

# 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

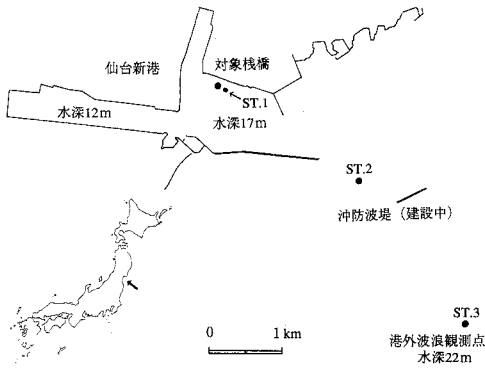
永井紀彦\* ・橋本典明\*\* ・浅井 正\*\*\* ・戸引 勲\*\*\*\*  
 伊藤一教\*\*\*\*\* ・東江隆夫\*\*\*\*\* ・小林昭男\*\*\*\*\* ・柴田孝雄\*\*\*\*\*

## 1. 緒 言

港内係留船舶の長周期動揺の解明は、港湾の稼働率や安全性の向上のために重要である。一方、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)の沖合波形記録は、長周期波の解析にも有用であることが、北海道南西沖地震津波を契機に認識されるに至っており、(永井, 1993a; 永井ら, 1993b), 沖合波浪の長周期成分と港湾の静穏度との関連の解明が望まれている。本論では、仙台新港における係留船舶動揺事例をもとに、沖合波形記録を解析し、長周期動揺に係わる波浪のパラメータを提案し(永井ら, 1994), その物理的意味を究明する。

## 2. 対象港湾およびデータ

各計測点では、超音波式波高計、超音波式流向流速計



図一 対象港湾概要図

型波向計により、水位、水平2成分流速、水圧を計測した。また、風速は対象桟橋地点の上空20mで計測した。

係留船舶の動揺に関するデータとして、桟橋における係留の可否を示したものがあり、着桟船舶の係留状態(係留中、沖待ちなど)が記録されている。

## 3. 従来の荷役可否判断

一般に荷役可否判断は、着桟時の港内波浪と気象予測、船舶の大小、係留索の良否および荷役作業時間など複数の要因を考慮して経験的に判断される。

表一 着桟時の波高・周期

年 月 日 時	港外波浪 ST. 3			船舶 万 DWT	桟橋地点 ST. 1	
	$H_{1/3}$ m	$T_{1/3}$ s	波高		$H_{1/3}$ m	$T_{1/3}$ s
90 6 30 12	0.76	5.98	SE	—	—	—
90 7 7 10	0.7	7.51	SE	—	0.26	4.39
90 7 8 14	0.61	6.19	SEE	—	0.15	4.28
90 7 15 10	0.74	7.57	SE	8.1	0.24	5.5
90 7 17 12	0.76	6.90	SSE	—	0.67	4.46
90 7 18 18	0.79	7.27	SSE	—	0.2	4.04
90 8 8 16	1.06	7.46	SEE	5.4	0.16	6.93
90 8 14 12	0.48	8.36	SE	—	0.09	5.08
90 8 15 18	1.2	5.75	SSE	18.6	0.13	5.55
90 8 24 10	0.94	8.27	SSE	6.5	0.11	6.57
90 8 25 14	0.45	6.74	SSE	—	0.09	4.08
90 8 26 14	0.41	7.20	SSE	—	0.09	4.71
90 9 2 10	0.65	6.59	SE	5.7	0.18	4.33
91 6 7 12	0.73	8.97	SE	6.1	—	—
91 6 17 16	0.89	7.66	SE	—	0.26	5.65
91 6 19 10	0.93	7.11	SSE	—	0.29	5.57
91 6 20 16	0.82	7.55	SE	—	0.22	5.34
91 6 25 10	0.97	7.43	SEE	—	0.23	4.78
91 7 14 12	0.51	6.34	SEE	—	0.41	5.67
91 7 16 10	0.5	7.22	SE	—	0.44	4.23
91 8 3 10	0.5	7.61	SE	7.3	0.19	3.85
91 8 4 14	0.64	4.83	SE	6.2	0.23	3.45
91 8 10 12	0.59	7.77	SEE	—	0.15	3.46
91 8 24 10	1.19	8.07	SE	—	0.34	4.61
91 8 25 18	0.98	9.29	SE	6.1	0.2	5.96
91 8 27 12	0.54	8.42	SE	—	0.15	3.84
91 8 29 14	0.68	6.01	SEE	6.1	0.18	4.24
91 9 4 10	0.55	8.92	SE	21.2	0.14	4.61
91 9 6 12	0.47	8.48	SEE	6.2	0.16	3.43
91 9 18 10	0.78	8.06	SEE	—	0.22	4.75
91 10 3 12	0.6	7.63	S	9.6	—	—
91 10 6 12	0.47	7.48	SE	6.1	—	—
92 10 22 10	2.54	12.3	SEE	22	0.26	5.78
92 11 24 12	1.56	12.67	SE	22	0.22	5.05

- \* 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海象調査研究室長
- \*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室長
- \*\*\* 正会員 工修 前運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海象調査研究室 現同海域環境研究室
- \*\*\*\* 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所調査課長
- \*\*\*\*\* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所
- \*\*\*\*\* 正会員 M.S 大成建設(株)技術研究所
- \*\*\*\*\* 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所
- \*\*\*\*\* 東北石油(株)仙台製油所

1990年と1991年の6月～10月について、着岸時の栈橋地点ST.1と、港外波浪観測点ST.3の波浪観測データを表-1に示す。また、表中の下2段は今回対象とする係留不可能時のものであり、一はデータ欠損である。

表より、着岸時には、ST.1で波高0.5m以下、周期6秒以下になっている。この値は、対象栈橋の係留可否判断の基準値とほぼ一致している。

4. 係留不可能事象の解析

4.1 係留不可能時の状況

港内の波浪が凪の状態であつ、風もない時に係留船舶(20万DWT級)の動揺量が大きく着岸できなかったり、一旦は係留したもの、船舶の動揺量が大きいため荷役作業を中断したりする事象(係留不可能事象)が、対象栈橋で1992年10月22日(case 1)と11月24～25日(case 2)に発生した。その状況を以下にまとめる。

両ケースとも着岸完了後、船体がsurge方向に動揺した。case 1では振幅約1.5mで約4.5時間動揺し続けたため荷役作業を保留、動揺量が1m弱にまで下がった時点で、荷役作業を開始した。case 2では、約24時間動揺したため、荷役作業を保留し、翌25日の13時より荷役作業を開始した。

これら両ケースとも係留状況は、索張力がウインチの制動力に達したところで自動的に索張力が弱まるように係留索を送りだし、その後、必要に応じて巻戻している。

4.2 係留不可能事象時の港外波浪

図-2は、case 1の着岸時のST.3における水位波形を示している。この時の有義波高は2.5mと大きいが、栈橋地点の波高・周期は荷役可否判断の基準を下回っていた。ST.3の波高・周期が他のケースに比べて大きな値にもかかわらず、栈橋地点で小さい理由は、1992年に沖防波堤が延長されたためその遮蔽効果が向上したことによる。

case 1の波形の特徴は、波群の存在であり、波群の形状は急峻なものが多く、高波の連りの強弱が明瞭に現れている。このような波群特性は、case 1およびcase 2の着岸時のST.3の波浪に共通していた。

対象期間中の方向スペクトル形状は方向集中度の高い単峰型であり、波向はSE、SEEに集中していた。

4.3 係留不可能事象時の波群特性

(1) 係留不可能事象時の波群特性の変化

従来より、波群を有する波浪と係留船舶の動揺は密接

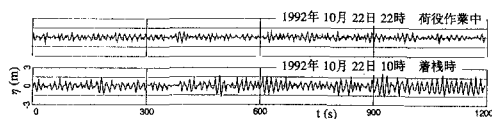


図-2 係留不可能事象時の水位波形 (ST.3: case 1)

に関わっていることが知られている。したがって、ここでは波群に絞って検討する。

図-3は、Groupiness Factor (GF) (Funke・Mansard, 1980)および平均連長  $\bar{T}_1$  の時間変化で、図中の横軸は着岸時からの経過時間である。ただし、 $\bar{T}_1$ 算出のための基準値は有義波高を用いている。case 3は表-1に示す1991年9月4日のケースで、case 1とcase 2の同型船が動揺を起こさず荷役作業を実施している。GFと $\bar{T}_1$ ともに、係留の可否による明確な差異はない。このことは、GFと平均連長が係留不可能事象を説明する指標としては不適切であることを意味している。

ついで、図-4に示す波群相関パラメタ( $\kappa$ ) (Battjes・Vledder, 1984)の経時変化をみると、case 1の場合、 $\kappa$ は荷役状況とよく対応している。すなわち、船体の動揺量が大きく荷役作業ができなかった時は $\kappa$ の値が大きく、動揺量が小さくなり荷役作業が可能となった時は $\kappa$ は小さくなる。そして、その値はcase 3に比較的近い。このことから、 $\kappa$ が係留不可能事象を説明する指標になる可能性がある。 $\kappa$ は包絡波形の自己相関を表現したもので、波群の時間特性を表すことを考慮すると、波群の時間特性が係留不可能事象と密接に関わっていると考えられる。しかし、case 2の $\kappa$ についてみると、case 3と差異が小さいにも関わらず係留不可能となっている。case 2とcase 3で $\kappa$ に明確な差異がないのは、 $\kappa$ の導出で狭帯スペクトルを仮定するのに対し、実際には必ずしも狭帯スペクトルでないことによると考えられる。

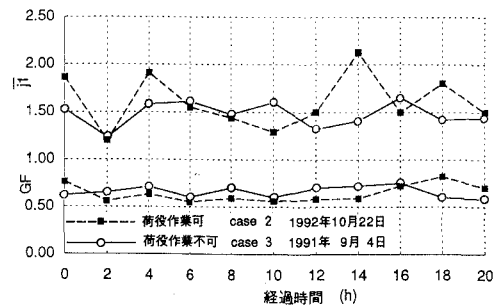


図-3 GF,  $\bar{T}_1$ の経時変化

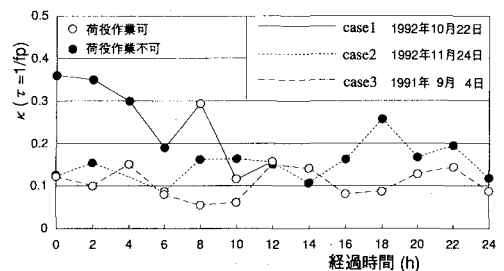


図-4 波群相関パラメタ  $\kappa$  の経時変化

(2) 係留不可事象を説明する波群指標

係留不可能事象を説明するために新たな指標を検討した。高波の繰り返し長さ(トータルラン)に対応する時間を波群周期( $T_g$ )とし、その平均値を平均波群周期( $\bar{T}_g$ )と定義した。ただし、 $\bar{T}_g$ の算出には有義波高を基準とした。

図-5に $\bar{T}_g$ の経時変化を平均風速とあわせて示す。case 1の $\bar{T}_g$ は船体の動揺量が大きく荷役作業を見送っていた●の時には100~150秒の大きな値を示し、動揺量が小さくなり係留可能となった○の時には75秒程度まで小さくなっている。これに対してcase 2の $\bar{T}_g$ は、着桟時に120秒程度の大きな値を示し、次第に小さくなるが、その後 $\bar{T}_g$ は120秒付近まで上昇する。case 2の $\bar{T}_g$ が100秒程度と大きい時は、係留船舶の動揺が大きく荷役作業ができなかった。このことはcase 1と同様である。しかしcase 2では、 $\bar{T}_g$ が60秒程度の小さい時でも動揺が大きく係留できていない。これはこの時、風の発達が顕著で、係留船舶は風によって動揺し、同時に風波の発達が波群性を弱めたため $\bar{T}_g$ が小さくなったと考えられる。

一方、荷役作業ができたcase 3の $\bar{T}_g$ は、着桟時から継続的に60秒程度の値を示している。このように、係留不可能事象を説明する指標として $\bar{T}_g$ を用いると、係留不可事象を比較的明確に説明できる。

4.4 波群周期と wave set-down

来襲する波浪が波群を有している場合、波群に拘束された wave set-down が発生する。時系列波形と空間波形

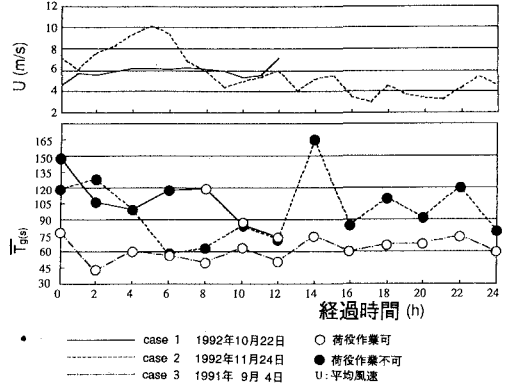


図-5 平均波群周期 ( $\bar{T}_g$ ) の経時変化

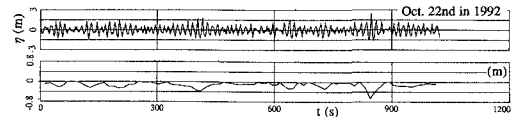


図-6 港外波浪と wave set-down の波形 (ST. 3 : case 1)

が同一に扱え、それが一方的に伝播していると仮定し、Longuet-Higgins (1962) にならって case 1 の港外波浪に対応する wave set-down を算出した。その結果を図-6に示す。ただし、wave set-down の計算は、ゼロクロスで定義される個々波の波高による radiation stress を用いて行った。図-6より、波群形状が急峻な場合には、wave set-down の変動の絶対値も大きいことがわかる。

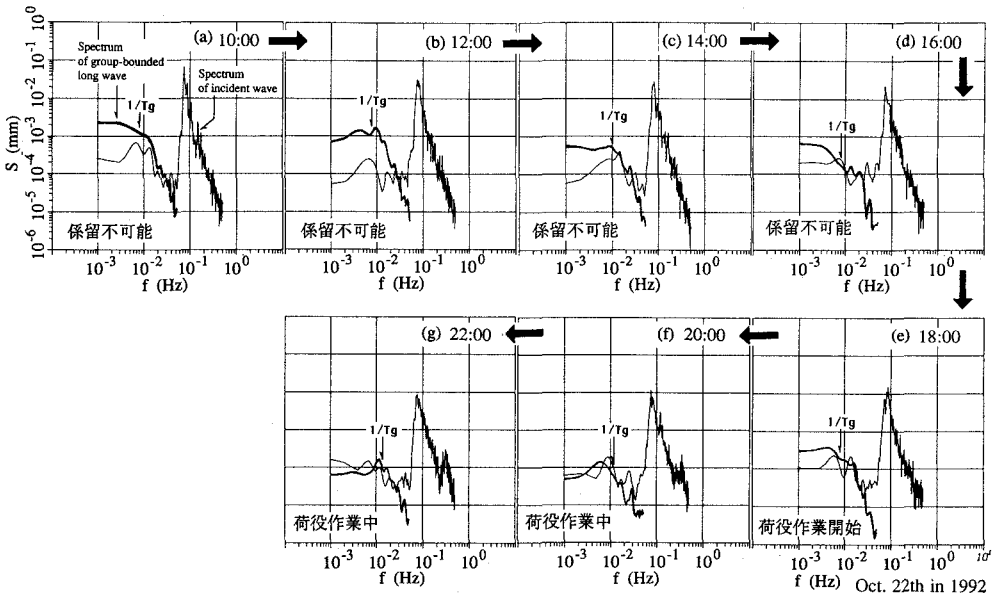


図-7 港外波浪 (ST. 3) と長周期波のスペクトルの変化

図-7は、港外波浪のスペクトルと上述の wave set-down のスペクトルである。図より、港外波浪の長周期波のピーク周波数および  $1/\bar{T}_0$  はほぼ一致する。また、図-7 (e) ~ (g) からわかるように、風波が発達し波群性が弱くなり、wave set-down のパワーが小さくなるにつれて長周期波のパワーが小さくなる。これより、港外波浪における長周期波は、波群により発生した wave set-down であり、 $\bar{T}_0$  はその平均周期であることがわかる。

5. 波群特性と船体動揺の関係

5.1 長周期波の伝播

ここでは、 $\bar{T}_0$  と船体動揺の関係について検討する。船体の長周期動揺は、波浪の長周期成分/波群性に起因するといわれている。(Pinkstarら, 1974). 4.4 で示したように、波群を有する波列は長周期波を拘束しており、その長周期波は、防波堤に達するまでは拘束波として伝播するが、防波堤背後では自由波として伝播する(喜岡ら, 1990, 関本ら, 1990). このような長周期波が港湾内に伝播した結果、係留不可能事象が起きたと考えられる。

図-8は、同時刻における ST.1, ST.2 および ST.3 のスペクトルである。0.1 Hz 付近にピークをもつ短周期成分は、ST.3, ST.2, ST.1 と伝播するにしたがい防波堤の遮断効果のためエネルギーが減衰している。一方、低周波数成分に着目すると、エネルギー減衰は少なく明瞭なピークが見られる。そして、ST.3 の長周期波成分のピーク周波数は  $\bar{T}_0$  と対応しており、ST.2, ST.1 でもその成分がピークを形成している。

図-9は、ST.2 と ST.3 の有義波高、0.05 Hz 以下の長周期成分から求めた水位の 2 乗平均値  $\bar{\eta}_{rms}$ , GF および  $\bar{T}_0$  を比較したものである。図-9(a) の有義波高は、防波堤背後で半減しているが、(b) の  $\bar{\eta}_{rms}$  はほとんど減衰していない。一方、(c), (d) の GF および  $\bar{T}_0$  は、防波堤背後では減少している。したがって、図-8 の結果と合わせると、防波堤の遮蔽効果によって波群が崩壊し、ST.2 の  $\bar{T}_0$  は短くなるが、長周期成分は減衰することなく短周期成分と無関係に自由波として防波堤背後に伝播する

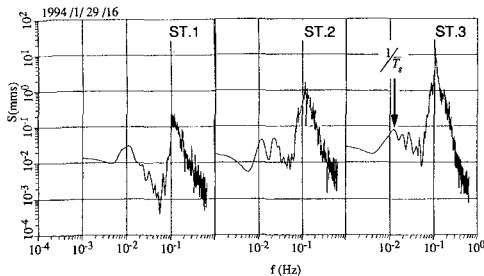
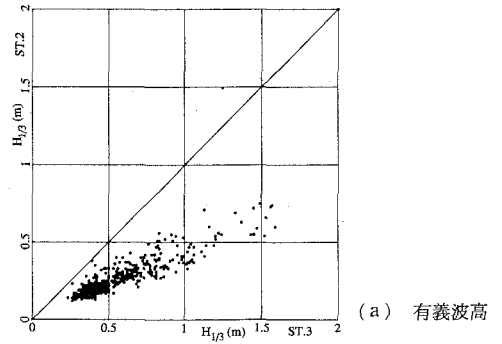
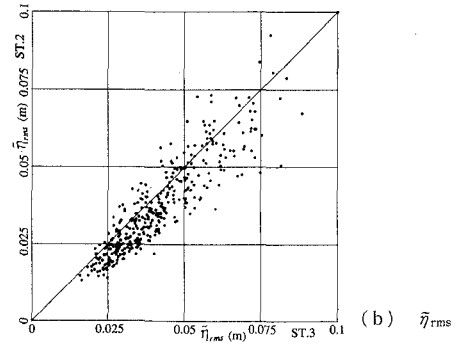


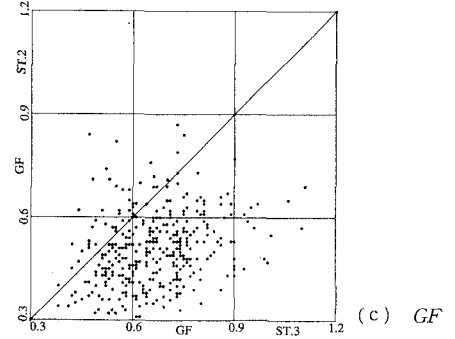
図-8 ST.1, ST.2, ST.3 におけるスペクトルの変化



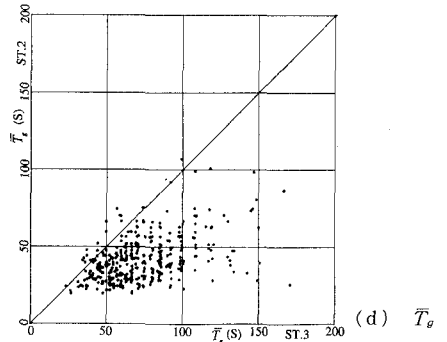
(a) 有義波高



(b)  $\bar{\eta}_{rms}$



(c) GF



(d)  $\bar{T}_0$

図-9 ST.2 と ST.3 の波浪統計量の関係

ことがわかる。そして、防波堤背後で自由波となった長周期波は ST.3 における周期  $\bar{T}_0$  で伝播し、港湾内へ入射する。

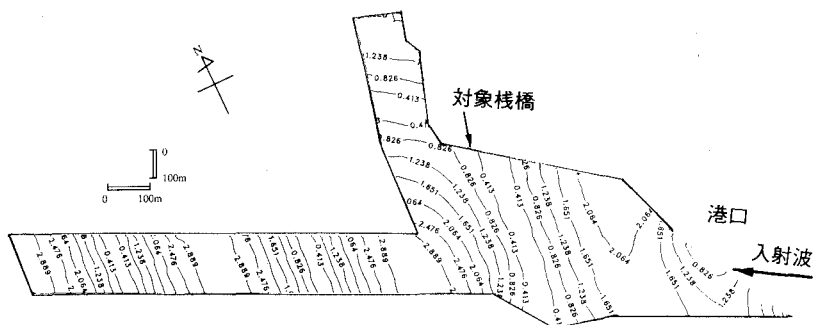


図-10 波高増幅率の等値線図 (規則波, 周期 100 s)

5.2 副振動波と船体動揺

図-10は、周期100sの規則波についてJ. J. Lee (1996)の方法で、対象港湾の副振動を解析し、波高増幅率を示したものである。図より、対象棧橋地点は節に近い地点であることがわかる。したがって、対象棧橋地点では岸壁に沿った水平流速成分が卓越するので、副振動によって係留船舶がsurge方向に動揺する可能性がある。

係留不可事象時の船舶(20万DWT)のサージングの固有期を正しく見積もることは、4.1で示したように係留状態が時々刻々と変化するため容易ではない。そこで、係留不可能時の係留状態を模擬した質点系モデルを設定して、係留中の船舶の概略の固有周期を調べた。係留索のsurge方向のバネ定数は、初期張力を3tfとしたときの静的な係留解析から算出されたものであり、固有周期は82秒であった。現実にはこのような長周期動揺が生じた場合には、索張力がウインチの制動力に達したところで自動的に索張力が弱まるように係留索を送り出すので、復元力となる索張力は弱くなる。さらに、上記の固有周期の計算に付加質量を考慮すれば、船体動揺の固有周期は一層長周期になり、 $\bar{T}_g$ の値に近づいていく。以上まとめると、 $\bar{T}_g$ という周期で波群が来襲した時、波群に拘束された長周期波は防波堤背後で周期 $\bar{T}_g$ の自由波となり、これが副振動を励起し、副振動と係留船舶が共振した結果、係留不可能事象が発生したと考えられる。

6. 結 語

港湾に入射する港外波浪観測データと係留可否の関係について解析し、港外波浪から港内波浪が風の状態でもない場合に発生する係留不可能事象を説明できる指標の抽出を試みた。ついで、係留不可能事象の原因につい

ても検討した。

その結果、係留不可能事象は、港湾に来襲する港外波浪の波群特性と密接に係わり、特に平均波群周期 $\bar{T}_g$ は、係留不可能事象を説明する指標として有効であることが明らかとなった。また、 $\bar{T}_g$ という周期で波群が来襲した時、波群に拘束された長周期波は防波堤背後で周期 $\bar{T}_g$ の自由波となり、これが副振動を励起し、副振動と係留船舶が共振した結果、係留不可能事象が発生することがわかった。

参 考 文 献

喜岡 渉・飯田耕三・水谷隆夫 (1990): 離岸堤まわりの長周期水位変動の変形特性, 第37回海岸工学論文集, pp. 609-613.  
 関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 第37巻, 海岸工学論文集, pp. 86-90.  
 永井紀彦 (1993a): 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)に関する最近の研究, 平成5年港湾技術研究所講演会講演集, pp. 15-44.  
 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 (1993b): 平成5年北海道南西沖地震波形記録解析速報, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第4号, pp. 51-97.  
 永井紀彦ら (1994): 波群特性を考慮した船舶係留のための港内静穏度指標について, 日本造船学会第12回海洋工学シンポジウム, pp. 343-348.  
 Battjes, J. A. and Van G. Ph. Vleder (1984): Verification of Kimura's theory for wave group statistics, Proc. 19th Conf., ASCE, pp. 642-648.  
 Funke, E. R. and E. P. D. Mansard (1980): On the synthesis of realistic sea states, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2974-2991.  
 Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1972): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.  
 Pinkstar, J. A. (1974): Low frequency phenomena associated with vessels moored at sea, Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SEP Paper No. 4837, pp. 593-615.