

# 中予海岸における波浪変形の観測(2)

——海底摩擦係数と粗度——

柿 沼 忠 男\*・伊 福 誠\*\*

## 1. 緒 言

近年、工業生産の場として沿岸地域の開発を進め、活動の場を拡大しようとする動きが活発である。特に、総延長 31,000 km にもおよぶ長大な海岸線を有するわが国は、沿岸の土地利用を盛んにし、各種構造物の築造によって、その付加的価値を高めようとしている。

しかし、こうした長大な海岸線も絶えず高波、高潮などの海岸災害をこうむるという危険にさらされている。こうしたことから、沿岸地域の保全および開発にあたっては、各種構造物を築造する海域における、海岸波浪の特性を十分に把握する必要がある。浅海領域においては、波の屈折、回折、水深変化および海底摩擦などの現象による波浪の変形が考えられる。

Bagnold<sup>1)</sup> は、セルロイド板に取り付けた人工粗度を使った振動流による実験から乱流境界層における摩擦係数について論じ、Putnam-Johnson<sup>2)</sup> は、風波およびうねりのエネルギー損失に関して、代表的な摩擦係数の値として 0.01 を提案し、Bretschneider<sup>3)</sup> は、メキシコ湾の浅海における波のエネルギー損失の観測を実施し、海底摩擦係数の値として 0.053~0.08 を得た。Jonsson<sup>4)</sup> は、コンクリートで造った粗な底における振動流の流速測定から、底でのせん断応力およびエネルギー損失について研究し、摩擦係数と相対粗度についての理論式を与え、梶浦<sup>5)</sup> は、摩擦境界層が水深にくらべて小さい波を取り扱い、Bagnold および Motzfeld<sup>6)</sup> の実験を考慮して、摩擦係数と相対粗度についての理論式を提案している。Riedel-Kamphuis-Brebnier<sup>7)</sup> は、数種の粗な sand bed での shear plate を使用した実験から、海底摩擦係数について論じている。また、岩垣・柿沼<sup>8)</sup> は、わが国各地海岸での波浪変形の観測から、海岸摩擦係数を算出し、浅海における波浪予知法を確立するに際して Bretschneider が考慮した値 0.01 よりはるかに大きいことを見出し、著者らは大湊海岸の棧橋で観測して得た波浪資料に基づいて、浅海における海岸波浪の変形を調べた結果、岸に非常に近い領域では、さらに比較的大きな海底摩擦係数

の値を算出することを得ている。

海底摩擦係数に関する研究には、上述した様な実験、理論および現地観測によるものがあるが、まだ不明な点が多く、特に、現地観測に基づく基礎的資料はきわめて少ない。

こうしたことから、この論文は、前報<sup>9)</sup>に引続いて、中予海岸を対象領域として、沖側の平均水深 10 m と岸側の平均水深 7 m に設置した 2 台の水圧式波高計の波浪資料を解析するとともに、海底粗度の観測をも実施して、浅海での海岸波浪の変形における海底摩擦係数についての基礎的資料を得ようとしたものである。

## 2. 観 測 方 法

図-1 は、観測対象とした中予海岸付近図を示すもので、沖側の黒丸および岸側の白丸は、それぞれ、建設省の波高計および愛媛大学の波高計の設置点であり、C-1~C-6 の 6 本の測線は、音響測深機 TDR-48S (玉屋商店(株)製)による海底地形の探索コースであり、丸中の数字は、水中カメラによる海底撮影点を示したものである。音響測深機および水中カメラによる海底地形の観測は、昭和 53 年 7 月 23 日および 9 月 5 日に行なった。

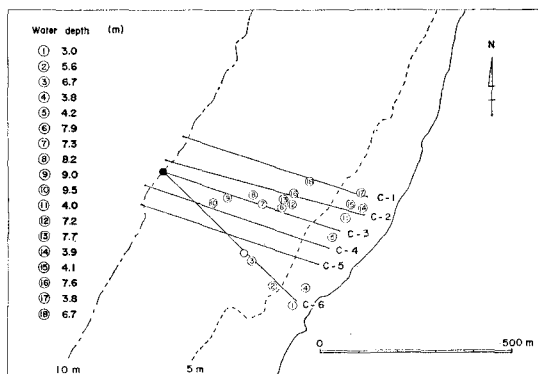


図-1 中予海岸付近図

## 3. 波浪資料の解析

建設省の伊予波浪観測所および愛媛大学の水圧式波高計での、昭和 53 年 2 月 15 日 17 時~20 日 5 時までの 2

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室

時間ごとの波浪資料を解析し、各種平均波の波高、周期、有義波の波形勾配、分散およびパワースペクトルと圧力波の skewness, kurtosis, パワースペクトルおよびバイスペクトルを求めた。なお、ここで得た分散, skewness, kurtosis および両スペクトルは、読み取り間隔 0.48 sec, 読み取り個数 1200 個で、愛媛大学のデジタルトレーサ OT-60 によって読み取り、九州大学の大型計算機および愛媛大学の計算機によって求めたものである。

#### 4. 波浪資料の解析結果

得た有義波高および有義波周期は、沖側と岸側で、それぞれ、0.81~1.93 m および 4.9~6.2 sec, 0.35~1.14 m および 5.0~5.9 sec である。

##### (1) 波浪変形

著者らは、大湊海岸および中予海岸において、有義波高の減衰率は有義波の波高、波形勾配および波高水深比が大きくなるにつれて増大することを見出している。木村・岩垣<sup>10)</sup>は、琵琶湖での波浪観測結果に基づいて、浅海における水位の頻度分布の変化を平均周期-水深無次元量で説明している。図-2 は、単位距離当りの有義波高の減衰率と沖側の有義波周期-水深無次元量との関係を示したものである。この図をみると、有義波周期-水深無次元量が大きくなるにつれて、単位距離当りの有義波高の減衰率は小さくなっているようである。

図-3 は、単位距離当りの有義波高の減衰率と沖側と岸側の skewness の平均値との関係を示したものである。この図をみると skewness が正のものについては、

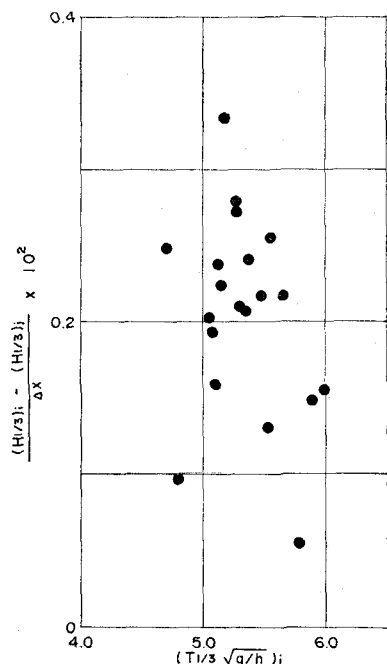


図-2 波高減衰率と有義波周期-水深無次元量との関係

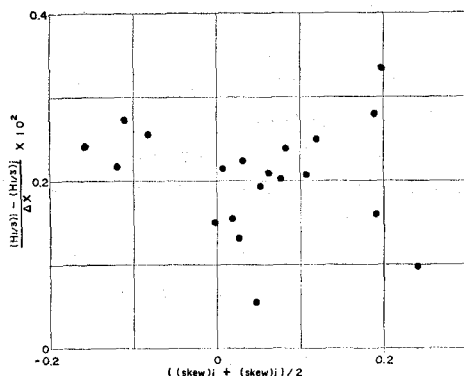


図-3 波高減衰率と skewness の平均値との関係

3点を除くと、skewness が大きくなるにつれて、単位距離当りの有義波高の減衰率も大きくなっているようである。

##### (2) バイスペクトルの変形

前報<sup>9)</sup>に引続いて、沖側の観測点から岸側の観測点にいたるまでの変形を 20 例について検討し、解析した 20 例を 6 つの分布型に分類した。図-4 (a), (b) は、代表的な 2 例を示すもので、(a) は有義波高の減衰率が最大のもので、このような分布型は 11 例と最も多く、

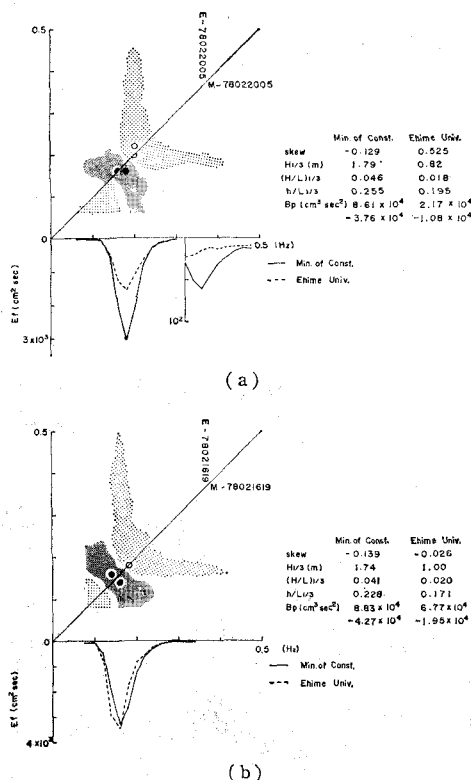


図-4 バイスペクトルの変形例

\* 9) 中, 沖側の skewness およびバイスペクトルの符号 ± を 干 に訂正。

(b) は1例と最も少ないものである。なお、これらは有義波高が減衰している資料に対応したものであるが、図中には、沖側および岸側の観測地点の圧力変動のパワースペクトルも、実線および破線によって示してある。密な影の部分は、パワースペクトル密度が正でかつパワースペクトルピーク値の20%よりも大きい領域、粗な影の部分は、パワースペクトル密度が負でその絶対値が負のパワースペクトルピークの絶対値の20%よりも大きい領域を示している。● および ○ は、それぞれ、正および負のパワースペクトルピークの位置を示している。一般的傾向として、沖側および岸側では、正のパワースペクトルピーク値が負のパワースペクトルピークの絶対値より大きく、6例を除いては、沖側の正のパワースペクトルピーク値は、岸側のそれよりも大きい。(a) は、沖側での有義波高 1.79 m, 有義波周期 5.2 sec, 風速 10.0 m/sec に対応するものである。パワースペクトルの第1ピークは約 50% 減衰しており、沖側では 0.36 Hz に第2ピークが生じている。パワースペクトルのピーク周波数を境にして、沖側では高周波側に負、低周波側に正の領域が生じ、岸側でも高周波側に負、低周波側に正の領域が生じ、それぞれの領域内に正および負のパワースペクトルにピークが存在している。また、沖側では、パワースペクトルの第1ピークの低周波側の裾にさらに正の領域が生じている。(b) は、沖側での有義波高 1.74 m, 有義

波周期 5.5 sec, 風速 8.0 m/sec に対応するものである。有義波高は、約 40% 減衰しており岸側の skewness も負である。沖側および岸側とも、パワースペクトルのピーク周波数を境にして高周波側に負、低周波側に正の領域が生じ、さらにパワースペクトルのピーク周波数の裾に負の領域が生じ、正および負のパワースペクトルピーク値も同じ位置にあり、両者とも非常に良く似た形をしているようである。

### (3) 海底摩擦係数

図-5 は、図-1 に示した C-1~C-6 の6本の測線下の海底地形を示したものである。この図をみると、水深 6 m 付近までの平均海底勾配は、 $1.0 \times 10^{-2}$  で、小さな起伏が連続していることがわかる。表-1 は、図-5 をもとにして、海底の起伏の山と山および山と谷を平均水深 7 m まで各測線ごとに読み取り平均したものである。水中カメラによる海底状況の撮影結果から、海底には、岩盤の上に高さ約 10~40 cm, 幅約 30~60 cm の岩石が散存していることが判った。また、観測場所の汀線付近には、高さ約 10 cm, 幅約 20 cm 程度の石が散存している。

沖側と岸側での解析結果から、Bretshneider-Ried<sup>11)</sup> の一様な海底勾配に対する海底摩擦係数の算定式をもとに、有義波法により、海底摩擦係数を算定した。

観測領域の海底は岩盤であるため、浸透効果による

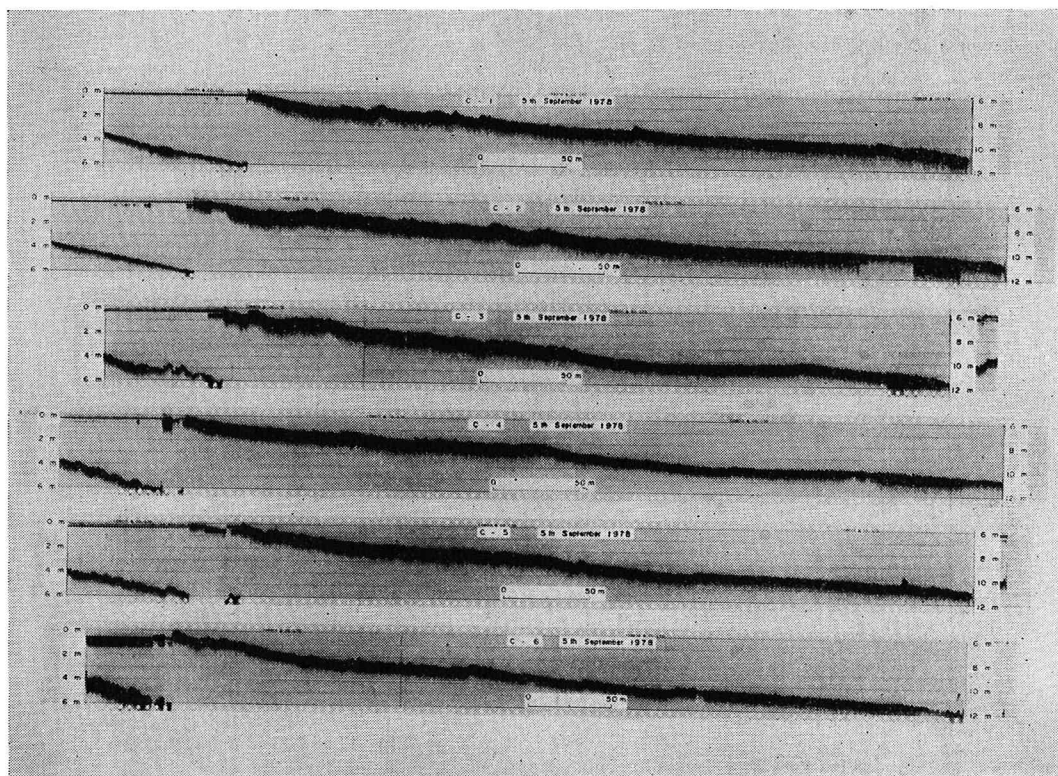


図-5 音響測深機による海底地形

表-1 粗 度

| Course No. | $k$ (cm) | $k$ (cm) | $k$ (cm) |
|------------|----------|----------|----------|
| C - 1      | 296.3    | 148.2    | 13.8     |
| C - 2      | 287.4    | 143.7    | 9.1      |
| C - 3      | 247.1    | 123.6    | 12.7     |
| C - 4      | 290.2    | 145.1    | 9.8      |
| C - 5      | 275.4    | 137.7    | 12.8     |
| C - 6      | 277.2    | 138.6    | 15.8     |
| Mean       | 278.9    | 139.5    | 12.3     |

波高減衰係数は 1.0 とし、冬季節風時の卓越波向 WNW、周期 5 sec および 6 sec の波に対しては屈折係数は 1.0 である。

解析した波浪資料の沖側および岸側での有義波の水深波長比は、それぞれ、0.22~0.30 および 0.15~0.22、また、最大波高と水深との比は、それぞれ、0.16~0.38 および 0.14~0.29 である。得た海底摩擦係数の値は、1.55~7.86 であり、浅海における波浪予知法を確立するに際して Bretschneider が考慮した値 0.01 よりはるかに大きく、また、岩垣・柿沼がわが国各地の海岸での現地観測から得た値よりも大きい。

図-6 は、海底摩擦係数と相対粗度との関係を示したものである。この図をみると、中予海岸において、海底粗度を山~山に取った場合には、海底摩擦係数は、Jonsson の理論値よりも約 15~80% 小さくなり、山~山の 1/2 に取った場合には、Jonsson の理論線には比較的よく一致しているが、梶浦および Kamphuis<sup>12)</sup> の理論値よりは小さくなっているようである。山~谷にとった場合には、Jonsson および 梶浦の理論値の、それぞれ、7~25 倍および 5~20 倍になっている。また、図中には、著者の一人が、日吉津、二色の浜および高浜海岸で得た粒

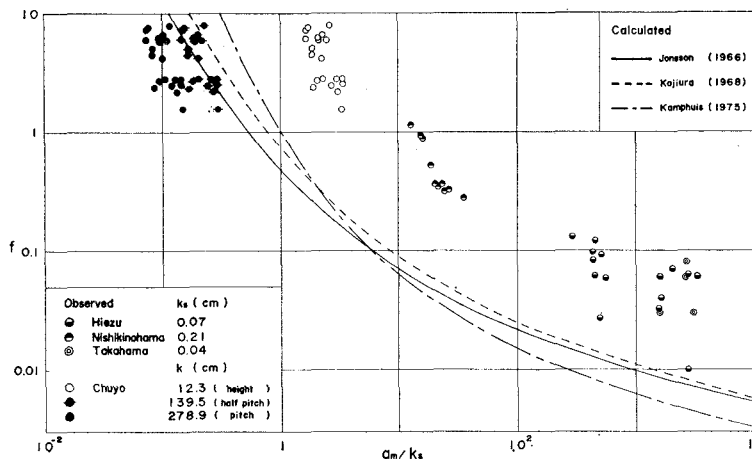


図-6 海底摩擦係数と相対粗度との関係

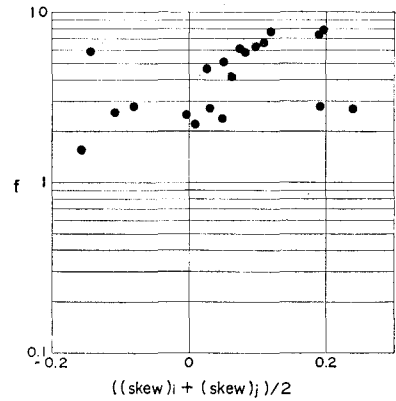


図-7 海底摩擦係数と skewness の平均値との関係

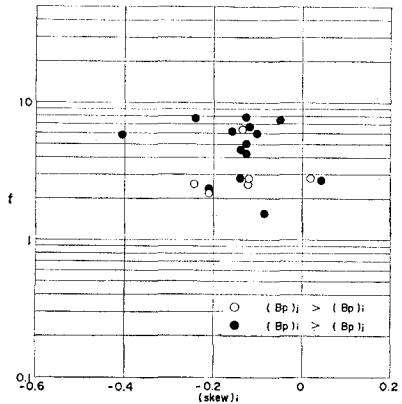


図-8 海底摩擦係数と沖側の skewness との関係

度分布から、Kamphuis<sup>13)</sup>に従って得た Nikuradse の相当粗度を使った結果も示してある。図をみると、日吉津、二色の浜および高浜海岸での観測結果は、Jonsson および 梶浦の理論値の、それぞれ、1.4~9、10~24 および 3.5~11 倍、1.2~8、9~20 および 3~10 倍であることがわかる。中予海岸で海底粗度を山~谷に取った結果、

日吉津、二色の浜および高浜海岸の結果は、いずれも、Jonsson、梶浦および Kamphuis の理論値よりも大きく相対粗度が大きくなるにつれて、海底摩擦係数は小さくなり、似た傾向を示しているようである。

図-7 は、海底摩擦係数と沖側と岸側の skewness の平均値との関係を示したものである。この図をみると、ばらつきはあるが、skewness が大きくなるにつれて海底摩擦係数も大きくなっているようである。図-8 は、海底摩擦係数と沖側の skewness との関係

を示したものである。この図をみると岸側の正のバイスペクトルピーク値が沖側のそれよりも大きいものは、海底摩擦係数は小さめであることがわかる。

## 5. 結 語

以上、著者らは、中予海岸に設置した2台の水圧式波高計の波浪資料および海底粗度の観測結果に基づいて、浅海における海岸波浪の変形を調べた結果、有義波高の減衰率は、有義波周期-水深無次元量が大きくなるにつれて小さくなること、沖側と岸側の skewness の平均値が正の場合、その値が大きくなるにつれて大きくなること、沖側および岸側とも、正のバイスペクトルピーク値は、負のバイスペクトルピークの絶対値より大きく、20例中6例を除いては、沖側の正のバイスペクトルピーク値は、岸側のそれよりも大きいこと、海底摩擦係数の値は、1.55~7.86であり、岩垣・柿沼が、わが国各地の海岸で得た値よりも大きいこと、海底摩擦係数と相対粗度との関係では、観測値は、Jonsson, 梶浦および Kamphuis の理論値よりも大きく、相対粗度が大きくなるにつれて、海底摩擦係数は小さくなること、skewness が大きくなるにつれて、海底摩擦係数も大きくなること、海底摩擦係数と沖側の skewness との間には、岸側の正のバイスペクトルピーク値が沖側のそれよりも大きいものは、海底摩擦係数は小さめであること、などを見出した。

今後、こうした成果に基づいて、さらに多くの資料を解析するとともに海底の地形を詳細に調べて、浅海での海岸波浪の変形における海底摩擦係数について調べていきたいと思う。

最後に、この研究を進めるにあたり、快く資料を提供して下さった建設省四国地方建設局松山工事事務所の方々に謝意を表す。なお、この研究が文部省科学研究費試験研究(代表者 名古屋工業大学細井正延教授)によ

る研究の一部であることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) Bagnold, R. A.: Motion of waves in shallow water; Interaction between waves and sand bottoms, Proc. Roy. Soc. London A, Vol. 187, pp. 1~18, 1946.
- 2) Putnum, J. A. and J. W. Jonsson: The dissipation of wave energy by bottom friction, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, pp. 67~74, 1949.
- 3) Bretschneider, C. L.: Field investigation of wave energy loss of shallow water ocean waves, B.E.B., Tech. Memo. No. 46, pp. 1~21, 1954.
- 4) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., pp. 127~148, 1967.
- 5) Kajiura, K.: A model of the bottom boundary layers in water waves, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 46, pp. 75~123, 1968.
- 6) Motzfeld, H.: Die turbulente Strömung an welligen Wänden, Z. angew. Math. u. Mech., Vol. 17, pp. 193~212, 1937.
- 7) Riedel, H. P., Kamphuis, J. W. and Brebner, A.: Measurement of bed shear stress under waves, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., pp. 587~603, 1972.
- 8) 岩垣雄一・柿沼忠男: 浅海における波浪スペクトルの変形と海底摩擦係数の推定について, 京都大学防災研究所年報, 第8号, pp. 379~396, 1964.
- 9) 柿沼忠男・伊福 誠: 中予海岸における波浪変形の観測, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 175~178, 1978.
- 10) 木村 晃・岩垣雄一: 水深変化にともなう不規則波の水位の頻度分布の変化について, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 39~40, 1976.
- 11) Bretschneider, C. L. and R. O. Reid: Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction, B.E.B., Tech. Memo. No. 45, pp. 1~36, 1954.
- 12) Kamphuis, J. W.: Friction factor under oscillatory waves, Proc. ASCE. Jour. Waterways Harbors and Coastal Eng. Division, Vol. 101, No. WW2, pp. 135~144, 1975.
- 13) Kamphuis, J. W.: Determination of sand roughness for fixed beds, Journal of Hydraulic Research, Vol. 12, No. 2, pp. 193~203, 1974.