

氏名	渡辺 毅
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第3891号
学位授与の日付	平成21年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	流体方程式の基本解
論文審査委員	教授 柳瀬眞一郎 教授 富田 栄二 准教授 堀部 明彦

学位論文内容の要旨

現在の流体力学における最大の未解決問題の一つは乱流である。乱流研究には、統計的に乱流を把握しようとするアプローチと、流体方程式を直接解いて乱流を理解しようとするアプローチがある。これら二つのアプローチは、大自由度系として乱流を把握しようとする「大数」の立場と、小数自由度系から出発してその自由度を大きくしながら乱流に近付こうとする「小数」の立場とそして整理される。しかし問題は、その中間に位置する広大な「中数」の領域であり、この「中数」の領域で、層流から乱流への遷移が起こる。本研究はこうした問題意識を持って、小数自由度の側から乱流へ至るまでの道筋をたどることを目的とするものである。

このような方針で研究を進めるにあたって重要になるのが「基本解」という概念であり、初期条件に依存しない普遍的な解を意味する。これは柳瀬によって提案された概念であり、単なるシミュレーションとは本質的に異なり、方程式系の骨組みを与える、という意味で非常に重要である。何故なら基本解は強い乱流であってもその中に埋め込まれており、乱流を支配する軸を提供するものと考えられているためである。

こうした立場から、本研究ではまず正方形断面曲り管について詳しく調べ、従来の2次元性を仮定した計算で得られてきた周期解が、実際には3次元的な構造を持ち、進行波となっていることを示した。この進行波は、曲り管に限らず壁近傍の流れ一般に見られる縦渦構造を持っているため、他の多くの流れに応用可能な成果である。

もう一つの研究対象は円柱後流であるが、これは開いた系を構成し、境界条件が無限遠で定義されるだけでなく、系への流出入を伴うため、数値的に扱うのが困難である。そこで本研究は従来法とは全く異なる手法として、無限領域を数学的に有限領域に写像してスペクトル法を用いる方法を提案した。この手法の利点は、流出入に関する困難を回避できる点で数値的に高い精度が得られる。さらに本研究では、現在急速にその有効性が認知され使用されつつある、Poincaré断面の不動点計算と GMRes 法を組み合わせる手法を逸早く採り入れて計算を行った点も重要である。一般に数値的に流れを表現しようとする場合、最終的には線形システムを解く問題に帰着されるが、良く知られているように、直接法でこれを解こうとすると、系の自由度の3乗に比例して計算量が増大するため、従来法では自由度が $O(10^5)$ 程度が限界であった。ところが本研究で新しく導入した、Poincaré断面の不動点計算と GMRes 法を組み合わせる手法では、場合によっては $O(10^7)$ という、従来は全く不可能だった自由度の系でも、わずか数日で周期解が得られる。本研究はこの手法により、これまで十分に明らかにされてこなかった、高レイノルズ数での周期解の分岐構造を明らかにした。

論文審査結果の要旨

本論分は、第1部と2部からなる。

第1部では、矩形断面曲り管内流に関する数値解析の結果を述べている。特筆すべき結果は3次元進行波解を厳密に求めた点であり、これは世界で始めて得られた成果である。また、2次元解析との比較も大変興味深い。つまり、2次元解の周期解は、3次元進行波解を管断面で観測したものと一致している。深厚な未開は本問題での基本解となっていて、これを基にしてカオス状態から乱流状態に至るまでの解の変化を追うための基本となる。

第2部では2次元カルマン渦の数値解析結果が述べられている。特に顕著な成果は、これまで多くの研究で用いられてきた流出・流入条件を必要としない数値スキームが完成した点である。用いられているのは適当な変数変換を用いたスペクトル法で、様々な工夫によって最適化がなされている。これによって定常解から始まり、周期解まで厳密に解が求められていて、これらが本問題における基本解である。解の精度の検討ではこれまでに得られた実験的・理論的な解との一致は良好である。さらに、線形安定性計算も求められ得られた攪乱の形状は大変好ましい空間構造を持っている。これを基にしてカオス状態から乱流状態に至るまでの解の変化を追うことが期待される。

以上の点から本論文は博士（工学）に相応しいものであると考える。