

3.事故時及び調査時の柏崎の波浪状況の推算

3.1.メソモデル (MSM) の概要

メソモデルは、水平格子間隔 5km で日本とその近海を計算領域とし、1日8回(3時間ごと)、78時間先(00,12UTC 初期値のみ)または39時間先までの予測計算を行っており、数時間から1日先の大雨や暴風などの災害をもたらす現象を予測することを主要な目的としている。⁵⁾なお、本研究では解析値を中心に再構成(1日分のオリジナルデータの初期値を連ね、その間を直前の初期値からの予報値で埋める)したNETCDFデータより、地上高10mのu,v方向風速データを取得し、風速、風向を求めた。⁶⁾

3.2.海上風パターンの把握

事故・調査時の波浪データは欠測しているため直江津の波浪データから柏崎の波浪状況の推算を行う。そのため事故時及び調査時の柏崎と直江津の海上風パターン(平面図)をメソモデルを使用して算出し、同様な海上風パターン(天気)時の2014年、2020年の柏崎港と直江津港の波浪観測データを抽出、そのデータを用いて、事故時及び調査時の波浪状況の把握を行う。算出した事故時の海上風の図を図-4に示す。

求めた海上風パターン図を用いて、事故時及び調査日の海上風パターンに似ている日を2014年と2020年の中から見つけ直江津と柏崎の波高・周期・波向の比率を調べる。調べた結果、求めた比率から算出した事故・調査時の波浪を表-1~表-3に示す。

3.3.事故時付近の柏崎の波浪状況の把握

3.2.で求めた比率を用いて事故時付近の波浪状況の推算を行う。推算した柏崎の波浪の波向の事故時前と事故時以降を示したものを図-5に示す。

図-5より事故時前では防波堤の影響を受けるような波向だが、事故時以降には防波堤の影響を受けない波向に変化していることがわかる。このことにより事故時前には防波堤の影響を受け低かった波高が、事故時には防波堤の影響を受けない波向に変化し波高が増大し、その結果事故が起きた可能性も考えられる。

4.推算した柏崎の波浪の正確性の確認

海上風パターンから求めた直江津港に対する柏崎港の波浪特性が正しいかどうか判断するために事故時の回折波波高・砕波波高・報道から推算する波高の比較を行う。



図-4 事故時の海上風

事故時の柏崎の波浪 (推算)		
有義波波高 (m)	有義波周期 (s)	波向 (度)
2.67	6.69	-96

表-1 事故時の直江津と柏崎の波高・周期・波向 (2022年8月16日14時)

調査時の柏崎の波浪 (推算)		
有義波波高 (m)	有義波周期 (s)	波向 (度)
3.19	9.8	-20

表-2 調査時の直江津と柏崎の波高・周期・波向 (2022年9月20日15時)

調査時の柏崎の波浪 (推算)		
有義波波高 (m)	有義波周期 (s)	波向 (度)
0.49	4.5	-96

表-3 調査時の直江津と柏崎の波高・周期・波向 (2022年11月18日12時)

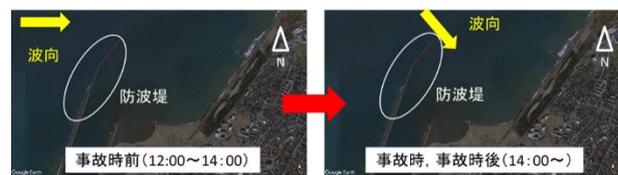


図-5 事故時前と事故時以降の柏崎の波向

4.1.回折波から推算した波高

回折波とは構造物等の背後に回り込んだ波のことであり、入射波高と回折係数から回折波高を計算する。今回は K_d 値(回折係数)分布図を使用して回折波高を求める。⁷⁾また K_d 値分布図は波長が必要にな

るため、波長も求める。以下に式を示す

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (1)$$

L_0 : 沖波波長, g : 重力加速度, T : 周期

式(1)を使用して沖波波長は $L_0 = 69.89\text{m}$ となる。その後、沖波波長から深海波か否かを判断する。判断する式を以下に示す

$$\frac{h}{L_0} > \frac{1}{2} \quad (2)$$

h : 水深

式(2)を使用すると深海波ではないことがわかるため図-6を使用して $\frac{h}{L_0}$ を $\frac{h}{L}$ に変換し、波長である L を求める。

図-6 より $\frac{h}{L} = 0.19$ となり波長 L は 63.16m となる。

回折波高を求めるために図-7 示す K_d 値分布図を使用して汀線から 100m, 200m 離れた位置の回折波高の算出を行う。また回折波高を求める位置は柏崎中央海岸の東端と西端からの距離の位置のものとする。

よって求めた回折係数から事故時の柏崎中央海岸の回折波高は、汀線から 100m 離れた箇所の波高は $0.35\text{m} \sim 0.88\text{m}$, 汀線から 200m 離れた箇所の波高は $0.37\text{m} \sim 1.1\text{m}$ となる。図-8, 図-9 を用いて求める。ここで H'_0 : 換算沖波波高, L_0 : 沖波波長, h_b : 碎波水深, H_b : 碎波波高である。今回使用した値は $H'_0 = 0.9862$, $L_0 = 69.89\text{m}$, 海底勾配: 1/20 で計算を行った。

4.2. 碎波波高

碎波とは沖合いから浅海域に進むと、波高が変化し、水深が波高に近づいた時点で前方へと崩れる現象である。また碎波後の波高を碎波波高という。

碎波波高の求め方はまず図-8 を用いて碎波水深を求める。 $\gamma \frac{H'_0}{L_0} = 1.41$ と求められるため、図-8 を用いて $\frac{h_b}{H'_0} = 1.62$ と求められる。またこの結果から碎波水深は 1.59m であると算出できる。今回予測していた碎波水深は 1.5m であり、碎波水深の計算値と予測値が概ね一致しているため碎波水深は 1.59m であるとする。

続いて図-9 を用いて碎波波高を求める。 $\frac{H'_0}{L_0} = 1.41$

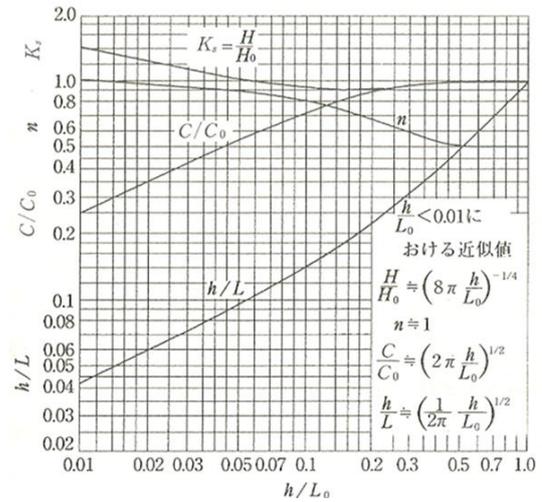


図-6 浅水における波の特性

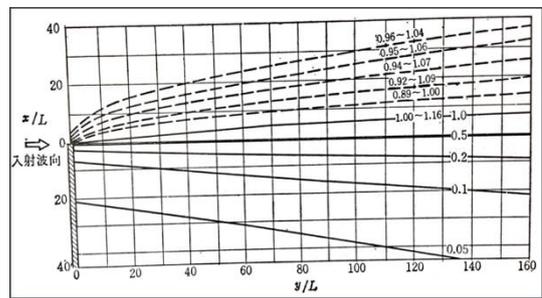


図-7 K_d 値分布図

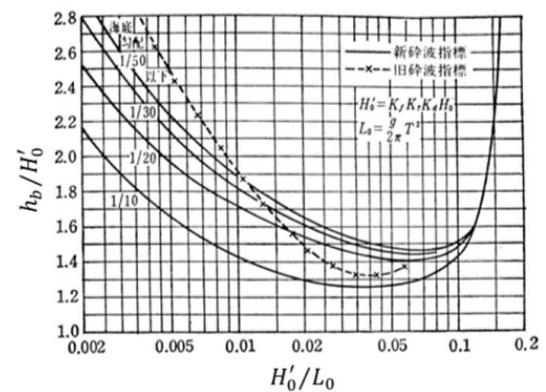


図-8 碎波水深

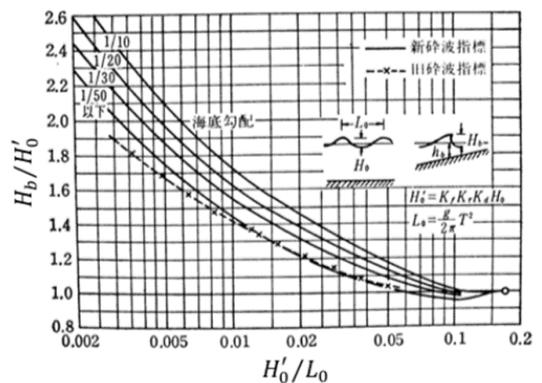


図-9 碎波波高

と求められるため、図-9 を用いて $\frac{H_b}{H'_0} = 1.49$ と求められる。またこの結果から砕波波高は 1.47m と算出される。

4.3. 報道の画像から推測する波高

報道の画像から事故時の柏崎中央海岸の波高の推測を行う。報道の画像を図-10 に示す。その結果図-10 から手前に写っている人と波の比較を行うと、波高は 1.4m 付近ではないかと推測する。

4.4. それぞれ推算した値の比較

今回推算したそれぞれの値は回折波波高が最大 1.1m, 砕波波高が 1.47m, 報道映像から推算した波高が 1.4m 付近である。そのためそれぞれの結果から値が概ね一致していると考えられるため今回推算した柏崎の波浪は正確であると考えられる。

5. 調査日の砂浜を流下・遡上する波の挙動の把握

本研究では砂浜を遡上する波浪の挙動を CADMAS-SURF 2D を用いた鉛直 2 次元で再現し、波浪の挙動を把握している。そのため CADMAS-SURF 2D を用いた計算が正しいかどうかを判断する必要がある。

5.1. 動画から見る波の流下・遡上速度の算出と汀線からの距離

2022 年 9 月 20 日に調査した際に記録した波の流下・遡上の様子から波の流下・遡上速度と汀線からの距離の算出を行う。

波の流下・遡上速度の求め方は、まず始めに動画から見る波の流下・遡上速度と汀線からの距離の算出についてです。

動画からの波の流下・遡上速度の求め方は、記録された動画には赤い浮き輪があり、この浮き輪を利用して浮き輪の移動距離、移動時間を求め、波の流下・遡上速度を求めます。その結果動画から流下 2 パターン、遡上 2 パターンが見つかりました。この 4 パターンの浮き輪の移動時間と移動距離を用いて波の流下・遡上速度を求めます。汀線からの距離については動画上で目視で汀線を確認し設定を行い、浮き輪の移動距離を確認し汀線からの距離の算出を行います。図-10、図-11 に 4 パターンの流下または遡上の状況の一部、汀線からの距離を示す。また動画から算出した波の流下・遡上速度をまとめたものを表-4 に示す。

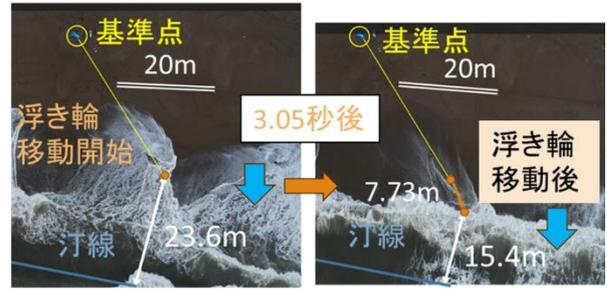


図-10 波浪の遡上状況

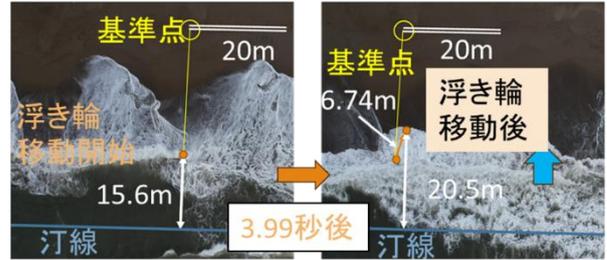


図-11 波浪の流下状況

	移動距離 (m)	移動時間 (s)	流下・遡上速度 (m/s)	汀線からの位置 (m)
①	7.73	3.05	2.54 (流下)	23.6m~15.4m
②	6.34	2.78	2.28 (流下)	26m~20.1m
③	6.74	3.99	1.69 (遡上)	15.6m~20.5m
④	11.0	4.21	2.62 (遡上)	25.3m~35m

表-4 動画から算出した波の流下・遡上速度

これらの結果から汀線から 20m の位置程度まで波が遡上すること、流速度は 2m/s 以上、遡上速度は 2m/s 程度であることがわかる。この結果は砂浜上の流下・遡上シミュレーション結果の正確性の確認に使用する。

5.2. 数値シミュレーションによる波の挙動の把握

本研究では砂浜を流下・遡上する波浪の挙動を鉛直 2 次元で再現し、波浪の挙動を把握している。そのため数値シミュレーションには CADMAS-SURF 2D を用いる。

CADMAS-SURF 2D とは 2 次元非圧縮流体の Navier-Stokes 方程式と連続の式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルに VOF 法を採用し、ポーラスモ

デルを用いて形状近似精度を高めた数値モデルである。⁸⁾

これを用いて調査日(2022年9月20日)の波の挙動の把握を行う。

数値シミュレーションで使用した地形データと計算条件を図-12, 図-13に示す。

計算結果を図-14に示す。図-14より数値シミュレーション結果は汀線から15mの位置では2m/s付近であることがわかる。また表5.1.5より動画から見る波の流下・遡上速度は汀線から15mの位置では2m/s付近であることがわかる。

動画から見る波の流下・遡上速度の算出と砂浜上の遡上・流下シミュレーション結果の比較を行うと動画から見る波の流下・遡上速度は計算結果から汀線から15mや25m離れた箇所での流速は2m/s付近であった。砂浜上の遡上・流下シミュレーション結果からは図-14より汀線から15m付近で流速が2m/s付近である。そのためCADMAS-SURF 2Dを用いた計算は正しいものであると考えられる。

6. 事故時及び調査日の砂浜を流下・遡上する波の挙動の把握

柏崎中央海岸での事故時の計算結果である図-12, 図-13を見ると第1波時に汀線から5mでは流速約6m/s, 水位約0.2mである。汀線から10mでは流速約4m/s, 水位約0.15mである。また犬飼らりの研究により, 流速6m/sの場合は水位が0.1m程度, 流速4m/sの場合は水位が0.15m程度の場合でも避難が困難になるとされている。よって事故時の波浪状況では, 水中だけでなく, 砂浜上においても遡上波により事故が発生する可能性が高いと考えられる。

次は, 柏崎中央海岸での調査時(2022年9月20日)の計算結果である図-14, 図-15を見ると第1波時に汀線から5mでは流速約6m/s, 水位約0.25mである。汀線から10mでは流速約4m/s, 水位約0.2mである。このことにより調査時(2022年9月20日)の波浪状況では, 水中だけでなく, 砂浜上においても遡上波により事故が発生する可能性が高いと考えられる。

次は, 柏崎中央海岸での調査時(2022年11月18日)の計算結果である図-16, 図-17を見ると第1波時に汀線では流速約1m/s, 水位約0.3mである。このことにより調査時(2022年11月18日)の波浪状況では, 安全な状況であったと考えられる。

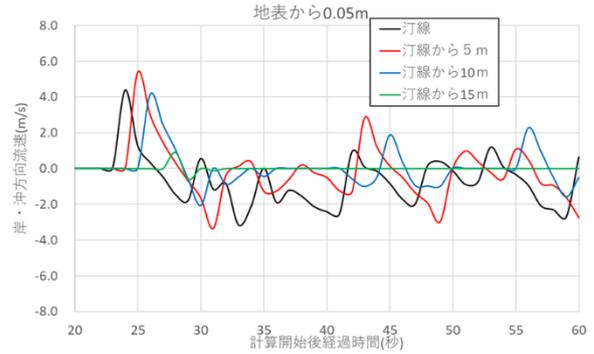


図-12 流速の経時変化図(2022年8月16日)

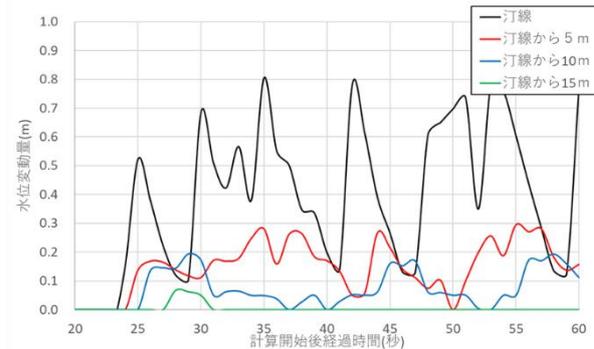


図-13 水厚の経時変化図(2022年8月16日)

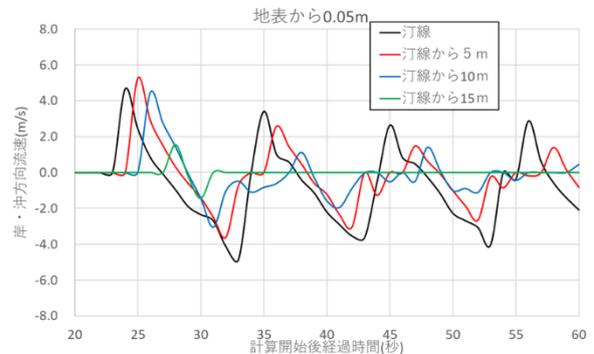


図-14 流速の経時変化図(2022年9月20日)

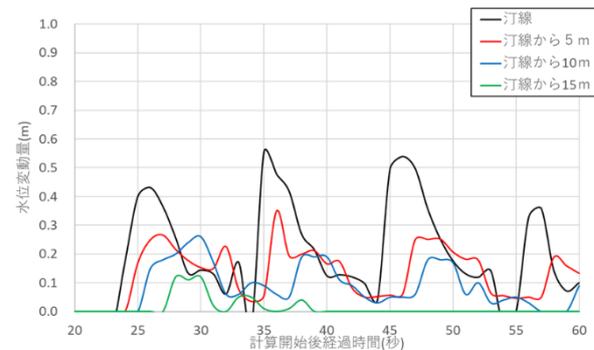


図-15 水厚の経時変化図(2022年9月20日)

7.総括

まとめとしては柏崎中央海岸において事故時付近の波向は、事故時前では、防波堤の影響を受ける波向であるが、事故時には防波堤の影響を受けない波向に変化しており、この波向の変化により波高が増大し、事故が起きた可能性が考えられる。

また犬飼らりの研究により、成人男性は水厚が30~40cm、流速2m/sになると歩行困難になるとされている。今回の結果を見ると第1波時に汀線から5mでは流速約6m/s、水位約20cmである。汀線から10mでは流速約4m/s、水位約15cmである。また流速6m/sの場合は水位が10cm程度、流速4m/sの場合は水位が15cm程度の場合でも避難が困難になるとされている。このことにより事故時の波浪状況では、水中だけでなく、砂浜上においても遡上波により事故が発生する可能性が高い。

今後の課題としては事故にあってしまった男の子は沖で流された可能性があるため、平面2次元による計算を行い、沖方面の波の挙動を把握する必要がある。

・参考文献

1)BSN：時速45キロの強い引き波「戻り流れ」が2人の命を奪ったか…

柏崎市の海水浴場で現地調査

<https://newsdig.tbs.co.jp/articles/-/160189?display=1&mwplay=1>, 最終閲覧日 2024.2.6

2)BSN：「強い引き波『戻り流れ』が原因か」 柏崎2人死亡水難事故 水難学会が調査

<https://newsdig.tbs.co.jp/articles/-/207527>, 最終閲覧日 2024.2.6

3)犬飼直之, 落合時光, 小川和真, 嶋田拓斗, 山本浩: 平成26年に新潟県上下浜で発生した水難事故時の遡上する波浪の動態把握について, 土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.72,No.2,ppI_1651-I_1656,2016.

4)犬飼直之, 篠原将也, 山本浩, 江尻義史, 大竹剛史: 砂浜を砂上する波浪で水難事故が発生する可能性のある新潟県内の海岸の把握について, 土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.73,No.2,ppI_1471-I_1476,2017

5)気象庁：メソモデル・局地モデル

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>, 最終閲覧日 2024.2.6

6)気象庁データ：NetCDF化した数値予報GPVデータ

<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-netcdf.html>, 最終閲覧日 2024.2.6

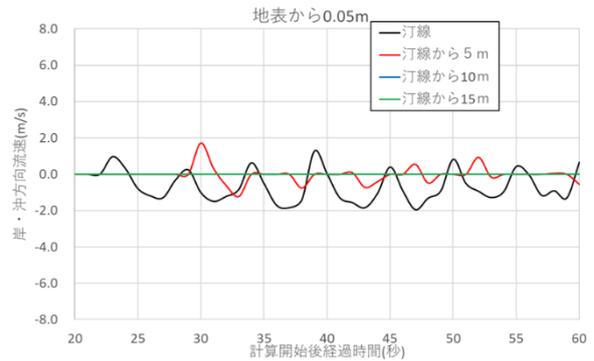


図-16 流速の経時変化図 (2022年11月18日)

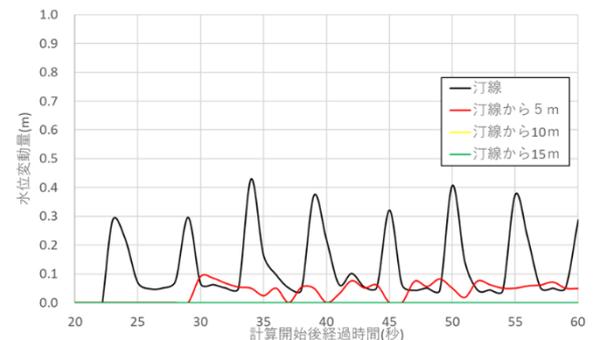


図-17 水厚の経時変化図 (2022年11月18日)

7)土木学会：水理公式集，昭和60年版

財団法人 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，平成20年5月発行