

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560200

研究課題名(和文) 超音速噴流が移動平板へ衝突するときを生じる特異な大規模振動とうなり現象の解明

研究課題名(英文) Study on Large Scale Oscillation caused by Supersonic Jet Impinging on Moving Plate

研究代表者

片野田 洋 (Katanoda, Hiroshi)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40336946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、音速よりも速い超音速の噴流が、移動する平板へ衝突する際に発生する大規模振動(large-scale oscillation with beat; LOB)に関する研究である。LOB現象のモデル化については線形理論を用いた解析により、比較的良い結果を得ることができた。しかし、LOB現象の数値シミュレーションでは、実験結果を正確に再現することはできなかった。基礎式の移流項を、より高次精度に離散化する必要があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research was to clarify the physics of the large-scale oscillation with beat, LOB, which occurs when a supersonic jet impinges on a moving plate. The modeling of the LOB was almost successful using a linear theory. However, unsatisfactory results were obtained by numerical simulation. The convection terms in the basic equations need to be discretized using a higher spatial resolution scheme to obtain better results.

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：圧縮・非圧縮流

キーワード：超音速流れ 衝突噴流 移動平板

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、超音速の噴流が移動する平板へ衝突する際に発生する大規模な振動 (large-scale oscillation with beat; LOB) に関する研究である。超音速または音速ノズルから噴出する流れを平板に吹きつける衝突噴流に関しては、1960年代から現在に至るまで数多くの研究者により研究がなされてきた。しかし、それらは全て静止した平板への衝突噴流であった。しかるに、超音速噴流を用いた固体微粒子のコーティングや、製鋼プロセス中の転炉における超音速の酸素噴流による溶けた鉄の精錬、ロケット発射時のロケットエンジンから地面への排気ガスの噴射、垂直離着陸航空機のジェットエンジンから地面への排気ガスの噴射など、作動中に衝突対象 (衝突平板) がノズルに対して相対的に移動するケースは多い。前述の LOB は世界的に報告例が無く、現在のところ工学的に深刻な問題となった事例は報告されていない。しかし、LOB の学術的な解明、および将来発生しうる工学的な問題の予防のために詳細な研究を行うことが必要であると考え、本研究を実施した。

### 2. 研究の目的

本研究では、LOB 発生時の流動状態と圧力波の発生・伝播状態、LOB の発生機構、および貯気圧力などの諸パラメータが LOB の支配周波数、振動振幅などの特性に与える影響を明らかにすることを研究目的として設定した。具体的には、主に以下のような項目について研究を行った。

- 1) LOB が発生しているときの衝突噴流の流動状態、圧力波の発生・伝播状態の詳細の調査
- 2) LOB の発生機構のモデル化
- 3) ノズルの設計マッハ数、貯気圧力、平板のトラバース速度が LOB に与える影響の調査

### 3. 研究の方法

LOB が発生したときの流動状態と圧力波の発生・伝播状態、LOB の発生機構、および諸パラメータが LOB の特性に与える影響を明らかにするために、本研究では実験、理論解析、および数値シミュレーションにより研究を行った。

実験においては、軸対称の超音速ノズルを用い、最大圧力 2.5MPa の圧縮空気を移動平板に吹き付けた。このとき、移動平板の壁面静圧およびノズル出口から十分離れた場所での音圧を測定した。実験のパラメータは、ノズルのスロート上流の貯気圧力、平板の移動速度、超音速ノズルの設計マッハ数とした。作動気体は、貯気圧力 2.5MPa 以下の常温の窒素とした。1.0MPa 以下の実験条件については、圧縮空気も併用した。

理論解析においては、静止平板に衝突する超音速流れのピーク周波数 (スクリーチ騒音の周波数) に関する線形理論を移動平板に応用し、その結果の妥当性を評価した。

数値シミュレーションにおいては、線形理論による理論解析では解明できない LOB の発生原因やスクリーチ騒音以外の周波数特性を明らかにすべく、Chakravarthy-Osher 型の空間 3 次精度の TVD 型の有限差分法を用いた数値シミュレーションプログラムを用いて計算を実施し、壁面静圧分布を実験結果と比較した。主に、初年度に様々な条件での衝突噴流の実験、2 年目に線形理論解析、3 年目に数値シミュレーションを行った。

### 4. 研究成果

実験においては、設計マッハ数 1.5 と 2.0 の軸対称の超音速ノズルを製作した。実験条件として、衝突平板のトラバース速度は 10 mm/s ~ 100mm/s、貯気圧力 0.2MPa ~ 2.0MPa とし、これらが LOB の振動形態、振動周波数および圧力振幅に与える影響を調査した。その結果、平板のトラバース速度が 10mm/s ~ 50mm/s 程度、貯気圧力が 0.7MPa ~ 1.5MPa 程度の範囲で衝突噴流から明瞭なうなり騒音が発生することを見出した。加えて、縦軸に衝突全圧、横軸にノズル出口からの流れ方向距離をとって平板上の圧力振幅を調べたところ、移動衝突平板の圧力振幅は、静止衝突平板の 1.5 ~ 2 倍程度あり、衝突噴流は大規模に振動していることを見出した。これらの傾向は、ノズルの設計マッハ数にはあまり依存しないことも分かった。

LOB 現象のモデル化については、線形理論により LOB を支配する振動形態と振動周波数、圧力振幅の予測を試みた。その結果、設計マッハ数 1.5 のノズルの場合については現象の支配的な周波数について、概ね一致する結果が得られた。これは、設計マッハ数 1.5 のノズルからの衝突噴流については、流動現象が線形理論に近い状態になっているためであると考えられる。しかし、設計マッハ数 2.0 のノズルの場合については、十分な一致が得られなかった。これは、設計マッハ数 2.0 のノズルの場合は、線形理論では予測できていない振動モードが加わり、または支配的になるためか、非線形な振動モードが支配的になるためであると考えられる。非線形な現象については理論解析が困難であるため、本研究では実施しなかった。

数値シミュレーションについては、Chakravarthy-Osher 型の空間 3 次精度の有限差分法、時間積分には 3 段階の Runge-Kutta 法を用いた数値計算コードを使用した。噴流部の自由境界については、Thompson の非反射境界条件を適用し、自由境界に入射した圧力波の非物理的な反射を抑制した。数値シミュレーションの結果、LOB の支配的な周波数、圧力振幅について、実験結果と十分に一致する結果を得ることはできなかった。この理由は、用いた数値シミュレーションプログラムが 2 次元軸対称コードであるために、軸対称でない流れおよび圧力波動の振動モードを数値シミュレーションで捉えられていない

ことと、有限差分法の空間精度が不十分であること等が考えられる。この対策としては、自作数値シミュレーションコードの3次元への拡張または既成の圧縮性3次元ソルバーの利用、および自作数値シミュレーションコードへの空間5次精度程度のTVD系差分法の採用が考えられる。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計8件)

森田洋充, 片野田洋, 相互相関PIVにより得られるコールドスプレーの粒子群の速度と平均直径に関する考察, 日本溶射学会誌 溶射, 査読有, 第51巻, 第1号, 2014年, pp. 1-7.

R. M. Molak, H. Araki, M. Watanabe, H. Katanoda, N. Ohno and S. Kuroda, Warm Spray Forming of Ti-6Al-4V, J. Thermal Spray Technology, 査読有, Vol. 23, No.1-2, 2014, pp.197-212.

M. Watanabe, C. Brauns, M. Komatsu, S. Kuroda, F. Gärtner, T. Klassen, H. Katanoda, Effect of Nitrogen Flow Rate on Microstructures and Mechanical Properties of Metallic Coatings by Warm Spray Deposition, Surface and Coatings Technology, 査読有, Vol.232, No.15, 2013, pp.587-599.

T. Mori, S. Kuroda, H. Murakami, H. Katanoda, Y. S. and S. Newman, Effects of Initial Oxidation on Beta Phase Depletion and Oxidation of CoNiCrAlY Bond Coatings Fabricated by Warm Spray and HVOF Processes, Surface and Coatings Technology, 査読有, Vol. 221, No. 25, 2013, pp.56-69.

片野田洋, 森田洋充, コールドスプレー, ウォームスプレー, 高速フレイム溶射における粒子速度に関する普遍的な法則, 日本溶射学会誌 溶射, 査読有, 第49巻, 第4号, 2012年, pp. 111-116.

K.-H. Kim, S. Kuroda, M. Watanabe, R. Huang, H. Fukanuma and H. Katanoda, Comparison of Oxidation and Microstructure of Warm-Sprayed and Cold-Sprayed Titanium Coatings, J. Thermal Spray Technology, 査読有, Vol.21, No.3-4, 2012, pp.550-560.

福原稔, 高本健太, 小田啓貴, 小嶋良昌, 高口裕芝, 片野田洋, 吹出し管を備えた吸込みノズルの空気輸送特性に及ぼすノズル深さの影響, 粉体工学会誌, 査読有, 第49巻, 第2号, 2012年, pp. 92-99.

S. Kuroda, M. Watanabe, K.-H. Kim and H. Katanoda, Current Status and Future Prospects of Warm Spray Technology, J. Thermal Spray Technology, 査読有, Vol.20, No.4, 2011, pp.653-676.

### 〔学会発表〕(計29件)

Mohd Hazwan bin Yusof, K. Moritake, H. Katanoda, Temperature and Pressure Measurements in Cold Flow of Vortex Tube, Proceedings of the 10th International Conference on Flow Dynamics, 4 pages, Nov. 26, 2013, Hotel Metropolitan Sendai

H. Morita, H. Katanoda, Estimation of Stagnant Gas Temperature of Cold Spray using Outer Surface Temperature of the Nozzle Throat, Proceedings of the 10th International Conference on Flow Dynamics, 4 pages, Nov. 26, 2013, Hotel Metropolitan Sendai

片野田洋, 森田洋充, コールドスプレー用超音速ノズルにおける固体微粒子の挙動に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2 pages, 2013年11月10日, 九州大学

森田洋充, 片野田洋, 幅広い粒径分布をもつ溶射粒子の平均速度データに関する考察, 日本機械学会 2013年度年次大会講演論文集, 2pages, 2013年9月10日, 岡山大学

森武光平, モハモド ハズワン ビン ユソフ, 片野田洋, 福原稔, ポルテックスチューブ冷風の温度測定法に関する研究, 日本機械学会 2013年度年次大会講演論文集, 2 pages, 2013年9月10日, 岡山大学

草野祥平, 片野田洋, 福原稔, 超音速流れを用いる高速フレイム溶射のOpenFOAMによる乱流数値シミュレーション, 日本機械学会 2013年度年次大会講演論文集, 2 pages, 2013年9月10日, 岡山大学

H. Katanoda, B. Sun, N. Ohno, H. Fukanuma, S. Kuroda, M. Watanabe, O. Ohashi, Design and Development of High-Pressure Warm Spray Gun, Proc. ITSC2013, 2 pages, May 13, 2013, Busan Exhibition and Convention Center

Molak Rafal, 渡邊誠, 荒木弘, 黒田聖治, 大野直行, 片野田洋, ウォームスプレーしたチタンおよびTi-6Al-4V合金皮膜のミクロ組織と機械特性に及ぼす成膜条件と熱処理の影響, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会講演概要集, 2pages, 2013年3月15日, 首都大学東京

H. Katanoda and H. Morita, Accuracy of Estimating Stagnant Gas Temperature of Cold Spray by Measuring Metal Temperature of Outer Surface of the Gun, Proc. 5th Asian Thermal Spray Conference, pp. 27-28, Nov. 27, 2012, Tsukuba Convention Center

森田洋充, 片野田洋, 粒径分布をもつ溶射粒子のPIVデータに関する考察, 日本機械学会 2012年度年次大会講演概要集, 4pages, 2012年9月10日, 金沢大学

- モハモド ハズワン ビン ユソフ, 片野田洋, 福原稔, ボルテックスチューブの高速冷風の温度測定法に関する研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演概要集, 4pages, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学
- 福元大地, 片野田洋, 福原稔, 超音速流を用いる高速フレーム溶射の Open FOAM による数値シミュレーション, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演概要集, 4pages, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学
- 供利涼司, 片野田洋, 福原稔, コールドスプレーノズル内の圧縮性流れに関する数値シミュレーション, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演概要集, 4pages, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学
- 柳田祐樹, 片野田洋, 福原稔, コールドスプレー用ノズル内の超音速流れに関する実験的研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演概要集, 4pages, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学
- 福元大地, 片野田洋, 福原稔, OpenFOAM による圧縮性流れの数値シミュレーション, 日本機械学会九州支部第 65 期総会・講演会講演論文集, pp.267-268, 2012 年 3 月 16 日, 佐賀大学
- 片野田洋, ウォームスプレーにおける粒子パラメータの検討, 日本溶射学会 2011 年度秋季全国講演大会講演論文集, pp.57-58, 2011 年 11 月 14 日, ウィンクあいち
- 渡邊誠, C. Brauns, 小松誠幸, 黒田聖治, 片野田洋, ウォームスプレー金属皮膜の力学特性と粒子温度・速度の相関, 日本金属学会 2011 年秋期大会講演概要集, 1page, 2011 年 11 月 7 日, 沖縄コンベンションセンター
- Mohd Hazwan bin Yusof, 片野田洋, 福原稔, ボルテックスチューブの性能に与える作動気体の効果, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, 4pages, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学
- H. Katanoda, Influence of computational grid spacing on gas/particle flow of cold spray, Proceedings of International Thermal Spray Conference 2011, 4 pages, Sep. 27, 2011, Congress Center Hamburg
- M. Watanabe, C. Brauns, M. Komatsu, S. Kuroda, H. Katanoda, F. Gärtner, T. Klassen, Effect of nitrogen flow rate on mechanical properties of metallic coatings by warm spray deposition, Proceedings of International Thermal Spray Conference 2011, 4 pages, Sep. 27, 2011, Congress Center Hamburg
- 21 K.H. Kim, S. Kuroda, M. Watanabe, R. Huang, H. Fukanuma and H. Katanoda, Comparison of oxidation and microstructures of warm-sprayed and cold-sprayed titanium coatings, Proceedings of International Thermal Spray Conference 2011, 4 pages, Sep. 27, 2011, Congress Center Hamburg
- 22 佐藤誠一郎, 片野田洋, 福原稔, OpenFOAM による超音速流れの数値シミュレーション, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, 4pages, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学
- 23 小岩慎一郎, 片野田洋, 福原稔, コールドスプレー用超音速ノズル内の流動状態に関する実験的研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, 4pages, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学
- 24 上高牧亮太, 片野田洋, 福原稔, コールドスプレーにおけるノズル形状の影響に関する数値シミュレーション, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, 4pages, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学
- 25 島井基行, 片野田洋, 福原稔, コールドスプレーの超音速流れに与える粒子負荷率の影響, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, 4pages, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学
- 26 H. Katanoda, Influence of computational grid spacing on supersonic gas/particle flow of cold spray, Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 4 pages, July 4, 2011, Vrije Universiteit Brussel
- 27 H. Morita and H. Katanoda, Experimental and Numerical Simulation on Over-expanded Supersonic Flow in Cold Spray Nozzle, Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 4 pages, July 4, 2011, Vrije Universiteit Brussel
- 28 片野田洋, コールドスプレーノズルの最適形状に関する考察, 日本溶射協会 2011 年度春季全国講演大会講演論文集, pp. 37-38, 2011 年 6 月 6 日, たかつガーデン
- 29 坂田一則, 田籠康児, 新屋康弘, 三輪直久, H. Gabel, R. M Tapphorn, J. Henness, 南部俊和, 高嶋和彦, 片野田洋, カイネティックスプレー皮膜特性に及ぼす粒子速度の研究 - 内径用ショートノズルの評価 -, 日本溶射協会 2011 年度春季全国講演大会講演論文集, pp. 17-18, 2011 年 6 月 6 日, たかつガーデン
- 〔図書〕(計 1 件)  
 福本昌宏監修, 榊和彦, 小川和洋, 片野田洋編集, 未来を拓く粒子積層新コーティング技術 - コールド/ウォームスプ

レー, エアロゾルデポジションのすべて  
-, シーエムシー出版, 2013 年 11 月,  
pp.55-61

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片野田 洋 (KATANODA, Hiroshi)  
鹿児島大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 40336946