

氏 名	たけだ ゆうき 竹田 裕貴
本籍（国籍）	北海道
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工 第52号
学位授与年月日	令和2年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当 論文博士
学位論文 題目	Numerical Investigation of Unsteady External Flows by Cartesian Cut-Cell Method (直交カットセル法による物体まわり非定常流れの数値解析研究)
学位審査委員	主査 教授 上野 和之 副査 教授 船崎 健一 副査 教授 柳岡 英樹

論文内容の要旨

Unsteady external flow simulation is a major topic of the numerical simulations, and compressibility is significant on the flows in the aerospace engineering. A Cartesian grid solver for unsteady flow simulations receives considerable attention with the improvement of the supercomputing performance and simulation scheme. Cartesian grid has advantages to the boundary fit grid such as the easiness to improve the spatial accuracy of the simulation and the robustness of the mesh generation. In the high-speed flow dynamics, Reynolds number based on the length of the object increases. Unsteady numerical simulation of the high Reynolds number flow has a difficulty of the grid resolution of the turbulence boundary layer and it more significant in the Cartesian grid solver.

Present study investigates computational fluid dynamics (CFD) result of unsteady external flows by Cartesian cut-cell method so that to improve the numerical prediction method for the high Reynolds number flow. Cartesian cut-cell method is one of the most accurate Cartesian grid solvers. The present study contains five chapters. Chapter 1 is the introduction of the present study. Chapter 2 to chapter 4 are shows the result and discussions of the unsteady CFD results. Chapter 2 shows the validation of the inviscid CDF analysis for the flow includes “sharp-edge separations” using Cartesian cut-cell method. Chapter 3 shows the CFD result and discussions for the

wall-modeled Cartesian cut-cell method. Chapter 4 shows the coupled CFD analysis and the aerodynamic force modeling of the unsteady flow with pitching motion of reentry capsule. Chapter 5 is the conclusion of the present study.

In chapter 2, the CFD analysis of inviscid compressible flow using the Cartesian cut-cell method are performed. Numerical simulations of the flow past a triangular column are performed as a validation problem of the applicability of the inviscid simulation to the flow around a body with sharp-edge separation. In two-dimensional simulations, the difference between the calculated and experimental values of the drag coefficient, contrary to expectations, increase as the grid width is refined. In these simulations, it is found that vortex shedding is accompanied by a markedly accelerated flow and that an extremely large pressure drop occurred in the vortices. In contrast to the two-dimensional simulation, three-dimensional inviscid simulations of the flow past a triangular column do not exhibit vortex shedding or a large pressure drop. Two shear layers develop from the trailing edges of the triangular column, and grid convergence to the experimental value of the drag coefficient is obtained. These validations confirm that the three-dimensional simulations are applicable for certain kinds of the flows around a body with sharp-edge separation; while, the two-dimensional simulations are invalid for the flow around a body with sharp-edge separation.

In chapter 3, the CFD analysis by the wall-modeled Cartesian cut-cell method is performed. The CFD analysis of the flow past a triangular column by wall-modeled Cartesian cut-cell method is performed and compare with the inviscid simulation. The result indicates that the inviscid simulation is sufficient to predict the flow which includes "sharp-edge separations". Also, numerical simulation of the flow around 30P30N three-element high-lift airfoil configuration is performed. The aerodynamic coefficients are agreed with the experimental results. Vortex structure of the outer-layer part of the turbulent boundary layer is formed on the suction side of the main element in the present study. Moreover, the unsteady movement of the separation point on the suction side of the flap is observed. These phenomena are not observed in the Euler simulation. Furthermore, Euler simulation overestimates lift coefficient. For this reason, Euler simulation is insufficient for prediction of the flow including the separation from smooth surface.

CFD analysis coupled with pitching motion of a reentry capsule is

performed, and model equation for aerodynamic force coincident with the CFD result is proposed. Self-excitation of pitching oscillation and subsequent limit-cycle oscillation are reproduced in the fine-grid CFD simulation. Axis of the vortex ring in the wake extracted by the phase average is displaced to the lower side of the capsule base when the zero pitch angle and pitch-up. This displacement causes dynamic component of pitching moment around $\alpha=0$. Pitching moment coefficient is decomposed into Fourier series. The amplitude of the third harmonics is larger than dynamic component of the fundamental frequency. The proposed model equation for the pitching moment, which fully includes the third harmonics, reproduces the same amplitude and the same frequency with the CFD result during limit-cycle oscillation. The dynamic component of the unsteady aerodynamic work per unit time of the present model gives better estimate than conventional models.

The chapter 5 concludes the present study.

論文審査結果の要旨

航空宇宙工学の分野では、風洞試験と同等の信頼性を有するような高精度な大規模数値解析が必要とされている。その状況下で、従来多数派だった物体適合格子法に対抗して直交格子法がその適用範囲を急速に拡大している。本学位論文は、直交格子法の中でもまだ実用例の多くない直交カットセル法に注目し、その有用性を検証している。さらにそれを大気圏再突入カプセルの動的不安定問題に適用して、カプセルの自励振動と気流の非定常連成解析を行い、カプセル設計に貢献する知見を得ている。

本論文は全体で5章から構成され、第1章は緒言であり、過去の研究例と本研究の位置付けが述べられている。

第2章では直交カットセル法の解析手法の説明と計算コードの健全性を示した後、三角柱まわり流れの3次元非定常解析結果について詳しく論じている。その結果から、シャープエッジ剥離流れの非定常数値解析では3次元非粘性解析が有用な結果を与えることを示した。いっぽうで、2次元非粘性解析では実現象と乖離した圧力の低下と抗力の増大が発生するため、シャープエッジ剥離流れの非定常問題に2次元非粘性解析を適用することは不適切であることを示した。

第3章では直交カットセル法と乱流境界層壁面モデルの適合性について議論した。選定された Kawai & Larson の壁面モデルと直交カットセル法の相性は良好であり、高レイノルズ数流れを予測する数値解析手法として最も有力な手法の一つであることをはじめて実証した。この手法ではシャープエッジ剥離流れだけでなく平滑界面からの非定常剥離流れも予測可能である。いっぽうで、シャープエッジからの剥離流れに限定すれば非粘性解析による解析結果も妥当な結果を与

えることが確認され、高レイノルズ数非定常流れ研究の選択肢の1つであることを示した。

第4章では開発した計算コードを使って実用研究である大気圏再突入カプセルまわりの流れについて議論した。特に、遷音速不安定振動に注目し、カプセルのピッチ角1自由度振動と非定常流れ場の連成解析を行い、自励振動が発達する過程を再現した。静的な空気力は比較的粗い計算格子でも予測できるが、振動発達を引き起こす動的な空気力は大規模な非定常連成解析でなければ捉えることができないことを示した。さらに空気力の動的成分の3倍高調波に着目して既往研究の空気力モデル式を改善する提案をして、大気圏再突入カプセルの遷音速不安定の理解を深めた。これらは大気圏再突入カプセルの設計に貢献する知見である。

第5章は結言であり、得られた知見をまとめている。

航空機運動と気流の連成問題を解析できる手法として直交カットセル法が信頼できる有力なツールであることを実証したこと、および大気圏再突入カプセルの遷音速不安定の理解を深める知見を得たことは、この分野の発展に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（3編を記載。ただし、単位取得満期退学後1年以内の申請の場合は、1編を記載）

Coupled Numerical Analysis of Three-Dimensional Unsteady Flow with Pitching Motion of Reentry Capsule -Investigation of the Third Harmonics of the Aerodynamic Force-,
Yuki Takeda, Kazuyuki Ueno, Shingo Matsuyama, Hideyuki Tanno
Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences（掲載決定）