

海岸道路維持管理のための波浪・越波予測と利用例

Wave overtopping prediction and example of utilization for the safety maintenance of coast road

日本気象協会北海道支社	○正会員 西村 修一(Shuichi Nishimura)
日本気象協会首都圏支社	非会員 松浦 邦明(Kuniaki Matsuura)
室蘭工業大学建設システム工学科	正会員 木村 克俊(Katsutoshi Kimura)
日本気象協会北海道支社	非会員 滝谷 克幸(Katsuyuki Takitani)
室蘭工業大学大学院博士後期課程	非会員 清水 敏明(Toshiaki Shimizu)

1. まえがき

北海道内の道路はその地形的条件から、海岸近くを走っている場所が多く、標高の低いところでは高波時の越波によって交通障害が発生することがある。道路管理者は車両等の安全を確保するため通行規制を行う必要があるが、その通行規制は道路利用者の利便性を考慮し出来るだけ効率的に行う必要がある。高波による交通障害を発生させないために越波柵や消波ブロックを設置するといったハードウェア的な対策がある一方、ソフトウェア的な対策として高波による越波の発生と終息に関する情報を事前に知ること、よりきめ細かな道路維持管理ができる。本論文では海岸道路維持管理のソフトウェア的な対策として、越波流量($m^3/s/m$)よりも概念的に理解し易い越波の高さや回数を用いた波浪・越波予測情報提供の方法、越波予測の基本となる波浪予測精度の向上策及び道路管理への利用例および今後の課題解決の方法について報告する。

2. 波浪・越波予測の方法

2-1 波浪予測の方法

現在波浪や越波の予測情報を提供している地点は北海道内では図-1 に示す地点であり主に日本海側では冬型の気圧配置によって、太平洋側では台風等の高波によって越波が起こる。大きな●印の地点は今回の調査対象地点である。



図-1 波浪・越波予測情報提供地点

図-2 に示すように越波予測の元になる波浪予測値は気象庁が毎日ルーチンで行っている波浪予測 GPV(Grid Point Value)を入力として気象協会では 2 分間隔 (約

3.7km) にネステイングして沿岸地形の影響をさらに詳細に考慮できるようにしている。現地波高を算定するための屈折係数等の沿岸係数も同時に考慮している。

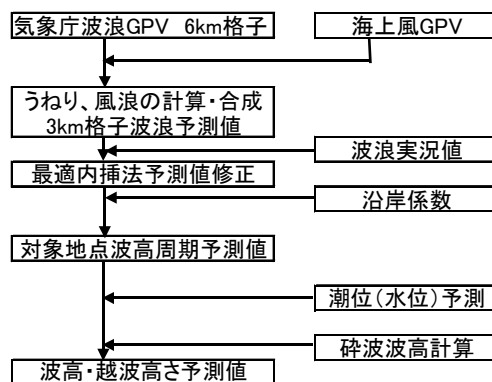


図-2 波浪・越波予測のフロー

波浪予測の精度は越波予測に大きく影響するので波浪予測精度向上策として松浦ら (2004、2006、2007) による計算負荷の小さい最適内挿法によるデータ同化システムを導入している。

これは式(1)に示されるように波浪予測値を初期推定値として、これにD値(観測値から観測地点の予測値を引いた値)の情報を加える際、予測誤差、観測誤差の大きさおよびこれらの時空間相関の情報を元にして内挿の重みを決定するものである。

$$F_g^I = F_g^P + \sum_{i=1}^N w_i (F_0^O - F_i^P) \frac{\sigma_g^P}{\sigma_i^P} \quad (1)$$

F_g^I は格子点における実況推定値 (解析値)、 F_g^P は格子点における波浪予測値、 $F_0^O - F_i^P$ はD値である。 w_i は各観測データの内挿重みであり最終的にはこれを求めてD値の内挿を行う。 σ^P は予測誤差の標準偏差である。 w_i は観測点のある格子点同士のD値の空間相関と将来予測値に対するD値の時間相関を予め求めておくことで算定することができる。

ここでデータ同化には公開されている NOWPHAS (全国港湾海洋波浪観測網) の観測値を用いている。

観測値は2時間毎に入手できるので1日2回しか発表できない波浪予測はデータ同化を導入することで2時間毎に逐次更新することが可能となっている。

最適内挿法によるデータ同化を採用したことによる精

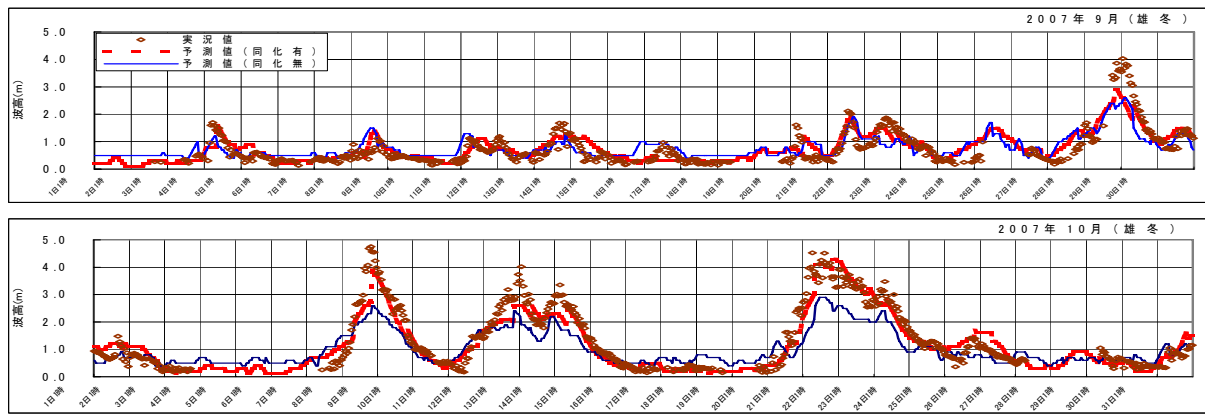
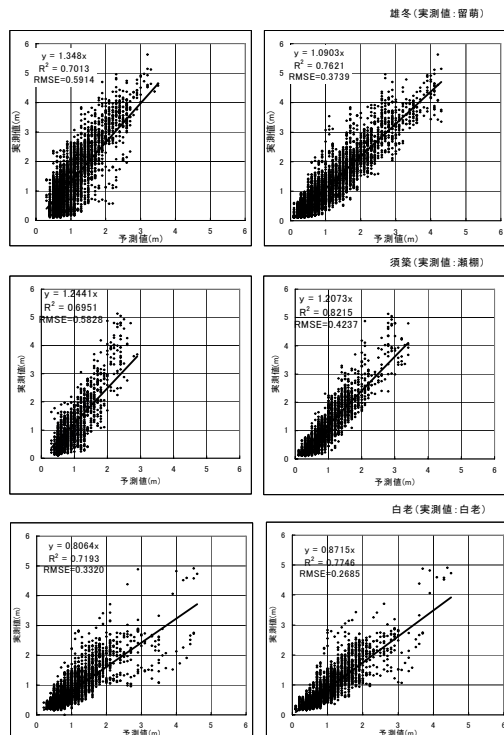


図-3 実況値と予測値の時間変化図(雄冬 9～10月)

度向上を確認するために北海道内の越波予測地点である国道231号石狩市浜益区雄冬での予測結果とNOWPHAS観測点の留萌港実況値を用いて検証した。図-3は2007年9月と10月における予測値にデータ同化を適用した場合としない場合の予測結果と実況値の時系列である。

実際の予測は2時間毎に更新を行っているがデータ同化適用無しの場合と比較するために同化後予測においても1日2回更新(12時間先までの予報を12時間毎に接続)とした。図-3からデータ同化を適用した予測は適用しないものに較べて明らかに予測精度が向上している。図-4はデータ同化が有る場合と無い場合の予測値と実況値の相関図を示した。データ期間は2007年7月から2008年3月の9ヶ月間である。散布図として示した地点は予測地点近傍にNOWPHAS観測地点のある日本海側の雄冬、国道229号瀬棚町須築および太平洋側の国道36号白老バイパスである。相関図からも同化無しの場合と比較すると3地点共、回帰直線の傾き、決定係数や平均二乗誤差(RMSE)において精度の向上が明らかであった。

図-4 実測値と予測値の相関図
(左図: 同化無、右図: 同化有)

越波は低波高時より3m以上の高波浪の予測精度がより重要である。そのため高波高の予測と実測波高に0.5m毎のランクを設定し実測波高が同じランクにあるかどうか、その適中率を調べた。適中率は実況、予測共同じランクのとき、±1ランク適中範囲を広げたもの両方について求めた。表-1は雄冬における適中率算定表である。

黒い部分は実測、予測共同じランクに属していることを示しており、灰色部分は±1ランクを表している。表-2の同化後の適中率と表-3のデータ同化適用無しの場合と比較すると高波高時の精度は明らかに向上していることがわかる。また、表-1や相関図から同化後においても実測値の方がやや高めの傾向を示している。

表-1 適中率算定表(雄冬、同化適用)

実況値	2.5≤H<3.0	3.0≤H<3.5	3.5≤H<4.0	4.0≤H<4.5	4.5≤H<5.0	5.0≤H<5.5	5.5≤H	総数	適中(±0)	適中(±1)
予測値	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%
2.5≤H<3.0	37	39	25	4	2	0	0	107	37	34.6
3.0≤H<3.5	9	42	41	12	1	0	0	105	42	40.0
3.5≤H<4.0	0	1	10	13	7	0	0	31	10	32.3
4.0≤H<4.5	0	0	0	1	9	2	1	13	1	7.7
4.5≤H<5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5.0≤H<5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5.5≤H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0

表-2 高波浪時の適中率(データ同化適用)

波高ランク (予測値)	雄冬				須築				白老			
	適中(±0)		適中(±1)		適中(±0)		適中(±1)		適中(±0)		適中(±1)	
	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%
2.5≤H<3.0	37	34.6	76	71.0	12	18.2	31	47.0	20	90.9	22	100.0
3.0≤H<3.5	42	40.0	92	87.6	9	21.4	22	52.4	0	0.0	6	100.0
3.5≤H<4.0	10	32.3	24	77.4	1	5.3	6	31.6	0	0.0	3	33.3
4.0≤H<4.5	1	7.7	10	76.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	100.0
4.5≤H<5.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	100.0	1	100.0
5.0≤H<5.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
5.5≤H	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0

表-3 高波浪時の適中率(データ同化無し)

波高ランク (予測値)	雄冬				須築				白老			
	適中(±0)		適中(±1)		適中(±0)		適中(±1)		適中(±0)		適中(±1)	
	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%	適中数	%
2.5≤H<3.0	4	4.4	33	36.7	2	5.3	6	15.8	18	81.8	20	90.9
3.0≤H<3.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	4	100.0
3.5≤H<4.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	40.0
4.0≤H<4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	60.0
4.5≤H<5.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5	0.0	3	60.0
5.0≤H<5.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
5.5≤H	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0

高波は気象擾乱の通過によって発生し、波高は増大からピークを迎え次第に減衰していくので、通行規制開始、解除の支援資料とするためにはその時間変化傾向も精度良く予測する必要がある。そのため予測値のピーク発生時刻を含めた変化傾向が実況値とどの程度ずれているかを調査した。調査の方法は波高3.0m以上が出現日を中心前後1日程度について相互相関係数を調べた。

相互相関係数は以下の式によって表される。

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X}_t)(Y_{t+k} - \bar{Y}_{t+k})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X}_t)^2 (Y_{t+k} - \bar{Y}_{t+k})^2}} \quad (2)$$

ここに X は予測値、 Y は実況値である。 k は時間差で-6 時間から+6 時間変化させ相互相関係数を算定した。負の時間は予測値の方がピークを含めた変化傾向が遅れていることを表している。図-5 にその結果を示した。日本海の雄冬についてはケースによっては波高変化傾向が遅れているものも早まった出現するもの両方混在している。

風浪が卓越する海域なので擾乱の移動速度の予測などが効いてくるものと考えられる。また、うねり性の波も多い太平洋側の白老では予測がやや遅れ気味の傾向である。擾乱速度やうねりの伝搬速度の影響もあるものと考えられる。

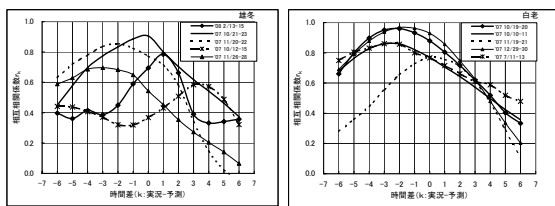


図-5 雄冬（左）と白老（右）の相互相関係数

周期については越波の計算には大きな影響を及ぼさないが波高同様に同化を行っている。図-6 に雄冬と白老について各々波高 2.5m、2.0m 以上の周期の相関図を示した。傾向としては日本海側で実測周期が大きめであり、太平洋側では相関性は高かった。これは波浪予測計算における特性を反映しているものと思われる。また、予測では便宜上 3 秒より小さい周期は全て 3 秒としている。

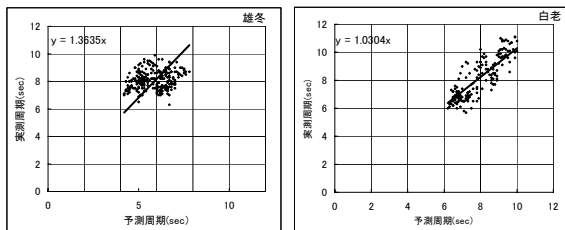


図-6 雄冬（2.5m 以上）と白老（2.0m 以上）の周期の相関図

2-2 越波の計算方法

越波の計算は 2-1 の波浪予測値を用いて越波の飛沫高さと 1 時間当たりの道路擁壁を超える越波回数として計算した。越波高さの計算方法は木村ら（2001, 2003）による水理模型実験と現地実証実験による以下の式を用いた。（図-7 参照）

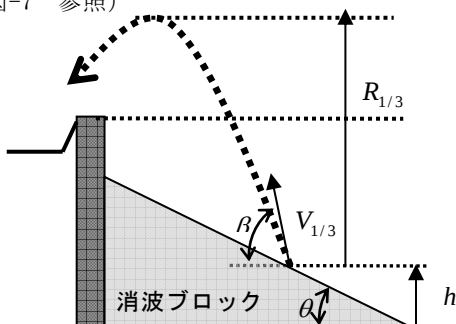


図-7 越波飛沫高さの軌跡概念図

越波飛沫の打ち出し角度は

$$\beta = 71.5 \exp(-0.07 \cot \theta) \quad (3)$$

水深係数は

$$k_D = 5.8 \exp(-0.2 \cdot \frac{h}{H_0}) \quad (-0.5 \leq \frac{h}{H_0} \leq 4.0) \quad (4)$$

構造係数は

$$k_B = 0.69 \exp(0.08 \cdot \frac{h}{H_0}) \quad (-0.5 \leq \frac{h}{H_0} \leq 4.0) \quad (5)$$

で与えられる。

これから越波飛沫の初速度は

$$V_{1/3} = k_D \cdot k_B \sqrt{g H_{1/3}} \quad (6)$$

で与えられ、越波飛沫高さの有義値は

$$R_{1/3} = V_{1/3}^2 \sin^2 \beta / 2g \quad (7)$$

となる。 H_0 と $H_{1/3}$ は波浪予測情報から、水深 h は気圧で補正された推算潮位と現地地形条件から算定される。波浪予測情報と共に提供している越波の予測情報の内容は越波の飛沫高さと道路擁壁を超える越波の 1 時間当たりの回数である。越波飛沫が道路擁壁を超える回数は平均周期から 1 時間当たりの全越波回数を算定し x を規格化した道路擁壁の高さとし、レーリー分布の式から求めている。

$$P(x) = \int_x^\infty p(\xi) d\xi = \exp(-\frac{\pi}{4} x^2) \quad (8)$$

(8) 式から道路擁壁を超える 1 時間当たり越波回数は

$$P(x) \times 1 \text{ 時間当たりの全越波回数} \quad (9)$$

で算定することができる。

図-8 は式 (3)～(7) を用いて海岸道路における越波飛沫の軌跡を計算したものである。水深は 2.8m (潮位 0.0m) と固定し、波高は 1m から 7m まで 0.5m おきに变化させた。周期は海域の代表的波形勾配 0.030 と固定して決めた。図中の太い実線は消波ブロックで覆われた道路断面に相当する。

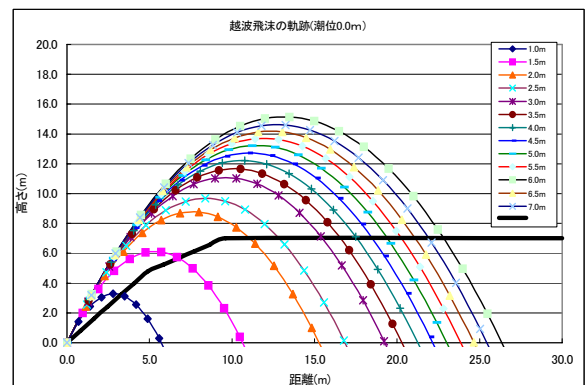


図-8 海岸道路への越波飛沫の軌跡（水深 2.8m）

3. 道路管理者への情報提供

前記の方法で計算された波浪予測値、越波高さ及び越波回数はインターネットを通じて道路管理者に情報提供を行っている。道路管理者はPCあるいは携帯端末によってその情報を閲覧することができる。また、波高あるいは越波高さがある基準値を超えたときは自動的に携帯 Eメールによって知らせることができるシステムを採用している (図-9 参照)。

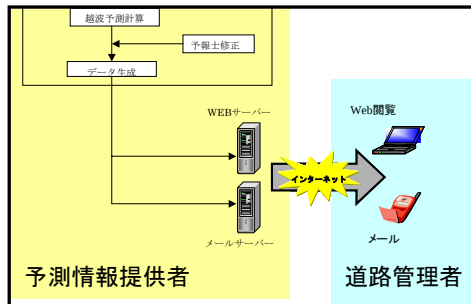


図-9 情報提供方法

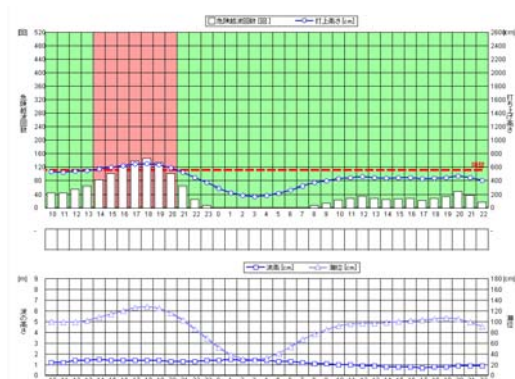


図-10 端末での情報表示例
(上図：越波高さと回数、下図：潮位と波高)

図-11は2008年2月13～15日の国道231号雄冬における高波時の例であるが道路管理者へのメールは13日8時に発信され事前に高波の恐れがあることが通知され、現地状況を実際に確認しながら、13日19時から片側通行規制が実施された。規制の解除についても予測値の今後の傾向を参考にして行うことができた。予測値はやや低めに経過したもの1m程度の誤差で時間変化も良く合っていた。

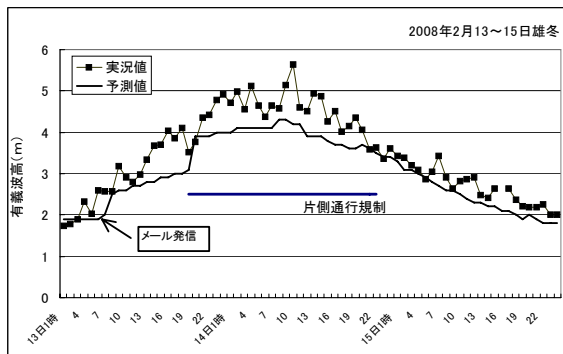


図-11 通行規制時の予測と実況の経過

4. まとめと今後の課題

波浪予測値から越波飛沫高さと越波の回数を予測す

る方法について述べた。以下に主要な結論と今後の課題を述べる。

- ①波浪予測計算による予測波高は日本海側ではやや低めであり太平洋側ではやや高めの傾向があったが、最適内挿法によるデータ同化を採用することによって精度は、顕著に向上した。
 - ②越波に関する情報提供は、通行規制等の道路管理を実施する管理者にとって利用しやすい越波高さや道路を超える回数によって行った。
 - ③予測情報の提供方法はインターネットを介して行っておりPCで閲覧でき、事前に基準値を超えると予測された時は携帯メールによって道路管理者に通知するシステムを採用した。
- 今後の課題としては予測精度の向上が最優先課題であり気象協会では以下のことを予定している。
- ①ここで使用している波浪予測値の元データは気象庁GPVであるが、平成21年度に最新波浪推算モデル(WAM)による独自計算に移行を予定している。また、波浪計算に使用する風データは気象庁GPVを使用するが従来の20km格子間隔のものを5kmにする予定である。これによって局地的に発生する波浪にもある程度対応できるものと思われる。
 - ②最適内挿法によるデータ同化は今後も継続するが、現在のようなポイントではなく面的に行うので、越波予測だけではなく、より波浪予測の利用価値が高まるものと思われる。

謝辞

本研究では波浪観測値として国土交通省NOWPHAS波浪観測網のデータを利用しました。北海道開発局札幌開発建設部からは通行規制に関する情報を提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松浦邦明、鈴木史郎、橋本典明、本橋昌志：波浪のリアルタイム実況推定および客観解析値データベース作成システムの構築、海洋開発論文集、第22巻、pp. 85-90, 2006
- 2) 橋本典明、松浦邦明：WAM Cycle5のデータ同化における同化変数の選択と評価関数に関する検討、海岸工学論文集、第51巻、pp. 206-210, 2004
- 3) 松浦邦明、西村修一、木村克俊、岡田弘三、窪田和彦、本橋昌志：データ同化によるリアルタイム波浪推定と海岸道路管理への利用の検討、海洋開発論文集、第23巻、pp. 1123-1128, 2007
- 4) 木村克俊、安田佳乃子、山本泰司、梅沢信敏、清水敏晶、佐藤隆：道路護岸における越波による通行障害とその対策について、海岸工学論文集、第48巻、pp. 756-760, 2001
- 5) 木村克俊、浜口正志、岡田真衣子、清水敏晶：消波護岸における越波飛沫の飛散特性と背後道路への影響、海岸工学論文集、第50巻、pp. 796-800, 2003
- 6) 本保隆之、木村克俊、山内章、西村修一、岡田真衣子：直積みブロック式護岸における越波飛沫の打ち上げ特性について、平成17年度土木学会北海道支部論文集、第62号、2005
- 7) 気象庁予報部：平成19年度量的予報研修テキスト、(財)気象業務支援センター、2007