

# 平均流が存在しない乱流場における水表面近傍の乱れの数値計算

山口大学工学部 正 員 〇朝位孝二  
山口大学大学院 学生員 宮脇周作  
九州大学大学院 正 員 杉原裕司

## 1. 緒言

杉原ら<sup>1)</sup>は水表面近傍の平均流が存在しない乱流場のシミュレーションに対して Launder, Reece & Rodi のレイノルズ応力方程式モデル（以下 LRR モデル）の有効性を検討している。このとき水表面における境界条件は乱れエネルギーと散逸率は対称条件、鉛直方向の乱れ強度は 0 としている。本研究は中村ら<sup>2)</sup>が詳細に行った水表面近傍の乱流計測データを用いて境界条件の設定について検討を行った。

## 2. 解析手法

本研究では振動格子乱流場を解析対象とする。図-1 に振動格子乱流水槽の模式図を示す。

LRR モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( C_s \frac{k}{e} w^2 + u \right) \frac{\partial k}{\partial z} + C_s \frac{k}{e} w^2 \frac{\partial w^2}{\partial z} \right\} - e \quad (1)$$

$$\frac{\partial w^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( 3C_s \frac{k}{e} w^2 + u \right) \frac{\partial w^2}{\partial z} \right\} - C_1 \frac{e}{k} \left( w^2 - \frac{2}{3} k \right) - \frac{2}{3} e - 2C_d \frac{e}{k} w^2 f_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( C_e \frac{k}{e} w^2 + u \right) \frac{\partial e}{\partial z} \right\} - C_{e2} \frac{e^2}{k} \quad (3) \quad k = \frac{1}{2} (2u^2 + w^2) \quad (4)$$

ここで、 $k$ は乱れエネルギー、 $e$ はエネルギー散逸率、 $w$ は鉛直方向の乱れ強度、 $u$ は流体の動粘性係数、 $z$ は仮想原点（格子振動中心）から

鉛直上向きに取られた座標である。水平方向の乱れ強度 $u$ は、その等方性を考慮することにより式(4)を用いて算定した。 $C_s$  (=0.0613),  $C_1$  (=5.0),  $C_e$  (=0.0841),  $C_d$  (=0.04) 及び  $C_{e2}$  (=1.9) はモデル定数である。また、式(2)の右辺第 4 項は、乱れ強度が水表面の影響を受けて減衰する効果を表し、ここでは減衰項と呼ぶ。

## 3. 仮想原点における境界条件 $k_0$ , $e_0$ についての検討

仮想原点 ( $z=0$ ) における境界条件は  $k=k_0$ ,  $w=0.8 k_0$ ,  $e=e_0$  となる<sup>1)</sup>。 $k_0$ ,  $e_0$  の算定には松永ら<sup>3)</sup>の算定式を用いた。実際の計算においては  $k_0$ ,  $e_0$  で無次元化された基礎式を用いるので  $k=1$ ,  $w=0.8$ ,  $e=1$  を与えることになる。

松永らの式を中村らのデータに適用する際に、実験装置の違いによる誤差が生じると考えられるため、式(5)のように補正係数  $a$ ,  $b$  を境界条件  $k_0$ ,  $e_0$  に乗じて補正を行った。

$$k_0^* = a k_0, \quad e_0^* = b e_0 \quad (5)$$

補正係数を決定するため  $a$ ,  $b$  の値を種々与えて中村らの実験値を  $k_0^*$ ,  $e_0^*$  で無次元化し、数値解との適合性について検討した。なお、無次元化された諸量には一をつけて表した。ここで、図-2, 図-3 は  $a=b=1.4$  とした場合の数値解と実験値との適合性を示したものである。この場合、 $\bar{k}$  についての適合性は良好な結果が得られた。しかし、 $\bar{e}$  については数値解より大きな値をとっている。試行錯誤の結果  $\bar{k}$ ,  $\bar{e}$  を同時に満足する補正係数は得られなかった。このため、ここでは  $\bar{k}$  の重要性を考慮し、 $a=b=1.4$  を採用した。

## 4. 水表面が存在する場合の数値計算

水表面が存在する場合の数値計算では、減衰項を考慮する場合と減衰項を考慮しない場合について 2 通り

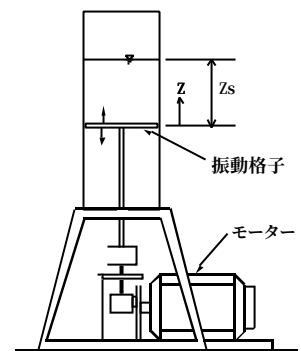


図-1 振動格子乱流水槽の模式図

Key Word：振動格子乱流，水表面，LRR モデル，境界条件

連絡先：〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 Tel 0836-35-9441 Fax 0836-35-9441 or 9429

の解析を行い、 $u$ 、 $w$ 、 $k$ について実験値との適合性を検討した。境界条件は式(6)のように与えた。ここで  $z_s$  は仮想原点から水表面までの距離である。図-4 に減衰項を考慮しない場合の計算結果を、また、図-5 に減衰項を考慮した場合の計算結果を示す。この際の数値解と実験値との適合性については、両方法とも良好な結果が得られなかった。このため、祢津の方法<sup>4)</sup>と類似の手法を用いることにした。この手法は、計算を二段階に分けて解析を行う。第一段階では、減衰項を考慮せず式(6)を境界条件として計算を行い、水表面における境界値  $\bar{k}_s$ 、 $\bar{w}_s$  を求める。第二段階では減衰項を考慮して計算を行う。このとき、境界条件は、第一段階で求めた  $\bar{k}_s$ 、 $\bar{w}_s$  を用いて式(7)のように与えた。

$$\left. \begin{aligned} \bar{k}=1, \quad \bar{w}^2=0.8, \quad \bar{e}=1 & \quad \text{at } \bar{z}=0 \\ d\bar{k}/d\bar{z}=0, d\bar{w}^2/d\bar{z}=0, d\bar{e}/d\bar{z}=0 & \quad \text{at } \bar{z}=\bar{z}_s \end{aligned} \right\} \quad (6) \quad \left. \begin{aligned} \bar{k}=1, \quad \bar{w}^2=0.8, \quad \bar{e}=1 & \quad \text{at } \bar{z}=0 \\ \bar{k}=s \bar{k}_s, \bar{w}^2=t \bar{w}_s, d\bar{e}/d\bar{z}=0 & \quad \text{at } \bar{z}=\bar{z}_s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $s$ 、 $t$  は減衰定数であり、0 から 1 の範囲で試行錯誤的に変化させた。その結果、 $s=0.8, t=0.3$  とした場合に最も良い適合性を得た。図-6、7 にその際の数値解と実験値との比較を示す。

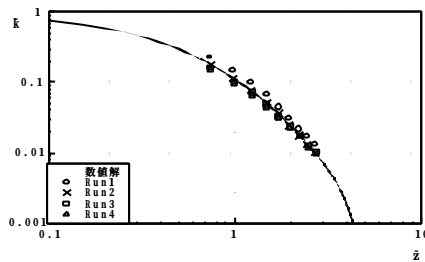


図-2  $\bar{k}$  に対する適合性  
( $\alpha = \beta = 1.4$ )

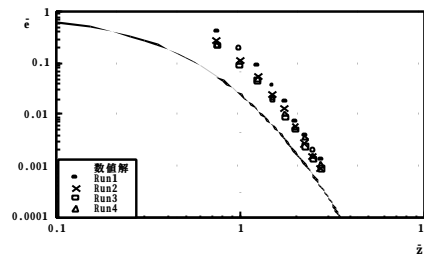


図-3  $\bar{e}$  に対する適合性  
( $\alpha = \beta = 1.4$ )

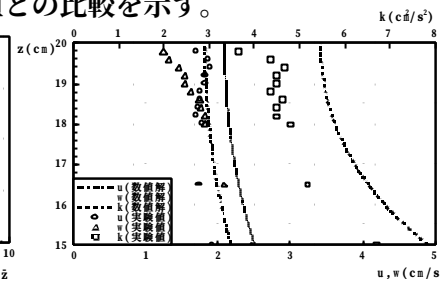


図-4 計算結果

減衰項を考慮しない場合

格子条件：周期 4 Hz，ストロー

ク長 6.0cm

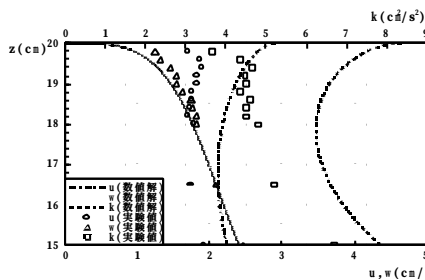


図-5 計算結果

減衰項を考慮した場合

格子条件：周期 4 Hz，ストロー  
ク長 6.0cm

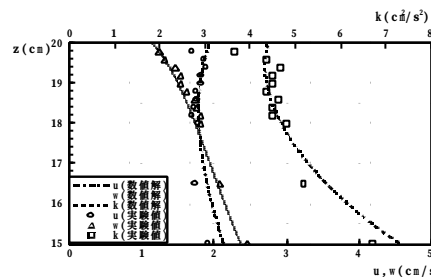


図-6 計算結果

( $\sigma=0.8, \tau=0.3$ )

格子条件：周期 4 Hz，ストロー  
ク長 6.0cm

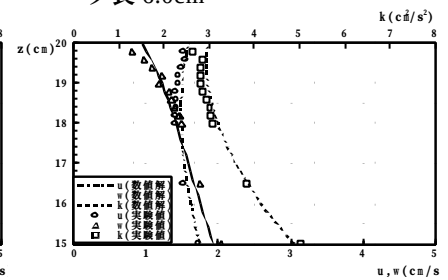


図-7 計算結果

( $\sigma=0.8, \tau=0.3$ )

格子条件：周期 3Hz，ストロー  
ク長 6.0cm

## 5. 結言

乱れエネルギーの減衰定数  $\sigma$  を 0.8 にすれば、他の格子条件でも実験値と良い一致を示すことが分かった。開水路乱流にける乱れエネルギーの減衰定数も 0.8 であること考えれば大変興味深い<sup>4)</sup>。しかしながら、水表面下 4(mm)あたりから水表面にかけて生じている、水平方向の乱れ強度の減少を再現することができていない。水表面の極近傍では別のモデルを導入する必要があると考えられる。今後の課題としたい。

【謝辞】運輸省港湾技術研究所海水浄化研究室の中村由行室長から貴重な実験データの提供と御教示を受けた。また平成 10・11 年度文部省科研費（基盤 B(1)代表者：角野昇八）の援助を受けた。記して謝意を表します。

【参考文献】(1)杉原ら：水表面近傍の乱流に対する LRR 型応力方程式モデルの有効性，九大総理工報告，18，39-44，1996 (2)中村ら：微小酸素電極を用いたガス交換機構に関する実験的研究，海講，44，1236-1240，1997 (3)松永ら：振動格子によって発生する乱れ特性，ながれ，11，254-265，1992 (4)祢津・中川：自由水面を考慮した開水路乱流の数値計算法，京大防災研年報，29B-2，1-27，1986