

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760126
 研究課題名 (和文) 超音速および極超音速ジェットにおける音波放射の抑制に関する数値解析
 研究課題名 (英文) Numerical analyses of suppression of sound emission in a supersonic and hypersonic jet
 研究代表者
 渡邊 大輔 (WATANABE DAISUKE)
 広島大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：70363033

研究成果の概要：直接数値シミュレーション (DNS) において高マッハ数において最も成長率が高くなる斜め線形不安定波を平面ジェットに加えた結果、放射される圧力変動レベルは約 5dB 程度低下することが確認できた。さらに、混合層においても同様に斜め線形不安定波を加えることにより混合層の成長が促進されることから、高レイノルズ数領域においても、平面ジェットにおける音圧低下が期待できることを示唆した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	180,000	2,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：超音速流れ、噴流、乱流、空力騒音、CFD、DNS、マッハ波

1. 研究開始当初の背景

ジェットから発生する音波は、航空機の飛行による騒音や離発着時の空港騒音など、周囲環境に対する問題を伴っている。特にジェットが超音速では、ノズル背後に形成されるショックセルなどの衝撃波に起因するスクリーチ音、さらに高マッハ数のジェット(移流マッハ数 Mc が 1 を超える： Mc はジェットマッハ数 Mj の約 $1/2$) ではマッハ波が発生するなど、亜音速ジェットに比べ周囲環境に耐えがたい騒音が発生する。このため、超音速輸送機や、スペースプレーンなどの極超音速機の実用化に向け、騒音抑制技術のさらなる

向上が重要であると考えられる。

従来の超音速機に用いられているターボジェットエンジンでは、圧縮機やタービンを持つ構造上、エンジン断面とそれに続くノズルを円形とする、性能面での必然性があり、多くの研究は円形ジェットを対象に行われてきた。しかし、極超音速機の推進器として期待されるスクラムジェットエンジンでは、その作動原理から、断面が円形である必要はなく、矩形(長方形)などの非円形ノズルの適用も十分妥当と考える。そのため、未だ完成されていないマッハ波低減手法の模索に対し、非円形ジェットを含め、ジェットの物理

的特性を理論的・数値的に調査することは、極めて重要な鍵を握ると考える。

これまで我々は、矩形ジェットモデルである、超音速平面ジェットの遷移機構および音波発生機構を線形安定性理論と直接数値シミュレーション(DNS)により調査してきた。その中で、「高マッハ数の平面ジェットでは、最も増幅率が高く・せん断層拡大に寄与する不安定波(斜めモード)は、マッハ波を放射しない」という、円形ジェットとは異なる性質を確認している。この性質から、ノズル先端部にアクチュエータを設置し、マッハ数に応じた最適な斜めモードを強制的に加えることにより、せん断層の急速な拡大を促し、マッハ波放射を抑制することが可能と予想する。この手法は、マッハ波放射モードとせん断層を拡大するモードが同一でありかつ最も増幅率が高い円形ジェットでは不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、マッハ波の発生する高マッハ数(超音速, 極超音速 $Mc > 1$)のジェットに対し、不安定波の性質を踏まえ利用する、能動的な騒音抑制の可能性を理論的・数値的により探ることを目的とする。

3. 研究の方法

高い移流マッハ数の超音速非円形ジェットに対し、ジェット速度分布の持つ不安定波の特性を利用した、ノズル部における能動的な騒音低減手法の可能性を理論的・数値的に探る。対象は、平面ジェット等の非円形ジェットとする。これらのジェットに対し、線形安定性解析を行い有効な不安定波の有無を確認し、その後、大規模高解像度 DNS の実行により、不安定波の非線形発達までを追い、不安定波の性質を利用した、マッハ波抑制効果を検証する。

4. 研究成果

①線形安定性解析による結果

DNS 実行の前に、本研究で用いた斜め線形不安定波 (3D mode) について、線形安定性解析を実行した。斜めモードの特徴は、成長率が最も高くなるジェットに対する角度 ($\theta = 51^\circ$) 付近では位相速度がジェット周囲の音速 ($c_\infty = 0.417$) 以下となり、マッハ波のような強い圧力変動を放射しないこと、および位相速度が最も高く超音速となる二次元モード ($\theta = 0^\circ$) に比べ成長率が高いことである。

また、これら二つの特徴のレイノルズ数に対する依存性を図1に示す。図1より、DNSの実行に用いた $Re_b = 1000$ という比較的低いレイノルズ数において、成長率や位相速度は低下しているが、三次元反対称モードの上記

二つの特徴は維持されることが確認できる。

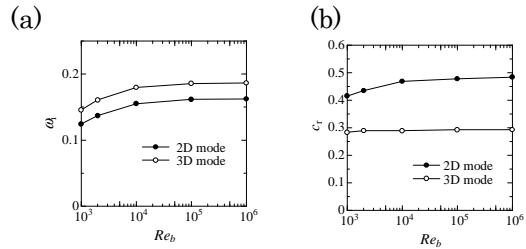


図1 斜めモードと二次元モードの成長率(a)と位相速度(b)の Re 数依存性。

②超音速平面ジェットの DNS による結果 (ジェット平均速度分布に与える影響)

次に自然遷移を模擬したランダム攪乱のみを平面ジェットに与えた結果とランダム攪乱に斜め不安定モードをジェット主流速度の 1%および 2%の振幅で加えた結果を図2示す。ジェットせん断層の拡大する位置は、斜めモードを加えることにより上流に移動し、その移動量は振幅を増すことにより増加することが確認できる。

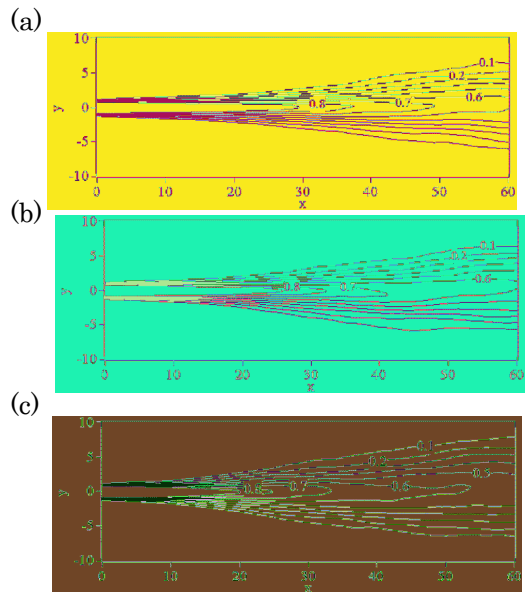


図2 ジェット平均速度分布。(a)ランダムケース、(b)ランダム+斜めモード 1%ケース、(c)ランダム+斜めモード 2%ケース。

また、図3に示すように、斜めモードを加えることにより、ジェット中心速度の低下を促進できることを確認した。これらの結果は、マッハ波の主要な要因である二次元モードが成長するためのジェット速度分布が、斜めモードを加えることにより、上流において変形され、二次元モードの成長を阻害する要因となることを確認した。

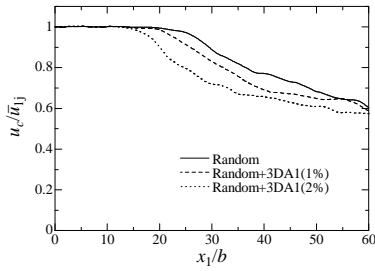


図3 ジェット中心速度分布の下流への変化.

③ 超音速平面ジェットの DNS による結果 (音響場に与える影響)

図4は、 $x=50b$, $y=20b$ において取得した圧力時系列をフーリエ解析した圧力変動レベルのスペクトルである。この図より斜めモードを加えることにより、二次元モード成長によるマッハ波を示す $St \approx 0.035$ 付近の周波数および全体の周波数において圧力変動レベルが低下することが確認できる。

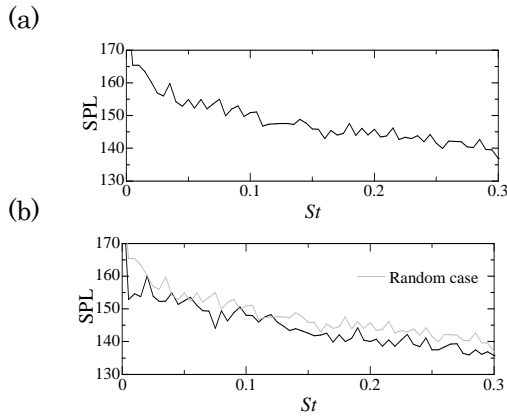


図4 圧力変動スペクトル ($x=50b$, $y=20b$). (a)ランダムケース, (b)ランダム+斜めモード2%ケース.

図5は、ランダムケースおよび固有関数2%ケースの全周波数に対する圧力変動レベルを示した図である。両図とも圧力変動レベルは下流の一定の範囲が高くなっている。ただし、固有関数2%ケースの圧力変動レベルはランダムケースに比べ全体的に5dB弱ほど低い値を示している。

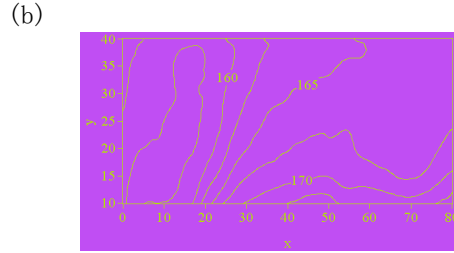
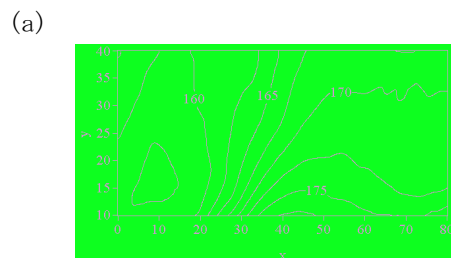


図5 圧力変動分布の比較 (ジェット遠方場: $y > 10b$). (a)ランダムケース, (b)ランダム+斜めモード2%ケース.

また、図6に示した $x=60b$ で比較すると、この圧力変動レベルの差は、ジェット遠方においても維持されていることが確認できた。

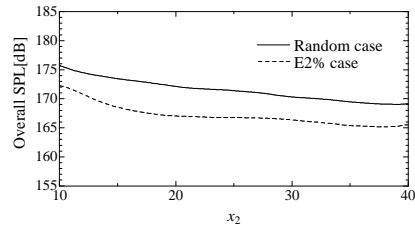


図6 圧力変動分布の比較 ($x=60b$)

④ 高 Re 数におけるマッハ波抑制効果の検証

平面ジェットせん断層の片側に相当する混合層において、平面ジェットと同様に斜めモードを加えた計算を実行した。混合層は下流に向け速度分布が相似的に拡大されるため、高 Re 数における斜めモードの効果が推測できる。図7に示すように、斜めモードを加えた計算では、混合層の渦度厚さが増大し、混合層せん断層領域を早期に拡大する効果が確認できた。このことは、マッハ波を形成する二次元波の増幅抑制を示唆する。

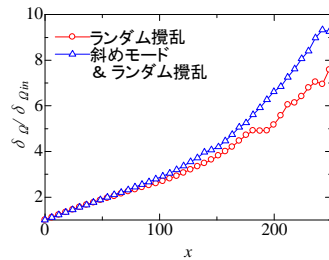


図7 超音速混合層の渦度厚さの変化

以上の結果から、直接数値シミュレーション (DNS) 実行により、高マッハ数において最も成長率が高くなる斜め線形不安定波を平面ジェットに加えた結果、放射される圧力変動レベルは約5dB程度低下することが確認できた。さらに、混合層においても同様に斜め線形不安定波を加えることにより、混合層

の成長が促進されることから、高レイノルズ数領域においても、平面ジェットにおける音圧低下が期待できることを示唆した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Daisuke Watanabe, Hajime Takami & Hiroshi Maekawa, "Acoustic Noise Generation in a Compressible Turbulent Cylindrical Boundary Layer", *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.56, pp.317-324, (2008), 査読有.
- ② 滝口 貴, 前川 博, 渡辺大輔 & 松尾裕一, "超音速後流からの音波発生機構について", 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-06-010, pp.95-100, (2007), 査読無.
- ③ 渡辺大輔, 前川 博 & 松尾裕一, "超音速平面乱流ジェットの音響場に対する斜め不安定モードの影響", 日本機械学会論文集(B編) 72 巻, 724 号, pp.2878-2885, (2006), 査読有.
- ④ Hiroshi Maekawa, Takashi Takiguchi and Daisuke Watanabe, "Acoustic wave generation in a compressible wake", *JSME International Journal Series B*, Vol.49, No.4, pp.1086-1091, (2006), 査読有.
- ⑤ 滝口 貴, 渡辺大輔 & 前川 博, "コンパクトスキームの圧縮性流れの高解像度シミュレーションへの応用", 日本機械学会論文集(B編) 72 巻, 721 号, pp.2186-2194, (2006), 査読有.
- ⑥ 渡辺大輔, 前川 博 & 松尾裕一, "圧縮性境界層の遷移に伴う音波発生機構の研究", 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-05-017, pp.168-172, (2006), 査読無.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 秋田健輔, 渡辺大輔, 前川 博 & 尾形陽一, "DNS による圧縮性混合層の遷移機構と音響場に関する研究", 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会講演論文集, No. 095-1, pp. 137-138, (2009. 3. 6), 山口大学.
- ② 石田 雅祥, 前川 博, 渡辺大輔 & 尾形陽一, "斜め衝撃波と干渉する超音速乱流境界層の DNS", 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会・講演会講演論文集, No. 095-1, pp. 143-144, (2009. 3. 6), 山口大学.

- ③ 若松裕紀, 前川 博 & 渡辺大輔, "壁面に衝突する渦による音響場の解析", 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, p. 303, (2008. 9. 7), 神戸大学.
- ④ 前川 博, 山田欣弘 & 渡辺大輔, "圧縮性円管流の乱流構造の研究", 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, p. 286, (2008. 9. 7), 神戸大学.
- ⑤ 渡辺大輔, 前川 博, 高見 創 & 菊地勝浩, "円筒境界層の遷移に及ぼす流入攪乱の影響", 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, p. 41, (2008. 9. 4), 神戸大学.
- ⑥ 渡辺大輔 & 前川 博, "超音速平面ジェットにおける斜めモードの組み合わせに対する遷移構造に及ぼす影響", 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.2, pp. 219-220, (2007. 9. 10), 関西大学.
- ⑦ Hiroshi Maekawa, Daisuke Watanabe, Hajime Takami & Kougen Ozaki, "Direct numerical simulation of a spatially evolving supersonic transitional/turbulent boundary layer", *5nd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-5)*, Munich, Germany Vol.1, pp. 301-306, (2007. 8. 27).
- ⑧ Hiroshi Maekawa & Daisuke Watanabe, "Turbulent Hierarchical Structures and Scalar Mixing in a Supersonic Mixing Layer at High Convective Mach Numbers", *ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, Vancouver, Canada, CD-ROM, (2007. 7. 9)
- ⑨ 渡辺大輔 & 前川 博, "超音速平面ジェットの音響場に対する斜めモードの影響", 第 84 期日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, p. 118, (2006. 10. 28), 東洋大学.
- ⑩ Daisuke Watanabe, Hajime Takami, Hiroshi Maekawa, Katsuhiro Kikuchi, Masanobu Iida & Hiroki Suzuki, "Acoustic Waves Emanating from Transitional Structures in a Compressible Boundary-layer for High-speed Train", *13th International Congress on Sound and Vibration (ICSV13)*, Vienna, Austria, CD-ROM, (2006. 7. 5)

[その他]

雑誌論文③は、2008 年度日本機械学会賞(論文)を受賞決定(2009 年 3 月 24 日)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 大輔 (WATANABE DAISUKE)
広島大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70363033

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者