

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560189

研究課題名(和文)ヘリカルモード間の干渉による超音速ジェット騒音抑制手法に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical analyses of suppression of sound emission by interference between a pair of helical modes in a supersonic jet

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：マッハ波放射放射方向を制御することを目的に $M=2.0$ 、 $Re=1000$ における超音速ジェットのDNSを実行し以下のことを確認した。ランダム攪乱のみを流入攪乱として加えたケースでは、ジェット近傍場に伝播する圧力変動は $m=\pm 1$ のヘリカルモードに相当する成分が支配的となり、ジェットポテンシャルコアが存在する領域では、ランダム攪乱のみを流入攪乱として加えた際に音響場において支配的となったヘリカルモードと回転方向の異なるヘリカルモードどうしを干渉させることにより、マッハ波放射方向が制御できる。非線形効果が顕著となるポテンシャルコア消失領域付近では加えたヘリカルモードの影響により新たな圧力変動が発生する。

研究成果の概要(英文)：The numerical results provide new physical features of the Mach wave generated in supersonic round jets, which lead to extinction of the Mach wave by introducing disturbance condition. Upstream disturbance conditions play an important role for the emission of the Mach wave in supersonic jets. The pressure fluctuations generated by the growth of the opposite helical mode are shown to be linearly superimposed into the jet near sound field. The numerical results indicate that the jet forced with a pair of first helical modes can indicate the elimination of Mach waves at restricted emission azimuthal angles due to the interference of these modes. The partial elimination of the Mach wave also appears in a turbulent jet at the frequency of the artificially forced an optimal combination of the helical modes at the inlet region. This forcing technique will be extended to the Mach wave reduction in the distinct azimuthal direction.

研究分野：工学

キーワード：超音速ジェット マッハ波 空力騒音 線形安定性解析 DNS CFD

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。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制し(適正膨張)低減することができる。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、近傍マッハ波の増大を引き起こすことが問題になっている。また、排気ジェットを覆う外殻を設置し、それによりマッハ波を反射させる ejector shroud を用いる手法は、その形状や大きさから、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。また、高マッハ数の円形ジェットに対する線形安定性解析によると、最も高い成長率を示すモードはヘリカルモードであり、このモードは超音速の位相速度を持ちマッハ波を形成させる。このため、円形ジェットにおけるマッハ波低減には平面ジェットのように亜音速のモードによる低減効果は望めない。このような背景から、新たなマッハ波低減手法の模索に対し超音速ジェットの物理的性質を理論的・数値的に調査するとは意義があるといえる。

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(第一ヘリカルモード)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。上記目的を達成するため、直接数値シミュレーションおよび線形安定性解析を用い、流入部に与えたヘリカルモード間の干渉によるマッハ波抑制効果について有効性を確認する。

3. 研究の方法

支配方程式は、円筒座標系で記述された圧縮性ナビエ・ストークス方程式である。空間の離散化に対し非線形項を含む移流項には、衝撃波を安定に捕らえるため高波数帯に数値粘性を持つ5次精度散逸コンパクトスキームを用い計算を行った。また、時間発展には4次精度 Runge-Kutta 法を用いた。境界条件は、境界における音波や渦の通過に伴う音波等の反射を可能な限り抑えるために主流方向および半径方向に NSCBC ($x=0$) と強制的な流出境界 ($35r_0 < x < 40r_0$, $20r_0 < r < 22r_0$)、また周方向には周期境界条件を用いた。計算

領域はジェット流入部半径 r_0 を基準長さとし、 $0 < x < 40r_0$, $0 < r < 22r_0$, $0 < \theta < 2\pi$ とした。格子数は $N_x \times N_r \times N_\theta = 801 \times 150 \times 128$ であり、半径方向に格子伸長を行っている。また、流入境界においては Freund 等⁹⁾と同様に tanh 型のジェット速度分布を与えた。ジェット半径および中心速度に基づくマッハ数およびレイノルズ数はそれぞれ $M=2.0$, $Re=1000$ とした。

4. 研究成果

本研究では周方向波数が $m=\pm 1$ のファーストヘリカルモード間の干渉によりジェットから放射されるマッハ波放射方向を制御することを目的としている。図1にファーストヘリカルモードが形成する圧力場を示す。図の縦軸、横軸はそれぞれ、 $y=(r/r_0)\cos\theta$ と $z=(r/r_0)\sin\theta$ である。図 1a,b はそれぞれ同一振動数 ($St=0.1$) のヘリカルモードで回転方向の異なるモード ($m=1$ または $m=-1$) のみを流入攪乱として加えた際に形成された圧力場であり、図 1c は同一振幅で回転方向が異なる一組のヘリカルモード ($m=1$ および $m=-1$) を組み合わせる流入攪乱として加えた際の圧力場である。単一のヘリカルモードによる圧力放射方向は周方向に均一であり全方向に放射されている。一方、一組のヘリカルモードを加えたケースでは、ヘリカルモード間の干渉により、 $y=0$ 方向 ($\theta=90^\circ$ および $\theta=270^\circ$ 方向)において圧力変動が弱め合い、結果として図上下方向には強い圧力変動が放射されていないことが分かる。ここでは、このヘリカルモードペアによる性質が、ランダム攪乱を流入攪乱として与えたジェットのマッハ波放射方向の制御に有効かを調査した。

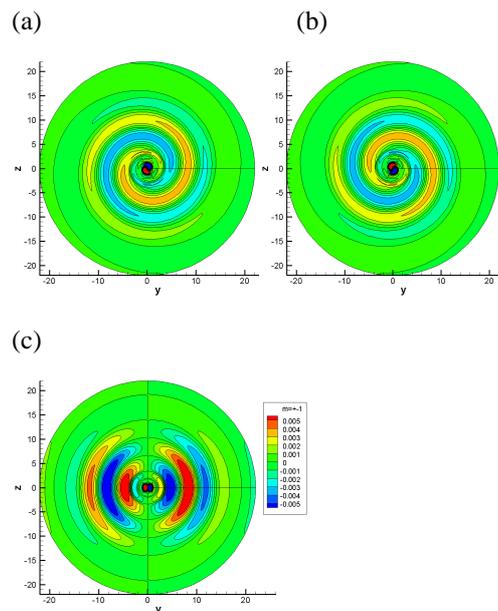


Fig.1 Contourplots of pressure at $x=32r_0$ for a) $m=1$ case, b) $m=-1$ case and c) a pair of helical modes case.

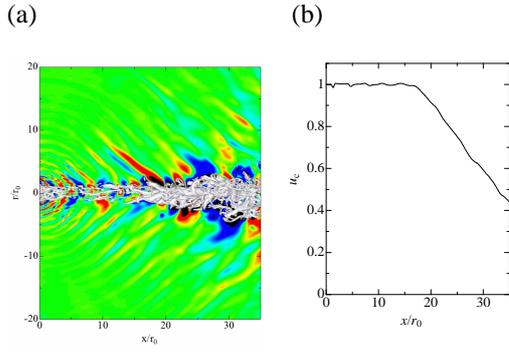


Fig.2 Downstream evolution of a) pressure fields and vortex structures and b) jet centerline velocity.

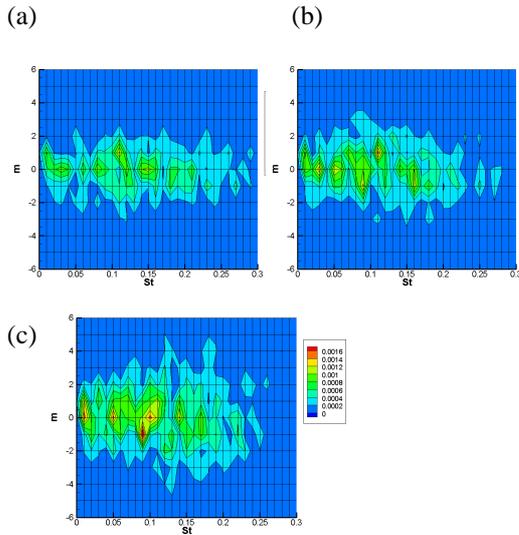


Fig.3 Pressure spectrum $|\hat{p}|$ for random disturbance case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

図2に流入攪乱としてランダムな速度変動のrms値がジェット中心速度の10%となるように与えた際の圧力場(カラーコンター)と渦構造(速度勾配テンソルの第二不変量等値面)およびジェット中心速度の分布を図1に示す。図より、攪乱の成長によってジェットから斜めに分布する圧力波(マッハ波)が図上下方向下流へ向け放射されている様子が確認でき、ポテンシャルコアが消失する付近(ジェット中心速度が $u_c < 1$ となる x 方向位置)から渦構造が複雑化していることが分かる。また、このランダム攪乱ケースのジェット近傍 $10r_0 < r < 20r_0$ に広がる圧力変動の周方向と時間に対するスペクトル分布を図3に示す。図に示したは圧力変動スペクトル $|\hat{p}|$ は、

$$|\hat{p}(x, m, St)| = \int_{10r_0}^{20r_0} \hat{p}(x, r, m, St) \hat{p}^*(x, r, m, St) dr \quad (1)$$

であり、*は複素共役を示す。図3より、ジェット近傍に放射される圧力変動の支配的

な成分は周方向波数が $-1 \leq m \leq 1$ であることが分かる。この結果は線形安定性解析が予測する第一ヘリカルモードの成長率が最も高い⁽³⁾ことやFreund等⁽⁷⁾のDNSの結果と一致し螺旋モードがマッハ波の形成に大きく寄与していることが分かる。また、 $x=24r_0$ および $x=28r_0$ では $St=0.11$, $m=1$ の成分が、 $x=32r_0$ では $St=0.09$, $m=-1$ の成分が他のヘリカルモード成分に対し振幅が大きくなっている。

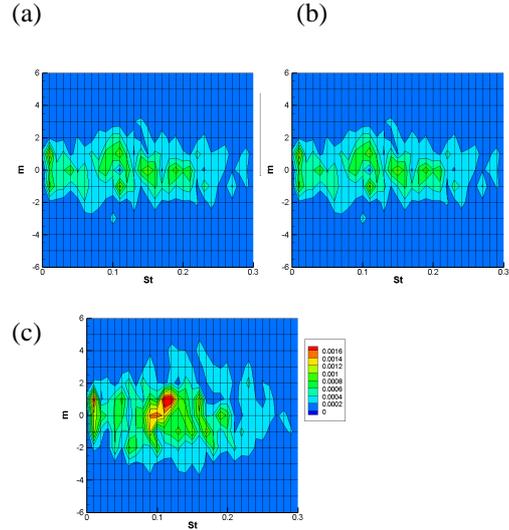


Fig.4 Pressure spectrum $|\hat{p}|$ for random disturbance with first helical modes case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

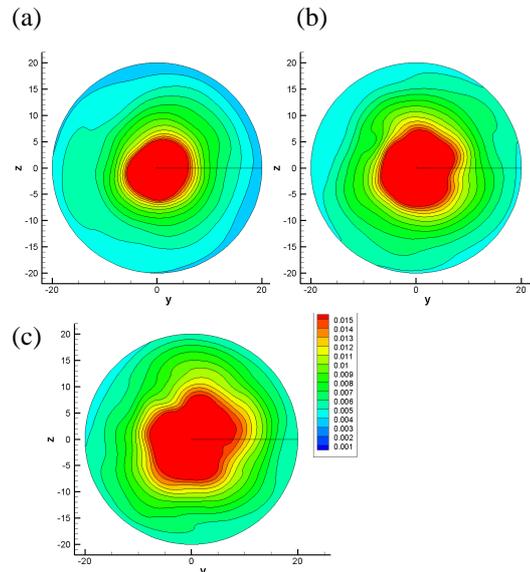


Fig.5 The rms of overall pressure fluctuations p_d/p_∞ for random disturbance case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

次に、前述したランダムケースにおいてジェット近傍場で振幅が大きく成長した $St=0.09$, $m=-1$ および $St=0.1$, $m=1$ の成分に対し、それぞれ反対回転の $St=0.09$, $m=1$ および

$St=0.11$, $m=-1$ の二つのヘリカルモードに相当する半径方向速度変動をジェット中心速度の 0.8% の振幅でランダム攪乱に加えた計算を行った。ここでは、放射方向の抑制方法を図 1c と同じ $y=0$ 方向 ($\theta=90^\circ$ および $\theta=270^\circ$ 方向) とするため、 $St=0.11$, $m=1$ のモードの時間に対する位相を $2\pi/3$ 遅らせ抑制方向の制御を試みた。圧力変動のスペクトル $|\bar{p}|$ を示した図 4 より、加えた $St=0.09$, $m=1$ および $St=0.11$, $m=-1$ の二つのヘリカルモードがランダム攪乱のみのスペクトルに対して増幅していることが確認できる。また、図 4c を見ると、ランダム攪乱のみのケースでは低い振幅を示していた $St=0.12$, $m=1$ の成分の振幅も大きくなっており、ヘリカルモードを加えたことにより新たな圧力変動が生じている。

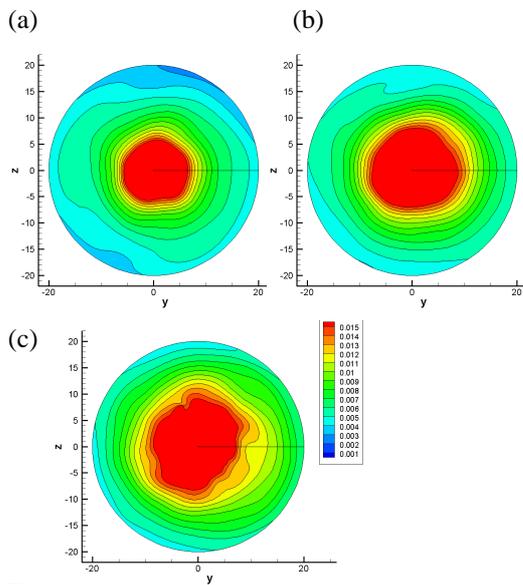


Fig.6 The rms of overall pressure fluctuations p_d/p_∞ for random disturbance with first helical modes case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

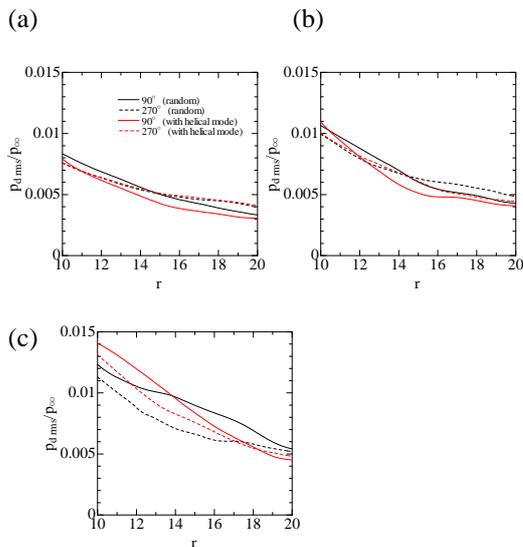


Fig.7 The profile of the overall pressure fluctuations rms at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

ランダム攪乱のみのケースと反対回転の二つのヘリカルモードをランダム攪乱に加えたケースのジェット近傍圧力変動の大きさを比較するため、それぞれ図 5 および図 6 に $x=24r_0$, $x=28r_0$, $x=32r_0$ の各断面における圧力変動の rms 値の分布を示す。また、図 6 と同じ位置の半径方向に対する圧力変動の rms 値分布を図 7 に示す。圧力変動の各位置 x での断面分布 (図 5, 6) をみるとランダムケースと比較し反対回転のヘリカルモードを加えたケースでは、図横方向にやや扁平に等高線が分布しており、図上下方向の圧力変動が弱められている。

また、 $y=0$ 方向 ($\theta=90^\circ$ および $\theta=270^\circ$ 方向) の分布を示した図 7 をみると、おおよそ $r>17r_0$ において反対回転のヘリカルモードを加えたケースはランダム攪乱のみのケースと比較し圧力変動がわずかに弱まっていることが確認できる。しかし、 $x=32r_0$ (図 7c) の $r<14r_0$ ではランダム攪乱のみのケースに比べ反対回転のヘリカルモードを加えたケースの圧力変動は大きくなる結果となった。

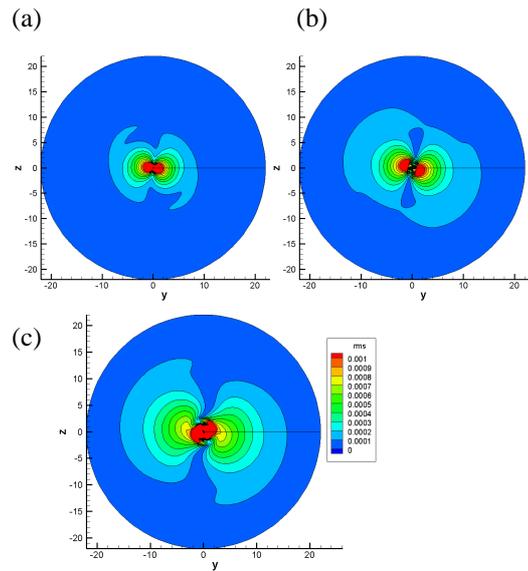


Fig.8 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.09$, $m=\pm 1$ components for random disturbance case at a) $x=8r_0$, b) $x=12r_0$ and c) $x=16r_0$.

さらに詳細にジェットから発生する圧力変動の様子を調べるため、各モードが形成する圧力変動について調べた。図 8, 9 は、ジェット速度のポテンシャルコアが存在する領域 $x<15r_0$ (図 2b 参照) における反対回転のヘリカルモードを加えたケースにおける圧力変動の $St=0.09$, $m=\pm 1$ および $St=0.1$, $m=\pm 1$ のフーリエ成分に対する rms 値分布である。このポテンシャルコアが存在する領域では、 $St=0.09$ と $St=0.11$ の両者の成分による圧力変動は意図した $y=0$ 方向 ($\theta=90^\circ$ および $\theta=270^\circ$ 方向) に対し圧力変動が抑制されていることが分かる。また、より下流の領域では、

ランダムケースの $St=0.09$, $m=\pm 1$ の成分 (図 10) の圧力変動が図上下方向に大きくなっていることに対し, 反対回転のヘリカルモードを加えたケース (図 11) では, 上流と同様に図上下方向の圧力変動の振幅が抑制されていることが分かる.

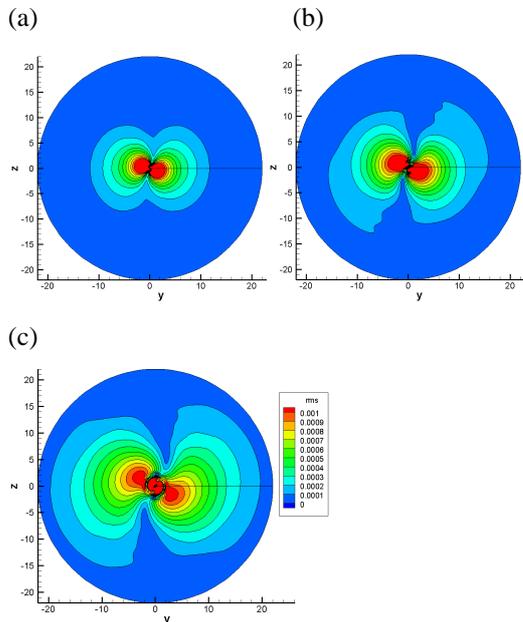


Fig.9 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.11$, $m=\pm 1$ components for random disturbance with first helical modes case at a) $x=8r_0$, b) $x=12r_0$ and c) $x=16r_0$.

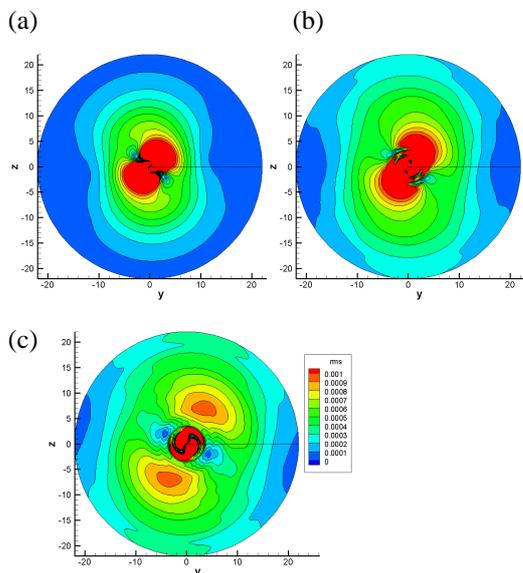


Fig.10 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.09$, $m=\pm 1$ components for random disturbance case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

一方, $St=0.11$, $m=\pm 1$ の成分を示した図 12, 13 を見ると, $x=24r_0$ においてランダム攪乱ケース (図 12) に対し反対回転のヘリカルモードを加えたケース (図 13) では上下方向の圧力変動振幅が抑制されているが, 下流の

$x=28r_0$, $x=32r_0$ ではジェット中心から新たな圧力変動が図上下方向に発生していることが分かり, より下流においてジェット外側に向け図上下方向に伝播していくと予想される. この新たな圧力変動の発生は, ジェットポテンシャルコア領域において攪乱が増幅し, その下流において非線形な効果が卓越したことによると思われる. また, このことは図 7c に示した $r < 14r_0$ における反対回転のヘリカルモードを加えたケースの圧力変動増大を引き起こした一因と考えられる.

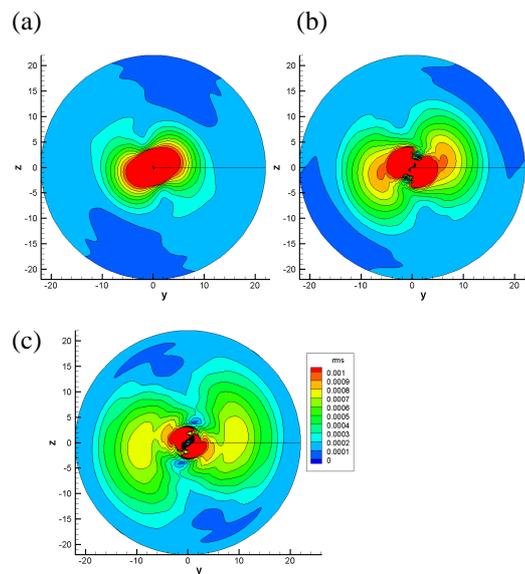


Fig.11 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.09$, $m=\pm 1$ components for random disturbance with first helical modes case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

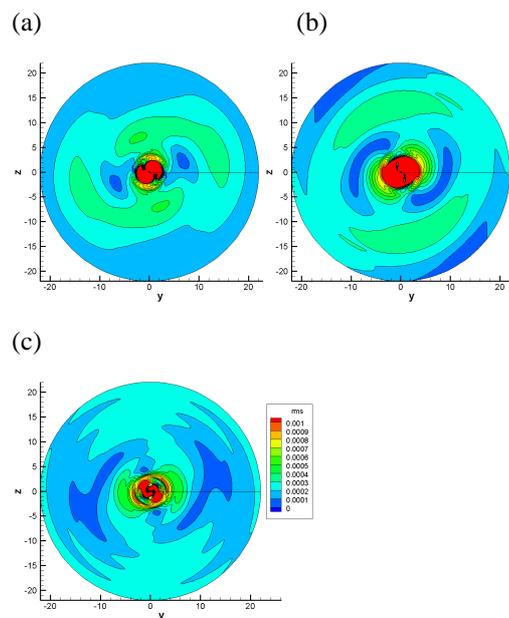


Fig.12 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.11$, $m=\pm 1$ components for random disturbance case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

これらの結果より、反対回転のヘリカルモードをランダム攪乱に加えたケースにおいて、攪乱の線形成長が見込まれるポテンシャルコアが存在している領域では、ヘリカルモード間の干渉によりマッハ波の放射方向を制御できることが確認されたが、非線形効果が卓越する下流においては新たな圧力変動が生じることが確認された。よって、より効果的なマッハ波放射方向の制御にはポテンシャルコアが消失する非線形効果が卓越した領域における圧力変動の発生を考慮した制御された上流攪乱の組み合わせを模索する必要があるといえる。

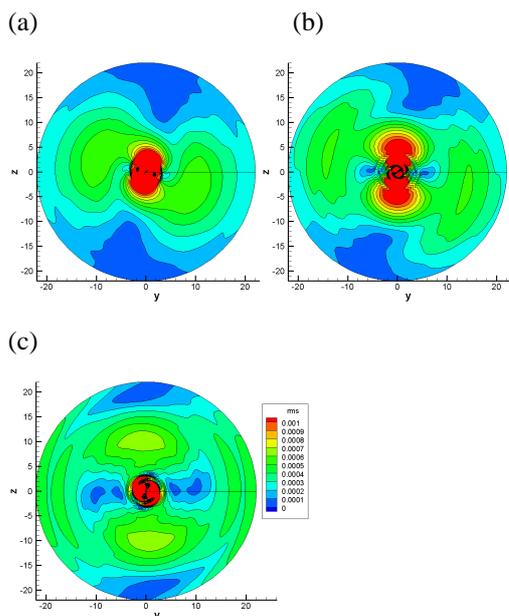


Fig.13 The rms of pressure fluctuations p_d of $St=0.11$, $m=\pm 1$ components for random disturbance with first helical modes case at a) $x=24r_0$, b) $x=28r_0$ and c) $x=32r_0$.

以上より、マッハ波放射方向を制御することを目的に $M=2.0$, $Re=1000$ 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。

- ・ランダム攪乱のみを流入攪乱として加えたケースでは、ジェット近傍場に伝播する圧力変動は $m=\pm 1$ のヘリカルモードに相当する成分が支配的となった。
- ・ジェットポテンシャルコアが存在する領域では、ランダム攪乱のみを流入攪乱として加えた際に音響場において支配的となったヘリカルモードと回転方向の異なるヘリカルモードどうしを干渉させることにより、マッハ波放射方向が制御できる。
- ・非線形効果が顕著となるポテンシャルコア消失領域付近では加えたヘリカルモードの影響により新たな圧力変動が発生する。このため、マッハ波放射方向の効果的な制御には、この領域での圧力変動抑制を考慮した攪乱をジェット流入攪乱として与える必要がある。

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 1 件)

- ① Daisuke WATANABE, Hiroshi Maekawa, The effect of upstream disturbance on the angle of sound emission in a supersonic round jet, Journal of Fluid Science and Technology 9(3) (2014, Oct.), JFST0054-JFST0054, 2014
DOI:10.1299/jfst.2014jfst0054

[学会発表] (計 7 件)

- ① 渡辺大輔, 前川 博, 超音速円形ジェットにおける流入攪乱の音波放射角度への影響, 日本流体力学会年会 2012, USB, (2012, 9)
- ② Daisuke WATANABE, Hiroshi Maekawa, The effect of upstream disturbance on the angle of sound emission in a supersonic round jet, Proc. 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2013) (2013, Sep.)
- ③ 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組み合わせの音響場に及ぼす影響, 第 90 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, USB, (2012, 11)
- ④ 渡辺大輔, 前川 博, 超音速円形ジェット音響場における流入攪乱の影響, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, CD-ROM (2013, 9)
- ⑤ 渡辺大輔, 前川 博, ヘリカルモードペアにより励起された超音速円形ジェットの渦構造, 第 91 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, USB (2013, 11)
- ⑥ 渡辺大輔, 前川 博, ヘリカルモードを用いた超音速ジェットのマッハ波放射方向制御, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, CD-ROM (2014, 9)
- ⑦ 渡辺大輔, 前川 博, 超音速 'top-hat' 型円形ジェットの不安定モードの性質, 日本流体力学会年会 2014, USB (2014, 9)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし