平均気温	約1.4℃上昇	約4.5℃上昇
海面水温	約1.14℃上昇	約3.58℃上昇
沿岸海面水位	約0.39m上昇	約0.71m上昇
台風の発生	強い台風の割合が増加	
1時間降水量	約1.6倍に増大	約2.3倍に増大

表1の4℃上昇シナリオでは、海水温や気温の上昇が著しく、さらに海面上昇が1m弱の大きさで発生し、台風の発生なども増える予測となっている。これらの予測値からは

四面を海に囲まれた我が国の沿岸域では、海面上昇、高潮、高波浪の越波、海岸侵食の発生が懸念され、我が国では沿岸域の防護が重要となってくる。

4. 海岸工学分野と連携した沿岸域での気候変動適応戦略

前出のCO₂排出を抑えた2°C上昇シナリオを想定するとしても、今後の気候変動は進むことから沿岸域では海面上昇、海岸侵食や高潮発生などの災害から逃れることはできない。以下では、筆者が、鳥取大学で長年、研究を行った海岸工学分野での研究から、気候変動による海岸侵食への適応検討の事例を紹介したい。海岸災害を軽減させ地域の安全と繁栄を確保する長期的適応は何か？と聞かれれば、まずは海岸工学関連の研究者や研究グループと連携することが第一と答えたい。できれば気象モデルの研究者がいれば、尚良い。そのグループで以下の手順で長期的な適応を考えることをお勧めする。

① 情報収集とリスク解析

気象データや沿岸域でのモニタリング情報をもとにリスク評価を行い、どの災害に対して、どの地域が最も脆弱なのかを明らかにし、緊急性の高いところから対策の優先順位を決める。

② 防潮・防波施設の改良と設置

長期における海水位上昇に対して防波堤、護岸、樋門などのインフラストラクチャー、堤防や排水システムの改善、設計の見直しなどが含まれる。また長期的な観点での嵩上げなどの継続的、受容的改良計画を検討する。

③ 海浜の総合土砂管理

防波堤や離岸堤、人工リーフ等で守られた海岸では、海水位が上昇するにつれて海岸防御の機能を失っていくことになる。この場合は、土砂を海岸に投入する養浜業務が効果的である。そうした海浜の総合的な土砂管理が重要になる。

これらの中長期的な観点からの海岸防御の事例として、筆者が関係した適応事例を紹介しよう。

5. 気候変動と海浜保全

5.1 砂丘海岸におけるサンドリサイクル

写真1は、2008年（平成20年）に撮影された鳥取砂丘（写真中央部の裸地）である。首都圏で実施されるアンケ

ート調査によれば、「鳥取県」というワードで連想されるものの、に対して80.1%が「鳥取砂丘」と回答する県外者にとって最も訪れたい場所である。しかし、写真1の左端の鳥取港の防波堤延伸以降、沿岸流が西向きとなり鳥取砂丘海岸の土砂は、徐々に西側に移動し海岸線が後退し鳥取砂丘は深刻な侵食傾向を示した。このため、鳥取県は、2005年6月に鳥取の沿岸域を総合的に管理する「鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン」を策定した。⁷⁾

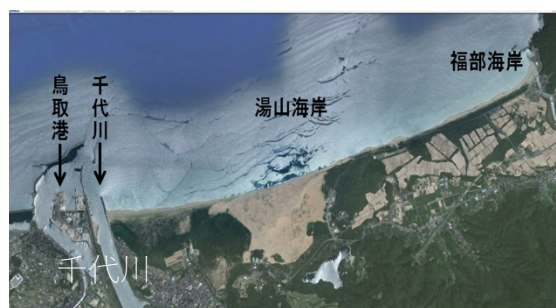


写真1 鳥取砂丘海岸（2008年）

これは、海岸侵食に対して構造物を設置して海岸を防護するハード対策でなく、堆積域で浚渫した土砂を侵食域に運び土砂を投入する「養浜工法」を優先して導入するという他県に先駆けた法整備であった。これを鳥取県では「サンドリサイクル事業」として「ソフト対策」によって海岸を守る事業を位置づけた。ガイドライン策定の検討会では、港湾域に堆積した土砂は港湾事業へ、漁港域で浚渫した土砂は漁港事業へという管理者の土砂占有意識があり、多くの意義や反対意見もあった。しかし、土砂の発生源から海岸域までの土砂を一貫して無主物の流砂として扱うという思想に各管理者も理解を示し連携協力が得られている。

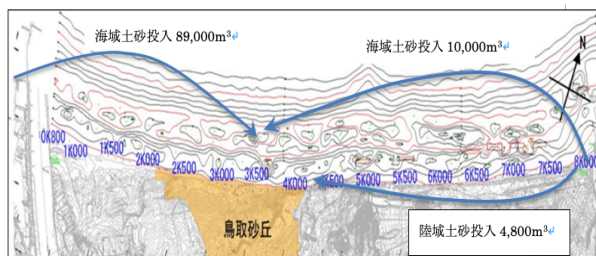


図4 鳥取砂丘海岸への土砂投入量（鳥取県）

図4は、2020年（令和2年度）にサンドリサイクル事業によって砂丘海岸への土砂投入状況を模式的に示したもので、図中鳥取港から8万9千m³および岩戸漁港から1万m³の海域投入が行われ、陸域土砂投入が、岩戸漁港区域から約4千m³あったことを示している。2005年の土砂管理ガイドライン策定以降、毎年の土砂投入累積量は107万

m³となっており、砂丘海岸は、全体として侵食は狭い範囲にとどまり、砂丘海岸全体の土砂の堆積、侵食の収支はバランスしており安定傾向であることが報告されている。これは17年間続けられてきた海上養浜および陸上養浜の成果であり、砂丘海岸の安定を目的としたガイドラインが寄与していると考えられる。鳥取砂丘では107万m³の養浜を行なったが、欧米においても養浜が主流となっており、オランダでは1970年以降1億m³以上という圧倒的な養浜土砂が投入され海浜保全に成功しているし、米国のマイアミビーチも沖合の土砂を大量投入することで観光地の海浜保全と景観の創造に成功している。こうした養浜事業は、中長期の海面上昇に対しても投入土砂量を調整することで受動的に対応できることから気候変動に対する一つの適応法といえよう。

5.2 気候変動が皆生海岸に与える影響検討

鳥取県西部に位置する皆生海岸（図5）は、砂丘海岸と同様に海岸侵食が著しく、管理者である国土交通省中国地方整備局日野川河川事務所は、平成5年より堆積域（境港工区）の土砂を侵食域（富益工区）へ養浜するサンドリサイクル事業を行ってきた。さらにサンドリサイクル量を軽減させるために、平成15年より侵食域に人工リーフを5基設置し養浜土砂の流出を防いでいる。当該海岸を研究フィールドにしていた筆者らのグループは、近年、皆生海岸や日本海で発達する爆弾低気圧などによる局所的な侵食では、これまでの地形変化特性と異なる変動が見受けられることから気候変動に伴う温暖化の影響ではないかと疑われたことである。ちょうど、筆者らのグループのメンバーは、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」にも参画していたことから、将来気候のもとで、サンドリサイクル事業がどのような影響を受けるかを検討した。こうした検討において最も重要になるのは、最新の気候変動予測技術による将来気候の波浪条件の設定である。海面上昇だけではなく、波高や周期・波向等の波浪特性を特定する必要があるが、今回は研究グループ内の森⁹⁾や志村¹⁰⁾の研究成果に依った。海浜地形の計算では、サンドリサイクル等による土砂浚渫および土砂投入の過程を考慮した3次元海浜変形モデル¹¹⁾を用いて、気候変動に伴う沿岸外力の変化が富益工区の構造物周辺の地形に与える影響について検討した。



図5 皆生海岸および対象領域の概要(サンドリサイクル:境港工区から富益工区へ土砂輸送)

表2 将来気候での皆生海岸来襲波浪

計算ケース	波高(m)	周期(s)	波向(°)	海面上昇(m)
Case1	±0.2m			
Case2		±0.3s		
Case3			±4°	
Case4				0.25m
Case5	±0.2m		+4°	
Case6	±0.2m		-4°	
Case7	±0.2m		+4°	0.25m
Case8	±0.2m		-4°	0.25m

表2は、4℃上昇シナリオで気候変動予測技術から求められた将来気候下での波浪特性である。波浪特性との差異として波高で±0.2m、波向で±4°、海面上昇量で0.25mと大きな差異は認められなかった。

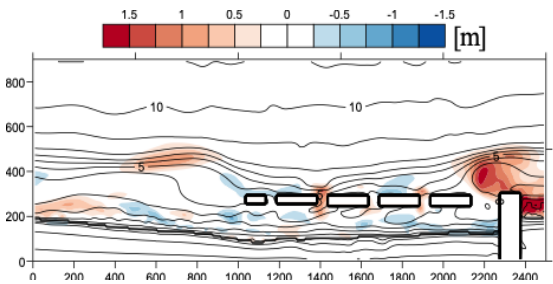


図6 波高(+0.2m)波向(西4度)+海面上昇(0.2m)

図6は、波高が0.2m増大し、波向が東へ変化した場合の海底地形の計算結果である。人工リーフ周辺で侵食傾向が助長されることや地形変化は最大で-1.5mの差(水深変化)が確認できた。海面上昇によりリーフ天端水深が深くなり、人工リーフ周辺の侵食が緩和されたことがわかった。

5. おわりに

連日の猛暑がニュースの話題になる中、地球温暖化と気候変動で沿岸域で何が起きるかについての小論をまとめた。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)、第五次報告書(AR5) 1)では、4°C上昇モデル(RCP8.5)で2100年に海面上昇量が0.52m~0.98mが見込まれている。場所によって上昇量は異なるとしても最大で1m近くの海面上昇が起きるとなれば、通常の高潮勾配1/30であれば30mの前浜を失うことになる。現在、鳥取砂丘海岸を守るサンドリサイクルも、マイアミビーチやオランダのように大量の土砂の投入を行う日が来るかもしれない。鳥取のシンボルである鳥取砂丘海岸を守るために許容されるコストとベネフィットのバランスであろう。また、皆生海岸についても人工リーフエリアへの土砂投入と将来気候について影響評価を行った結果、波向が東にシフトもしくは波高が増大した場合、侵食傾向が助長される傾向にあることや、海面上昇および波浪特性の変化による地形への影響は最大2m程度であり、構造物周辺の地形変化には、波浪特性の変化による影響が大きいことが示された。

今回は、気候変動下での鳥取の海岸での事例紹介となったが太平洋側都市部での高潮対応などについては触れることはできなかった。しかし間違いなく大都市圏での高潮問題は発生するので、時間をかけてでも堤防の嵩上げや防潮施設の整備改良を行う必要がある。

鷺田も述べたように、数m単位でダイナミックに海面が上下する瀬戸内海や有明海と異なり、年間の潮汐変動が30cm程度と小さい日本海側は潮位変化に対する経験もなく、生活文化もない。⁵⁾今後起こりうる海面上昇に対して日本海側で育まれた沿岸の文化を守りながら、海岸保全を考えていく必要がある。

参考文献

- 1) Svante Arrhenius, *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (fifth series), vol 41, pages 237–275, April 1896.
- 2) 全大気中の月別メタン濃度速報値,2015
(<https://www.gosat.nies.go.jp/recent-global-ch4.html>)

- 3) 「「いぶき」の観測データに基づく全大気中の月別二酸化炭素濃度算出方法について」、国環研 GOSAT プロジェクト、2015.
- 4) 森 信人、記念講演「気候変動が我が国の自然災害に与える影響とその適応」、2021
- 5) 鷺田正樹、海面上昇の影響評価と沿岸域防災に対する高潮・海浜変形解析手法の高度実用化に関する研究、関西大学学位論文、2022
- 6) 文部科学省、気象庁、日本の気候変動2020、
- 7) 鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン、-千代川流砂系の土砂管理計画-、平成17年6月、鳥取県.
- 8) 小坂田 祐紀・澁谷 容子・森 信人・志村 智也 黒岩正光・松原 雄平、気候変動に伴う波浪特性の変化が皆生海岸の地形に与える影響について、土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, I_847—I_852, 2016.
- 9) 森信人, 志村智也, 中條壮太, 安田誠宏, 間瀬肇:マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2 pp.I_1191-I_1195, 2011.
- 10) 志村智也, 森 信人, Mark A. Hemer, 安田誠宏, 間瀬 肇:北太平洋における冬季の波候と大規模循環場の将来 変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol, 71, No, 2, I_1525-I_1530, 2015.
- 11) 安本善征, 黒岩正光, 澁谷容子, 松原雄平, 小坂田祐 紀:土砂の浚渫と投入過程を考慮した3次元海浜変形予測モデル, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol, 71, No2, I_787-I_792, 2015.