

---

---

## ミシガン大学（アメリカ） 研修報告書

### WENO scheme を用いた管路内気液二相流の直接数値計算

工学研究科 機械システム工学専攻 土田 崇史

#### 1. はじめに

2016年9月1日から同年9月30日の間、アメリカのミシガン大学において研究を行った。以下にその報告内容を示す。

#### 2. 共同研究テーマ

ミシガン大学の Computational Flow Physics Laboratory では乱流や衝撃波、多相流などの CFD が盛んに行われている。CFD で用いられる多くの計算手法の中の一つに WENO scheme というものがある。これは圧縮性流体の CFD で用いられることが多い手法であり、ミシガン大学の研究室でも用いられている。一方で私が行っている気液二相流の管路内流れの CFD にも応用できる可能性がある。そこで今回はこの WENO scheme の基礎学習および気液二相流 CFD への応用に関する共同研究を行った。

#### 3. 共同研究スケジュール

9月1日 出国  
9月2日～9月30日 研究, プレゼンテーション  
10月1日 帰国

#### 4. 共同研究派遣先の概要

大学名: University of Michigan College of Engineering  
所在地: アメリカ ミシガン州 アナーバー  
指導教員: Assis. Prof. Eric Johnsen

#### 5. 共同研究内容

##### 5.1 背景・目的

現在、ものづくりにおける研究・開発工程ではコンピュータを用いたシミュレーションの実用性が認められ、ほぼ必須の技術となりつつある。従来は実験やテストを繰り返していたことを容易に低コストで行える、実験による再現が困難なこと、可視化が不可能なことの結果を求めることができる、これらがシミュレーションの利点である。

しかしその一方でシミュレーションによる事象の完全な再現には極めて詳細なモデルが必要であり、これはメッシュ分割の規模や境界条件の設定など様々な面で問題があり、現段階では不可能である。この理由から現在は、いかにシミュレーションの精度を上げて実現象に近づけることができるかということに焦点を当てたシミュレーション方法の改善が行われている。

シミュレーション精度の改善方法の一つにシミュレーションの中で使用される計算方法の高精度化がある。私は現在広島大学で、矩形管内気液二相流の液滴飛散挙動について実験とシミュレーション CFD (Computational Fluid Dynamics) の両方の観点から研究をしている。この研究の CFD に関しては、商用ソフト CONVERGE を用いて進めているが気液界面の挙動がソフト本体のバグによりうまくとらえられていない。そのなかで代替の計算方法の候補の一つに WENO scheme がある。これは圧縮性流体のシミュレーションで用いられることがある計算方法で、商用ソフト CONVERGE が中心差分の2次精度であるのに対し、WENO scheme は3次精度、5次精度の二つがある。また私の研究のような非圧縮性流体のシミュレーションにも応用できる可能性があり、これができるればシミュレーション精度の向上にもつながると考えられる。

今回は WENO scheme の基本的な使用方法について学ぶとともに、気液二相流のシミュレーションへの応用を目的として共同研究を行った。

---

---

## 5. 2 計算手法 (WENO scheme)

共同研究のテーマでもある WENO scheme について説明する.

WENO scheme は二つの隣り合う格子点間を補間する方法である. WENO scheme は ENO scheme に重みづけをすることで高次の精度を達成した方法であり, WENO scheme は風上差分を改良した方法である. 図 2 に概要図を示す. WENO scheme において次の時刻での値  $n+1$  は次式で示される.

$$f_i^{n+1} = f_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\widehat{F_{i+1/2}^n} - \widehat{F_{i-1/2}^n})$$

ここで,  $\widehat{F_{i+1/2}^n}$  は, 条件によりとる値が異なる. 一例を示すと,

$$\widehat{F_{i+1/2}^n} = \frac{w_0}{w_0 + w_1 + w_2} V_0 + \frac{w_1}{w_0 + w_1 + w_2} V_1 + \frac{w_2}{w_0 + w_1 + w_2} V_2$$

である. 図 2 中の  $uf$  は Flux と呼ばれ, 重み  $w$  や  $V$  はこの Flux の組み合わせによって求めることができる.

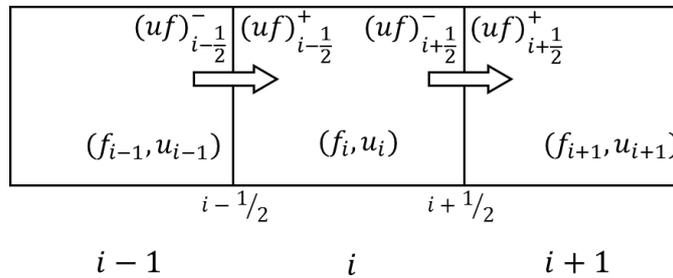


図 2. WENO scheme の概要図

## 5. 3 気液二相流への適応

まず, WENO scheme のプロファイルの表し方を学び, 二次元のナビエストークス方程式を解くシミュレーションコードを作成した. 二次元気液二相流ナビエストークス方程式は次の式である.

$$\rho_{(\Phi)} \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla (2\mu_{(\Phi)} (\nabla \mathbf{u})) + \frac{1}{We} (\nabla \cdot \mathbf{n}) \nabla H_{(\Phi)} + F_{sf}$$

通常, WENO scheme は保存形式の移流方程式を解く際に用いられる方法である. 今回は非圧縮性流体を仮定しているが, 非圧縮流体使用時は, 非保存形式, 保存形式の移流方程式が等しくなることから, 下記の保存形式の式に WENO scheme を適用した.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uf) + \frac{\partial}{\partial y} (vf) = 0$$

計算条件を表 1 に示し, その結果を実験結果と比較する. 本研究で得られた計算結果を図 3 に示し, 広島大学で行った実験結果を図 4 に示す.

表 1. 計算条件

気相密度 $\rho_g$	1.0	X 方向気相速度 $u_g$	1.0
液相密度 $\rho_l$	10.0	X 方向気相速度 $u_l$	0.5
格子間隔	$0.05 \times 0.05$	Y 方向気相速度 $u_g$	0.0
計算範囲	$8.0 \times 4.0$	Y 方向気相速度 $u_l$	0.0
時間間隔 $\Delta t$	$1.25 \times 10^{-3}$	ウェーバー数 We	20
気相レイノルズ数 Reg	100		

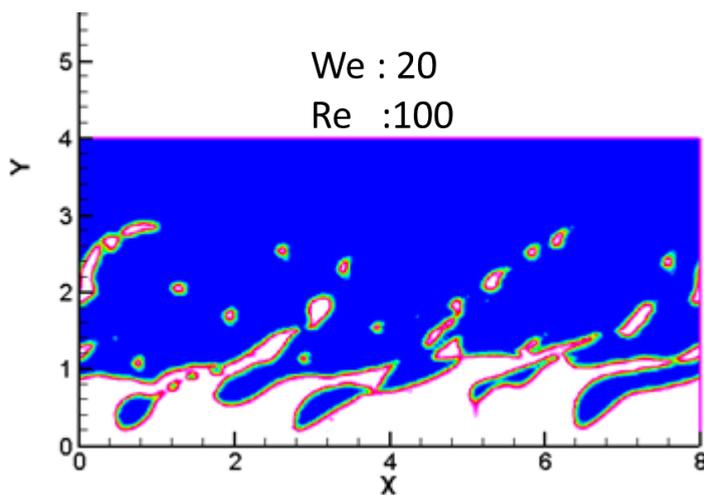


図 3. 計算結果

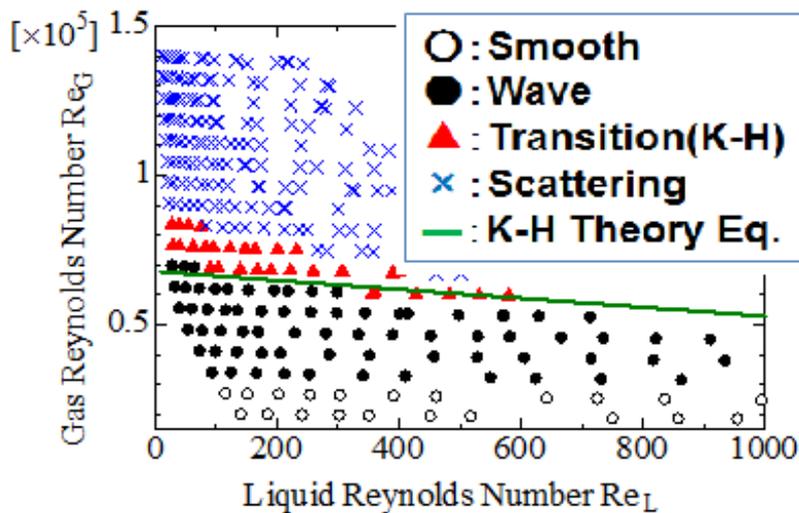


図 4. 実験結果

図 4. 実験結果は既往研究から抜粋した図である。(平成 26 年度修士論文「気流を受ける壁面液膜の波形成—飛散分裂挙動」著 丸井堅太郎) プロット点の形は液膜挙動により分類されており、○層流, ●波状, △遷移, ×飛散, という 4 種類の液膜挙動を示している。

---

図 3. 計算結果を見ると、液膜から液滴が分裂していることがわかる。これは図 4 では、×飛散領域に分類される。しかし、実験結果の飛散領域は気相レイノルズ数が約 8000 付近から始まっているのに対し、計算結果では気相レイノルズ数が 100 にもかかわらず飛散してしまっている。これは、計算条件の液相と気相の密度差が現実に対し小さすぎることなどがあげられる。より計算条件を実験に近づけると計算が発散しまうため、コードの改善が求められる。

## 6. まとめ

今回は気液二相流の CFD 精度向上を目的として、移流方程式に WENO scheme を用いた直接数値計算を行った。

計算結果は波の発達に関して実験結果と、とても似通った挙動を示したが、同条件下での結果を比較できるまでに至らなかった。広島大学で今まで使用していた商用コード CONVERGE では、波の発達挙動ですら正確にとらえることができていなかったため、その点では大きな成果があったといえる。今後は同条件下で実験結果と計算結果を比較できるようコードの改善を続け、自分の研究をより良いものにしたい。

## 7. 謝辞

海外共同研究を通し、初めて一人で海外へ行き、渡航の準備から研究まで普段経験できないような貴重な数多くの経験ができました。このような機会を与えてくださった先生方、並びにサポートしてくださった皆様に感謝の意を表します。特に研究を行うにあたり、様々な指導、ご鞭撻を頂いた尾形先生、西田先生並びに現地で指導および世話して下さった Eric Johnsen 先生、研究室の方々に深く感謝します。皆様のおかげで 1 ヶ月充実した日々を過ごすことができました。本当にありがとうございました。最後に全面的に応援、サポートしてくれた家族にも感謝の意を表します。

---