

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01621

研究課題名（和文）音響-流れ場同期可視化手法開発と、それを用いた超音速ジェット広帯域騒音の音源探査

研究課題名（英文）Development of wavelet-based conditional sampling and averaging method and the application to the noise source identification of supersonic jet broadband noise

研究代表者

寺本 進 (Teramoto, Susumu)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30300700

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：高速のエンジン排気から生じる強い騒音の発生メカニズムを解明するために、「音響トリガ条件付き抽出法」を改良した上で、風洞試験で得られた音響信号と非定常可視化結果に適用した。その結果、従来概念的に提唱されているだけだった、大規模擾乱から音波が発生している様子を直接可視化する事に成功した。可視化結果を元に数値シミュレーションを行い、擾乱と衝撃波の干渉から音波が発生する具体的なメカニズムを明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ジェットエンジンやロケットから騒音が発生するメカニズムの研究。騒音の源になっている変動の発生場所や、その変動が衝撃波と干渉して音波が発生する様子を、従来よりも分かりやすい形で視覚的に確認することが出来た。この研究により、騒音を大幅に低減できる可能性が広がる。また、ここで開発したデータ解析手法は、間欠的かつ不規則に発生する現象をはっきりと取り出すことができるので、他の流体解析にも応用することができる。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of the noise generation from high-speed engine exhausts was studied. Wavelet-based conditional sampling and averaging (WB-CSA) method was modified and applied to the analysis of the acoustic signal and the unsteady visualization data obtained from wind-tunnel tests. The analysis successfully visualized the process of acoustic wave generation caused by large-scale disturbances. The mechanism was further studied by the numerical simulation. It was shown that the acoustic waves emanate from the interaction between the disturbance and the shock waves.

研究分野：航空宇宙工学、流体力学

キーワード：空力音響 超音速ジェット 条件付き抽出

1. 研究開始当初の背景

旅客機やロケット打ち上げなどで生じる空力騒音は、工学的にも社会的にも重要性が増している。空力騒音の根本的な低減のためには騒音の発生機構の理解が不可欠だが、乱流と流れ場の干渉で生じる広帯域空力騒音は、個々の音波の発生が不規則・間欠的であるため、単純な位相平均や周波数解析で騒音発生機構を明らかにすることが難しい。そのため、騒音源となっている流動現象を明らかにするための有効な解析手法が求められている。

2. 研究の目的

独自に開発してきた非定常実験データの解析手法である「音響トリガ条件付き抽出法」をベースとして、空力騒音の発生メカニズムを明らかにするための手法を開発し、実際の空力騒音源を解明することを目的としている。具体的には、以下の3テーマを設定する。

- (1) 「音響トリガ条件付き抽出法」の実験での適用領域拡大
- (2) 「音響トリガ条件付き抽出法」の数値解析への応用
- (3) 超音速衝突ジェット騒音の発生機構の解明

3. 研究の方法

(1) 実験解析

先行研究では適正膨張状態の超音速ジェットを対象に、マッハ波と呼ばれる広帯域騒音を対象に「音響トリガ条件付き抽出法」を適用し、その有効性を示してきた。そこで本課題では、マッハ波とは異なる広帯域騒音である衝撃波関連騒音と、狭帯域騒音(特定の周波数に強く現れる騒音)の一種であるスクリーチノイズが発生するような、非適正膨張状態の超音速ジェットを対象に、本手法の適用を試みた。さらに複雑な音響現象として、斜め平板に衝突する非適正膨張超音速ジェットから発生する騒音を対象にした実験も行い、本手法の有用性を確認すると同時に、音源位置や音波発生の様子を明らかにした。

(2) 数値解析

風洞試験可視化動画から抽出された大規模構造が音波を発生するメカニズムを解明するために、2次元平面衝突ジェットに孤立渦を付加したシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 実験解析

まず、設計マッハ数 1.8 のラバルノズルで、圧力比 6.73 の不足膨張ジェットを対象にした試験を行った。計測された音響スペクトルから、この条件下では衝撃波関連騒音が発生していることが確認されている。これに対して「音響トリガ条件付き抽出法」を適用して得られた可視化結果(図1, トリガ抽出周波数=7kHz)から、まずジェットに沿ってマッハ波とみられる密度変動が下流に伝播している様子が現れ(i),それがノズル直径の13倍程度下流に到達したのち、左上に向かって伝播する密度変動(ii)が現れる様子が観察された。このような間欠的な発生過程は、先行研究におけるマッハ波現象と類似しており、伝播方向や波長などから、衝撃波関連騒音が抽出できていることが確認された。さらに、ショックセル構造の可視化画像(図2)と比較したところ、衝撃波関連騒音の音源位置は第7ショックセル付近にあることが明らかとなった。

次に、ノズル圧力比 4.00 の過膨張ジェットを用いた試験を行った。観察された音響スペクトル

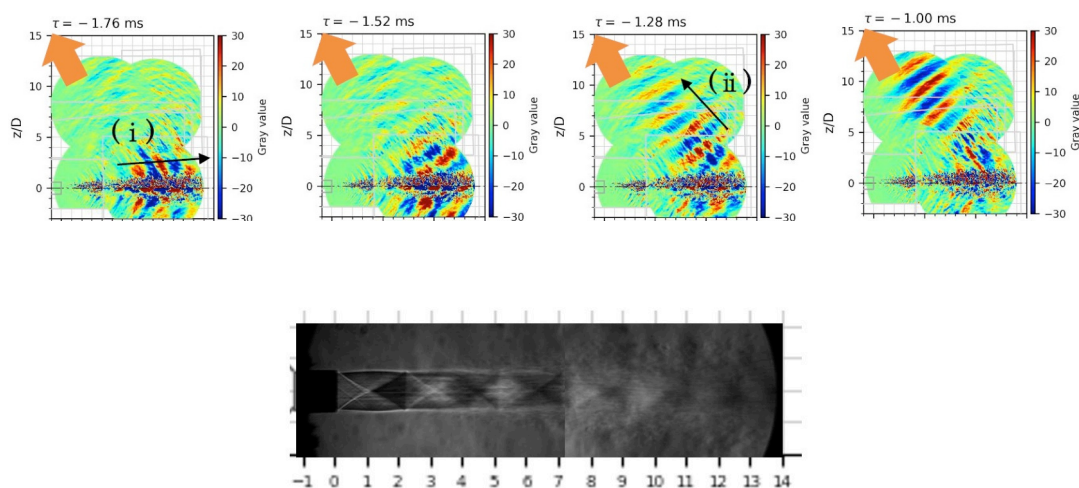


図2 ショックセル構造 (不足膨張)

から、この条件下では衝撃波関連騒音に加えてスクリーチノイズが発生していることが確認されている。同様に「音響トリガ条件付き抽出法を適用した。図3は、トリガ抽出周波数を、衝撃波関連騒音のピーク周波数である 10kHz としたものであり、不足膨張の時と類似した音響波が抽出されている。一方、図4はトリガ抽出周波数をスクリーチ周波数のひとつである 6.5kHz としたものである。ここで抽出された現象は、常に音波が発生していることが観察され、狭帯域騒音の特徴が現れていることが分かった。以上のことから、「音響トリガ条件付き抽出法」を用いると、広帯域騒音と狭帯域騒音が混在しているような現象においても、トリガ抽出周波数を適切に選択することによって、それらの現象を別々に抽出できることが示された。

さらに、抽出された画像とショックセル可視化画像を比較すると、衝撃波関連騒音とスクリーチ音の音源位置は、どちらも第6ショックセル付近にあることが明らかとなった。またスクリーチ音については、ターゲット周波数である 6.5 kHz の音波は音源から上流約 45 度方向に伝播しているのに対して、その倍の周波数の音波がジェット軸に垂直方向に伝播している様子が観察された (図4)。

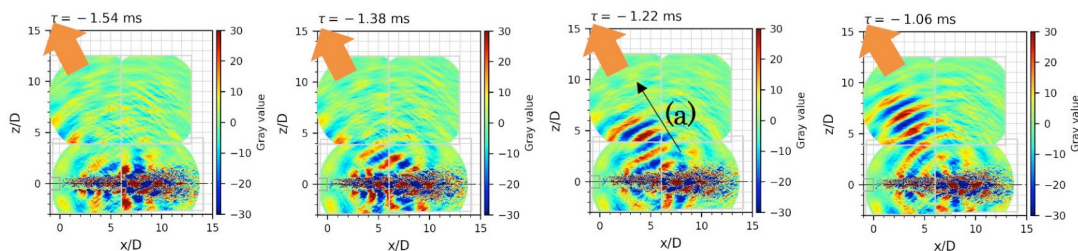


図3 抽出結果 (過膨張, 抽出周波数 10kHz)

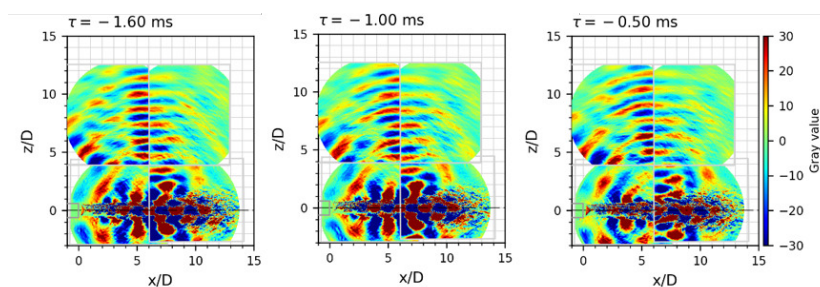


図4 抽出結果 (過膨張, 抽出周波数 6.5kHz)

次に、トリガ検出手法についての検討を行った。上記の抽出解析においては、抽出の母関数として波数3のMorlet関数を採用していたが、これは広帯域騒音が間欠的に発生するという特性に合わせたものであったため、逆に狭帯域騒音の検出に向いているとは言い難かった。そこで、Morlet関数の波数を増やすことによって、狭帯域騒音現象の抽出改善を試みた。その結果、ウェーブレットマップ上において、波数3の場合では現れなかった帯状の分布が検出できるようになった (図5)。この結果は、将来的に、広帯域騒音と狭帯域騒音が同じ周波数であっても、トリガ検出の際に区別できるようになる可能性を示しており、本研究で提案している「音響トリガ条件付き抽出法」は、広帯域騒音だけでなく、狭帯域騒音が混在するような音響現象に対しても、それぞれの成分を分離して抽出できることが示された。

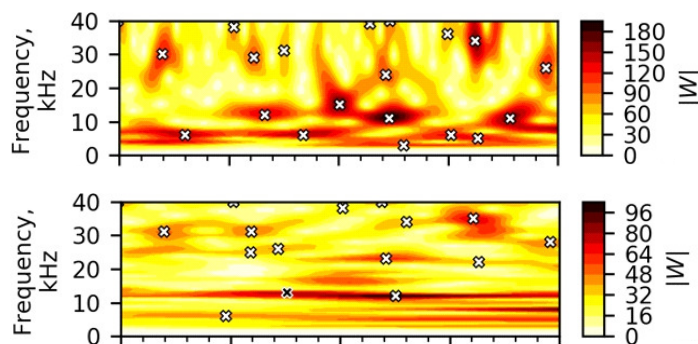


図5 母関数の波数によるウェーブレットマップの違い (上: 波数3, 下: 波数9)

最後に、さらに複雑な音響現象の一例として、斜めに設置した平板に衝突する過膨張超音速ジェットから生じる音響現象を対象に、解析を行った。その結果、ノズルと平板間の距離に応じて発生する音響現象が大きく異なることが、音響スペクトルだけでなく可視化動画と

しても示され、それらの整合性があることを確認した。また、その音響現象の特徴は、図4で示したスクリーチ音源位置よりも平板が上流にあるのか下流にあるのかによって変化することが明らかとなった。

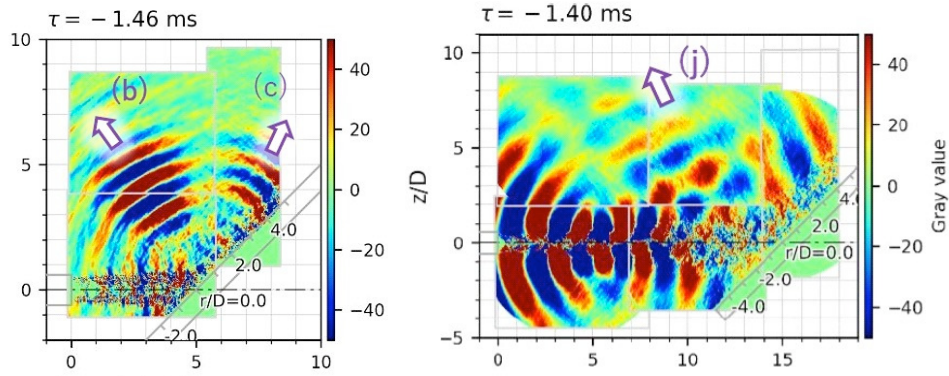


図6 衝突ジェット騒音抽出結果 (左: 5D, 右: 15D)

(2) 数値解析

45度平板に衝突するマッハ1.8適正膨張の2次元平面ジェットの剪断層に孤立渦を付加した解析を行った。非定常静圧分布から、衝突点やや下流の $x/L=6$ 付近から平板垂直方向に伝搬する音波(A), $x/L=4.5$ 付近のプレートショックからジェット上流方向に伝播する音波(B, D), $x/D=8$ 付近の第一テールショックから等方的に広がる音波(C)と、実験(図6)に対応する3種類の音が確認できた。

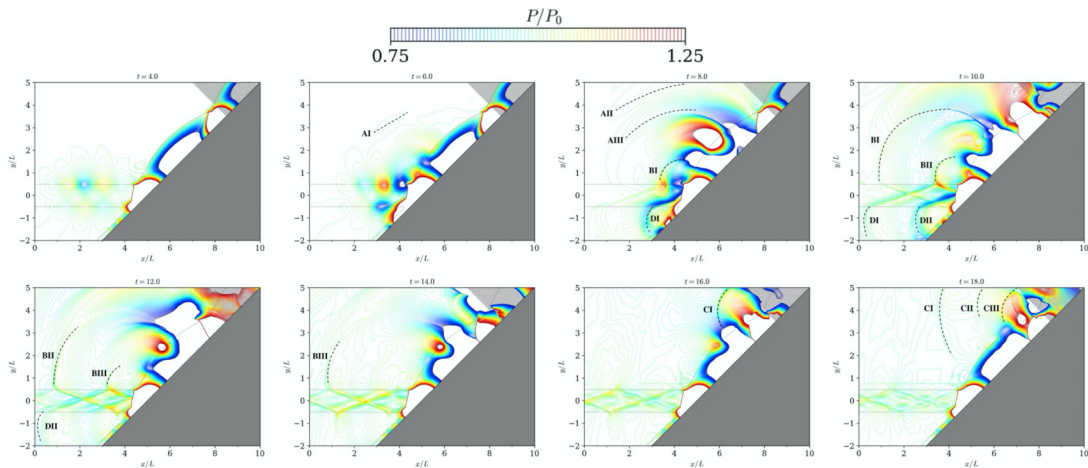


図7 超音速ジェットから生じる音響波 (非定常静圧分布)

時刻 4.0, 6.0, 8.0 における上側剪断層の圧力変動を見ると、剪断層上での圧力変動を見ると、 $x/L < 4$ のジェット剪断層、 $x/L=4.5$ 付近のプレートショック、 $x/L > 5$ の壁面ジェットと移流するに従って変動が大きくなっている事がわかる。特に $x/L=4.5$ から 5.0 にかけてのプレートショック直下流における圧力変動増加が大きく、この圧力変動の急増大によって音響波 A が発生している。

次に、音響波 B, D に着目すると、付加擾乱がプレートショックに到達する $t=5.0$ 以降、プレートショック下端の変形によって $x/L=4.7$ 付近の壁面淀み点圧力が上昇していき、 $t=6.8$ に赤・オレンジ色等高線で示された高圧部が $x/L=4.4$ のプレートショックに達すると、プレートショックが上流側に凸に変形し、それが直線状に戻った $t=7.2$ にプレートショック上下端から圧力波(密な黒色等高線)が発生していることがわかり、プレートショック変形と淀み点圧力変動が連成して音波 B, D が発生していることが明らかになった。

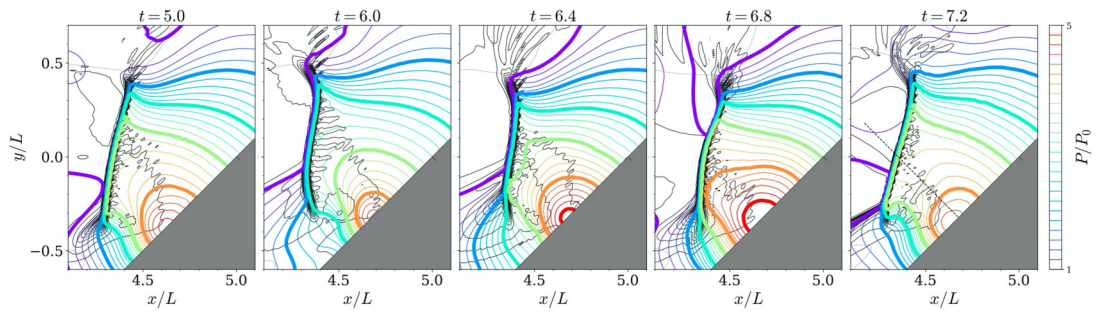


図8 プレートショックから生じる音響波（黒等高線：速度発散，色等高線：静圧）

一方、音響波Cの発生過程を細かく見ると、図9の $t=13.3$ では矢印で示すように壁面で正常反射する斜め衝撃波が形成されているが、V6, 7で示される孤立渦の移流とともに $t=14.4$ では壁面付近が垂直衝撃波になるマッハ反射に遷移し、時刻 14.9 では垂直衝撃波が形成されている。この垂直衝撃波はその後 $t=15.5$ で下流に消失し、同時に $x/L=7.5$ 付近に再び正常反射の斜め衝撃波が形成される。このように、音響波Cが発生している $x/L=7-8$ では、衝撃波構造が斜め衝撃波（正常反射）→マッハ反射→垂直衝撃波→斜め衝撃波と繰り返し変動し、それに伴って衝撃波背後の圧力も変動し、その変動が音響波Cを生じさせていることが明らかになった

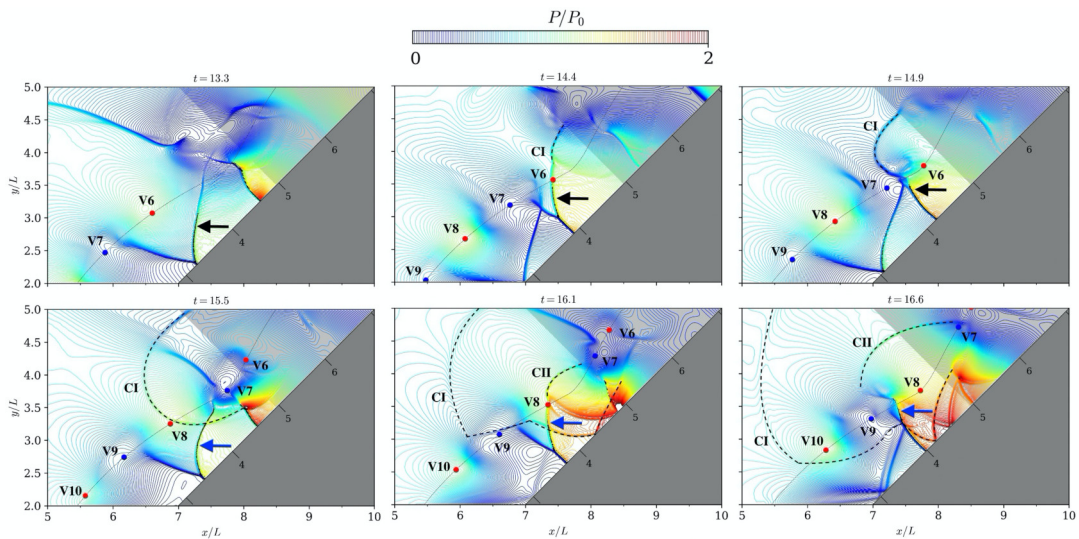


図9 第一テールショックから生じる音響波（色等高線：静圧）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kurokawa Masashi、Teramoto Susumu、Okamoto Koji	4. 巻 58
2. 論文標題 Acoustic Wave Generation from Two-Dimensional Supersonic Inviscid Jet Impinging on Inclined Plate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3436 ~ 3445
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J059012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nielsen Tracianne B.、Vaughn Aaron B.、Gee Kent L.、Akamine Masahito、Okamoto Koji、Teramoto Susumu、Tsutsumi Seiji	4. 巻 146
2. 論文標題 Data-educed broadband equivalent acoustic source model for supersonic jet noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3409 ~ 3424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/1.5132947	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Akamine Masahito、Okamoto Koji、Teramoto Susumu、Tsutsumi Seiji	4. 巻 145
2. 論文標題 Conditional sampling analysis of high-speed schlieren movies of Mach wave radiation in a supersonic jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 EL122 ~ EL128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/1.5088493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akamine Masahito、Okamoto Koji、Gee Kent L.、Nielsen Tracianne B.、Teramoto Susumu、Okunuki Takeo、Tsutsumi Seiji	4. 巻 56
2. 論文標題 Effect of Nozzle-Plate Distance on Acoustic Phenomena from Supersonic Impinging Jet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1943 ~ 1952
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J056504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 今野千尋, 寺本進, 赤嶺政仁, 岡本光司	4. 巻 66
2. 論文標題 斜め平板に衝突する超音速噴流と渦の干渉から生じる音響現象	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 24 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.66.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 赤嶺政仁, 寺本進, 岡本光司, 堤誠司
2. 発表標題 超音速ジェットから間欠的に生じる音波の周方向相関
3. 学会等名 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2020オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 堤誠司, 寺本進, 岡本光司, 野中聡
2. 発表標題 モード解析と条件付抽出解析によって得られた乱流ジェット騒音の特徴量比較
3. 学会等名 日本流体力学学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takemura, M., Okamoto, K., and Teramoto, S.,
2. 発表標題 Visualization and acoustic-triggered conditional sampling analysis of acoustic phenomena with screech-tone of an over-expanded supersonic jet
3. 学会等名 178th Meeting of the Acoustical Society of America (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Akamine, Seiji Tsutsumi, Koji Okamoto, Susumu Teramoto, Satoshi Nonaka
2. 発表標題 Comparison of Modal and Conditional Analyses for Intermittent Phenomena in Jet Noise
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 堤誠司, 岡本光司, 寺本進, 野中聡
2. 発表標題 ジェット騒音の間欠現象における動的モード分解から得られた特徴量の理解
3. 学会等名 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okamoto, K., Fukatsu, K., Akamine, M., and Teramoto, S.
2. 発表標題 Laser optical measurement of acoustic phenomena in the near field of a supersonic jet using 2-D position sensitive detector
3. 学会等名 176th Meeting of the Acoustical Society of America (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sekiguchi, Y., Okamoto, K., and Teramoto, S
2. 発表標題 Visualization of acoustic phenomena of imperfectly expanded supersonic jets using acoustic-triggered conditionalsampling analysis
3. 学会等名 176th Meeting of the Acoustical Society of America (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李 允台, 寺本 進, 岡本 光司
2. 発表標題 翼列のLES解析におけるブロック境界条件の影響
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 将志, 寺本 進, 岡本 光司
2. 発表標題 超音速衝突噴流における渦と衝撃波の干渉から生じる音響現象
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李允台, 寺本進, 岡本光司
2. 発表標題 翼列LES解析に向けた高次精度ブロック境界条件の検証
3. 学会等名 第46回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 将志, 寺本 進, 岡本 光司
2. 発表標題 斜め平板への超音速衝突噴流における渦と衝撃波の干渉によって生じる音響現象に関する数値解析
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関口 侑矢, 岡本 光司, 寺本 進
2. 発表標題 過膨張噴流から発生する音響現象の条件付抽出解析
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤嶺 政仁, 岡本 光司, 寺本 進, 堤 誠司, 野中 聡
2. 発表標題 音響トリガ条件付抽出解析におけるトリガ 検出方法の影響とモード解析との比較
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	岡本 光司 (Okamoto Koji) (70376507)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	赤嶺 政仁 (Akamine Masahito) (00835465)	東京大学・大学院工学系研究科・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------