

高波浪時の大水深域から浅海域への 波浪変形の実測値に基づく検討

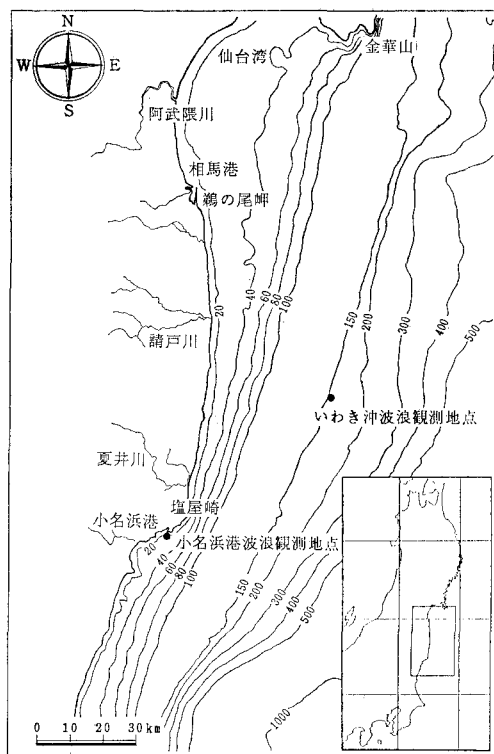
永井紀彦* ・ 橋本典明** ・ 浅井 正***
八木橋貢****・ 鶴飼亮行*****・ 清水琢三*****

1. ま え が き

港湾構造物に襲撃する波浪は、波浪推算に基づいて沖波を求め、対象地点まで屈折計算を行って算定されるのが一般的である。この際、沖波から浅海への波浪の伝播途中ではエネルギーの授受がないことを仮定している。しかしながら、気圧や風の場の時・空間的変動の激しい高波浪時には、台風や低気圧の経路によっては、沖波と考えるべき地点の特定が困難であったり、浅海域への伝播途中で風の影響を受ける場合も考えられる。このような影響を評価するためには、沖波と浅海域での同時観測データによる比較検討が必要であるが、これまで沖波の直接測定が困難であったことから、十分な検討がなされていないのが現状である（永井ら，1990）。本研究では、水深 154 m の大水深域におけるいわき沖波浪観測記録と水深 20 m の浅海域における小名浜港の波浪観測記録を基に、高波浪時の沖波の浅海への伝播特性について検討した。

2. 波浪観測記録の概要

図一1 は、運輸省第二港湾建設局により実施されているいわき沖ならびに小名浜での波浪観測地点の位置と周辺の海底地形を示したものである。いわき沖では、水深 154 m 地点で天然ガス開発用のプラットフォームの脚を利用して、4 台のステップ式波高計、水圧式波高計ならびに超音波流速計による水位、水圧、水平 2 成分流速の合計 7 ch の同時観測が実施されている。また、風向・風速の計測も併せて行われている。一方、小名浜港の三崎沖の水深 20 m 地点では、超音波波高計、水圧式波高計ならびに超音波流速計による水位、水圧、水平 2 成分流速の合計 4 ch の観測が実施されており、いわき沖、小名浜とも波浪観測は、2 時間毎に 20 分間、サンプリング間隔 0.5 秒である。



図一1 いわき沖の海底地形と計算範囲

観測波形データに対して、波別解析法による統計処理とともに、方向スペクトル解析を行った。4 成分以上の観測データに対してはベイズ型モデルを用いた方法 (BDM) (橋本, 1987) が、3 成分の観測データに対しては最大エントロピー原理を用いた方法 (MEP) (橋本・小舟, 1985) が、既往の他の方法に比べて推定精度が高いことが、いわき沖の観測データに基づき既に明らかにされている (橋本ら, 1988)。そこで、いわき沖に対しては BDM を、小名浜に対しては水圧と水平流速 2 成分の 3 成分観測データに対して MEP (パワースペクトルは超音波波高計の記録により補正) を用いて方向スペクトルの推定を行った。また、推定された方向スペクトルから周波数毎に long-crestedness パラメタ $\gamma(f)$ を計算し、光易型の方法関数を仮定した場合の方向集中度パラ

* 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海洋水理部主任研究官
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室
**** 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
***** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

メタ $s(f)$ を次式より推定した (堀川編, 1985).

$$\gamma(f)^2 = \frac{2s(f)+1}{s(f)^2+s(f)+1} \quad \dots\dots(1)$$

3. 大水深域から浅海域への波浪変形

3.1 検討対象期間の気象海象条件

図-2 の天気図に示すように, 台風 13 号と 15 号の 2 つの台風が連続して来襲した 1987 年 9 月 13 日~20 日の高波浪時を対象に, いわき沖と小名浜における方向スペクトルを含む波浪の出現特性を, 当該期間の風の場の変化と併せて検討した.

図-3 は, 検討対象期間中のいわき沖と小名浜における有義波高, 有義波周期, 共分散法により求めた主波向, 推定された方向スペクトルから求めたピーク周波数に対する方向集中度パラメタ s_{max} , 第一および第二ピーク波向, いわき沖における風速・風向の経時変化を示している. また, 図中には, いわき沖の実測方向スペクトルを沖波条件とした場合のいわき沖から小名浜への波浪変形計算結果も併せて示している. なお, 計算方法については後述する.

いわき沖の気象・海象観測記録によれば, 図-3 の下段に示すように, 対象期間の波浪は, 台風の接近により S 寄りのうねりによる高波浪が卓越した期間, 台風通過時に風向の変化により 2 方向系波浪となって有義波高が最大になった期間, および台風通過後 N 寄りの波浪となって波高が徐々に減衰した期間の 3 つに大別できる.

3.2 大水深域と浅海域の波浪特性の比較

台風が本州の南に位置し, 北上しながら接近した S 寄りの周期の比較的長い波が卓越した期間は, いわき沖に比べて小名浜の波高が概して大きい. この期間は台風の移動や風の影響を受けており, 小名浜の南方に台風が位置したときに発達したうねりが小名浜に直接入射したこと, および追風によりエネルギーを受けたことが原因であると考えられ, いわき沖の波浪が直接小名浜の入射波となっているとは考え難い. このことは小名浜での周期が 13~16 秒といわき沖に比べて長かったこと, 15~16 日にみられるように, いわき沖の波向 SE に対して小名浜の波向が SSE と南寄り, 屈折だけでは説明できないことから裏付けられる. また, いわき沖と小名浜の波高の相違が最も大きかった 9

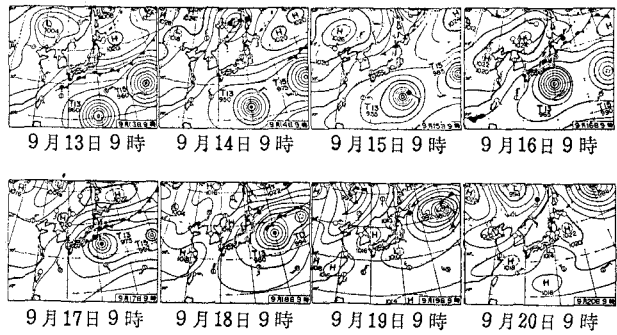


図-2 検討対象期間の天気図

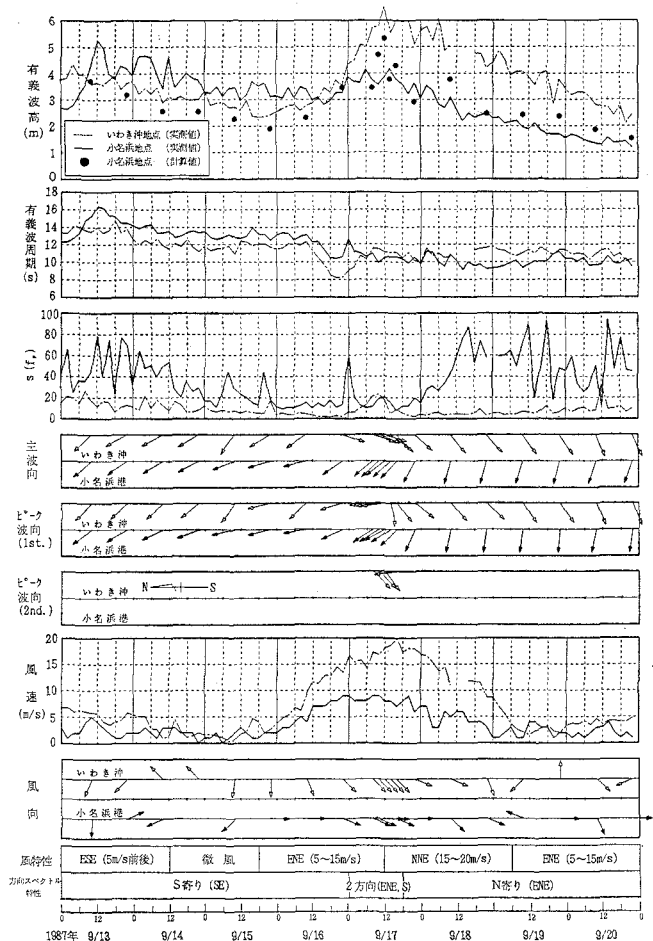


図-3 気象・海象条件の経時変化

月 13 日 12 時の小名浜での観測記録には, 前半の 5 分間とその後は様相を異にする顕著な波群が観測されており, 台風の通過に伴う高波浪時は時・空間的にも変化が激しいことが改めて確認された. また, 台風の接近に伴い S 寄りの波浪から N 寄りの波浪に変化した後は, 小名浜は北側が地形的に遮蔽されていることから屈折と回折により波浪減衰が大きくなっている.

いわき沖における S_{max} は、比較的減衰距離の短いうねり（沖波波形勾配 0.015 程度）と考えられる 13~14 日の SE 波のとき 20 程度の値を、風波（沖波波形勾配 0.04 程度）と考えられる 15~16 日では 10 程度の値を示している。この結果は、従来から設計に用いられてきた合田・鈴木 (1975) の S_{max} の概略値と一致しており、その妥当性が実測データによって確認できた。また、小名浜では、計器の台数の関係もあって MEP による方向スペクトルの推定精度はいわき沖の BDM に比べて劣るにもかかわらず、いわき沖に比べて全般的に方向集中度の増大が認められる。特に、S 寄りのうねりが卓越した 13~14 日と、風波であるが N 寄り波浪で地形的に屈折および回折の影響を受ける 18 日以降は、方向集中度の増大が顕著である。

波向については、SE からのうねりが卓越していた 13~14 日はいわき沖と小名浜でほぼ一致するが、台風の接近に伴い 15~16 日はいわき沖では E 方向に、小名浜では S 寄りにと反対方向に変化した。台風が最も接近した 17 日にはいわき沖で N 寄りと S 寄りの 2 方向波浪となり、台風が通過した 18 日以降、いわき沖では ENE からの波浪となり、小名浜でもいわき沖の波向の変化に対応して E 方向に変化している。このように波向の変化からも、台風が接近した極大波浪来襲時には、波浪場の時・空間的変動が激しく、沖波と考えるべき地点の特定が困難であることがわかる。

3.3 波浪変形計算による検討

いわき沖における実測方向スペクトルを沖波条件として、Karlsson (1969) のエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行い、小名浜での実測方向スペクトルと比較・検討した。S 寄りと N 寄りの 2 方向系波浪の場合には、それぞれのピーク方向近傍の方向スペクトルに光易型の方角関数を当てはめて分離し、それぞれに対して波浪変形計算を行い、小名浜地点で合成した。計算には、高山ら (1991) の砕波減衰を考慮できる計算モデルを用いたが、計算対象が 20 m 以深であるため砕波の影響は小さい。計算領域は 図-1 に示した範囲であり、1 km メッシュの格子で計算した。なお、周波数は 10 分割（エネルギー等分割）、角度は主波向 $\pm 90^\circ$ の範囲を 45 分割（等幅分割）して計算した。

図-3 に示したように、台風通過後の N 寄りの波が卓越する波高減衰期（9 月 18 日以降）には、屈折計算によりいわき沖から小名浜への伝播を概ね良好に再現できたが、それ以前の台風の接近に伴い時・空間的変動の激しかった期間の小名浜の波高は計算値より実測値の方が概して大きかった。ただし、波向が SE 方向で小名浜に対して直に入射するため、いわき沖に対して屈折による波高減衰はあまりみられなかった。

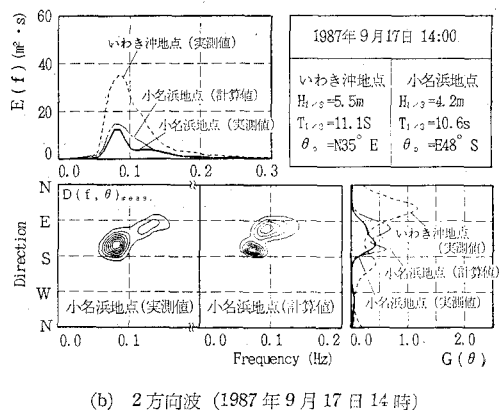
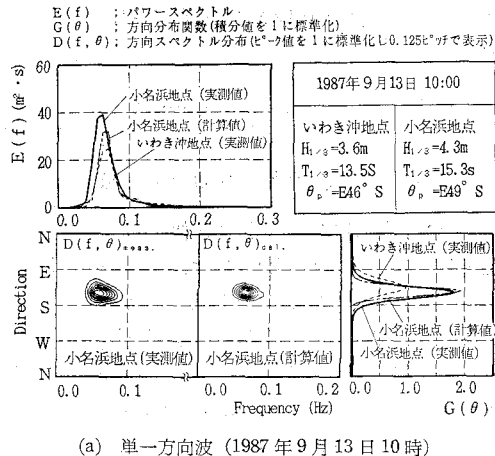


図-4 方向スペクトルの実測値と計算値の比較

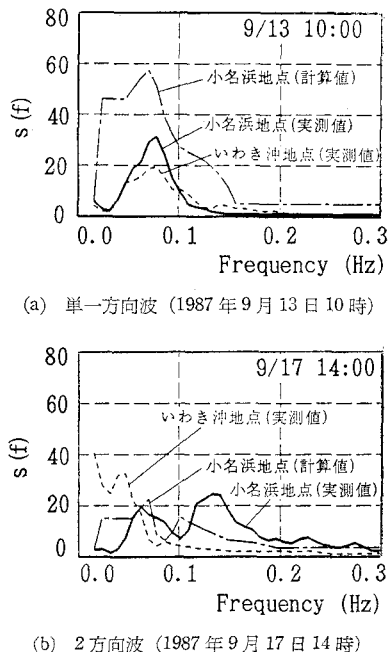


図-5 周波数別方向集中度パラメタの比較

単一方向波 (13 日 10 時; いわき沖波向 SE) ならびに 2 方向波浪 (17 日 14 時; いわき沖波向 ENE, S) の場合の小名浜における方向スペクトルの実測値と計算値の比較を図-4 に示す。また、光易型の方向関数の方向集中度パラメタ $s(f)$ の周波数変化を式 (1) により求めた結果を図-5 に示す。

単一方向波では屈折による波向変化ならびに方向集中度の増大がよく再現されている。方向集中度パラメタの周波数変化をみると、計算値、実測値ともにピーク周波数付近でいわき沖に比べて大きくなる傾向を示しており、いわき沖の 20 に対して小名浜では実測値が 30 程度、計算値が 60 程度に増大している。小名浜の実測値は 3 成分アレイであるため、いわき沖に比べて方向スペクトルの推定精度が劣ることが原因の一つと考えられるが、方向集中度の実測値は、時間的に少しずれると 60~80 となって、計算値とほぼ対応した結果となる。

一方、2 方向波の場合にも傾向は概ね再現されているが、計算結果で現れる顕著な 2 つのピークが実測値では明確には現れず、なだらかな方向分布となっている。これは単一方向波と同様、実測方向スペクトルの推定精度がいわき沖に比べて劣ることが原因の一つである。また、小名浜は地形的に北側が遮蔽されているため、いわき沖で N 寄りの波が屈折して小名浜では E 方向に変化している様子は計算結果によく再現されているが、小名浜の実測値は周期が短く、しかも S 寄り波が卓越している点が計算値と異なる。いわき沖では NNE からの強風の影響で既に N 寄りの波が発達していたが、いわき沖から小名浜まで N 寄りの波が伝播するのに 1 時間程度を要するため、小名浜ではいわき沖の発達した N 寄りの波がまだ到達していなかったものと考えられる。さらに、図-5 の方向集中度の周波数変化に着目すると、N 寄り波浪に対応する周波数 0.12 Hz 付近で、実測値、計算値ともに方向集中度の増大が認められる。

図-6 は、計算を行った全ケースについて、周波数スペクトルから求めた有義波高、ピーク波向 θ_p ならびに

ピーク周波数での方向集中度パラメタ s_{max} の小名浜における計算値と実測値の比較を示したものである。有義波高の計算結果は、SE 方向からのうねりが卓越した期間では過小評価、2 方向波浪の場合にはやや過大評価しているが、波高減衰期には概ね一致している。全体的にみても、おおよそ $\pm 20\%$ の範囲で実測値と一致する。ピーク波向は、ばらつきが大きいものの、傾向は概ね再現されている。2 方向波浪のとき実測値と計算値が大きくはずれたケースがみられるが、これはいわき沖での S 寄り波から N 寄り波へのピーク波向の変化が、小名浜に比べて早かったことが原因である。方向集中度パラメタ s_{max} は SE からのうねりが卓越した期間については一致したが、N 寄りの波浪のときには、小名浜では地形的に風の影響を受けにくいに対して、いわき沖では風の影響を直接受けるため方向集中度が小さく、実測値ほど方向集中度は増加しなかった。

以上のように、沖波から浅海域へ伝播する過程で風の影響などエネルギーの授受が無視できる場合には、屈折による方向スペクトルの浅海域での変形をエネルギー平衡方程式によりある程度再現できることがわかった。

3.4 風の影響の検討

大水深域から浅海域へ波浪が伝播する過程での風の影響を調べるため、追風あるいは逆風が顕著にみられたケースを抽出した。検討ケースは、他の 3 つの気象擾乱も含めて表-1 に示す 6 ケースである。いわき沖の風および波浪観測データを用いて、波の進行方向の風速を求め、正の場合追風、負の場合逆風と定義した。

波向方向の風速の絶対値が 5 m/s 以上で、いわき沖の有義波高が 2 m 以上のデータについて、いわき沖に対する小名浜の有義波高の比といわき沖の波向の関係を調べた。その結果を図-7 に示す。図中には、Bretschneider・光易型の周波数スペクトルと光易型の方向関数を用いた標準スペクトルに対する屈折計算結果も併せて示されている。

計算結果によれば、S 寄り波のときは屈折の影響が小

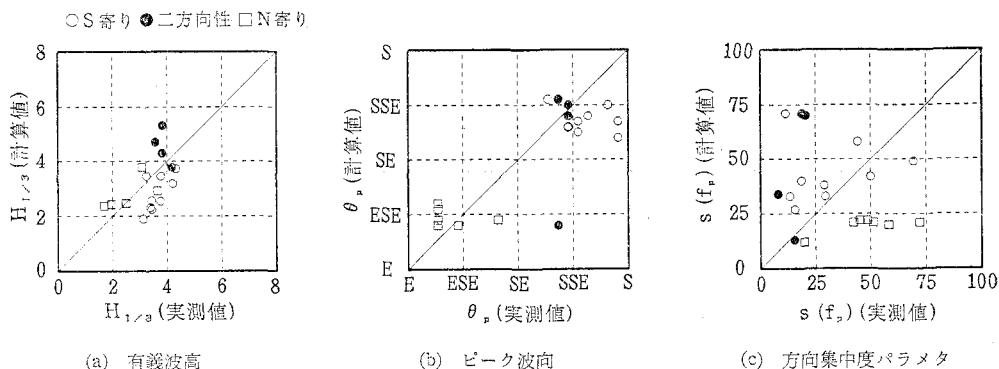


図-6 有義波高、ピーク波向、方向集中度パラメタの比較

表-1 風の影響の検討ケース

	対象期間	擾乱原因	最大有義波	スペクトル特性	風の特性
1	1987 9/13 2:00 - 9/14 8:00	台風	3.90m, 14.8s	単一 S寄り	追風 約 5m/s
2	1987 9/17 2:00 - 9/17 18:00	台風	6.50m, 11.1s	二方向性波浪	追風 10-20m/s
3	1987 9/18 12:00 - 9/19 6:00	台風	4.86m, 11.4s	単一 N寄り	追風 約 5m/s
4	1988 3/23 18:00 - 3/25 0:00	南岸低気圧	3.08m, 9.8s	単一 N寄り	逆風 5-10m/s
5	1988 11/25 2:00 - 11/27 0:00	二つ玉低気圧	3.72m, 10.7s	二方向性波浪	逆風 約 10m/s
6	1990 11/29 0:00 - 12/4 0:00	台風	6.68m, 12.0s	単一 S寄り	逆風 5-10m/s

さいため波高減衰は小さいが、N寄り波に対しては屈折による波高減衰が顕著である。実測値も概ね計算結果と同じ傾向を示すが、黒いシンボルで示された追風の時は、いわき沖に対する小名浜の波高が屈折計算結果よりも大きくなる傾向を示しており、浅海域へ伝播する過程で追風によりエネルギーを受けたことを示しているものと考えられる。また、白抜きのシンボルで示された逆風時には、逆に計算結果よりも波高減衰が大きく、逆風による砕波によってエネルギーを失ったものと判断される。このように、追風の場合には向い風の場合に比べて小名浜の波高が増大する傾向がみられた。

4. あとがき

いわき沖と小名浜における波浪観測データを解析し、高波浪時の大水深域から浅海域への波浪変形を実測値に基づき検討した。また、いわき沖の実測方向スペクトルを入射波として多方向不規則波の波浪変形計算を行い、屈折に伴う方向スペクトルの変化について、小名浜の実測値と比較検討した。その結果、台風や低気圧の通過に伴

い高波浪が発生する場合には、入射波の時・空間的な非一様性の影響や浅海域への伝播過程での風の影響がみられた。特に、追風条件の場合には、伝播する過程で波高が増大するので、浅海域の波高を推定する際には風の影

響を考慮する必要があることがわかった。

本研究は、平成元年度から3年度までの3年間にわたって横浜調査設計事務所と港湾技術研究所が協力して実施した「波浪変形調査」の成果を取りまとめたものである。いわき沖および小名浜における定常波浪観測は、小名浜港工事事務所をはじめとする第二港湾建設局の関係機関の皆様の様々な御努力御苦労の上に実施されているものである。研究の実施にあたっては、港湾技術研究所水工部波浪研究室の高山知司前室長（現水工部長）、池田直太研究官および同部海洋エネルギー利用研究室の後藤智明室長の御指導御助言をいただいた。また、水深データの作成等にあたっては、(株)ニシキコンサルタントの御協力をいただいた。あらためて、ここに謝意を表します。

参考文献

- 合田良實・鈴木康正 (1975): 光型型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45 p.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp. 20-66.
- 永井紀彦・冷水康悦・後藤智明 (1990): 大水深波浪観測データによる波浪推算法の検証, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 175-179.
- 橋本典明・小舟浩治 (1985): 最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, pp. 123-145.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 97-125.
- 橋本典明・小舟浩治・亀山 豊 (1988): 現地観測データを用いた方向スペクトル推定法に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第2号, pp. 59-94.
- 堀川清司編 (1985): 海岸環境工学, 補章 A, 東大出版会, pp. 506-524.
- Karlsson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol. 95, No. WW4, pp. 437-448.

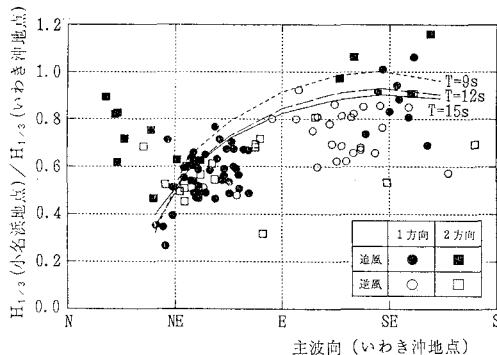


図-7 浅海への波浪変形に対する風の影響