

<気液界面挙動の AEOLUS によるテスト計算>

内容

1. 目的
2. 採用モデル
3. 計算
4. 計算結果
5. まとめ

Advanced Algorithm & Systems

1. 目的

水平分布する水に気流が衝突する時の計算を行い、以下2点を調べる。

- (1) 気流が衝突する際の窪みのサイズ、及び物理量分布。
- (2) 密度差（1000倍程度）が著しい状況での計算安定性。

固気液が同時に存在する計算は、非保存形式の分離解法：**CIP-CUP**法によって成功している。ここでは、状態方程式と整合的に解く、**CIP-GCUP**法によって計算を行う。また、この計算結果によって、相転移が伴う現象（溶融、溶接 etc.）に対する準備計算となる。また、そのようなシミュレーションに対するノウハウを蓄積することにも役立つ。

2. 採用モデル

本計算は、気液の自由表面の挙動を調べる問題である。この問題において解くべき方程式を以下で説明する。

—方程式—

1. 質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{u} = 0$$

$$\frac{\partial \rho_i \phi_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i \phi_i \bar{u} = 0 ; i = 1, 2$$

ここで、 $\rho = \phi_1 \rho_1 + \phi_2 \rho_2$ である。 ρ_1 は空気の密度、 ρ_2 は水の密度を表す。

2. NS 方程式 (運動量保存式)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\nabla \cdot \tau}{\rho} + g + F_{st}$$

圧力勾配 ∇p , 粘性 $\nabla \cdot \tau$, の他に以下も考慮した。

2-1. 重力: g

この計算では、標準重力加速度を使用。

2-2. 表面張力: F_{st}

密度関数の曲率, $\nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$, を計算し与えた (Brackbill 1992)。

3. エネルギー保存式

省略

4. 状態方程式 (EOS)

4-1. 空気

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_{10}} \right)^{1.41} ; \text{断熱条件の式 (ポリトロープ)}。$$

4-2. 水

$$\frac{P_2 + B}{P_0 + B} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_{20}} \right)^{7.15} ; \text{Tait 式。} (B = 3000 \text{ atm})$$

対象とする物質で、 P_0 , ρ_{i0} はそれぞれ基準となる圧力・密度を表す。

5. 密度関数の移流

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \phi_i = 0 ; \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla F = 0, \quad F = \tan[0.99\pi(\phi - 0.5)]$$

気液の区別つけるため密度関数, $\phi_i (\phi_1 + \phi_2 = 1)$, を導入する。

但し、本計算では第1番目の式は採用せず、第2番目の式を CIP 法で解く (tan 変換 CIP 法)。これにより、シャープな界面を表現できる。

—説明—

< 1 圧力 1 速度を仮定 >

今回は、気液の混在領域で力学的平衡が成立し、両相とも等しい速度で移動すると仮定する。

< 温度は解かない >

EOS が密度のみに依存するため、エネルギー方程式無しで方程式は閉じる。このため 3. は解かない。

3. 計算

本計算では CIP-GCUP 法を採用する。この方法は、以下 3 点で特徴付けられる。

- (1) 部分段階法 (fractional step method) である。
- (2) 移流項処理に CIP 法を採用。
- (3) 圧力勾配項の処理には、GCUP 法を用いる。

(Newton 法で EOS と整合的な解を探索)

上のプロセスを経て、NS 方程式に入る圧力は、熱力学的意味を十分持つ。

計算条件とマシン環境

①条件

初期条件

図 1. 参照。

境界条件

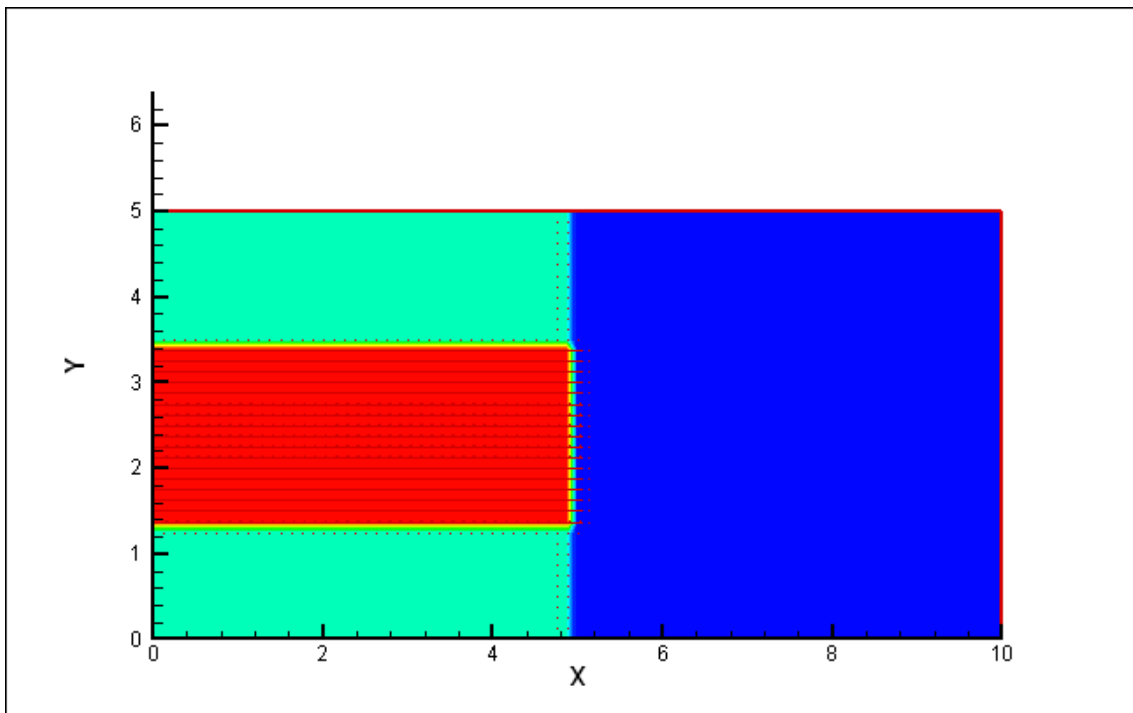
勾配ゼロのノイマン条件

使用格子

81 × 41 等間隔矩形格子 (デカルト座標 ; z 方向に並進対称)

②計算環境

コード : **AEOLUS** (CIP-GCUP 法採用、乱流モデル無し)

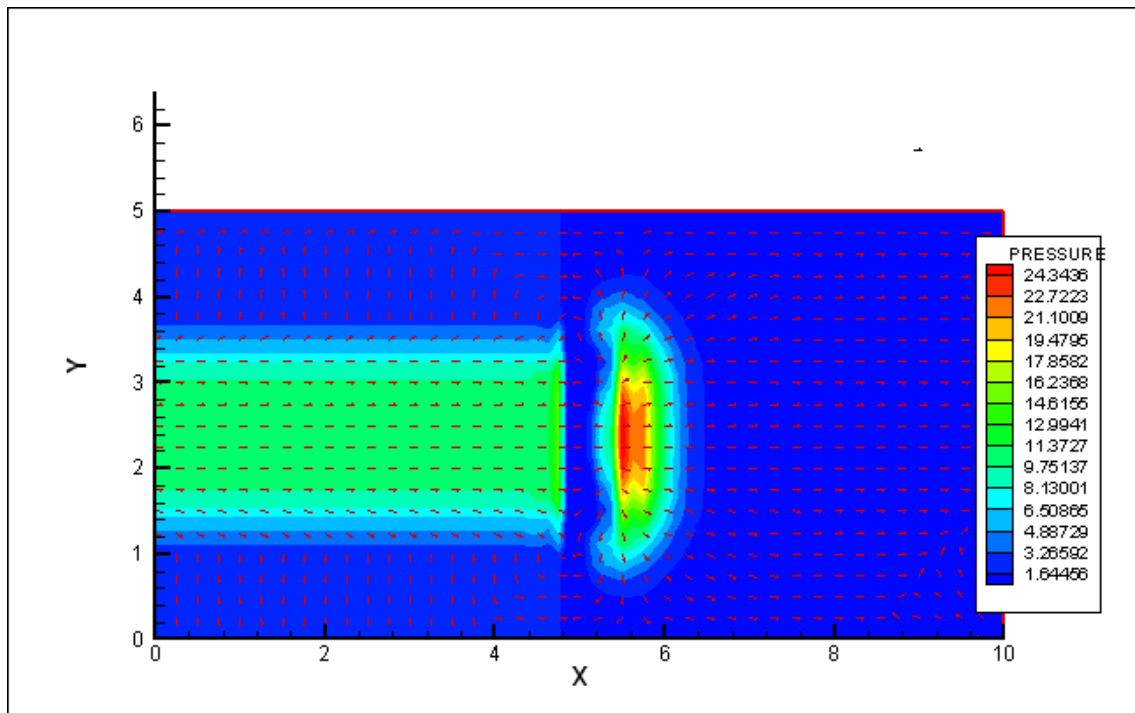


(図 1) 初期条件 : 青部分が水。それ以外は空気。赤、緑、青の順に 10, 2, 1 atm の気圧を加える。流速は、空気の音速を単位としてマッハ 2 を与える (赤の部分)。但し、気流は与え続けない。尚、重力の向きは x 軸方向。

4. 計算結果

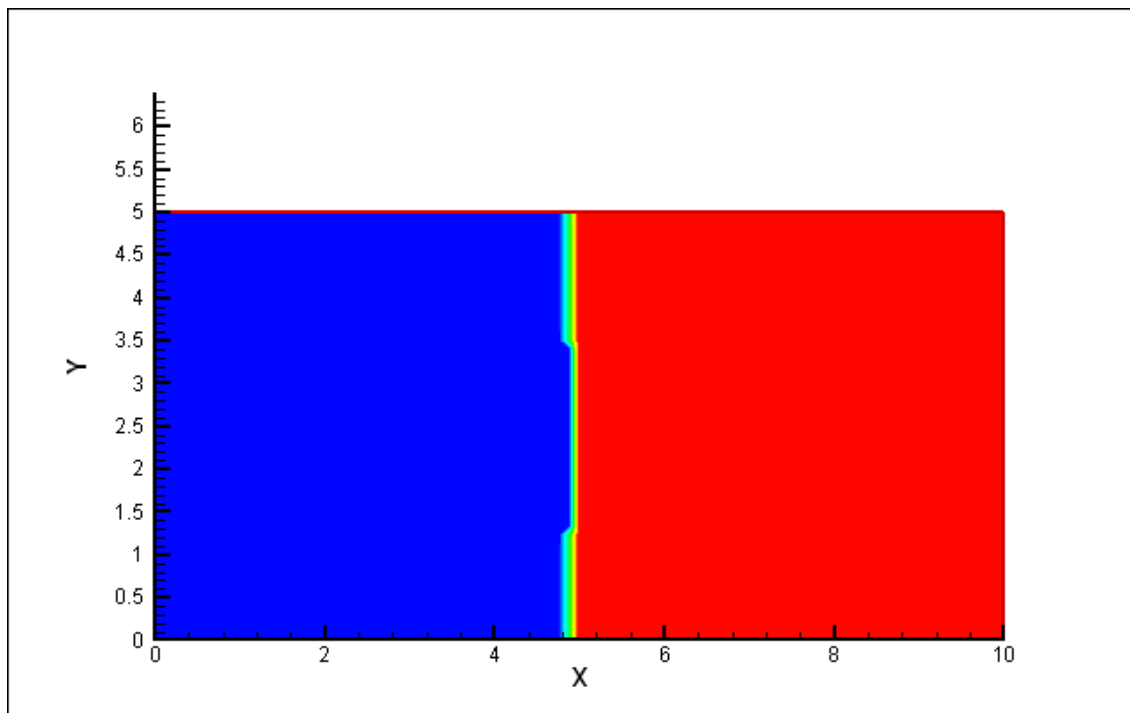
圧力分布・密度関数がある時刻に対して、示す。速度のコンタは示さないが、ベクトルは示した。ここでは、流れの方向を捉える程度に留める。

① 圧力分布

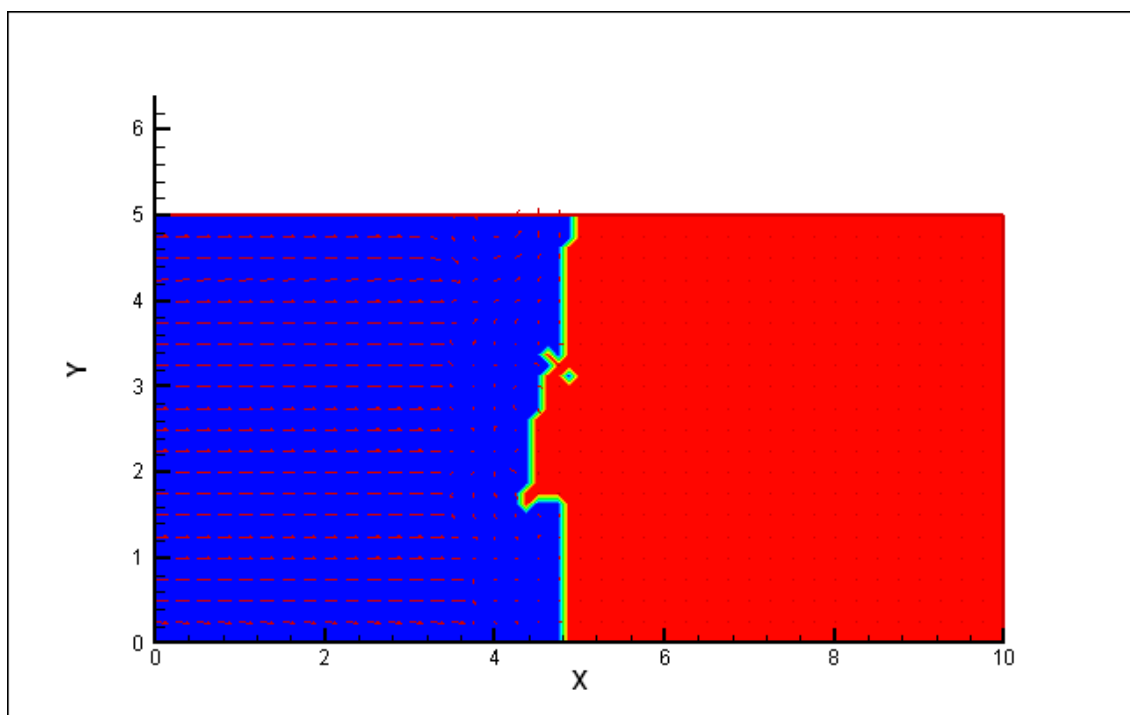


(図 2) @ $t = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。圧力の単位は atm。矢印は流速を表す。
気塊が衝突して、水中に高圧の部分が生じている。

②密度関数の挙動



(図 3) @ $t = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。 参考のために流速のベクトルを示しておく。



(図 4) @ $t = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。 この時刻で衝突はほぼ終了したと思われる。

5. まとめ

本ケースは予備計算であるため、計算モデル（方程式）とその結果の十分な検討が必要である。また、GCUP 法の遂行には、特に状態方程式の一貫性が必要であることが分った（ここには詳細を載せていない）。次回は、固体の溶融を含めた計算を行う予定である。