

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(第二報)

——予測モデルの精度向上および拡張——

笹 健児*・久保雅義**・白石 悟***・永井紀彦****

台風時のうねりや風波の伝播による港内の係留問題に対し、簡易予測モデルの必要性を明らかにした。予測モデルはカルマンフィルターの理論に基づく台風の逐次予測と予測された台風で発生してから推算点まで伝播する波浪を推算する部分で構成される。また予測モデルを複数の台風が同時に存在する状況でも予測可能となるように拡張した。このモデルにより太平洋に面した A 港について、台風が接近しながら勢力を強める状況や複数の台風が同時に存在する状況にも予測可能であり、さらに他の地点に対してもほぼ十分な精度で予測可能であることが検証された。一方、本モデルを港湾での係留限界の予測システムとして構築できる可能性についても検討した。

1. 緒 言

太平洋や日本海といった外洋性港湾で発生している係留問題について、長周期波や船体動揺に関する多くの研究が実施されてきた(白石ら, 1995)。これらの研究成果を踏まえ、最近ようやく長周期波による係留問題に対する具体的な対策検討が行われる状況となりつつある。ただし財政面などの問題もあり、係留設備の増強などが各地の港湾に早期に実現する可能性は依然として高いとは言えず、早期に実現可能な他のシステムの提案が必要である。著者らは前報(笹ら, 2001)において、太平洋に面した A 港を対象に台風時におけるうねりおよび高波浪の伝播によって係留限界となっている状況をまず明確にした。さらにカルマンフィルターおよび台風による簡易的に波浪推算を組み合わせた予測モデルを提案した。これにより、台風から伝播する波浪によって引き起こされる係留限界をある程度事前に予測することが可能となり、係留問題に対する有効なツールとして期待されるところである。しかし、前報で示した予測モデルには接近しながら勢力を急に強める台風による係留限界の予測に半日程度の時間遅れを有する問題点が残されていたほか、複数の台風が同時に存在する状態で発生する係留限界の予測が不可能であった。本研究では、前報で考慮できていなかった予測上の問題点を中心に予測モデルのアルゴリズム全体について改良および拡張を行った。さらに改良した予測モデルによって接近型の台風および複数の台風が同時に存在する場合の A 港における係留限界について予測精度の検証を行った。また太平洋に面した他の地点について、本予測モデルの適用可能性についても検討した。以上から、本研究での予測モデルについて、台風時における係留限界の予測モデルとしての有効性を

考察した。

2. 前報における予測モデルの課題

前報において、著者らはカルマンフィルターによる台風の逐次予測とその予測値を用いた台風からの波浪伝播の近似計算(井島ら, 1970; Bretschneider, 1952)を組み合わせたモデルを構築した。アルゴリズムの詳細については前報を参照されたい。前報の予測モデル(以下、前モデルと呼ぶ)で遠方に位置する台風からうねりが伝播する状況について、1~3日の時間幅で事前予測が精度よく実施できることが確認された。一方、勢力を強めながら北上する経路を取るパターンの台風において、予測値が実測値に対して半日程度の時間遅れを有する問題点があった。また、前モデルでは台風が1つだけ存在する場合のみを検討対象としていた。しかし、実際の状況では海上に複数の台風が同時に存在し、それぞれの波浪から台風が伝播するケースもよく見られる。台風時における係留限界を予測するためには、このような状況についても予測可能とする必要がある。また太平洋に面した A 港のみを対象に検討していたが、予測モデルを他の地点に適用した場合の可能性についても検討する必要がある。

3. 検討条件の整理

3.1 対象地点

前報で検討対象とした太平洋に面した A 港の係留限界について基本的に検討する。波浪データについては A 港の沖で計測されているナウファスのデータベースを使用した。さらに太平洋に面した他の地点についても予測を行うため、N 港、M 港、K 港、S 港および O 港(いずれもナウファスの観測地点)についても検討を行った。

3.2 対象とする台風条件

台風データについては、前報で検討した 1995~1999 年の 5 年分のデータを検討対象とした。この中で A 港において係留限界に至ったケースを中心に台風を抽出した。ただし、この期間で同時期に複数の台風による影響が見られるパターンを数ケースほど新たに検討対象に追加し

* 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 博(工) (独法)港湾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) (独法)港湾空港技術研究所海洋・工部部海象情
報研究室長

た。またこれらのデータについては気象データベースを用いた。

4. 予測モデルの改善点

前モデルに関する問題点に対し、予測精度を向上させるために計算アルゴリズムを以下の点について改良した。基本的な計算流れは前モデルと同じく、カルマンフィルターおよび台風からの波浪伝播に関する近似計算を組み合わせる方法を用いている。なお、本研究では台風の予測ステップを2時間から6時間に延長した。これによって最低でも6時間後の予測が可能となり、係留船舶が緊急避泊する際の時間的な余裕幅をやや増加させることができる。

4.1 波浪伝播の多方向性および風域の再定義

前モデルでは台風から伝播する波浪について、有義波として取り扱っていたが、波向に関しては主方向のみを考慮した一方向としていた。さらに台風の暴風円から最大有義波が推算点に伝播する影響のみを考慮していた。しかし、実際には台風上の多方向から様々な強さの波浪が伝播していると考えられる。本研究ではこれらの点が予測精度に影響していると考え、モデルの修正を行った。

波向の多方向性については、主方向を中心に方向分散の影響を考慮し台風上の多方向から波が伝播するモデルに変更した。すなわち、有義波の形で求められる台風内の波浪を方向スペクトルに変換する必要がある。

$$DS(f, \alpha_i) = G(f, \alpha) S(f), \quad (i=1 \sim ND) \cdots (1)$$

ここで、 $DS(f, \alpha)$: 方向スペクトル、 $G(f, \alpha)$: 光易型の方向関数、 $S(f)$: 周波数スペクトル、 f : 周波数、 α : 主方向からの偏角、 ND : 波の方向数を示す。周波数スペクトルは JONSWAP 型を用い、井島の方法で求められる台風内の有義波高 $(H_{1/3})_T$ および周期 $(T_{1/3})_T$ を代入して求める。これより、方向ごとの成分波は有義波の形に再度変換される。

$$(H_{1/3})_{Ti} = 4.0 \sqrt{\int_0^\infty DS(f, \alpha_i) df}, \quad (i=1 \sim ND) \cdots (2)$$

$$(T_{1/3})_{Ti} = \frac{1}{1.05 f_p}, \quad (i=1 \sim ND) \cdots (3)$$

ここで、 f_p : 方向スペクトルのピーク周波数を示す。これらを Bretschneider の式に代入し、各方向における台風からの成分波の伝播が計算できる。

風域についても以下のようなモデル改良を行った。暴風域から最大波が伝播する状況のみを考慮する場合、台風が接近しながらうねりと共に風波も伝播する影響が考慮できていない。このため、台風が推算点に接近しながら勢力を強めるような状況で予測精度が不十分であったと思われる。よって、暴風域から最大波がうねりとして伝播するだけでなく、図-1 に示すように台風が接近す

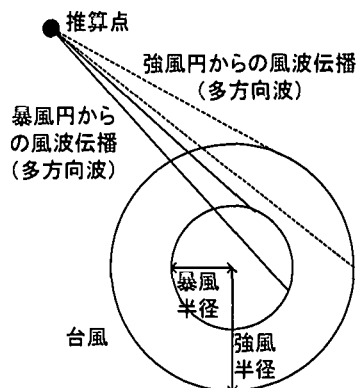


図-1 本モデルでの風域および波向の定義

る場合には強風域からも風波が伝播し、両者が重ね合わせた波浪を台風から推算点への伝播波とした。

4.2 複数の台風が存在する場合への拡張

前モデルでは1つの台風から伝播する波浪によって引き起こされる係留限界のみを予測対象としていた。しかし、実際には海上に複数の台風が同時期に発生・活動し、この影響で係留限界が引き起こされるケースも特に台風シーズンを中心に見られる。そこで、複数の台風が同時期に海上に存在する場合の予測についても対応できるようにモデルを改良した。まずカルマンフィルターによる台風の予測部分において、それぞれの台風パラメータを逐次予測する。この予測値をもとに各台風から伝播する波浪をそれぞれ求め、推算点への到達時間 t_a (予測時間 t_k + 予測ステップ Δt + 波の伝播時間 t_b) を基準に以下のように成分波および台風ごとに重ね合わせることで予測時点から $(t_a - t)$ だけ先の予測値 $\{(H_{1/3})_{Dj}, (T_{1/3})_{Dj}\}_{t=t_k}$ が求められる。

$$\{(H_{1/3})_{Dj}, (T_{1/3})_{Dj}\}_{t=t_k} = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{ND_i} \{(H_{1/3})_{Dij}, (T_{1/3})_{Dij}\}_{t=t_k} \cdots (3)$$

ここで、 $\{(H_{1/3})_{Dj}, (T_{1/3})_{Dj}\}_{t=t_k}$: 台風から $t=t_k$ の時点で推算点に i 番目の台風から伝播する j 番目の成分波高および周期、 ND_i : i 番目の台風から $t=t_k$ の時点で推算点へ伝播する成分波の総数、 NT : 台風の数それぞれ示す。

4.3 他の地点への予測モデルの拡張

これまで A 港を対象としてきたが、他の地点にも予測が可能となるようにモデルを拡張する必要がある。モデルに中において、対象地点の緯度・経度および反射・回折などに関する地形条件を地点ごとに考慮した。

5. 係留限界の予測精度に関する検証

5.1 接近しながら勢力を強める台風の場合

前報で予測精度に問題が見られたケースについて、再

度予測を行い本モデルによる精度を検証した。図-2に1995年9月に発生した台風によるA港での予測結果を示す。

図中に予測時点および係留限界 (A港では $H_{1/3} \geq 2$ mかつ $T_{1/3} \geq 10$ s) を矢印で示している。これより、波浪が立ち上がる過程での6時間後の状況が時間遅れなく予測できていることが分かる。

5.2 複数の台風が同時に存在する場合

図-3に1996年9月に発生した台風9620および9621の経路を示す。

これらはほぼ同時期に発生し、台風9620は中心気圧が955 hPaでA港にかなり接近している。一方、台風9621も中心気圧が940 hPaで南東方向からうねりが伝播している状況と考えられ、両台風からA港に波浪が伝播している状況であった。このケースについて、本モデルにより係留限界の予測を行った結果を図-4に示す。

これより、予測時点あたりは実測値よりも若干大きいことが30時間後に係留限界となる状況を予測できていることが分かる。一方、図-5に示す1997年10月における台風9723および台風9724によって引き起こされた係留限界についても検討を行った。

両台風の経路は図-3と似た状況であることが分かる。図-6にこれら両台風に起因する係留限界を予測した結果を示す。

図より約48時間後までうねりが伝播する状況が予測され、ピーク値も実測値に近い。しかし、係留限界となるまでの波浪の立ち上がり部分では実測値よりも予測値がかなり過大な結果となっている。この点については、図-3のケースよりも両台風が転向点に達する前の段階、すなわち台風の勢力が強かつ遠方からうねりが伝播する状況において、両者の距離が接近していることが特徴的である。この影響でうねりが上昇する過程において、風場がかなり複雑になっている可能性が考えられる。

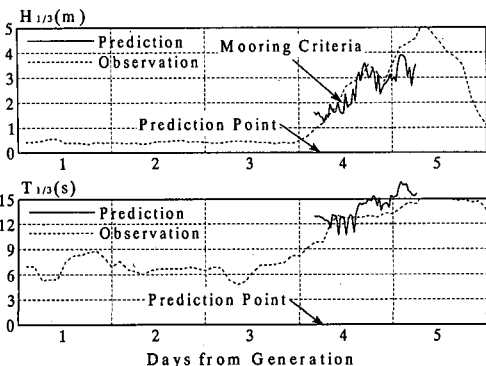


図-2 係留限界の予測結果 (1995年9月, A港)

5.3 太平洋に面した他の地点への適用結果

太平洋に面したA港についてある程度の精度で適用できることが確認された。さらに太平洋に面した他の地点についても適用可能かを検討した。図-7に検討対象

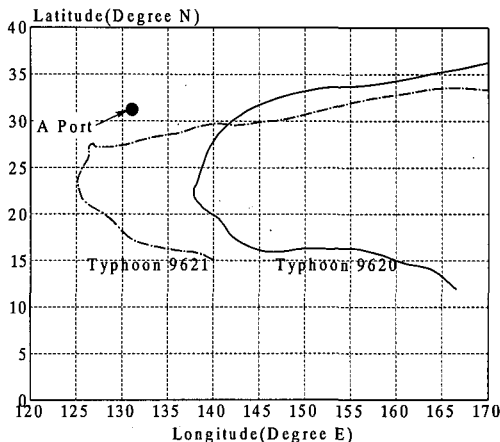


図-3 台風9620および台風9621の経路

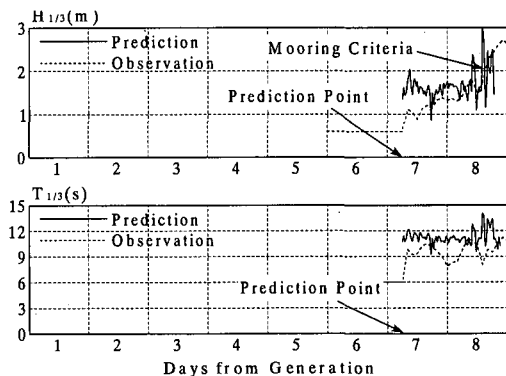


図-4 係留限界の予測結果 (1996年9月, A港)

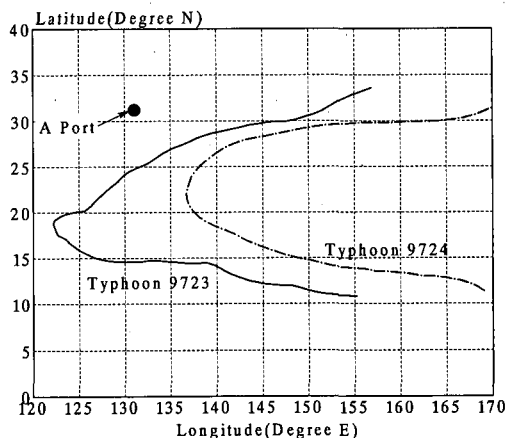


図-5 台風9723および台風9724の経路

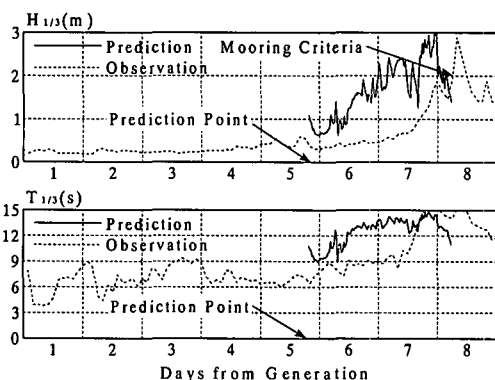


図-6 係留限界の予測結果 (1997年10月, A港)

とした5地点 (N港, M港, K港, S港, O港) と1997年7月に発生した台風9709の経路との位置関係を示す。

図-8に台風9709に起因する波浪が伝播する状況について, 各地点の有義波高を予測した結果を示す。

これより, 低緯度のN港では24時間先, 緯度がこれよりも北の他地点では36時間先の状況をほぼ予測できている。また図-2の1996年9月における2台風に起因する波浪をN港, M港およびO港で予測した結果を図-9に示す。

N港については時間的な余裕を持った予測が難しいが, M港およびO港については徐々にうねりの波高が上昇していく様子を36~48時間先までほぼ正確に予測できていることが分かる。これより, 本モデルは太平洋に面した他の地点においても台風時における係留限界の予測に適用および拡張が可能であることが検証された。

6. 係留限界の予測システムへの活用

本モデルが太平洋での地点で台風時の係留限界をある程度予測できることから, 外洋性港湾で係留限界の予

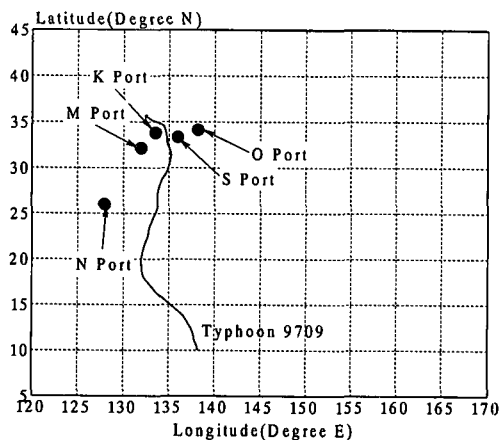


図-7 検討対象とした地点と台風9709の経路

測システムとして活用できれば非常に有効である。図-10に港湾での係留限界の予測システムのフローを示す。

システムは港外での波浪計測システムによって計測された波浪情報と台風発生後に配信される台風情報を現場

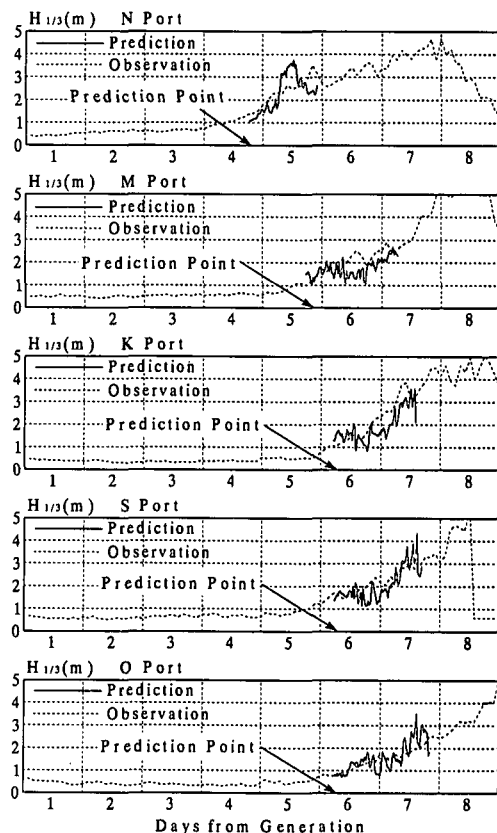


図-8 他の地点における予測結果 (1997年7月)

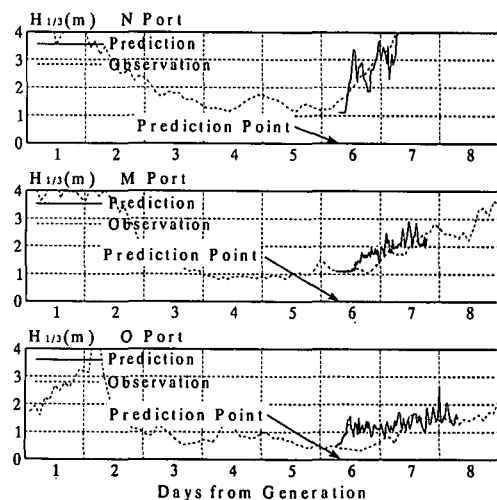


図-9 他の地点における予測結果 (1996年9月)

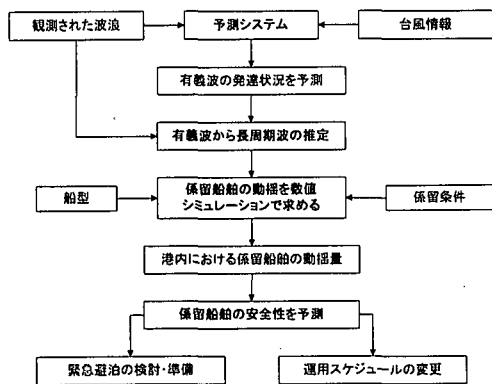


図10 係留限界の予測システムのフロー

の予測システムへデータ転送し、有義波の予測値を求める。さらに対象地点での有義波と長周期波の関係を蓄積された波浪データから求め(Sasa ら, 2001), 長周期波を含めた予測情報に変換した条件をもとに対象港湾における係留船舶の安全性について長周期動揺を再現できる数値シミュレーション(白石ら, 1999)によって最終的に評価する。これより、台風時の港内係留船について係留限界をより詳細に予測することが可能となる。

7. 結 論

本研究では前報で提案された台風時の係留限界に対する予測モデルで不十分あるいは考慮できていなかった点を中心に精度向上に関する検討を実施し、予測モデルの適用範囲を拡張した。結論は以下のとおりである。

(1) カルマンフィルターでの台風予測で時間ステップを2時間から6時間に拡張した。発生時からの時間が経っていない台風の場合、若干精度は低下するが概ね予測精度は良好であった。これより、最低でも6時間先の予測が可能となり、緊急避泊に関する時間的余裕が増大できる。

(2) 予測モデルにおいて、波伝播の過程で多方向性を考慮し、暴風円からでなく強風円からも風波が伝播する影響を追加した。これより、台風が接近しながら勢力を強める場合でも時間遅れを生じずに係留限界を予測で

きるようになった。

(3) 台風が同時期に複数存在する状況についても予測できるようにモデルの拡張を行った。このモデルで台風が2つ存在するケースについても、係留限界を30時間前に予測できる結果が得られた。ただし、複数の台風が存在する場合における風場の複雑さをモデル上に何らかの形で今後考慮していく必要がある。

(4) モデルの妥当性を太平洋に面した数地点についても検討した。台風が1つまたは複数の場合においても、ある程度の精度でうねりや風波の発達する状況が予測可能であることが検証された。

(5) モデルを港外で計測される波浪情報、台風情報と組み合わせるだけで台風に起因する有義波の発達予測が可能となる。さらに長周期波との相関関係を求めた上で係留船舶の動揺を数値的に予測できるシステムの構築が可能となった。

(6) 今後は台風だけでなく、低気圧に起因する係留限界についても予測モデルを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

- 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一, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 27-33.
- 笹 健児・久保雅義・高橋倫也・白石 悟・永井紀彦 (2001): 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, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1351-1355.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榎原繁樹 (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.
- 白石 悟・久保雅義・榎原繁樹・笹 健児 (1999): 長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 861-865.
- Bretschneider, C. L. (1952): The Generation and Decay of Wind Waves in Deep Sea Water, Transaction of A. G. U., Vol. 37, pp. 381-388.
- Sasa, K., M. Kubo, S. Shiraishi and T. Nagai (2001): Basic Research on Frequency Properties of Long Period Waves at Harbour Facing to the Pacific Ocean, Proceedings of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 3, pp. 593-600.