

## 論文の内容の要旨

論文題目	重み付き非線形コンパクトスキームを用いた衝撃波と壁近傍渦の干渉の数値シミュレーション
学 位 申 請 者	左 志 峰

衝撃波と渦の干渉が、超音速航空機やロケットより発生する騒音の原因の一つであることはよく知られている。超音速乱流場では多数の衝撃波と渦が相互に干渉するため、流れ場は非常に複雑となり現象を理解するには多大な困難が伴う。この複雑な流れ場を解明する第一歩として自由空間に平面衝撃波と単独渦が干渉する流れ場に関して、これまでに多くの理論的研究や実験的研究および数値計算が行われてきている。これらの研究により、自由空間に平面衝撃波と単独渦の干渉による空力騒音の発生メカニズムが解明された。衝撃波と渦が干渉を始めると、渦の誘起する速度により衝撃波が減速する部分と加速する部分ができ、減速される側では衝撃波背後の圧力は上昇し、加速される側では圧力は下降する。この圧力の上昇・下降に伴ってまずプリカーサ (precursor) と呼ばれる四重極音が発生する。その後、二つの反射衝撃波が形成され、プリカーサの背後にはプリカーサとは極性が反転した四重極性をもつ第二音波、第二音波の背後にはプリカーサと同じ四重極性をもつ第三音波が発生する。圧力波は渦を中心にして円形に伝播していく。発生する音の強さは、衝撃波マッハ数  $M_s$  が大きくなるほど、また渦マッハ数  $M_v$  が大きくなるほど強くなることが判っている。

一方、超音速航空機やロケットなどの機体表面近くにも渦がたくさん存在していることが知られている。その壁近傍圧縮性渦が衝撃波を通過する際にどのような変化を起こすかという問題は工学的観点から重要な研究である。しかし、このテーマには、高速流れ（衝撃波）と低速流れ（渦）また境界層の影響がどう処理すればいいかなど難しい問題があり、これまでのところほとんど行われていない。

近年、高精度の計算スキームが提案されるようになり、スーパーコンピュータの発達と相まって流体音を数値的に直接求めようになった。数値計算による音の研究は Computational Aeroacoustics (CAA) と呼ばれ、近年急速に発展しつつある。Leleの提案したコンパクトスキームは通常差分法に対し少ないステンシルで同程度の精度を達成できるが、不連続の存在する流れ場では、通常差分法と同様に不連続近傍で数値振動を生じてしまう。そこで、Dengらは非線形コンパクトスキームに重み付き計算を導入することにより、WCNS (Weighted Compact



Nonlinear Scheme) を構築し、数値振動を生じさせることなく高精度で衝撃波を捕えることに成功した。WCNSはほかの有限差分スキームに比べ、様々な流束評価法 (flux splitting method) が使えるといった利点がある。その流束評価法も近年目覚ましい進化を遂げてきた。FDS (Flux Difference Splitting) やFVS (Flux Vector Splitting) やAUSM (Advection Upstream Splitting Method) は衝撃波を振動なく鋭く捕えるが、低マッハ数領域を正しく計算できない欠点がある。これに対して、全速度スキーム (All-Speed Scheme) と呼ばれ、低速流れにおける低散逸という性質を有する近似リーマンソルバーがいくつ提案された。本研究で用いたSLAU2 (Simple Low-dissipation AUSM) はそのひとつである。

このような背景のもと、本研究では中強度衝撃波 ( $M_s=1.29$ ) と壁近傍渦 ( $M_v=0.39$ ) の干渉を調査対象とし、直接数値シミュレーション (DNS, Direct Numerical simulation) を用いて調査し、詳細に議論した結果について報告する。

本研究は、衝撃波と壁近傍渦の干渉に関する三つの音源が存在することを解明した。(1) 衝撃波と渦の干渉による四重極音源; (2) 渦と壁の干渉による二重極音源; (3) 壁せん断応力の変動による二重極音源。

渦と壁の距離が比較的大きい場合 (渦中心と壁の距離  $d_{vw}=3.0R_v$ ,  $R_v$  は渦のコア半径), まず四重極性を持つプリカーサが現れ、渦の径方向へと伝播していく。壁との干渉により、二つの圧縮と一つの希薄領域へ変わる。その後、衝撃波は渦領域を通し、マッハ反射が発生、二つの反射衝撃波 (MR1とMR2) が形成される。MR2が壁へ伸び、反射される。プリカーサの背後にはプリカーサとは極性が反転した第二音波が現れる。プリカーサと第二音波は衝撃波と渦の干渉により形成されるので、渦を中心にして円形に伝播していく。壁から反射されたMR2は渦へ伸び、二回目の衝撃波と渦の干渉が発生する。第二音波の背後にはプリカーサと同じ極性をもつ第三音波が現れる。第三音波はMR2と渦の干渉により形成されるので、壁を中心にして広がる。この第三音波は本研究の新発見である。最後に、圧縮された渦により四重極性をもつ第四音波を発生する。渦と壁の距離が比較的大きいので、音波は主に衝撃波と渦の干渉から放出される。

渦と壁の距離が小さい場合 ( $d_{vw}=2.0R_v$  と  $1.5R_v$ ), 渦と壁の相互作用により、二重極を持つ音波が発生する。衝撃波は音波の膨張領域と干渉する時、プリカーサ前に位置する弧状の膨張領域と形成する。その音波の圧縮領域は衝撃波前の圧力変動として現れる。MR2と渦の干渉のタイミングは渦中心と壁の距離によって決められる。音場は、衝撃波と渦の干渉から放出された音波および渦と壁の相互作用により放出された音波で構成される。

音源3の存在は滑りなし条件を用いたケースによって確認された。その音波は、音源1と音源2からの音波と比べ無視できるほど小さいので、全体の音場への影響はほとんどない。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 左 志峰

審査委員主査 前川 博

委員 Matuttis Hans-Georg

委員 宮崎 武

委員 大川 富雄

委員 ※山本 誠

衝撃波と渦の干渉が、超音速航空機やロケットより発生する騒音の原因の一つであることはよく知られている。超音速乱流場では多数の衝撃波と渦が相互に干渉するため、流れ場は非常に複雑となり現象を理解するには多大な困難が伴う。この複雑な流れ場を解明する第一歩として自由空間に平面衝撃波と単独渦が干渉する流れ場に関して、これまでに多くの理論的研究や実験的研究および数値計算が行われてきている。これらの研究により、自由空間に平面衝撃波と単独渦の干渉による空力騒音の発生メカニズムが解明された。衝撃波と渦が干渉を始めると、渦の誘起する速度により衝撃波が減速する部分と加速する部分ができ、減速される側では衝撃波背後の圧力は上昇し、加速される側では圧力は下降する。この圧力の上昇・下降に伴ってまずプリカーサ (precursor) と呼ばれる四重極音が発生する。その後、二つの反射衝撃波が形成され、プリカーサの背後にはプリカーサとは極性が反転した四重極性をもつ第二音波、第二音波の背後にはプリカーサと同じ四重極性をもつ第三音波が発生する。圧力波は渦を中心にして円形に伝播していく。発生する音の強さは、衝撃波マッハ数  $M_s$  が大きくなるほど、また渦マッハ数  $M_v$  が大きくなるほど強くなることが判っている。

近年、高精度の計算スキームが提案されるようになり、スーパーコンピュータの発達と相まって流体音を数値的に直接求めようになった。数値計算による音の研究は Computational Aeroacoustics (CAA) と呼ばれ、近年急速に発展しつつある。Leleの提案したコンパクトスキームは通常差分法に対し少ないステンシルで同程度の精度を達成できるが、不連続の存在する流れ場では、通常差分法と同様に不連続近傍で数値振動を生じてしまう。そこで、Dengらは非線形コンパクトスキームに重み付き計算を導入することにより、WCNS (Weighted Compact Nonlinear Scheme) を構築し、数値振動を生じさせることなく高精度で衝撃波を捕えることに成功した。WCNSはほかの有限差分スキームに比べ、様々な流束評価法 (flux splitting method) が使えるといった利点がある。その流束評価法も近年目覚ましい進化を遂げてきた。FDS (Flux Difference Splitting) やFVS (Flux



Vector Splitting) や AUSM (Advection Upstream Splitting Method) は衝撃波を振動なく鋭く捕えるが、低マッハ数領域を正しく計算できない欠点がある。これに対して、全速度スキーム (All-Speed Scheme) と呼ばれ、低速流れにおける低散逸という性質を有する近似リーマンソルバーがいくつ提案された。本研究で用いた SLAU2 (Simple Low-dissipation AUSM) はそのひとつである。

このような背景のもと、本研究では中強度衝撃波 ( $M_s=1.29$ ) と壁近傍渦 ( $M_v=0.39$ ) の干渉を調査対象とし、直接数値シミュレーション (DNS, Direct Numerical simulation) を用いて調査し、詳細に議論した結果について報告している。

本論文は全5章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。

#### 第1章 緒言

第1章では、衝撃波と渦の干渉研究の歴史と現状を概観し、空力音の理論、数値計算法の進化と衝撃波と渦の干渉に関するこれまでの研究を述べる。また、本論文の構成についても述べている。

#### 第2章 計算法

第2章では、まず、直接数値シミュレーションにおける計算法を示し、垂直衝撃波、初期渦、空間微分項の離散化における重み付き非線形コンパクトスキームや近似リーマン解法について述べている。

#### 第3章 数値流束の性能比較

第3章では、重み付き非線形コンパクトスキーム (WCNS) において使用する近似リーマン解法について、近年開発された全速度流束評価法と従来の流束評価法の性能を比較するため、単独渦や平面衝撃波と単独渦の干渉を計算し、これまでの実験値や理論値やほかの研究結果との比較を示している。WCNSと複数の流束評価法 (FVS, FDS, ASUMとSLAU2) の計算結果を比較し、本研究に使われた SLAU2 の特性を述べている。

#### 第4章 計算結果および考察

第4章では、中強度衝撃波 ( $M_s=1.29$ ) と壁近傍渦 ( $M_v=0.39$ ) の干渉DNSの結果を示す。流れ場の構造と騒音発生メカニズムを述べる。自由空間における衝撃波-渦干渉を計算し、これまでの実験値や理論値、および計算結果との比較を示す。その後、壁近傍の渦と衝撃波との干渉を計算し、衝撃波を含む流れ場の構造と四重極と二重極の音源を持つ音波発生メカニズムを述べている。

#### 第5章 結言

第5章では、本研究で得られた主要な成果を総括し今後の課題と展望を述べている。

以上より、本論文は衝撃波と壁面近傍渦との干渉を高精度で安定な計算法である WCNS と SLAU2 を組み合わせた数値シミュレーションによって明らかにした。未解明な点が多い衝撃波と壁面近傍渦の干渉における音響場の理解に対し工學上有用な知見を与えるものと評価できる。

よって、本論文は博士 (工學) の学位論文として十分な価値を有するものと認める。