

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246144

研究課題名(和文)革新的ソニックブーム低減技術の地上実証研究

研究課題名(英文)Ground experiment of the innovative sonic boom reduction technology

研究代表者

大林 茂(OBAYASHI, Shigeru)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80183028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超音速複葉翼理論に基づく実用的な低ブーム超音速機形状を完成させるため、超音速機の設計・評価システムを構築する。特に、流体科学研究所の共用設備である2段軽ガス銃実験設備の改修により3次元形状の自由飛行実験を可能にする地上実験装置を開発し、超高速応答型感圧塗料を用いた圧力の面計測システムの開発、多重極解析手法による圧力波形補正法の開発、力天秤の開発と超音速風洞への導入、ソニックブーム予測技術の開発および非定常最適設計探査手法の提唱を行った。

研究成果の概要(英文)：Design and evaluation systems for supersonic vehicles are constructed in this research to develop a low-boom supersonic vehicle based on Supersonic Biplane Theory. The following experimental and numerical simulation techniques were developed: free flight experiment of three-dimensional projectiles, surface pressure distribution measurement using ultrafast response pressure-sensitive paint, a calibration technique of pressure waveforms by the multipole method, a force balance measurement system in a supersonic wind tunnel, sonic boom estimation with consideration of the real atmospheric conditions, and design optimization and exploration for unsteady phenomena.

研究分野：数値流体力学

キーワード：航空工学 超音速 ソニックブーム 数値流体力学 実験流体力学

1. 研究開始当初の背景

近年、民間の超音速輸送機 (SST) の分野では、小型超音速旅客機や超音速ビジネスジェット (SSBJ) の開発計画が世界的に注目されている。米国では、エアリオン社[1]や SAI社[2]などが開発計画を打ち出し、数年後の市場投入を目指している。NASA でも 2020 年以降の市場投入を目指した SST の研究が進められている[3]。欧州では、仏ダッソー社を中心に HISAC と呼ばれる SSBJ 開発が進められている[4]。国際民間航空機関 (ICAO) では、これらの動きに対応して 2016 年に民間超音速飛行に関するソニックブーム基準策定を計画している。我が国でも、第 3 期科学技術基本計画の分野別推進戦略においてソニックブームの低減が掲げられ、これに対応して文部科学省では「次世代超音速機技術の研究開発」が重点的に進めるべき研究開発として取り上げられ、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において「静粛超音速研究機の研究開発」が検討され、2011 年に気球投下による低ブーム技術実証試験が行われた[5]。また 2005 年 10 月には、日本航空宇宙学会において申請者を主査とするサイレント超音速旅客機研究会が発足し、2010 年 3 月からはソニックブーム研究会として継続的に活動をしており、JAXA・学会を中心に組織を横断してオール日本で超音速機の研究開発に取り組む体制が整いつつある。一方、申請者は、本研究課題に関連して、2003~2006 年度に基盤研究 (A) (2) 課題番号：15206091 「サイレント超音速飛行実現のための実験・計算融合研究」、2007~2009 年度に基盤研究 (A) (一般) 課題番号：19206086 「超音速複葉翼理論に基づくサイレント超音速機の基盤研究」を研究代表者として実施してきた。2003 年度採用の基盤研究で用いられた「サイレント(静粛)超音速」という言葉は、その後の NASA や JAXA のプロジェクト名に利用されており、この研究の先駆性が裏付けられている。この研究の 2 年目には、東北大学 21 世紀 COE プログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」で招聘した楠瀬博士の協力も得て、超音速複葉翼理論を提案した。この理論は、古典的なブーゼマン翼の概念を応用して 2 枚の翼を用いて衝撃波を干渉させることで、造波抵抗を低減しつつソニックブームを根本的に削減することを目指しており、JAXA の低ブームコンセプトとも異なる革新的空力形状である。また、2007 年度採用の基盤研究では、最適な 3 次元超音速複葉翼形状を探索するとともに、ラジコン機による低速飛行試験やバリスティックレンジを利用した超音速複葉翼による世界で初めての超音速飛翔実験を成功させた。

参考文献

[1] エアリオン社：

<http://www.aerioncorp.com/home>

[2] SAI 社：<http://www.saiqsst.com/>

[3] NASA 先進概念研究：

http://www.aeronautics.nasa.gov/nra_awa_rdees_10_06_08.htm

[4] ISAC：<http://www.hisacproject.com/>

[5] JAXAD-SEND データベース：

http://d-send.jaxa.jp/d_send.html

2. 研究の目的

本研究では、超音速複葉翼理論に基づく実用的な低ブーム超音速機形状を完成させるため、ソニックブームを含めた地上における超音速実験機的设计・評価システムを構築する。特に低ブーム性を地上実験により実証するため、流体科学研究所の共用設備である 2 段軽ガス銃実験設備を利用し、3 次元形状の自由飛行実験を可能にするソニックブーム地上実験装置を開発する。

3. 研究の方法

本研究では 3 つの研究グループに分け、緊密な連携のもとに研究を実行する。

(1) ソニックブーム地上実験グループ：東北大学流体科学研究所の共用設備である 2 段軽ガス銃実験設備では、模型の自由飛行実験が実施可能である。この施設を改修し、3 次元複雑模型の近傍場圧力計測システムを開発し、東北大学が保有している感圧塗料による圧力計測技術を応用して、より詳細な圧力場を評価できる計測システムを構築する。また、情報技術を応用して、計測の高精度化を行う。

(2) 超音速風洞実験グループ：定常空力性能を評価するため、力天秤の製作および検定を行い、開発した力天秤を東北大学および鳥取大学の超音速風洞に導入する。力天秤を開発することで、計測感度の高い力天秤であっても小型化が可能であり、様々なサイズの風洞に導入できる。

(3) シミュレーション研究グループ：主に東北大学流体科学研究所のスーパーコンピュータを利用し、ソニックブーム予測技術の高度化と、非定常最適設計探索による機体設計の研究を行う。これまで開発してきた計算技術としては、大気乱流の影響を考慮したソニックブーム予測や非構造格子法、多目的設計探索法である。特にソニックブーム予測技術の開発は、JAXA の気球投下による低ブーム技術実証試験と連携のもとに進める。

4. 研究成果

本報告では代表的な成果を 3 件記載し、詳細な成果は論文等で公開する。

近傍場圧力計測技術の開発：翼胴形状などの複雑形状模型の近傍場圧力波形を高精度に計測するため、模型全周で近傍場圧力波形を計測し、多重極解析手法により圧力波形を補

正する計測システムを構築した。多重極解析手法による実験結果と数値解析結果を比較検証した結果、本解析手法を用いることで計測の高精度化が達成できた。また、ブームカーペットの評価が可能である圧力の時空間分布計測システムを構築するため、時間応答性を大幅に改善した超高速応答型感圧塗料を用いて、超音速飛翔体から発生する非定常圧力変動を面計測し（図1）、近傍場圧力計測実験における感圧塗料計測の有用性を評価した。その結果、感圧塗料による計測結果と非定常圧力センサの計測結果が定性的に一致し、観測面上を超音速で伝播する非定常圧力波を面的および時系列的に捉えることに成功した。

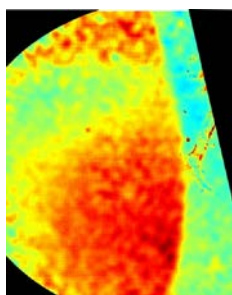


図1 感圧塗料計測による観測面上の圧力分布

空力評価に向けた力天秤の開発：揚力や抗力などの空気力の計測感度を変えて設計できる超音速風洞試験用の力天秤を開発した。超音速気流中のくさび模型の空気力測定に適用した結果、超音速風洞試験用六角天秤の有用性を確認した（図2）。一方、スターティングロードによる天秤破損を避けるため、安全率を推算して設計製作したが、その見積もりが過大であり、測定精度向上の余地があることが分かった。

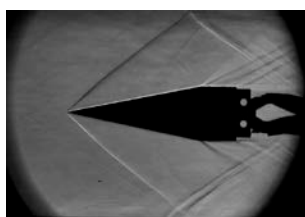


図2 力天秤の有用性評価実験写真

数値解析の効率化および高精度化：非定常現象を伴う設計問題に効率的に対処すべく、新たなデータマイニング手法として階層型相関分析を提案し、工学問題に応用した。本手法では、ルール生成に対して信頼度と確信度を用いている。ルール自体の信頼度を数学的に保証するため、90%以上の信頼度を確保する必要がある一方で、確信度はパラメータにできることが判明した。また、遠方場におけるソニックブームの予測精度を向上するため、温度・密度・湿度の変化を伴う大気乱流中を

長距離伝播する微弱なソニックブームのシミュレーション技術を開発した（図3）。本解析結果と実験結果を比較した結果、定性的な傾向が一致し、有用性が確認できた。

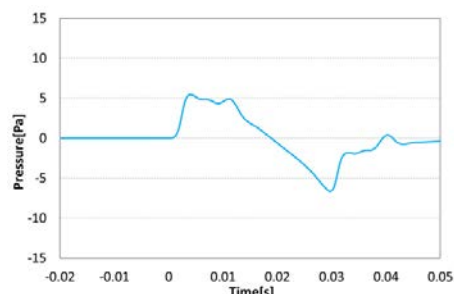


図3 大気乱流中を伝播したソニックブームの予測波形

本研究では、ソニックブーム地上実験装置を開発し、3次元形状模型の近傍場圧力計測実験が実施できるようになり、力計測や圧力計測などの計測手法の開発や計測精度の向上を行い、低ブーム超音速機の性能実証体制が整った。今後は、開発したソニックブームの地上実験技術を用いて、さまざまな低ブーム形態の実証実験を行っていきたい。

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38件）

1. T. Ukai, K. Ohtani, S. Obayashi, Validation of Measurement Accuracy for Near-Field Pressure around Supersonic Projectiles in a Ballistic Range, Measurement, Vol.67, pp.24-33, (2015.5) 査読有
doi:10.1016/j.measurement.2015.01.031
2. 大塚輝人, 齋藤務, 吉川典彦, 爆発事故定量評価のための Bursting Sphere の数値解析とスケール則, 査読有, 安全工学, Vol. 53, 2014, pp. 310-316 査読有
3. 千葉一永, 渡邊 真也, 金崎 雅博, 北川 幸樹, 嶋田 徹, 設計情報学を用いたハイブリッドロケットエンジン搭載単段式宇宙輸送機概念設計, 日本機械学会 論文集, Vol.80, No. 818, 2014, TRANS0287, pp.1-13 DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0287 査読有
4. Hiroshi Yamashita, Naoshi Kuratani, Masahito Yonezawa, Toshihiro Ogawa, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, and Shigeru Obayashi, Wind Tunnel Testing on Start/Unstart Characteristics of Finite Supersonic Biplane Wing, International Journal of Aerospace Engineering, Vol.2013, (2013.11). Article ID 231434, 10 pages, 2013. DOI: 10.1155/2013/231434 査読有

5. Takahiro Ukai, Takamasa Kikuchi, Kiyonobu Ohtani, Shigeru Obayashi, Simultaneous visualization of surface and flow field for a projectile, *Journal of Visualization*, Vol.16, No.4, pp.331-340, (2013.11) 査読有
DOI 10.1007/s12650-013-0174-1
 6. Hiroshi YAMASHITA, Takashi FUJISONO, Atsushi TOYODA, Hiroki NAGAI, Keisuke ASAI, Shinkyu JEONG, Shigeru OBAYASHI, Aerodynamic Characteristics and Effects of Winglets of the Boomless Tapered Supersonic Biplane during the Starting Process, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 11, pp. 17-26(2013) 査読有
doi.org/10.2322/tastj.11.17
 7. Chiba, K., Makino, Y., and Takatoya, T. , Design-Informatics Approach for Intimate Configuration of Silent Supersonic Technology Demonstrator, *Journal of Aircraft*, Vol.49, No.5, 2012, pp.1200-1211, DOI: 10.2514/1.C031116 査読有
 8. 藤園崇, 山下博, 豊田篤, 永井大樹, 浅井圭介, 鄭信圭, 大林茂, テーパー型超音速複葉翼の始動特性と翼端板効果, Aerodynamic Characteristics and Effects of Winglets of the Boomless Tapered Supersonic Biplane during the Starting Process, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol.60, No.1, (2012), pp.1-8 査読有
DOI :10.2322/tastj.11.17
 9. 萩原真澄, 永井大樹, 沼田大樹, 浅井圭介, 断層シュリーレン法を用いた超音速複葉翼の内部構造の解明, *日本航空宇宙学会論文集*, 60 巻 3 号, 2012, pp. 142-147 査読有
 10. Bitter, M., Hara, T., Hain, R., Yorita, D., Asai, K., Kähler, C. J. , Characterization of pressure dynamics in an axisymmetric separating/reattaching flow using fast-responding pressure-sensitive paint, *Experiments in Fluids*, Vol.53(6), 2012, pp. 1737-1749 査読有
DOI 10.1007/s00348-012-1380-7
 11. Saito T., Hatanaka K., Yamashita H., Ogawa T., Obayashi S., Takayama K., Shock stand-off distance of a solid sphere decelerating in transonic velocity range, *Shock Waves*, Vol.21, No.5(2011) 査読有
DOI 10.1007/s00193-011-0323-1
 12. 大久保正幸, 豊田篤, 山下博, 小川俊広, 大林茂, 清水克也, 鈴木角栄, 松田淳, 佐宗章弘, 胴体先端形状修正による翼胴型超音速複葉翼機のソニックブーム低減化, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol.59, 2011, pp.119-125 査読有
 13. T.Saito, Shock stand-off distance of a solid sphere decelerating in transonic velocity range, *Shock Waves* , Vol. 21 2011, pp. 483-489.
DOI: 10.1007/s00193-011-0323-1 査読有
 14. K. Hatanaka, T. Saito, Numerical analysis of weak shock attenuation resulting from molecular vibrational relaxation, *Shock Waves*, Vol. 21, 2011, pp. 121-129

DOI: 10.1007/s00193-011-0301-7 査読有
 15. S. Kadowaki, M. Yahata, H. Kobayashi, Effects of the Unburned-Gas Temperature and Lewis Number on the Intrinsic Instability of High-Temperature Premixed Flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.6, 2011, pp. 376-390
査読有
- [学会発表] (計 129 件)
1. 大谷清伸, Prisha Rao, 齋藤務, 水波のマッハ反射現象に関する研究, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 平成 27 年 3 月 11 日, 群馬県伊香保
 2. D. Numata, K. Asai and K. Ohtani, "Application of PSP Technique to Near-Field Sonic Boom Measurements in a Ballistic Range," 53th AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA 2015-0024 Kissimmee, Florida, U.S., Jan. 5-8, 2015.
 3. Ishida, H. Nagai, H. Tanno and T. Komoro, "Aerodynamic Evaluation of a Capsule Shaped Projectile during Free Flight Testing with Ballistic Range," 53th AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA 2015-0244 Kissimmee, Florida, U.S., Jan. 5-8, 2015.
 4. Chiba, K., Kanazaki, M., Watanabe, S., Kitagawa, K., and Shimada, T. , Structurization of Design Space for Launch Vehicle with Hybrid Rocket Engine Using Stratum-Type Association Analysis, The 18th Asia-Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, IES2014, November 12th, 2014, Nanyang, Singapore
 5. Chiba, K., Watanabe, S., Kanazaki, M., and Obayashi, S. , Stratum-Type Association Analysis for Conceptual Design of Hybrid

- Rocket in View of Fuels, International Conference on Flow Dynamics, ICFD2014, October 8th, 2014 Sendai, Japan
6. T. Saito, Shock wave studies and CFD, The 16th National Symposium on Shock Wave, July 16, 2014, 洛陽 (中国)
 7. H. Nagai, T. Horagiri, H. Tanno and T. Komoro, "Visualization of a Re-entry Vehicle in Hypersonic Flow using Temperature-Sensitive Paint," The 16th International Symposium on Flow Visualization, ISFV16-1275, Okinawa, Japan, Jun. 25-27, 2014.
 8. Daiju Numata, Keisuke Asai, Time-Resolved PSP Imaging of Unsteady Shock-Wave Phenomena Using a High-Speed Camera, The 2014 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech2014), National Harbor, Maryland, USA, (2014.1.14)
 9. Yuta Saito, Takahiro Ukai, Ko Miyakoshi, Kiyonobu Ohtani and Shigeru Obayashi, Sonic Boom Estimation using the Multipole Method for Free-Flight Experiments, 52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting(Scitech 2014), National Harbor, Maryland, USA, (2014.1.14). AIAA-2014-0368
 10. Takahiro Ukai, Yuta Saito, Ko Miyakoshi, Kiyonobu Ohtani, Shigeru Obayashi, Interaction of Low Sonic Boom Pressure Signatures with Jet Turbulence, The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2013), Takamatsu, Japan, (2013.11.20).
 11. Daiju Numata, Keisuke Asai, Ultrafast Time Response Pressure-Sensitive Paint for Unsteady Shock-wave Research, The 29th International Symposium on Shock Waves (ISSW29), Madison, Wisconsin, USA, (2013.9.15).
 12. Takahiro Ukai, Hossein Zare-Behtash, Kin Hing Lo, Konstantinos Kontis, Shigeru Obayashi, Experimental Study of Dual Injections with a Cavity in Supersonic Flow, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison, USA, (2013.7.15).
 13. Shota Fujii, Daiju Numata, Hiroki Nagai and Keisuke Asai, Development of Ultrafast Response Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paints, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 9, 2013, Grapevine, Texas, USA
 14. Chiba, K. Performance Comparison of Evolutionary Algorithms Applied to Hybrid Rocket Problem, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 23rd November 2012, Kobe, Japan
 15. Chiba, K., Hybrid Evolutionary Optimizer Applicable to Large-Scale and Practical Design Problem, International Computational Mechanics Symposium, Computational Mechanics Division, Japan Society of Mechanical Engineers, 10th October 2012, Kobe, Japan
 16. Chiba, K., Pure and Hybrid Optimizers Applicable to Aeronautical Design Problem, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 11th September, 2012, Vienna, Austria
 17. Hiroshi Yamashita, Shigeru Obayashi, Global Variation of Sonic Boom Overpressure Due to Seasonal Changes in Atmosphere, Nonlinear Acoustics State-of-the-Art and Perspectives, The 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Tokyo, Japan (2012.5.21).
 18. H. Kobayashi, Y. Ogami, Turbulent Combustion of Model Coal-gasification Syngas at High Pressure, The Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2011), Sendai, Japan (November 9, 2011)
 19. Shigeru Obayashi, Multidisciplinary Design Exploration Applied to Supersonic Aircraft, EUROGEN2011, Italian Aerospace Research Center, Capua, Italy, (September 16, 2011)
 20. Takashi Fujisono, Hiroshi Yamashita, Atsushi Toyoda, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, Takashi Matsuno, Hiromitsu Kawazoe, Shinkyu Jeong, Shigeru Obayashi, SUPERSONIC WIND TUNNEL EXPERIMENT ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS AND WINGLETS EFFECTS OF THE TAPERED SUPERSONIC BIPLANE, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, Hamamatsu,

Japan, Proceedings of ASME-JSME-KSME
Joint Fluids Engineering Conference 2011
(2011.7.28). 論文番号:AJK2011-15015

東北大学・工学研究科・助教
研究者番号：20551534

21. T. Saito, Computations of flow field around an object decelerating from supersonic to subsonic velocity, 28th International Symposium on Shock Waves, The University of Manchester, Manchester U.K. (2011.7.15).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

大林 茂 (OBAYASHI, Shigeru)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：80183028

(2)研究分担者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30170343

浅井 圭介 (ASAI, Keisuke)
東北大学・工学研究科・教授
研究者番号：40358669

永井 大樹 (NAGAI, Hiroki)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：70360724

小川 俊広 (OGAWA, Toshihiro)
東北大学・流体科学研究所・技術専門員
研究者番号：30375133

斎藤 務 (SAITO, Tsutomu)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：00302224

川添 博光 (KAWAZOE, Hiromitsu)
鳥取大学・工学部・教授
研究者番号：40260591

千葉 一永 (CHIBA, Kazuhisa)
北海道科学大学・工学部・准教授
研究者番号：50450705

沼田 大樹 (NUMATA, Daiju)