

平成26年度

# オホーツク海に面した海岸道路の波浪遡上特性 と盛土被害について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○本間 大輔  
上久保勝美  
山本 泰司

近年、オホーツク海沿岸の氷海域において、地球温暖化に伴う氷海勢力の変動により海面上昇および流氷減少に起因する冬期間の波浪増大に伴う高波・越波や海岸浸食等の現象が発生しており、主要道路の通行止めなどの交通アクセスへの影響が懸念されている。しかしながら、比較的勾配の緩い複合勾配の海浜における波の遡上現象の水理特性は、詳細に解明されていない。そのため、本研究では、オホーツク海沿岸の氷海域における海岸道路の高波による被害を分析し、複合勾配海岸を想定した水理模型実験を実施することにより、オホーツク沿岸域の波の遡上特性について解明するものである。

キーワード：波の遡上、海岸道路、盛土被害、複合勾配、海面上昇、波浪増大、沿岸防災

## 1. はじめに

気象庁<sup>1)</sup>によると、地球温暖化の影響により、北海道北西部における海氷面積が将来的に著しく減少する可能性が高く、海面水位についても、日本近海において将来的に上昇する可能性が高いことが報告されている。冬期におけるオホーツク海は、流氷に覆われることにより、波浪が低く抑えられているが、流氷勢力の減少や水位上昇に起因するオホーツク沿岸の冬期間における波高増大が懸念されている。この現象を再現するため、近年の海氷面積減少を考慮した波浪推算手法について、第3世代波浪モデル SWAN を用いた菅原ら<sup>2)</sup>の手法により山之内ら<sup>3)</sup>がオホーツク海沿岸の50年確率波高（以下  $H_{50}$ ）を算出した結果、海氷の減少などの気象変動の影響により、近年では、 $H_{50}$  が 1m 以上増大していることを報告している。

写真-1、2 は、近年における冬期間のオホーツク海沿岸道路への波の遡上および遡上に伴う越波状況である。オホーツク海沿岸には、国道が通じているが、背後圏の物流や地域住民の生活を支える重要な交通アクセスとなっており、通行止め等の措置が講じられた場合、その影響は非常に大きい。しかしながら、オホーツク沿岸における海岸は、比較的緩い自然勾配からなる複合勾配地形（図4 参照）となっており、このような条件に対応した波の遡上特性の詳細な研究はあまりなく、現状での波の遡上対策は、現場毎の対応が必要となっている。

このため、本研究では、オホーツク海沿岸域における近年の海象状況を把握すると共に、海岸道路の被害事例

を整理し、複合緩勾配海岸の代表例として A 地区を対象に水理模型実験を実施し、この地区における波の遡上特性を把握する。また、今後発生する可能性のあるオホーツク海沿岸域での海面上昇や波浪増大に備えるため、将来的な水位および波浪における波の遡上について検証することを目的とする。



写真-1 国道への高波遡上事例（宗谷地方沿岸国道）



写真-2 海岸護岸への越波事例（網走港海岸護岸）

## 2. オホーツク海沿岸域における近年の波浪状況

一般的に冬期におけるオホーツク海沿岸域は、流氷に覆われ波高が小さくなる特徴がある。図-1は、オホーツク海沿岸の紋別沖で観測された最近（2001～2011）の2月における波浪データを示したものである。月平均有義波高 $H_{1/3}$ は全体的に微増傾向となっており、特に月最大波高 $H_{max}$ および月最大有義波高 $H_{1/3}$ については、ここ数年で著しく増加している。なお、2010年に波高が小さかった理由は、流氷勢力が強かったことが考えられる。図-2は、図-1と同期間における年間の波浪変化を示したものである。通常、年間における最大波高 $H_{max}$ は、低気圧が発達する台風時期もしくは流氷の発達しない秋期から冬期初期にピーク値となるが、2009年および2011年の年間最大波高 $H_{max}$ および最大有義波高 $H_{1/3}$ は通常波高の小さい2月期に発生している。図-3は2011年の年間最大波高が発生した2月14日の流氷分布であるが、オホーツク沿岸部周辺には流氷は存在しておらず、また過去全体的に密接度についても波高の小さかった過年度と比較し低く、同様の現象は2009年の2月期においても見られた。

以上のことから、オホーツク海沿岸の流氷勢力が減少すると、波高が増大する要因と推測され、今後、冬期においても高波が発生する可能性がある。

また、通年の平均有義波高 $H_{1/3}$ については大きな変化はないが、災害をもたらす可能性がある年最大波高および年最大有義波高については、年変動が大きいものの増加傾向であり、冬期のみならず通年の波浪に対する備えが重要であると考えられる。

## 3. 海岸道路の盛土被害の事例

近年、オホーツク海沿岸の国道において、波の遡上により、道路盛土を欠損させる被害が発生している。事例1（写真-3）は、国道238号線のA地区における被災である。被害は2004年1月14日に発生したと想定され、同日の22時に近隣の波浪観測点の紋別（南）では、有義波高 $H_{1/3}=7.16\text{m}$ 、最大波高 $H_{max}=10.73\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=10.5\text{s}$ 、潮位 $DL+1.05\text{m}$ を記録した。被災区域はオホーツク海沿岸において特徴的な自然海浜からなる複合緩勾配海岸であり、汀線から道路盛土の路肩までの海底勾配は1:10程度で、距離は60m程度であった。道路面の標高は $DL+7.9\text{m}$ であり、波は路面まで遡上し、盛土が侵食された。事例2（写真-4）は国道238号線のB地区における被災である<sup>4)</sup>。被害は2006年10月8日に発生したと想定され、同日の14時に近隣の紋別（南）における観測データは、有義波高 $H_{1/3}=7.45\text{m}$ 、最大波高 $H_{max}=11.47\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=12.6\text{s}$ 、潮位 $DL+1.66\text{m}$ を記録した。被災範囲は延長約100m、高さ約3m、幅約7.5mとなっており、路肩舗装部分が欠落するまで浸食、崩壊が進行した。B地区はA地区と海底

Daisuke Honma, Katsumi Kamikubo, Yasuji Yamamoto

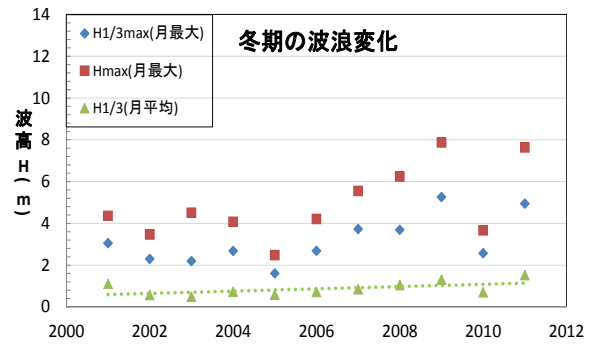


図-1 冬期における波浪変化(2001～2011)

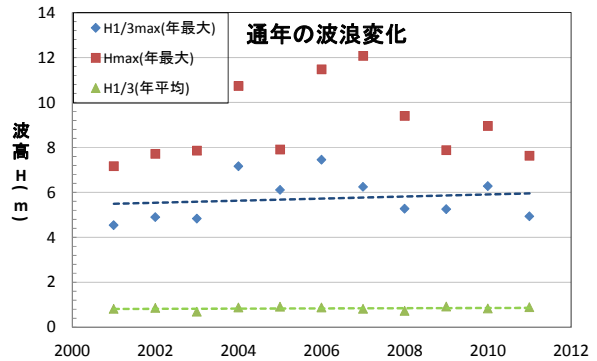


図-2 通年の波浪変化(2001～2011)

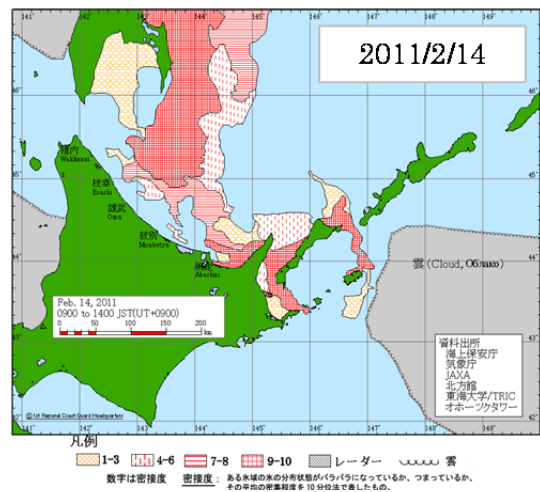


図-3 流氷分布

地形の特徴が以ており、汀線付近から道路路肩までの海底勾配は1:8、距離は25m程度であった。波の遡上は、被害状況から道路面のレベル（約 $DL+5.5\text{m}$ ）まで達していたと想定される。事例3（写真-5）は、国道244号線のC地区での被災である。被害は2006年10月7日～8日に発生したと想定され、波浪推算により、7日の23時に有義波高 $H_{1/3}=3.81\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=11.4\text{s}$ が発生していたと推測される。潮位は、近隣の港の潮位から $DL+1.17\text{m}$ であり、2時間後の翌日の1時には $DL+1.7\text{m}$ 記録している。当該地区の被害は、延長約124m、高さ約4.4m、幅約5.6mの範囲となっており、前面消波ブロックの途切れた開口部に集中している。汀線付近から道路法肩までの勾配は1:6程度、距離は5m程度となっている。なお、図-4は被害箇所

海底地形を示したものである。

表-1は、事例-1付近の海岸K.P.225.1～229.3のL=4.2km区間（①～⑥）および事例-2付近の海岸K.P.267.8～276.0のL=8.2km区間（⑦～⑰）における汀線から道路盛土法肩までの海底勾配と距離の結果を整理したものである。海岸の整備状況および道路の高さにかかわらず、概ね汀線から道路までの平均勾配は概ね1:10で構成されており、汀線から道路盛土法肩までの平均距離は、それぞれ約62m、54m程度になっている。事例は少ないが、実際の被害事例の汀線から道路盛土法肩までの距離と比較し、A地区海岸においては60m程度、B地区海岸では50m程度を被災の目安として、周辺の汀線変化を確認しながら日々のパトロールを実施し、対策を検討しておくことで、大きな被害を未然に防ぐ1つの方法となり得ると考えられる。

表-1 A地区海岸およびB地区海岸付近の調査結果

調査箇所	①汀線から道路盛土法肩までの距離(m)	②道路面の高さ(m)	勾配(②/①)	海岸状況	
A地区	① KP225.3	52.4	5.9	0.11259542	消波堤
	② KP255.39	59	5.9	0.1	自然海浜
	③ KP227.33	76.2	6	0.078740157	自然海浜
	④ KP227.42	63.7	6.2	0.09733124	自然海浜
	⑤ KP227.57	51.1	6.5	0.127201566	消波堤
	⑥ KP228.62	70.9	7.2	0.101551481	消波堤
B地区	⑦ KP267.98	59.1	6	0.101522843	自然海浜
	⑧ KP268.38	46.3	5.7	0.123110151	自然海浜
	⑨ KP268.62	39.5	6.1	0.15443038	矢板護岸
	⑩ KP268.94	45.1	6.7	0.148558758	矢板護岸
	⑪ KP269.74	71.2	5.4	0.075842697	埋設護岸
	⑫ KP272.46	35.4	4.5	0.127118644	自然海浜
	⑬ KP273.1	42.5	4.6	0.108235294	海岸擁壁
	⑭ KP273.26	52.4	4.6	0.08778626	自然海浜
	⑮ KP273.58	67.2	4.9	0.072916667	自然海浜
	⑯ KP274.22	75	5.8	0.077333333	自然海浜
	⑰ KP275.97	59.5	3.9	0.065546218	自然海浜

#### 4. 不規則波における波の遡上高

##### (1)波の遡上高

オホーツク海沿岸における海底および海浜勾配は、概ね1:100～1:30と1:10程度の複合勾配からなり、自然護岸となっているケースが多く、構造物がある場合でも堤脚水深が水面上となっている事例が多い。しかしながら、上記条件下において、不規則波における波の遡上高さの算出方法は、未だ確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、複雑な複合勾配に対応可能である中村ら<sup>5)</sup>の改良仮想勾配法の考え方をベースとし、砕波水深 $h_b$ の算出は、合田<sup>6)</sup>およびMase・Kirby<sup>7)</sup>を踏襲した。その上で、玉田ら<sup>8)</sup>により提案された算定式による遡上高さ、被害事例であるA地区を再現させた水理模型実験による波の遡上高さを比較し、被災時の波高と波の遡上高さの関係を整理した。図-5は、被害事例であるA地区を対象に、被害のあった水位であるDL+1.05mにおいて、第4章(2)表-2の波浪条件で合田の砕波指標および玉田ら



写真-3 被害事例1 A地区



写真-4 被害事例2 B地区



写真-5 被害事例3 C地区

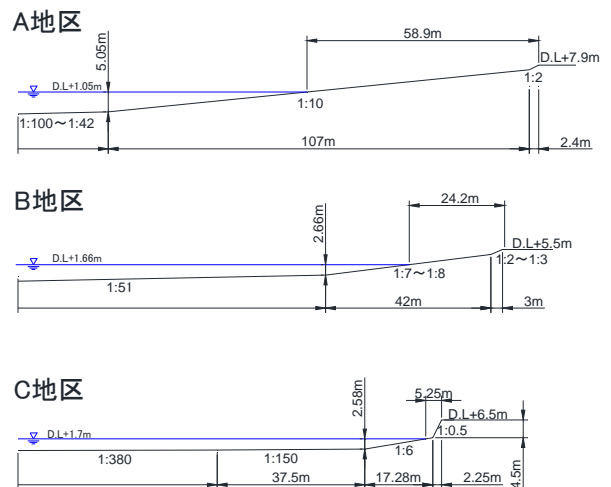


図-4 被害事例1～3の海底地形

の碎波水深算定図から碎波水深 $h_b$ を算出したものである。玉田ら<sup>8)</sup>にもあるように本実験の条件は、海底勾配 $i$ が $1/10\sim 1/30$ かつ波形勾配 $H_o/L_o=0.02\sim 0.05$ の範囲となっており、合田<sup>9)</sup>の碎波水深とほぼ一致する結果に対応する値となった。図-6は上記で求めた $h_b$ から、中村ら<sup>5)</sup>の改良仮想勾配法図を用いて遡上高さ $R$ を算出したものである。現地の被害領域は海水面(W.L.)から $5.65\text{m}\sim 6.85\text{m}$  (道路面高さ) の間で発生しており、道路面の高さ $W.L.+6.85\text{m}$  (D.L.+7.9m) まで波の遡上痕が残っていたが、改良仮想勾配法で求まる $R$ は、 $4.2\text{m}$ 程度となり、現地の遡上高を過小評価していることがわかる。

### (2)水理模型実験の条件

被害事例A地区における波の遡上高を再現するため、水理模型実験を行った。実験装置は、反射吸収式造波装置を備えた長さ $24\text{m}$ 、幅 $0.8\text{m}$ 、深さ $1.0\text{m}$ の2次元造波水路を用い、模型縮尺は $1/45$ とした。海底および海浜勾配はA地区とほぼ同様とし、それぞれ $1/30$ 、 $1/10$ とした(図-7参照)。水位は、A地区で被害のあった潮位(D.L.+ $1.05\text{m}$ )を基準とし、それに加え気象庁より報告されている将来予測の水位上昇である約 $0.5\text{m}$ <sup>1)</sup>を増加させた2水位とした。波高については、 $H_o=3\text{m}$ から $1.5\text{m}$ 毎に段階的に波高を増加させ $H_o=9\text{m}$ までの6波高とし、周期については $T=9\text{s}$ 、 $12\text{s}$ の2パターンとした。また、これに加え、被災時の波浪相当条件である $H_o=7.5\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$ と将来的に想定される波浪条件の $H_o=8.5\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$ (水位D.L.+ $1.55\text{m}$ )を対象とした(表-2参照)。波の遡上高の計測には容量線を用い、水路床に溝を設け、斜面と平行となるよう容量線を設置し、水路床と同じ高さに設定した。遡上計の精度の検証を行うため、ビデオ映像により撮影した遡上高と、容量線により計測した遡上高を比較検証した。対象とした波は規則波とし、波高の安定する5波目以降21波目までの17波を対象とした。結果を図-8に示す。図中の上段および下段は、それぞれビデオ撮影による高さ $H$ と遡上計による高さ $R$ で、静水面からの鉛直距離を表したものである。遡上計の高さとビデオ撮影の差の平均は、 $+0.099\text{cm}$ であり、遡上計による平均計測値に対し誤差も $1.58\%$ と小さく、十分使用可能と考えられるため、以後の実験は、遡上計のみでの計測とした。

なお、遡上計による計測値は、3回の平均値とし、本研究における遡上高の定義は、静水面からの鉛直距離とした。

### (3)実験結果と被災時の遡上高さとの比較

実験による遡上高さを整理するにあたり、最大遡上高で評価した場合、ばらつきが大きいため、入射波数の2%の波数に対応する遡上高さ $R_{2\%}$ と1/10の波数に対する遡上高さ $R_{1/10}$ を代表遡上高さとし、併せて玉田ら<sup>8)</sup>の波の打ち上げ高算定式(式1)により算出した高さとを比較した。

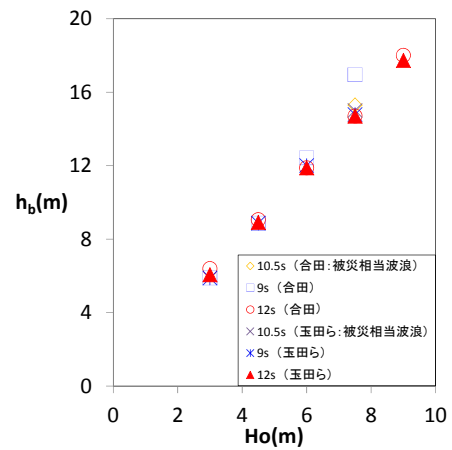


図-5 沖波波高  $H_o$ (m)に対する碎波水深  $h_b$ (m)

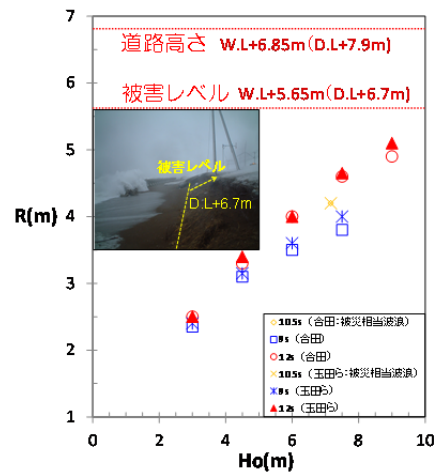


図-6 沖波波高  $H_o$ (m)に対する波の遡上高さ  $R$ (m)

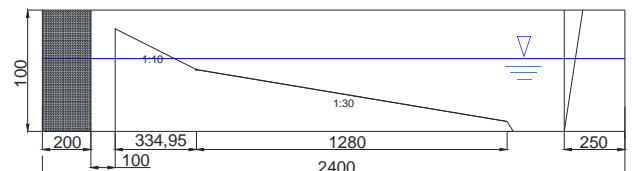


図-7 実験水路 (単位:cm)

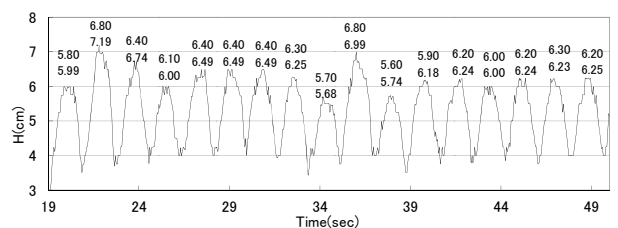


図-8 遡上計と目視による遡上高  $H$ (cm)の比較

表-2 実験条件

実験条件(括弧内は現地量)	
模型縮尺	1/45
入射波高 $H_o$ (cm)	6.7(3m)~20(9m):6波高
入射周期 $T$ (s)	1.34(9s), 1.57(10.5s), 1.79(12s)
実験水位 $h$ (cm)	D.L.+0.23(+1.05m), D.L.+3.44(+1.55m)
海底勾配 $i$	1/30と1/10の複合勾配
海浜勾配 $i$	1/10

$$R_{2\%}/H_0 = 2.99 - 2.73 \exp \left[ -0.57 * \left\{ \tan\beta / \left( H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\} \right] \quad \left. \vphantom{R_{2\%}/H_0} \right\} \text{(式 1)}$$

$$R_{1/10}/H_0 = 2.72 - 2.56 \exp \left[ -0.58 * \left\{ \tan\beta / \left( H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\} \right]$$

図-9、10は、沖波波高 $H_0$ と代表遡上高 $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ の関係を示したものであり、図中の○印は、被害のあった波浪条件（被害相当波浪）での結果である。計算値(cal)から求まる遡上高さ $R_{2\%}$ 、および $R_{1/10}$ は、実際の被害の高さまで到達しない結果となったが、実験値(exp)では両方とも被害範囲もしくはそれ以上の遡上高さとなった。計算値と実験値は異なるものの、実験値は実際の現地での被害レベルまで波が遡上しており、概ね再現できていると想定される。図-11は遡上高さの実験値 $R_{exp}$ と計算値 $R_{cal}$ を沖波波高 $H_0$ で除して無次元化したものである。実験値は周期に関わらず計算値に対し、波高が小さい場合に計算値との隔たりが大きくなる傾向がある。

#### (4)波の遡上高さ算定式の提案

実験値(exp)と計算値(cal)の値が異なる原因として考えられるのは、式(1)に含まれている $\tan\beta$ の算出にあたり、1/100と1/10,1/20,1/30の複合勾配の条件で行った実験結果をベースとしているものであり、本実験で実施した複合勾配とは異なる条件であったことが考えられる。また、その他の原因としては、特に比較的小さい沖波波高の場合において、1:30の地形勾配では碎波せず、勾配変化点もしくは1:10の地形勾配で碎波する現象が見られたことも影響していると考えられる。玉田ら<sup>8)</sup>にもあるように上記式(1)の検証として実施されている本実験と同じ複合勾配条件の実験において、実験値は、計算値よりも大きくなるが、上記式の適用の妥当性を概ね確認している。そのため、本実験における実験結果についても $\tan\beta$ を含む項（surf similarity parameter）で整理することを試みた。図-12は、surf similarity parameterと $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ を沖波波高 $H_0$ で無次元化したものとの関係を示したものである。波浪条件や、潮位条件が異なる結果を含んでいるにも係わらず、surf similarity parameterにより整理することができる。以上から、オホーツク海沿岸域における波の遡上高さの関係を以下のように提案する。

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 1.89 * \left\{ \tan\beta / \left( H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\}^{0.674} \dots (1)$$

$$\frac{R_{1/10}}{H_0} = 2.23 * \left\{ \tan\beta / \left( H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\}^{0.657} \dots (2)$$

ただし、摘要条件は海底および海浜地形が1:30と1:10の複合勾配で

Daisuke Honma, Katsumi Kamikubo, Yasuji Yamamoto

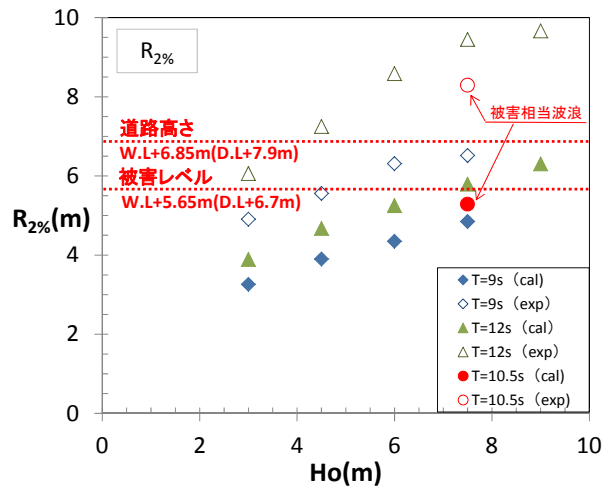


図-9 沖波波高  $H_0$  (m) と遡上高さ  $R_{2\%}$  (m) の関係

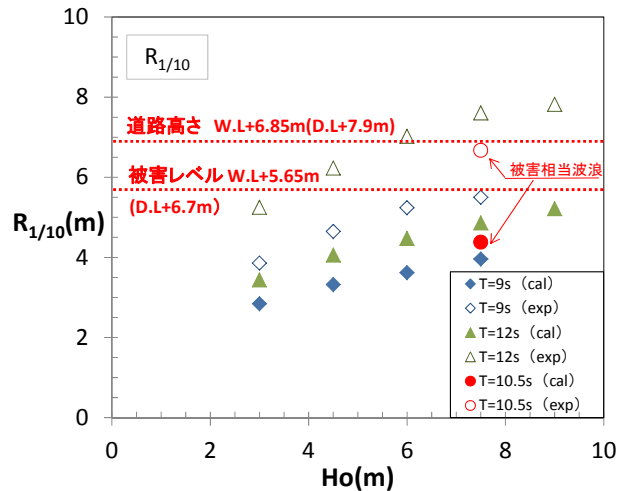


図-10 沖波波高  $H_0$  (m) と遡上高さ  $R_{1/10}$  (m) の関係

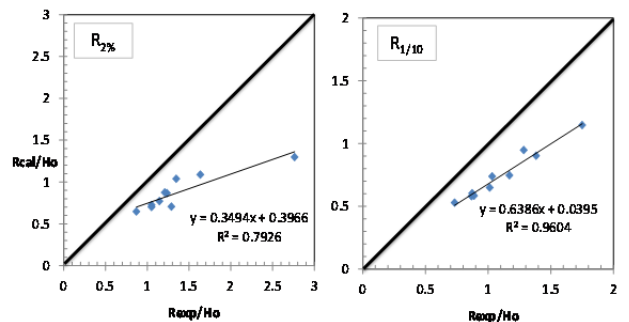


図-11 遡上高さの実験値と計算値との関係

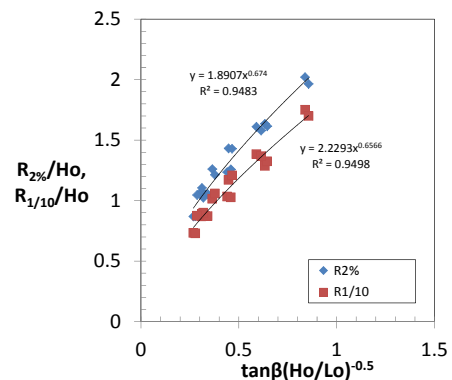


図-12  $R_{2\%}$  および  $R_{1/10}$  遡上高さ

$$\left. \begin{aligned} 5.05 < h < 5.55 \quad (h \text{は勾配変化点の水深(m)}) \\ 0.007 < H_o/L_o < 0.07 \\ 0 < \tan \beta / (H_o/L_o)^{0.5} < 0.86 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

の場合とする。

### (5) 現地 (A地区) の被災と波の遡上高さの関係

現地の被害高さを実験による遡上高さの関係を明らかにするため、被害相当波浪条件 ( $H_o=7.5m$ ,  $T=10.5s$ ) において、被害レベルと遡上高さとの関係を検討した。対象とした現地は、本実験の勾配とほぼ同じであるA地区とした。図-13に示すとおり、現地の被災を発生させた遡上高さは、入射波数の1/5に対応する遡上高さ  $R_{1/5} \sim R_{1/10}$  に相当していることがわかる。なお、図中の  $R_{1/3}$  は入射波数の1/3に対応する遡上高さ、 $R_{\text{バー}}$  はすべての入射波数に対応する平均遡上高である。また、図-14は、A地区において、 $R_{1/5}(m)$  と沖波波高  $H_o(m)$  との関係を整理したものである。図中の赤字の結果は、被災時の水位 (D.L.+1.05m) での遡上高さであり、×印が被害相当波浪での遡上高さである。また、図中の青字の結果は、水位が0.5m上昇した場合の遡上高さであり、×印は被害相当波浪に今後予想される波浪1mの増加を見込んだものである。遡上高さ  $R_{1/5}$  は、将来的に2割程度増加する結果となり、現状で被害レベル程度の遡上高から道路面を越える遡上高となるため、今後、遡上対策工などの措置が必要になる可能性がある。

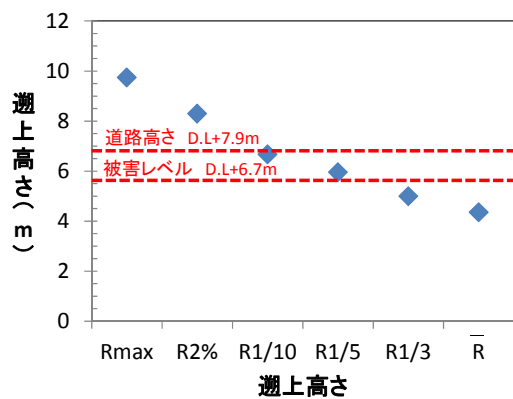


図-13 被災高さと遡上高の関係

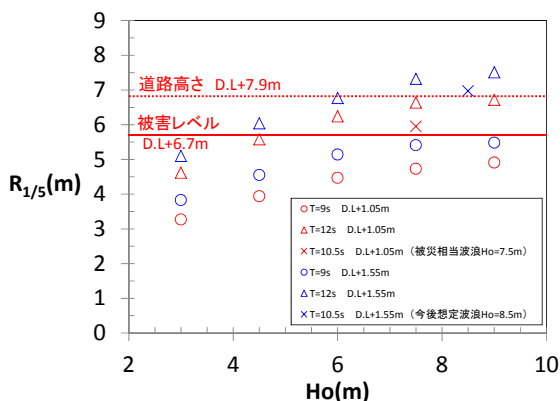


図-14 沖波波高  $H_o(m)$  と遡上高さ  $R_{1/5}(m)$  の関係

Daisuke Honma, Katsumi Kamikubo, Yasuji Yamamoto

## 5. まとめ

- 1) 近年におけるオホーツク海沿岸の波浪状況は、年平均有義波高にほとんど変化はないが、被災の原因となる最大波高および最大有義波高が高くなっている傾向があり、特に冬期において顕著に見られる。
- 2) オホーツク海沿岸の海岸における汀線から道路盛土法肩までの距離について、A地区海岸は60m程度、B地区海岸は50m程度を被害の目安とすることを提示した。
- 3) オホーツク海に面した海岸道路の盛土被害事例を整理し、被災の原因である波の遡上高の算定式を提案した。
- 4) 現地A地区での被害レベルと波の遡上高さの関係は、代表遡上高さ  $R_{1/5} \sim R_{1/10}$  で発生することを明らかとした。
- 5) 将来的に想定される波浪条件では、波の遡上高さが2割程度増加する可能性がある。

## 6. 今後の課題

今後、海底勾配や水深条件などの実験条件を追加し、提案式の妥当性を検証した上で、適用範囲を拡張する必要がある。また、将来的な波浪の増大や水位上昇に備えることが重要であるため、遡上対策工などを視野に入れた検討が必要である。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道開発局稚内開発建設部道路整備保全課、網走開発建設部道路保全課、釧路開発建設部道路計画課および室蘭工業大学木村教授の協力を頂いたことをここに記し、謝意を表します。

### 参考文献

- 1) IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約. 気象庁暫定訳 (2014年3月6日版), pp.23-24
- 2) 菅原吉浩, 山之内順, 山本泰司 (2012): 海氷減少を考慮したオホーツク海における波浪の将来変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, pp. 1221-1225.
- 3) 山之内順, 菅原吉浩, 関口浩二 (2011): オホーツク海沿岸における流氷勢力の変動と確率波高の変化について, 北海道開発技術研究発表会論文, 第55回.
- 4) 武田光邦, 山本隆, 及川秀一 (2006): 一般国道 238 号猿払村における海岸侵食被害状況と復旧後の管理体制について, 北海道開発技術研究発表会, 第50回.
- 5) 中村充, 佐々木康雄, 山田穰二 (1972): 複断面における波の打ち上げ高に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 309-312.
- 6) 合田良實 (1975b): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, pp. 59-106.
- 7) Mase, H. ・ Kirby, J. T. (1993): Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation, Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 474-487.
- 8) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏 (2009): 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 936-940.