

横滨国立大学工学部 正会員 泉宮尊司

1 緒論

近年、海況地形変化予測を精度よく行うために、砕波後の波の変化に関しても高い精度が要求されるようになってきている。これまでに、砕波後の波の変形に関する研究は数多く行われているが、その大部分は波の再成現象が考慮されておらず、任意の海底地形に適用できるモデルはきわめて数少ない。本報では、現在までに提案されている砕波後の波の計算方法を系統的に分類し、その中でエネルギー方程式法で用いられているエネルギー消散率の比較検討を行っている。

表1 砕波後の波の変形に関する研究の分類

表1 砕浪後の波の変形に関する研究の分類

2 既往の研究とその分類

破波後の波の変形に関する研究は、表 1
 に示すように、大きく 4 種類に分類される。
 それらは、破波閉路式による方法、線形波
 動方程式法、非線形浅水波方程式法および
 エネルギー方程式法である。エネルギー方
 程式法は、さらに滑動粘性係数モデル、
 bore モデル、乱流モデルおよびその他に細
 分される。これらの分類名称は、モデルの
 内容と端的に表現するように著者が付けた
 ものである。

群波限界式による方法は、Boussinesq (1871), Miche (1944)あるいは合田(1973)等による群波限界式を用いて群波後の波高を評価する方法である。渡辺(1984)による線形波動方程式法は、伊藤・行本(1971, 1972)による数値波動解析法にエネルギー逸散項を付加し、かつ波の浅水変形が正確に計算できるように改良したものである。非線形浅水波方程式法は、気体の衝撃波の解析法を非線形浅水波に応用したもので、波先条件として bore conditionを用いることにより、波の減衰を評価するものである。

エネルギー方程式法は、波のエネルギー方程式の中に砕波によるエネルギー逸散率を付加して解く方法で、エネルギー逸散率の評価の仕方によってさらに細分されている。滑動粘性係数モデルとは、粘性によるエネルギー逸散とのアナロジーにより、滑動粘性係数を用いて逸散を評価する方法である。bore モデルは、砕波と bore との類似性を考えて、砕波によるエネルギー逸散を bore によるエネルギー逸散と等しいものとする方法である。また、乱流モデルとは、乱流強度を直接に用いてエネルギー逸散を評価する方法である。この乱流モデルのうちで、泉宮・堀川(1983)は、Reynolds 応力の働く流体中の波のエネルギー逸散率を次のように評価した。

$$\Phi_d = \int_{-L}^L \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dz - \int_{-L}^L \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_{ij} u_i] dz \quad (1)$$

ここに、 $i, j = 1 \sim 3$, τ_{ij} は Reynolds 応力テンソル, u_i は変動流速成分である。式(4)の関係は、次のような物理

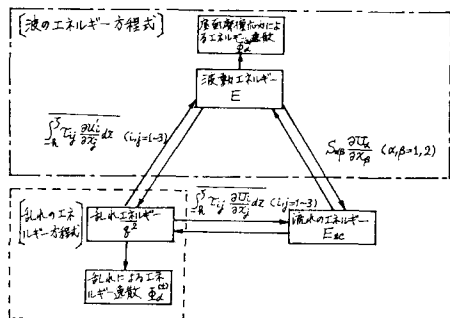
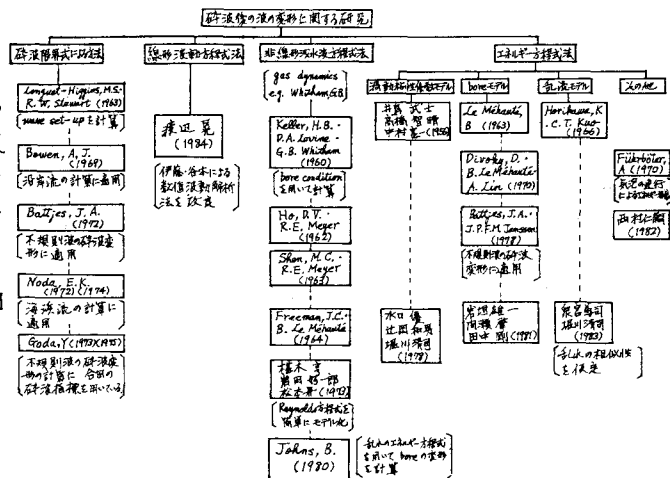


図1 波・流・水および乱れエネルギーの相互関係

的の意味をもつ。図1に示すように、波動エネルギーは radiation stress S_{xy} と流水の shear $\frac{\partial U_x}{\partial y}$ との積 $S_{xy} \frac{\partial U_x}{\partial y}$ の割合で流水とのエネルギー交換が行われる。また同様に、波動エネルギーと乱水エネルギーとの間においても、 $S_{xy} \frac{\partial u_x}{\partial y}$ の割合でエネルギー交換が行われる。したがって、式(1)の右辺第1項は一般に正であるため、波動エネルギーが乱水エネルギーに変換される量であると解釈することができる。

3 砕波によるエネルギー逸散率の比較

表2は、モデル化されたエネルギー逸散率を比較したものである。エネルギー逸散率の表現は、各モデルによって異なるが、 $\rho g^{3/2} \tan \beta^* d^{3/2}$ で無次元化するとモデル間の類似度・相異度が明確となる。表2によると、無次元エネルギー逸散率 $\tilde{\Phi}_d$ は、いずれも波高水深比 H/d の関数となっていることがわかる。しかも、与えられたモデルは、 H/d の2乗〜3乗に比例していることがわかる。なお、波のエネルギーによりエネルギー逸散率が表現されている西村(1982)および泉宮・堀川(1983)のモデルでは、等価エネルギー波高 H^* ($E \equiv \frac{1}{2} \rho g H^2$) を用いて表現している。エネルギー逸散率に海底勾配の影響が直接的に考慮されているのは、Batjes(1975)および水口ら(1978)によるモデルであり、砕波後の波の再成現象が考慮されているのは、水口ら(1978)および泉宮ら(1983)のモデルのみである。なお、Batjesら(1978)の bore モデルでは、 $\tilde{\Phi}_d$ が $(d/L_0)^{1/2}$ にも比例し、水口ら(1978)のモデルでは $(d/\lambda)^{1/2}$ にも比例することから、波高水深比 $H/d = 0.01$ のときエネルギー逸散率は $d^{3/2}$ に比例するのではなく、 d^2 および d にそれぞれ比例することになる。

表2 モデル化されたエネルギー逸散率の比較

研究者 (発表年)	モデルの種類	エネルギー逸散率 Φ_d	$\tilde{\Phi}_d = \Phi_d / \rho g^{3/2} \tan \beta^* d^{3/2}$	備考
Batjes (1975)	砕波現象式に よる方法 $H = \pi d$	$\frac{5}{16} \rho g^{3/2} \tan \beta^* \left(\frac{H}{d}\right)^2 d^{3/2}$	$\tilde{\Phi}_d = \frac{5}{16} \left(\frac{H}{d}\right)^2$	β^* : 流水水深比 ρ : 水の密度 g : 重力加速度 H : 波高 d : 平均水深
Batjes・Janssen (1978)	bore モデル	$\frac{\alpha}{4\pi} \rho g \left(\frac{H}{d}\right) H^2$	$\tilde{\Phi}_d = \frac{\alpha}{4\pi} \frac{1}{\tan \beta^*} \frac{1}{2} \left(\frac{H}{d}\right)^2$ $= \frac{\alpha}{4\pi} \frac{1}{\tan \beta^*} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/2} \left(\frac{H}{d}\right)^2$	$d = 0.01$: 波数 π : 波の周期 $\tan \beta^*$: 波の傾度 L_0 : 波の長さ $\alpha = \frac{1}{10} \frac{H}{d}$ $\alpha = \frac{1}{10} \frac{H}{d}$
水口・辻岡 堀川(1978)	満潮粘性 係数モデル $\nu_{eq} = \frac{5.7 d}{8 \pi} \frac{1}{(1-C)^2} \frac{\tan \beta^*}{k_s d}$	$\frac{1}{2} \rho g L_0 \left\{ \frac{1}{2\pi} \frac{H}{d} - C \right\}^2 (H/d)^2$ $\nu_{eq} = \frac{5.7 d}{8 \pi} \frac{1}{(1-C)^2} \frac{\tan \beta^*}{k_s d}$	$\tilde{\Phi}_d = \frac{5}{16} \frac{1}{\tan \beta^*} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/2} \left(\frac{H}{d}\right)^2$ $\cdot \left(\frac{H}{d}\right)^2$	$C = 0.25$ $\gamma = \frac{1}{2} \frac{H}{d} \frac{1}{(1-C)^2} \frac{1}{2\pi} \frac{H}{d}$ $C = C'/r$ $r = \frac{H}{d}$
西村 (1982)	エネルギー法	$\alpha_1 \exp \left\{ \beta_1 \frac{H}{d} \right\} E G / d$	$\tilde{\Phi}_d = \frac{\alpha_1}{8 \tan \beta^*} \exp \left\{ \beta_1 \frac{H}{d} \right\} \left(\frac{H}{d}\right)^2$	$\alpha_1 = 2 \times 10^{-4}$ $\beta_1 = 13.0$ H^* : 等価エネルギー波高 ($E \equiv \frac{1}{2} \rho g H^{*2}$)
泉宮・堀川 (1983)	乱流モデル	$\tau_b \left\{ \frac{C_g E}{\rho g d} - 0.009 \right\} \frac{E^2}{\rho^2 g^2 (C_g)^2}$	$\tilde{\Phi}_d = \frac{\tau_b}{16 \pi^2 \tan \beta^*} \left\{ \frac{1}{8} \left(\frac{H}{d}\right)^2 - 0.009 \right\}^2 \left(\frac{H}{d}\right)^2$	$\tau_b = 1.80$ C_g : 群速度

図2は、無次元エネルギー逸散率を比較したものである。図に示しているのは、修正海底勾配が1/20の場合である。この場合には、 H/d の値が0.6〜1.0の範囲内では、Batjesら(1978)、水口ら(1978)および泉宮ら(1983)のモデルとはほぼ同程度の値を示していることがわかる。海底勾配が比較的小さい場合、たとえば1/50程度では、海底勾配の影響が考慮されているモデルとそうでないモデルに差が生ずることが明らかであり、後者は何らかの方法によりその影響を取り入れるべきである。

4 結論および今後の課題

エネルギー方程式モデルにおけるエネルギー逸散率の比較を行うことにより、それぞれの関係が明らかとなった。今後の課題として、モデルの検証データを多く蓄積するとともに、砕波位置の決定法やその位置におけるエネルギーの評価、また再成条件等を実験的に明らかにする必要がある。

4 結論および今後の課題

エネルギー方程式モデルにおけるエネルギー逸散率の比較を行うことにより、それぞれの関係が明らかとなった。今後の課題として、モデルの検証データを多く蓄積するとともに、砕波位置の決定法やその位置におけるエネルギーの評価、また再成条件等を実験的に明らかにする必要がある。

参考文献 堀本亨(1973): 砕波特論, 水工研修会議義集, B-2.

Batjes・Janssen (1978): ICCE, pp. 569-587.

水口・辻岡・堀川(1978): 第25回海講, pp. 155-159.

西村(1982): 第29回海講, pp. 333-337.

泉宮・堀川(1983): 第30回海講, pp. 15-19.

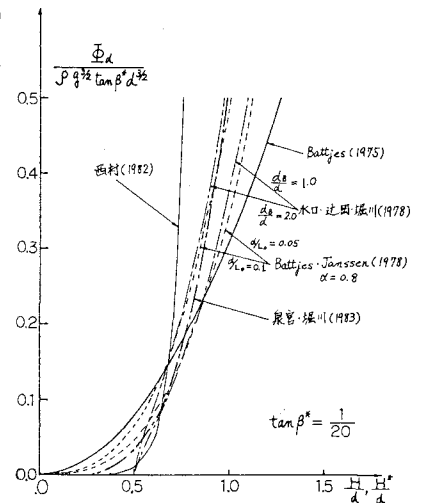


図2 無次元エネルギー逸散率の比較