

審査の結果の要旨

氏名 安部 諭

本論文は、「汚染質拡散に関するリバースシミュレーションの研究」と題して時間逆解析(リバースシミュレーション)による拡散源特定手法を構築するために、最大の問題点である「数値不安定性」に対する解析方法を提案・実践、さらには実問題適用に向けての課題に関して論じたものである。

流体中の任意の場所から拡散物質が発生した場合、その物質はバックグラウンドに存在する流体によって運搬希釈される。バックグラウンドの流体は連続の式、Navier-Stokes方程式、拡散物質に関してはその輸送方程式により支配されている。既往の研究による拡散解析手法は観測、実験さらには数値計算であり、それら解析の本流は任意に拡散源を設定し、そこから拡散物質を放出し濃度分布、濃度変動強度、ピーク濃度などを論じてきた。しかし、拡散源が分からない場合に、それを特定するための解析手法は未発達段階である。拡散源特定手法を確立することは環境問題への対応、発電所や工場、海洋湖沼など水域での突発的な漏えい事故などで即座に原因を解明すること、さらにはテロ攻撃などの犯罪行為への対策、抑止力にも繋がる。

本研究の第一段階はリバースシミュレーションの第一かつ最大の問題点である数値不安定性への対応である。本研究では、ローパスフィルター操作を用いて数値不安定性を除去することに取り組んでいる。

まず、ローパスフィルター操作を濃度場に適用し安定化を試み、リバースシミュレーションの実現可能性を論じている。この時、解析対象は平面上の流れ、単体建物周りの流れでの拡散である。その結果、ローパスフィルター操作は数値安定性確保に有用である事が示されている。しかし、解析領域全体にフィルター操作を施した場合、結果として得られた濃度分布は計算領域全体に大きく拡がり、濃度分布の重心位置、拡散幅の時間変化は順方向解析のそれらと比べて対称性が良くなく、高濃度を示す位置は初期条件として設定した位置と大きく離れた結果になってしまった。以上より、改善の余地は多いにあるものの、フィルター操作により安定性を確保し、リバースシミュレーションは実現可能であると示している。

次に、リバースシミュレーションの精度向上を目指し、ローパスフィルター操作の対象を濃度フラックスにし、リバースシミュレーションが拡散源特定に有用であるかを論じている。解析対象は濃度場にフィルター操作を施した時と同じ平面上、単体建物周りの流れ

場での拡散である。その結果、濃度フラックスへのフィルター操作は数値安定性を向上させると同時に、上述の濃度場へフィルター操作を施した解析で生じた解析領域に拡散物質が大きく拡がるという問題点が格段に改善され、高濃度を示す位置は初期条件として設定した拡散源付近に集中する結果となっている。さらに、重心位置、拡散幅の時間変化に関しても順方向解析のそれらと対称性が向上し、良い結果を示している。このリバースシミュレーション精度向上の要因は、本論文中では拡散物質に数値解析上の輸送方程式を用いて考察を行い、以下のように考察している。濃度場にフィルター操作を適用するより濃度フラックスにフィルター操作を適用するほうが、数値不安定性の原因となる丸め誤差を含む高波数成分が担う強い拡散効果を選択的に排除することができる。

以上より、濃度フラックスにフィルター操作を施すことにリバースシミュレーションの精度は向上し、拡散源特定に有用であることが示されている。

本研究の第二段階は、実問題への適用に向けての観点から論じている。

まず、リバースシミュレーションの格子解像度・フィルター幅依存性について論じている。解析対象としては、流線が大きく曲がり循環流を形成するキャビティフローでの拡散としている。その結果、濃度フラックスへのフィルター操作はキャビティフローのような複雑な流れ場でも適切に作用し数値安定性を確保することが確認されている。さらに、リバースシミュレーションの格子解像度依存性については順方向解析のそれより、大きく実問題適用し拡散源特定を行う際はその決定が重要である。また、フィルター幅依存性についても同様に大きく適切なフィルター幅の決定がリバースシミュレーションの精度を大きく左右するという重要かつ有用な知見を得ている。

次に、限られたモニタリングポストから得られた濃度の時系列データから濃度塊をモデリングし、拡散源特定に有用であるかを論じている。実問題への適用を考慮した場合、数値計算のように詳細な空間全体の濃度分布を得ることは難しい。そこで、本研究では数値計算上に仮想のモニタリングポストを設定し、そこで得られた時系列データから濃度塊をモデリング、拡散源特定を試みている。解析対象はシンプルな平面上の流れ場とし、放出開始時間を既知とした場合には、拡散源を特定することに成功している。さらに、放出開始時間の特定に関しても、時系列データの検知継続時間を用いることにより特定できる可能性があることを示唆している。

本論文は、リバースシミュレーションという拡散源特定に向けて新たな可能性に挑み、その発展に大きく貢献している。本研究で得られた知見は工学的、社会的な有用性は極めて高い。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。