

平成30年度
宇宙科学に関する室内実験シンポジウム

飛翔体衝撃波によって形成される 非定常圧力場の可視化計測

○作田瞬、和田光司、沼田大樹

東海大学 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻

発表内容

- 研究背景
- 研究目的
- 感圧塗料の構成
- 実験装置
- 実験条件
- 実験結果
- まとめ及び今後の課題

研究背景

研究背景 - 超音速旅客機

□ コンコルド

- ✓ 1969年3月1日初飛行
- ✓ マッハ2で飛行する世界で唯一の超音速旅客機
- ✓ 2003年に全機引退

騒音問題が影響



コンコルド

出典: <https://mrdesign.exblog.jp/3986061/>

□ 騒音の原因

- ✓ 超音速飛行機体から発せられる衝撃波由来のソニックブーム現象 (Sonic Boom, S.B.)

S.B. はその騒音のために人の居住地域上空の飛行に制限をもたらす

今後の航空輸送需要の更なる増大に対する解の一つが超音速輸送による時間短縮であるため、S.B.の低減・解消を目指した研究が必要

研究背景 - ソニックブーム

□ ソニックブーム

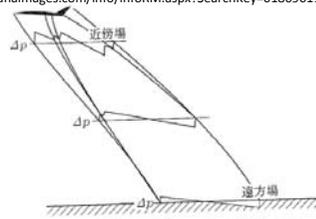
- ✓ 超音速で飛行する飛行機や飛翔体はつねに**衝撃波**の発生を伴うが、それらの**圧力波が整理統合**され地上に到達したもの
- ✓ 波面前後における急激な圧力変動のため**強い爆発音**が起こる



出典：
<https://amanaimages.com/info/infoRM.aspx?SearchKey=01809011153>

□ ソニックブームの特性

- ✓ 圧力波形は機体の形状に関係なくN字形となるので、**N波**と呼ばれる
- ✓ ソニックブーム強さは衝撃波面の前後における急激な圧力上昇 Δp で評価される



耳の反応
出典：産業図書、牧野光雄、「ソニックブーム—その現象と理論」

研究背景 - 感圧塗料

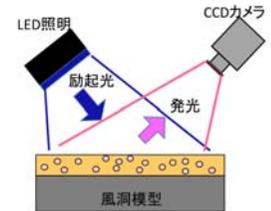
□ ソニックブーム研究に用いられる非定常圧力場計測手法

- ✓ 低周波マイクロホン
- ✓ 非定常圧力センサ

面としてどのように現象が伝わっているか解析不能

□ 感圧塗料 (Pressure-Sensitive paint, PSP)

- ✓ 酸素消光作用を受ける蛍光色素を用いた圧力センサの一種
- ✓ 色素の発光強度が周囲の酸素濃度に応じて変化する特性を用いてPSP塗布面の**表面圧力を面で計測**することが可能



Stern-Volmer の式

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A + B \frac{P}{P_{\text{ref}}}$$

I : 発光強度
 P : 圧力
 A, B : Stern-Volmer 定数

マイクロホンなどを用いた点計測手法と比べ、感圧塗料を用いた計測手法では現象を**面で捉えることができる**ため、より正確な現象評価が可能

研究目的

PSP の計測条件について着目し、飛翔体衝撃波によって形成される非定常圧力場をより鮮明に捉えてソニックブーム現象の定量的可視化計測を実現するため、露光時間の観点からPSPの計測条件の最適化を図る

□ 発表内容

- 感圧塗料の構成
- 実験装置
- 実験条件
- 画像解析
- 実験結果
- まとめ及び今後の課題

感圧塗料の構成

感圧塗料の構成

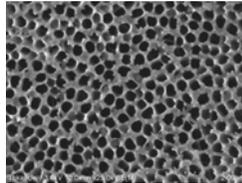
□ 感圧色素・溶媒

✓感圧色素: tris- (BATHOPHENANTHROLINE)

RUTHENIUM (II) CHLORIDE

励起波長: 460 nm

発光波長: 620 nm



試験サンプルの陽極酸化皮膜構造

✓バインダ: リン酸型陽極酸化皮膜

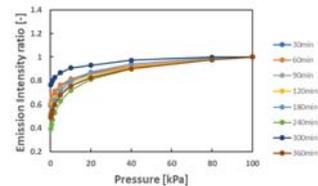
✓溶媒: ジクロロメタン

□ 試験サンプル条件の決定

✓色素濃度: 0.1 [mM]

✓ディッピング時間: 240 min.

➢ 最も高い発光強度を有するため



色素濃度0.1 [mM]において、各ディッピング時間での発光強度比

実験装置

実験装置

✓バリスティックレンジ

➢ 0.2 ~ 7 [m/s] の速度で飛翔体射出が可能

➢ チャンバー: 常温真空 (~5 [Pa])

➢ 速度に応じてガス銃モード、一段式火薬銃モード、二段式軽ガス銃モードの使い分けが可能

✓飛翔体

➢ ポリカーボネート球

(直径 7.18 [mm])



ポリカーボネート球



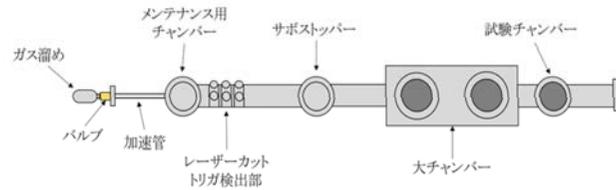
バリスティックレンジ (ISAS)

実験条件

実験条件

□ 実験条件

- ✓動作モード: **ガス銃モード**
- ✓試験部内圧力: **1 kPa**
- ✓飛翔体速度: **マッハ2程度**



ISASパリストックレンジ装置概略(ガス銃モード)

飛翔体撮像用光源条件

□ 撮像光学系

- ✓撮像装置: 高速度カメラ (FASTCAM SA-Z, (株) フォトロン)
- ✓レンズ: Nikon F マウントカメラレンズ (f = 85 [mm])

□ 撮像用光源 (励起光源)

- ✓LED 光源: IL-106-UV-SS (西華デジタルイメージ株式会社)
(LED 素子を交換して、ブルー LED として使用)

□ 撮像用光学フィルタ

- ✓カメラ: ハイパスフィルタ (FELH0600)



FASTCAM SA-Z



IL-106-UV-SS

撮像条件

□ カメラ側撮像条件

- ✓露光時間: 8.39 [μs]
- ✓フレームレート: 100,000 [fps]
- ✓解像度: 380 × 408 [pixel]

□ 光源側撮像条件

- ✓動作モード: パルスモード

✓パルス間隔

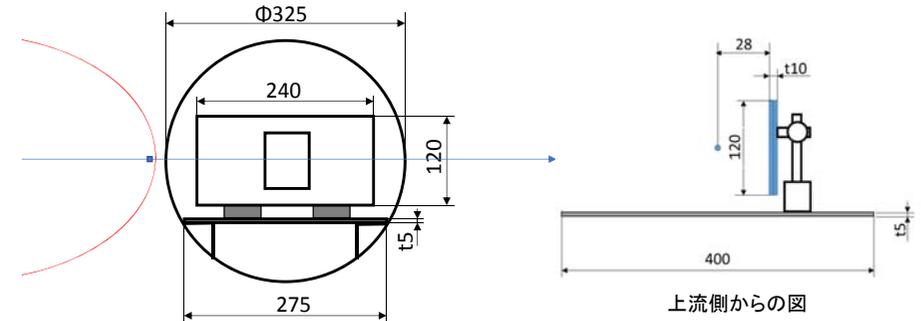
- 1 [μs] (2回目)
- 2 [μs] (1回目)
- 2.5 [μs] (3回目)

※カメラの露光時間中に、左記の時間の間励起光を照射

✓LED カレント

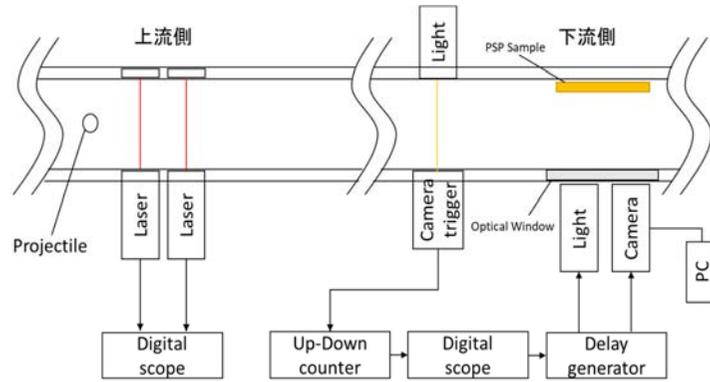
- 240 [A] (3回目)
- 250 [A] (1,2回目)

試験部へのサンプル固定方法



- ✓チャンバー内に鉄板を配置し、その上に光学ロッドを使ってサンプルホルダを固定
- ✓サンプルホルダ上に PSP 板を設置
- ✓飛翔体からサンプル板までの距離は 28 [mm]

セットアップ図

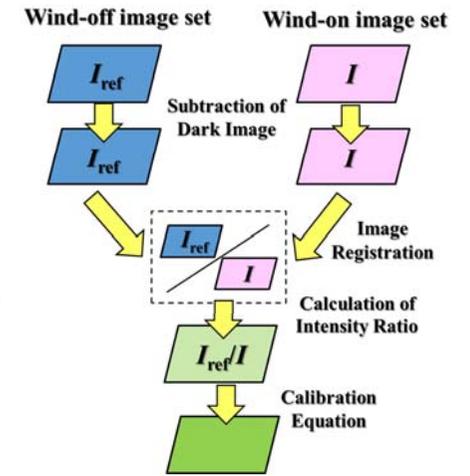


- ✓上流側のレーザーカット信号により、飛翔体の射出速度を計算
- ✓飛翔体が下流側のカメラトリガーを通過したタイミングで各機器にトリガー信号が送られ、ディレイジェネレータによってカメラ及び光源の動作タイミングを調整

発光強度画像から圧力への変換

□ 画像処理手順

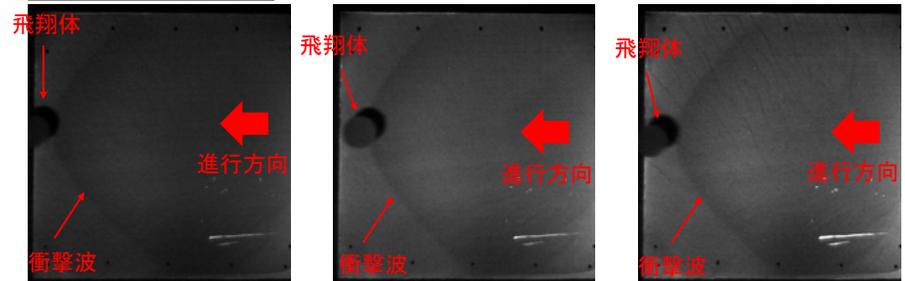
- ① 通風画像とリファレンス画像の両方の画像からダーク減算を行う
- ② 通風画像及びリファレンス画像上にそれぞれマーカー位置を複数点選択し、相関を利用してマーカーを微調整して画像補正を行う
- ③ 画像を割り算して発光強度比画像を得る
- ④ 結果に較正式を当てはめ圧力画像に変換



実験結果

非定常圧力場の可視化結果

感圧色素 (Ru(dpp))
検出波長: 600 ~ [nm]



飛翔体速度: 683 [m/s]
パルス間隔: 1 [μs]
LED カレント: 250 [A]

飛翔体速度: 638 [m/s]
パルス間隔: 2 [μs]
LED カレント: 250 [A]

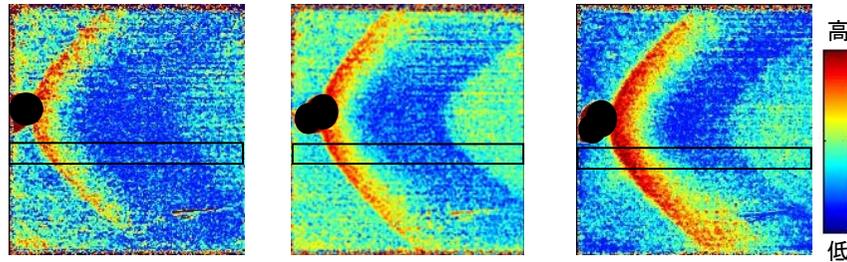
飛翔体速度: 671 [m/s]
パルス間隔: 2.5 [μs]
LED カレント: 240 [A]

短 パルス間隔 長

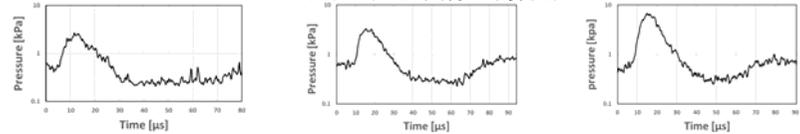
- ✓どのパルス間隔の条件においても飛翔体由来の衝撃波を捉えることに成功

圧力画像

圧力画像(発光強度比画像から変換)



圧力プロファイル(圧力画像より算出)



パルス間隔: 1 [μs]

パルス間隔: 2 [μs]

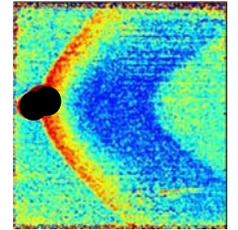
パルス間隔: 2.5 [μs]

✓すべてのパルス間隔の条件において、圧力分布およびソニックブーム特有のN波が確認できた

解析結果・考察

□ 露光時間が短い (1 [μs])

✓現象をシャープに捉えることができるが、露光時間が短いのために検出光量が小さく、圧力変化に伴う発光強度変化を十分に捉えることができない



露光時間: 2 [μs]

□ 露光時間が長い(2.5 [μs])

✓検出光量が増加するが、露光時間が長いいため現象がぼやけてしまい、現象を鮮明に捉えることができない

結果より衝撃波を捉えることができる高速応答 PSP では、2 [μs]の露光時間が、検出光量及び現象の鮮明な解像にとって最適であることがわかった

まとめ及び今後の課題

まとめ及び今後の課題

非定常衝撃波によって形成される非定常圧力場をより鮮明に捉えてソニックブーム現象の定量的可視化計測を目指し、PSP を用いてバリスティックレンジ試験を実施した

- 感圧塗料により、衝撃波を可視化することに成功した
- ソニックブームの定量可視化に必要な感圧塗料の最適撮影条件に関する知見を得た
- 今後の課題
 - ✓ 非定常圧力センサによる計測結果と感圧塗料による計測結果との比較
 - ✓ 温度分布の定量解析 (感温塗料, Temperature-Sensitive Paint, TSP)