特集

電力設備と気象

発電所港湾施設における気象・海象災害の予測と対策

Meteorological and oceanographic disaster predictions and managements of harbor with electric power plants

木原直人*¹ 森 信人*²

Naoto KIHARA, Nobuhito MORI

1. はじめに

沿岸部における主要な水災害として、高波、高潮および津波が挙げられる。この中で高波および高潮は、台風や低気圧等の気象擾乱に伴う強風を主要な外力として生じ、沿岸部に立地する火力・原子力発電所の建設および運用上で重要な検討課題である。

高波は、海上風のエネルギーが水面波へ流入することにより発達し、両者とも海上風によって励起されるものの物理的な発生メカニズムと空間スケールが異なる。わが国沿岸域に高波を発生させる気象擾乱として、(1)台風及び熱帯低気圧、(2)冬型気圧配置(冬季季節風)、(3)前線の移動が挙げられ¹⁾、このため、高波を発生させる主要な気象擾乱が海域によって異なる。九州南西部から関東南部にいたる太平洋側の海域では台風、日本海沿岸では冬型気圧配置が主な高波の発生要因である。一方、高潮は海上風のエネルギーが海面表層の流れへ流入することによって引き起こされる吹き寄せ効果と気圧低下による静的な吸い上げ効果により発達し、わが国では主に台風の接近にともなって発生する。吸い上げ効果は1hPaあたり1cmの海面上昇を引き起こし、吹き寄せ効果は湾の形状に大きく依存する。このため、高潮により影響を受ける海域はある程度特定される。

このような高波・高潮の影響については、沿岸部に立地する火力・原子力発電所の建設および運用の両面において様々な観点からの検討が行われる。発電所港湾の設

計において、高波に対する港湾施設に作用する波力は地震と並び主要な自然外力となる。高波に対する港湾施設の安全性は、外郭施設の保全や燃料の搬入(火力発電所では年間20~40回)を担保するものである。一般港湾の設計は30~50年の確率波に対して行われるが、原子力発電所港湾は50~100年確率波を対象としており、耐用年数内に作用する設計波力も非常に大きな値であることから様々な観点より設計外力が設定される。同様に設計外力以外に越波により敷地内へ越流する海水についても検討が行われる。一般的には、長期間の波浪実測値と気象データを元に波浪推算を行い、対象地点港内での回折や屈折といった局所的な波浪変形を考慮して設計波が設定される²⁾。一方、高潮は、発電施設の地盤高設計に大きな影響を与え、対象地点での天文潮や港内副振動を考慮し、既往の潮位履歴を調べることで設計潮位が設定されることが多い。さらに港湾形状の設計時に重要視されるのは、港湾内の静穏度である。高潮や高波が極値的な自然現象であるのに対し、燃料を搬入する船舶を係留し荷役作業を安全に行うため年間95~97.5%以上の燃料搬入船の停泊または係留日数を確保できるように港湾形状は設計される³⁾。燃料搬入船舶の係留系の固有周期は、波浪成分より長い周期を持ち、1分から10数分程度の周期を持つ長周期波の影響が大きい。それゆえ、港湾形状の設計においては、常時波浪の推算に加えて長周期波に対する検討が行われる。

*1 (財)電力中央研究所地球工学研究所 主任研究員

Research Engineer, Central Research Institute of Electric Power Industry

*2 大阪市立大学工学部環境都市工学科 講師

Lecturer, Department of Environmental Urban Engineering, Osaka City University

図1 長周期波動による取水管路系の水面連成振動

火力・原子力発電所建設時における高波・高潮に対する影響評価に対して、運用時における高波・高潮に対する主な懸念事項については以下のようにまとめられる。

(a) 防波堤や護岸の損壊による機能損傷。この被災事例としては、設計以上の高波による防波堤の被災、高波に付随う長周期波による堤内外での水位差による防波堤の滑動が報告されている³⁾。(b) 船舶及び原料の荷役管理。港湾内は静穏水域を確保できるように設計されているものの、長周期波により係留船舶が動揺し、係留索の破断事故が報告されている。また、船体動揺が大きい場合には、作業船の荷役作業も制限される^{eq.4)}。これについては、次章で詳細に記述する。(c) 波浪による取水管路系への影響⁵⁾。港湾内において長周期の水位変動が生じた場合、取水槽内の水位も振動し、取水管路系のレイアウトによっては共振により取水設備を損壊させるおそれがある(図1)。一般に、船舶の荷役スケジュールの管理や、港湾工事での作業計画や工程管理を行う上では、1日から数日間先の波浪や高潮の高精度な予測値が必要とされている。

波浪や高波に対する予測と推算は、ほぼ同じモデルが使われる。予測と推算の違いは、外力(海上風)の与え方とデータ同化等の修正方法の違いになる。以下では、主に発電所の運用上における海象予測に的を絞り、近年、最も懸念されている港湾内での長周期波による災害の対策を第2章に、設計と対策に用いられる波浪および高波予測・推算手法に対する現状の取り組みと、その高精度化について第3章に記述する。

2. 港湾内長周期波の予測と荷役管理

港湾における荷役作業の可否は、風、雨、霧などの気象条件と、波浪条件に基づいて判断される。台風や低気圧によって発生する高波や長周期波により、港湾内のバースでの荷役作業の中断や係留索の破断等が発生し、特に、1分から10数分の周期を持つ長周期波は、大型船舶の係留系固有周期と一致する周波数領域を有するため、たとえ沖の波高が小さくとも、船舶の大きな動揺を引き

図2 東京電力(株)のバース荷役可否判断支援システムの概要

図3 東北電力(株)の波浪予測システムの概要

起こす。このような船舶の荷役障害の主因となる長周期波は、不規則波群中のラディエーションストレスの変化によって波群に拘束された長周期の水位変化発生が原因であり、短周期の波が浅水変形や消波構造物によりエネルギーを消失しても残りやすく、港湾内に伝播する⁶⁾。

長周期波に起因する荷役障害については、防波堤等の波浪制御構造物による長周期波のエネルギーを低減させる手法や係留系を改造することにより共振を防止させる手法といったハード面からの対策や、波浪予測による荷役作業可否予測といったソフト面からの対策がある⁶⁾。いずれにせよ、あらかじめ荷役作業の可否を予測することが必要であり、現状では以下のような手順で実施されている。まず、対象となる発電所の港湾外での波浪予測が行われ、そこから統計解析によりバース地点での波浪値を推定する。この統計解析を実施するために、港湾内外の波浪実測値を用いて対象地点固有の係数関係を予め各港湾で求める。次に、与えられたバース地点での波浪予測値に対して係留船舶のsurge(前後動)やsway(左右動)等の複数の動揺形態における動揺量を推定し、各動揺形態の動揺量を荷役作業限界条件と照らし合わせ、作業の可否を予測する。

このような荷役作業の管理を支援するシステムとして、東京電力(株)の常陸那珂火力発電所では「バース荷役可否

判断支援システム」を石炭バースの荷役可否予測に運用している⁷⁸⁾。このシステムでは、港湾外の波浪予測値として有義波高・周期・波向きの3日間予報値を用いており、波浪条件だけでなく、気象条件による荷役限界条件に基づいて荷役作業の可否を予測している(図2)。このシステムによる荷役可否判断は高い的中率であることが報告されているものの、予測精度は沖波波浪予測値に依存しており、常時波浪予測精度向上の必要性が課題として挙げられている⁸⁾。一方、東北電力(株)では波浪予測システム⁹⁾を運用している。このシステムでは海上風の予測計算、沖波の波浪推算、および、港湾内波浪の推定計算を実施している(図3)。そして、得られた波浪予測結果は火力発電所へ配信されている。

以上のように、発電所バースでの荷役管理を支援する予測システムを運用する上で、港湾外での1m程度の常時波浪に対する正確な予測値が必要とされている。

3. 波浪・高潮の予測方法

3. 1 海上風の推定方法

波浪・高潮の発達は海上風へ強く依存するため、海上風の予測精度が波浪・高潮の推算精度に対して最も強い影響を与える。最近では、気象庁、ECMWF(ヨーロッパ中期気象予報センター)、及び、NCEP(アメリカ環境予測センター)が提供している数値モデルによる予測データGPV(Grid Point Value)を海上風に用いることが一般的である。例えば、気象庁では2007年11月にデータ形式が変更され、全球予報モデル(GSM)による84時間予報を1日4回運用しており、0.2度×0.25度(緯度×経度)の空間格子解像度で1時間間隔のデータを提供している。また、港湾構造物の設計や工事の際に実施する統計解析で必要となる過去の主要な気象擾乱による波浪推算値を計算する際には、各国の気象局や研究機関による観測値を取り込んだ客観解析データや再解析データが海上風に用いられる。

局所的な陸上地形の影響が大きな場合、各国の気象局が提供しているGPVデータよりも時空間的に高解像度な海上風データが必要となる。この場合には、GPVデータを初期値・境界値として利用し、メソ気象モデルやさらに高解像度の気象モデルにより高分解能な海上・地上風を計算する^{eg.10)}。たとえば電力中央研究所で開発された地域気象解析・予測システムMARS¹¹⁾では、気象庁の客観解析データRSM-GPV(領域スペクトルモデルによる格子点データ)及びNCEPのRTG-SST(リアルタイム全球海面水温解析値)を初期値・境界値として利用し、メソ気象

モデルWRF(Weather Research and Forecasting Model)を用いて36時間予測を1日1回運用している。MARSシステムでは、GPVより1オーダー詳細な空間解像度5kmの海上・地上風データが得られている。このようなメソ気象モデルから得られた海上風による波浪推算結果は、ECMWFの客観解析データを用いて得られた結果と比べて、詳細な海上風の時空間変化の影響により、有義波高の変化の立ち上がりやピーク値の推算精度が向上されることが報告されている¹⁰⁾。東北電力(株)が運用している波浪予測システムもまた、高分解能気象予測モデルを用いて高解像度の海上風を計算している⁹⁾。

3. 2 波浪推算方法

簡易な波浪推算手法として、Sverdrup and Munk(1947)¹²⁾によって発表され、Bretschneider(1952, 1958)¹³⁾¹⁴⁾によって修正されたSMB法が用いられる。この手法では、有義波高・有義波周期が外的要因である風速、吹送時間、吹送距離、水深と関連づけられており、吹送距離が限られている閉鎖領域においてそれなりに有効である。

最近では、気流から波浪へのエネルギー流入、砕波や海底摩擦によるエネルギー散逸、および、非線形相互作用によるエネルギー輸送を考慮した次式のkinetic方程式を解くことにより波浪の方向スペクトルの時間発展を計算する第3世代波浪推算モデルが一般に用いられている^{eg.15)}。

$$\frac{DN}{Dt} = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{friction} \quad (1)$$

ここで S_{in} 、 S_{nl} 、 S_{dis} 、 $S_{friction}$ はソース項と呼ばれ、それぞれ風からのエネルギー流入、非線形波相互作用によるエネルギー輸送、砕波によるエネルギー散逸および底面摩擦項である。東北電力の波浪予測システムでは、港湾外の波浪予測にこの第3世代波浪推算モデルを採用している⁹⁾。代表的な波浪推算モデルとして、外洋型のWAM¹⁶⁾やWAVEWATCH III¹⁷⁾、回折や浅水深による砕波の効果を取り入れた浅海型のSWAN¹⁸⁾がある。これらの波浪モデルは各国で独自に開発されてきたが、近年はその精度について相互比較が行われ、各モデルの精度や優位性が明らかにされつつある。

物理モデルの改良に加えて、波浪モデルの初期値を改良する手法が実施されている。従来用いられてきたブイデータに加えて、JASON-1やENVISATに搭載されている高度計から推定される有義波高の空間分布を取り込み、データ同化することにより大幅な精度向上が計られている¹⁹⁾。東北電力の波浪予測システムでは、波浪モデルの

図4 アンサンブル波浪予測結果を用いた港湾工事施工管理シミュレーション結果²²⁾ ($\langle B_t \rangle$:総利益, $\langle C_t \rangle$:総経費, P_H :判断基準の超過確率. (a) 基礎工: 本均し工 (翌日予測を利用), (b) 本体工: ケーソン中詰 (3日予測を利用). Control run は決定論的な波浪予測)

初期値として、気象庁が配信する波浪予測値、発電所の港湾に設置されたブイの波浪観測実測値、前回の波浪予測値の3種類を用いて品質向上をはかっている⁹⁾。

また、計算システムの発達に伴い、ネスティングについても積極的に導入されつつある。例えば WAVEWATCH III では、双方向マルチグリッドネスティングが取り入れられ²⁰⁾、これまでのような全球モデルと領域モデルの使い分けが無くなり、1種類の波浪モデルで全球からメートルスケールの解像度が要求される沿岸域まで取り扱う試みが進められている。これにより、発電所港湾極近傍での波浪予測値が得られるようになるため、港湾外波浪予測値から港湾内波浪予測値を推定する統計解析の精度向上が期待できる。

波浪予測の予測精度は海上風の予測精度に大きく依存するため、海上風の予測誤差に伴う波浪予測誤差を抑制する目的で、アンサンブル気象予測の海上風を用いて波浪推算するアンサンブル波浪予測が提案されている¹⁵⁾。また精度検証により、アンサンブル波浪予測の優位性は予測開始後2, 3日後から現れ始め、例えば4日後の波高が1mを超える確率の予測精度は決定論的な予測に比べ30%改善されることが示されている²¹⁾。アンサンブル予測は波浪予測の精度が不十分な常時波浪の予測精度を向

図5 北海で観測された Freak wave の波形

(a) 有義波高: $H_{1/3}$

(b) 最大波高: $H_{\max}$ (期待値)

図6 全球モデルによる波浪予測結果 (ECMWF)

上させることが可能であり、また、港湾でのケーソン式防波堤建設工事の施工管理シミュレーションにアンサンブル波浪予測結果を適用し、施工期間や経済的利益が算定されている(図4)²²⁾。

一方、波浪モデルの物理過程を精緻にモデル化する試みもある。式(1)に含まれるソース項については、80年代に大幅な改良が行われ、その後大きく改良されることはなかったが、近年の観測機器の発達に伴い、予測値と観測値の差違が顕著に見られるようになり、詳細な改良が行われるようになってきた。 S_{in} については、強風時における海面抵抗係数の見直しや²³⁾、初期の波浪発達率の改良が行われている。 S_{in} については、長らく直接近似法(DIA)が用いられてきたが、数学的に洗練された改良が進められている^{eg.24)}。 S_{dis} については、物理的に難しい碎波

を取り扱うため、余り改良が行われてこなかったが、白波砕波によるエネルギー散逸や水深変化による砕波について幾つかのモデル化が行われている²⁵⁾、

想定以上の高波（有義波高の2倍を超える波）であるFreak wave（図5）については、90年代初頭に議論が始まり、工学的見地から様々な検討が行われている。Freak waveの出現には、波浪予測のソース項の1つである、非線形4波相互作用が関連している。現在は気象条件、方向スペクトルとFreak waveの出現頻度の関係についての研究が進められている。このようなFreak waveの予測は、最大波高の予測そのものであり、風工学ではガストの推定と等価なチャレンジングなトピックとなっている。非線形干渉によって発達するFreak waveの出現には高精度な方向スペクトル形状の推定が不可欠であり、前段落で述べたようなソース項の改良と密接な関係を持っている。図6に示すのは、ECMWFによる通常の有義波高と最大波高分布の予測結果であり、工学的に重要な実体波である最大波高の推定が可能となってきた。

3. 3 高潮推算方法

発電所の設計時には、波浪と同様に、過去の主要な気象擾乱での高潮による水位変動も推算され、設計潮位が設定される。また、発電所敷地内への浸水対策を講じる上でも高潮や潮汐による水位変動は監視されている。

高潮を引き起こす気象擾乱の水平スケールは水深に比べて大きいので、高潮の推算には静水圧近似を仮定した運動方程式を解く数値海洋モデルが一般に用いられる^{eg.26)}。海洋モデルに潮汐モデル（例えば全球海洋潮汐モデルNAO）の解析値を与えることにより潮汐の効果を考慮した高潮推算が実施されている。

高潮推算の高精度化の試みとして、近年では気象モデル、海洋モデル、波浪モデルを結合して同時にオンラインで計算するシステムが用いられている^{eg.27),28)}。モデルを結合させる主要なメリットとしては、次の2つである。

一つめは、気象擾乱に伴う海洋の応答を気象モデルに時々刻々反映させることである。代表的な現象として、台風の通過に伴い、高波浪による海面表層混合や湧昇が生じ、それによって通過後に海面温度が2-5℃程度低下することが報告されている^{eg.29)}。海面温度の低下により海面から大気へ輸送される熱が減少するため、低気圧の発達には抑制される。

二つめは、波浪の情報を気象モデルや海洋モデルの海面物理過程に反映させることである。波浪が砕波するこ

とによって海面表層の混合が強化される過程³⁰⁾や、波浪の状態を考慮した海面での運動量フラックスのモデル化^{eg.31)}が可能となる。これにより、最近の研究による強風時の抵抗係数に関する問題点²³⁾を解消することができ、高潮推算だけでなく、海上風の推定や波浪推算の高精度化も期待できる。高波と高潮やこれらを引き起こす気象擾乱は、異なった数値モデルにより予測される現象であるが、大気・海洋・波浪の相互作用を十分に考慮したシステムを用いて予測することにより、三者の予測精度を共に向上させることができる。

4. まとめ

本報告では、火力・原子力発電所の運用上における海象予測について紹介した。第2章で記述した港湾へ伝播する長周期波は、荷役作業の中断や係留索の破断だけでなく、取水管路系の連成振動も引き起こすため、発電所港湾で近年最も懸念されている海象である。これらの予測による運用支援は一部の電力会社のみで実施されているのが現状であるが、予測精度を向上させ信頼性を高めることにより幅広く利用されることが期待できる。そのためには、気象・海象を予測する各数値モデルの精緻化や、観測データの面的な整備が不可欠である。

本報告をまとめるに当たり、電力中央研究所の平口博丸氏並びに榊山 勉氏に貴重なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会 海岸工学委員会, “新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法—性能設計法の確立に向けて—”, 土木学会, 2001.
- 2) 電力土木技術協会, “火力・原子力発電所土木構造物の設計”, 電力土木技術協会, 1995.
- 3) 田中征夫・溝辺哲・岡部成光, “苓北地点9119号台風災害の原因究明と復旧対策”, 電力土木, No. 242, pp. 81-89, 1992.
- 4) 渡辺幸浩・安田勝則, “現地波浪観測結果に基づく作業船の作業限界波高の限界”, 電力土木, No.289, pp.63-67, 2000.
- 5) 林 文晴・杉山陽一・澤利明, “長周期波浪が放水設備に与える影響”, 電力土木, No. 331, pp.34-38, 2007.
- 6) 平石哲也・白石悟・永井紀彦・横田弘・松渕知・藤咲秀可・清水勝義, “長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査”, 港湾技研資料, No. 873, pp. 1-39, 1997.

- 7) 松村信・興野俊也・安田勝則・佐々木政秀・阿部光信, “バース稼働状況シミュレーションを用いたバース運用予測手法の研究,” 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 623-628, 2002.
- 8) 興野俊也・安田勝則・阿部光信・長舩徹, “長周期波予測に基づくバース荷役可否判断支援システムの開発と運用実績,” 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 803-808, 2005.
- 9) 榎本重朗, “船舶運航管理のための波浪予測に関する研究,” 電気評論, 1月号, 2006.
- 10) 森 信人・平口博丸・筒井純一, “気象モデルを用いた波浪推算の高精度化,” 海岸工学論文集, Vol. 47, 2000.
- 11) 和田浩治・杉本聡一郎・豊田康嗣・平口博丸, “電中研一地域気象解析・予測システム(MARS)の開発,” 電力中央研究所報告, No. N06016, 2007.
- 12) Sverdrup, H. U. and W. H. Munk, “Wind sea and swell. Theory of relation for forecasting”, U.S. Navy Hydrogr. Office, Washington, No. 601, 1947.
- 13) Bretschneider, C. L., “The generation and decay of wind waves in deep water”, Trans. A.G.U., Vol. 33, pp. 381-389, 1952.
- 14) Bretschneider, C. L., “Revision in wave forecasting; deep and shallow water”, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 30-67, 1958.
- 15) 森 信人・平口博丸, “アンサンブル波浪予測の精度について,” 土木学会論文集, Vol. 747, pp. 155-171, 2003.
- 16) WAMDI group, “The WAM model-a third generation ocean wave prediction model”, J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, pp. 1775-1810, 1988.
- 17) Tolman, H. L., “User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15”, 1997.
- 18) Booij, N. R., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen, “A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation”, J. Geophys. Res., Vol. 104, pp. 7649-7666, 1999.
- 19) Janssen, P.A.E.M., J.R. Bidlot, S. Abdalla and H. Hersbach, “Progress in ocean wave forecasting at ECMWF”, ECMWF Technical Memorandum, 478, 30 p., 2005.
- 20) Chawla, A., D. Cao, V. Gerald, T. Spindler and H. L. Tolman, “Operational Implementation of a Multi-grid Wave Forecasting System”, 10th Wave Hindcasing and Forecasting, 12p., 2007.
- 21) 森 信人・平口博丸, “アンサンブル波浪予測の精度と価値について”, 土木学会論文集, Vol. 768, pp. 167-177, 2004.
- 22) 平口博丸・森信人, “アンサンブル波浪予測を用いた港湾工事施工管理の意志決定,” 電力中央研究所報告書, No. 05071, 2006.
- 23) Powell, M.D., P. J. Vickery and T.A. Reinhold, Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, Vol. 422, pp.279-283, 2003.
- 24) Resio, D and W. Perrie, “A two-Scale approximation for efficient representation of nonlinear energy transfers in a wind wave spectrum”, J. Phys. Oceanogr., 印刷中.
- 25) 10th Wave Hindcasing and Forecasting, <http://www.waveworkshop.org/>, 2007.
- 26) 山下隆男・別宮功, “台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算”, 海岸工学論文集, Vol. 43, pp. 261-265, 1996.
- 27) 村上智一・安田孝志・大澤輝夫, “気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発”, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 366-370, 2004.
- 28) 金庚玉・山下隆男, “大気・波浪・海洋結合モデルによる台風 9918 号の高潮・高波の追算”, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 236-240, 2004.
- 29) Bender, M. A., I. Ginis, and Y. Kurihara, “Numerical simulation of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model”, J. Geophys. Res., Vol. 98, pp. 23245-23263, 1993.
- 30) Craig, P. D., and M. L. Banner, “Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer,” J. Phys. Oceanogr., Vol. 24, pp. 2546-2559, 1994.
- 31) Moon, I.-J., I. Ginis, and T. Hara, “Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclones,” J. Atmos. Sci., Vol. 61, pp. 2334-2348, 2004.