

# 石川海岸における気候変動による 外力変化量の推定

なかぞの だいすけ くろべ しょうた じんぼ まきのぶ いわた あつゆき  
中園 大介<sup>1</sup>・黒部 笙太<sup>2</sup>・神保 正暢<sup>1</sup>・岩田 敦行<sup>1</sup>

<sup>1</sup>株式会社建設技術研究所 東京本社海岸・港湾室（〒330-6030 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2）


<sup>2</sup>株式会社建設技術インターナショナル 水資源部（〒136-0071 東京都江東区亀戸2-25-14）

近年、海岸保全計画を考えるうえで気候変動による外力変化を見込むことが重要となってきた。台風を要因とした気候変動の外力変化量の推定手法が確立されつつある一方で、石川海岸のように高波浪や高潮の発生要因が低気圧の場合の推定手法は確立されていない。そこで、簡易的に波浪や潮位偏差を再現可能な推定式を重回帰分析により構築し、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を入力条件に将来外力量を推定した。本手法は、重回帰分析により将来外力を推定するため、スーパーコンピューター等の高性能な計算資源を必要としない。そのため、本手法は観測データが存在する様々な地点への適用可能性がある。

**Key Words** : 気候変動影響評価, d4PDF, 簡易推定式

## 1. 研究の目的

「日本の気候変動2020」によると、気候変動に伴い海面水位が上昇することについては確信度が高いとされているなど、今後の海岸保全計画を考えるうえで気候変動による外力変化を見込むことが重要となってきた。また近年、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を用いて、波浪や潮位偏差等の外力変化の予測が実施されている。

本研究が対象とする石川海岸は、-1に示すとおり日本海側に位置している。日本海側では太平洋側と異なり台風の襲来が少なく、高波浪や高潮の主な発生要因は冬型の気圧配置や爆弾低気圧である。

太平洋側の台風を要因とした気候変動の影響評価事例は多数存在する<sup>1)</sup>。一方、爆弾低気圧はトラックデータが整理されているものの、冬型の気圧配置についてはトラックデータ等が整備されていないなど、気候変動の影響評価手法が確立されていない。また、d4PDFの全てのデータを対象に高潮解析モデルや波浪推算モデルといった物理モデルで計算することは、膨大な時間やコストが掛かるため非現実的である。そのため、将来の気候変動に伴う外力変化を推定するために、効率的な外力の推定方法が求められている。

上記のような背景を踏まえて、本研究では石川海岸周辺の波浪・潮位観測データを観測開始から最新年まで収

集・整理し、長期的な波浪・潮位の変化傾向を把握した。また、観測データに加えて気象庁GPVデータ(MSM, CWM)等を用いて石川海岸における高波浪や高潮の発生要因を分析した。さらに、高波浪や高潮の発生要因を踏まえて気象場から対象地点の外力を予測する手法(簡易推定式)を提案し、構築した簡易推定式に将来気候の予測気象場(d4PDF)を入力して将来外力を推定した。

## 2. 長期観測データに基づく実態解析

### (1) 概要

石川海岸における現計画外力は、金沢港と輪島における過去の観測データに基づいて決められている。計画高潮位(H.H.W.L.)が設定された時点では、石川海岸直近の



図-1 石川海岸の位置図

金沢港の潮位観測が長期間なかったことから、輪島の観測データに基づいて決められている。しかし、現在では金沢港の潮位も約60年間蓄積されてきたことから、後述する将来外力の推定では、金沢港を対象に実施している。

## (2) 波浪

### a) 年最大有義波高の時系列変化

金沢港における年最大有義波高については年変動が大きいものの、明確な増加のトレンドは見られなかった。

### b) 極値統計解析に基づく計画外力の評価

本研究では最新年のデータまで延伸した上で、現計画外力と同様に極値統計解析に基づいて50年確率相当の波高を算定した。算定結果を図-2に示す。金沢港の1970年～2019年のデータを用いた結果、50年確率波高相当の波高は9.78mとなり、現計画波高よりも約0.8m大きくなった。

なお計画周期については、現計画外力と同様に年最大有義波高の有義波周期のうち、最も長い周期を確認すると14.3sであり、現計画周期よりも0.2s長くなった。

## (3) 潮位

観測潮位には、地盤変動による影響が含まれている。そこで、国土交通省や海上保安庁等の機関が公表している測量値と国土地理院が公表している電子基準点の日々の変動値から、観測基準面の地盤変動を考慮してTP換算した。

### a) 朔望平均満潮位(H.W.L.)及び潮位偏差

金沢港の観測潮位データから朔望平均満潮位を算定し、長期トレンドを整理した。朔望平均満潮位等の1970年～2019年の時系列変化を図-3に示す。長期的に見て海面は上昇傾向であると言える。

朔望平均満潮位については、1984年頃までは低下傾向で、1984年頃から上昇傾向である。これは、日本沿岸全域での解析結果とも概ね一致する傾向である。

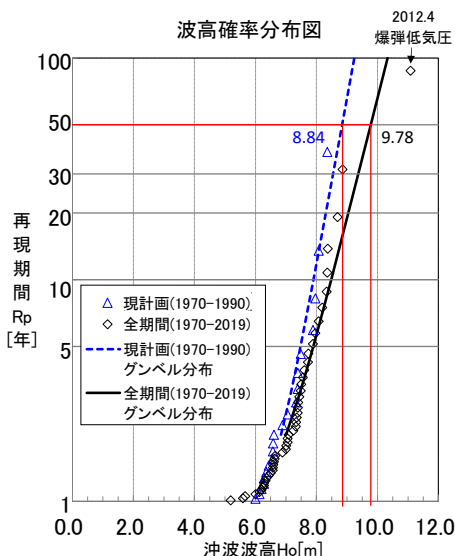


図-2 年最大有義波高の確率処理結果（金沢港）

潮位偏差については、紙面の関係で結果を割愛しているが明確な傾向は見られなかった。

### b) 極値統計解析に基づく現計画偏差の確率年の確認

石川海岸では、輪島で観測された既往最大の潮位偏差を計画潮位偏差として設定している。しかし、将来の潮位偏差を推定するためには、現計画外力の確率年を把握することが重要である。そこで、本研究では金沢港の観測データを用いて、現計画偏差0.75mの確率年を算定した。その結果、確率年は79.5年であった。

## 3. 高潮、高波浪の発生要因分析

### (1) 分析概要

高波浪や高潮の発生要因を分析するため、気象庁メソ数値予報モデルGPV(MSM)と沿岸波浪数値予報モデルGPV(CWM)を収集し、面的な風や気圧、波浪データの時系列的な関係を分析した。

### (2) 発生要因の分析結果

面的な風や気圧、波浪データを分析した結果、波浪については、北西方向から風が吹き続け、対岸から波浪が発達して石川海岸に到達することで、波高が大きくなるメカニズムを明らかにした。

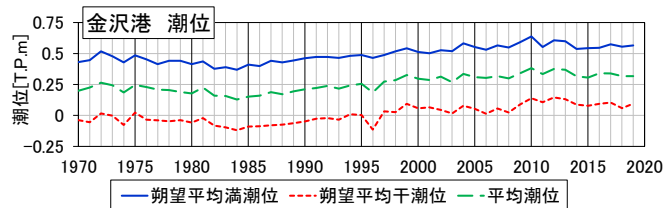
また、石川海岸では潮位偏差が大きくなる瞬間と気圧が下がる瞬間は一致しておらず、風速や波高が大きくなるタイミングと一致していることから、北西方向から風が吹き続けることで、吹き寄せやウェーブセットアップによる影響が大きくなり潮位偏差が大きくなるというメカニズムを明らかにした。

## 4. 波浪や潮位偏差を推定するための簡易推定式の構築

### (1) 検討概要

3で分析した高波浪や高潮の発生要因を踏まえて、簡易的に波浪や潮位偏差を推定可能な簡易推定式を構築した。簡易推定式は、観測波浪や潮位偏差を目的変数に、風や気圧を説明変数にした重回帰分析により構築した。

なお、説明変数に用いる風や気圧については、気象庁55年長期再解析(JRA-55)の計算格子間隔約60kmのモデル格子データを用いた。



データ出典：金沢港湾・空港整備事務所

図-3 金沢港の潮位の時系列変化

## (2) 波浪の簡易推定式の構築

構築した波浪の簡易推定式を式(1)に示す。実態解析から明らかとなった風の吹き寄せに伴う波浪の発達を考慮するため、説明変数には風に関するパラメータとして風速の絶対値 $W$ 、風速の二乗 $W^2$ 、風向き $X$ 、 $Y$ を採用した。また図の掲載は割愛するが、実態解析より12時間前の時刻の風速も波浪の発達に影響していることが明らかとなったため、現時刻に加えて12時間前のデータも考慮した。

$$y = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^L (\alpha_{Wijt} W_{ijt} + \alpha_{\Delta W^2ijt} W_{ijt}^2 + \alpha_{Xijt} X_{ijt} + \alpha_{Yijt} Y_{ijt}) + \beta \quad (1)$$

ここで、 $y$ ：有義波高や有義波周期、波向、 $i, j$ ：地点、 $t$ ：時刻、 $\alpha$ ：係数、 $\beta$ ：切片である。

説明変数については、トライアル計算により図-4に示す地点を採用した。なお、地点同士が近すぎると多重共線性が出てしまうなど、分析上適切ではなかったため、任意の補助線を設け地点同士をなるべく離すなどの工夫した。

本研究では、10分間隔で波浪観測が実施されている2006年～2017年のデータを用いて推定式を構築した。構築した推定式は、2018年で再現計算を実施することで精度検証を実施した。

図-5に結果の一例を示す。全観測波を対象に推定式を構築すると、波高の全体的な傾向は再現できるものの、本研究でターゲットとしている計画外力相当の高波浪の再現性があまり良くない等の問題が生じていた。そこで、モデル構築の際に、波高に閾値を設けて閾値以上のデー

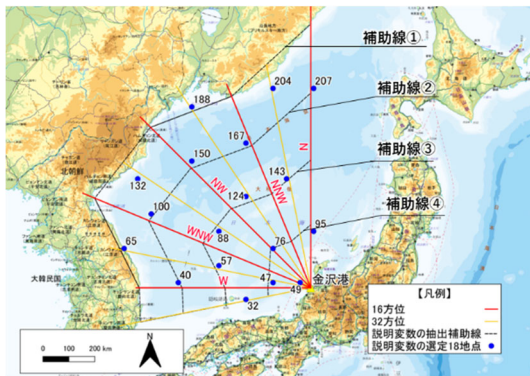


図-4 説明変数の抽出地点

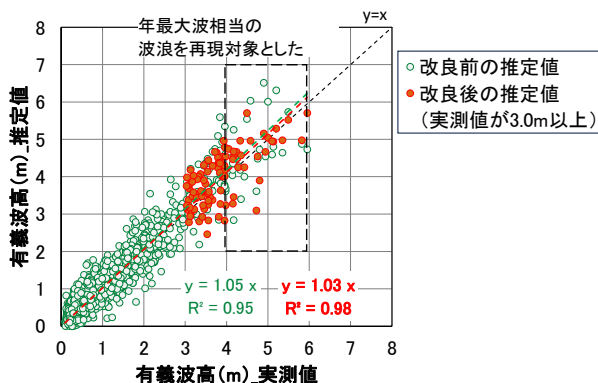


図-5 波高の再現結果 (相関)

タのみを使用して推定式を構築することで高波浪の再現性を改善させた。なお、本研究ではトライアル計算の結果、波高の閾値を3mに設定した。

## (3) 潮位偏差の簡易推定式の構築

構築した潮位偏差の簡易推定式を式(2)に示す。潮位偏差については、風の吹き寄せによる効果に加えて気圧低下に伴う吸い上げの効果を考慮するため、式(1)に気圧も説明変数に加えた。ただし、気圧低下に伴う吸い上げについては、メカニズムを考えると直近の地点の気圧のみしか影響を受けないため、金沢港隣接の地点の気圧のみを考慮した(図-4のNo.49の地点)。

$$y = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^L (\alpha_{\Delta Pijt} \Delta P_{ijt} + \alpha_{\Delta W^2ijt} W_{ijt}^2 + \alpha_{Xijt} X_{ijt} + \alpha_{Yijt} Y_{ijt}) + \beta \quad (2)$$

ここで、 $y$ ：潮位偏差、 $\Delta P$ ：基準気圧からの差分である。なお、海面気圧については季節変動があることを踏まえ、1886年～2021年の金沢における海面気圧の月平均値(1008.3hPa～1019.9hPa)を基準気圧に設定した。結果については本紙では割愛するが、波浪と同様に再現性を確認している。なお、推定式を構築する際の閾値は試行計算の結果、29cmに設定した。

## 5. 簡易推定式を用いた将来外力の推定

### (1) 使用データ

4で構築した簡易推定式に、d4PDFの風や気圧のデータを入力することで、将来の波浪や潮位偏差を推定した。

d4PDFについては、簡易推定式を構築したJRA-55のモデル格子間隔と同じ60km格子間隔である全球モデル(GCM)を用いた。なお、過去実験(HPB)と将来2度上昇実験(HFB\_2K)の風と気圧から波浪や潮位偏差を推定して、両者の計画外力相当の波高や潮位偏差を比較することで、将来の波浪や潮位偏差の変化率を算定した。

### (2) バイアス補正方法

d4PDFには、モデル特有の統計的誤差があることが知られている。そのため、バイアスを補正するために様々なバイアス補正が提案されている<sup>2)</sup>。

本研究では、d4PDFのバイアス手法として多数の実績があるクオンタイルマッピング法を用いた。バイアス補正の対象としては、以下の3パターンとした

1. d4PDFの風や気圧に対して実施
2. 推定した波浪等に対して実施(比率により補正)
3. 推定した波浪等に対して実施(差分により補正)

なお、バイアス補正実施にあたっては、過去実験のメソッド毎に結果を大きい順に並び替えた後、50%タイル値を算定し、同じ超過確率の実測値と比較することでバイアスを確認し補正した。なお、ここでは過去実験と将来

実験が同じバイアスの傾向であると仮定していることに留意が必要である。

### (3) 将来外力の推定結果

将来の波高と潮位偏差の推定結果の例を図-6及び図-7に示す。実測値との乖離が見られたため、バイアス補正を実施した。

2度上昇下での将来の計画外力相当の波高の推定結果、過去実験と比較して1.05～1.07倍となる可能性が示唆された。

潮位偏差は1.10～1.15倍となる可能性が示唆された。ただし、バイアス補正パターン1については、過小評価傾向であった。これは、d4PDFの風や気圧に対するバイアス補正が効きすぎていることが考えられる。そのため、本結果は参考値扱いとした。

## 6. 結論

本研究では、石川海岸周辺の波浪や潮位の観測データを用いて、長期的な波浪や潮位の変化傾向を分析した。その結果、朔望平均満潮位については、明確な上昇傾向が見られるものの、波浪や潮位偏差については、現時点では変化があまり見られなかった。

また、各種観測データや気象庁再解析データを用いて、石川海岸特有の高波浪や高潮の発生要因を明らかにした。

将来外力の推定にあたっては、簡易的に波浪や潮位偏差が再現可能な簡易推定式を新たに構築することで、将来の波浪や潮位偏差を推定した。推定の結果、波浪は1.05～1.07倍、潮位偏差は1.10倍～1.15倍増大する可能性がある結果となった。

本手法では、重回帰分析により将来外力を推定するため、スーパーコンピューター等の高性能な計算資源を必要としない。そのため、本手法は観測データが存在する様々な地点への適用可能性がある。

謝辞：本研究にあたって、金沢大学の由比教授、楳田教授、二宮准教授、金沢工業大学の有田准教授、国土技術政策総合研究所海岸研究室の方々に様々なアドバイスをいただきました。また、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所、気象庁様には研究にあたり各種データを提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 五十嵐雄介, 野口七海, 中園大介, 牛木賢司, 秩父宏太郎, 渡邊国広, 森信人: 大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を活用した設計外力相当の高潮・波浪に対する気候変動の影響評価手法の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 78, No.2, pp.1\_967-1\_972, 2022.
- 2) 有村盾一, 邱中睿, 岡安徹也, 秩父宏太郎, 渡邊国広, 森信人: 大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の台風を対象としたバイアス補正手法とその将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, pp.973-978, 2021.

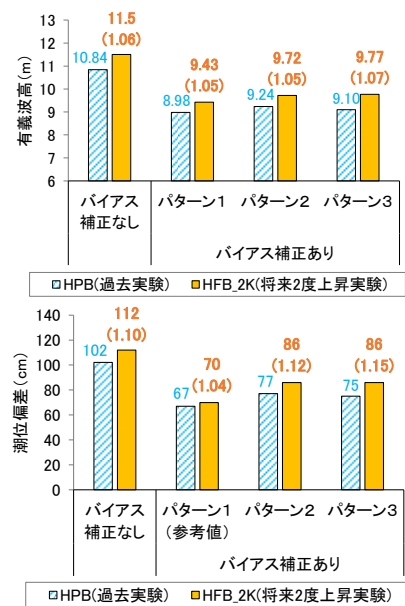


図-6 将来外力の推定結果のまとめ

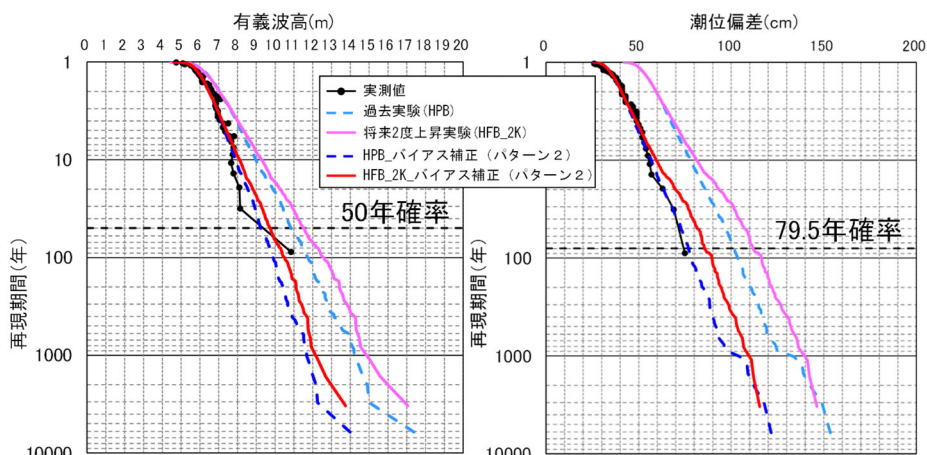


図-7 極値統計解析結果の例 (左：有義波高, 右：潮位偏差)