

[討議・回答]

二瓶 泰雄
瀬岡 和夫 共著

「GALモデルに基づく移動境界流れ解析法の構築とその応用」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 642/II-50, 2000年2月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

中山昭彦 (神戸大学)

Akihiko NAKAYAMA

近年流体運動の数値計算法の進歩は著しく、特に流体の相が変わる界面のある場合や異なる相が混在している場合など、従来では解く事自体難しいとされていたものまで計算が可能になり精度も上がって来ている。本論文もまた相間界面の移動を精度良く計算する新しい解法の提案と検証で、今後いろいろな場合で応用されることが考えられ非常に興味あるものである。今後のユーザーの立場から少々細かくなるが、3点ほど質問することで討議に替えさせて頂きたいと思います。

まず主題の界面追跡であるが、本方法では体積濃度関数の計算に、界面を含むセルでは液体の占める部分の重心や法線方向、曲率などの計算が加わるため、計算負荷が増加する可能性がある。他の方法との比較は、同一格子、Courant numberの条件での精度の比較なされているが、計算時間はどうか知りたいところである。

次に各々の相についての運動方程式の解法で、界面での圧力の条件は説明されているが、速度についての条件は明確に示されていない。本方法はFractional step methodを用いているので、中間仮速度の境界条件が必要になる。Kim & Moin¹⁾によればFractional step methodでの中間速度の境界条件には実速度から圧力勾配の影響分を取り除いたものにししないと不都合が起ると指摘されているが、本方法では界面での中間速度についての条件はどのような取り扱いをしなければならないのか。

最後に水柱崩壊問題への適用例について幾つか質問させていただきます。この問題では、液体にかかる力は重力とそれに起因する圧力が支配的で粘性力は殆ど影響しないと考えられる。しかし、すべりなしの側壁と底面の近傍、また界面近傍では重要であると考えられる。図-9に示されている場合であると、水柱の高さと平均的速度(図から約0.5 m/s)で定義されるレイノルズ数は液体側で 5×10^5 、気体側で7000程度で差分法による数値計算にはかなり高いレイノルズ数である。側壁、底面の界面層は非常に薄く本計算格子で

は境界層内の変化は捉えられていない。また界面の気体側でも速度勾配が大きい層があるが十分解像されていないように見える。粘性、レイノルズ数の影響が捉えられていない可能性と、移流項に用いられている風上差分による数値粘性の影響が気になるところである。

すべりなし境界では液体・気体界面も動かないので、界面の鉛直壁上での理論値は常に初期値で、壁から少し離れたところでは時間が経つにつれ壁に近づいていくはずである。また底面近傍でも界面はやや離れた位置から時間の進行とともに、底面に近づいていくのではないのか。図-9や図-12ではこの傾向が見られないが、これも粘性の効いている領域が解像されていないためと想像される。これが全体の予測にどう影響しているのか。図-10に水面の高さと、液相フロント位置の計算結果が、実験値と比べられている。水面下降は実験値よりやや早く、フロント位置予測は実験値よりやや遅く予測されている。これは粘性過大評価では説明出来ない。また越塚の計算やVOF法による結果、また未発表であるが睦田²⁾の計算結果と反対の傾向である。もし、理由が分かっているなら知りたいところである。以上の水柱崩壊問題についての質問は移動界面追跡法の精度と直接関係無いかも知れないが、高レイノルズ数流れに応用することが目的とされているので、理由は明らかにされている方が良いのではないのか。

参考文献

- 1) Kim, J. and Moin, P.: Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, *J. Comp. Phys.*, Vol. 59, pp. 308-323, 1985.
- 2) 睦田秀実: 大規模砕波による気液混相流体場における高精度数値計算手法の開発, 岐阜大学博士論文, 2000. 3.

(2000. 3. 10 受付)

著者らの論文に対して貴重な討議を寄せて頂きましてありがとうございます。以下に貴員からの3種類の質問に対する回答を示したいと思います。

まず、本モデルと他の既存モデルの計算時間に関する比較については、本モデルの計算時間は既存のオイラー手法の約2倍程度となっていることが確認されている。このような計算時間の増加の要因に関しては、ご指摘の通り、格子内の液体(もしくは気体)が占める部分の重心に関する計算などがモデル上付加されているためであると考えられる。このような計算時間の差は、実際に行われているプログラミング技法に大きく依存しており、今後検討して計算時間の短略化を図る必要がある。ただし、ここで移動境界追跡モデルとして適用されているGAL(Grid-Averaged Lagrangian)モデルの大きな特徴として、大きなクーラン数で計算しても計算精度が落ちることはなく、高精度な結果を維持していることが原論文の図-5から分かる。空間解像度を同じにして本モデルと既存モデルの結果を比較した場合、本モデルの場合には計算時間間隔を相対的に大きくしても同程度の計算精度が得られる、ということを上記の結果は示している。このようなGALモデルの利点を考慮すると、実際の計算負荷に関しては、本モデルは既存モデルと比べて遜色ないものと考えられる。

二つ目の気液界面上における速度の境界条件に関しては、原論文中の2.2に記載されているとおりである。具体的には、気相側の中間速度に関しては、単に液相側の中間速度の外挿値を与える、というやり方に準じており、この手法は他研究者の移動境界計算¹⁾にも使われている。このようなシンプルな取り扱い方では、ご指摘のような圧力勾配の影響は加味されていな

いものの、実際上の計算においては特に問題は生じていない。また、本モデルに基づいて液相と気相に加えて分散性気泡粒子の効果まで考慮した3次元砕波シミュレーション²⁾も実施したが、ご指摘のような不都合は生じていない。

最後に、水柱崩壊問題の数値シミュレーションに関しては、本計算では等間隔格子を採用しているため壁面近傍での格子解像度が十分細かくないこと、また、乱流モデルを用いずに計算を行っていることなどから、本計算における壁面近傍の流動現象の取り扱いに関しては今後改善していく必要があることは言うまでもない。また、ご指摘されているような、液相フロント位置に関する本計算結果と実験結果(原論文中の図-10)との差異については、わずかであったため、その理由までは検討していない。また、このような計算をより高精度に実現するためには、壁面上における気液フロント周辺での乱流構造特性を適切に反映した壁面境界条件を課すことが必要不可欠であるが、それらに関する知見が少ないことから、上述した計算精度に関する詳細な議論を行うには限界がある。

参考文献

- 1) 金井亮浩, 宮田秀明: 密度関数法を応用した気泡の数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, No. 179, pp. 41-48, 1996.
- 2) Yasuo Nihei and Kazuo Nadaoka: Breaking-wave simulation with a new computational method for moving boundary flows based on a GAL model, *Proc. 4th Int. Conf. Hydrodynamics*, Vol. 2, pp. 533-538, 2000.

(2001.1.19 受付)