

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23760079

研究課題名（和文） フロントトラッキング法に基づく高マッハ数液滴崩壊現象に対するマルチスケール解析

研究課題名（英文） A front-tracking method for fluid interfaces in high-speed compressible flows

研究代表者

寺島 洋史（TERASHIMA HIROSHI）

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：20415235

研究成果の概要（和文）：本研究では、高速流中の推進剤混合過程解明を目指し、衝撃波を含む圧縮性高速流中の流体界面挙動に対するマルチスケールシミュレーション手法の開発とその流体不安定メカニズム解明に関する研究を行った。高速流中で生じる衝撃波、それと干渉する流体界面挙動をシミュレーションするため、圧縮性流体方程式を用い、界面追跡にフロントトラッキング法を、界面境界条件にゴーストフルイド法を採用した解析法を構築した。これまでの手法に対して、界面において厳密リーマン解を求めるよう大幅な修正を施し、界面マーカー点における物理量を背景格子点に埋め込む一般的な変換手法を構築した。また、液滴崩壊により追跡できなくなったマーカー点を粒子の運動方程式へつながるフレームを検討した。密度比 1000 倍となる気液界面問題に適用し、実験や過去の数値解析結果との比較から精度良い結果が得られることを示した。衝撃波と液滴の干渉問題では、従来捕えることが難しいとされた液滴のストリッピングを含めた液滴崩壊現象を比較的少ない格子点で捕えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：A front tracking method for compressible multi-fluid flows is presented where marker points are used both for tracking fluid interfaces and also for constructing the Riemann problem on the interfaces. The Riemann problem between two fluid phases (defined in the interface normal direction) is solved using the exact Riemann solver on the marker points. The solutions are projected onto fixed grid points and then extrapolated into the corresponding ghost fluid regions, as in the ghost fluid method. The proposed procedures are designed to be consistent in any dimensions and to be simple to implement. Several multi-fluid problems, including the breakup of a water cylinder induced by the passage of a shock wave, were computed in order to demonstrate the capability of the new method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景
高速流体中の気液界面挙動の数値解析は、界面間の大きな特性ジャンプ、衝撃波と界面の干渉、そして複雑な界面トポロジーなどを含むことから、未だに解析が難しい挑戦的な課

題である。このような流れ場は、例えば、高速燃焼場における酸化剤と燃料の混合現象、キャビテーション崩壊現象、更には超新星爆発など多岐に渡り、数値解析法の確立は、このような複雑な流動現象の解明に貢献でき

るものと期待される。本研究では、気液界面解析のため、陽なる点で界面を追跡するフロントトラッキング法に注目する。フロントトラッキング法の利点は、数値拡散が極力抑えられること、それにより小さなスケールの界面挙動を解像できることにある。また、表面張力の評価が精度良くできる利点も有する。Glimmらは、80年代から開発を開始しており、界面をマーカー点で追跡、そのマーカー点の法線と接線方向に数点の格子を発生させて、近似リーマン解法などで解の再構築を行っている。この解は、Ghost node と呼ばれる界面近傍点に外挿され、界面境界条件として用いられる。Cocchiらもマーカー点により界面を追跡し、厳密リーマン解により解を再構築する手法を提案している。しかしながら、マーカー点と固定背景格子との情報のやり取りが非常に複雑であり、多次元への実装は困難と考えられる。Glimmらの手法も含め、このようなプログラミング実装の難しさは、フロントトラッキング法の最大の欠点であり、克服する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、精度良く界面を追跡することが可能なフロントトラッキング法を高速圧縮性流体解析、特に気液界面を含む流れ場に適用できるよう手法の開発を行い、高速流中の液滴変形問題へ適用した。これまでの他者の研究成果を踏まえ、新たに、マーカー点上でリーマン問題を定義し、界面境界条件を求める手法を採用した。マーカー点は界面追跡だけでなく、リーマン問題構築にも使用される。本手法の特長は、リーマン問題の構築法や固定格子点への投影法を、多次元化やプログラミングが容易になるよう構築したことにある。幾つかの圧縮性気液界面解析を通して、本手法の有効性を示す。

3. 研究の方法

(1) 支配方程式：流体は非粘性かつ界面間で混ざり合わないと仮定し、圧縮性オイラー方程式により支配されるとする。また、状態方程式として、Stiffened 状態方程式を採用した。数値流束の評価には AUSM+ を使い、MUSCLにより高次精度化を行った。制限関数には van Albada limiter を採用した。また、液相衝撃波背後で生じる数値振動を低減させるため、追加の散逸項を圧力の数値流束に加えている。時間積分は 3 段階 TVD Runge-Kutta(TVD R-K)法で行った。

(2) 界面追跡法：本研究で提案する方法は、我々が開発してきた方法をベースとして、その精度、堅牢性、そして統一性を高めたものである。まず、流体界面を追跡するため、ラ

グランジュ的に界面を追跡するフロントトラッキング法を用いた。フロントトラッキング法では、界面を連続につながったマーカー点で表現し、固定背景格子から内挿した速度によりマーカー点を移流させる。時間積分は、流体方程式と同様に、TVD R-K 法で行った。

本研究では、界面境界条件を求めるため、各マーカー点でリーマン問題を界面法線方向に定義し、その解を固定背景格子に埋め込む手法を導入した。以下にその手順を説明していく。ここでは、簡単のため、シャープな界面で仕切られた 2 流体を想定する (図 1)。また、固定格子点には、ゴーストフルイド法のように、各流体の物理量が 2 重に定義されるものとする (各格子点は、各流体の値を持つ)。まず、マーカー点に物理量を定義するため、各流体の変数 (密度、速度、圧力) をそれぞれの Ghost fluid 領域に外挿する。外挿には、以下の方程式を用いた。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \pm \mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

ここで、 ϕ は外挿される変数、 \mathbf{n} は界面法線ベクトル、 τ は疑似時間である。本研究では、外挿の際に、Isobaric fix を行っている。外挿後、図 2 に示すように、各マーカー点に、各変数が内挿される。このように、値を外挿し、各格子点が各流体の値を独立して持つことで、マーカー点への変数内挿が非常に容易なものとなる。

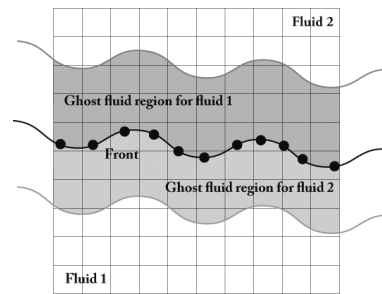


Fig. 1 A schematic of the ghost fluid region for extrapolation and interpolation.

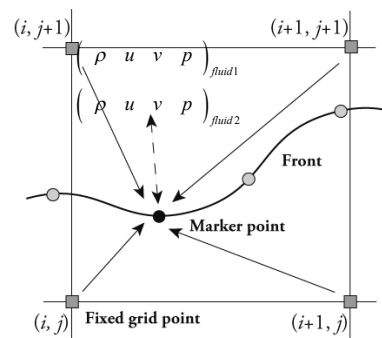


Fig. 2 A schematic of the interpolation to the marker point.

各マーカー一点上において、界面法線方向にリーマン問題を定義する(図 3). 本研究では、厳密リーマン解法を採用し、圧力、速度の法線成分、両サイドの密度を得た. また、内挿された速度は、事前に、法線と接線方向成分に分解し、接線方向成分は、後に使用するため保存しておく.

式(1)における速度の成分分解において、界面法線ベクトルの情報が必要となる. マーカー一点から直接求めることも可能であるが、本研究では、より複雑な界面に対応するため、マーカー一点から生成される標識関数の勾配、

$$n_{i,j} = \nabla I(x, t)_{i,j} \quad (2)$$

により求めた. 各マーカー一点上に定義された物理量を固定格子点に埋め込むことで、界面境界条件として使用する(図 4). まず、厳密リーマン解として求めた速度の法線方向成分を、保存していた接線方向成分と足し合わせる.

$$\begin{aligned} u &= u_n^* \cdot n + u_t \\ u_t &= u - (u \cdot n)n \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、*が付いた速度成分は厳密リーマン解を意味する. 本手法では、このようにして、速度の接線成分は界面を通して不連続量として扱われる. これは、ゴーストフルイド法での速度の取扱いと同様であり、非粘性流の取扱いとなる.

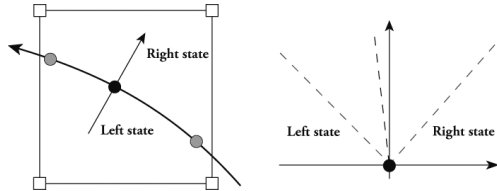


Fig. 3 A schematic of the construction of the Riemann problem on a marker point.

以上の手順により得られた各マーカー一点上の各流体の変数 ϕ (密度、速度、圧力)は、次のように固定格子点へ投影される.

$$\bar{\phi}_{i,j} = \sum_f (\phi_f \Delta e_f) w_{i,j}^f \quad (4)$$

ここで、上バー付きの ϕ は、固定格子点に投影された変数(界面フロント線素の長さ Δe が掛けられていることに注意)、 w は Area weighting による内挿係数である. 添え字 i, j は固定格子点のインデックスであり、 f はフロントの要素番号である. 同様に、界面フロント線素も固定格子点に投影する.

$$e_{i,j} = \sum_f \Delta e_f w_{i,j}^f \quad (5)$$

最終的に、式(4)を式(5)で割ることにより、マーカー一点から固定格子点への近似値は、

$$\phi_{i,j} = \frac{\bar{\phi}_{i,j}}{e_{i,j}} = \frac{\sum_f (\phi_f \Delta e_f) w_{i,j}^f}{\sum_f \Delta e_f w_{i,j}^f} \quad (6)$$

この式からわかるように、界面フロント線素と内挿係数による重み付き平均の形で、マーカー一点から固定格子点への近似が行われていることがわかる. この操作は、3次元においても同様にして行うことが可能である. 式(6)により投影された変数は、それぞれの Ghost fluid 領域に外挿され、界面境界条件として用いられる(図 4). このプロセスは、各流体に対して行われる.

以上、開発した手法をまとめると、(a) 各 Ghost fluid 領域に変数を外挿する(図 1)、(b) 固定格子からマーカー一点に変数内挿する(図 2)、(c) マーカー一点上で厳密リーマン解を得る(図 3)、(d) マーカー一点から固定格子点に解を投影する(図 4)、(e) 投影された解を各 Ghost fluid 領域に外挿する(図 4)、(f) Ghost fluid 領域に与えられた界面境界条件により、オイラー方程式を各々の流体領域で解く、(g) 得られた速度場によりフロントを移流させる、(a) 1.に戻る、という手順となる.

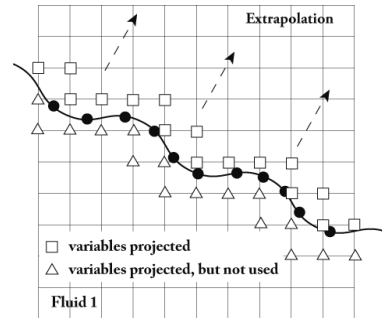


Fig. 4 A schematic of the projection of variables from marker points to fixed grid points.

4. 研究成果

(1) 水中爆発計算: まず、妥当性検証を目的として、円柱形状の圧縮された気泡が水中で爆発する状況を解析した. 初期気泡の直径を 0.4 として、初期条件を次のように与えた. 計算空間は、正方形(1×1)として、格子解像度の影響を調べるため、101×101(Grid1)と201×201(Grid2)の2つの格子を用いた. 四方の境界条件は、単純外挿とした. 図 5 は、 $t=0.058$ における密度の分布である. プロファイルには、格子数 500 点に

よる1次元モデルの解もプロットした。本計算結果は、低解像度にも関わらず、1次元モデルの解とよく一致していることがわかる。格子解像度を上げることにより、衝撃波と膨張波はシャープにとらえられる。一方で、界面の位置はほとんど影響がないことがわかる。これらにより、本手法の妥当性が検証された。

(2) 水中衝撃波空気泡干涉：最初の問題は、多次元とはいえ、接線方向速度成分がほとんど誘起されず、また、界面が法線方向にのみ移動するため、比較的容易な検証問題であった。そこで、次の例として、水中衝撃波と気泡の干涉問題を採用した。これまで多くの研究者が、手法検証のために採用しており、検証問題として適当なものと考えられる。初期条件として、平面衝撃波 ($M_{is} = 1.72$) が静止気泡を通過する状態を設定した。各物理量は次のように設定される。気泡の初期直径は6 mm、その中心を原点とし、入射衝撃波を気泡の右側 $x = 5.4$ mm に位置させた。計算空間は、12 mm × 12 mm とし、501 × 501 (気泡直径を約 252 cells で解像することに相当) 格子点とした。

図6は、入射衝撃波が通過することにより変形する気泡界面の時系列挙動を示している。衝撃波(圧力勾配)と界面(密度勾配)の相互作用により渦度が界面に発生し、中心軸付近にジェットが発生し、これが気泡を貫通する形で気泡を崩壊させる ($t=3.6 \mu\text{sec}$)。一般的に、泡内部の密度が外部より低い場合には、このようなジェットの発生が見られる。逆の場合は、液滴の変形に見られるような、界面から流体が引きちぎられるような変形が見られる。図7に、気泡の高さと幅の時間履歴を示した。過去に実施された高解像度の計算結果(気泡直径に約 800 cells)をプロットしており、本結果がそれらとよく一致していることがわかる。これらから、本手法により、定性的にも定量的にも気泡崩壊過程が正確にとらえられたといえる。

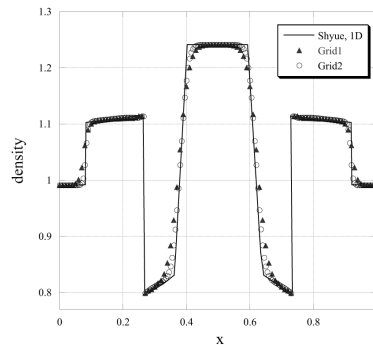
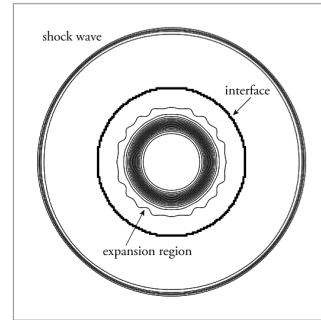


Fig. 5 A comparison of the density distributions along the line $y=0.5$ with the one-dimensional multicomponent model and the full simulations.

(3) 高速流中液滴崩壊：衝撃波背後に誘起された高速気体と液柱との干涉問題である。密度比が、前例と逆のケースであるが、シミュレーションするのがより難しい問題である。入射衝撃波を $M_{is} = 1.47$ と仮定した。液柱直径は6.4 mmで、中心は原点とした。入射衝撃波は、液柱の右 ($x = 4.0$ mm) に位置する。これらの条件は実験を基にした。計算空間は $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ とし、 401×401 の格子(液柱直径に 128 cells)を使用した。図8は、衝撃波が通過後の液柱の様子を示している。誘起された流れが液柱に衝突することにより、液柱前方部がわずかではあるがフラットになる。同時に、界面間の速度差が液柱肩口付近に Kelvin-Helmholtz waves を発生させていることがわかる。その後、液柱肩口で発生した波が成長し、最終的に液柱肩口から液柱の一部が引きちぎられる。この引きちぎられた液柱の一部は、外部流によって液柱後方へ流されていく。一方で、液柱の一部は引きちぎられていくが、液柱は(本計算時間中は)その形状をほぼ維持している。図9に示される反射衝撃波をはじめとした干涉場は、実験により観察された流れ場とよく一致している。本計算結果は、これまで報告されてこなかった界面不安定性が起因となる液柱崩壊現象をとらえており、これは界面追跡に

マーカー点を使用している本手法ならではの考えられる。液柱肩口で発生した不安定波をオイラー型解法 (VOF や Level-Set) でとらえるには非常に高解像度の格子が必要と予想される。本計算は、粘性や表面張力の効果を無視しているため、実際の界面はより安定であり、stripping 現象もより遅い時間で生じるものと予想される。より詳細な液柱変形挙動の詳細解析などが今後の課題である。

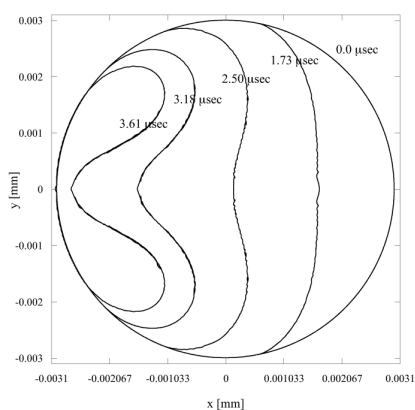


Fig. 6 A sequence of the interface motions of an air bubble induced by an incident shock wave.

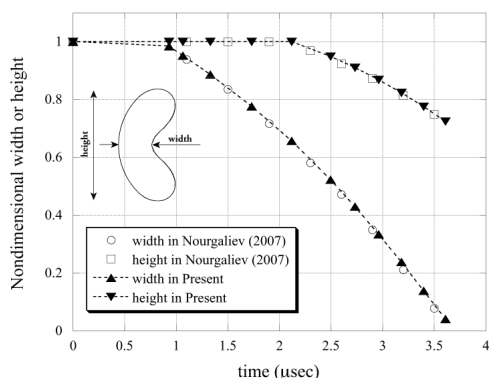


Fig. 7 Time histories of bubble height and width compared with an earlier study until the air bubble is collapsed.

(4) 本フロントトラッキング手法の界面境界条件の考察の過程において、オイラー型的手法ではあるが、高次精度中心差分法を用い、圧縮性他成分流体における新しい界面/衝撃波捕獲スキームを提案することにも成功した。界面における速度、圧力、そして温度平衡を満足する、一貫性ある人口粘性項を構築することで、これまで大きな問題となっていた虚偽振動を発生させずに界面/衝撃波を捕獲する新しい数値モデルである。更に、理想気体状態方程式で構築された本スキームを、超臨界流体のような非理想性が強い状態方程

式にも拡張することに成功した。これは当初予定になかった新しい成果である。

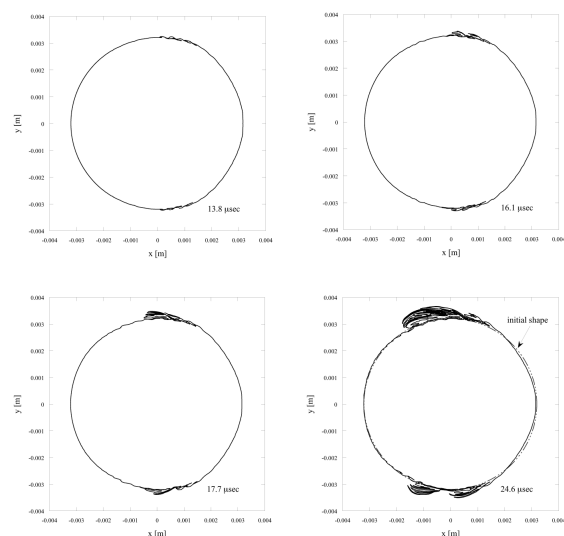


Fig. 8 A sequence of the interface motions of a water cylinder induced by the passage of a shock wave.

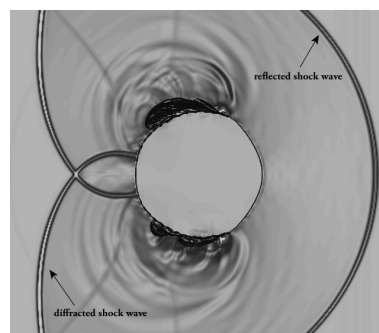


Fig. 9 Water interface and density gradient fields at $t=25.3[\mu\text{sec}]$.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) 寺島洋史, 河合宗司, 越光男, コンパクト差分法を用いた圧縮性多成分流体の界面圧力/速度/温度平衡スキーム, 日本流体力学誌ながれ, 査読無, 31 巻, 2012, 131-139

(2) 寺島洋史, 越光男, 界面平衡を考慮した超臨界圧極低温流体の高精度数値解法: 他成分系への展開, 日本流体力学誌ながれ, 査読無, 31 巻, 2012, 483-486

(3) H. Terashima and M. Koshi, Approach for simulating gas-liquid-like flows under supercritical pressures using high-order central differencing scheme, Journal of Computational Physics, 査読有, 231, 2012, 6907-6923

〔学会発表〕（計 5 件）

(1) 寺島洋史, 越光男, 界面平衡を考慮した超臨界圧極低温流体の高精度数値解法：他成分系への展開, 日本流体力学学会 2012, 2012

(2) 寺島洋史, 越光男, 超臨界圧における極低温流体混合現象の高精度数値モデリング, ロケットエンジンシミュレーションの最先端, 2012

(3) H. Terashima, S. Kawai, and M. Koshi, Approach for preventing spurious oscillations in compressible multicomponent flows using high-order methods, ASME Fluids Engineering 2012 Summer Meetings, 2012

(4) H. Terashima and M. Koshi, Approach for robustly simulating supercritical fluid mixing with large density contrast using high-order schemes, APS 65th Annual DFD Meeting, 2012

(5) H. Terashima and M. Koshi, Strategy for simulating supercritical cryogenic jets using a high-order central differencing scheme, International Workshop on Future of CFD and Aerospace Science, 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺島 洋史 (TERASHIMA HIROSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：20415235