

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

STUDY ON BERTH USE PREDICTION BASED ON TIME SERIES SIMULATION

村松信¹・興野俊也²・安田勝則²・佐々木政秀¹・阿部光信³

Makoto MURAMATSU, Toshiya KYONO, Katsunori YASUDA,
Masahide SASAKI, and Mitsunobu ABE

¹正会員 修(工) 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野三丁目3-3)

²正会員 東京電力株式会社技術開発研究所建設技術グループ(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

³正会員 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (同上)

In this study, in order to evaluate harbor tranquility and predict effective use of berth for site plan of port facilities, "time series simulation of berth utilization factor" is developed and the method of predicting berth operation is studied. The time series simulation of berth utilization factor developed here reproduces a series of work of arrival in port, arrival at berth, cargo handling, leave at berth, and leave in port for a ship, based on the condition of such as time series data on atmospheric and oceanographic phenomena, and possible work condition. It then outputs the ever-changing situation of operating ships, waiting time, rate of berth operation, amount of cargo, and so on. The influence of long-period, multi-directional waves should be considered to estimate waves within harbor and limits of cargo amount in this simulation. For the method of predicting berth use, its validity was shown through case study for a model site.

Key Words : *prediction of berth utilization, time series simulation, cargo handling, long-period waves, multi-directional waves, moored ship motions*

1. まえがき

港湾施設に要求される性能は、港内での貨客の迅速かつ安全な海上輸送に供する静穏水域を確保することである。防波堤やバース施設の配置計画にあたっては、これらの性能を照査するために港内静穏度の検討を実施する。これまでの港内静穏度の検討では、バース位置での波浪の出現率のみに着目し、荷役限界波高以下の波浪の出現率で評価することが一般的であった。しかし、港内静穏度には波浪の他に風も影響する。波浪や風の荷役限界を設定する場合には、それらの自然条件による船舶の動揺と港内での諸作業の関係も考慮する必要がある。また、船舶の利用頻度やバースの運営方法、荷役設備等の能力、社会的制約条件などを考慮して評価することも重要であると考えられる。このように、港内静穏度には複雑かつ多様な要因が関係することから、それらを総合的に検討する評価方法が必要であると考えられる。

一方、通常の港湾の運用にあたっては、入出港船舶の安全性を確保するため、波浪、風等の自然条件に対する

作業限界を設定し、主に現地で観測している気象・海象データに基づいて作業の可否判断をしている。外航大型石炭船のように荷役に一週間程度を要する船舶の場合には、入港後の海象条件の悪化により荷役作業中断等が発生することがあり、安全で効率的なバース運用のためには入港判断時に荷役予定期間中の船舶の係留、荷役等の作業可否を予測する必要があると考えられる。

以上のような観点から、本研究では、港湾施設の配置計画における港内静穏度の評価と、バースの効率的な運用予測に活用するために、港湾内での船舶の一連の動きを模擬する時系列シミュレーションモデル「バース稼働状況シミュレーション」を開発し、さらに、そのモデルを活用したバース運用予測手法について検討した。

港内でのバース運用予測のためのシステムとしては、上田ら¹⁾による港内波浪と係留船舶動揺のリアルタイム予測システムがあるが、本手法は港内波浪や係留船舶動揺量だけでなく、バースの利用時間や荷役設備の能力などのバースの運営条件も考慮して港湾内での船舶の時々刻々の作業状況を予測するものである。これにより、係

が基本となっている。この時系列データの所定の日時に到着船舶を模擬的に発生させることによって、シミュレーションがスタートする。擬似発生させた船舶は、バースの利用可能時間帯、荷役設備能力、各種作業限界条件等のもとで、入港、着棧、荷役、荷役中断、離棧、出港等の港湾内での一連の作業をシミュレートする。すなわち、入港時のバースの空き待ち、夜間の荷役中断、波浪条件の悪化による荷役待ち等を再現し、バースでの各船舶の利用状況、各種作業の待ち時間、荷役量等の情報が得られる。

運用判断支援型モデルでは、1週間程度の気象・海象予測データのもとで、計画到着日時に船舶を発生させ、港内での船舶の作業予定と作業可否判断を出力する。また、計画支援型モデルでは、年間の到着予定隻数を入力して擬似乱数によって船舶到着日時を設定し、荷役可能時間やバース稼働率等のバース利用状況、物資の荷役・在庫量等を出力する。

3. 長周期波を考慮した荷役限界条件の検討

通常の港湾では、入出港船舶の航行、係留、荷役の安全性を確保するために、波浪、風、雨、霧などに対する作業限界値を設定している。このうち、荷役限界値については、これまではバース位置での限界波高として設定されてきたが、近年、港湾内での長周期波の影響による荷役作業中断や係留索破断などの障害の発生が見られるようになってきた。このため、港内での船舶の作業可否判断には、長周期波成分を含む港内波浪の影響と係留船舶の動揺特性を考慮して評価する必要がある。

バース稼働状況シミュレーションにおいては、長周期波を考慮した荷役限界条件を図-2のフローに従って設定することとした。

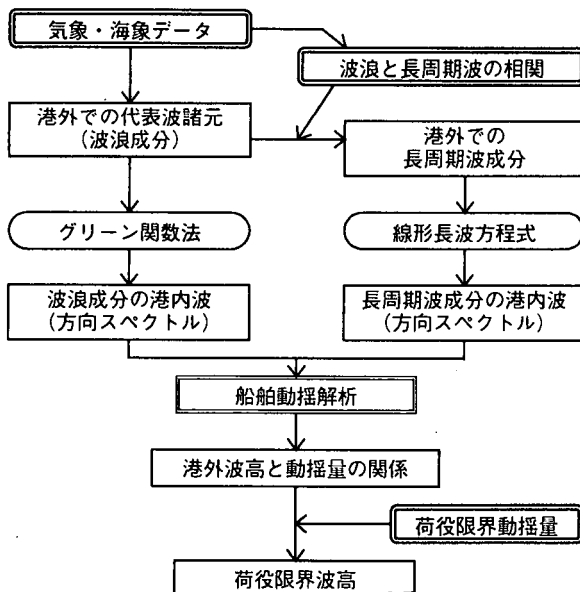


図-2 荷役限界波高の設定フロー

(1) 長周期波の多方向性を考慮した港内波算定手法

港湾内での長周期波の特性に関して、著者らは茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力(株)常陸那珂火力発電所周辺海域で現地観測を実施し、港外での長周期波は波浪成分の有義波諸元と高い相関を示すこと、方向分散性が非常に高いこと等の知見を得た²⁾。さらに、その成果に基づいて、長周期波の方向分散性を考慮した港内波算定手法を提案した³⁾。

本研究では、これらの研究成果を踏まえて、以下に述べる長周期波の多方向性を考慮した港内波算定手法を用いることとした。すなわち、波浪観測データ等から設定する港外での代表波諸元に対する方向スペクトルは、波浪成分についてはブレットシュナイダー・光易型周波数スペクトルと光易型方向関数の組合せ⁴⁾を、長周期波成分については平石らの標準周波数スペクトル⁵⁾に基づく堀沢らの表示⁶⁾と筆者らが提案した方向分布関数³⁾の組合せを用いて設定することとした。また、港内波浪解析手法としては、波浪成分に対してはグリーン関数法⁷⁾を、長周期波成分に対しては線形長波方程式を用い、波の不規則性については線形解の重ね合わせによって評価することとした。なお、求められたバース位置での港内波については、波浪成分と長周期波成分を方向スペクトルレベルで合成することとした。

(2) 多方向不規則波を考慮した船舶動揺解析手法

港内での船舶の作業可否判断には、係留船舶の動揺特性を考慮する必要がある。一般には係留船舶の動揺解析によって評価する。

本研究では、前項(1)の長周期波の多方向性を考慮した港内波算定手法で求めた港内波を入力条件とした船舶動揺解析手法を用いることとした。船舶動揺解析手法は、流体力および波浪強制力の周波数解析と、船体動揺の運動方程式の時系列解析とで構成され、前者については任意の浮体形状に適用できる三次元特異点分布法を、後者については浮体の運動方程式に遅延関数を導入して時系列的に解く方法を用いた^{8), 9)}。また、波浪成分および長周期波成分の多方向性に関しては、運動方程式の時系列解析での外力項において、時系列波力 $P(t)$ を次式のように成分波の重ね合わせとして評価することとした。

$$P(t) = \sum_{j_w=1}^{M_w} \sum_{i=1}^N (P_w)_{ij}(t) + \sum_{j_g=1}^{M_g} \sum_{i=1}^N (P_g)_{ij}(t) \quad (1)$$

ここで、 i, j は波向、周波数の成分波番号、 $P_{ij}(t)$ は成分波の波力、添字 w, g はそれぞれ波浪成分と長周期波成分を示す。

(3) 多方向不規則波を考慮した船舶動揺量の試算

船舶動揺量に及ぼす長周期波の多方向性の影響を把握するため、図-3に示すモデル地点の石炭バースを対象に、前項(2)で提案した多方向不規則波を考慮した船舶動

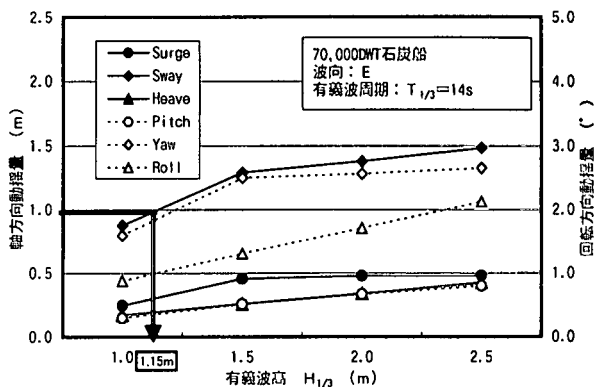
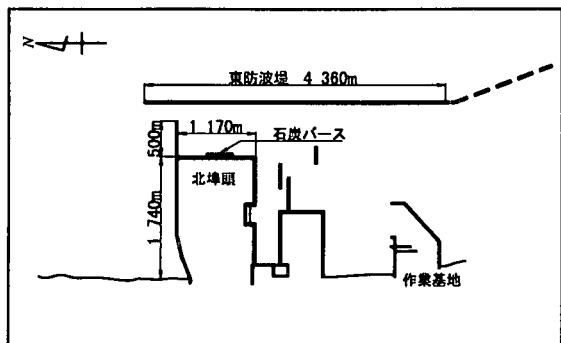


図-5 港外波高と船舶動揺量の関係

揺解析手法を用いて船舶動揺量の試算を行った。対象船舶は70,000DWTと150,000DWTの石炭船で、波浪条件は $H_{1/3}=3.9m$, $T_{1/3}=10.0s$, 波向E, $S_{max}=25$ の多方向波とした。長周期波の有義波高については、モデル地点での波浪観測データに基づいて、 $H_{G1/3}=0.005H_{1/3}T_{1/3}=0.2m$ とし、長周期波の多方向性については、単一方向波は方向集中度パラメータ $S=\infty$ 、多方向波は $S=2$ とした。

図-4に、船舶動揺解析によって求めた単一方向波と多方向波の船体動揺6成分の動揺量を示す。これによれば、Surge, Sway, Pitch, Yawにおいて単一方向波に比べて多方向波の動揺量が小さくなる傾向が見られ、特に動揺量の大きいSurgeにおいてその傾向が著しい。

このように、船舶動揺解析においては長周期波の多方向性の影響が見られ、本手法の有効性が確認された。

(4) 長周期波を考慮した荷役限界条件の設定

以上の検討成果を踏まえて、前述図-3のモデル港湾を対象に荷役限界条件を設定した。

図-5は、船舶動揺解析によって求めた港外波高と船体動揺6成分の動揺量の代表例を示したものである。これに荷役限界動揺量を与えれば、荷役限界波高が求められる。荷役限界動揺量については既往の調査・研究事例は少なく、鉱石運搬船に対してはUeda,S.et al.の提案¹⁰⁾があるのみである。船舶動揺解析によって得られた動揺量にUeda,S.et al.が提案した荷役限界動揺量を当てはめて設定した荷役限界波高を表-2に示す。なお、同表の

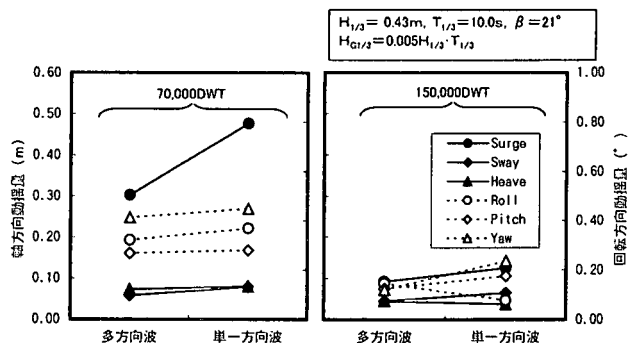


図-4 多方向波と単一方向波の船舶動揺量の比較

表-2 船舶動揺量に基づく荷役限界波高

[単位:m]

船級	波向	有義波周期					
		6.0s	8.0s	10.0s	12.0s	14.0s	16.0s
150,000 DWT 石炭船	ENE	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)
	E	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	2.24	(2.50)
	ESE	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	1.87	1.76
70,000 DWT 石炭船	ENE	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	2.26	2.14
	E	(2.50)	(2.50)	1.84	1.45	1.15	1.26
	ESE	(2.50)	(2.50)	1.32	0.85	0.42	0.94

注：() は港外波高が2.5mで荷役限界動揺量を満足しているケース

荷役限界波高は港外の波浪観測位置での波高値で整理しており、()内は港外での波高が2.5mであっても荷役限界動揺量を満足していることを示している。

4. バース運用予測手法による試検討

本研究で提案したバース運用予測手法の適用性を検討するため、前述図-3に示すモデル地点を対象に、バース稼働状況シミュレーションを実施した。ここで、石炭バースの入港船舶隻数は70,000DWT石炭船32隻、150,000DWT石炭船16隻で、荷役限界条件は前項表-2に示す長周期波の多方向性を考慮した船舶動揺解析結果に基づく設定値を適用した。また、波浪の時系列データはモデル地点の2000年のNOWPHASデータを、風、雨の時系列データはAMEDASデータを用いた。なお、運用判断支援モデルでは気象・海象時系列データはCOMEINSなどの予測データを用いることが基本であるが、本試算では適用性評価が目的であることから実測値をそのまま用いた。

図-6は、運用判断支援モデルにおけるバース稼働状況に関する出力の一例である。バース稼働状況シミュレーションでは、1時間ごとの波浪データに基づいて、係留船舶の予想動揺量の算定と荷役可否判断を行う。予想動揺量は前述図-5の結果を数値データベース化して算定し、荷役可否は表-2の波浪による荷役限界条件に、

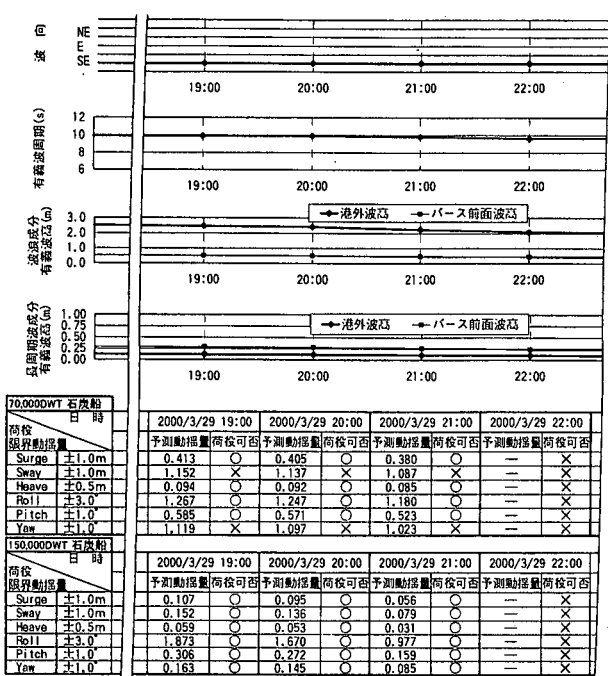


図-6 バース稼働状況の出力例 (その1)

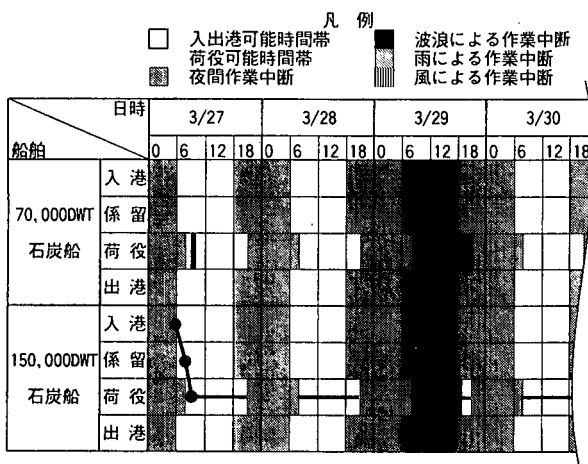


図-7 バース稼働状況の出力例 (その2)

さらに風、雨、霧の気象条件による荷役限界条件を加味して判定した。また、夜間等の荷役可能時間帯以外は[-]と表示した。

図-7は、上記の情報を簡易表示したもので、対象船舶ごとに各日時の入港、係留、荷役、出港の可否判断結果を示している。これに船舶到着予定時刻を入力すると、図中の太線のように船舶作業予定が表示される。

図-8は、物資の荷役量に関する出力例である。別途入力する初期在庫量と計画消費量をもとに、荷役量、在庫量の予測値が表示される。

運用判断支援型モデルにおいては、気象・海象予測データのもとで図-6、7のバース稼働状況、並びに図-8の物資荷役・在庫量を求め、到着船舶の作業計画立案に情報を提供する。

図-9は、計画支援型モデルにおける年間バース稼働状況の出力の一例である。上3段には年間の港外および

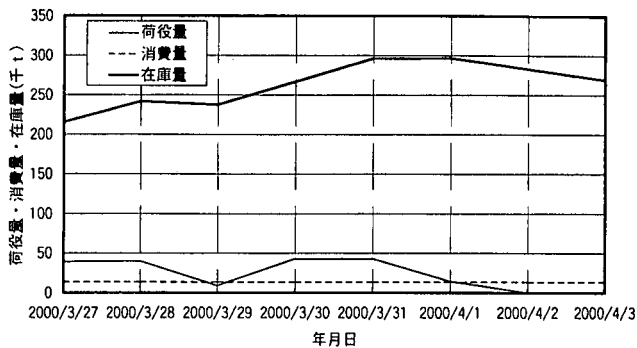


図-8 荷役量・在庫量の経時変化の出力例

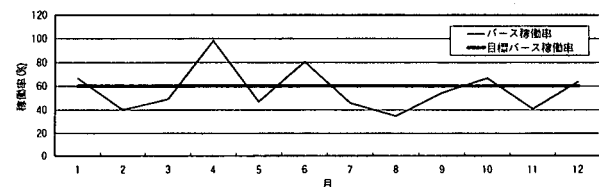
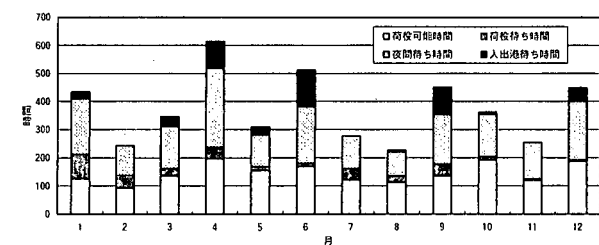
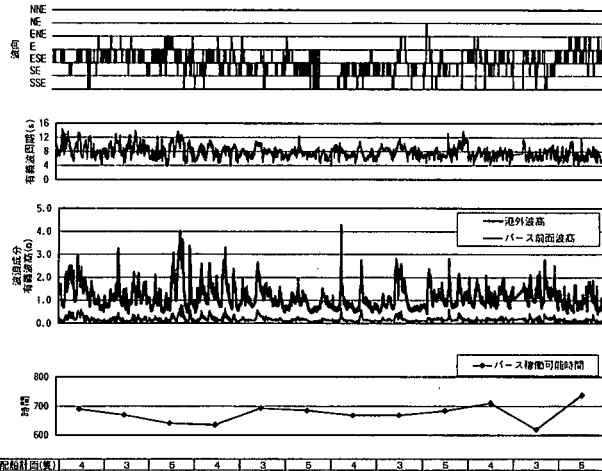


図-9 年間バース稼働状況の出力例

バース前面での波浪状況を、4段目には150,000DWT石炭船を対象として算定したバース稼働可能時間を、5段目にはシミュレーションで設定した配船隻数に対する荷役可能時間、各種待ち時間等の算定結果を、6段目にはバース稼働率の経時変化を示す。ここで、バース稼働率は年間のバース稼働可能時間に対するシミュレーションで模擬・再現した船舶の在港時間の比で表される。専用バースにおいて円滑な運用をするためには、バース稼働率を60%程度にするのがよいとされている。

この結果によれば、4月のバース稼働率が100%近くに

なっている。これは、気象・海象条件から求まるバース稼働可能時間、すなわちバースが利用できる時間が少ないために荷役待ち状態が多くなっていること、設定した船舶の到着時間が比較近いために入港待ちや多くなっていることに起因するものと考えられる。したがって、4月は配船隻数を減らす等の適正な計画見直しをする必要があると判断される。

以上のように、本手法を用いることにより、予測期間中のバースでの波浪状況、船舶動揺量を予測することができ、それに基づいて、船舶の作業可否判断、各種作業計画、荷役・在庫量管理が容易にできるものと考えられる。また、年間の波浪データを用いることによって、港内での船舶の作業時間や各種待ち時間、バース稼働率を求めることができ、適切な配船計画の作成やバースの新設、増設等の港湾配置計画の検討に活用することができると考えられる。

5. まとめ

本研究では、港湾施設の配置計画とバースの効率的な運用予測に供する目的で、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検討を行った。本手法の特徴は以下のとおりである。

- ① バース稼働状況シミュレーションは、計画対象地点の気象・海象データを用いることによって、港湾内での船舶の稼働状況を模擬・再現できる。
- ② 港内波の推定と荷役・係留限界条件の設定にあたっては、長周期波の影響を考慮することができる。また、船舶動揺量に及ぼす長周期波の多方向性の影響を検討し、これを考慮できるようにした。
- ③ 運用判断支援型モデルでは、気象・海象予測データを入力することによって、予測期間中の各船舶の推定動揺量、作業可否判断、各種作業予定、物資荷役・在庫量を求めることができる。
- ④ 計画支援型モデルでは、年間の荷役可能時間等のバース稼働状況、バース稼働率、物資荷役・在庫計画量を求めることができる。

提案したバース運用予測手法は、バースでの作業可否判断等を支援するモデルとして活用されるだけでなく、効率的な配船計画等の支援や、バース等港湾施設の合理的な配置計画等にも有効なモデルである。

今後は、本研究成果の実務への運用を図るとともに、バース運用サイドでのテストなどによる実用性の評価を行い、使いやすいシステムへのバージョンアップを図り

たいと考えている。

謝辞：本研究で提案したバース運用予測手法の船舶動揺解析手法は、海洋構造物・船舶動揺解析システム「Maris」を改良したもので、改良にあたっては(株)富士総合研究所産業安全解析研究部の真鍋尚主事研究員の協力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 上田茂・永井紀彦・平石哲也・白石悟・木内里美・小林昭男：港内の波浪及び係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発(第1報)ーシステムの開発及び現地への設置ー、港湾技術研究所報告、第33巻、第1号、pp.67-96、1994.
- 2) 阿部光信・興野俊也・青野利夫：現地連続観測に基づく港湾内の長周期波の伝播特性に関する検討、海岸工学論文集、第46巻、pp.311-315、1999.
- 3) 阿部光信・興野俊也・青野利夫：現地観測データに基づく長周期波の方向関数特性と静穏度解析への適用、海岸工学論文集、第47巻、pp.266-270、2000.
- 4) 合田良実：港湾構造物の耐波設計ー波浪工学への序説ー [増補改訂]、pp.17-27、1990.
- 5) 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて、海岸工学論文集、第44巻、pp.246-250、1997.
- 6) 堀沢真人・佐藤典之・大中晋・青野利夫・Eric C. Cruz・早川淳：港内外長周期波の現地観測とその予測手法、海岸工学論文集、第45巻、pp.301-305、1998.
- 7) 近藤浩右・清水琢三・山田耕一：グリーン関数を用いた港内波方向スペクトルの計算法、第34回海岸工学講演会論文集、pp.106-110、1987.
- 8) 笹健児・白石悟・榊原繁樹：係留船舶の長周期動揺の各種数値計算法による再現性に関する比較検討、港湾技研資料、No.931、1999.
- 9) 藤畑定生・秦禎勝・中山晋一・森屋陽一・関本恒浩・池野正明・笹健児：船体動揺計算における港内腹心道の考慮方法と粘性減衰係数の評価、海岸工学論文集、第46巻、pp.856-860、1999.
- 10) Ueda, S. and S. Shiraishi: The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.4, pp.3-61, 1988.