

氏名	さいとう やすひろ
授与学位	齋藤泰洋
学位授与年月日	博士(工学)
学位授与の根拠法規	平成23年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科(博士課程)化学工学専攻
指導教員	VOF法を用いた気液流動解析の高度化に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 三浦 隆利
	東北大学教授 猪股 宏
	東北大学教授 塚田 隆夫
	東北大学准教授 青木 秀之

論文内容要旨

第1章 緒論

気相および液相を解析する気液二相流解析として、各相の流動を捉え、気液境界となる自由表面の形状変化を追跡する界面追跡法がある。界面追跡法の代表であるVOF(volume of fluid)法は、VOF関数 $f(0 \leq f \leq 1)$ を用いて各セルの性状を識別し、各相の流動をまとめて一組の支配方程式で解くことができる。数値流体力学には重要な三要素(解析精度・数値安定性・計算時間)があり、VOF法解析における流体計算、VOF関数 f の対流方程式に関する計算および流体計算とVOF関数 f のカップリングはそれぞれ計算時間、解析精度および数値安定性に関連する。一般に界面追跡法を用いた解析は、セミDNS(direct numerical simulation)とも呼ばれ、計算負荷が大きいことが知られている。工学的に気液二相流解析を実施するためには、解の信頼性が高く、計算コストが低い手法が求められる。そこで本論文では、流体計算における計算時間(第2章)およびVOF関数 f に関する計算における解析精度(第3章)に関して最適化することで気液流動解析の高度化を行い、実用プロセスへの応用として工業塗装プロセスの液体流動問題(第4章)へ適用する。

第2章 圧力速度結合解法の計算時間に関する一考察

非圧縮粘性流体解析では、支配方程式として連続の式および運動量保存式を解くために、圧力速度結合解法が必要である。この圧力速度結合解法は流体計算の大部分を占めており、計算負荷を低減させるために圧力速度結合解法を議論する必要がある。圧力速度結合解法としてMAC(marker and cell)系解法およびSIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equation)系アルゴリズムが広く適用されているものの、それぞれの解法を利用する判断基準が確立されていないのが現状である。そこで第2章では、SMAC法およびSIMPLEアルゴリズムを用いて非定常性の強い角柱周りの流れを対象に、解析

Cr	SMAC	SIMPLE
0.01	0.141	0.146*
0.05	0.141	0.142
0.1	0.141	0.142
0.2	0.141	0.142
0.5	0.139	0.142
1.0	0.138	0.141
1.5	0.135	0.142
2.0	0.134	0.141
Exp. [1]		0.146

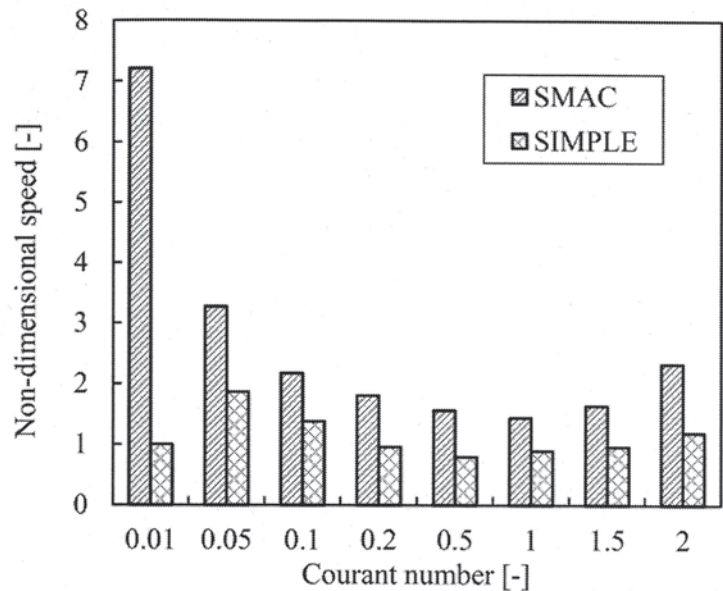


Fig. 1 Non-dimensional CPU time

精度，数値安定性および計算時間について比較した．1.3 s 経過した際の Strouhal 数($St = fD/u_{in}$)および無次元計算速度(基準計算時間/計算時間)を Table 1 および Fig. 1 に示す．SMAC および SIMPLE の解析精度はともに高いことを示したが，Courant 数($Cr = u\Delta t/\Delta x$)の増加にともない SMAC の数値解に差が生じ，SMAC の数値安定性が低いことを示した．計算時間は Courant 数によらず SMAC が高速であり，特に Courant 数が低い場合に効果的であることを示した．

以上のことから，Courant 数が小さい(時間刻みが小さい)場合，SMAC が非常に効果的であり，Courant 数が大きい(時間刻みが大きい)場合，計算が安定な SIMPLE が有効であるという判断基準を提案し，小さな時間刻みが必要な VOF 法解析において選択すべき圧力速度結合解法が‘SMAC’であることを示した．

第 3 章 VOF 法の解析精度に関する定量的な評価

VOF 法解析では，VOF 関数($0 \leq f \leq 1$)を用いて気液を表し，自由表面を再構築することで界面を捕獲する．VOF 関数 f は 1 流体モデルにおける輸送物性を決定し，VOF 関数 f が流体流動そのものを表すため，高い解析精度が要求される．自由表面の移動を追跡するには VOF 関数 f に関する非定常対流方程式を解く．この支配方程式を構成する項のうち対流項は非線形であるため，取り扱いが難しく，離散化する際に，数値拡散と呼ばれる数値誤差が発生し，解析精度に多大な影響を及ぼすことが知られている．数値拡散を減少させることを目的にさまざまな高次精度スキームが開発されているものの，厳密解を有する一次元流れにおいて比較されることが多い．VOF 法解析のように特別な必要条件($0 \leq f \leq 1$)を持ち厳密解が存在しない系では，実験値との比較が行われているものの，数値拡散を定量的に見積もり，スキームを評価する方法が確立されているとはいえないのが現状である．そこで第 3

章では、数値拡散を定量的に評価する方法としてなまり度(dullness)およびにじみ度(blur)を提案した。ダム崩壊問題を解析し、ベンチマーク値との比較では評価できない Chakravarthy-Osher (CO) 法と CICSAM(Compressive Interface Capture Scheme for Arbitrary Meshes)の差異を提案した方法により CICSAM が有効であることを示した(Fig. 2)。また、解析手法を変更しても数値拡散を完全に抑制することはできないものの、数値拡散を直接制御する逆拡散操作を施すこと(CICSAM-AD)で、より現実的な解を得ることが可能なことを定量的に示した(Fig. 2)。

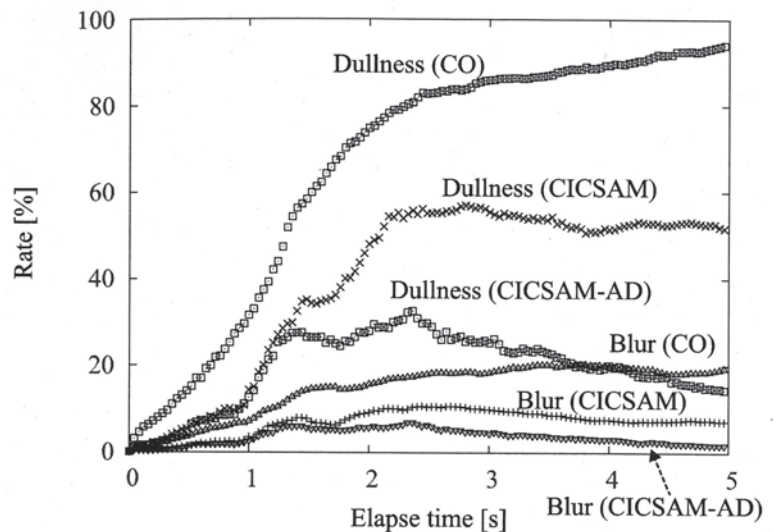


Fig. 2 Comparison of the rate of dullness and blur

以上のことから、高い解析精度が必要な VOF 法解析において選択する対流項離散化スキームが‘逆拡散操作を施した CICSAM’であることを示した。

第4章 高速回転ベルカップ周りの液体流動解析への適用

自動車塗装を始めとする工業塗装では、単位時間あたりの塗装面積が広く、仕上がり品質に優れる高速回転するベルカップを用いた噴霧塗装が広く利用される。高速回転ベルカップ噴霧塗装機は、高速で回転するベルカップに塗料を供給し、遠心力により噴霧を形成させ、製品に吹きつける。しかしながら、塗料が被塗装物に塗着する割合である塗着効率がバルク塗装と比較して低く、塗料飛散による作業環境の悪化やコスト増加が懸念され、塗着効率の向上を図ることが命題である。塗装プロセスは大きく分けて、微粒化・飛行・塗着プロセスに分類される。微粒化プロセスは、供給された塗料がベルカップの回転に伴う遠心力によって液膜を形成し、ベルカップの周縁で液膜のままもしくは液糸となって射出され、液滴となるプロセスであり、液滴の粒子径および粒径分布を制御する最も重要な領域である。特にベルカップ表面上で起こる流動現象を把握することが必要である。これまで実験的な検討が行われているものの、平均化された流れを観測するのに留まり、非定常的な流動現象を捉えることは難しい。そこで第4章では、微粒化プロセスに及ぼす因子の特定および定量化を目的にベルカップ表面上の流動現象を対象に数値解析を試みる。具体的には、ベルカップ表面上の液膜厚さを予測する。

解析対象はフラットなベルカップを模擬し、液体供給口を半径方向11 mm から12 mm のスリット状に配置した。座標系は二次円筒座標系を用い、解析領域 (半径方向10 mm から14 mm, 高さ方向0.4

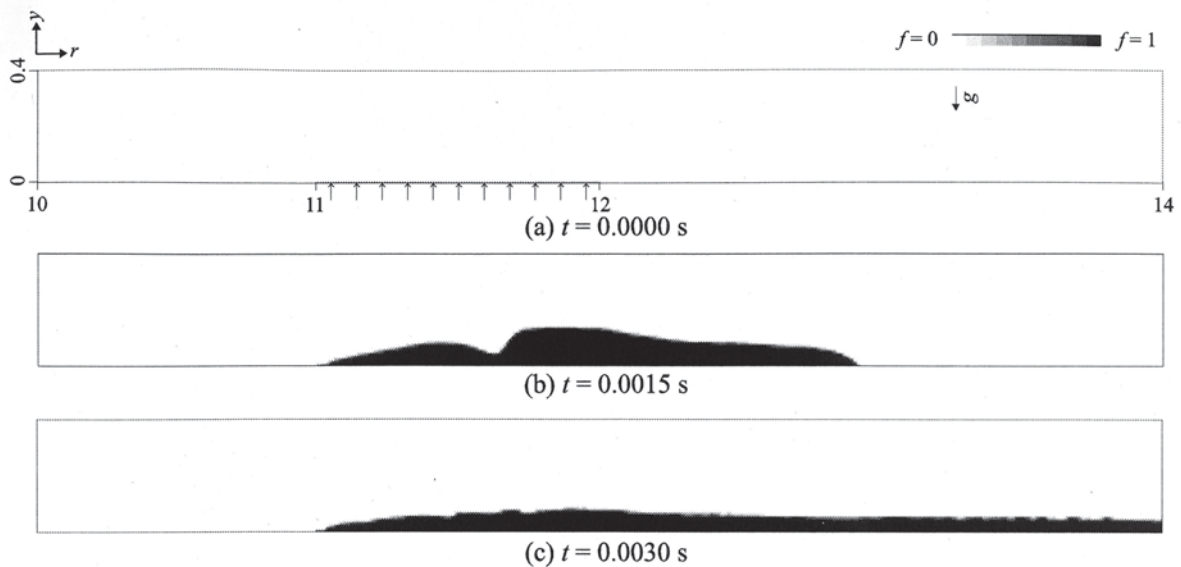


Fig. 3 Numerical results of liquid flow

mm)を各方向に 400×40 分割した。液体は水を、気体は空気を仮定した。解析の一例として、Fig. 3 にベルカップ表面上の流動の時間変化および Fig. 4 に回転数 (TA)を変えた場合の液膜厚さを示す。Fig. 3 から時間の経過とともに、遠心力の影響により液膜を形成し、半径方向の外側に移動することがわかる。Fig. 4 から回転数により液膜厚さが薄くなる傾向を示した。また、高回転数領域では液膜厚さの変化が少ないことがわかった。

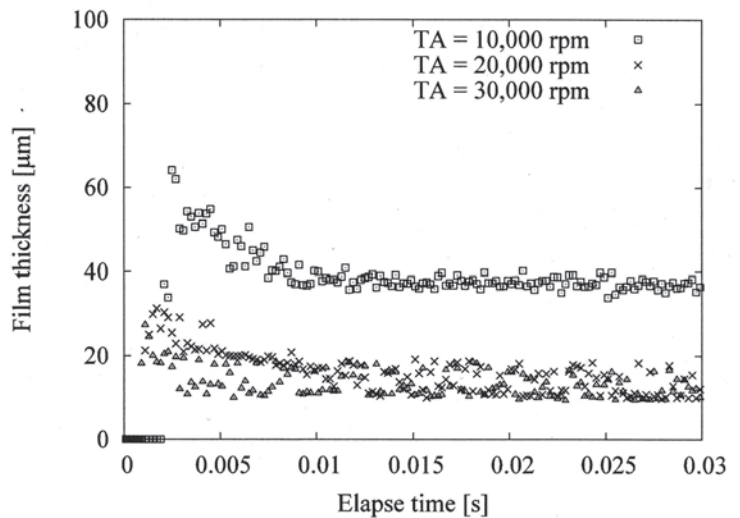


Fig. 4 Numerical results of film thickness

第5章 結論

界面追跡法として VOF 法解析を対象に、計算時間の低減および解析精度の向上を図る高度化を実施し、実用プロセスへの応用として工業塗装プロセスの液体流動問題へ適用した。高速回転するベルカップ表面上における液膜厚さに及ぼす因子を評価した。

【記号】 Cr : Courant number [-], D : width [m], f : VOF function [-], St : Strouhal number [-], u : velocity [m/s],

Δt : time step [s], Δx : cell width [m], Subscript in : inlet

【参考文献】 [1] R. W. Davis and E. F. Moore, *J. Fluid Mech.*, **116**, 475–506 (1982)

論文審査結果の要旨

本論文は、界面追跡法である VOF (volume of fluid)法解析の高度化を行い、実用プロセスへの応用を目指した論文である。工学的に気液二相流解析を実施するためには、数値解の信頼性が高く、計算コストが低い手法が求められるため、本論文では、VOF 法解析における流体計算の計算時間および VOF 関数の計算の解析精度に関して最適化し、実用プロセスへの応用として工業塗装プロセスの液体流動問題へ適用を図ったものである。

第 2 章では、非圧縮粘性流体解析において計算の大部分を占める圧力速度結合解法の計算負荷低減手法を検討した。現状では、圧力速度結合解法として MAC (marker and cell) 系解法および SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation)系アルゴリズムが提案されているが、それらの解法を利用する基準が未だに確立されていない状況である。そこで、第 2 章では、SMAC 法および SIMPLE アルゴリズムを用いて二次元非定常流れを対象に、解析精度および計算時間について比較した。その結果、両手法の定常状態および非定常状態の解析精度がともに高いことを示し、SMAC の計算時間は SIMPLE より短く、特にクーラン数が低い場合に SMAC が効果的であることを示した。また小さな時間刻みが必要な VOF 法解析では、選択すべき圧力速度結合解法が ‘SMAC’ であることを明白にした。

第 3 章では、VOF 関数の対流方程式の計算における解析精度について検討した。VOF 関数の非定常対流方程式を離散化する際に発生する数値拡散の定量化を行い、各種のスキームを評価するとともに逆拡散操作の導入を検討した。数値拡散の定量的な評価方法としてなまり度およびにじみ度を提案し、提案した評価法によりベンチマーク値との比較では評価できない CO (Chakravarthy-Osher)法と CICSAM (compressive interface capture scheme for arbitrary meshes) との比較を行い、CICSAM が有効であることを示した。また逆拡散操作の必要性を定量的に示し、現実的な解析を行うために、選択すべき VOF 関数の対流項離散化スキームが ‘逆拡散操作を施した CICSAM’ により現実的な解析が可能であることを明らかにした。

第 4 章では、実用プロセスとして工業塗装プロセスにおけるベルカップ表面流動現象の解析に対して世界初の挑戦を試みた。高速回転ベルカップ噴霧塗装機は、高速で回転するベルカップに塗料を供給し、遠心力によって噴霧を形成させ、製品に吹き付け塗装する機構であるが、超高速で回転するベルカップに着目した数値解析による研究例は現在まで皆無である。本研究では、高速で回転するベルカップに供給された液体が遠心力によって液膜を形成し、その液膜がベルカップ表面上を移動する現象の解析を可能とした。回転数により半径方向の外側に移動する速度は異なることを示し、時間が経過すると、液膜厚さが一定となり、液膜には波立ちが発生することがわかった。また回転数が大きい方が液膜厚さは薄くなる傾向を示す一方、2 万 rpm 以上の高回転数域では、ほぼ同程度の液膜厚さとなり、液膜厚さがある一定値に漸近する傾向を示した。液体供給流量が多い方が、液膜厚さが厚くなるが、その傾向は、回転数の影響と比較して小さいことを明らかにした。以上により、工業塗装プロセスにおけるベルカップ表面上の液膜厚さを数値解析する手法の開発を実現したものであり、化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。