

3 次元波浪場における反射率の推定法

Estimation Method of Reflection Coefficient in Three Dimensional Wave Field

伊 福 誠 *
Makoto Ifuku

The estimation method of reflection coefficient is proposed. This method is the modified one which is proposed by Guza et al. and assumed to the linear long wave theory, and moreover, dealt with the three dimensional wave field, while Guza et al. dealt with the two dimensional one. The reflection coefficient calculated by present method was compared with it by the directional spectrum which is calculated by maximum entropy method. The agreement between the estimated value and it by the directional spectrum is satisfactory.

Keywords : reflection coefficient, long wave, directional spectrum

1. はじめに

不規則波を対象とした海浜や構造物による反射率の推定にあたっては、不規則な波列を入射波と反射波に分離することが重要となる。これまで、造波水槽内の反射率の測定法は鹿島¹⁾による相関関数法や合田ら²⁾によるFFT法を利用する分離法等がある。しかしながら、これらの方法は2次元を対象としたものであり、方向性を有する現地海岸における不規則波を対象とする場合あるいは波が構造物に斜めに入射する場合には上述した分離法が妥当であるか否かは定かではない。とくに、現地海岸における不規則波の反射率を推定するには各成分波の方向特性を精度良く把握することが重要となる。

著者³⁾は現地海岸の砕波帯において観測して得た圧力変動量と水平方向流速の記録から方向スペクトルを算出し、各成分波の主方向とその反射方向のエネルギー密度から反射率を算出し、得た反射率はBattjes⁴⁾が提唱したsurf similarity parameterとの関係から得た値より6～20%程度小さいことを得ている。さらに、長波を仮定して入射波と反射波を分離するGuzaら⁶⁾の方法を用い砕波帯における長周期波の反射率を算出し、方向スペクトルから求めた反射率との比較から両方法で算出した反射率は定性的・定量的に一致することを得ている⁵⁾。また、Guzaらの方法を修正し、2次元の波浪場を対象とした入・反射波の分離法がMizuguchi⁷⁾によって提案されている。

現地海岸における不規則波を対象とした入・反射波の分離法および分離した量から算出される反射率の推定にあたっては高い分解能を有する方向スペクトルの推定法の開発が必要不可欠である。橋本・小舟⁸⁾は、最大エントロピー原理から方向スペクトルを推定する方法を開発し、Longuet-Higginsら⁹⁾の直接フーリエ変換法や磯部ら¹⁰⁾の拡張最尤法および現地データとの比較から3成分の観測データを対象とする場合には推定精度が最も高いことを得ている。しかしながら、うねりと風波が重合するような双峰型の方向分布関数を有する場合には真のスペクトルとは若干の差がある。橋本・小舟の推定法がこれまで報告されている推定法に比較して精度の高いものであることは否めないが、ラグランジュの未定乗数の算出法には検討の余地があるように思える。

こうしたことから、2次元の波浪場を対象としたGuzaらの入・反射波の分離法を3次元に拡張した入・反射波の分離法(以下、特性法と呼ぶ)について述べるとともに、橋本・小舟の方法(以下、MEPと呼ぶ)やLonguet-Higginsらの方法(以下、LHMと呼ぶ)から得られる反射率との比較から推定法の有用性について検討しようとするものである。

2. 3次元を対象とした反射率の算出法

任意の点における水面変動量 η と岸沖方向流速 u および沿岸方向流速 v から長波を仮定し、入射波成分と反射波成分に分離する(図1)。

x および y 方向の流速成分は

$$u = \eta \cos \theta \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad v = \eta \sin \theta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (1)$$

*正会員 愛媛大学工学部土木海洋工学科 (790 松山市文京町3番)

となる。ここに、 u および v は、それぞれ岸沖方向および沿岸方向の流速成分、 η は水面変動量、 θ は波向線と x 軸とのなす角度、 g は重力の加速度、 h は水深である。

水面変動量、岸沖方向および沿岸方向流速が入射波成分と反射波成分の線形重ね合わせで表現できるものとすれば、

$$\eta = \eta_I + \eta_R, \quad u = u_I - u_R, \quad v = v_I - v_R \quad (2)$$

のように表される。ここに、 η_I, η_R は水面変動量の入射波成分、反射波成分、 u_I, u_R は岸沖方向流速の入射波成分、反射波成分、 v_I, v_R は沿岸方向流速の入射波成分、反射波成分である。

岸沖方向の入射波および反射波成分は次式で算出される。

$$u_I = (\eta \cos \theta \sqrt{\frac{g}{h}} + u) / 2, \quad u_R = (\eta \cos \theta \sqrt{\frac{g}{h}} - u) / 2 \quad (3)$$

また、沿岸方向の入射波および反射波成分は次式で算出される。

$$v_I = (\eta \sin \theta \sqrt{\frac{g}{h}} + v) / 2, \quad v_R = (\eta \sin \theta \sqrt{\frac{g}{h}} - v) / 2 \quad (4)$$

ここに、 $\cos \theta = |u| / \sqrt{u^2 + v^2}$, $\sin \theta = |v| / \sqrt{u^2 + v^2}$ である。

規則波を対象とする場合、岸沖および沿岸方向流速の入射波成分と反射波成分の振幅を U_I, U_R および V_I, V_R とすると、反射率は次式で算出される。

$$K_R = \frac{\sqrt{U_R^2 + V_R^2}}{\sqrt{U_I^2 + V_I^2}} \quad (5)$$

一方、不規則波を対象とする場合、式(3)、(4)で算出される入射波成分および反射波成分のエネルギー密度を E_{xI}, E_{xR} および E_{yI}, E_{yR} とすると、反射率は次式で算出される。

$$K_R = \frac{\sqrt{E_{xR}^2 + E_{yR}^2}}{\sqrt{E_{xI}^2 + E_{yI}^2}} \quad (6)$$

なお、2次元の場合は沿岸方向の流速を考慮しないので式(5)あるいは(6)中の V_I, V_R あるいは E_{yI}, E_{yR} が 0 となる。

3. 実験および観測

実験は多方向不規則波造波装置(三井造船(株)製)を有する東洋建設株式会社の平面水槽を用いて行われた。計測機器は、容量式波高計(計測技研(株)製)と超音波式流速計(電子工業(株)製)である。平面水槽の概要、多方向不規則波造波装置、波高計および超音波式流速計の配置は図2のようである。波の入射角は Run No.IW-1, 2, 3 および 4 が、それぞれ $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ および 45° である。また、Run No.IW-5,6 および 7 は方向関数として次式で示される光易型を用い、方向集中度パラメーター $S_{\max}$ は、10, 25 および 50 である。

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (7)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (8)$$

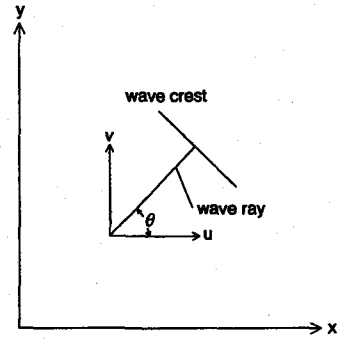


図 1 座標系

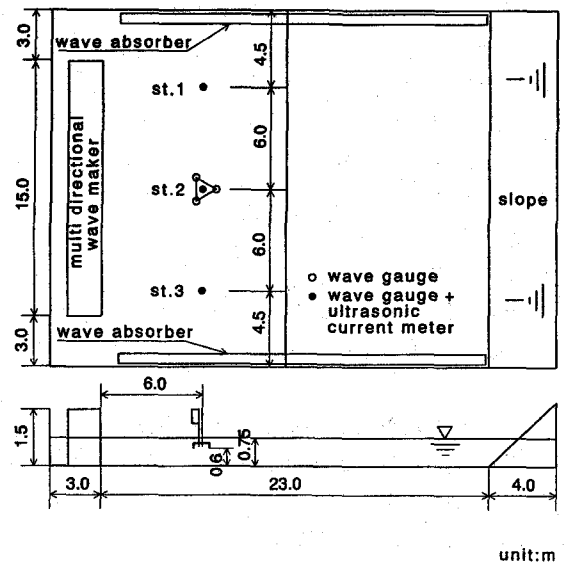


図 2 実験水槽および計測機器の設置位置

- 161 -

ギ密度と比較するとかなり小さく、その傾向はピーク周波数付近で顕著である。(b)はピーク周波数の主方向が 5° の場合である。2次元と3次元の x 方向の入射波成分のエネルギー密度と反射波成分のそれはピーク周波数より低周波数側において差が大きい。さらに、3次元の y 方向の入射波成分と反射波成分のエネルギー密度は、 0.1 Hz より低周波数側を除けば両者の差は小さい。また、3次元の y 方向の入射波成分のエネルギー密度は、2次元および3次元の x 方向のそれらに比較するとかなり小さい。

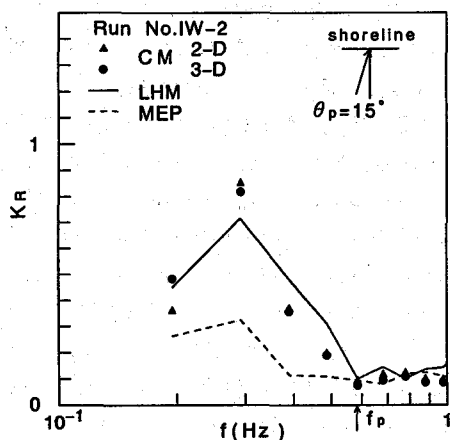
4.2 反射率

反射率の周波数特性を示したのが図4であり、(a),(b)および(c)は、それぞれ実験水槽、梅津寺海岸で得た1月および3月のデータをもとに計算したものである。図中のCM2-D, CM3-D, LHMおよびMEPは、それぞれ2次元、3次元の特性法、LHMおよびMEPから算出した反射率である。汀線に対しての角度はピーク周波数の主方向を示す。なお、LHMおよびMEPによる方向スペクトルの計算法は参考文献1)および2)を参照して頂きたい。

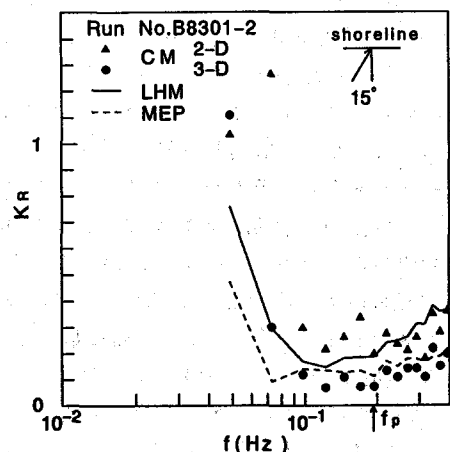
水槽実験のデータを用いて計算した(a)をみると、ピーク周波数より高周波数側では2次元、3次元の特性法、LHMおよびMEPで算出した反射率はほぼ同一である。しかしながら、ピーク周波数より低周波数側では特性法で算出した反射率はほぼ同一であるが、LHMとMEPで算出した反射率にはかなり差がある。梅津寺海岸で得た1月のデータを用いて計算した(b)をみると、 0.05 Hz を除くすべての周波数において2次元の特性法で算出した反射率は3次元の特性法で算出したそれらより大きく、LHMで算出した値とよく似た傾向をしている。また、特性法の3次元で算出した反射率は、低周波数側を除けばMEPと定性的には一致するが、MEPで算出した値より小さい。梅津寺海岸で得た3月のデータを用いて計算した(c)をみると、ピーク周波数より高周波数側では2次元、3次元の特性法、LHMおよびMEPから算出した反射率は(b)よりも大きい。こうした反射率の増大は、水深が浅くなるにつれて汀線と流速計設置点との距離が減少するためではないかと考える。また、ピーク周波数付近では特性法の2次元と3次元で算出した反射率はMEPで算出したそれとほぼ同一であるが、高周波数側ではかなりの差がある。

図5にMEPと3次元の特性法によって算出した反射率の周波数特性を示す。計算に用いたデータは梅津寺海岸における1月のものである。MEPで求めた反射率は、上部と下部における流速を用いて算出した場合には 0.1 Hz より高周波数側では両者の反射率はほぼ同一である。しかしながら、中間部の流速を用いて算出した反射率は、 0.2 Hz より高周波数側では周波数が増大するにつれて増大する。また、上部および中間部の流速を用いて算出した反射率は、 0.1 Hz より低周波数側ではほぼ同一であるのに対し、下部の流速を用いて算出したそれは上部および中間部の流速を用いて算出したそれらよりも大きい。

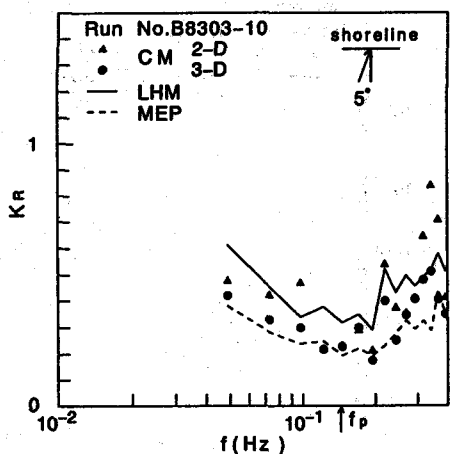
一方、特性法で求めた反射率は 0.1 Hz より高周波数側では上部、中間部、下部の順に大きくなる。なお、ピーク周波数付近では下部の流速を用いて算出した反射率は、上部の流速を用いて算出したその1.5倍程度である。中間部の流速を用いて算出した場合、 0.1 Hz よりピーク周波数付近にかけては特性法と



(a)



(b)



(c)

図4 反射率の周波数特性

MEPで求めた反射率は定性的・定量的に一致している。しかしながら、上述した周波数帯において上部および下部の流速を用いて算出した反射率は、中間部の流速を用いて算出したそれらの1/2程度および1.5~2程度である。なお、0.1 Hzより低周波数側では特性法で求めた反射率はMEPによるその1.5~3倍程度である。底面からの高さが異なる位置で得たデータを用いて算出した反射率の周波数特性に違いが生ずる理由としては戻り流れ等の存在のため、流速の鉛直構造が異なることが考えられる。

以上のことから、自然海浜における反射率が0.05~0.2程度であるということ¹¹⁾を考えれば、ここで提案した特性法による反射率の推定法は有用であると考えられる。なお、その際に用いる流速データはできるだけ水表面に近い位置で測定したものを用いるべきである。

図6は ξ_0 ($\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{(H/L)_0}$; $\tan \beta$: 海浜勾配)と3次元の特性法によって算出した反射率との関係を示したものである。なお、流速データは上部のセンサーで得たものを用いた。また、 ξ_0 は観測地点で得た有義波高と有義波周期から求めた沖波の波形勾配と梅津寺海岸の平均海底勾配を用いて算出した。図中の○および●は、それぞれ梅津寺海岸における1月および3月のものである。1月のデータは水深、有義波高、有義波周期および碎波頻度がほぼ同一であるため反射率に顕著な差は見られない。一方、3月のデータは水深の減少とともに汀線から流速計の設置位置までの水平距離は減少し、有義波周期は徐々に長くなり碎波頻度は増大するため ξ_0 が増大するにつれて反射率も増大する。こうした傾向はBattjesが得たsurf similarity parameterと反射率との関係とよく似ている。

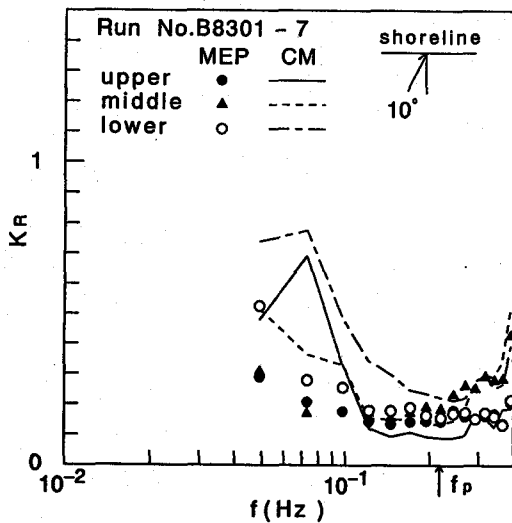


図5 MEPと特性法との比較

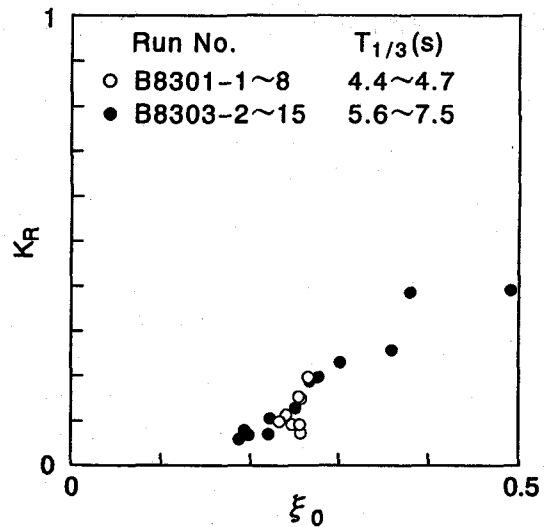


図6 KRと ξ_0

5. おわりに

本研究では特性法による3次元を対象とした反射率の推定法について調べた。得た結果についてを要約すると以下ようになる。

方向分布関数から求めたピーク周波数の主方向がほぼ 0° である場合、特性法の2次元と3次元で算出した反射率にほとんど差はないが、主方向が 0° より大きくなると両者で算出した反射率に差が生じる。

現地観測で得たデータをもとに2および3次元の特性法で算出した反射率はMEPで求めた反射率より小さく、ピーク周波数付近の反射率は経験的に得られている値0.05~0.2とほぼ同一であることから提案した反射率の推定法は有用であると考えられる。

しかしながら、低周波数側および高周波数側においては必ずしも満足いく精度で推定できるとは言い難い。今後は、こうした周波数帯における推定法の精度向上に努めることが残された課題であると考えられる。

なお、本研究で使用した実験水槽の資料は、東洋建設株式会社から提供されたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 鹿島達一：不規則な波の入射および反射エネルギー Spektral の測定法について，第15回海岸工学講演会論文集，pp.91-96，1968.

- 2) 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：不規則波実験における入・反射分離法，港湾技研資料，No.248，24p., 1976.
- 3) 伊福 誠・柿沼忠男・油井秀人：砕波帯における方向スペクトルの観測例，第31回海岸工学講演会論文集，pp.30-34, 1984.
- 4) Battjes, J.A. : Surf similarity, Proc.14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.466-480, 1974.
- 5) 伊福 誠・高石盛大・柿沼忠男：傾斜海浜上における長波の伝播，海岸工学論文集，第36巻，pp.99-103, 1989.
- 6) Guza, R.T., E.B.Thornton and R.A.Holman : Swash on steep shallow beaches, Proc.19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.708-723, 1984.
- 7) Mizuguchi M. : Note on a method to separate incident and reflected waves, Coastal Eng. Japan, Vol.33, No.2, pp.113-117, 1990.
- 8) 橋本典明・小舟浩治：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, 1985.
- 9) Longuet-Higgins, M.S., D.E.Cartwright and N.D.Smith: Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc., pp.111-136, 1963.
- 10) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張，第31回海岸工学講演会論文集，pp.173-177, 1984.
- 11) 合田良美：港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説，鹿島出版会，p.22, 1990.