

審査の結果の要旨

氏名 松谷 浩明

修士（工学）松谷浩明提出の論文は、「Study on the Immersed Boundary Method to Compute Flow around Thin Plate」（和訳：「薄板周りの流れを計算するための境界埋め込み法の研究」）と題し、本文六章よりなっている。

第一章は序論であり、本論文の背景となっている鳥や虫の飛行手段である羽ばたき翼について触れ、その空力特性の数値解析手法を概観し、特に境界埋め込み法（Immersed Boundary Method）についてこれまでの研究に言及している。鳥や虫、小型飛行体 MAV（Micro Air Vehicle）は、小さな寸法で低速であるため、通常の航空機などに比べてレイノルズ数がかなり低く粘性効果が顕著で、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を解く必要がある。羽ばたき翼を物体適合格子で解く場合には、格子を変形させる必要があり、計算時間が課題となる。物体形状と計算格子を分離できる境界埋め込み法は、このような場合に有効な計算手法と考えられ、本論文の主題となっている。

第二章では、支配方程式と境界埋め込み法について述べている。物体適合格子を用いた計算では、形状に合わせて格子を生成することが必要であるが、境界埋め込み法では、直交格子をそのまま利用できる。境界埋め込み法では、流れの速度を物体の移動速度となるように強制する。速度の強制方法は、大きく分けてフィードバック強制と直接強制の二種類に分けられる。フィードバック強制は、速度場の情報を集め計算した外力を分布させる煩雑さを伴う。また、外力の計算で係数の理論的な決定方法が無いことや、物体速度に強制できるとは限らないなどの課題がある。直接強制では、物体境界周囲の格子点で速度計算の方法を変える必要が生じる。

ここでは、デルタ関数を基に、速度強制の度合いを表す重み変数を分布させる手法を新たに提案し、計算の単純化を試みている。変数の分布にはスタガード格子を用い、重みは各速度成分と同じ位置に分布させている。非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の運動量保存の式と物体上の速度境界条件を、重みを用いて結合している。更に圧力による速度補正の式にも重みによる制限を加えることで、物体境界周囲の速度場を強制している。流出境界条件では、流れ場全体の連続の式を満たすように無反射境界条件を改良している。

第三章では、境界埋め込み法の計算結果を検証するために用いられるいくつかの既存の解析法を要約している。非圧縮性ブラジウス境界層の速度分布と表面摩擦係数について言及し、ついで振動翼の比較基準となるテオドルセン関数

について述べている。さらに、パネル法で非定常翼計算を行う手法について概括している。

第四章では、煙を用いた可視化実験のための低速風洞と、ヒービング（上下運動）やフェザリング（迎角運動）を行う薄板模型について概要を述べている。境界埋め込み法の研究においては、数理解析上の知見を深めることに加えて、計算から得られる非定常の流れ場が物理的な妥当性を有しているか定性的にも検証しておくことは、工学や技術応用の立場から肝要である。このような観点から、可視化実験と計算結果を比較することが企図されている。

第五章では、境界埋め込み法を用いた計算結果について述べ、基準となる解や可視化実験との比較考察を行っている。低レイノルズ数で飛行する生物などでは薄い翼形状が多く見られ、計算対象を二次元薄板としている。運動の基本となる無次元周波数は、鳥の羽ばたきから推定される値を用いている。静止薄板について、ブラジウス解による抵抗係数や速度分布と比較し、計算結果が妥当であることを示している。微小振幅のヒービングやフェザリングでは、テオドルセン解やパネル法による揚力係数の値が、境界埋め込み法の計算結果とほぼ一致することを示している。ヒービング運動では静止薄板に比べて抵抗係数が減少し、推力成分の発生が認められている。境界埋め込み法によるモーメント係数は、テオドルセン解やパネル法と比較して若干の位相差があり、後縁付近での小さな圧力差に起因するものと考察している。

薄板の振動振幅が大きい場合について、煙による後流可視化実験の流脈と境界埋め込み法による渦度分布を比較している。レイノルズ数は3200と7500の二つの場合を扱い、無次元周波数を鳥の羽ばたきを模擬した0.35に合わせている。ヒービングおよびフェザリングでは、運動によって生じる剥離渦が卓越し、境界埋め込み法による計算結果は概ね可視化実験を再現できることを示している。

第六章は結論であり、境界埋め込み法に重みを導入した手法を新たに提案し、基準となる解や可視化実験との比較を行い、本論文の手法が有効であると結論付けている。

以上要するに、本論文は運動物体周りの流れ場を計算する境界埋め込み法において、新しく重み変数を導入した手法を提案してその有効性を示したもので、航空宇宙工学上の貢献が大きい。

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。