

新潟県沿岸域の港湾における波の港内湾水振動に関する研究

水圏防災工学研究室 永原優衣

担当教員 犬飼直之

1. 研究背景・目的

日本海の物流はかつて日本海側の経済を支える重要な役割を果たしてきた。その中心的な存在は江戸時代中期から明治 30 年代にかけて、日本海を回って大阪と北海道を行き来していた帆船「北前船」である。その中で新潟県内の港も北前船の寄港地の一つであり、日本海側の物流における重要な拠点であった。そして現在に至るまで新潟県内の港は国内外との物流の拠点として人々の生活を支えている。そのため、船舶が安全に停泊・係留することができ、かつ荷役作業を支障なく行うことのできる「静穏な水域」²⁾を保つ必要がある。しかし、港内へ進入する波の挙動により、船舶の安全な停泊が難しく、係留索の破断や荷役作業効率の低下などが問題となっている。また、防波堤や護岸の破壊、係留設備の損壊など、港内で構造物破壊が発生することがあり、港内で静穏度を維持することは重要な課題となっている。また、日本海では波浪に加え、「より回り波」³⁾と呼ばれるうねり性波浪や、津波などの長周期の波が発生することがあり、これらの波に対しても静穏度を確保することが重要となる。

そこで、本研究では新潟県内の港湾を対象に、港内へ入射する波浪や津波の影響を数値実験及び計算で把握した。また、過去に新潟県周辺で発生した地震の震央からの距離と津波周期を把握し、相関関係を調査した。これにより、新潟県内の港湾内で水位が増大する条件を把握し、問題点があれば対応策を考察すること、緊急体制時の防災対策のための知見を得ることを目的とした。

2. 新潟東港内へ入射する波浪の把握

2018 年 5 月 16 日午前 10 時 35 分ごろ、新潟東港

区臨港道路で長さ 12m、幅 5m、深さ 3.5m にわたって陥没事故が発生した。翌日 17 日には新潟県交通政策局港湾整備課より調査が開始され、調査の結果、護岸基礎の腐食による土砂の吸い出しによって発生した空洞化が主たる原因であると推測された。

港内では直接波が当たることで消波ブロックや矢板についた砂が飛ばされ、腐食の被害をもたらすことがある。今回も港内への進出波浪が陥没事故発生現場付近に直接入射したことによって吸出しが発生したと考えられる。そのため、事故原因の究明のためにも、港内への波浪進出状況を把握することが重要であるといえる。

そこで、新潟東港内への波浪進出状況を把握するとともに、現況及び西防波堤延伸地形（以下将来地形）を用いた港内での波高が増加する波浪条件の把握を目的とし、数値シミュレーションを用いた波浪解析モデルを実施した。

2.1 数値解析モデルと計算条件

(1)数値解析モデル NOWT-PARI

既往の研究で波浪変形予測に関しては、数多くの数値モデルが提案されてきた。その中でも今回用いたブシネスクモデルは波浪の変形を表現でき、水深変化の激しい地形にも適用できる特徴を持つ。そこで、本研究では、独立行政法人港湾技術研究所が公開している計算プログラム NOWT-PARI46d8a_r1（以下ブシネスクモデル）を用いた数値シミュレーションを行った。

(2)新潟港の波浪特性と入力波浪の決定

2020 年の NOWPHAS 新潟港の有義波高と有義

波周期の分布図を作成したところ、波高と周期は相対的に増大しており、波高 3m 時に周期は 8s 程度を示すことが判明した。また、波向別波高、周期の出現頻度図から、波高 2m 以上を観測した場合、波向 NW~N の出現頻度が高く、周期 8s 以上の波はすべて波向 NW~N が観測されたことが判明した。そのため、今回の数値計算では波高 2~5m、周期 7~10s として、出現頻度の多い波向 NW~N を入力波とし、計算を行った。

(3)計算条件

表-1 に計算条件を示す。計算用地形データは 10m 格子間隔で作成し、反射波の影響を受けないよう測量領域の外周にスポンジ層を設けた。

表-1 NOWT-PARI 計算条件

	設定値等
計算格子 (m)	498 × 349
格子間隔 (m)	10
計算時間 (s)	13000
有義波高 (m)	2.0 ~ 5.0
有義波周期 (m)	7.0 ~ 10.0
波向	NW, NNW, N
タイムステップ (s)	0.02
データ出力間隔 (s)	0.1

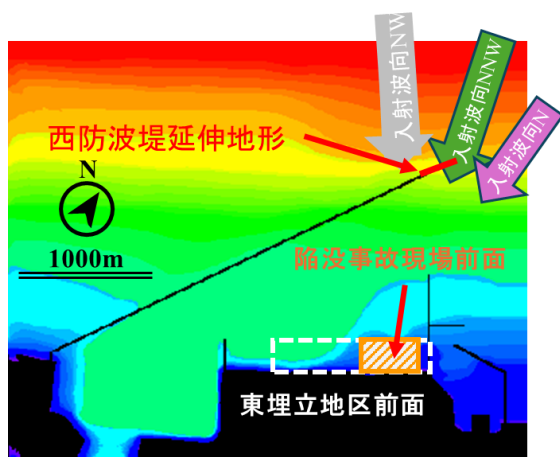


図-1 新潟東港地形データ

2.2 結果

今回の数値シミュレーションの結果から、陥

没事故発生現場付近では波向 NNW, N の水位が増大することが判明した。そのため、今回の事故においては波向 NNW, N の入射波の影響が大きいと考えられる。また、今回検討した将来地形では、陥没事故現場付近で現況地形に比べ約 20% の波高低減効果が見込める。

また、東埋立地区前面ではほぼすべてのケースで波向 N で最大波高が算出された。なお、東埋立地区前面では将来地形で約 40% の波高低減効果が得られると考えられる。

表-2 東埋立地区前面 波高低減率

波向	波浪条件	地形条件	2m,7s	3m,8s	4m,9s	5m,10s
NW		現況地形	0.18	0.22	0.66	1.49
		西防波堤延伸地形	0.10	0.30	0.44	0.93
		波高低減率	44.44	-36.36	33.33	37.58
NNW		現況地形	0.55	0.70	1.61	2.58
		西防波堤延伸地形	0.22	0.59	0.93	1.11
		波高低減率	60.00	15.71	42.24	56.98
N		現況地形	0.48	1.06	2.47	3.76
		西防波堤延伸地形	0.35	0.82	1.37	2.87
		波高低減率	27.08	22.64	44.53	23.67
波高低減率平均			43.84	0.66	40.03	39.41

表-3 陥没事故現場前面 波高低減率

波向	波浪条件	地形条件	2m,7s	3m,8s	4m,9s	5m,10s
NW		現況地形	0.11	0.19	0.55	0.91
		西防波堤延伸地形	0.09	0.14	0.34	0.56
		波高低減率	18.18	26.32	38.18	38.46
NNW		現況地形	0.44	0.58	1.37	2.40
		西防波堤延伸地形	0.22	0.31	0.84	0.66
		波高低減率	50.00	46.55	38.69	72.50
N		現況地形	0.26	0.93	1.30	3.03
		西防波堤延伸地形	0.35	0.82	1.28	1.78
		波高低減率	-34.62	11.83	1.54	41.25
波高低減率平均			11.19	28.23	26.14	50.74

3.新潟県沿岸域に襲来する津波の把握

3.1 令和 6 年能登半島地震の津波の港内への影響

令和 6 年能登半島地震において、新潟県内では姫川港、直江津港、柏崎港、新潟東港、新潟西港の計 5 港で津波が観測された。

3.1.1 共振現象の確認

(1)観測された津波周期及び津波の高さ

能登半島地震時に各港湾の港内外で観測された潮位をゼロアップクロス法で整理し、観測津波周期及び津波の高さを算出した。

(2)周期変化時の港内振動の変化について

観測周期と比較するため、平面的な津波挙動を把握する必要がある。そこで、流体の運動方程式及び連続式を陽的に差分した平面2次元の津波伝播数値シミュレーション¹⁾を用いて直江津港へ入射する波の周期を変化させ、直江津港内で水位変動量が增大する状況を調べた。

(3)観測津波周期と固有周期の比較

入射波周期が港湾の固有周期と一致することで、波が港内で増幅される共振現象が発生する。今回検討を行った能登半島地震においても、姫川港や直江津、柏崎港の港内で港外より大きな水位変動を観測したことから、共振現象が発生したと考えられる。そこで式(1)、(2)^{2,3)}を用いて港内の1次~3次モードの固有周期を算出した。

$$T = \alpha \cdot 4l / \sqrt{gh} \quad \dots(1)$$

$$\alpha = \left\{ 1 + \frac{2b}{\pi l} \times \left(0.9228 - \log \frac{\pi b}{4l} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2)$$

ここで l : 港奥までの湾長(m), h : 平均水深(m), α : 港湾補正係数, b : 湾幅(m)である。

(3)結果

今回の地震において観測データを整理したところ、姫川港、直江津港、柏崎港の港内で顕著な水位の増幅が見られた。次に、水位伝播計算モデルを用いた数値シミュレーションでは、周期 25 分で水位が増大した。これは今回の地震において観測された直江津港の港内観測津波周期 27.4 分とほぼ一致するため、各港湾の固有周期は数値実験においても把握可能だと考えられる。

また、表-1 に今回検討を行った 5 港の固有周期と観測津波周期の比較を示す。今回の結果から、複数の港で固有周期は観測津波周期と近い値が得られた。よって、姫川港、直江津港、柏崎港で共振現象が生じたと考えられる。しかし、新潟東港、新潟西港では今回港奥として設定した部分と検潮所の

位置が異なるため、比較は難しい。また、今回の結果から、算出した固有周期と令和 6 年能登半島地震で観測された津波周期はある程度近い値を取ることが判明した。そのため、今回固有周期の算出のために用いた諸数値はある程度有用であると判断できる。

表-1 各港の固有周期と観測周期の比較

	姫川港		直江津港		柏崎港		新潟港		
	港外	港内	NOWPHAS 直江津港 (港外)	港内	港外	港内	NOWPHAS 新潟港 (港外)	新潟東港 (港内)	新潟西港 (港内)
湾長 (m)		1,700		5,800		2,400		7,300	7,000
固有周期(1次モード)(分)		12.22		38.38		21.05		44.56	52.54
固有周期(2次モード)(分)		3.94		12.41		6.35		14.45	17.30
固有周期(3次モード)(分)		2.33		7.34		3.61		8.56	10.32
観測周期 (分)	12.3	16.4	41.4	27.4	21	21.2	83	45	35.8
観測津波の高さ (cm)	85	159	16	155		142	13	8	19

3.1.2 増幅率の算出

3.1.1 より、観測津波周期と固有周期は近い値を取ったものの、完全に一致することはなかった。そのため、港内の水位の増幅についてさらなる検討が必要であると考え、増幅率の算出を行った。また、3.1.1(2)で用いた津波伝播シミュレーションでも入力周期を変更し増幅率を調べた。

(1) 増幅率の算出

増幅率は入射波に対して港内でどれだけ水位が増加したか表したものである。なお、増幅率は以下の式¹⁾を用いて算出した。ここで、 R :増幅率、 R_0 :湾奥の増幅率である。

$$R(x) = \frac{\eta_{max}}{a_m} = R_0 \cos kx, R_0 = \frac{1}{\cos kx} = \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi T_1}{2 T_*} \right)} \quad \dots(3)$$

(2)数値実験による増幅率の算出

今回用いたメリアンの式(2)は水路のみを通り港奥に到達すると考えるものであるため、複雑な地形の港湾に対応することは難しい。そのため、現況地形に加え、直江津港の①現況地形、②水路以外の部分を埋め立てた埋立地形、③②に加え沖防波堤と西防波堤を接続した埋立・防波堤接続地形を対象とし、数値シミュレーションを行った。

また、今回は新潟東港においても検討を行った

新潟東港は人流・物流の拠点としてだけでなく、近年洋上風力発電設備などの設置に必要な基礎港湾に指定されたこともあり、災害にも強い港湾であることが望ましい。そのため、数値シミュレーションにより水位が増大するじょうけんを把握することも重要であると考えた。

(3)結果

ここでは(3)式を用いて増幅率を算出した。例として、今回算出した直江津港の増幅率を図-2 に示す。算出した増幅率において、すべての港で入射波に対して顕著な増幅効果が得られ、それぞれ 1 次モードの固有周期により共振現象が生じたと考えられる。また、数値シミュレーションによる港内(験潮所)における各地形の増幅率を図-3 に示す。数値シミュレーションによる増幅率では、①地形では周期 25 分で増幅率が增大したほか、②地形、③地形では直江津港の 2 次モードと近い周期 15 分で約 5.0 の顕著な増幅率が得られた。各地形の港内(験潮所)の増幅率を比較すると、②地形、③地形にて、周期 15 分で 2 次モードの固有周期をもつ波によって共振現象が生じた。また、現況地形と同様に、防波堤の間を接続しないことで 1.0 も増幅率を低減することが判明した。また、実際の複雑な地形を持つ港湾では、増幅率はさらに低減することが分かった。

新潟東港の数値シミュレーションによる増幅率を図-4 に示す。新潟東港では港口部と港奥部では異なる増幅率を示した。また、周期 25 分、50 分で増幅率が大きくなることから、それぞれ 2 次モード、1 次モードの固有周期に対して共振現象が発生する可能性があると考えられる。

これらの結果から、数値計算による増幅率と式(2)、式(3)で算出した固有周期及び増幅率は近い値が得られた。そのため、簡単な計算式で容易に各港湾の固有周期が求められると判明した。

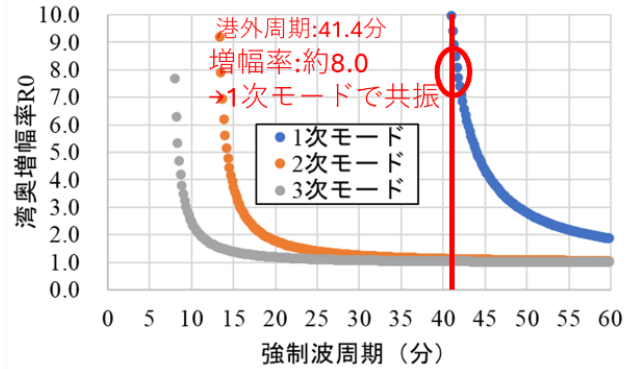


図-2 直江津港の増幅率

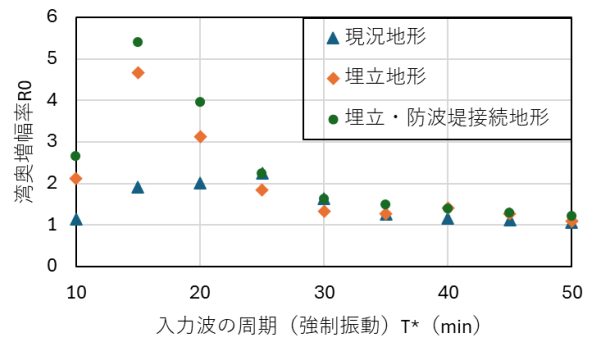


図-3 直江津港 港内(験潮所)における各地形の増幅率

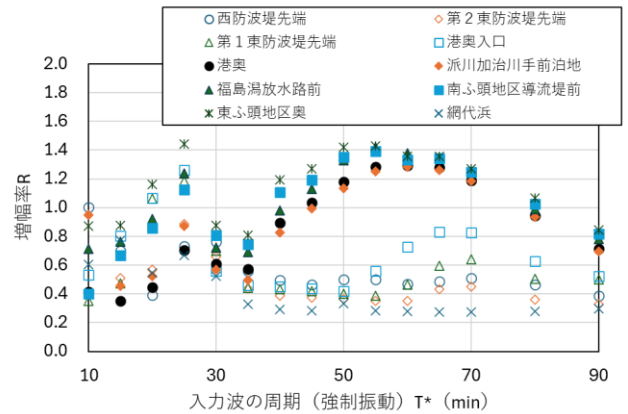


図-4 新潟東港 シミュレーション増幅率

3.2 新潟県に津波が襲来した地震

(1)新潟県内で津波が観測された地震

新潟県では過去に新潟地震、中越沖地震、2019 年山形沖地震、令和 6 年能登半島地震などで津波が観測された。そのため、これらの地震について調査し、新潟県に到達する津波の特徴の把握を行った。

(2) 観測津波距離と震央からの距離の相関

上記の津波を整理したところ、震央からの距離がある程度近い地震により発生した津波の場合は、距離と周期にはある程度相関関係があることが判明した。また、新潟県周辺では周期 20~40 分、特に 30 分前後の津波が多く襲来していることから、固有周期約 30 分の港湾においては今後発生する津波においても港内で水位が増大する共振現象が発生する可能性があると考えられる。そのため、防波堤(湾長)を延伸するなどの工夫が必要になると考えられる。

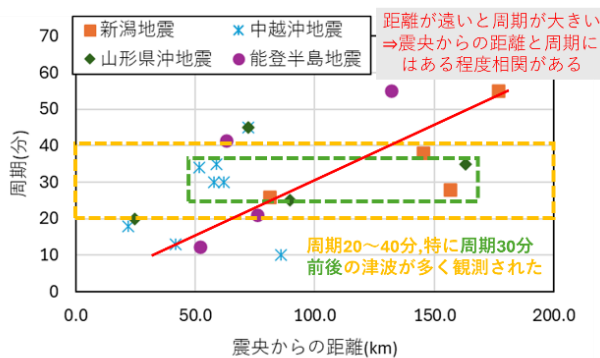


図-5 観測津波周期と震央からの距離の相関関係

4. まとめ

本研究では新潟東港内に入射する波浪の推定、令和6年能登半島地震で観測された津波の観測津波周期、固有周期、共振現象の把握及び新潟県周辺で津波が観測された地震についての調査を行った。

これらの結果から、新潟東港では西防波堤を延伸することで約 20%の波高低減率が得られることが判明した。そのため、新潟東港では西防波堤を延伸することで港内静穏度の上昇が期待される。

次に、観測データと算出した固有周期、増幅率の比較より、今回の地震で津波を観測した 5 港において、港内で水位が増大する共振現象が発生したこと、固有周期は計算式と数値実験の両方で算出可能であることが判明した。また、過去の地震デー

タから新潟県周辺では周期 30 分前後の津波が多く襲来することが判明した。今回検討した 5 港で固有周期 30 分に該当する港はなかったが、今後港湾計画を行う上では共振現象が発生しないよう、防波堤を延伸するなど固有周期に対して考慮が必要であると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 犬飼直之,永沢薫:数値計算による東北地方太平洋沖地震津波による岩手県北部での構造物被災状況の把握,土木学会論文集 B2(海洋工学),Vol.68,No.2,I_306-I_310,2012
- 2)K. Honda, T. Terada, Y. Yoshida &D. Ishitani: Secondary undulations of oceanic tides, Journal of College of Science, Imperial University 24 (1903).
- 3) 宇野木早苗:沿岸の海洋物理学,東海大学出版,1993 年