

令和元年6月17日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05787

研究課題名(和文)ヘリカルモードペアによる超音速ジェット騒音抑制と拡散促進に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical analysis on noise suppression and diffusion enhancement of supersonic jet by helical mode pair

研究代表者

渡邊 大輔 (Watanabe, Daisuke)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・講師

研究者番号：70363033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：M=2.0の超音速ジェットDNSの結果より、ジェット速度分布に生じる不安定波の一種である亜音速の位相速度を持つヘリカルモードペアを流入部において加えることにより、遠方に放射されるマッハ波による騒音レベルが抑制されることを確認した( $r=50$ にて約2.5dB低下)。この低減効果はヘリカルモードペアの増幅によりジェットの拡散が促進され、ポテンシャルコア領域が短くなることにより、マッハ波を放射する超音速の位相速度を持つヘリカルモードの増幅を妨げることによって生じることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、高い移流マッハ数の超音速円形ジェットに対し、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・数値的に探ることである。この不安定波による抑制手法が効果的であれば、ノズル部に与える不安定波の振幅は微小でよいことから、ノズル部に設置するアクチュエータも小型化が可能と考えられる。そのため従来の手法に比べ、推力低下を招かない、広範なマッハ数に対応した、高性能騒音抑制ノズルの開発に貢献できると予想する。さらに、ジェットの拡散(中心速度の低下)が促進できれば、空港での離発着時間短縮の助けとなる残留ジェット気流の抑制にも貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Spatial DNSs of a supersonic round jet for  $M_j = 2.0$  have been performed. Introduced upstream disturbances play an important role for the evolution of jet velocity and sound field. The numerical results show that the jet potential core region is reduced in the jet forced by a pair of 3rd helical modes. The growth of the additional helical mode pairs leads to a sooner expansion of the shear layer and then interrupts or reduces the growth of unstable modes with a supersonic phase velocity responsible for the intense Mach wave formation. Therefore, it is concluded that the intense Mach wave radiation observed in the randomly forced jet can be reduced by forcing with a pair of 3rd helical modes with a subsonic phase velocity.

研究分野：流体力学

キーワード：マッハ波 超音速ジェット DNS 線形安定性解析 騒音抑制 ヘリカルモード

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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(約  $M_j > 2$ )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。騒音抑制に関し、衝撃波に起因する騒音は、ノズル内部形状の適切化により、衝撃波そのものの発生を抑止し(適正膨張化)低減できる。一方、高マッハ数のジェット騒音を支配するマッハ波は、ジェットせん断層に起こる超音速で進行する不安定波が音源であり、せん断層の急速な拡大により低減できることが予測され、lobe mixers などによる混合促進ノズルが提案されているが、騒音低減に対し大きな推力損失を伴うという重大な欠点が存在する。このような状況のもと、推力低減や騒音増加を招かないジェットの拡散手法が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究は、超音速円筒ジェットにおける代表的騒音源であるマッハ波の抑制を達成するため、超音速円筒ジェットが持つ螺旋形不安定波(ヘリカルモード)の組み合わせにより生じる干渉を利用した広い速度領域に適用する能動的マッハ波抑制手法を提案することを目的とする。特に、低い位相速度を持つ第三ヘリカルモード(周方向波数  $m=3$ )の特性を利用しジェットの拡散促進によりマッハ波抑制の可能性を探る。

### 3. 研究の方法

本研究では、ノズルから噴き出す乱れたジェットを模擬したランダム攪乱により励起された  $M=2.0$ ,  $Re=2000$  の超音速円形ジェットに、同一周波数の互いに反対回転の第三ヘリカルモードペアを流入部より加えた直接数値シミュレーション(DNS)を実行し、第三ヘリカルモードペアの放射マッハ波強度に対する影響を調査した。

### 4. 研究成果

図 1(a), (b)はそれぞれランダム攪乱 2.5%のみのケースおよびランダム攪乱 2.5%に第三ヘリカルモードペア 10%を加えたケースの圧力変動 RMS 値の分布である。どちらのケースもジェット中心の流入部下流の位置から斜め下流へ圧力変動が広がっており、過去の実験報告と定性的に一致している。このとき、圧力変動の強さはランダム攪乱ケースと比較し第三ヘリカルモードペア 10%ケースが半径方向遠方において弱くなっていることが確認できる。図 2 に図 1 で示した圧力変動レベルの各半径位置における最大値の半径方向への変化を示す。  $r=50r_0$  の位置における比較では、第三ヘリカルモードペア 10%ケースの圧力変動はランダム攪乱ケースより約 2.5dB ほど低い値を示している。さらに、  $r=50r_0$  の位置での圧力変動の減衰率を比較すると第三ヘリカルモードペア 10%ケースの減衰率がランダム攪乱ケースより大きくなっており、より遠方ではさらに圧力変動が小さくなることを示唆している

(a)

(b)

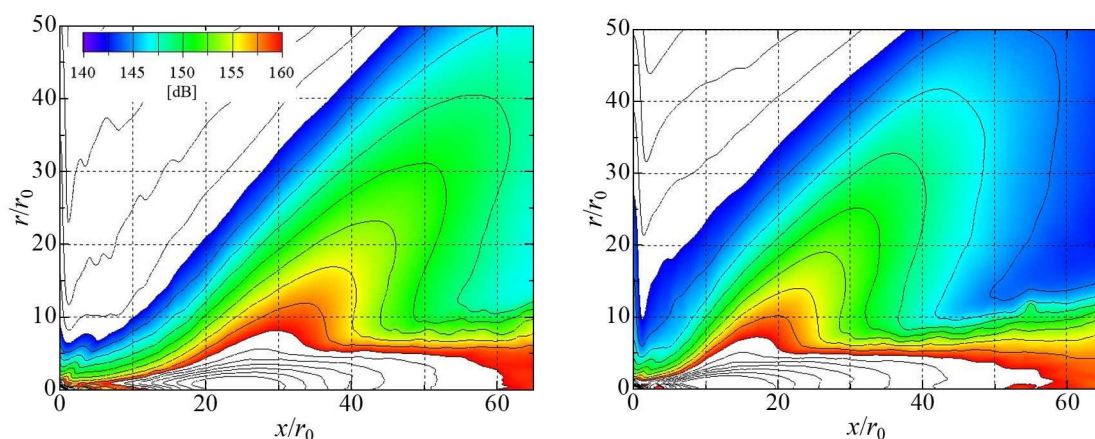
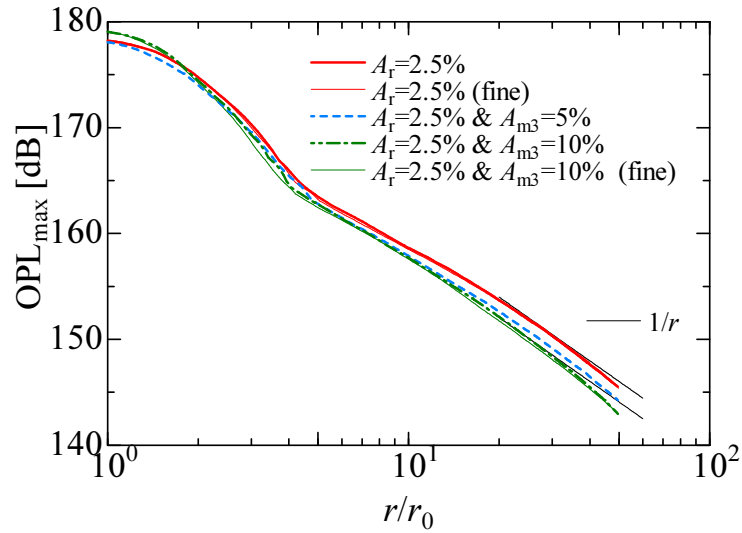


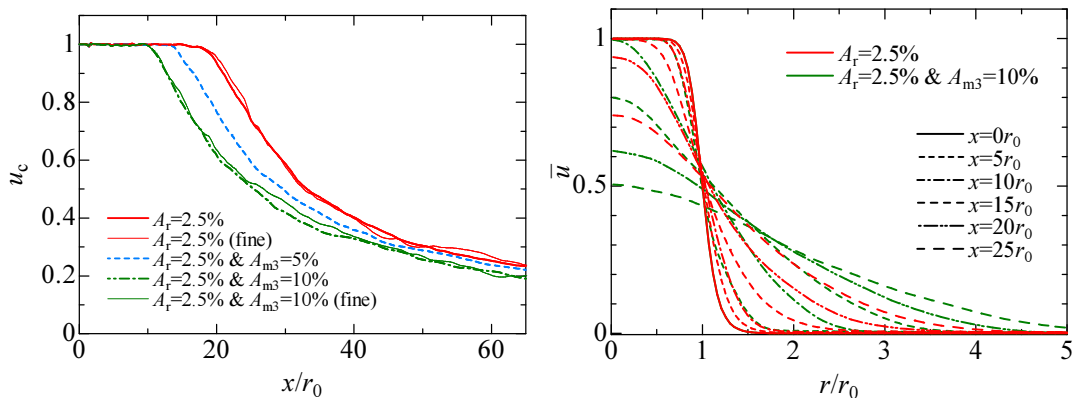
Fig.1 Overall pressure fluctuation level [dB] for a) random case and b) random with helical modes of  $m=\pm 3$  with a magnitude of 10% case.



**Fig.2 Radial decay of the maximum value of overall pressure fluctuation level [dB] in the same radius  $r/r_0$  shown in Fig.1.**

ジェット速度場について、図 3(a)にジェット中心速度、図 3(b)にポテンシャルコアが消失する位置までのジェット平均速度半径方向分布、図 4 にジェット半値半径を示す。図 3(a)より、加える第三ヘリカルモードペアの振幅を増加させるとジェット中心速度はより上流から減衰が生じ、ポテンシャルコア領域の長さが短くなる傾向がある。また、図 3(b)のジェット平均速度の半径方向分布および図 4 のジェット半値半径を見ると、第三ヘリカルモードペア 10%を加えたケースではせん断層の拡大が促進されていることが分かる。マッハ波を形成するモードを含め不安定モードの増幅は、ジェットの速度分布に依存する。このため、下流へ向けジェット速度分布が短い距離で大きく変形する場合、上流の条件では高い成長率を示しても下流では増幅が抑制されると推測できる。このようなことから、第三ヘリカルモードペア 10%を加えたケースでは、ジェットせん断層の拡大が促進されたことよりマッハを形成する  $m=0$  および  $m=\pm 1$  のモードの増幅が抑制されたため、圧力変動レベルの低下が引き起こされたと考えられる。

(a)



**Fig.3 a) Jet centerline velocity and b) development of jet half radius.**

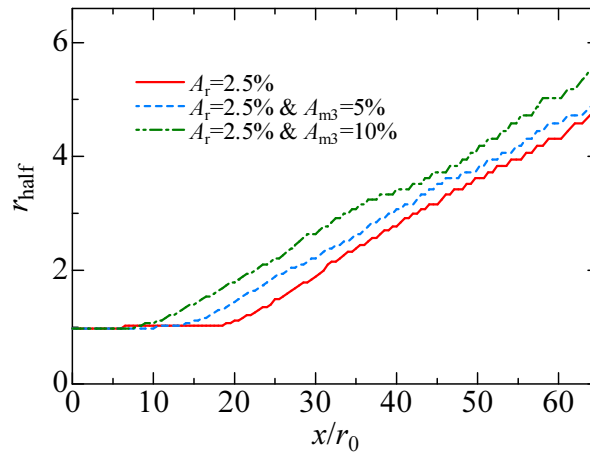


Fig.4 Downstream evolution of jet half radius.

マッハ波放射方向を制御することを目的に  $M=2.0$ ,  $Re=2000$  における超音速円形ジェット DNS を実行し以下のことを確認した。

- ・ランダム攪乱により励起されたジェットに流入部より第三ヘリカルモードペアを加えることにより、ジェット遠方に伝播するマッハ波に起因する圧力変動が抑制された（ランダム攪乱のみと比較し、第三ヘリカルモードペア振幅 10% で加えた場合  $r=50r_0$  において約 2.5dB 低下）。
- ・第三ヘリカルモードペアの増幅はジェットポテンシャルコア領域の短縮に寄与し、ジェット速度分布の変形を促進した。
- ・このポテンシャル領域の短縮効果により、マッハ波を形成する不安定波の増幅が抑制されたと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 渡辺 大輔、石崎 匡則, 超音速ジェットにおけるヘリカルモードペアを用いたマッハ波抑制のせん断層厚さの影響, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, JAXA-SP-18-005, 2019 年, 147-151

〔学会発表〕（計 16 件）

- ① Daisuke Watanabe, Hiroshi Maekawa, Mach wave suppression by a pair of subsonic helical modes in a supersonic jet, 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Delft, The Netherlands, 2019  
DOI:10.2514/6.2019-2754
- ② 渡辺大輔、前川 博, 低い位相速度を持つヘリカルモードペアを用いた超音速ジェットのマッハ波抑制, 日本機械学会 第 96 期 流体工学部門 講演会, 2018
- ③ 大和 優太、渡辺 大輔, 同軸噴流の拡散促進に対するヘリカルモードの影響, 日本機械学会北陸信越支部 第 55 期総会・講演会, 2018
- ④ 渡辺 大輔、広上 溪介、前川 博, 超音速ジェットにおける非対称なヘリカルモード組合せの遷移構造への影響, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017
- ⑤ 渡辺 大輔、前川 博, 超音速円形ジェットの安定性に及ぼす速度分布の影響, 日本流体力学会 年会 2017, 2017
- ⑥ 大和 優太、渡辺 大輔, 超音速 co-flow ジェットの遷移に対する流入攪乱の影響, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017
- ⑦ 渡辺 大輔, 超音速円形ジェットにおける流入攪乱の影響, 日本機械学会 北陸信越支部 第 54 期総会・講演会, 2017
- ⑧ 渡辺 大輔、前川 博, 超音速ジェットから放射される音響場に対する流入攪乱スケールの影響, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016
- ⑨ 渡辺 大輔、前川 博, 第三ヘリカルモードペアによりマッハ波が抑制された超音速ジェットの音波放射特性, 第 94 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, 2016
- ⑩ 渡辺 大輔、前川 博, 第三ヘリカルモードペアを用いた超音速ジェットのマッハ波抑制, 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シミュレー

ション技術シンポジウム, 2016

- ⑪ 渡辺 大輔、前川 博, 超音速ジェットに加えられたヘリカルモードペア振動数のマッハ波放射に対する影響, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016
- ⑫ 渡辺 大輔、大畑利揮, 超音速ジェットの遷移における流入攪乱スケールの影響, 日本機械学会 北陸信越支部 第 53 期総会・講演会, 2016
- ⑬ Daisuke Watanabe, Hiroshi Maekawa, Nonlinear Development of a Pair of Helical Modes in a Supersonic Round Jet, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows 2015, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015
- ⑭ Daisuke Watanabe, Hiroshi Maekawa, Rapid growth of unsteady finite-amplitude perturbations in a supersonic boundary-layer flow, Ninth International Symposium On Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-9), Melbourne, Australia, 2015
- ⑮ 渡辺 大輔、前川 博, 超音速ジェットにおける組み合わせられたヘリカルモードの遷移構造に及ぼす影響, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015
- ⑯ 渡辺 大輔、前川 博, 超音速ジェットにおけるヘリカルモードペア成長に対するレイノルズ数の影響, 第 93 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, 2015
- ⑰ 渡辺 大輔、前川 博, 圧縮性境界層におけるスパン方向渦の受容性, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 2015

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。