

漁港内の長周期水面変動と平均水位上昇に関する 現地観測と水理実験

清水琢三*・金山 進*・服部 武*
武藤亮介**・高木伸雄***・二見耕左****

1. まえがき

伊豆諸島八丈島の中央、南西側に位置する八重根漁港は、港口が太平洋に直接面した掘り込み漁港であるため、台風による高波来襲時に港内で平均水位の上昇ならびに副振動による長周期水面変動が顕著になり、これまでも岸壁や冷蔵庫等の陸上施設がたびたび冠水するなど多大の被害を生じている。

従来の漁港は、船舶の入出港に際しての航行安全性と岸壁での係留、陸揚の安全性を確保するため、周期10秒前後の通常波浪に対して必要な静穏度を確保するよう泊地の大きさや外かく施設の形状、岸壁の位置などが決められている。しかしながら、来襲波浪には波浪成分の非線形干渉による波群に拘束された周期1~2分の長周期波が存在し、砕波するとさらに新たな長周期波(いわゆるサーフビート)を発生させるため、高波浪時に砕波帯内に漁港が包まれる場合には、港内への侵入波にも長周期成分のエネルギーが多く含まれており、通常の波浪に対しては十分な静穏度が確保されていても港内で長周期水面変動が無視し得ない場合がある。しかも、通常の漁港は規模があまり大きくないため、サーフビートの周期が港の固有振動モードと一致しやすく、港内副振動を励起することも考えられる。

そこで、このような港内水位変動の実態とメカニズムを把握するため、まず、漁港内外で現地調査を行い、通常波浪と長周期波を含む水位の連続観測を実施した。さらに、平面水槽で不規則波に対する水理模型実験を行って、被災状況の再現を試みるとともに、平均水位上昇と長周期水面変動の抑制という観点から将来形状について検討を加えた。

2. 現地調査の概要

八重根漁港は、東京都八丈島の南西に位置する第4種漁港である(図-1)。現地調査は、図-2に示す漁港内外

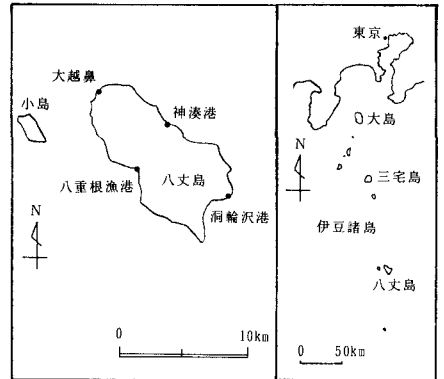


図-1 八重根漁港位置図

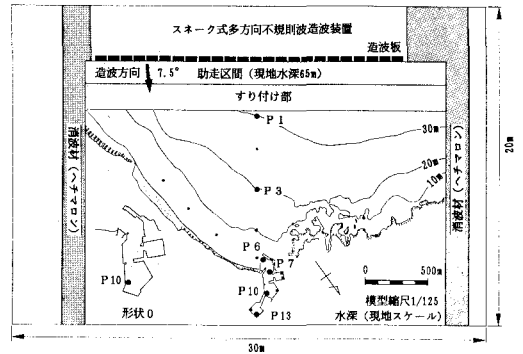


図-2 現地調査、水理実験の計測地点

の4箇所(港外の水深20m地点P3、港内のP6、P7、P10)に自記記録式の水圧センサーを設置し、サンプリング間隔1sで約1ヶ月間の連続観測を3回実施した。夏期調査は1992年8月21日~9月22日、冬期調査は1993年1月27日~3月3日に実施した。また、夏期の補足調査として1992年10月7日~11月12日には港外のP3と港内のP10の2箇所で観測を実施した。

得られたデータは1時間毎の時系列データに分割し、FFT法により分解した成分波毎に微小振幅波理論により水位の振幅に変換し、それらを再び位相を考慮して合成して水位変動の時系列を求めた。このように水圧波形から変換された水位変動データをスペクトル解析するとともに、数値フィルターにより周期20s以下の通常波浪

* 正会員 工修 (財)漁港漁村建設技術研究所
 ** 正会員 (財)漁港漁村建設技術研究所
 *** 正会員 農修 (財)漁港漁村建設技術研究所
 **** 正会員 東京都港湾局離島港湾部

成分とそれ以上の長周期波成分に分離し、波別解析を行った。港内の周波数応答特性は、水深 20 m の P3 地点に対する港内各地点のパワースペクトル比の平方根として評価した。

3. 水理実験の概要

水理実験はスネーク式造波装置付きの平面水槽（長さ 20 m, 幅 30 m, 深さ 1.5 m）を用い、模型縮尺 1/125 で現地地形、漁港を再現した。本実験では、砕波による水位上昇や長周期成分の励起といった現象の把握を目的としているため、最も波高の大きな実験波（30 年確率波）に対しても再現地形の沖側端部で砕波しないように、現地スケールで沖側端部水深を約 30 m とし、造波機前面の水深 60 m から約 1/10 勾配ですり付けた。

現地は多方向不規則波であるが、被災を生じるような高波浪時は周期が長いうねり性の波で、しかも地形的にも屈折して港口では単一方向不規則波に近いと考えられる。そこで実験波としては JONSWAP 型の周波数スペクトルを有する単一方向不規則波とし、現地観測結果に基づきパラメータを設定した。また、スペクトル法(MRI モデル)による沖波推算結果をエネルギー平衡方程式による浅海波浪変形計算を行って水深 30 m の P1 地点に変換したところ、30 年確率波や被災をもたらした台風 9115 号来襲時の波向がおおよそ SSW と SW の中間付近になること、また夏期調査時のうねりの卓越波向などを総合的に勘案して、実験波向を S30°W に設定し、造波板に対して 7.5°斜めに造波させた。なお、長周期波を含む精度の高い実験を行うためには、波浪の 2 次の非線形干渉によって生じる入射波群に拘束された長周期波をあらかじめ造波信号として入力することが望ましいが、今回の実験では波浪成分のみを造波信号として入力した。実験波の一覧を表 1 に示す。

実験は、以下の 3 つの目的に対して実施した。①現地調査結果の再現性の検証実験（実験波 A：静穏時代表波浪、B：夏期高波浪、C：冬期高波浪）、②台風 9115 号による被災再現実験（実験波 F：台風 9115 号来襲時）ならびに③将来形状に関する実験（実験波 D：漁労限界波高、

E：1 年確率波、G：30 年確率波）である。なお、実験波は、A～C については水深 20 m の P3 地点で、それ以外は水深 30 m の P1 地点で検定した。

計測は、漁港内外の 16 地点で容量式波高計により水面変動を計測するとともに、港口および港内の狭搾部の 3 箇所電磁流速計による流速測定を行った。測定は、造波開始直前よりサンプリング間隔 0.05 s で約 13 分間行い、その内、港内の水位上昇や水面変動がほぼ定常に達したと考えられる造波開始約 2 分後から 3.75 分間(現地スケールで約 42 分間)のデータを用いて、現地データと同様、スペクトル解析や波別解析を行った。

4. 水理実験による現地再現性の検討

4.1 水位変動の比較

ここでは、夏期高波浪時の代表的なケースとして 1992 年 9 月 1 日 18 時の波浪 B ($H_{1/3}=3.44$ m, $T_{1/3}=13.6$ s) を取り上げ、実験結果と現地観測結果の比較を試みる。

図-3 は、現地調査と実験の時系列波形を比較した結果である。なお、実験の波形は静水状態を基準として現地スケールに直して示されており、平均水位上昇も含まれているが、現地調査結果は図に示した 20 分間の平均値まわりの変動として示されている。

実験波形は現地波形と波群特性も含めて完全に一致するわけではないが、水深 20 m の P3 地点ではいずれも同程度に波群化した波が入射しており (GF は現地で 0.8、実験で 0.9)、港口の P6 では浅水変形と砕波により波形が尖鋭化する様子が、また港内奥の P10 地点では通常波浪成分は防波堤による遮蔽により減衰しているにもかかわらず、長周期波が発達する様子が水理実験でも再現されている。

図-4 は、P3 地点の現地観測波形に含まれる長周期波形と Sand (1982) の方法により通常波浪成分から推定した 2 次の非線形干渉による長周期波のシミュレート波形の比較を示している。部分的にはあまり対応の良くないところもあるが、両者の対応は概ね良好である。このことは、非砕波領域における長周期波は入射波の波群に拘束された非線形拘束波（いわゆる set-down 波）として存在することを示している（例えば、関本ら、1990）。

このように現地では入射波中に長周期波が存在するが、今回の実験では波浪成分のみしか造波させていないので、砕波によって生じるサーフビートは実験で考慮できても、非線形拘束波の分だけ港内へ入射する長周期成分としては過小評価になることが懸念された。そこで、沖の水深 30 m 地点の P1、25 m 地点の P2、

表 1 実験波の諸元一覧

実験波浪	検定地点	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	波向 (°)	潮位 (m)	γ	実験目的
A：静穏時代表波浪	P3(20m)	1.30	7.7	210	2.12	4.9	現地調査の再現
B：夏期高波浪	P3(20m)	3.44	13.6	210	2.27	11.2	現地調査の再現
C：冬期高波浪	P3(20m)	4.56	10.3	210	2.15	2.3	現地調査の再現
D：漁労限界波高	P1(30m)	2.50	8.5	210	2.30	3.3	将来形状の検討
E：1 年確率波	P1(30m)	7.20	12.0	210	2.30	7.1	将来形状の検討
F：台風 9115 号	P1(30m)	10.00	13.4	210	2.30	7.1	被災状況の再現
G：30 年確率波	P1(30m)	11.50	15.7	210	2.30	7.1	将来形状の検討

波向：N より時計廻りの角度、潮位：工事基準面上の高さ、 γ ：JONSWAP 型周波数スペクトルの係数

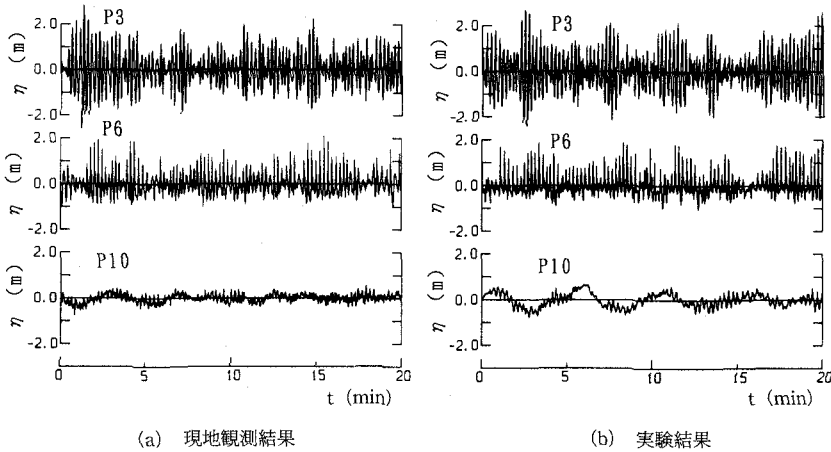


図-3 水位変動時系列の比較

位が下がり、小さいところで水位が上がる特性を示すが、P1, P2 地点ではまだ非線形拘束波が十分発達していないため、振幅がやや小さいだけでなく、位相もずれる傾向がみられる。しかしながら、水深 20 m の P3 地点ではすでに非線形性により不規則波群に拘束された周期 1~2 分程度の長周期波が発達していることが確認された。したがって、必ずしも十分な精度を有するわけではないが、波浪成分のみを造波させた場合でも、不規則波群に伴う長周期波を考慮した実験が可能であることがわかった。

4.2 周波数応答関数の比較

図-6 は、港外の P3 地点ならびに港内の P10 地点の周波数スペクトルと港外に対する港内の周波数応答について、実測値と計算値を比較した結果を示している。図中には Lee (1971) の方法によって計算された港内副振動の主要な共振周波数も併せて示されている。

周波数スペクトル、周波数応答関数ともに、漁港の共振周期付近で差異がみられるものの、実験結果は現地観測結果の傾向を概ね再現している。港内の P10 では、5 分程度、2 分程度ならびに 30 秒程度に共振点が見られ、港の固有周期に応じて港内副振動が励起されている様子が実験でも再現されている。

最も長周期側の共振点付近の実験の増幅率が、現地に比べて大きいのは、実験室では底面がモルタル仕上げでスムーズであり、海底面や崖、防波堤など現地の粗度を十分再現していないことが原因ではないかと推察される。

4.3 波浪統計量の比較

平均水位上昇量 η_{mean} 、波浪の有義値 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ および長周期波の有義値 $G_{1/3}$ 、 $T_{G1/3}$ の実験値と現地観測値の比較を表-2 に示す。長周期波の有義波高の実験値は、現地観測値に比べて約 2 倍程度大きい。入射波とみなせる P3 地点に対する波高比を求めると現地観測結果と概ね一致する結果が得られる。このことは、入射波に含まれる長周期波のエネルギーとしては実験値の方が大きい。長周期波が港内で増幅される様子は概ね実験で再現されていることを示している。平均水位の上昇量ならびに波浪成分の有義波高については波高減衰が急な P7 を除けば概ね再現されている。

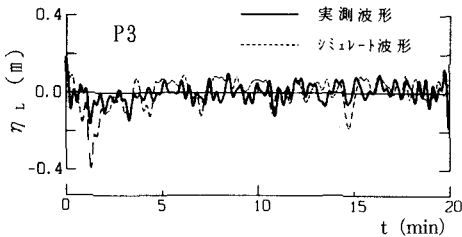


図-4 波群拘束長周期波のシミュレート波形と実測波形の比較

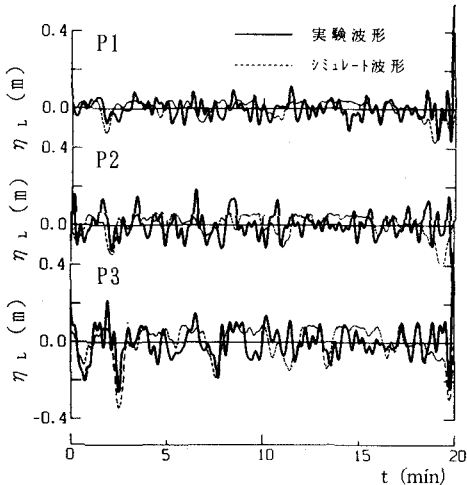
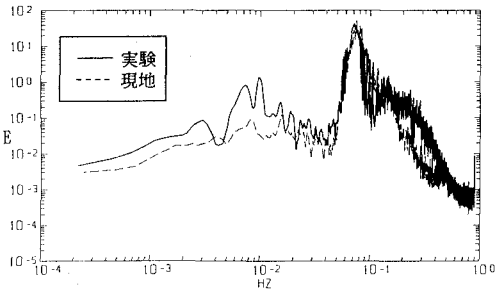


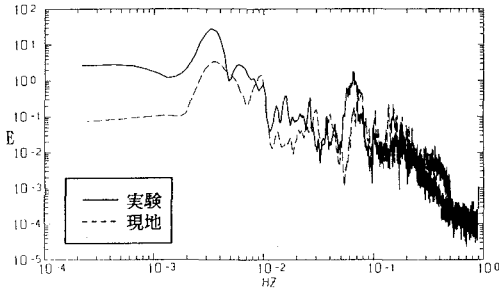
図-5 波群拘束長周期波の水理実験による再現

20 m 地点の P3 において、通常波浪の成分の実験波形から本来存在すべき非線形拘束波形を Sand (1982) の方法によりシミュレートし、その結果を実験波形に含まれる長周期波形と比較した。その結果を図-5 に示す。

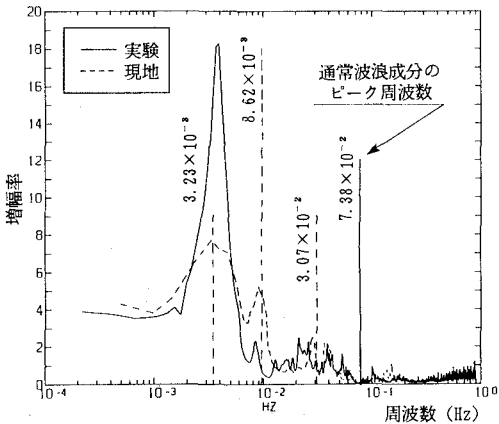
非線形拘束波は、波浪成分の振幅の大きいところで水



(a) 周波数スペクトル(P3)



(b) 周波数スペクトル(P10)



(c) 周波数応答

図-6 漁港内外の周波数スペクトルと応答関数の比較

4.4 台風 9115 号による被災状況の再現

台風 9115 号は八丈島の南東側を通過し、沖波有義波高の最大値は 12.1 m, 13.5 s と推定されている。波高ピーク時は、ほぼ満潮時に当たっており、高潮（主として気圧低下による吸い上げ）と砕波による wave set-up により平均水位が上昇するとともに、長周期の水面変動により冷蔵庫の扉（下端高 D.L+3.5 m）および製氷機のシュート（D.L+3.5~4.5 m）が被災するとともに、冷蔵庫横の階段上（D.L+4.9 m）まで水位が上がったと報告されている。なお、漁港近くの八重根検潮所の観測結果によれば天文潮に対して 2.5~3 m の水位上昇が記録されているが、砕波による平均水位上昇が含まれており、高潮

表-2 波浪統計量の比較（夏期高波浪時：波浪 B）

測点 No.	η_{mean} (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$G_{1/3}$ (m)	$T_{G1/3}$ (s)	
P3	現地	—	3.11(1.00)	13.42	0.15(1.00)	60.00
	実験	-0.01	3.48(1.00)	13.98	0.28(1.00)	80.68
P6	現地	0.12	2.10(0.68)	12.82	0.29(1.93)	70.88
	実験	0.15	2.03(0.58)	13.49	0.51(1.82)	117.39
P7	現地	0.12	2.19(0.70)	13.80	0.36(2.40)	78.43
	実験	-0.01	1.40(0.40)	13.41	0.69(2.46)	92.10
P10	現地	0.13	0.48(0.15)	10.04	0.40(2.67)	149.25
	実験	0.12	0.64(0.18)	15.35	0.94(3.36)	251.28

$H_{1/3}$, $T_{1/3}$: 波浪成分の有義値, ()内は P3 に対する比
 $G_{1/3}$, $T_{G1/3}$: 長周期波成分の有義値

による平均水位上昇を実測値に基づき正確に見積もることは困難であった。

実験は朔望平均満潮位 (D.L+2.3 m) に対して実施し、港内の岸壁での平均水位は D.L+3.7 m, 実験計測中の最大水位は D.L+5.7 m という結果が得られた。この結果は概ね被災状況とも一致しており、港内全体が冠水する様子や入射波群に伴う長周期水面変動により港内副振動が生じる様子など実際の被災状況が再現できた。

5. 将来形状に関する検討

5.1 対策の考え方

八重根漁港の対策案の立案に当たっては、①港内の平均水位上昇対策ならびに②港内の長周期水面変動対策について検討する必要がある。いずれの対策としても、港外に新たに外かく施設を作ることが必要となるが、それには多大の時間と費用を要するため、まず、岸壁前面における通常波浪の低減ならびに実験では考慮できない風対策を目的として、港内の中波除堤を付け替えることが地元から要望された（形状 A）。

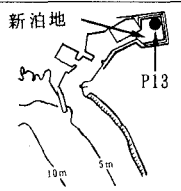
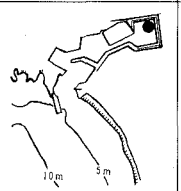
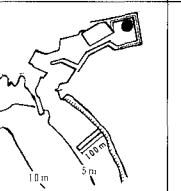
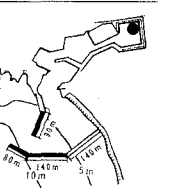
港内の平均水位上昇対策としては、砕波による wave set-up 量が多い汀線付近と港内が直接接続しないように港口を沖へ移動することが原理的に望ましいと考えられる。そこで、漁港の東側海岸から突堤状に東防波堤を延長する案について検討した（形状 B）。

さらに、港口を沖へ移動することは、より大きな波に対して平均水位上昇対策となるだけでなく、入射波群に伴う長周期波の振幅を抑え、また砕波により新たに発生するサーフビートが港内へ侵入するのを防ぐことができるため、長周期水面変動対策になると期待できる。そこで最終形として東防波堤を延長するとともに、西側に防波堤をかぶせる案についても検討した（形状 C）。

5.2 将来形状の比較

1年確率波と 30年確率波に対する港内奥の P13 地点における平均水位や通常波浪成分の波高、長周期波成分の波高の比較を表-4 に示す。港内奥に新泊地が完成した形状を現状として、各将来形状の平均水位上昇低減効果と長周期水面変動抑制効果を考察する。

表-3 将来形状の比較実験結果 (P13地点)

平面図		現況	形状A	形状B	形状C
					
1年確率波 $H_0=7.2\text{m}$ $T_0=12.0\text{s}$	η_{mean}	0.81(1.00)	0.87(1.07)	0.33(0.41)	0.12(0.15)
	η_{max}	2.23(1.00)	2.09(0.94)	1.33(0.60)	0.78(0.35)
	$H_{1/3}$	0.13(1.00)	0.06(0.46)	0.10(0.77)	0.04(0.31)
	$G_{1/3}$	1.80(1.00)	1.55(0.86)	1.53(0.85)	1.34(0.74)
30年確率波 $H_0=11.5\text{m}$ $T_0=15.7\text{s}$	η_{mean}	1.51(1.00)	1.59(1.05)	1.06(0.70)	0.73(0.48)
	η_{max}	3.69(1.00)	3.26(0.88)	2.49(0.67)	2.29(0.62)
	$H_{1/3}$	0.30(1.00)	0.09(0.30)	0.10(0.33)	0.05(0.17)
	$G_{1/3}$	2.75(1.00)	2.17(0.79)	2.00(0.73)	2.05(0.75)

単位: m, () 内は現況に対する比

現況から形状 A へと港内形状を変更すると、平均水位の上昇を抑えることはできないが、通常波浪成分の波高減衰が大きく、1年確率波に対しては0.46倍に、30年確率波に対しては0.3倍になっている。また、長周期波成分も15~20%程度低減している。

次に、港外に東防波堤を100m建設すると(形状B)、港内の平均水位上昇に対して期待通りの効果を発揮し、1年確率波に対しては0.41倍に、30年確率波に対しても0.70倍に低減する。しかしながら、通常波浪や長周期波の振幅は大差なく、東防波堤の反射波の影響のためか、むしろ通常波浪は大きくなる傾向を示す。

さらに、最終形状である形状Cでは、平均水位の上昇がさらに抑えられると同時に、通常波浪の静穏度が高められる結果が得られた。また、すべての水位変動を合成した最大到達水位は、1年確率波に対しては0.35倍とかなり低減するが、長周期波の有義波高 $G_{1/3}$ は形状Bに比べて若干小さくなるものの、顕著な低減効果はみられなかった。このように砕波帯外でもすでに非線形効果により波群に拘束された長周期波が存在するため、その周波数帯が港内副振動の共振周波数と近ければ副振動を抑えることはなかなか難しいことがわかる。

6. あとがき

本研究では、八重根漁港を対象に、砕波によって引き起こされる港内の平均水位上昇と、入射波群に含まれる非線形拘束波や砕波によって生じるサーフビートなどの長周期波によって励起される港内副振動の実態とメカニ

ズムを現地観測ならびに平面水槽を用いた不規則波実験により明らかにした。造波段階で波浪と非線形拘束波を同時に考慮する方法や、底面粗度の適切な設定法など物理実験上の課題も多く残されているが、不規則波を用いた平面実験は平均水位上昇や長周期波による港内擾乱などの検討に有効であることが確認された。今後はブシネスク方程式のように非線形の方程式を用いて、通常波浪から長周期水面変動、さらには平均水位の上昇までを同時にシミュレートする実用的な数値モデルの確立が望まれる(例えば、金山ら, 1994)。

最後に、本研究を遂行するに当たり、「平成5年度基本計画調査(八重根・坪田漁港水理模型実験)検討部会」の磯部雅彦東京大学教授(部会長)、山本正昭水産工学研究所開発システム研究室長、橋本牧水産庁漁港部建設課課長補佐、中山哲巖水産工学研究所漁港水理研究室主任研究官を始めとする関係各位には多くの有益な助言を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): ブシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 61-65.
 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, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 86-90.
 Lee, J. J. (1971): Wave induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, J. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375-394.
 Sand, S. E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 195-208.