

小水域への高速流入数値シミュレーションについて

名城大学理工学部 正員 新井宗之
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保

1. はじめに: 土石流のような高速の流れが小規模な湛水域に流入する場合の発生波や水面形、流速などを検討する場合、その目的に応じてその方程式系が用いられる。このような高速の流れの流入にともなう発生波や水面形を検討する場合には、非線形な現象が現れるのでそれに対応する方程式系である必要があろう。そして一般にこれらの方程式の数値計算は種々の手法が用いられている。しかしながら、これらの計算手法と物理的な現象との対応は必ずしも十分検討されているとはいえないと思われる。ところで、比較的高速な流れを対象とする数値シミュレーション法に MAC(Marker and Cell)法がある。これは液滴の高速衝突やゲート開放によるサージ現象などの数値計算に有用であることが示されている。しかしこれらの現象は必ずしも物理的現象による比較でその有用性が十分検討されていないように思われる。そこで、ここでは土石流のような流れが小水域に流入することを想定したものと、MAC法について検討する。

2. 基礎方程式及び計算法: MAC法は基礎方程式に N-S 方程式を用いるところに一つの特徴がある。そして差分格子の Cell が境界部分、流体部分、自由表面を有する流体、物体あるいは境界ではなく流体も物体も含まない empty な Cell であるかなどの情報を有し、その情報に基づいて計算が進められ、1 計算ステップごとに仮想的な流体粒子のマーカーがその速度成分により移動する手法である。MAC法にはさらにいくつかの方法があり、差分に使用する方程式の展開形によっても計算の収束などがとなり、ここでは、水平方向を x 軸、垂直方向を z 軸にとる直交座標系で表した次式のような運動方程式および連続方程式を用い、圧力項を単純化(静水圧近似)した SMAC 法を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = g_x - \frac{\partial \theta}{\partial x} + \nu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = g_z - \frac{\partial \theta}{\partial z} + \nu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

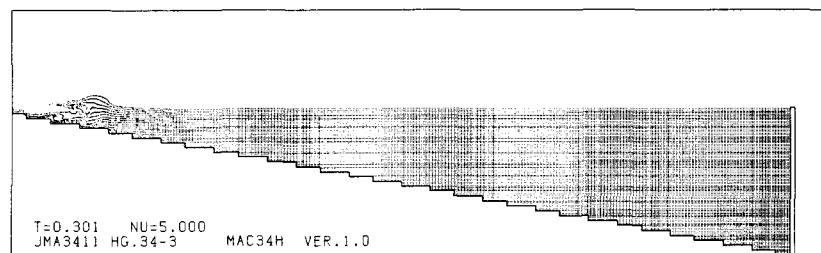
$$D \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u, w : x, z 軸方向の速度成分, $\theta = p/\rho$, p : 圧力, ρ : 流体密度, g_x, g_z : x, z 軸方向の重力加速度成分。

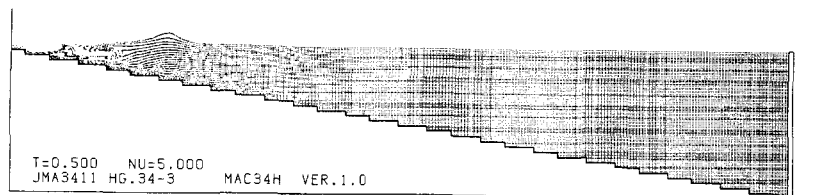
数値計算格子はスタッガードを用い、時間的には前進差分、空間的には中心差分スキームを用いる。壁面での境界条件はノンスリップとしている。数値計算においては、(1), (2) 式の差分方程式からの速度成分では (3) 式を満足しないため、ポテンシャル関数を導入し、ポアソン方程式を解くかたちで速度成分を補正し、(3) 式を満足する速度成分を得ている。

3. 実験の概要: 水路は湛水部の長さ 1.635 m, 幅 10.0 cm, 水路勾配 10°で、水路下流端に 29.0 cm の垂直な堰を設け、天端満水状態で上流端部分より水を流入させた。

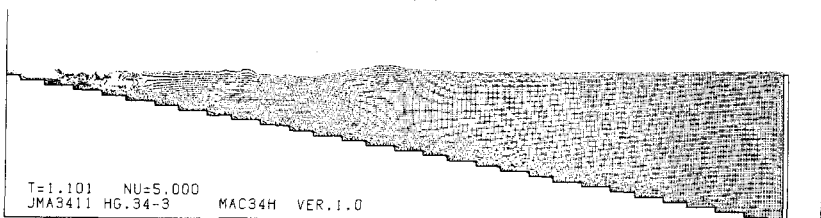
4. 考察: 計算条件としては格子間隔 $\Delta x = \Delta z = 1$ cm とし、時間ステップは $\Delta t = 0.001$ sec であるが、1 ステップごとに計算の収束条件から変えているので、 $\Delta t = 0.001$ sec は最大時間ステップと考えることができる。また計算上の動粘性係数は計算の安定から $\nu = 5.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ を用いた。図-1 (a) - (d) は流入流速 $u = 120 \text{ cm/s}$ の時間 $t = 0.3, 0.5, 1.1, 1.5 \text{ sec}$ の計算結果である。境界からの流入による発生波が伝播する様子が計算され (d) では堰天端より流体が流出する様子が計算されている。図-1 (e), (f) は



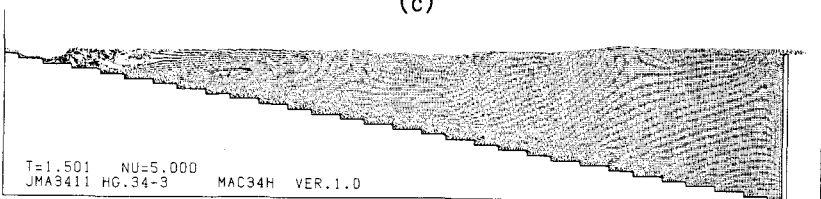
(a)



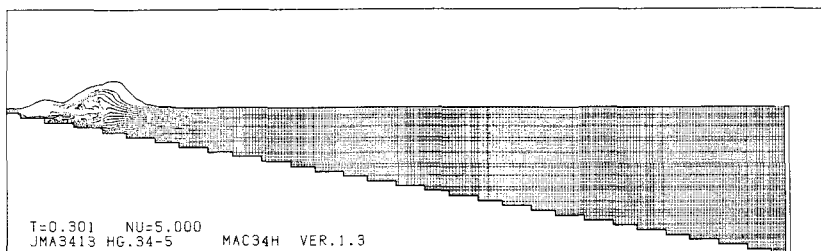
(b)



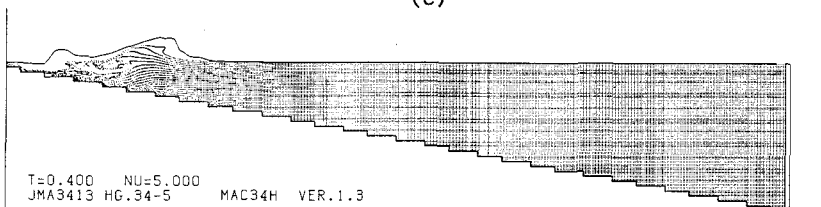
(c)



(d)



(e)



(f)

図-1 計算結果、実験結果

実験結果との対応を示した例である。図中の実線が実験結果である。流入流速は $u = 150$ cm/s である。実験結果と計算値を比較すると、自由水面の形状は比較的良好であるが、発生波の高さは計算値の方が実験結果よりも小さな値となっている。これは実験上の測定が比較的難しく測定上の誤差をとれない易いことと実験との時間上の整合性も難しいことにもよるが、いずれにしても計算値の方が小さな値となっている。この理由は、実験と計算における境界条件の整合性の問題や計算上の動粘性係数を物理的なそれよりもかなり大きな値を用いることなどの問題があり必ずしも十分明かなわけではないが、波形が比較的減衰しやすいことからみると、計算上の粘性が大きいことが起因していると考えられる。

4. おわりに: 以上SMAC方による計算結果と物理的な実験結果との関係を示した。清水の場合、波形は比較的良好に似ているものの計算による波高は少し小さな値となることを示した。