

台風時における港内係留船の係留限界予測に関する研究

笹 健 児* ・久保雅義**・高橋倫也***
白石 悟****・永井紀彦*****

1. 緒 言

外洋性港湾において、係留船舶の長周期動揺に起因した荷役または係留障害に関する問題が数多く研究されてきた。これより、船体動揺の主原因である長周期波の特性に関する研究（永井ら，1994）や長周期船体動揺を低減するための係留システムに関する研究も報告された（白石ら，1995）。しかし，現時点で係留対策が実用化している港湾はまだ少なく，多くの港では検討課題のまま放置されている。一方，現行の運用基準では港内での係留が困難と判断された場合，船舶は港外へ避泊するように定められている。荒天時の避泊は港外の波浪が発達するタイミングを見計らった対応が必要となるが，実際には急激に波浪が発達する状況に対応できず，船舶が大変危険な状況に陥った事例も見られる。上記背景より，早期に実用化が可能な運用対策が必要と考えられ，波浪予測による港内係留船の係留限界の予測システムは有効な方策と言える。過去に荒天時の波浪予測に関しても多くの研究が実施され（青野ら，1993；橋本ら，1995），最近では大容量の計算モデルで予測精度も向上している。しかし，船舶の係留限界の観点から詳細に検討された波浪予測の研究例はほとんど見られず，冬季日本海の港湾を対象に検討した事例（久保ら，1997）も荷役運用のために要する有効な予測時間差を有していない。本研究では，太平洋側の港湾を対象に係留困難であった状況について，ノウファスのデータを用いた波浪の発達状況と台風的位置・強さの変化および現場での対応状況の関係を時系列的および統計的に分析する。さらに台風および波浪データをもとにカルマンフィルターと台風内の波浪推算式を組み合わせた係留限界の予測モデルを新たに構築し，過去の実測例をもとに検証を行う。

2. 検討条件の整理

本研究で太平洋沿岸に面した A 港を検討対象とした。当該港湾はうねりや高波浪時に長周期波の影響が顕著となり、港内係留船が係留不能となった事例が報告されている。A 港はナウファスの波浪観測地点にも設定されており、最近 5 年間の港外の有義波データ、荒天時（約 40 ケース）の時系列データ（長周期波）の解析を実施した。

3. 係留限界時の気象状況について

対象とした A 港で 1997～1999 年の 3 年間に係留障害が発生した時の気象に関する傾向を表一 1 に示す。

表一1 係留限界時の気象に関する統計的傾向 (A 港)

気象要因	報告件数	割 合	時期
台風-1	11	55%	7～9月
台風-2	6	30%	4～6月, 10～11月
低気圧	3	15%	11～4月

(注) 台風-1：台風シーズンに発生した台風

台風-2: 台風シーズンの前後に発生した台風

これより、A 港では全体の 85% が台風に起因する影響で係留索の切断や防舷材または船体の破損、緊急避泊といった状況に至っている。台風による係留船への影響は台風シーズンだけでなく、4 月～11 月の長期間に影響が出ており、日本に接近しない台風の影響も無視できない。また台風だけでなく、冬季～春季にかけても発達した低気圧の影響で係留障害が発生している。ただし、本研究では台風による波浪の影響を対象を絞って検討を行った。

4. 係留限界時における台風と波浪の関係

本研究では係留限界時だけでなく、静穏時から係留限界に至るまでの波浪および台風の位置・強さの変化を時系列的および統計的に分析した。図-1 および 図-2 に 1997 年 11 月および 1998 年 9 月における有義波の時系列と港内の船舶が係留限界となった時点の関係を示す。

・学生会員	神戸商船大学大学院	博士後期課程	
・正会員	工博	神戸商船大学教授	船貨輸送研究施設
・正会員	工博	神戸商船大学教授	情報システム工学講座
・正会員	博(工)	(独)港穹空港技術研究所	地盤・構造部 海洋 構造研究室長
・正会員	博(工)	(独)港穹空港技術研究所	海洋・水工部 海象 情報研究室長

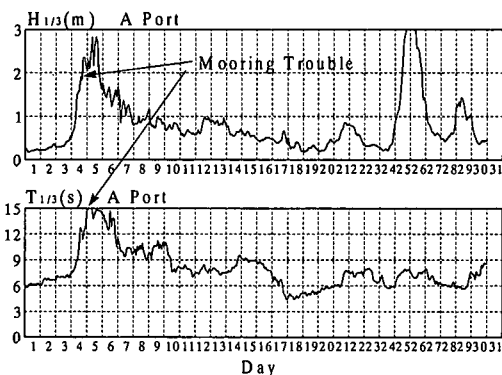


図-1 1997年11月の有義波の時系列

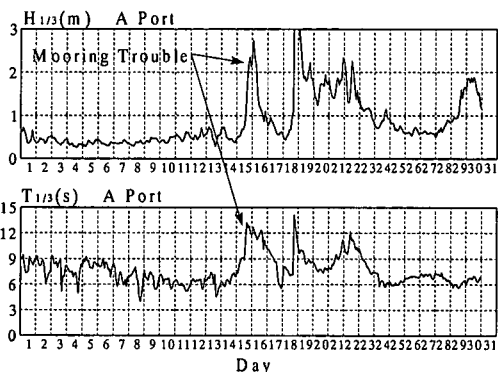


図-2 1998年9月の有義波の時系列

図-1では有義波高3m, 有義周期15s程度のうねりが, 図-2では有義波高2.5m, 有義周期12s程度のうねりがA港の港外に急激に伝播してきており, 現場での予測が困難な状況が窺える。有義波の時系列は極めて非定常な傾向を示しており, 有義波だけでなく長周期波, 台風との位置関係, 台風の経路, 台風の強さといった多変量のパラメーターを用いた分析が必要であると考えられる。図-3および図-4にそれぞれの台風経路と船舶の係留が困難と考えられる波浪条件(有義波および長周期波)ごとの位置関係, A港への接近距離, 台風の移動距離を示す。前者はかなり遠方で発生し北緯20°の少し南から進路を北東に変更する旋回型経路の台風であるのに対し, 後者は北緯20°の少し南の海域で発生しそのまま北上する経路の台風であった。また係留限界となりうる時点の比較を行い, 前者は北緯20°よりも南の地点に台風が位置している時点であるのに対し, 後者はA港とほぼ同じ緯度まで接近した状況で係留限界となっている。

両ケースとも有義波高2mおよび長周期波高0.1mとなる時点がほぼ等しく, A港における係留限界は有義波では波高2m, 周期10sを目安に検討すればよいと考えられる。これらの統計的傾向として, 図-5に

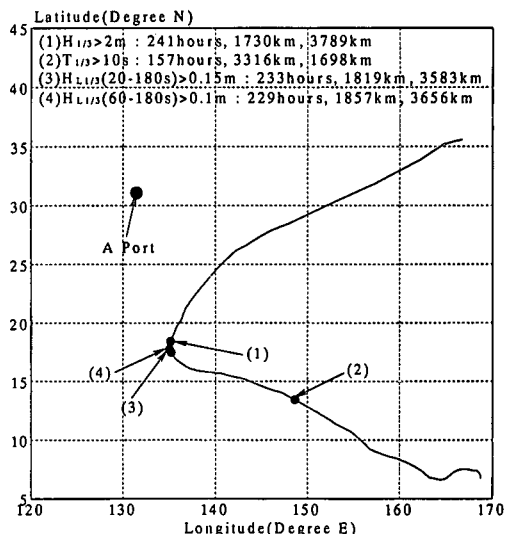


図-3 1997年11月の台風経路と係留限界条件

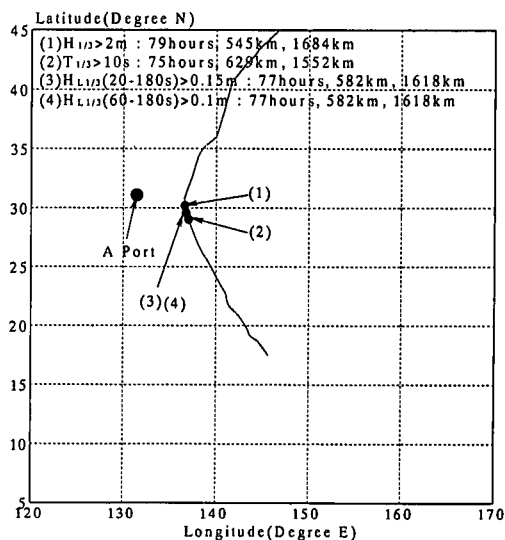


図-4 1998年9月の台風経路と係留限界条件

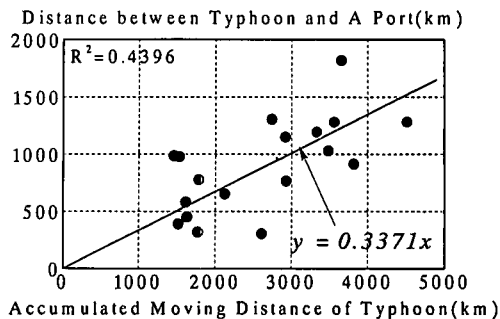


図-5 係留限界時の台風の移動距離と接近距離の関係

1995～1999年の5年間の台風について、 $H_{L1/3} > 0.1$ m となる時点における台風発生時からの移動距離とA港への接近距離の関係をプロットした結果を示す。

両者の関係は回帰直線で表現できるが、船舶の係留に支障を与える台風のパターンとして、移動距離2000 km以下かつ接近距離500 km前後の台風(日本に接近)と移動距離3000 km以上かつ接近距離1000 km以上の台風(日本の南方を通過)に大別できる。波浪だけの情報では係留限界の評価は困難であり、波浪と台風の来襲傾向より判断する必要がある。

5. 高波浪およびうねり予測モデルの構築

ここではA港に高波浪・うねりが伝播・発達する状況について、極力少ないデータによる簡易予測法の構築を試みた。図-6に本研究における高波浪・うねりの予測に関する流れを示す。

ここでは波浪を直接予測する方法ではなく、まず波浪を発生させる台風の諸パラメーターを逐次予測し、この予測値を用いて台風内の風場から波浪を求め、台風内の波浪が台風域を離れA港まで伝播したうねりの有義波高および有義周期を求める方法とした。台風のパラメーター予測に関しては多変量時系列としての入出力が必要であり、逐次実測値による補正が可能なカルマンフィルターのアルゴリズムを用いて検討した(北川, 1993)。台風パラメーターの逐次予測式は次式で表される。

$$\{x_i\}_{k,k+1} = [F_{ij}]_k \{x_j\}_k + \{v_i\}_k, (i, j=1 \sim 6) \quad \cdots (1)$$

$$\{y_i\}_k = [H_{ij}]_k \{x_j\}_k + \{w_i\}_k, (i=1 \sim 5, j=1 \sim 6) \quad \cdots (2)$$

ここで、 $\{x_i\}_{k,k+1}$: 時点 k から一期先予測された状態ベクトル、 $[F_{ij}]_k$: 時点 k から $k+1$ への推移マトリックス、 $\{x_j\}_k$: 時点 k の状態ベクトル、 $\{v_i\}_k$: 状態雑音、 $\{y_i\}_k$: 時点 k の観測値および $\{w_i\}_k$: 観測雑音をそれぞれ示す。予測対象は台風の緯度、経度、中心気圧、暴風半径および強風半径の5変数とした。推移マトリックス $[F_{ij}]_k$ は各説明変数ごとに時点 k までの時系列データに対し重回帰分析で求めた係数によって設定し、計算ステップごとにマトリックスの係数を変更される。このように予測された台風パラメーターを用い、移動中の台風内における最大有義波高および周期を各時点について求めた(井島ら, 1970)。台風の場合、風域そのものが沿岸に接近する場合と風域を離れてうねりとして伝播する場合があるが、沿岸に伝播する波浪の有義波高および有義周期は次式によって求められる(Bretschneider, 1952)。

$$(H_{1/3})_D = \sqrt{\frac{0.4 F_{\min}}{0.4 F_{\min} + D}} (H_{1/3})_T \quad \cdots (3)$$

$$(T_{1/3})_D = \sqrt{2.0 - \frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_T}} (T_{1/3})_T \quad \cdots (4)$$

ここで、 $(H_{1/3})_D$: 沿岸での有義波高、 $(H_{1/3})_T$: 台風内の有義波高、 D : 風域終端から沿岸までの距離、 $F_{\min}$: 風域での最小吹送距離、 $(T_{1/3})_D$: 沿岸での有義周期、 $(T_{1/3})_T$: 台風内の有義周期をそれぞれ示す。さらに台風から沿岸までの波浪の伝播時間 t_D は次式によって求められる。

$$t_D = \frac{4\pi D}{g(T_{1/3})_D} \quad \cdots (5)$$

沿岸域で観測される波浪は台風による波浪にそれ以外の要因で発生した波浪が重ね合わさったものであると考えられるため、A港での有義波データより台風以外の要因で発生した波浪を求め、両者を足し合わせた値によってA港の港外波浪の予測値とし、予測時間差については、台風パラメーターの予測時間+波浪の伝播時間 t_D として高波浪・うねりの伝播予測が可能となる。

6. 係留限界の予測に関する検証

1995～1999年における台風および波浪データを用いて波浪および係留限界の予測を数例行い、本手法の有効性を検証した。図-7に1997年11月のA港における有義波高・有義周期および伝播時間の計算結果を示す。図中の○, ●, ◎は予測に用いた時期と予測された有義波高、有義周期の時間関係を示す。

これより、有義周期は実測値よりもやや大きめであるが、台風以外の波浪成分と干渉している影響で実測値は若干小さくなっていると考えられる。有義波高については、立ち上がり始める時点が少しずれているが、係留限界条件と定めた $H_{1/3} > 2$ m, $T_{1/3} > 10$ sとなる時点は時間遅れなく正確に予測できており、波高に関してはピーク

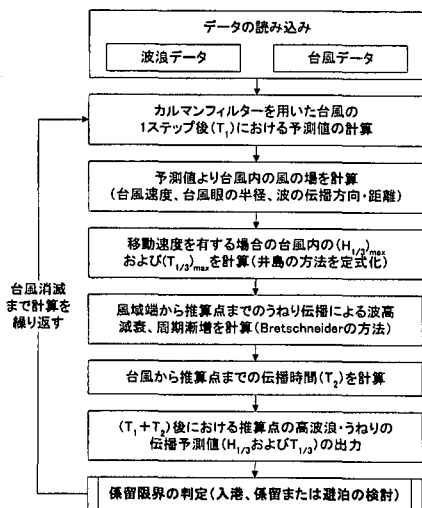


図-6 高波浪・うねりの予測に関する流れ

値およびその継続時間もほぼ実測値に近い値になっている。伝播時間については遠方から伝播した影響で、係留限界となる台風発生後10日の波浪は約3日前(7日目)に予測できていることとなる。一方、台風のパターンが異なる場合について、図-8および図-9に1997年7月および1995年9月の波浪予測に関する結果を示す。

1997年7月のケースについては、ピーク値が実測値よりも少し小さいが、波浪の立ち上がる状況が約1.5日前の時点で実測値を極めて正確に再現できており、係留限界の判定には問題のない精度であると考えられる。これに対し、1995年9月のケースについては、波高および周期の値は実測値に近く、係留限界となる時点(台風発生後4日目)を約1.5日後の予測が出来ているものの、実測値よりも半日ほど遅れて波浪が立ち上がる結果となっている。このため、係留限界の適切な予測としては精度的にやや不十分であると思われる。

全体的に見れば、高波浪またはうねりの発達には台風の位置や強さに関する多変量パラメータを予測・考慮し、図-7や図-8のように台風の勢力が接近する前に最大となるような場合は予測が成功している。船舶が港外避泊に要する時間はおよそ2～3時間と言われており、係留や避泊作業が危険となりうる時点を1～3日前に把握できれば、現場において荷役中断や港外避泊の最適なタイミングを見計らった対応が可能となることが期待さ

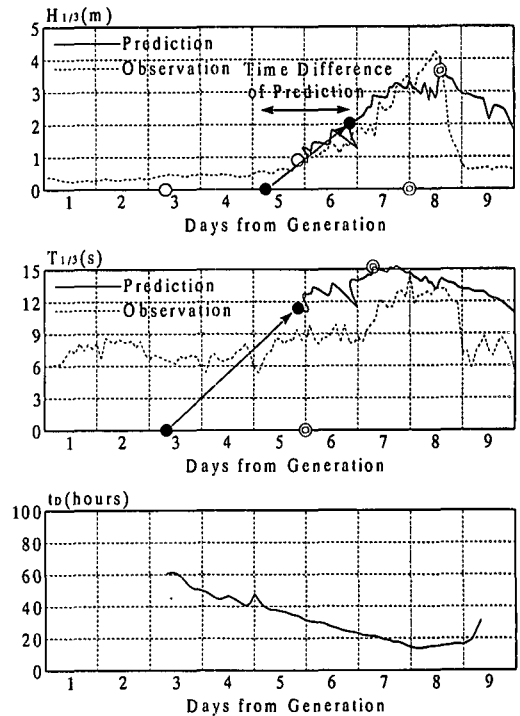


図-8 有義波と伝播時間の予測結果 (1997年7月)

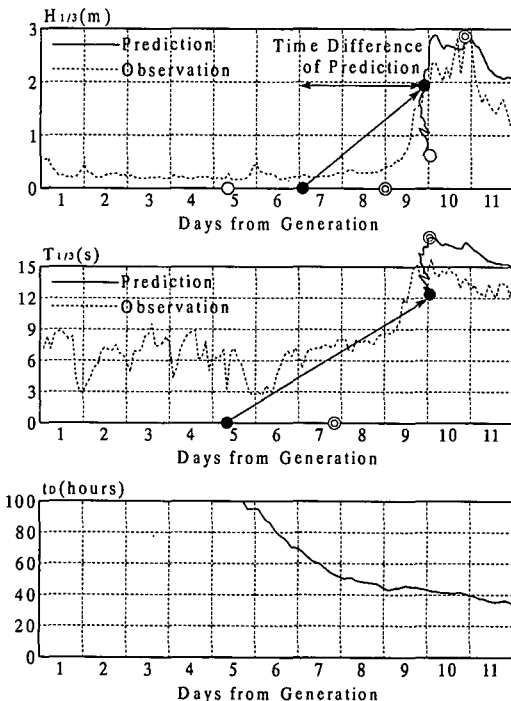


図-7 有義波と伝播時間の予測結果 (1997年11月)

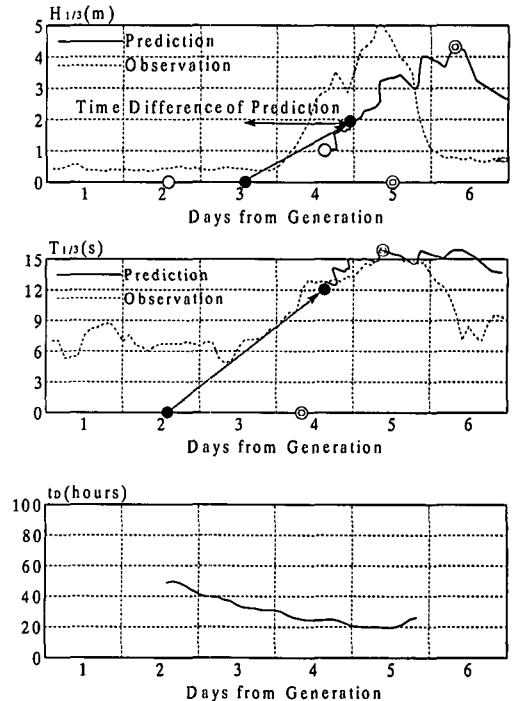


図-9 有義波と伝播時間の予測結果 (1995年9月)

れる。また停泊期間が1～3日以内の船舶の場合、入港前に停泊期間中の気象状況が把握できることから、あらかじめ沖待ちや航海スケジュールの変更といった対応を検討する際の判断材料ともなりうる。ただし、図-9のように近海で発生し、接近しながら急激に勢力を強める台風や本研究で検討していない複数の台風が同時に発生・接近する状況における波浪予測については今後検討する必要がある。

7. 結 論

本研究では太平洋に面した港湾における係留限界の予測を目的に台風起因した高波浪・うねりの簡易予測モデルの開発を実施し、現場での運用支援ツールとしての可能性を検討した。結論および今後の課題は以下のとおりである。

(1) 台風起因するA港での係留限界は台風シーズンだけでなく、4～11月の広範囲に及んでいる。また接近台風だけでなく、台風警報が発令しないような遠方台風の影響も注意しなければならないことが明らかとなった。

(2) 波浪の発達と台風の接近距離および累積移動距離は非常に相関が深いことが分かった。過去5年間のデータより、係留限界となりうるのは移動距離2000 km以下かつ接近距離500 km前後の台風と移動距離3000 km以上かつ接近距離1000 km以上の台風に大別できることが明らかとなった。

(3) 台風のパラメーターを多変量時系列として重回帰分析およびカルマンフィルターを用いた逐次予測によって求め、これから台風域内の波浪を算定し、さらにA港に伝播する波浪を予測するという方法で新たな予測手法を構築した。この手法では、対象地点における波浪データと台風に関する少数のデータ入力のみで予測計算が可能であるため、現場においても活用しやすい手法であると考えられる。

(4) 本手法によって様々なパターンの台風起因する高波浪およびうねりの発達状況を予測・検証した。台風

が最接近する手前で勢力が最大となるような場合については、半日～3日程度の時間的な余裕をもって係留限界となる時点を正確に予測できることが確認された。したふがって、船舶が入港する前や係留中での避泊に関する最適なタイミングを判断する情報として活用されることが期待される。

(5) 近海で発生し勢力を強めながら急接近する台風のような場合については、本手法での予測値は実測値に対して半日程度の時間遅れを有している。よってこのようなケースにおける予測精度の向上および同時期に複数の台風が発生、接近する場合の波浪予測が可能となるモデルへの拡張についても実施・検討していく必要がある。

本研究は神戸商船大学と独立行政法人港湾空港技術研究所の共同研究として実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 青野利夫・後藤智明・佐藤典之 (1993): 沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 156-160.
- 井島武士・田淵幹修 (1970): 数値計算による台風域内の波の分布について (II) - 実際の台風による検討 -, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 27-33.
- 北川源四郎 (1993): 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 390p.
- 久保雅義, 小宗多恵, 斎藤勝彦, 笹 健児 (1997): 日本海に面した港湾での高波高の発生予測に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 第97号, pp. 73-83.
- 白石 悟, 久保雅義, 上田 茂, 柳原繁樹 (1995): 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 941-945.
- 永井紀彦, 橋本典明, 浅井 正, 戸引 照, 伊藤一教, 東江隆夫, 小林昭男, 柴田孝雄 (1994): 現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 931-935.
- 橋本典明・永井紀彦・清水勝義・菅原一晃・久高将信・田中 聡 (1995): 主成分分析とカルマンフィルタを用いた統計的波浪予測手法の適用性について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 336-340.
- Bretschneider, C. L. (1952): The Generation and Decay of Wind Waves in Deep Sea Water, Trans. A. G. U., Vol. 37, No. 3, pp. 381-388.