

自由表面を有する円筒容器内渦崩壊の可視化

Visualization of vortex breakdown in a confined swirling flows with free surface

岩津玲磨, 東京電機大学, 千代田区神田錦町 2-2, E-mail: Iwatsu@cck.dendai.ac.jp

水山哲彦, 東京電機大学大学院, 千代田区神田錦町 2-2

加藤茂, 東京電機大学大学院, 千代田区神田錦町 2-2

Reima Iwatsu, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda Nisiki-cho Chiyoda-ku 101-8457 Tokyo

Tetsuhiko Mizuyama, TDU, 2-2 Kanda Nisiki-cho Chiyoda-ku 101-8457 Tokyo

Shigeru Kato, TDU, 2-2 Kanda Nisiki-cho Chiyoda-ku 101-8457 Tokyo

Numerical investigation was performed on the axisymmetric swirling flows of incompressible viscous fluid within cylindrical geometry with top undeformable free surface. It had been noted that there existed some discrepancies on the meridional flow patterns between the previous numerical studies and the experimental visualization study. Present computation exhibited qualitative similarity to the numerical study by Brons *et al.* for the parameter region $h > 1$ and clarified in detail flow state dependency on the prime parameters for $h < 1$. Validity of the theories to explain the vortex breakdown mechanism was evaluated by the post-processing of computed numerical solutions.

1. 序論

渦崩壊現象は航空に関連した外部流で発見されて以来、翼端渦、管内の旋回流、容器内の流れなどにおいて研究されてきた。この現象に関する概説論文が、既に数度にわたって書かれているほどである。渦崩壊の発生メカニズムを説明するために、幾とおりもの理論が提案されている。しかしこのように多数の実験、理論的解析が行われたにもかかわらず、渦崩壊現象に関する統一見解が存在しないという状況にある。

円筒形状の容器内で端版の回転によって引き起こされた旋回流中に発生する渦崩壊は、管内の旋回流に生じる渦崩壊とは幾つかの点において共通点を持たないことが認識されてきている。パラメータ変化に対するよどみ点位置の敏感な移動などは、定常解には感知されず、すべてのパラメータと境界条件を明確に指定することができる点が、数値解析には有利である。実験と数値計算の結果は非常に良く一致して、いずれの結果も渦崩壊が定常に存在して、軸対称性を保つバブル型の崩壊が観察されることを示している。

円筒形状の容器上面を自由表面で置き換えた場合にも上記の流れと類似の特徴が観察される。大きな相違点は、自由表面上に剥離線をもつ再循環領域の形成であるが、類似性から渦崩壊と呼ぶことにする。自由表面の変形量が小さいとき、この問題は、2倍のアスペクト比をもつ円筒形状容器の両端版を回転させる問題と、流れ場の反対称性が保たれるパラメータ範囲において同等である。

本問題を2種類の可視化法で実験した Spohn ら⁽¹⁾の実験結果は、Valentine と Janke⁽²⁾および Brons ら⁽³⁾の数値計算結果とあるパラメータ範囲においては定性的に一致するが、全般的に不一致点が多い。Valentine と Janke の結果は Brons らの結果と良く一致するが、計算されたのはパラメータ平面の狭い区間に限られている。Brons らは対称軸近辺の特異点の位相変化を明らかにしたが、計算結果の方では低アスペクト比に対する計算が行われておらず、完全な結果ではない。Spohn らの実験も可視化の困難から低アスペクト比を調べていない。

この様に、Escudier 問題と比較すると本問題では基本流のパラメータ依存性に関して実験と計算結果の不一致が顕著で、また調査されていない広いパラメータ領域が残存している。これらの理由から自由表面を持つ容器内旋回流の問題を数値計算によって調べた。本計算結果は過去の実験および数値計算によって取り扱われなかったパラメータ領域におけ

る流れ場の様子を明らかにした。この点に関連して、現在までの研究の問題点、不明点、これからの解明が望まれる点について、数値計算法、可視化法、実験それぞれの問題点に言及しながら論じる。

2. 計算法

基礎方程式として軸対称の渦度方程式、流れ関数の式、旋回成分の運動方程式を用い、2次精度の差分公式に基づき離散化して解いた。時間方向の近似度も2である。詳細は⁽⁵⁾による。半径 R 、高さ h の円筒形容器内の非圧縮性粘性流体を一定角速度で回転する底面で動かす。そのとき円筒形容器の側壁は固定壁で、上部は変形のない自由表面であると仮定する。本問題の支配パラメータはレイノルズ数 Re と容器のアスペクト比 h である。レイノルズ数、アスペクト比の定義はそれぞれ $Re = R^2 \omega / \nu$ 、 $h = H/R$ である。ただし流体の動粘度を ν とする。

3. 結果

計算は $Re = 4000, 0.2 < h < 4.0$ の範囲で行い、中立曲線を求め、定常解を $r-z$ 面内の流れで分類した。非定常解については、臨界 Re をわずかに越えた Re で計算を行い、再循環領域の時間変化を調べた。

本計算においては超臨界ホップ分岐が観測された。Lopez⁽⁴⁾は両端版回転の問題を取り扱い、亜臨界ホップ分岐を報告したが、その後この結果は追試確認されていない。本計算においても亜臨界の分岐を確認することはできなかった。臨界 Re は h の値によっては Brons らによる値よりも高い傾向にあるが、 h の別の値では低い値をとった。また中立曲線は少なくとも4個以上の区分連続な曲線から成り立っているように推測される。計算された臨界 Re は高 h では Spohn らの実験と近似し、低 h では高くなる傾向にあった。Escudier 問題と同様3次元的な擾乱に対する安定性が不一致の原因と推定される。

渦崩壊を伴う非定常流は、回転軸上のよどみ点位置の振動、軸と自由表面の交点における新たな渦(corner vortex)の生成を示すが、 Re の増加とともによどみ点の消滅、複数個の新たな特異点の生成を伴う渦運動に移行する。これら2つの状態間において卓越振動数の変化は連続的であった。この現象

は、もし実験における非定常流が軸対称に近い形で現われる場合には、 Re の値をある閾値以上に増加させたとき、急速な可視化染料の拡散として観察される筈である。また Re を増加すると卓越振動数とは別な基本振動数を持つ振動数成分が現れた。

定常解を再循環領域の配置と特異点の個数に着目して約 12 の状態に分類した 流れ場の状態図(図 1)は $h = 1$ で Brons らの図と定性的にほぼ一致する。対称軸上に 2 個の再循環領域が生成するパラメータの限界値が、Brons らの $(h, Re) = (2.24, 1275)$ に対して、本計算では $(2.17, 1229)$ となり、妥当な一致を示している。Spohn らの可視化実験において漠然と 'Long bubble' として分類されたパラメータ領域の状態がより詳細に明らかになった。上記のパラメータ値付近の流れ場の分類も、本計算と Brons らによる計算は定性的に一致する。なお本計算は $h \sim 1.4$ の定常解においては鞍点の消滅が生じないことを明らかにした $h = 1$ において計算結果はパラメータ値に応じて複数の異なる状態を現した。計算された状態図は $h = 0.5$ において h, Re 軸近辺に再循環領域を持たない領域があることを示している。Brons らが Escudier 問題との類推で示唆した、co-dimension one の特異点の分岐曲線の楕円曲線による限界曲線の表現は、数値計算から補間された値に対して大きな誤差をもつ。したがって適当な仮定ではないものと考えられる。

定常解をもとにした解析によれば、 h の値が大きい場合には Hall の擬似円筒方程式よりも Berger と Erlebacher の式が良く成り立つことを示している。これは支配方程式が放物型の性質を示さなくなる点から妥当な結果である。したがって本問題に対しては、また、Lopez の基準式が不十分であることを示唆する結果である。しかし h の値が小さい場合には、回転軸のまわりの比較的大きな半径まで、すなわち $r < 0.4$ 、ほぼ遠心力と圧力の間でつりあいが保たれていることを速度分布などは示している。2 次流れの速度成分 (u, w) の大きさは主流に対して 10^{-5} 以下で、この小さな値の成分が断面 (r, z) 内流線の変化を担っていることになる。

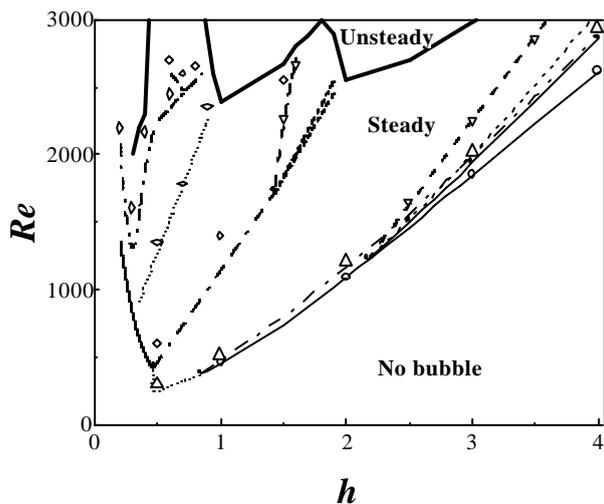


Fig. 1 Computed flow state diagram on the (h, Re) plane.

4. 議論と結論

Escudier 問題、本問題、あるいは Valentine と Jahnke ら、Lopez によって取り上げられた問題に共通する問題点と

して渦核の半径、渦度、旋回方向速度成分の 3 パラメータを物理的パラメータから指定することができない欠点がある。さらに渦崩壊のメカニズム解明のためには、旋回速度成分と渦度分布を独立に指定可能な問題設定がより適当であると考えられる。それが直接に可能であるのは流入、流出を伴った拡大管あるいは収縮管内の流れの問題である。管内流問題においては、臨界状態の存在、解の 2 重性、カスプ分岐の発生などが数値計算によって示されている。ただし流出条件を設定することに関するあいまいさと、よどみ点位置がパラメータ変化により敏感に影響を受けて上流へ移動する点が問題視されている。発生した渦が時間的にあるいはパラメータ値の変化とともに上流境界に到達する場合があるため、計算結果の妥当性を疑問視する論文もある。本問題および容器内渦崩壊の問題はこうした境界条件の設定に関連した不定性がない代わりに、上述の欠点を有する。容器内の問題でこの欠点を取り除くためには、容器半径とは異なる半径の回転円盤を使用して、旋回流の半径スケールを指定する問題設定が考えられる。この場合には本問題では容器角に隠れていた特異点が平面上に現われる問題点が発生するが、この点近傍を特別処理する方法で十分に取り扱い可能であると思われる。あるいはもし 3 次元計算が十分に実行可能な計算環境のもとに置かれているのであれば、旋回流発生実験装置をモデル化した BFC 格子を組んで 3 次元計算の実施を試みる方法が可能性として考えられる。

本問題に関しては、流れ場の解明はまだ完全でないことが指摘される。本計算は h の値が 0.2 以上で行われており、低アスペクト比の問題が依存として解析されていない。低アスペクト比の問題では、本計算で仮定したフルード数 Fr 無限大の仮定を、 $O(1)$ の大きさを持つ Fr 値の問題として取り扱うことによって、自由表面近くの渦度分布と流れ場の問題の観点から研究することが可能であると考えられる。また、2 番目の問題としては、自由表面の変形は無視するが、3 次元的な流れ場の変化に着目する可能性も考えられる。

すでに発表されている Spohn らの蛍光染料、電解法による可視化実験で明らかかなように、本問題に対する可視化実験では流れ場の詳細が明確にできていない。パラメータ値によっては可視化が困難であると報告されている。また可視化実験に対応する流脈線の数値計算による可視化法に関しては、軸対称性などの点で渦崩壊の発生形態を誤って観察する危険性が Neitzel によって指摘されている。したがって今後実験ではこうした点に留意した可視化が必要である。さらには可視化に留まらず、流速分布の測定結果の必要性が指摘される。本問題に関しては実験結果が不足しており、新たな実験研究の実施が望まれる。

参考文献

- (1) Spohn, A., Mory, M. and Hopfinger, E. J, J. Fluid Mech. 370 (1998) pp.73-99.
- (2) Valentine, D. T. and Jahnke, C. C., Phys. Fluids 6 (1994) pp.2702-2710.
- (3) Brons, M., Voigt, L. K. and Sorensen, J. N., J. Fluid Mech. 428 (2001) pp.133-148.
- (4) Lopez, J. M, Phys. Fluids 7 (1995) pp.2700-2714.
- (5) 岩津, 兎山, 日本機学会論文誌(B 編)66 巻 643 号 (2000-3)pp.107-114, 2000.