

冬季日本海沖における波浪推算に関する研究

水工学研究室 能登 雄太
指導教官 細山田 得三

1-1 はじめに

長大な海岸線を保持するわが国沿岸の来襲波浪は、その海域に特有な局所的な地域性および気象擾乱タイプに起因するマクロな地域性を持っている。このことから、港湾・漁港・および海岸事業の計画・設計の実施に当たっては、対象施設が存在する海域の地域性（風特性、波浪特性、地形特性）を十分に考慮し、その海域において危険となる気象のタイプを把握し、対象海域の地域性を反映させた計画の検討を行うことが望ましい。本研究で対象とした、日本海領域では、季節風の影響で冬季間に比較的好く荒れている。このことから、十分有用に沿岸域を活用するには、冬季日本海の波浪特性を知ることが重要なことである。現在、わが国では、各地で波浪の現地観測が多年にわたって継続され、また過去の気象擾乱による波浪の追算がいろいろ行われている。近年は波浪推算も格段に進歩して、目的に応じ観測に変わる情報収集手段として様々な波浪推算モデルが使用されている。

そこで、本研究では、まず、実用的観点から、冬季日本海に特有な気象状況下において簡易に波浪を推算し概略値を求めることを目標にし、その後、波浪観測に代わる波浪情報収集手段として、信頼性の高い高精度な波浪推算法を用い、日本海沿岸を対象とした冬期間にわたる波浪推算を行い、現地観測値とともに推算値を用いることで、日本海における波浪特性をとりまとめることを目標とした。

1-2 波浪推算法の概要

気象資料に基づいて波高、周期及び波向などの波浪状況を推定することを波浪推算という。より正確には、過去の波浪状況を再現することを波浪追算、将来の波浪状況を予測することを波浪予測と呼んで、波浪推算の内容を区別する。波浪推算手法については、従来、有義波法にて行われてきたが、1 最近、波浪スペクトル構造（波浪の発生・発達・浅海域におけるスペクトル特性など）に関する研究成果が数多く蓄積されてきたこと、2 電子計算機の性能の飛躍的な向上と計算技術の進歩によって膨大な量の数値計算が可能になってきたこと、などからスペクトル理論に基づく波浪推算法が実用化されてきている。ここでは、代表的な波浪推算法である有義波法とスペクトル法について以下に概説する。

・ 有義波法

観測データを統一的に整理した結果より、有義波諸元（有義波高、有義波周期）と、その波を発生させる外的要因（風速、吹送時間、吹送距離及び水深）との関係を導き、この関係を利用して実用的な波浪予想式を定式化したものであり、現在 Wilson 型と呼ばれる波浪予想式が用いられている。

現在はスペクトル法によるものが多くのケースで用いられるが、有義波法でも特定の状況で波浪を推算する場合、簡易に精度よく推算できるため十分有用である。

・ スペクトル法

波浪の不規則性を多方向多周期の波浪成分をパラメータとすることにより直接的に考慮して開発された波浪推算法である。スペクトル法の代表的なものにはMRI、WAM、SWANなどがある。現在、わが国でも数多くのケースで研究がされており今後現地観測に替わる情報収集手段として期待される。

2 実用的簡易波浪推算

2-1 Wilson の波浪推算式

Wilson (1965) は、風速 U の風が距離 F の水面を十分に長い間吹き続けるときに発達する風波について、多数の観測データを整理して、有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の算定式を式(1)、(2)のように取りまとめた。

$$gH_{1/3}/U^2 = 0.30 \left\{ 1 - \left[1 + 0.004(gF/U^2)^{1/2} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

$$gT_{1/3}/(2\pi U) = 1.37 \left\{ 1 - \left[1 + 0.008(gF/U^2)^{1/3} \right]^5 \right\} \quad (2)$$

ここに g は重力加速度 ($= 9.807\text{m/s}^2$) であり、風速 U は水面上 10m の高さにおける値である。

この推算式は、昭和46年版水理公式集(土木学会)において紹介され、これに基づいて作成された波浪推算図が掲載された。

波浪推算図表を使うときに不便な点は、吹送距離と吹送時間のそれぞれに基づく波高・周期をから読み取った上で、比較検討しなければならないことである。そこで本研究では、合田(2002)による Wilson 波浪推算式の実用簡易化手法を用いて冬季間における波浪推算を行った。

2-2 Wilson波浪推算式の実用簡易化

波浪は風上側から発達するにつれて次第に周期も長くなり、伝播速度が増大する。発達しながら風域 F を伝播するのに要する時間が最小吹送時間であり、これは式(3)で算定される。

$$t_{\min} = \int_0^F \frac{dF}{c_G}; \quad \frac{gt_{\min}}{U} = \int_0^{gF/U^2} \frac{d(gF/U^2)}{gT_{1/3}/(4\pi U)} \quad (3)$$

この式(3)は解析的に解くことができず、数値積分が必要である。過去に実行された数値積分より得られる無次元最小吹送時間 $t_{\min}U/F$ と無次元吹送距離 gF/U^2 の関係を図 1.1 に示す。

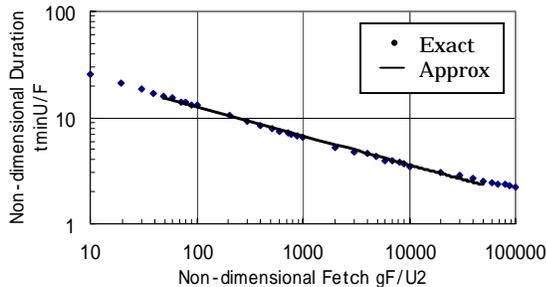


図 1.1 無次元最小吹送時間と無次元吹送距離

この図において $gF/U^2 = 50 \sim 50,000$ の範囲に着目して近似的に直線を当てはめると、式(4)のようなべき乗式が得られる。

$$t_{\min}U/F = 43(gF/U^2)^{-0.27} \quad (4)$$

実用に供するためには、次元表示のほうが便利である。そこで吹送時間 t_{\min} は hours, 距離 F は km, 風速 U は m/s 単位で表示すると、式(5)が得られる。

$$t_{\min} = 1.0F^{0.73}U^{-0.46} \quad (5)$$

また、式(5)を書き換えると、与えられた吹送時間 t に対する最小吹送距離 F_{\min} を求める式(6)を得ることができる。

$$F_{\min} = 1.0t^{1.37}U^{0.63} \quad (6)$$

本資料に示した諸式を用いて波高・周期を簡便に推定するには、まず風域を固定し、平均風速 U (m/s), 吹送(離岸)距離 F (km), および吹送時間 t (hr) を設定する。これらのデータから、まず式(6)で最小吹送距離 F_{\min} を求め、実際の吹送距離 F と比較する。もし $F > F_{\min}$ であれば、波の発達には吹送時間で規定されるので、吹送距離としては F_{\min} を用い、式(1)で有義波高、式(2)で有義波周期を算定する。逆に $F < F_{\min}$ であれば波の発達は吹送距離で規定されるので、 F をそのまま用いて波高・周期を計算する。

2-3 波浪推算結果

自動コード化した Wilson 推算式を用いて冬季日本海気象特性に合わせ季節風を想定し、輪島を対象として、風速 5~15m/s、吹送時間 1~48h について作成したプログラムを用いて波浪推算を行った。この推算結果と、実際に北西季節風が卓越し、風域が固定され、十分長い吹送距離を長時間にわたって風が吹いている期間の現地観測値の比較を行った。風データの整理より、比較対象日時は 2002 年 1 月 2 日 12 時~3 日 20 時を選出した。図 1.2、1.3 に推算結果および現地観測値を示す。ここで、1 月 3 日 7 時は波浪推算を始めて 20 時間が経過しており推算波浪が十分発達していると考えられる。有義波高については、推算値と観測値に若干の差が見られるものの両者の一致はよく、精度よく推算できている。観測値と推測値に差があるのは、計算上固定している風域場が、実際には多少の風速・風向の変化があるためだと考えられる。一方、周期についてその結果を見てみると、やや推算値が観測値に対して過小評価する結果となった。この乖離が何に起因するものなのか现阶段では判断できないが、日本海大陸側で発生した長周期波浪が伝播したことが影響していると推測した。有義波高、周期ともに推算値と観測値に若干の差がみられたものの、簡易に概略値を得る推算方法としては良好な結果が得られたと考えられる。このように、冬季間において季節風が卓越し風域場が長時間にわたり固定されるような状況がつづく場合、有義波法(ここでは Wilson 推算式)は簡易に有義波諸元を推測する方法として十分有効であるといえる。

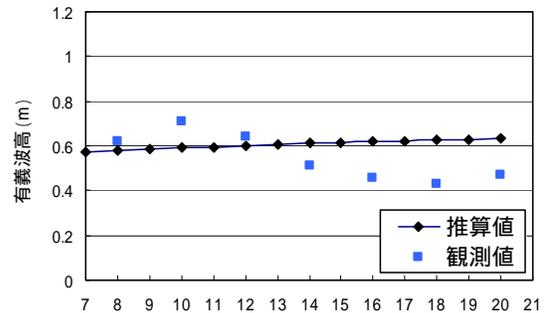


図 1.2 輪島における有義波高の比較

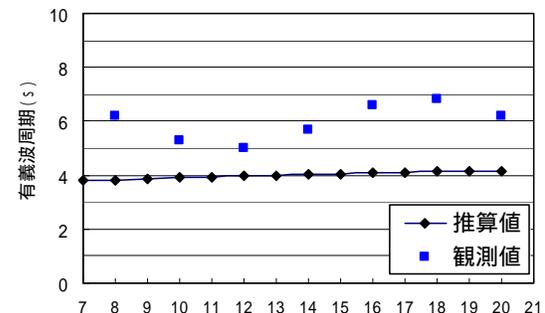


図 1.3 輪島における有義波周期の比較

3. 新潟沿岸域における地域性の検討

3-1 SWAN ((Simulating Waves Nearshore)

本研究では、波浪特性をまとめる上で現地観測値とともに推算値をデータの不足を補うために使用した。波浪の推算に当たっては、SWAN を用いて行った。

SWAN (L.H.Houltuijsen,1999) は Wave action 方程式を基礎とした浅海波の種々の物理現象を式中に考慮した第 3 世代波浪推算モデルである。表 3.1 に SWAN の概要を示す。SWAN では浅海域を推算するにあたり、幾つかの物理過程が考慮されている。特に 3 波共鳴の非線形相互作用が考慮されている点特徴的である。ただし、3 波共鳴は水深が十分に浅く、アーセル数が $10 < U_r < 0.1$ の時のみに有効である。SWAN による波浪推算は繰り返し計算に伴う収束計算であるため計算負荷が大きく、長期間を対象とする波浪推算には不向きである。

表 3.1 SWAN 概要

項目	内容
基礎方程式	・波作用量平衡方程式
物理過程	・波の伝播
	・海底地形及び流れによる波の屈折
	・浅水変形
	・風によるエネルギー入力
	・白波砕波理論によるエネルギー消散
	・海底摩擦によるエネルギー消散
	・地形性砕波
	・4波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送
	・3波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送
	・波による水位変化
数値計算手法	・防波堤等港湾構造物がある場合の波の反射
	・2次風上差分法 (移流項空間差分)
	・1次風上差分法、2次中心差分のハイブリッド法 (スペクトル空間差分)
	・方程式全体を繰り返し計算で解く近似的陰解法
	・DIA (4波共鳴の非線形相互作用)
	・LTA (3波共鳴の非線形相互作用)
	・側面境界は開境界条件
・1方向ネスティング (SWAM,WAM,WAVEWACTH より)	
入力条件	・海上10m風
	・水深データ
	・流れの流速データ
	・水位の平面分布データ
計算領域	・海底の摩擦係数平面分布データ
	・1km ~ 5000km程度 (格子間隔10m ~ 100km程度)

外部データ

SWAN を使用する場合、波浪推算に伴う入力データとして必要なものは、 計算条件設定データ、水深データ、 風データの3つである。本研究で使用にあたり、設定した計算条件データを表 3.2 に示す。

表 3.2 計算条件設定データ

項目	
座標系	球面座標系
計算領域	35°.45°N, 125°.140°E
格子点数	181×121 = 21,901点
格子間隔	5'
時間ステップ	1分
スペクトル方向領域	0 ~ 360°
方向分割数	16分割
方向間隔	22.5°
スペクトル周波数領域	0.004 ~ 1.0Hz

本研究では外部データとして、地形データについては NGDC(National Geophysical Data Center)から計算対象領域の地形データを取得し SWAN に適用した。データは緯度、経度ともに 5'ごとに記録されている。また、風データ (高度 10m における風速 U (m/s), V (m/s)) については ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) が提供している地表面データセットを採用した。データは 1 日につき、0, 6, 12, 18 時 (それぞれ世界標準時) に、0.5° ごとに記録されている。ただし、このデータをプログラム中で用いる場合、バイナリデータ形式からテキストデータ形式への変換が必要となる。本研究では、このデータ形式変換処理および計算条件に合わせるための、時・空間間隔における線形補完処理をフォートランプログラムにより行い SWAN に適用した。ここで得た推算結果をまとめて波浪特性を検討していく。また、整理した風データは地域別における気象特性の検討の際も使用した。

3-2 地域性の検討

本研究では、対象地点の決定に際して、日本海沿岸でも特に新潟県沿岸における波浪特性を取りまとめることを目的とし、2 地点を選出した (新潟沖・直江津) また、比較対象地点とし輪島を選出した。波浪特性を整理するのにあたり観測値および推算値の有義波高、有義波周期、有義波向、および波形勾配についてとりまとめた。

ここではまず、波浪の重要な要素となる風特性について述べる。新潟、および直江津における発生風向頻度は、冬季間全体を対象とした場合、冬型気圧配置の影響から起こる季節風の影響から北西から西の風の発生頻度が多い。その中でも特に西北西、次に北西の風エネルギーが強い。しかし、新潟が風速 8 ~ 13.9m/s の風の全エネルギー比率が 80%以上なのに対し、直江津では、新潟より強い風速 10.8 ~ 17.2m/s の風の比率が 80%以上となっている。これにより全風エネルギーも新潟と比較すると大きい。一方、輪島では、新潟、直江津で見られた傾向と同様に季節風の影響から北西から西の風の発生頻度が多いが、他の 2 地域が西北西が中心なのに対し、輪島では若干北西側が多く見られる。風エネルギーからもその傾向は明らかで、北西風エネルギーが他の方向の風エネルギーより大きい。また、冬季間における月毎の分布を比較しても輪島での広範囲にわたる分布が目立った。全体的な風エネルギーについて他の 2 地域と比較した場合、新潟より若干強く直江津より若干弱いと言える。これについては、全エネルギーに占める風速毎の比率から見てみるとわかるように、直江津と同様に新潟より強い風速である 10.8 ~ 17.2m/s の風の比率が 80%以上となっているものの、その構成を直江津と比較すると 13.9 ~ 17.2 m/s の強い風の割合が 10%程度減少しているためである。

次に波浪特性について地域性を考慮して述べる。ここでは一例として1999年12月～2000年2月までの波浪に関するデータを図3.1～3.4に示す。

冬季間における基本的傾向は全対象地域において同様で、夏季にはほとんどみられない波浪の乱れが、冬型気圧配置の強弱によって発生する。その中でも特に、冬型気圧配置を形成する低気圧が日本海海域上を通過するような場合に波浪変移が大きく、地域間においても差異がみられる。これは、地域毎の地理の差が大きく作用しているためだと思われる。新潟県沿岸域と輪島を比較した場合、輪島においては地形的に大陸の障害を受けにくいいため波浪の変動域が大きい。これに対して、新潟沿岸域では、北西季節風が卓越する冬季間においては、その位置関係から佐渡島の影響が増し、冬型気圧配置が特に卓越するような場合に、直江津と新潟の波浪に差異が見られた。これは、前述したように風エネルギーが新潟沖は他の2地域と比較して弱いことから明らかである。次に各諸元について地域性を含めて群述していく。

・波高・周期

夏季全般において、全対象地域の有義波は、波高が変動が少なくほぼ1m以下、周期が3～6秒の間で推移するのに対し、図1.2によると、冬季間においては、地域で違いは見られるが、全対象地域で有義波高は、変動が大きく、夏季とは異なり1mを下回る日が少なく、冬型気圧配置が強まる時は4mを越え、周期は4～10秒の範囲で変動していることがわかる。これは北西季節風が卓越し、吹送距離が十分に得られることで波が夏季に比べ十分発達するためである。次に地域毎の波浪特性について述べる。有義波高を地域毎に比較した場合、地域間で波高に差異が見られるものの、全対象地域で波浪傾向は似ているが、日本海で低気圧がさらに発達するような場合(2月9日)には、新潟沖と比較して、輪島、直江津ではさらに波高が高くなる場合も見られる。特に輪島は、直江津と比較しても冬型低気圧が特に発達した場合、地理的に波高にその影響を受けやすいのがわかる。逆に、気圧配置が弱まる場合は対象地域間の一致性は高い。

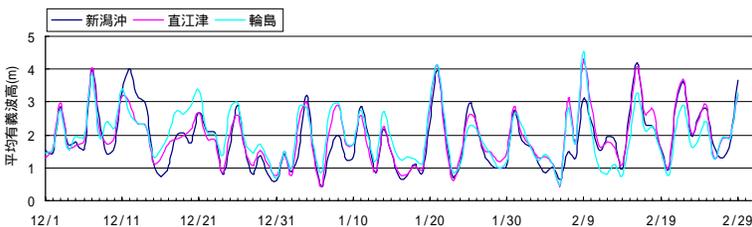


図 3.1 平均有義波高

一方で周期では、気圧配置が特に発達した場合、若干の差は見られるものの、新潟県沿岸2地域での一致性は高い、しかし、輪島における有義波周期は、新潟県沿岸域と比較すると冬季全般で若干大きいのがわかる。これは、地理的な背景から大陸側からの長周期の波浪伝播を妨げる障害が少ないためだとおもわれる。

・波向

図3によると、全対象地域で冬季間において有義波向は、季節風の影響により主に北西方向となることがわかる。しかし、冬季間を通じて新潟がほぼ北から北北西にかけての狭い範囲での波向分布なのに対して、直江津では北北西から西北西にかけて、輪島にいたっては北北東から西北西の広範囲での分布となる。このような傾向は年度によって若干の違いはあるが毎年度の傾向として見る事ができる。

・波形勾配

図4によると、全対象地域で冬季間において有義波は、ほぼ波形勾配 1/200～1/30 の範囲に分布していることがわかるが、輪島と新潟県沿岸域を比較した場合、新潟県沿岸域では、同波高に対して波形勾配の大きい波が存在しているのがわかる。また、新潟沿岸域について見てみると、新潟と比較して、直江津において同波高に対して短い周期の荒い波が多く起こっていることがわかる。

4. まとめ

本研究の結果、冬季日本海領域のように、卓越した季節風の影響から風域場が固定され、十分に長い吹送距離を持った風が長時間にわたって吹き続けるような状況が続く場合、実用簡易化した Wilson モデルを用いることにより、簡易にある程度の精度を持った概略値を求められることがわかった。また、現地観測値とともに SWAN による推算値を用いてデータを整理することで、不足データを補うことが可能になり冬季日本海沿岸、特に新潟県沿岸域における地域性(風特性・波浪特性)について取りまとめることができた。今後は、高精度波浪推算を更に活用することで、新潟県沿岸全域における、地域性の差異について取りまとめられることを期待する。

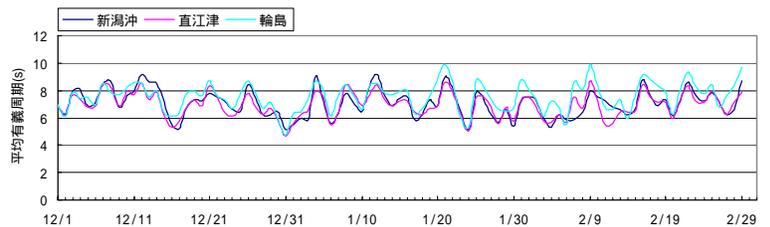


図 3.2 平均有義波周期

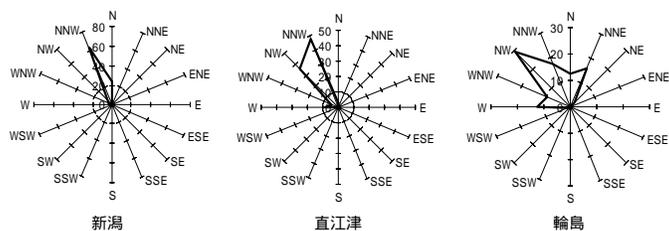


図 3.3 有義波向分布

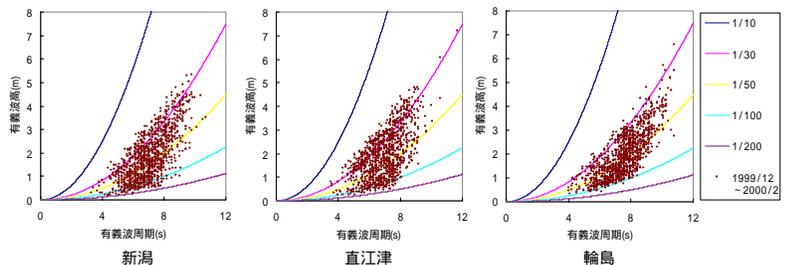


図 3.4 有義波高と有義波周期の分布結合図