

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

REAL TIME WAVE ESTIMATION BY DATA ASSIMILATION,
AND USAGE OF MANAGEMENT IN COASTAL ROADS

松浦邦明¹・西村修一²・木村克俊³・岡田弘三⁴・窪田和彦⁵・本橋昌志⁶

Kuniaki MATSUURA, Shuichi NISHIMURA Katsutoshi KIMURA Kouzou OKADA,
Kazuhiko KUBOTA and Masashi MOTOHASHI

¹非会員 水修 財団法人日本気象協会 首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F)

²正会員 理修 財団法人日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 北海道札幌市中央区北4条西23-1-18)

³正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

⁴正会員 理博 財団法人沿岸技術研究センター 波浪情報部 (〒160-0004 東京都千代田区隼町3-16)

⁵非会員 工修 財団法人日本気象協会 首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F)

⁶非会員 財団法人日本気象協会 首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F)

We develop a real-time wave information and analysis system on the basis of a data assimilation technique, the optimum interpolation method, applied for wave observation data and forecasted data. The system can provide nowcast and forecast wave information for the sea area where there is no wave observation point. Then the estimate is corrected after 12 hours with more accurate forecasted wave information. We investigate the characteristics of the nowcast wave data and confirmed that the accuracy of the data is high enough for practical applications. Splashing height and frequency of wave overtopping on coastal road is forecasted from wave information. It was shown that forecasted height and frequency from assimilated wave information is more accurate than from not assimilated one.

Key Words : data assimilation, real- time wave now-cast and forecast system, wave analysis database, splashing height and frequency of wave overtopping.

1. はじめに

海岸・港湾の安全管理や設計波算定等において、波浪観測が行われていない地点でも正確な波浪情報が必要とされている。そこで、松浦ほか¹⁾は、波浪観測が行われていない任意の地点を対象として、波浪予測値と波浪観測値の両方を用いて、これまでの波浪予測値よりもさらに精度の良い推定値をリアルタイムで作成し、先にリアルタイムで作成した実況推定値を、12時間後の予測更新時により確かな波浪情報に更新して、これを客観解析値としてデータベースに追加するシステムを構築した。そして、東北太平洋岸、南海太平洋岸において、データ同化の効果及ぶ時間および空間範囲、データ同化前後の精度の比較等について検討した。

本研究では、解析対象領域を内海・内湾を除く日本沿岸を概ねカバーする領域に拡大して客観解析値の精度を検証した。さらに、任意地点についてのリアルタイム波浪実況推定方法を拡張して波浪予測値

を修正し、その効果を検証した。

海岸道路では、越波による交通規制は現地パトロールなどの目視により、越波の大きさや頻度、視程障害から通行に支障・危険があると判断した場合に交通規制を実施していることが多い。このような行政対応をとる上で、精度の高い波浪予測情報が求められている。そこで、データ同化によって修正した予測を利用して、北海道の海岸道路を対象として越波の予測を行い、その精度を検証して海岸道路管理への有効性について検討した。

2. 解析対象領域、解析データと解析手法

波浪予測値には、COMEINS（財団法人沿岸技術研究センターによる沿岸気象海象情報配信システム）による沿岸域波浪予測値（格子間隔 2' の沖波、予測時刻は初期時刻から 6 時間間隔で 72 時間先迄、1 日 2 回更新）のうち有義波高・有義波周期を使用した。

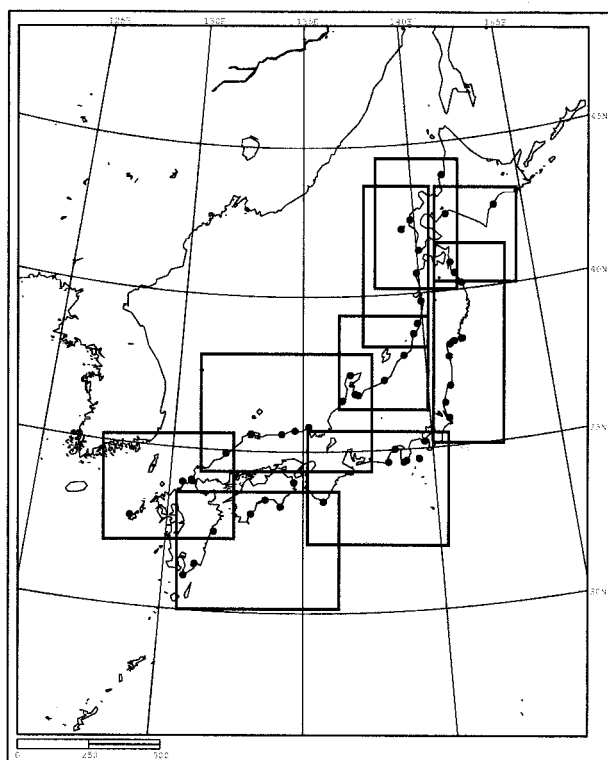


図-1 気象庁、NOWPHAS波浪観測地点と解析領域

表-1 解析対象領域と波浪観測地点

No	海域区分	観測地点名			
1	北海道太平洋	尻羽岬	十勝	苫小牧	むつ小川原
		八戸			
2	東北・北関東太平洋	むつ小川原	八戸	久慈	釜石
		石巻	江ノ島	仙台新港	相馬
		小名浜	常陸那珂	鹿島	
3	南関東・東海	第三海堡	アシカ島	波浮	下田
		石廊崎	清水	御前崎	伊勢湾
		潮岬			
4	南海	潮岬	神戸	小松島	佐喜浜
		室津	高知	上川口	細島
		志布志湾	佐多岬		
5	北海道日本海	留萌	瀬棚	神威脇	松前
		深浦			
6	東北日本海	瀬棚	神威脇	松前	深浦
		秋田	酒田	(温海)	
7	北陸	酒田	(温海)	新潟沖	直江津
		富山	伏木富山	輪島	
8	山陰	輪島	金沢	経ヶ岬	柴山
		鳥取	鹿島	浜田	
9	九州日本海	浜田	藍島	玄界灘	福江島

対象とした海域は、図-1 に示す北海道から九州東の9つに区分けした沿岸域とした。このうち、解析に使用した観測地点は表-1 に示す気象庁の沿岸波浪観測地点と港湾局のNOWPHAS観測地点である。解析対象期間は、観測地点数が多く、台風による高波が数多く観測された2004年の1年間とした。近年連続観測の地点が徐々に増え始めているが、各地点を同一条件とするため、本研究では毎偶数時の波浪観測値を用いた。用いた要素は有義波高・有義波周期とした。尻羽岬、佐喜浜は全て欠測、釜石、第二海堡、伊勢湾、神戸は内湾のため、松前は「5 北海道日本海」海域の他地点とD値（観測値から観測地点の初期推定値を引いた値）の相関が低いと除外した。温海は、欠測が多いが利用した。

解析手法は、松浦ほか¹⁾に倣い、リアルタイムで

表-2 ローレンツモデルパラメータ

No	海域区分	rank	波高			周期		
			a	b	c	a	b	c
①	北海道太平洋	rank1	0.603	0.0000022	0.952	0.463	0.0000072	0.935
		rank2	0.717	0.0000078	0.961	0.647	0.0000162	0.950
		rank3	0.827	0.0000135	0.956	0.788	0.0000204	0.958
②	東北・北関東太平洋	rank1	0.654	0.0000036	0.942	0.448	0.0000022	0.942
		rank2	0.759	0.0000198	0.951	0.657	0.0000119	0.947
		rank3	0.794	0.0000673	0.940	0.768	0.0000683	0.952
③	南関東・東海	rank1	0.801	0.0000199	0.957	0.710	0.0000120	0.931
		rank2	0.819	0.0001840	0.952	0.717	0.0001630	0.916
		rank3	0.876	0.0002888	0.948	0.861	0.0002813	0.903
④	南海	rank1	0.760	0.0000062	0.966	0.511	0.0000099	0.940
		rank2	0.860	0.0000355	0.951	0.795	0.0000236	0.952
		rank3	0.909	0.0000197	0.947	0.890	0.0000215	0.944
⑤	北海道日本海	rank1	0.625	0.0000318	0.921	0.375	0.0000008	0.899
		rank2	0.810	0.0000295	0.917	0.738	0.0000278	0.901
		rank3	0.908	0.0000287	0.924	0.885	0.0000171	0.896
⑥	東北日本海	rank1	0.643	0.0000461	0.912	0.359	0.0000114	0.906
		rank2	0.823	0.0000264	0.905	0.767	0.0000207	0.895
		rank3	0.883	0.0000648	0.908	0.880	0.0000223	0.874
⑦	北陸	rank1	0.677	0.0000094	0.921	0.593	0.0000204	0.918
		rank2	0.856	0.0000263	0.903	0.823	0.0000588	0.906
		rank3	0.879	0.0001047	0.900	0.873	0.0001055	0.846
⑧	山陰	rank1	0.650	0.0000064	0.936	0.486	0.0000016	0.945
		rank2	0.881	0.0000083	0.932	0.836	0.0000102	0.918
		rank3	0.841	0.0000177	0.895	0.861	0.0000208	0.871
⑨	九州日本海	rank1	0.702	0.0000216	0.943	0.500	0.0000213	0.937
		rank2	0.830	0.0000360	0.922	0.815	0.0000387	0.910
		rank3	0.788	0.0000334	0.858	0.822	0.0000306	0.846

情報を提供するために、計算負荷の小さい最適内挿法（以下、OI）を用いた。この際、誤差の時空間相関 μ_{ig}^p は、ローレンツモデルを拡張した橋本・松浦²⁾のモデルにより近似した。

$$\mu_{ig}^p = \frac{a}{1 + br_{ig}^2} \times c^{\Delta T_{ig}} \quad (1)$$

r_{ig} は2点*i,g*間の距離(km)である。また、 b は誤差相関の及ぶ距離（相関距離）を決定する量で、 $r_{ig} = \sqrt{1/b}$ で共分散が半分になる。 a は予測誤差分散、 c は時間差 ΔT_{ig} に関する予測誤差共分散を表すパラメータである。

なお、式(1)右辺の時間差 ΔT_{ig} に関する予測誤差項は、OIの通常の実況推定値、客観解析値作成の際には用いないが、波浪観測データの欠測時、データ同化による予測の修正の時にOIを適用する際に利用する項である。

ローレンツモデルのパラメータは、海域別に現象のスケールを波形勾配によりrank1（うねり：波形勾配0.01未満）、rank2（減衰距離の短いうねり：波形勾配0.01～0.025）、rank3（風波：波形勾配0.025以上）に分けてD値の空間相関解析を行った。解析結果を表-2に示す。

概ね各海域ともパラメータ a はrank1がもっとも小さく、rank2、rank3の順に大きくなる傾向がある。すなわち、予測誤差分散はうねり性の波ほど小さい。パラメータ b はrank1がもっとも小さく、rank2、rank3の順に大きくなる傾向がある。すなわち、相関距離はうねり性の波ほど長い。パラメータ c はrankによる明確な違いはない。そこで、D値の空間相関は波形勾配によるrank別に、時間相

表-3 解析対象領域と波浪観測地点

地点	要素	予測値		解析値	
		回帰係数	相関係数	回帰係数	相関係数
苫小牧	波高	1.17	0.73	1.04	0.80
	周期	0.94	0.52	0.98	0.64
相馬	波高	1.24	0.76	1.00	0.88
	周期	0.83	0.54	0.88	0.75
下田	波高	1.58	0.82	1.31	0.92
	周期	0.94	0.60	0.96	0.83
高知	波高	1.20	0.90	1.02	0.94
	周期	0.99	0.55	0.98	0.70
瀬棚	波高	0.60	0.93	0.61	0.94
	周期	0.78	0.61	0.85	0.79
酒田	波高	0.87	0.94	0.96	0.96
	周期	0.87	0.82	0.93	0.86
鳥取	波高	0.79	0.91	0.95	0.97
	周期	0.85	0.77	0.96	0.90
玄界灘	波高	0.90	0.88	0.90	0.94
	周期	0.88	0.77	0.88	0.83

関は波形勾配によって区別せずに解析した。

3. 客観解析値の精度検証結果

本手法による客観解析値の精度を検証した。検証は、表-3に示した検証地点で観測値がないものとして解析を行い、実際に測得された波高・周期と比較して行った。予測波高の回帰係数は、太平洋側で1.17から1.58と過大評価、日本海側で0.60から0.90と過小評価である。予測周期の回帰係数は高知で概ね1であるが、その他は0.78から0.94と過小評価である。予測波高の相関係数は苫小牧、相馬以外は0.82から0.94と高く、予測周期の相関係数は酒田、鳥取、玄界灘で0.77から0.82である他は、0.52から0.61と予測波高の相関係数と比較して低い。予測値と比較して客観解析値の回帰係数が1に近づいた場合、相関係数が1に近づいた場合にハッチングをかけている。回帰係数、相関係数が大幅に1に近づき、精度が改善された地点（海域）が多い。

北海道太平洋沿岸のえりも町の海岸道路（一般国道336号；通称、黄金道路）では、越波・打上げ高の予測を行っている。この最寄りの観測地点である十勝について同様に精度を検証した。波高・周期の観測値、予測値と客観解析値の経時変化を図-2に、散布図を図-3に示す。図-2より、予測波高は、低波高時に過大、擾乱のピーク付近で過小評価しているが、データ同化により客観解析値は観測値に近づいている。予測周期は全般に過小評価であるが、客観解析により観測値に近づいている。図-3も同様の傾向を表しており、データ同化により、回帰係数は1に近づき、散布図のばらつきが小さくなり相関係数も向上している。

4. データ同化による予測値の修正

ローレンツモデルパラメータ c は概ね0.90から0.96であった。誤差の時間差相関は、 $c=0.94$ とすると、11時間でおおよそ半分になる（ $0.94^{11}=0.51$ ）。これは、データ同化による修正の効果が10数時間は持続することを意味する。したがって、できるだけ新しい観測値を用いてデータ同化により予測値を修正することが効果的であるといえる。そこで、観測値が得られる2時間毎に、その時刻のD値と、その時刻と予測時刻の時間差を考慮した誤差相関を用いて予測値を修正した。

黄金道路における交通規制（通行止め）の期間は、これまでの実績から波高が4m以上である期間との対応が良かった。したがって、道路管理のためには、波高4m以上の高波の予測精度、とくに波高4mの閾値をきる立ち上がり時刻の予測精度を上げることが重要である。また、行政対応をとる上で12時間前までに情報が必要である。そこで、12時間前までに4mの波高を予測できるかどうか検討した。図-4は、2004年5月22日に黄金道路が通行止めとなった高波浪事例における、観測値とデータ同化前後の予測値である。観測波高は22日4時に4mを超え、10時に5mに達した。5月22日の予測の波高・周期は観測値と比較して過小であったが、21日16時（観測値が4mを超える22日4時の12時間前の時点）の観測値を同化した結果、擾乱の変動を概ね予測した。その6時間後の観測値を同化した結果、擾乱のピーク付近の精度はさらに向上し、4mを超える波高を予測することができた。

したがって、本手法による予測は有効であると判断できる。そこで、次章では越波の観測を実施している事例について、本予測値を適用し、越波飛沫高さ、越波回数の予測値を観測値と比較検証することとした。

5. 北海道白老町国道36号線道路管理事例

(1) 現地の状況

北海道胆振支庁管内白老町の一般国道36号白老バイパスは図-5に示すように太平洋岸に位置し延長約4kmのうち約1km部分が海岸に近接している。台風等の接近によって越波が発生することがあり、対策工として写真-1に示すように道路護岸前面に消波ブロックを設置しているが、波高によっては消波ブロックを超える越波によって車両への危険度が増加することがある。

このため所管の道路事務所に車両等の安全性に配慮した道路維持管理を行うために波浪と越波に関する36時間先までの予測情報を1日2回（午前9時と午後18時）提供している。

(2) 越波に関する情報の作成

越波に関する予測情報の作成は水理模型実験と現

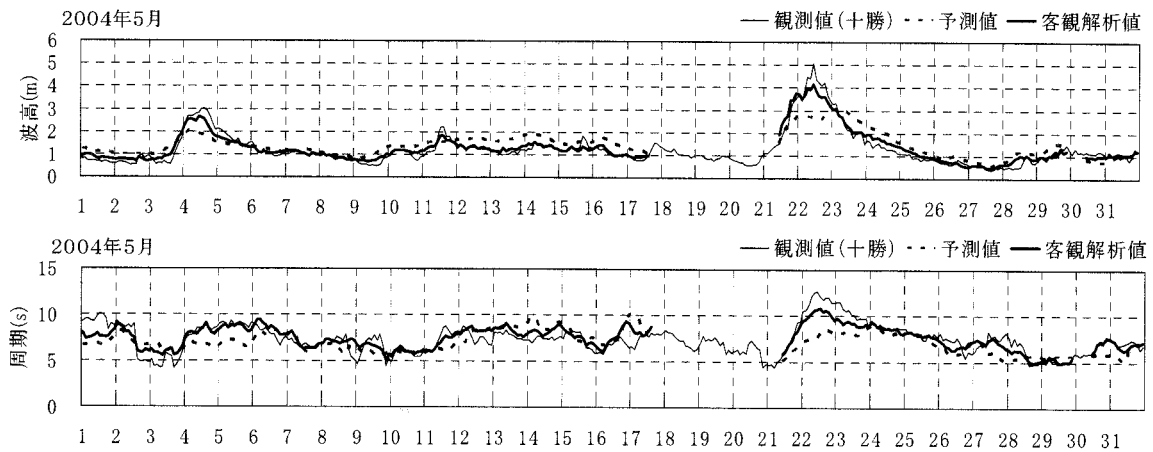


図-2 波高、周期の観測値、予測値と客観解析値の経時変化図（十勝，2004年5月）

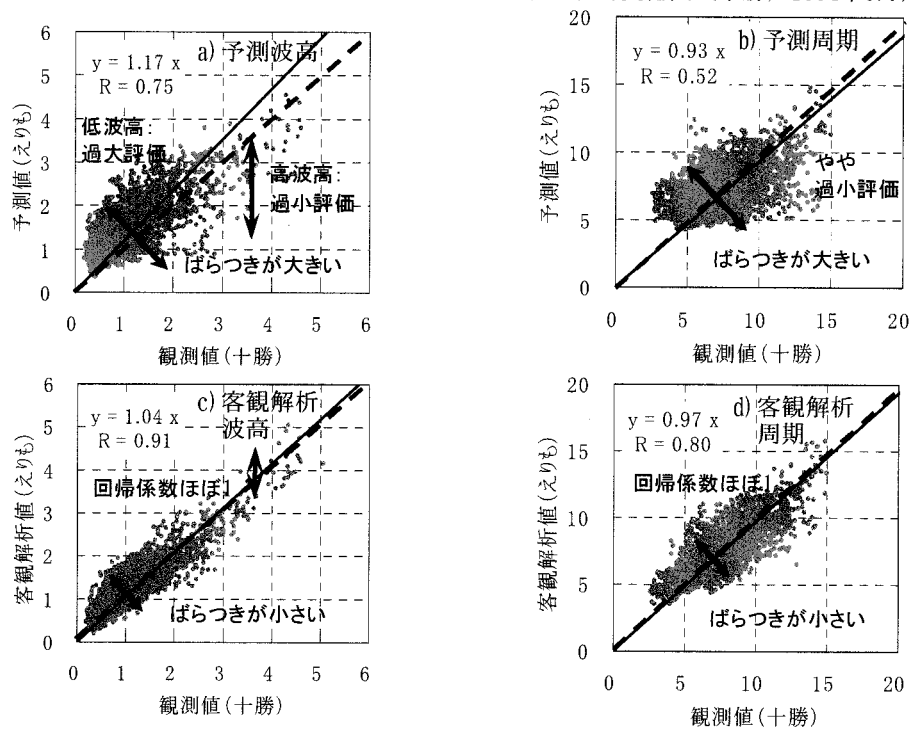


図-3 波高、周期の観測値と予測値の比較（上図），観測値と客観解析値の比較（下図）（十勝，2004年1年間）

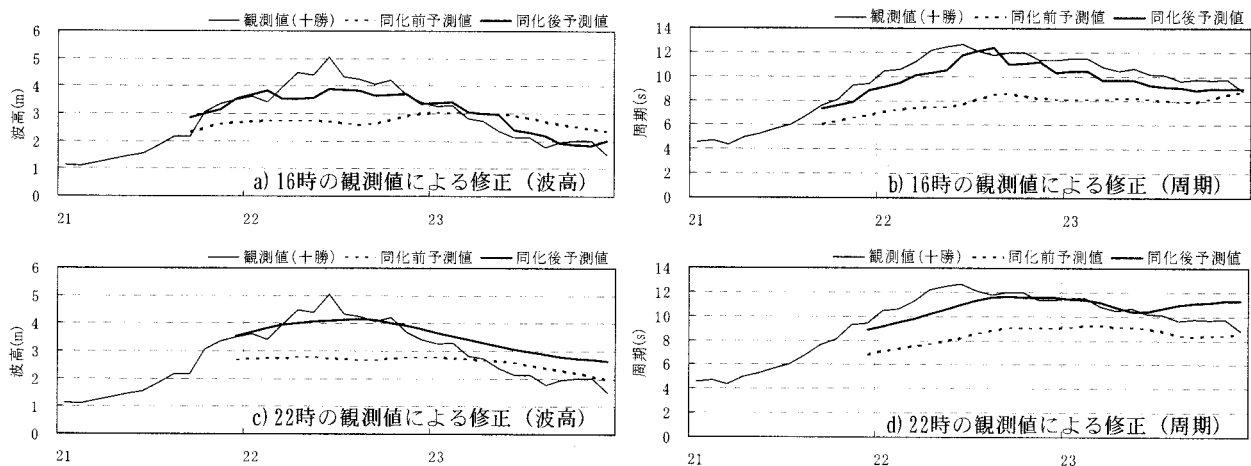


図-4 データ同化による予測値修正の効果（2004年5月22日の高波浪事例）

予測値の初期時刻：21日09時

同化による修正（上段：16時の観測値を利用），（下段：22時の観測値を利用）

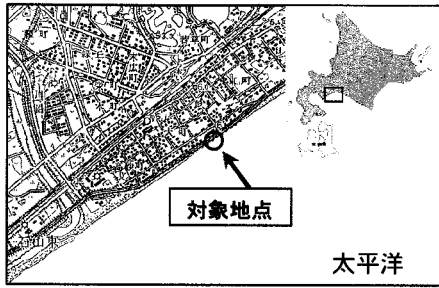


図-5 国道36号線白老バイパス

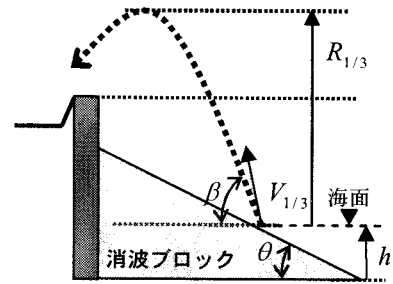


図-6 越波飛沫軌跡の概念図



写真-1 対象地点付近の状況



写真-2 越波の状況

地実証実験から定式化された木村ほか³⁾、本保ほか⁴⁾による以下の越波飛沫高さの算定式を用いている(図-6 参照)。

越波飛沫の打ち出し角度は、

$$\beta = 71.5 \exp(-0.07 \cot \theta) \quad (2)$$

水深係数は、

$$k_D = 5.8 \exp(-0.2 \cdot \frac{h}{H'_0}) \quad (-0.5 \leq \frac{h}{H'_0} \leq 4.0) \quad (3)$$

構造係数は、

$$k_B = 0.69 \exp(0.08 \cdot \frac{h}{H'_0}) \quad (-0.5 \leq \frac{h}{H'_0} \leq 4.0) \quad (4)$$

で与えられる。

これから越波飛沫の初速度は、

$$V_{1/3} = k_D \cdot k_B \sqrt{g H_{1/3}} \quad (5)$$

で与えられ、越波飛沫高さの有義値は

$$R_{1/3} = V_{1/3}^2 \sin^2 \beta / 2g \quad (6)$$

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。

$$P(x) = \int_x^\infty p(\xi) d\xi = \exp(-\frac{\pi}{4} x^2) \quad (7)$$

1時間当たりの道路擁壁を超える越波回数は式(7)の $P(x)$ に1時間当たりの全越波回数を乗じて求

めることができる。

(3) 2006年9月4～7日の事例

この期間は台風0612号が日本の東海上を北東に進んだため、太平洋沿岸にはうねり性の波が来襲した。対象地点近傍にある白老港のNOWPHAS波浪観測速報値では5日23時に4.2m、15.8secの最大有義波が観測された。期間中白老バイパスでは越波のため1車線交通規制が実施された。この時の越波の状況を写真-2に示す。午前、午後の1日2回、36時間先まで行っている波浪予測値を24時間毎に更新し接続したものを図-7に示す。予測波高のピーク出現時刻は観測値よりも1日以上遅れている。この原因は、予測波浪の周期が短いことからうねりの伝播が実際より遅れたこと等が考えられる。データ同化により修正した予測値(同化後予測)を6時間毎に更新し接続したものを同様に図-7に示す。同化後予測の波高は、ピーク時は観測波高よりも1m以上低い、同化前予測の波高に比べてピーク出現時刻や変化傾向は観測値と良く一致している。また、周期については同化後予測は同化前予測に比べて観測値と良く一致している。

図-8は白老波浪観測値から現地に換算した波浪諸元と潮位を式(2)から(6)に入力して算定された1時間毎の越波飛沫高さと、当日現地で観測された道路擁壁を超えた越波の回数である。算定された越波飛沫高さは、観測された越波の回数の変化によく対応している。

図-9は同化前および同化後の波浪予測値、潮位予測値から算定された越波飛沫高さと道路擁壁を超える越波回数を示している(同化前の午前・午後予測は3時間間隔、同化後予測は2時間間隔で表示)。

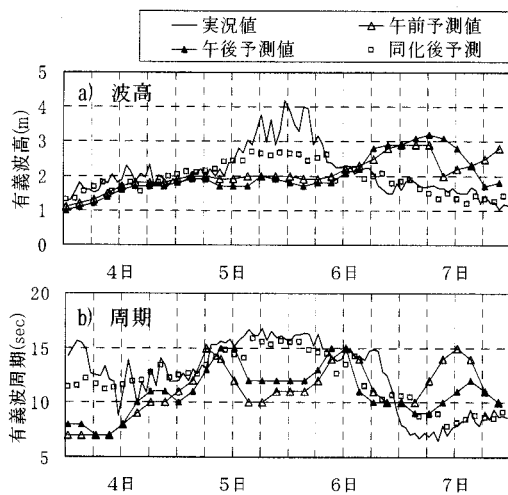


図-7 同化前、同化後波浪予測値

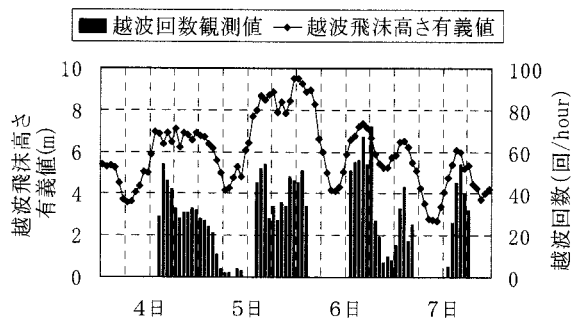


図-8 越波飛沫高さと同化後観測された越波回数

越波飛沫高さ、越波回数を図-8 の観測値と比較すると、同化後予測を用いた越波飛沫高さは、ピーク時は観測値と比べて低く予想しているが、同化前予測値を用いた越波高さよりも観測値に近づき、改善されているといえる。

越波は海岸道路の交通障害の一因となるため、地形条件、予測潮位及び予測波浪から越波飛沫高さや越波回数の予測情報を提供している。越波予測誤差のうち、波浪の予測誤差が最も大きい。このため、波浪予測の精度が、越波予測の精度を左右する。本予測手法を採用することで予測精度の向上が大いに期待できる。

6. おわりに

波浪予測値と、気象庁および港湾局の沿岸波浪観測値を用いて作成した日本沿岸海域を対象とした客観解析値データベースは、通常の予測値と比較して、各海域とも回帰係数・相関係数は大幅に1に近づいた。日本沿岸については、データ同化によりリアルタイムに有用なデータセットを作成することができたといえる。また、この手法により予測値を修正することにより、予測精度も向上した。

現在、北海道の海岸道路では越波による交通規制

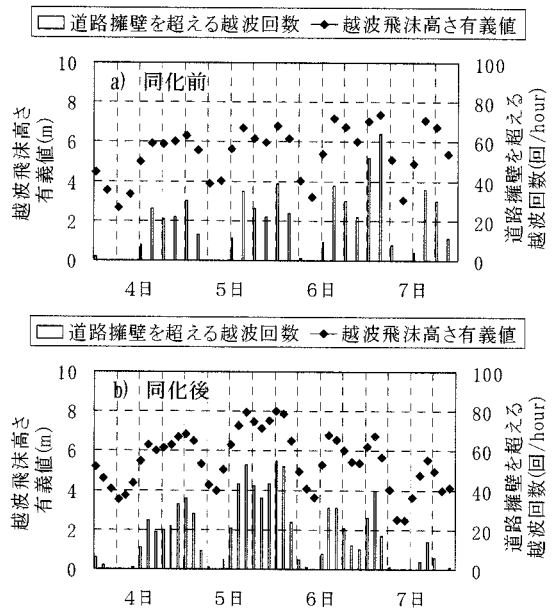


図-9 同化前(上)、同化後(下)の越波飛沫高さと同化後観測された越波回数

は現地パトロールなどの目視により、越波の大きさや頻度、視程障害から通行に支障・危険があると判断した場合に交通規制を実施している。本予測により、このような行政対応をより適切に支援することができる。また、海岸道路は生活道路としても利用されているため、交通規制についての明確な基準作りをすることが求められている。今後、海岸道路への越波飛沫到達距離や越波回数等を指標として、全面通行止めや片側1車線通行規制等、よりきめ細かな道路交通規制の基準づくりが今後の課題である。

謝辞：本研究の実施に際して、気象庁の沿岸波浪観測値、国土交通省港湾局のNOWPHAS 波浪観測値を使用しました。北海道開発局室蘭開発建設部室蘭道路事務所からは観測データと写真の提供を受けました。また、九州大学大学院工学研究院橋本典明教授にはデータ同化に関して、終始ご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松浦邦明、鈴木史朗、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) 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。
- 4) 本保隆之、木村克俊、山内章、西村修一、岡田真衣子：直積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報告集、第62号、2005。