

砕波帯内の波の現地観測

堀田新太郎*・水口 優**

1. はじめに

砕波帯近傍における諸問題（例えば、海岸変形、温排水の拡散、沿岸海水の汚染等）に対する関心が最近とみに高まっているが、これらの現象の外力である砕波後の波の特性が十分に明らかになっているわけではない。砕波後の波の特性が十分に明らかになっていない理由の1つとしては、現地における観測が極めて困難なことが挙げられる。近年の計器の著しい発達は、その問題を解決しつつある。現在においては工学的に十分満足できる精度で砕波帯内の波を観測することは技術上可能である。

しかしながら、多点の測点を短期間だけ観測するという目的に対して、現在の段階では、経済的に満足できる計測システムは見当たらない。この目的に沿うために筆者等は同期された何台かの 16mm カメラで砕波帯内に打設したポールを標識として水位変動を撮影する方法を試みている。この方法の利点は、砕波帯内にポールの打設ができさえすれば、容易に多点の波高観測が可能であることである。

逆に、多点のデータが得られる故に、電算処理をするまでのデータの処理に時間と人手が必要な点が大きな欠点である。特に 16mm フィルムアナライザーの映像を電氣的に処理できる装置を持たなければ、すみやかな解析は期待できない。

このシステムの第1回の試行は、1977年12月9日に阿字ヶ浦でなされた。阿字ヶ浦が選ばれた理由は、この海岸に建設省土木研究所の漂砂観測用の棧橋があり、この棧橋を利用すれば撮影に極めて好都合であるからである。第1回目の試行では、棧橋より約80m北側に砕波点より汀線まで約2m間隔で、30本のポールを打設し、棧橋上の7台の同期された 16mm メモーションカメラで波浪を観測した。しかしながら、ポールの打設法に問題があり、砕波点近傍のポールの破損を来し、肝心の境界条件である砕波点のデータが得られなかったり、また 16mm カメラの2台に故障が生じ、十分に満足できるデータを取得することができなかった。しかしなが

ら、興味ある結果が得られたので、その一部は第25回海岸工学講演会に発表した〔堀田・水口(1978)〕¹⁾。

第2回目の試行を1978年7月5日に実施した。第1回目の経験に基づき、ポールの設置法、16mm メモーションカメラの同期装置の一部改良などを実施したにもかかわらず、再度ポールの破損、カメラの故障が生じ、意図した完全なデータは得られなかった。

データの欠損は、主として汀線付近に生じ、波の遡上がり等、汀線近傍の現象を論ずるには不都合がある。しかし、砕波帯の外より汀線までほぼ砕波帯全体に渡ってデータが得られたので、その解析結果をここに報告する。尚、主として波の統計的性質に関する項目についてのみ報告する。スペクトル的な議論は稿を改めることにする。

2. 現地観測と解析

(1) 現地観測

現地観測は、茨城県那珂湊市阿字ヶ浦海岸にある建設省土木研究所の漂砂調査用棧橋を利用して、昭和53年7月5日に実施した。棧橋より北側に50m離れた地点に汀線に直角にポール間隔約2mの全長120mに及ぶ1列のポール群を打設した。棧橋上に同期された11台の16mm メモーションカメラを据え、ポールを通過する波を撮影した。1台のカメラの撮影区間は約10mで6本のポールが写し込まれている。但し、岸側より1台目のカメラの撮影区間は約14mで8本のポールが写し込まれるようにし、ポール列全長が撮影できるようにした。撮影間隔は、0.2秒で約768秒(3840コマ、12.8分)の観測がなされた。観測時の概略の砕波波高 1.2~1.5m、周期 8~10秒、砕波帯の幅約80mで砕波帯の外側までのデータが得られている。

写真-1, 2に棧橋上のカメラとポール群を示す。

(2) データの解析

こま送り可能なプロジェクターでフィルムを壁面に投影し、ポール先端を基準として水位を読み取った。最小読み取り値は2cmである。カメラの故障および取扱上の不注意があり、観測時間全体、又は、1部のデータが得られなかった。

* 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工修 中央大学助教授 理工学部土木工学科

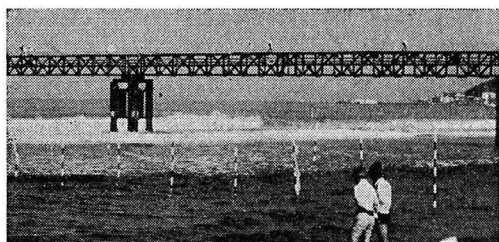


写真-1 栈橋上の 16 mm カメラ群およびポール群

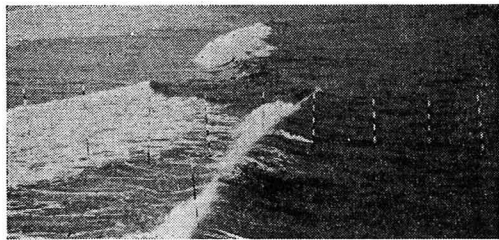


写真-2 栈橋上よりみた砕波点附近のポール群

すなわち、ポール番号 26, 29, 30, 31, 32 の有効データは、観測開始後 168 秒から 788.6 秒までであり、ポール番号 18, 19, 20, 21, 22 の有効データは、観測開始後 284 秒までである。ポール番号 13, 14, 15, 16, 17, 及び 8 以下はカメラの故障のためデータはない。尚、45, 47, 59 は、ポールの破損のためにデータは得られていない。

3. 観測結果

(1) 波形記録

図-1 に観測された波形記録の例を示す。観測開始後 6 分から 9 分までの記録である。観測開始後 3 分程度は比較的小さい波で、以後数分の高い波群が来襲しているが、その高い波群の後半とそれに引き続く低い波群の 1



図-1 観測された代表的な地点の波形記録

部である。示されているポール番号は次のような特性を持っている点である。すなわち、

57: 砕波のない浅海領域

49: shallowing による波高の増大しつつある点、又は大きな波の幾つかは砕波する点でもある。

44: $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ の値が最大になる点 [図-3(b)] フィルムでもこの近傍で砕波する波が最も多いことが観察できる。

39: 平均的にみて砕波による波高の減衰中の点。

33: 砕波による急激な波高減衰が止まり、再成波として進行を始める点。

23: バーの頂部。

11: trough より出て run-up に入ろうとする点。

これらの波形記録から後に示される統計的処理後の結果を示唆する幾つかな特徴をあげることができる。すなわち、(i). zero down cross 法による波の定義は zero up cross 法による波の定義よりは適当であろうということ、(ii). 波高の増大とその減衰の傾向、(iii). 砕波後、岸に近づくにつれて波の数が増えることなどである。 [図-4 (a)]

(2) 波高分布変化

砕波帯内の波の統計的

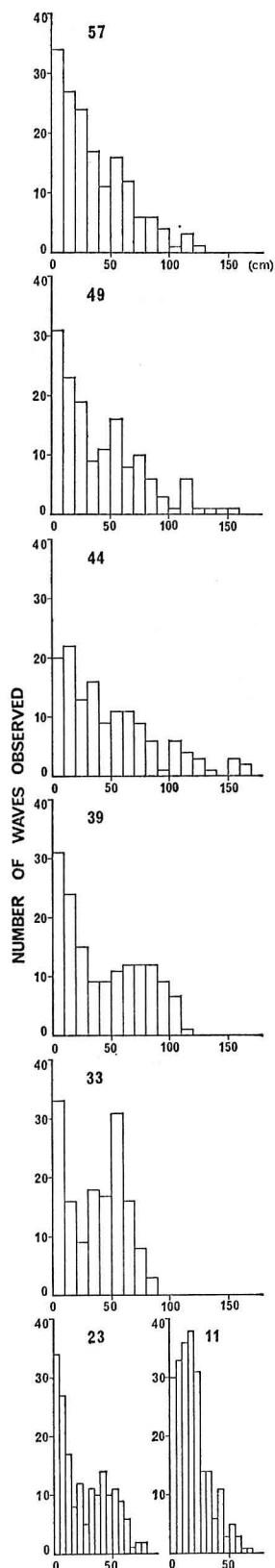


図-2 観測された代表的な地点の波高のヒストグラム

性質を論じるために図-1に示すような砕波帯付近の特徴的な領域を代表すると思われる点での波高の出現ひん度ヒストグラムを作製したものが図-2である。観測技術および読み取り精度上の問題から波高の小さい波については信頼性が小さいことを念頭に入れて図-2を見れば以下のことが読みとれよう。すなわち、1) 砕波点以沖の波高の出現ひん度は波数が100波あまりと統計処理の限界であることを考慮すればほぼレーレー分布に近い(ポール 57)。2) 砕波点に近づくにつれて浅水効果が現われ、全体として波高の大きい方にずれていく(ポール 49)。3) 図-3(b)に示すように、 $H_{1/10}$, $H_{1/3}$, $\bar{H}$ とともに

4) 砕波した波の急激な波高減衰と、まさに砕波に入ろうとする波が存在するポール 39 でのヒストグラムは波高の高い方で平坦で台形的になり、波高の大きい側で鋭く落ちているのが特徴である。5) 砕波による急激な波高減衰の末端にある地点であるポール 33 の特徴は、砕波による最大波高の制限と小波高の波の浅水効果による波高増大によって、波高の大きい側での頻度が高くなり、平均波高に対する超過確率が0.5以上にもなり、完全にレーレー分布から外れることであろう。6) パーの頂点であるポール 23 の地点は、フィルムによると前面にある凹部よりの反射が時折見られ、この反射波と岸側に進行する波とが重ね合って、進行波の波高を高めたり、或は砕波を生ぜしめている。この砕波が波の数を増し、且つ波高の大きい方と小さい方に波を分け、図-2(23)に示されるようなヒストグラムを来たすものと思われる。7) ポール 11 においては、ポール 23 との間に見られる凹部において完全に再成された波が2次砕波に入るための浅水変形を始めていて[図-3(b)], ヒストグラムの特徴は、ポール 57 ないし 49 に相似のようである。凹部及び汀線側のデータが欠測となったため2次砕波時の特性を議論できないのは惜しまれる。

以上各地点での特徴についてのべてきたが、まとめると次のように言えよう。砕波点にさしかかった波は浅水効果により波高を増大させながら、主として波高-水深比で定まる砕波条件に従って波高の大きいものから砕波して、個々の波に着目する議論は、主たる波と付随的な波に関するものにわけられる。図-1に見られるように主たる波峰は、ほぼ全域にわたり同定可能であり、その意味で波の数は不変であるが、砕波帯内特有の水面変動の乱れが付随的な波となるのである。尚、分散関係が個々の波(峰)について異なる結果、少なくとも波の周期および波長はその保存波的な意味を失うことになる。

(3) 統計的性質

図-3(a), (b) は、それぞれ周期および波高に関する統計的処理の結果の諸量を表わしている。周期に関しては、砕波後平均周期が減少していることおよび zero down cross 法と zero up cross 法による $T_{1/3}$, $T_{1/10}$ にばらつき方に差があることが特徴的である。前者は既にのべたように砕波にともなう水面変動の乱れを反映するものである。後者は zero down cross 法による周期の変動が少ないことから、砕波後の波として zero down cross 法による定義の合理的なことを示していると言えよう。砕波帯付近の波高の定義として波峰後面の立

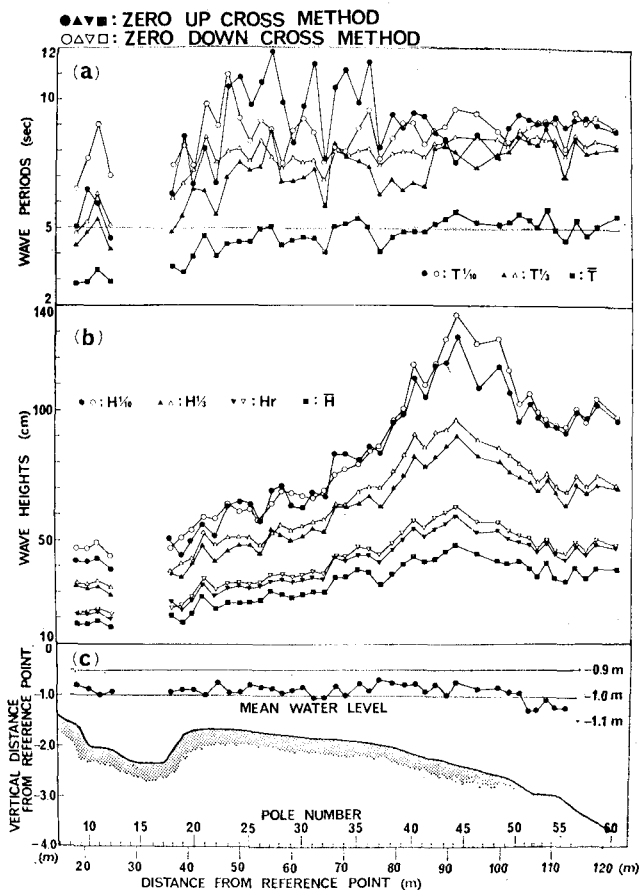
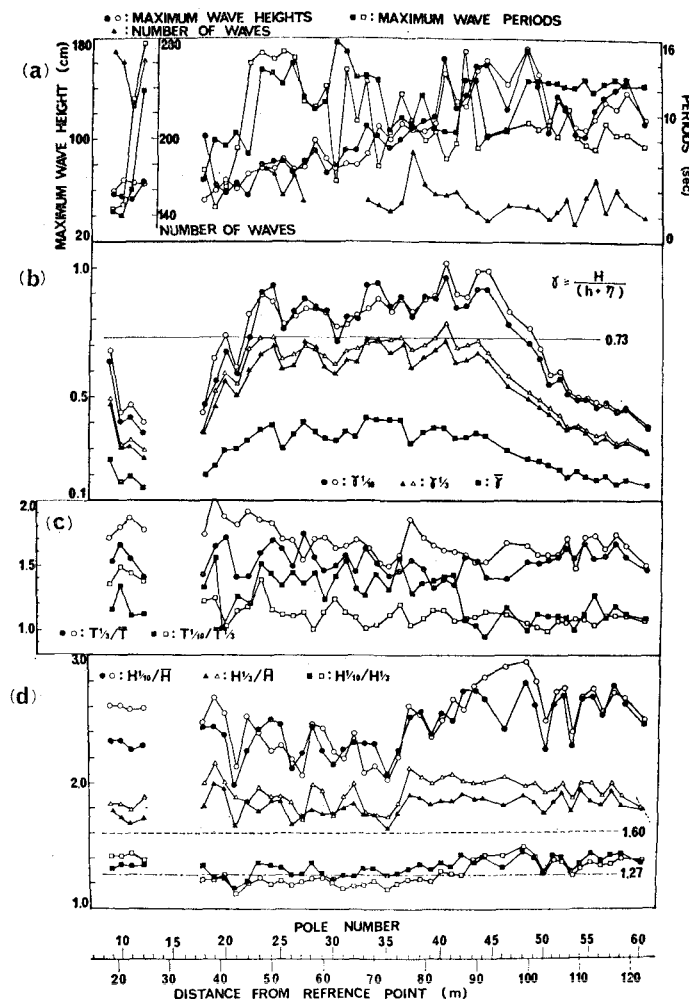


図-3 平均水位の分布及び波の統計的な特徴

ポール 44 で最大値をとり、ほとんどの波がこの点において砕波している。その理由としては、図-3(c)に見るように、ちょうどポール 44 が海底地形勾配の急変点にあったことが第一にあげられる。この点におけるヒストグラムは、砕波が始まり波高増大が頂点になる点であるので、波高分布の幅が広く、高い波が出現している。砕波が主として波高水深比に依存していることを示していると言えよう。波高と水深の比は、図-4(b)にみられるように $\gamma_{1/10}=0.99$, $\gamma_{1/3}=0.68$, $\bar{\gamma}=0.35$ となっている。



図—4 波の統計的諸性質

も下りよりも波峰前面の立ち上りに意味があることは自明であろう。

図—3 (b) における波高に関する諸量は、それぞれ砕波点付近における規則波に対するものとよく似た分布を示している。砕波点付近で急激すぎる程の波高増大を、砕波後は、ほぼ指数的な減衰を示している。一般に zero down cross 法によるものが zero up cross 法による諸量よりも大きいのもひとつの特徴であろう。尚、zero down cross 法および zero up cross 法による差は、定義の上から云って平均量には現われない。

以上、定性的な議論に終始してきた。定量的な議論は、既にのべたように統計処理の段階において、読み取り誤差によると思われる波（例えば波高 2 cm という波）を含めたためにどのポールにおいても、波高の小さい側での波の数が過大評価となる問題があったため、今後の課題とする。例えば、ポール 55 以沖においては砕波する波はほとんどないものの前述のように、波高出現ひん度

も波高の小さい側を除いて始めてレーレー分布に近くなる。その結果、統計的諸量も一般に小さ目になることになる。図—4 (b), (c), (d) における各量間の比の値も、その誤差を反映していると言えよう。

(4) 平均水位

図—3 (c) に平均水位の分布を示す。地形の鉛直縮尺と平均水位の縮尺が相違することに注意されたい。wave set-up、及び wave set-down に関して、規則波に対しては Longuet-Higgins and Stewart²⁾ (1964) は radiation stress の概念を用いて現象を説明することを試み、Bowen et al. (1968)³⁾ によって実験的に確かめられている。Battjes (1974)⁴⁾ は波高の自乗平均値を用いることによって、規則波と同様に不規則波に対しても radiation stress の概念で wave set-up, set-down を説明できるとし、実験で確認した。

同様に合田 (1975)⁵⁾、樫木・岩田・東 (1978)⁶⁾、日野・柏柳 (1978)⁷⁾ らは radiation stress の概念を用いてこの現象を理論的に考察し、結果として導びかれた式は実験値を定量的に十分に予測できないとしても定性的には現象を説明するとしている。しかしながら、筆者らは前回の現地観測で定量的な議論をするのに基準点の測量上の精度の問題があるとしても定性的には波高の減少に見合う平均水位の上昇は生じていないこと、また地形に伴う単調増加でないことを指摘した。今回の結果についても同様である。図—3 (c) にみられるように平均的な砕波点はポール番号 49 近傍と考えられるがこの地点には wave set-down 生じていない。set-down はそれより幾分沖合に生じている。また、このポール番号 49 からポール番号 33 番までの間に波高は急激に減衰するが、その減衰に見合う水位の上昇はみられない。トラフの部分のデータがないので明らかではないが、この区間では平均水位の下降の傾向があり、ポール番号 10 から波は二次砕波を生じつつ遡り上りに入る部分にて水位は上昇の傾向にある。しかし、この点における平均水位の上昇量はポール 35~45 の区間にみられる上昇量と同じ程度の量である。ポール 9 の岸側ポール 6, 7 当りは swash zone の末端であり、砂面の露出がみられるのでポール 9 を汀線近傍の平均水位の最高上昇量と考えると、汀線近傍にて平均水位が最も高くなるという従来の概念に一致しない。堀川・佐々木ら (1975)⁸⁾ はハイドロリックフィルターを用いて

砕波帯内の平均水位を測定し、平均水位の最高点は汀線近傍ではないという可能性を指摘しているが、その指摘に相当する例であると思われる。wave set-up, wave set-down の現地における現象が複雑なのは現象が三次元的であるのみならず、長周期波との兼ね合いもあるので、これらの観測と合せての議論が必要であろう。

4. 結 論

以上、データの一次処理された結果での特性又は推論を述べてきた。しかしながら、既に述べたように、読み取り精度程度の波を如何に取り扱うかが問題である。無視する波の大きさが統計上の諸量に影響を与えるのは自明である。いくらかの試行錯誤は行なっているが、現在の段階では結論は出ていない。波高減衰、砕波限界、波高分布等に関する定量的な取扱いは、この結論を待つて行うことにする。

尚、現地観測を実施するに当たって、建設省土木研究所海岸研究室長橋本 弘氏、宇多高明氏に特別の御配慮をいただいた。紙上を借りて感謝の意を表す。又、データ解析においては、山田好一氏(都立大学大学院生)、中村昭博氏(明水エンジニアーズ)の多大な協力を得た。尚、この研究の一部は、トヨタ財団研究助成金(研究代

表者、東京大学工学部 堀川清司教授)によってなされたものであることを記し、関係諸機関及び諸氏に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 堀田新太郎・水口 優: 砕波後の波についての現地観測, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 151-154, 1978.
- 2) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stress in water waves, a physical discussion with application, Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-563, 1964.
- 3) Bowen, A. J., D. L. Inman and V. P. Simmons: Wave "Set-down" and "Set-up", J.G.R., Vol. 8, pp. 2569-2577, 1968.
- 4) Battjes, J. A.: Computation of Set-up, Longshore currents, Run-up and Overtopping due to Wind-generated Waves, Dept. of Civil Engineering, Delft University, Report No. 74-2, 1974.
- 5) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告第14巻第3号, pp. 59-106, 1975.
- 6) 榎本 亨・岩田好一朗・東 俊夫: 不規則波による平均水位変動に関する研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 184-188, 1978.
- 7) 日野幹雄・柏柳正之: Wave Set-down, Set-up 及び水粒子軌道速度の推定における Dean の流関数法の適用性, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 18-22, 1978.
- 8) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘: 海浜流に関する研究(第3報), 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 127-134, 1975.