

河川流による酒田港港口部の波浪場への 影響について

EVALUATION OF THE RIVER FLOW INFLUENCE TO THE WAVE HEIGHTS AT THE SAKATA PORT ENTRANCE AREA

梅沢信敏¹・永井紀彦²・平山克也³・北村道夫⁴・鈴木智浩⁵・山田貴裕⁶

Nobutoshi UMEZAWA, Toshihiko NAGAI, Katsuya HIRAYAMA

Michio KITAMURA, Tomohiro SUZUKI and Takahiro YAMADA

¹国土交通省東北地方整備局酒田港湾事務所長 (〒998-0061 山形県酒田市光ヶ丘5-20-17)

²フェロー会員 (独)港湾空港技術研究所 海象情報研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴(財)沿岸技術研究センター調査部 主任研究員 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁵(株)エコー水理実験部 主任 (〒221-0052 神奈川県横浜市神奈川区栄町10-35)

⁶(株)エコー調査解析部 主任 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

The Sakata Port is located at the mouth of Mogami-River. It is sometimes claimed that there exist small-boats operational problems at the port entrance due to the chopping waves with interaction between the incident waves and the river flow. Nevertheless, sufficient study has not been conducted on the problems up to present stage due to difficulty of the engineering approach. This paper introduced the results of three types of the engineering study to solve the problems, witness questionnaire to the small-boats operators, field waves and currents observation with four seabed installed acoustic gauges, and the numerical simulation using the newly developed model with consideration of waves and currents interactions. It is concluded that the breakwaters extension project will be a good countermeasure.

Key Words : *chopping waves, river flow, Sakata Port, questionnaire, observation, Boussinesq equation*

1. 調査目的

酒田港の港口部は、最上川の河川流の影響を受け、小型船舶の航行に支障が生じる懸念がもたれている。しかし、今日に至るまで、河川流が海域の静穏性にどのような影響を与えるかについては、定量的な実態調査や解析がなされていない。このため、こうした懸念に対する合理的な対応方針が示されていない。本研究は、より一層の利用者にやさしい港づくりをめざす一環として、酒田港港口部の波浪場の現状を明らかにすることを目的として、港湾利用者へのアンケート調査、港外・港内の同時波浪観測による面的な波浪特性の解析、河川流による波浪増大を定量的に示すことのできる数値シミュレーション手法の開発と検証を行った。

2. 調査方法

調査方法としては、海域利用に関するアンケート調査、波浪と流れの現地観測、波浪場の数値シミュレーションの3項目とした。図-1に調査項目間の関連性を示す。

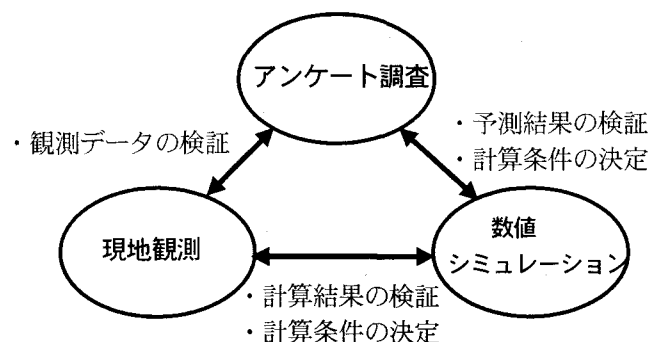


図-1 調査項目間の関連図

(1) 海域利用に関するアンケート調査

アンケート調査は、酒田港港口部の周辺海域における波浪場の現状を把握する目的で行った。アンケート調査の対象は、酒田港を利用している山形県漁業協同組合所属の漁船所有者と山形県酒田小型船舶協議会に所属する小型船舶の所有者とし、平成15年度、平成16年度の2カ年にわたって実施した。平成15年度のアンケート調査では、サンプル数382に対して151（回収率は40%）の回答を得た。平成16年度のアンケート調査では、平成15年度時のアンケート結果の中で詳細に記述を頂いた27名に限って実施し、22（回収率は81%）の回答を得た。平成15年度の調査項目は、①港口部における限界波高、②出港月、③出港頻度、④所有船舶の長さの諸元、⑤通常時航行するルート、⑥酒田港周辺で波高が高い場所、⑦操船障害に遭遇した場所の7項目である。平成16年度の調査項目は、平成15年度のアンケート結果の補完を目的に、①具体的な出港日（8月、9月）、②出港時の波高確認方法、③酒田港周辺で波高が高い場所（詳細な位置を記入）、④三角波の発生位置（詳細な位置を記入）の4項目である。

(2) 波浪と流れの現地観測

河川流などの流れの影響を受けた波浪場の計算モデルは、研究事例が少ないため、計算モデルの現地適用性を検証する必要がある。そこで港湾利用者から操船障害が生じると報告されている港口部において、波及び流れの現地観測を行い、この結果をもとに、計算モデルの現地適用性の検証資料を作成した。また、現地データをもとに、港口部で生じている現象の把握を行った。さらに、酒田港沖で発生する波向を明らかにするための現地観測も合わせて実施した。

現地観測は、図-2の下図に示す酒田港沖1カ所（St.A）¹⁾と、上図に示す港口部3カ所（St.1～St.3）で行った。ここで、St.Aはナウファスの観測点の一つである。観測は、St.AおよびSt.1～3に波浪計（DL-2）を、St.2のみに流速計（ADCP）も設置した。なお、流速計を用いて、水面から海底付近までの全水深を1.0m層で区切り、層別流速を計測した。波浪計及び流速計による観測期間は、観測機器設置日（5/17）から撤去日（7/23）までの約2ヵ月間である。なお、最上川河口部に最も近いSt.3では、7月18日頃に発生した最上川の出水の影響により、波浪計が流失した。そのため、6月16日以降の観測データが欠測している。

(3) 波浪場の数値シミュレーション

河口に隣接した酒田港では、南防波堤に沿って港口部に達した河川流と波が干渉して局所的な波高増大が生じ、航行船舶の障害となることが懸念される。このような河川流の影響を受けた平面波浪場を表現できる実用的な波浪変形計算モデルは、現在のところ研究段階にある。そこで、本調査では、NOWT-PARI^{2),3)}による非線形波浪解析を利用した流れによる波高増大の簡易算定手法（以降、波・流れ簡易解析手法と記述）^{4),5),6)}を用いた。こ

れは、微小振幅波理論に基づき、Wave Action 保存式から求められる流れによる波振幅の増幅量を考慮し、平面波浪分布に反映できる算定手法である。なお、この詳細については文献4)を参照されたい。本研究では、はじめに、現地観測で捉えた波高が流れによって増大する現象の検証計算を行った。次に、図-2の上図に示す酒田港第2北防波堤の延伸に伴い、最上川の流れの影響を受けて、酒田港港口部の波浪場がどのように変化するかを予測した。ここで、流れの計算は、流れの観測結果をもとに、4層レベルモデルを用いた。

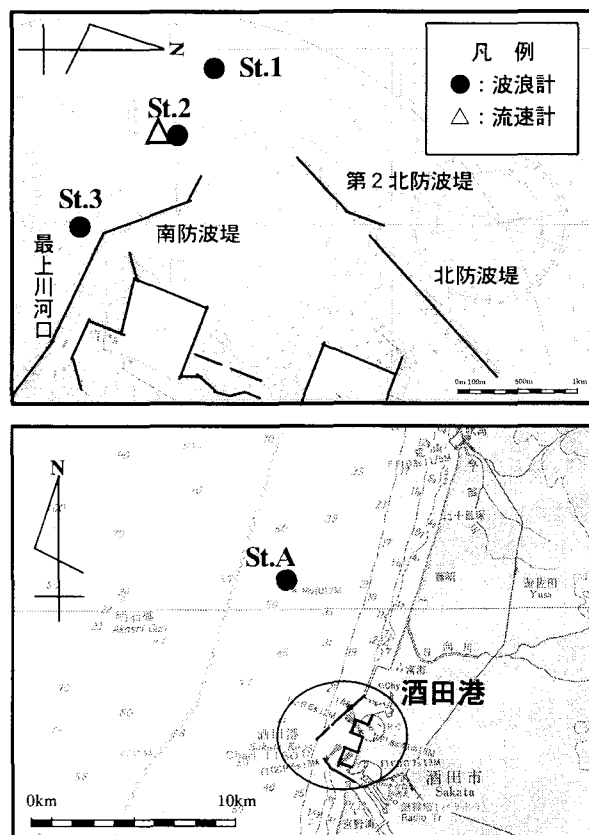


図-2 酒田港の港形と現地観測の位置図

3. 調査結果

(1) 海域利用に関するアンケート調査の結果

平成15年度と平成16年度に実施したアンケート調査の主な結果は、以下のようにまとめられる。

① 酒田港周辺海域で波が高い箇所について

平成15年度に、アンケート調査を行った結果、最上川からの河川流の影響が予想される海域で最も多くの回答を得た。回答数は全体の5割程度となった。次いで、港口部、北防波堤の外港側という回答が多かった。平成16年度は、酒田港周辺海域を約200m×200mの格子状に分けて、より詳細な海域の特定を行った。その結果を図-3に示す。ここで、有効回答数は22であり、個々のアンケートは複数の格子の選択も可としている。平成15年度の結果と同様に、最上川からの河川流が影響する海域、

港口部、北防波堤の外港側の前面海域において回答数が多い。このような海域において、高い波が発生する要因は、最上川からの河川流による波高の増幅と防波堤からの反射による波高の増大が考えられる。

なお、このアンケート結果は、利用者が実際にその海域を航行して波高が高いと感じた場所であるため、利用者が航行する頻度の高い海域の回答数が多い点は留意する必要がある。しかし、高い波が発生する海域は抽出されたと考えられる。

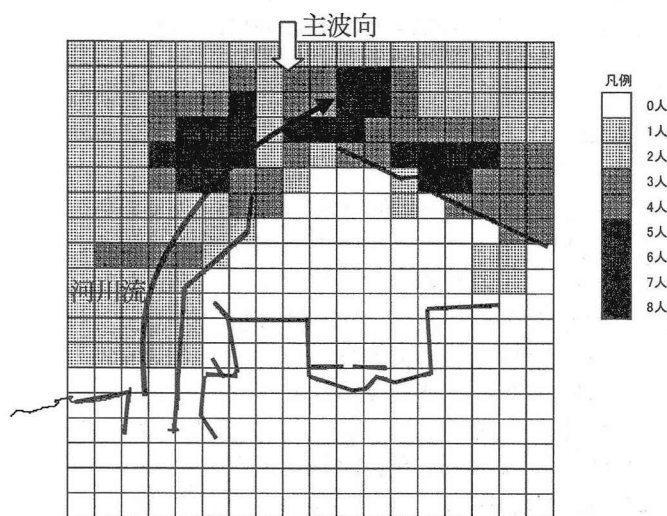


図-3 波高が高い海域の抽出結果

② 限界波高について

航行限界波高は1.0m～1.5mと回答した 경우가多く、全体の8割程度である。一方、所有船舶の長さは、6.0～10.0m程度の場合が多く、船舶が長くなるほど航行限界波高は高くなる傾向を示す。これは、船の長さによって、航行の限界と感ずる波の高さが変わることを示す。アンケートの集計結果から判断すると、小型船舶の利用者は、波高が1.0～1.5m程度を航行限界波高と判断していることが明らかになった。本研究では、この波高を小型船舶の航行限界波高と定義する。

③ 波の増幅状況に対するアンケートの回答

利用者の経験をもとに得られた波が増幅する状況に関する回答例を、以下に挙げる。

- ・ 強風時に港口の三角波が高くなる。
- ・ 前日、北東風の時、北防波堤および第2北防波堤による反射波が沖合4～5マイル付近まで及び、小型船には危険である。
- ・ 西または北西風の時、沖合まで北防波堤および第2北防波堤の反射波がある。
- ・ 北防波堤および第2北防波堤の反射波が、入射波と重なり危険度の高い三角波が発生する。
- ・ 南西風の時、波が南防波堤にぶつかり危険である。
- ・ 南西風の時、反射波が非常に高く、三角波になる。
- ・ 最上川の流れと重合する付近は特に波が高い。
- ・ 最上川が増水したとき、または風が強いとき、よく三角波が発生する。

- ・ 最上川河口では、南西又は北西の強風時に三角波が発生する。

回答例を集約すると、風向と波の増幅には何らかの関係が読み取れる。風波の場合、風向と波向はほぼ一致することから、波向と波の増幅に関係があると考えられる。南西の風の時（南西の波向）は、南防波堤に直角に波が入射し、反射による重複波が発生し、波高の増幅の要因となる。また、北西の波向は、北防波堤および第2北防波堤で同様な現象が生じる。さらに、最上川河口から港口部付近では、河川流による波高の増幅が発生していることも指摘されている。

④ アンケート調査結果のまとめ

アンケート調査の結果は、以下のようにまとめられる。

- ・ 港口部付近の海域における小型船舶の航行限界波高は1.0～1.5m程度である。
- ・ 北防波堤および第2北防波堤と南防波堤からの反射により、防波堤前面海域で重複波が発生し、波高が増幅する。
- ・ 最上川の出水と波が重合し、波高が増幅する。
- ・ 利用者は、波高が増幅した波を、経験的に三角波と呼んでいる。

(2) 波浪と流れの現地観測の結果

現地観測データの解析において、最上川の出水と波高増幅の関係を明らかにするため、最上川の流量と波高観測値に着目してデータを整理する。また、港口部の波高増幅と沖波諸元の関係を明らかにする。

図-4は、最上川の出水と波高増幅の関係をまとめたものであり、最上川の流量の昇順に、同時刻の波高観測値を並び替えてある。波高の観測値は、St.Aの波高値に対する3地点の波高の比として表示している。図によれば、最上川の流量が450m³/s以上になると、3地点ともに波高増幅率が右肩上がりの傾向を示し、最上川河口部に最も近いSt.3における波高の増幅傾向が顕著である。

次に、港口部における波高増幅と沖波諸元との関係を明らかにするため、波高の増幅が確認された流量450m³/s以上を対象に、波高増幅率と沖波諸元の相関解析を行った。なお、出現率が少ない流量1,000m³/s以上の場合に観測された波浪は、解析の対象外とする。図-5は、地点別・流量別に分類した波高0.5m以上の沖波周期と波高増幅率の相関図を示す。3地点とも、出現日数が年間100日程度となる流量450～1,000m³/sの場合に、相関係数が0.7以上と高くなり、St.1からSt.3へと最上川河口部に近づくにつれて相関係数が高くなる。波高増減の境となる沖波周期は、概ね6.0sとなり、3地点ともに一致する。また、観測位置が最上川河口部に近づくにつれて相関式の傾きは大きくなり、波がより増幅している状況がわかる。

これらの解析結果より、波高増幅が顕著となる諸条件は以下のようにまとめられる。

- ・ 沖波条件：沖波周期6.0s以下、波高0.5m以上
- ・ 最上川の流量条件：流量450m³/s以上

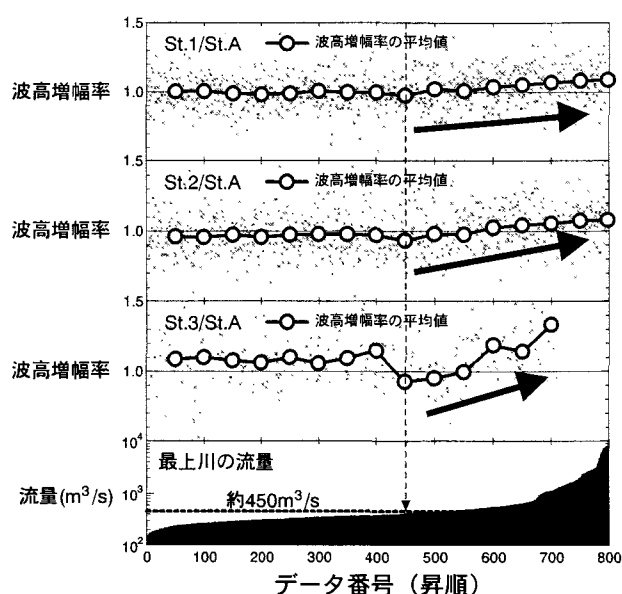


図-4 最上川の河川流量の昇順に並び替えた波高の観測値 (St.Aの波高により基準化して表示)

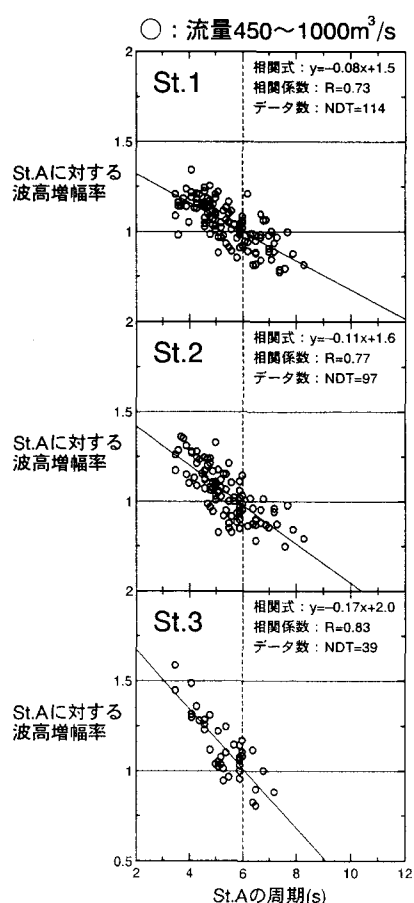


図-5 最上川河口部の波浪観測点における波高増幅率と沖側の波浪観測点St.Aにおける沖波周期との相関関係

(3) 波浪場の数値シミュレーション

① 計算モデルの現地適用性の検証 (再現シミュレーション)

計算モデルの検証のために、現地観測結果から抽出し

た諸条件は表-1のとおりである。ケース1は河川流量が平時の流量で、沖側の波高が比較的高い場合、ケース2は河川流量が $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水時の場合である。波向は、波高の増幅が大きいと推察される河川流に対して逆向きのWNWである。

はじめに、河川流による河口部の流速観測値との整合性を得るためにSt.2における現地観測結果との比較を行った。流れの計算は4層レベルモデルを用い、上記の河川流量の条件で行い、観測値の再現性を確認することにより、計算モデルを検証した。表-2は、河川流の計算値と観測値との比較結果を示す。計算値は、4層レベルモデルで、河口部海域の全水深を上層から下層まで4層に分けたうち、最上層の値を採用した。一方、観測値は、St.2においてADCPで観測されていることから、上層から下層まで1.0mピッチでデータが取得できている。この結果をもとに、計算値との整合をとるため、上層から下層までを4層に分け、最上層の値を比較に用いた。この結果、ケース1は観測値0.22に対して計算値が0.15、ケース2は観測値が0.37に対し、計算値が0.38となった。これより、波に影響する表層の流れについては、ほぼ現地の流速を再現していることが確認できた。また、図-6にケース2の流速の平面分布図を示す。この流速分布を見ると、河川からの流れが港口部に向かって偏向している。この現象は、写真-1に示す最上川河口の状況からも確認でき、出水時に河川から流れ出た濁水が港内に流入している。

次に、得られた河川流の計算結果を入力条件として、波・流れ簡易解析手法を用い、河川流による波高の増幅を考慮した波浪場の計算を行う。図-7に波高の増幅率の平面分布図を、図-8に波高分布を示す。また、表-3、表-4に計算値と観測値の比較結果をまとめる。表中、波のみと記述した計算結果は、流れを考慮しない場合のブシネスク方程式法による計算結果である。ケース1の条件の場合は、簡易解析手法による計算値と現地観測値とで若干の差が見られる。一方、ケース2の条件の場合は、良好な一致が得られた。また、波高の増幅率が1.0以上であることから、河川流の影響により波高が増大していることが表現されている。増幅率は、河口に近づくほど大きな値となる。これは河口付近の流速が大きいためである。なお、増幅率の算定にあたっては、現地観測で得られた流速値を用いた結果も併記した。計算モデルから推定された波高の増幅率とほぼ同様の値が得られた。このことから、増幅率については適切な値が得られたと評価できる。さらに、小型船舶への影響という観点に立てば、波形勾配も影響する。そのため、河川流によってどの程度、波形勾配が変化するかも検討した。表-5に波のみの計算と河川流を考慮した計算における波形勾配の変化を示す。河川流によって、波高が増幅するとともに波長が短くなるので、波形勾配は大きくなる。よって、河川流の影響により、小型船舶の航行は厳しい条件となることが明らかとなった。

表-1 計算モデルの検証に用いた諸条件

ケース	時刻	波向	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	$Q(m^3/s)$
ケース 1	5/25 16:00	WNW	1.25	6.0	543
ケース 2	5/22 0:00	WNW	0.62	5.6	1158

表-2 河川流の再現計算結果

St.2	ケース 1		ケース 2	
	計算結果	観測値	計算結果	観測値
流速 (m/s)	0.15	0.22	0.38	0.37

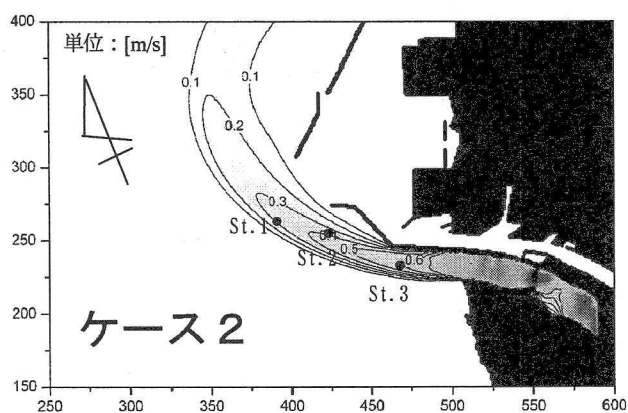


図-6 河川流の平面分布図

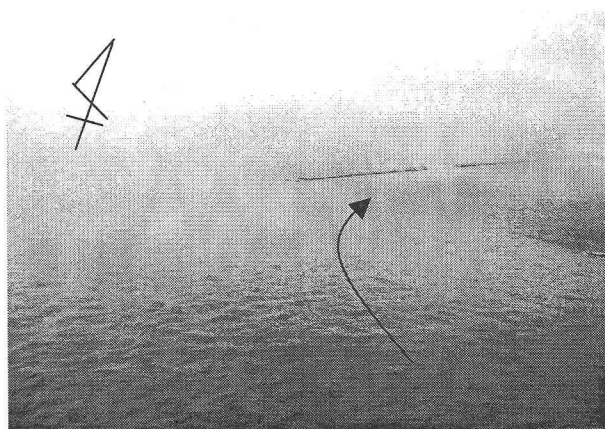


写真-1 最上川の出水時の航空写真

表-3 ケース 1 の条件による波浪場の再現計算結果（簡易解析手法）

ケース	波のみ $H_{1/3}(m)$	増幅率	簡易解析手法 $H_{1/3}(m)$	観測値 $H_{1/3}(m)$
St.1	1.10	1.00	1.10	1.35
St.2	1.11	1.03 (1.03)	1.14 (1.14)	1.23
St.3	0.95	1.08	1.02	1.19

() 内で示した数値は現地観測波高から推定した数値。

表-4 ケース 2 の条件における波浪場の再現計算結果（簡易解析手法）

ケース	波のみ $H_{1/3}(m)$	増幅率	簡易解析手法 $H_{1/3}(m)$	観測値 $H_{1/3}(m)$
St.1	0.54	1.06	0.57	0.64
St.2	0.55	1.09 (1.06)	0.60 (0.58)	0.62
St.3	0.47	1.17	0.55	0.57

() 内で示した数値は現地観測波高から推定した数値。

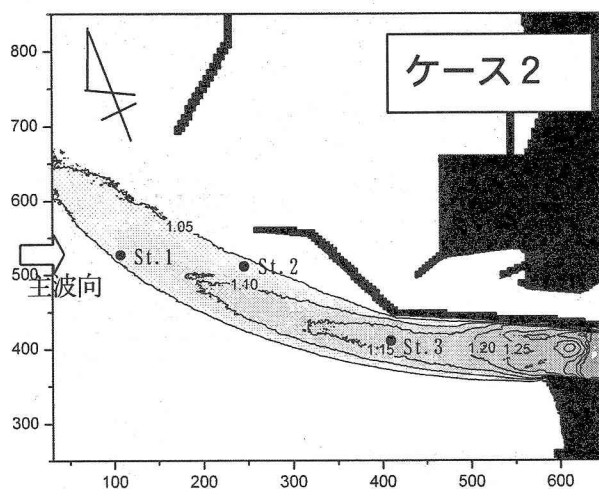


図-7 河川流による波高の増幅率分布図

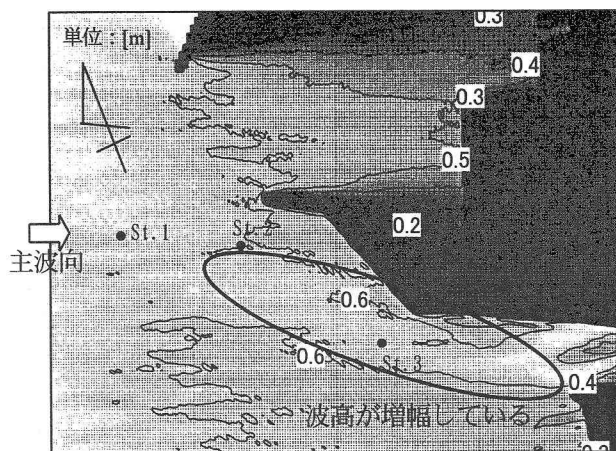


図-8 ケース 2 の条件による波高分布図

表-5 簡易解析手法による波形勾配の変化

ケース2	波のみ (H/L)	簡易解析手法 (H/L)	波形勾配の 増幅率
St.1	0.011	0.012	1.09
St.2	0.010	0.012	1.18
St.3	0.010	0.014	1.34

② 波浪場の予測シミュレーション

検証を行った計算モデルを用いて、予測シミュレーションを行った。予測シミュレーションは、現況地形の防波堤延長（969m）の場合と計画まで延伸した将来地

形の防波堤延長(1900m)の場合の2種類である。計算の諸条件は、アンケート調査および現地観測の結果をもとに、波向はWNW、波高は1.5m、周期は5.0s、流量は $1000\text{m}^3/\text{s}$ とした。現況地形および将来地形における河川流の流速計算結果を図-9に示す。現況地形と比較すると、防波堤が延伸しても、小型船が航行する港口部の海域において、流速に大きな違いはない。一方、図-10の波高分布を見ると、将来地形において港口部付近の海域は波高が小さくなる。そのため、河川流による流速が同程度であっても、現況地形に比べると波高の絶対値が小さいため、河川流による波高の増幅は目立たなくなる。このことは、防波堤が延伸することによって、酒田港の利用者が懸念している河川流による小型船舶の航行障害は、現況地形よりも頻度が低下することを表す。

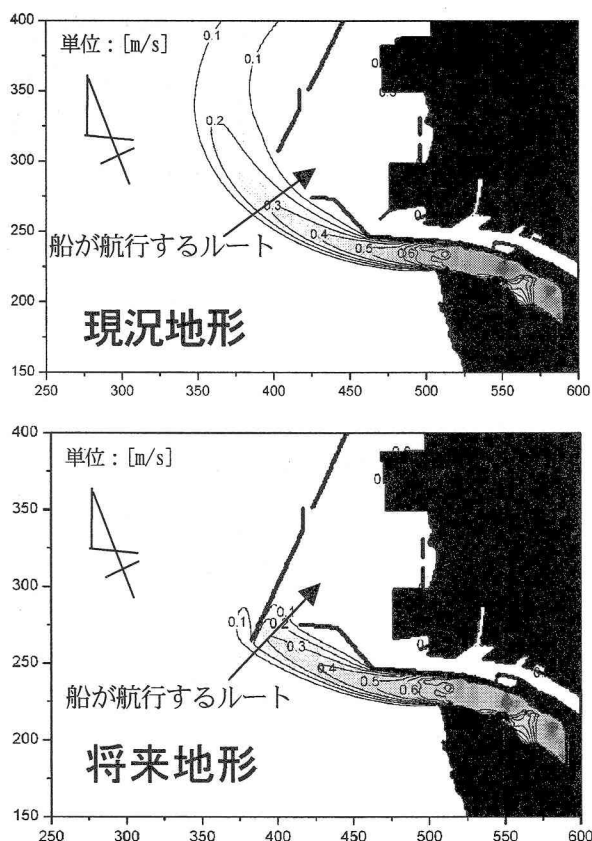


図-9 流れの計算結果の比較

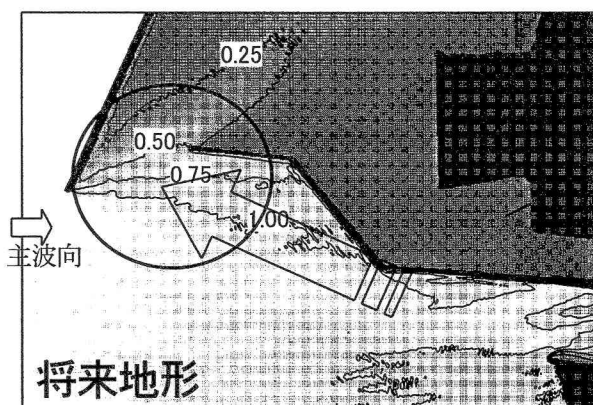


図-10 将来地形の波高分布図

4. まとめ

海域利用に関するアンケート調査、波浪と流れの現地観測、波浪場の数値シミュレーションをもとに、小型船舶の航行に対する酒田港港口部の静穏性を評価した。主な成果を以下にまとめる。

- ・ 酒田港港口部付近の海域における小型船舶の航行限界波高は1.0～1.5m程度である。
- ・ 北防波堤および第2北防波堤、南防波堤の反射により防波堤付近で重複波が発生し、波高が増幅する。
- ・ 最上川の出水によって波高が増幅する。
- ・ 酒田港港口部は、沖波や最上川の出水等の諸条件により波高増幅が生じ、操船障害の要因となっている。
- ・ 河川流の影響を考慮した波浪場の計算のために、ブシネスク方程式による波浪変形計算法を基礎とする波・流れ簡易解析手法を適用した。この手法により、波浪の現地観測値をほぼ再現できた。
- ・ 河川流の予測計算結果から判断すると、小型船の航行海域の流速は、防波堤の延伸による大きな差が認められない。
- ・ 波高の予測計算結果から判断すると、防波堤が延伸することによって、防波堤背後海域の波高は小さくなる。このため、河川流による波高増幅が小型船舶に与える影響は、現況地形に比べて小さくなると予測される。

謝辞：本稿は、国土交通省東北地方整備局酒田港湾事務所が実施した調査の内容を取りまとめたものである。調査の実施は委員会形式で行われ、同整備局仙台港湾空港技術調査事務所、山形県、港湾空港技術研究所等の関係各位からご指導並びにご助言を頂いた。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) 永井紀彦・里見茂：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2003)、港湾空港技術研究所資料 No.1094, p.89, 2005。(各港湾波浪観測統計図表はCD-ROM化。2002年以前の観測記録も、港湾空港技術研究所資料として既刊。)
- 2) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料, No.1036, 2002
- 3) 平山克也：NOWT-PARIによる多方向波の計算精度の検証と効率的な計算手法の開発、港湾空港技術研究所資料 No.1046, 2002.
- 4) 平山克也・峯村浩治：河口部における波高増幅率の簡易算定手法、海洋開発論文集, 第21巻, 2005 (印刷中)。
- 5) Brevik I. and Aas, B, Flume Experiment on waves and currents. I. Rippled bed, Coastal Eng., Vol.3, pp.149-177, 1980.
- 6) 平山克也, 峯村浩治, 平石哲也：流れによる波の変形計算に関する一考察, 第10回河口研究会, 2004.