

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

多孔壁モデルを用いた数値解析による  
遷音速風洞の壁干渉に関する研究

Numerical Analysis of Wall Interference in  
Transonic Wind Tunnel using Porous Wall  
Model

申請者

南部	太介
Taisuke	NAMBU

機械科学専攻 航空宇宙輸送システム研究

2014年7月

本論文は、航空機開発における空力解析の更なる高精度化を目的として、多孔壁を有する遷音速風洞の壁干渉問題について、数値流体解析（CFD 解析）を用いて研究した成果をまとめたものである。

現在の航空機開発において、空力解析の精度要求は非常に高く、抗力係数において誤差 1count（全抗力の約 0.5%）が計測精度の基準となっている。そのため、風洞試験及び CFD 解析の更なる高精度化は必須となっているが、風洞壁や模型支持装置（ストラット、ステーキング）など、実際の飛行状態では存在しない要素との干渉が問題となる。その影響が風洞試験のみならず、風洞試験によって精度保証が行われる CFD 解析の高精度化に対して大きな障害となっている。これまで、風洞試験では壁が無い状態の流れ場を実現できず、壁干渉の影響を厳密に評価することはできていない。また、現在広く用いられる線形のポテンシャル方程式を基にした壁干渉補正法は、遷音速や失速を含む流れ場に対してその精度が疑問視されているにも関わらず、その定量的な精度検証は行われていない。さらに、これらの補正法の適用は風洞壁面の圧力分布など、なんらかの風洞内の計測値を必要とし、その適用に困難が伴うことが多い。

本研究では、CFD 解析を用いて、これらの壁干渉問題の解決を目指した。民間航空機開発で特に重要な遷音速風洞試験では、テストセクションにおける多孔壁の影響を如何に精度良く評価するかが重要となる。そこで、遷音速風洞に適用可能な新たな多孔壁モデルを構築し、そのモデルを用いて風洞壁の影響を忠実に再現した CFD 解析を行い、壁干渉の解析を行った。

本論文の内容をまとめると以下の様になる。

1. 遷音速風洞に適用可能な新たな多孔壁モデルの開発
2. 実際の風洞試験との比較による、多孔壁モデルの検証
3. 壁有り・壁無しの流れ場の比較による、壁干渉の現象解析
4. 既存の壁干渉補正法（Mokry の補正法）の精度検証、及び、干渉量分布図による補正法の簡便化

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序論として、航空機の環境適合性における諸問題を示し、その解決に向けて空力解析の更なる高精度化が必要であることを示した。また、その高精度化において、壁干渉問題の解決が不可避であることを示し、本論文の重要性を明らかにした。

第 2 章では、本研究で用いた CFD 解析手法について示した。本論文で用いた、CFD ソルバー FaSTAR について、基礎方程式、離散化の手法、粘性・非粘性流束の取り扱い、勾配計算法、時間積分法、乱流計算法、境界条件について述べた。

第3章では、本研究で新たに開発した多孔壁モデルについて示した。風洞多孔壁では、壁を介した差圧が微小であり、これまでその様な微小差圧に適用できる実用的なモデルは存在しなかった。単一孔を介する差圧と通過する流量の関係をCFDによって解析したところ、風洞多孔壁の様な微小差圧下では、その関係が線形となることが分かった。また、名古屋大学の遷音速風洞において検証実験を行い、同様の差圧対流量の線形関係を確認した。この様な微小差圧における線形の関係は、より差圧が大きい範囲を対象としている既存の多孔壁モデル（修正Harloffモデル）では考慮されていない。

次に、単一孔の解析結果から多孔壁モデルへの拡張を試みた。多孔壁を通過する流れ場のCFD解析から、個々の孔の位置に単一孔を通過する流量を与えなくても、多孔壁の存在する範囲全体に平均流を与えることで、多孔壁の影響を十分な精度で模擬できることを示した。この結果をもとに、単一孔モデルから求めた流量に空隙率（多孔壁における孔と壁の面積比）を掛けて、多孔壁を通過する平均流とすることで、多孔壁モデルに拡張を行った。

第4章では、第3章で示した多孔壁モデルを用いて、二次元翼の風洞試験における壁干渉の解析を行った。JAXAの遷音速風洞における二次元翼（Model70811）の風洞試験を対象とし、多孔壁、固体壁、壁無しの3種類の条件でCFD解析を行った。翼面と風洞壁面での圧力分布において、多孔壁の影響を模擬したCFD解析は、実験値と良い一致を示し、多孔壁モデルの妥当性を示すことができた。一方、多孔壁の影響を考慮しないCFD解析は、結果に実験値と大きな差が見られ、壁干渉の解析には多孔壁の影響を考慮することが重要であることを示した。

壁有り・無しの流れ場の比較から、壁干渉の現象解析を行った。多孔壁は、流れを透過させるために、風洞壁の閉塞によって生じるブロッキングの低減に効果的であるが、壁を通過する流れによって吹き下ろしが発生し、翼に流入する流れ角度を減少させることが分かった。流れ角度の低下は揚力を減少させる一方で、三次元翼における誘導抗力と同様の機構で抗力の増加に繋がることを示した。

二次元翼のCFD解析を用いて、壁干渉補正法として現在広く用いられる、線形の微小擾乱速度ポテンシャル方程式を基にしたMokryの壁干渉補正法の精度検証を行った。Mokryの壁干渉補正法は、これまで定量的な検証を行うことができなかった。本論文では、壁有りのCFD解析結果に壁干渉補正を適用し、壁無しの流れ場と比較することで精度検証を行った。その結果、線形のポテンシャル方程式の仮定に反しない亜音速・失速点以下の流れ場では、模型サイズが大きい場合でも抗力において誤差1count程度の非常に高い精度を示すが、遷音速の流れ場では10count程度、失速が起きた流れ場では100count以上の誤差が生じることを示した。

第5章では、三次元翼の風洞試験（ONERA-M6翼）を対象として、壁干渉の解析を行った結果を示している。ONERA-M6の試験結果はCFD解析の妥当性検

証に広く用いられているが、一部分の翼面圧力分布に CFD 解析と風洞試験で誤差が生じることが知られている。本研究において、上下の多孔壁の影響を含めた解析を行ったところ、これまで CFD 解析と実験値に差が生じていた衝撃波形状をより実験値と近い形で捉えることができた。すなわち、多孔壁モデルの妥当性を検証するとともに、これまで原因が明らかではなかった実験値と CFD 解析の誤差が壁干渉の影響によるものであることを示すことができた。また、これらの解析から、三次元翼の衝撃波形状における壁干渉の影響を明らかにした。

第 6 章では、一般的な航空機の風洞試験を対象に壁干渉の解析を行った。まず、どの程度、壁干渉が空力係数へ影響を及ぼすのか定量的な評価を行った。航空機の風洞試験は二次元翼や三次元翼の試験に比べて壁干渉の影響は小さく、遷音速の風洞試験として一般的な条件では、最大で全体の抗力・揚力係数に対して 3% 程度の影響が生じることが分かった。

航空機の試験においても、第 4 章と同様に線形のポテンシャル方程式を基にした壁干渉補正法の精度検証を行った。航空機の試験では壁干渉の影響が小さいため、遷音速での精度低下は顕著ではなく、一般的な遷音速域の試験条件下における補正誤差は最大 3count 程度と、十分実用的な精度を示すことが分かった。本研究では、より簡便に壁干渉補正を行えるように、風洞試験の条件（マッハ数・迎角・模型サイズ）に対する壁干渉量の分布図を作成した。壁干渉の補正を行うためには、マッハ数と迎角の壁干渉量（ $\Delta M, \Delta \alpha$ ）及び、主流方向におけるマッハ数の干渉量の勾配（ $\partial \Delta M / \partial x$ ）が必要となる。しかし、航空機の風洞試験における多孔壁の壁干渉では、マッハ数への干渉量は無視できるほど小さい。よって、CFD 解析によるパラメトリックスタディにより迎角の補正量  $\Delta \alpha$  と、マッハ数の補正量の流れ方向への勾配  $\partial \Delta M / \partial x$  の分布図を作成した。本研究で作成した分布図を用いることにより、マッハ数・迎角・模型サイズの値のみで、これまで実施が容易ではなかった壁干渉補正をより簡便に行うことができる。

第 7 章では、本研究の結言を示している。

以上、本研究を通して、これまで未知であった多孔壁の壁干渉の影響を明らかにすることができた。多孔壁の壁干渉は、民間航空機の開発に特に重要な遷音速風洞の高精度化に不可避な問題であり、本論文の成果は航空分野の発展に資するものである。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 南部太介 印

(2014年 6月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<u>T. Nambu</u> , A. Hashimoto, T. Aoyama, and T. Sato “Numerical Analysis of the ONERA-M6 Wing with Wind Tunnel Wall Interference” Transactions of the JSASS (掲載決定)
論文	<u>T. Nambu</u> , A. Hashimoto, M. Ueno, K. Murakami, and T. Sato “Evaluation of Linear Wall Interference Correction Method using CFD and Porous Wall Model”, AIAA Journal of Aircraft (掲載決定)
論文	<u>T. Nambu</u> , A. Hashimoto, T. Aoyama, and T. Sato “Numerical Analysis of Flow through a Hole for Modeling of Wind Tunnel Porous Wall”, Transactions of the JSASS, Vol. 54, No.185/186, pp221-228
講演(国際 学会)	<u>T. Nambu</u> , D. Mavriplis and K. Mani “Adjoint-based Shape Optimization of High-lift Airfoil using the NSU2D Unstructured Mesh Solver”, AIAA paper 2014-0554, AIAA SciTech 2014, January 2014
講演(国際 学会)	<u>T. Nambu</u> , A. Hashimoto, K. Murakami, and T. Sato “Numerical Analysis of Wind Tunnel Wall Interference on Two-dimensional Airfoil by New Porous Wall Model”, AIAA paper 2012-3229, 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference, June 2012
講演(国際 学会)	<u>T. Nambu</u> , A. Hashimoto, T. Aoyama, and T. Sato “Analysis and Modeling of Flow through Wind Tunnel Porous wall”, AIAA paper 2010-4858, 40th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, June, 2010
講演(国内 学会)	南部太介,佐藤哲也,橋本敦,上野真,村上桂一 「多孔壁モデルを用いた CFD 解析による風洞壁干渉補正法の検証」, 日本航空宇宙学会 第 44 回流体力学講演会/ 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, 2A16, 2012 年 7 月
講演(国内 学会)	南部太介,橋本敦,砂田茂,佐藤哲也 「移動格子法による低 Re 数用 Propeller 流れの数値解析」, 日本航空宇宙学会 第 44 回流体力学講演会/ 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, 2C6, 2012 年 7 月
講演(国内 学会)	南部太介, 佐藤哲也, 橋本敦, 村上桂一 「二次元翼流れ場における風洞のブロック効果の CFD 解析」, 第 49 飛行機シンポ ジウム,1G8, 2011 年 11 月

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演（国内 学会）	南部太介, 佐藤哲也, 橋本敦, 村上桂一 「風洞多孔壁を考慮した二次元翼風洞試験流れ場のCFD解析」, 日本航空宇宙学会 第 43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション, 2A-11, 2011年7月
講演（国内 学会）	南部太介 「風洞内流れ解析のための多孔壁モデルの開発」, 日本航空宇宙学会 第48回飛行機シン ポジウム, 1C9, 2010年12月
講演（国内 学会）	南部太介, 橋本敦, 青山剛史, 佐藤哲也 「多孔壁通過流れモデルにおける孔形状効果の検討」, 日本計算工学会 第15回計算工学 講演会, D-15-5, 2010年5月
講演（国内 学会）	南部太介, 橋本敦, 青山剛史, 佐藤哲也 「風洞多孔壁モデル化のための単独孔流れの解析」, 日本流体力学会 第23回数値流体力 学シンポジウム, H9-3, 2009年12月
受賞	「最優秀賞」, 日本航空宇宙学会 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーシ ョン技術シンポジウム2012, 2012年7月
受賞	「学生プレゼンテーション賞」, 日本航空宇宙学会 第43回流体力学講演会/航空宇宙 数値シミュレーション技術シンポジウム2011, 2011年7月
受賞	「学生優秀講演賞」, 日本航空宇宙学会 第48回飛行機シンポジウム, 2010年12月