

網走港における設計沖波の検討について

網走開発建設部 網走港湾事務所 第1工事課 ○水口 陽介
林 誉命

網走港において、従来港湾施設の設計に使用していた設計沖波は、1987年までの気象海象観測資料をもとに算出され約20年経過している。その間、波浪の来襲状況は変化しており、特に近年の高波浪の来襲によって、施設の被災が発生したり、船舶の安全な係留を阻害している。

本報告は最新の気象海象観測資料をもとに、オホーツク海特有の海水を考慮した波浪推算値を用いて確率波を算定し、設計沖波としての妥当性について検討を行ったものである。

キーワード：設計沖波、波浪推算、海水密接度、海上風補正係数、確率波

1. はじめに

網走港において従来使用されてきた設計沖波は、1947年から1987年までの有義波法による波浪推算値を用いて確率波を算出し、設計沖波として用いてきた。

しかし、波浪の来襲状況は変化しており、図1-1に示すように、越波を防止するように設計された防波堤において越波が頻発し、施設の被災や港内擾乱の発生回数の増加が問題となっている。

本検討は、港湾施設の設計に用いられる設計沖波を見直すために、これまで蓄積された網走沖の波浪観測値と、オホーツク海特有の海水を考慮した波浪推算値を用いて確率波を算出し、設計沖波としての妥当性について検討したものである。



図1-1 網走港 南防波堤越波状況 (2006.10.8)

2. 基礎資料の収集・選定

確率波の算出にあたっては、原則として30年以上の極値波浪データが必要とされているため¹⁾、網走沖で波浪観測を実施していた1977年から2004年までの波浪観測値と2004年から2006年までの波浪推算値を用いて30年分の極値波浪データとした。

網走沖波浪観測点では波向の観測を実施していないため、1977年から2006年までの極値波浪データには網走沖の推算波向を用いた。

また、波浪推算を行うためには、気象データを用いて波浪の発生要因となる風の推算を行う必要がある。

風の推算に使用した気象データは、図2-1に示す1977年から2006年までの6時間毎のオホーツク海とその周辺の天気図で、この天気図を用いて気圧傾度、コリオリの力及び等圧線の曲率による遠心力を考慮して傾度風を算出した。

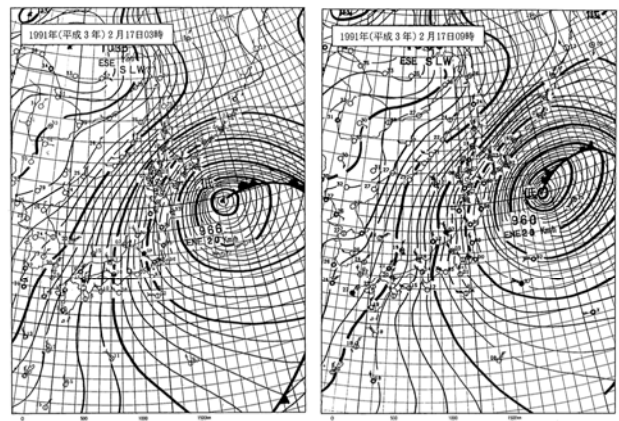


図2-1 天気図の一例 (1991.2.17: 3時及び9時) (気象庁)

3. 波浪推算条件の検討

波浪推算手法は有義波法とスペクトル法に大別される。本報告では、現在主流となっている急激な風の変化に対応できるスペクトル法を用いて推算を行った。

波浪推算の実施にあたっては、傾度風から波浪推算に必要な海面上10mの高さにおける海上風を推定するための海上風補正係数と冬季にオホーツク海を覆う海氷の影響を考慮するための手法について検討を行った。

(1) 波浪推算モデルと計算条件

本検討で実施した波浪推算は、スペクトル法の中でも発達期の風波成分と減衰期のうねり成分を考慮可能な第三世代WAMモデルを用いた。

図3-1に波浪推算モデルにおける解析領域、表3-1に計算条件を示す。

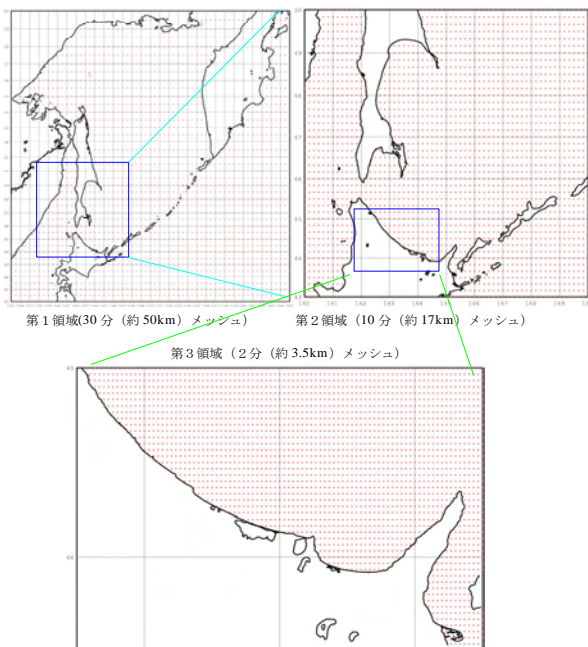


図3-1 波浪推算モデルにおける解析領域

表3-1 波浪推算の計算条件

	第1領域	第2領域	第3領域
計算範囲	N 40~60 E 135~165	N 43~50 E 140~150	N 43.5~45 E 142.5~145.5
格子数	61×41	61×43	91×46
格子間隔	30分 (約50km)	10分 (約17km)	2分 (約3.5km)
計算時間間隔	20分	10分	2分
周波数分割数	25成分 (0.04177248Hz~0.411447761Hz : $f(i)=1.1 \times f(i-1)$)		
周期成分	25成分 (約24秒~2.4秒)		
方向分割数	36成分		

解析領域は、効率的に波浪推算を実施するために、解析領域と格子間隔を広くとった第1領域（格子間隔30分）から順次、第2領域（格子間隔10分）、第3領域（格子間隔2分）へと段階的に解析領域を狭め空間解像度を上げて計算を行った。

(2) 海上風補正係数の検討

波浪推算の実施にあたっては、天気図の気圧配置から推定した傾度風に海面の摩擦等の効果を表す海上風補正係数を乗じて、初期値となる海上風を推定する必要がある。

海上風補正係数は北緯40°付近では平均的に0.67とされているが、これも1つの目安であり、海域や気象条件によって異なることから適切な補正を行ったうえで推定する必要がある²⁾とされている。

海上風補正係数の推定には、海上風の実測値と傾度風を比較して推定することが望ましいが、海上風の観測はされておらず、定量的に算定する手法も確立されていない。そこで、従来から海上風補正係数の推定には、推算波高と実測波高の比較から間接的に算出する手法が用いられてきた。

この手法で海上風補正係数を推定することにより、単に海面の摩擦の効果を表すのみでなく、波の推算では再現できない物理機構を係数により補正するという意味を持つことになる。網走港では、1988年に実施した有義波法による波浪推算において、海上風補正係数を0.80としていた。

本検討においても波浪観測実施期間中の代表的な高波浪時について波浪推算を行い、推算波高と実測波高の関係から間接的に海上風補正係数を推定した。

予備計算として海上風補正係数0.55~0.80までの0.05刻みで8通りの計算を行ったところ、海上風補正係数0.60前後の相関が良く、最終的に海上風補正係数を0.60と0.65の場合で算出した推算波高と実測波高の関係を比較し海上風補正係数を決定した。図3-3に海上風補正係数別推算波高と実測波高の関係を示す。

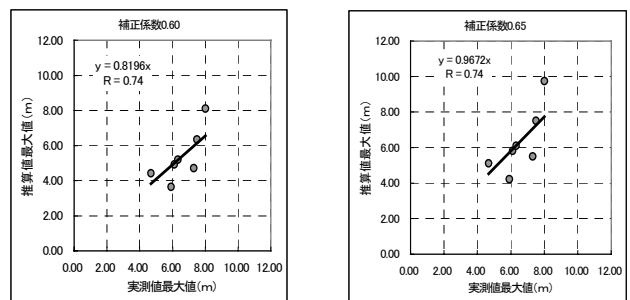


図3-3 海上風補正係数別推算波高と実測波高の関係

推算波高と実測波高の関係を回帰式の傾きに注目して比較すると、海上風補正係数0.65で傾きが0.97、海上風補正係数0.60で傾きが0.82となり海上風補正係数0.65で推算した場合の傾きが1に近く、推算波高が実測波高に近くなる結果となった。この結果から、本検討における波浪推算で用いる海上風補正係数は0.65とした。

(3) 海水の評価手法

図3-4 はオホーツク海の海氷領域の平年値を示したものである。この図に示すとおり、オホーツク海沿岸及びその沖合においては1月から4月にかけて海水に覆われる。

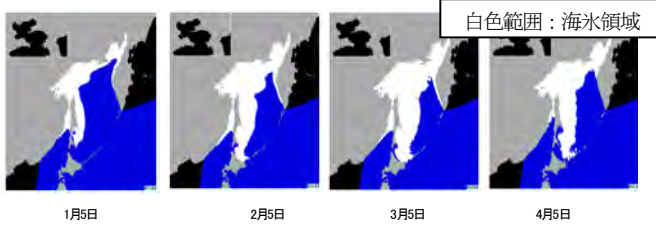


図3-4 オホーツク海氷領域の平年値 (気象庁)

表 3-2 は網走地方気象台の月平均風速及び最多風向の平年値、図 3-5 は網走沖の高波浪の月別出現回数を示したものである。

表3-2 網走地方気象台の風平年値

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均風速 (m/s)	37	32	35	35	31	25	23	25	30	35	36	37
最多風向 (16方位)	西	北西	北西	南	南	南	南	南	南	南西	南西	南西

(平均風速：1975～2000年、最多風向：1971～2000年)

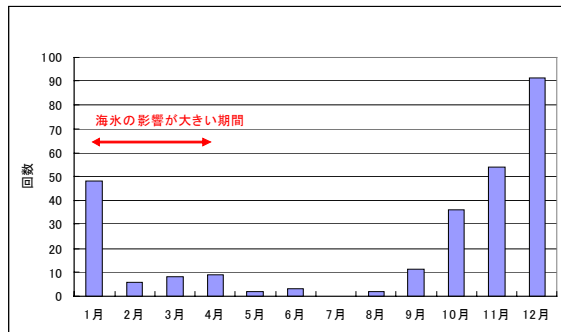


図3-5 網走沖の高波浪の月別出現回数(1977～2006年)

これらによると、網走では1～4月と10～12月にかけて、月平均風速が3～4m/sとなっており、比較的風が強くなる。特に2～3月では最多風向が北西であるため、網走では海上からの風向になり高波浪になりやすいと考えられる。しかし、高波浪の月別出現回数は12月が最も多く、次いで11月、1月の順となり、風向からみると高波浪となりやすいと予想される2、3月は高波浪になっていない。これは、海氷の存在によって風のエネルギーが海面に伝わらないことによるものと考えられることから、波浪推算においては海氷の影響を考慮する必要がある。

本検討においては、推算モデルの中で海氷域を陸域とみなすことで海氷の影響を考慮した。

海氷域を把握するための資料として、図3-6 に示す海水分布図を用いた。

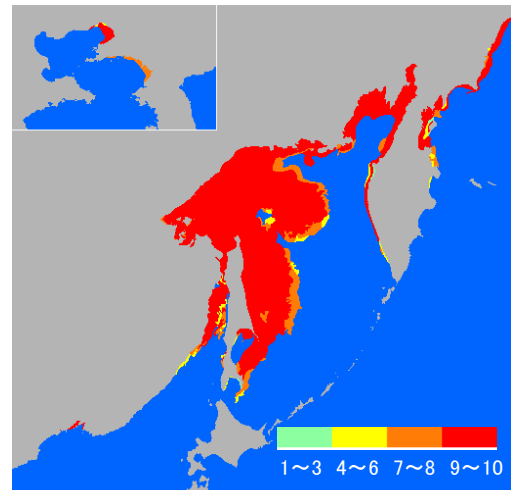


図3-6 海水分布図の一例 (2004.1.15) (気象庁)

海水分布図における海氷は、氷に覆われている海面の割合に応じて海水密接度により4区分 (1～3、4～6、7～8、9～10) に分けて表現されている³⁾。図3-7 は海水密接度毎の海水分布状況を示している。

本検討においては、海水を陸域として扱う場合の指標として、海水密接度に着目し、陸域として扱う海水密接度の検討を行った。

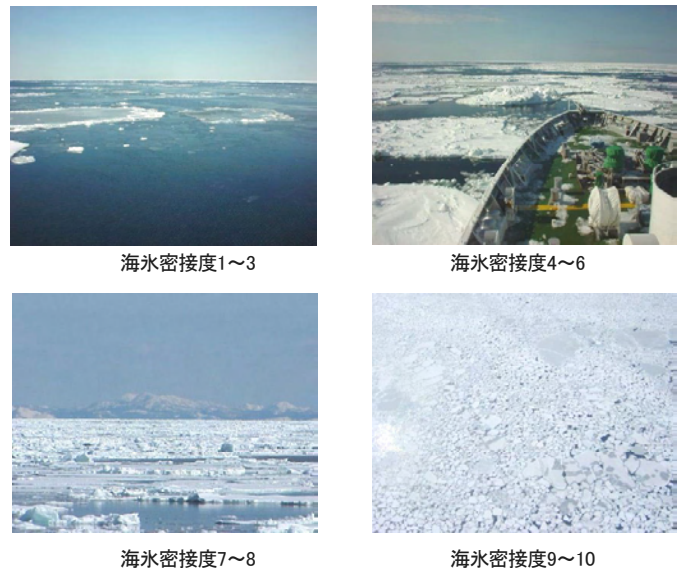


図3-7 海水密接度毎の海水分布状況 (第1管区海上保安本部P)

海水密接度7以上と4以上を陸域とみなした場合において、海上風補正係数と同様に海水期の高波浪を選定して波浪推算を行い、推算波高と実測波高の相関から陸域として扱う海水密接度について検討を行った。

なお、オホーツク海の海水分布データは約5日毎であるため、波浪推算モデルの中では時間的に近接する海水分布データを用いた。

図3-8は推算モデルにおける計算結果例（第2領域）を示したものである。

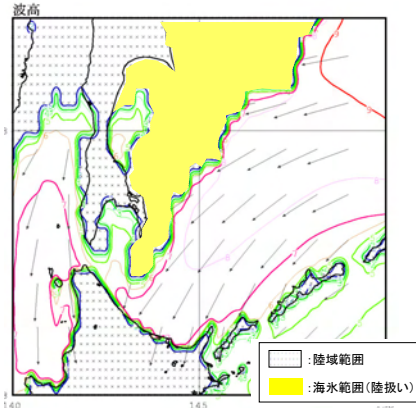


図3-8 推算モデルにおける計算結果の一例

図3-9は海水氷接度7以上を陸域として扱った場合と4以上を陸域とした場合における高波浪時の推算波高とその時の実測波高の関係を示したものである。

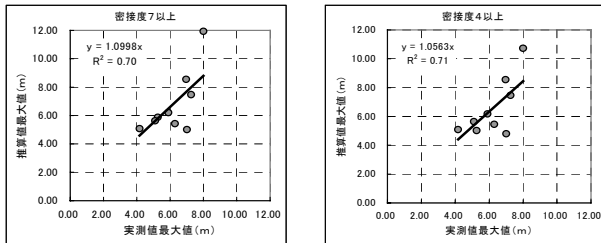


図3-9 海水氷接度別推算波高と実測波高の関係

海水氷接度4以上を陸域と扱った場合における回帰式の傾きは1.06で、海水氷接度7以上の場合の1.10よりも1に近い傾きとなった。

また、陸域として扱う海水氷接度の違いによる推算波高の比較を行った。図3-10は陸域として扱う海水氷接度の違いにより、推算波高に特に違いが見られた1991年2月20日（実測波高8.0m）の海水氷分布図を示したものである。

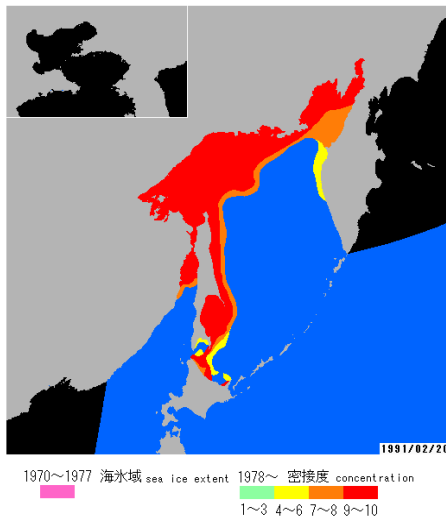


図3-10 海水氷分布図（1991.2.20）（気象庁）

この日は網走沖で海水氷が途切れており、その部分から高波が進入し高波浪が観測されたと考えられる。

氷接度別に算出した推算波高を比較すると、海水氷接度4以上を陸域と扱った場合の推算波高は10.72mであったのに対し、氷接度7以上を陸域と扱った場合の推算波高は11.94mとなり氷接度の違いにより推算波高に大きく違いがでた。

以上のことから、推算波高が実測波高に近くなった海水氷接度4以上を陸域として波浪推算を実施した。

(4) 波浪推算値の波向別補正

前述の検討結果から、海上風補正係数を0.65、海水氷接度4以上の海水氷を陸域として扱い1977年から2006年までの30年間の極値波浪の推算を行った。

図3-11は波高ピーク時における推算波高と実測波高の関係を示したものである。

全波向においては、回帰式の傾きが0.97となり、1に近い値となっている。

しかし、波向別に推算波高と実測波高の関係をみると回帰式の傾きが0.87~1.13となり、波向によって回帰式の傾きが異なることが分かった。

このため、波浪推算により算出された推算波高を実測波高に近づけるために、波向毎に回帰式の傾きで推算波高を除する方法により補正を行った。

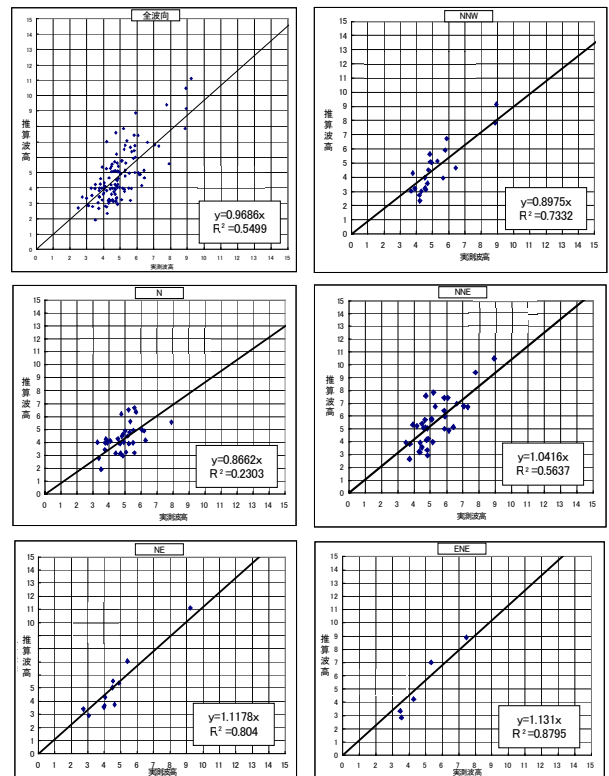


図3-11 波高ピーク時における推算波高と実測波高の関係

4. 確率波の算出

(1) 波向別高波高順位表の作成

確率波を算出するためには、ある1つの気象条件によって波浪が発達し減衰する過程において波高が最大となる極値波浪データを集め、波向別高波高順位表を作成する必要がある。

高波高順位表の作成方法として、各年毎の最大波高を極値としてデータを集めた年最大値資料を用いる方法と、閾値以上の波高を極値としてデータを集めた極大値資料を用いて作成する方法がある。

年最大値資料を用いる場合は、各年の最大波浪を確実に捕捉する必要があり、極大値資料を用いる場合は、波高の低いケースを全体の1/4~1/3程度棄却する事が無難とされている⁴⁾。

本検討における極大値資料の閾値の設定には、各年毎で上位の高波浪ケースを選定した中で、その中に含まれなかったケースの最大波高を閾値と設定し、閾値以下の波高については棄却した。

年最大値資料と極大値資料はどちらかが優位とはいえないため、両資料を用いて波向別高波高順位表を作成し、それぞれ算出した確率波を比較検討した。

表4-1 は年最大値資料と極大値資料を用いて作成した高波高順位表の一例である。

表4-1 高波高順位表の一例 (波向NE)

年最大値資料		極大値資料	
単位: m			
年	波高	年	波高
1977	4.63	1991	6.62
1978	7.77	1977	4.33
1979	5.09	1978	7.77
1980	4.87	1978	4.70
1981	5.89	1978	4.48
1982	5.62	1978	4.35
1983	5.30	1979	4.23
1984	2.74	1979	5.09
1985	6.54	1979	4.83
1986	4.22	1979	4.87
1987	5.84	1980	4.87
1988	8.92	1980	4.42
1989	5.66	1981	5.84
1990	5.19	1981	5.89
1991	8.25	1981	4.48
1992	5.20	1981	4.50
1993	3.73	1981	3.81
1994	6.14	1982	5.62
1995	6.41	1983	5.30
1996	5.87	1983	5.08
1997	7.05	1985	6.54
1998	5.20	1985	4.87
1999	5.26	1985	4.65
2000	4.67	1986	4.11
2001	5.18	1986	4.11
2002	5.07	1986	4.22
2003	4.38	1987	5.84
2004	8.12	1987	4.64
2005	7.43	1987	4.76
2006	8.30	1987	4.59
		1987	4.04
		1988	8.92
		1988	4.18
		1989	5.66
		1989	3.99
		1990	5.19
		1991	8.25
		1991	7.30

下限波高 3.96 データ数 75個

(2) 確率波の算出と評価

年最大値資料及び極大値資料を用いて作成した波向

別高波高順位表に極値分布関数をあてはめ、確率波の算出を行った。

算出にあたっては、一般的に用いられている極値分布関数 (グンベル分布、ワイブル分布) に加え、極値II型分布関数を導入し、MIR基準と棄却基準 (DOL棄却基準・REC棄却基準) により最適関数を選択する合田の提案する方法³⁾を採用した。

また、確率波の周期については極値波高と周期の関係に正の相関性があることから、1次式などの適した関数をあてはめ、それぞれの確率波に対応する周期を求めた。

図4-1 は50年確率波と1997~2006年の30年間における波向別の年最大有義波高の経年変化、表4-2 は年最大有義波高が極値波浪データ別 (年最大値資料及び極大値資料) の50年確率波を越えた回数を示したものである。

極値波浪データ別の50年確率波高を比較すると、波向NNWで極大値資料による50年確率波の方が大きくなったものの、その他の波向については、年最大値資料による50年確率波の方が大きくなった。

50年確率波は再現期間50年に1度発生すると考えられる値を求めたものである。年最大有義波が30年間で極大値資料による50年確率波を2回超えているため、極大値資料による50年確率波を設計沖波とすることは危険であると考えられる。このことから、年最大値資料による50年確率波を採用することが妥当であると考えられる。

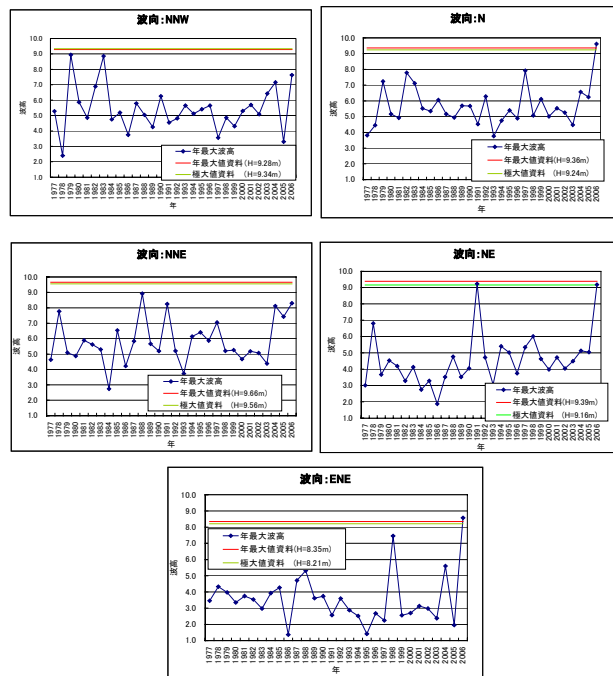


図4-1 50年確率波と波向別年最大波高の経年変化

表4-2 年最大有義波が50年確率波を越えた回数

	年最大値資料		極大値資料	
	波高 (m)	回数	波高 (m)	回数
NNW	9.28	0	9.34	0
N	9.36	1	9.24	1
NNE	9.66	0	9.56	0
NE	9.39	0	9.16	2
ENE	8.35	1	8.21	1

5. 設計沖波の評価

本検討で算出した50年確率波が設計沖波としての妥当性を評価するために、新50年確率波（年最大値資料による確率波）及び旧50年確率波（1988年に算出された確率波）について比較を行った。表5-1 に新旧50年確率波を示す。

表5-1 波向別50年確率波（旧・新）

波向 確率波	NNW		N		NNE		NE		ENE	
	Hi/3(m)	Tl/3(s)	Hi/3(m)	Tl/3(s)	Hi/3(m)	Tl/3(s)	Hi/3(m)	Tl/3(s)	Hi/3(m)	Tl/3(s)
旧	7.1	10.4	8.3	11.4	9.3	12.3	9.1	12.1	6.4	9.8
新	9.3	11.6	9.4	12.8	9.7	13.4	9.4	12.3	8.4	11.6

新50年確率波は旧50年確率波に比べて全波向で波高は高く、周期は長くなった。特に波向NNW、ENEでは波高が2.0m程度高くなった。これは高波浪の出現回数が少なかった波向において、近年発生した高波浪が極値波浪データに含まれた影響によるものと考えられる。

図5-1 は波向別の年最大有義波高・周期の経年変化と新旧50年確率波の関係、表5-2 は年最大有義波高が新旧50年確率波を超えた回数を示したものである。

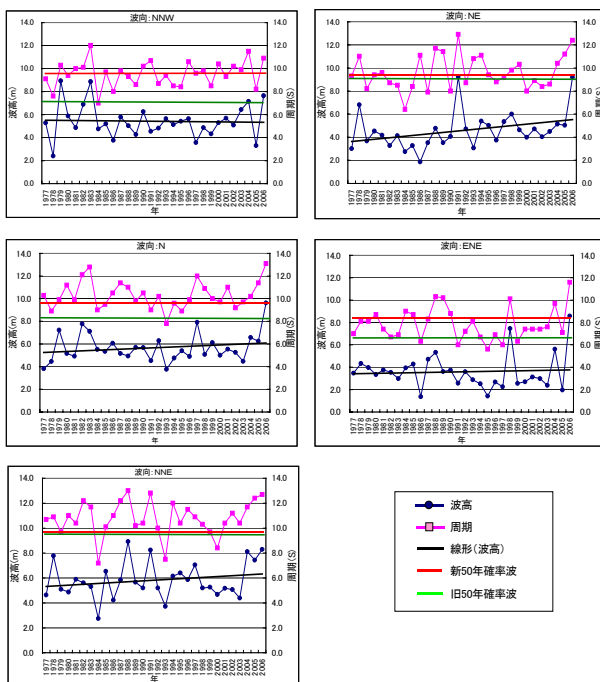


図5-1 波向別の年最大波高・周期の経年変化と新旧50年確率波の関係

表5-2 年最大有義波高が50年確率波を超えた回数

波向	旧確率波	新確率波
NNW	4	0
N	1	1
NNE	0	0
NE	2	0
ENE	2	1

波向別の年最大有義波高・周期の経年変化をみると、各波向で年々、緩やかに波高が上昇する傾向と言える。

また、年最大有義波高が50年確率波を越えた回数を比較すると、旧50年確率波に対しては波向NNWで4回、波向NE及びENEでは2回超える結果となり、設計沖波としては不適であると考えられる。

これに対し新50年確率波は波向N、ENEにおいて1回ずつのみ年最大有義波高が50年確率波を超える結果となった。また、50年確率波を超える年最大波高は波向Nで9.61m、波向ENEでは8.57mと新50年確率波にほぼ近い値となった。

以上のことから、今回算出した新50年確率波は設計沖波として妥当であると考えられる。

5. まとめ

本検討をまとめると以下ようになる。

- (1) 網走沖において第三世代WAMモデルによる波浪推算を実施する場合、海上風補正係数0.65とし海水密度4以上を陸域として扱うことで推算波高が実測波高に近づく。
- (2) 波向毎に推算波高の精度が異なることから、波向別に回帰式の傾きによる補正を行うことで推算波高が実測波高に近づく。
- (3) 本検討においては、極値波浪データによって50年確率波が異なり、年最大値資料による50年確率波が大きくなった。
- (4) 本検討で算出した50年確率波は、網走港の設計沖波として妥当であると考えられる。

6. おわりに

本検討では、オホーツク海特有の海水を考慮して波浪推算を実施したが、近年、地球温暖化等の影響により年々海水領域も減少傾向にあると言われている。

今後、海水の減少が顕著になった場合、冬季の高波浪来襲頻度が増加し設計沖波も大きくなる可能性がある。そのため、適切な時期に設計沖波の見直しを検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上），pp.211, 2007.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上），pp.110, 2007.
- 3) 日本気象協会：海洋観測指針, 1990.
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計, pp.318, 1997.
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上），pp.212, 2007.