

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630442

研究課題名(和文) 野外爆発実験を利用したソニックブーム乱流変調シミュレーション

研究課題名(英文) Turbulence modulation simulation of sonic boom using field explosion experiments

研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40215752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、野外爆発実験で発生する衝撃波の背後の圧力変動に対する、人為的に発生させた速度場の乱れの影響についての定量評価データを得るシミュレーション実験手法を開発した。雷薬0.51gを紙筒内に充填し、電気導火線で着火し爆発させることで衝撃波を生成し、送風機、ダクト部、格子から構成される乱流源からの風向きを、衝撃波と対向するように設置した。爆点から6000 mm、格子から爆点側に500 mmの同一平面内にマイクロホンを4台設置し多点測定した結果、乱流による過剰圧ピーク値の変動が±40%以上にも達することが示され、空間的にもランダムな箇所に変調が起こることが実証された。

研究成果の概要(英文)：In this study, experimental simulation method of evaluating overpressure variation induced by a blast wave interacting with turbulent flow was developed. The blast wave was generated using a 0.51-gram power. The turbulent flow was generated with an electrical fan, duct and grid. Overpressure histories were measured using four microphones set symmetrically. A 40% standard deviation in overpressure was obtained, thereby demonstrating spatiotemporal behavior as the result of the shock wave-turbulence interaction.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：衝撃波 ソニックブーム 乱流 爆発実験 圧力変調

1. 研究開始当初の背景

コンコルド以来の民間超音速機開発の機運は、成長著しい航空需要とグローバル化、価値の多様化に後押しされ、近年国内外で再び高まっている。その実現のため解決すべき大きな空気力学的課題が、ソニックブームである。NASA では、民間超音速機開発のロードマップが示されており、JAXA も D-SEND プロジェクトによって低ソニックブーム機の性能を実証しようとしている。静止大気中を伝播するソニックブームの挙動に関しては音響学に基づくモデルが確立されているが、実飛行では大気の流れがあり、それが支配的影響を及ぼす。しかし、それを詳しく調べる実験の機会は限られ、定量的な基準作りには程遠い段階である。

NASA では、超音速飛行機によるソニックブーム計測を行っているが、大気乱れは自然に任せ受動的なもので、その空間分布を十分に解像することも困難である。Agui ら (J. Fluid Mech., 2005) は、衝撃波管の中に格子を設置し、入射衝撃波背後に発生する格子乱流と反射衝撃波との干渉を実験的に調べたが、衝撃波背後の圧力変動に関する系統的なデータは得られていない。Lipkens ら (J. Accos. Soc. Am., 1998)、Kim ら (Shock Waves, 2010) は、プラスト波が、スリットジェットによって大きな圧力変動を受けることを示したが、衝撃波も速度乱れも非定常、非一様なものであった。Sasoh らは、低乱風洞で発生した格子乱流と、球状衝撃波の干渉を調べ、圧力ピーク値低下の平均値が 1% 程度であるのに対して、その標準偏差が 1 桁大きくなりうることを実証した。ただ、この実験では、衝撃波が球状に広がるにしたがって急激に減衰するため、圧力変動に対する乱流伝播距離の影響を定量化することができなかった。

2. 研究の目的

本研究では、野外爆発実験で発生する衝撃波の背後の圧力変動に対する、人為的に発生させた速度場の乱れの影響について、圧力ピーク値、圧力立ち上がり時間それぞれのアンサンブル平均および標準偏差などの統計データを取得することによって、ソニックブーム (超音速飛行体による衝撃音) に対する大気乱流の影響についての定量評価データを得るシミュレーション実験手法を確立することを目的とする。計測地点にてほぼ平面とみなせる衝撃波を対象とすることができるため、小規模実験でできなかった乱流領域伝播距離の影響を調べることができ、しかも実際のソニックブーム条件であり衝撃波管では精密に制御することが困難な、背後過剰圧力が大気圧の 1/1000 ~ 1/100 程度の弱い衝撃波を対象にできる。

3. 研究の方法

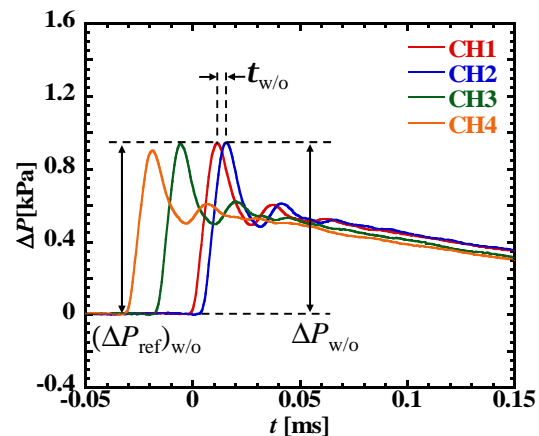
当初計画していた経済産業省の爆発実験

には参加の許可が下りなかったため、本実験は、独)産業技術総合研究所 安全科学研究部門 (つくば市) の敷地内で実施された。雷薬 (組成 KP:Al:S=65:19:16) 0.51g を紙筒内に充填し、電気導火線で着火し爆発させることで衝撃波を生成した。乱流源は送風機、ダクト部、格子から構成され、衝撃波と対向する向きに流速を生成するように設置した。送風機 (SF-45MS-1VP, スイデン) で生成される流速はダクト部で縮流され、格子 (10 x 10 mm² 角、間隔 50 mm、開口比 64%) を通過し乱流化された。爆点から 6000 mm、格子から爆点側に 500 mm の同一平面内にマイクロホン (4939-A-011、Brüel & Kjaer) を 4 台 (CH1 ~ CH4) を対称に設置し、乱流中を伝播してくる衝撃波の圧力波形を多点測定した。

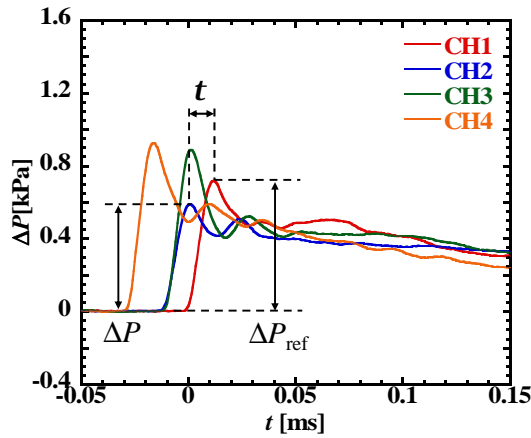
4. 研究成果

実験は 2 日間に渡って実施し、乱流なし (送風機の流速 0.0 m/s) の場合は 8 回、乱流ありの場合は 21 回の圧力波形を計測した。いずれも天候は晴れまたは曇りであり、風速 0.0 m/s で自然風の影響を無視できるタイミングで実験データを取得した。

図 1(a) に乱流なし、(b) に乱流ありの場合の各マイクロホンでの圧力波形を示す。ただし、CH1 に衝撃波が到達した時刻を横軸の基準 $t=0$ とする。図 1(a) に示すように、乱流がない場合には各マイクロホンでの過剰圧はほぼ等しい。また、平均衝撃波マッハ数 $M_s \approx 1.004$ であった。衝撃波が到達する時間が各マイクロホン CH で異なるのは、マイクロホンの取り付け位置または火薬の設置箇所により多少の誤差が生じていたためである。一方、図 1(b) では、乱流の影響により各マイクロホンでの過剰圧が大きく異なる。また、図 1(a) と比較すると、衝撃波が到達する時間も変化していることがわかる。



(a) 送風機 OFF



(b) 送風機 ON
図 1 圧力履歴測定例

図 2 に乱流ありの場合について、マイクロホン CH1 を基準とした過剰圧ピーク値の差と到達時間差の関係を示す。ただし位置の誤差の影響を取り除くため、図 2 の縦軸 β 、横軸 γ は F 図 2 中に示す過剰圧 ΔP 、 $\Delta P_{w/o}$ 、 ΔP_{ref} 、 $(\Delta P_{ref})_{w/o}$ 、到達時間差 τ 、 $\tau_{w/o}$ 、爆点からマイクロホンまでの距離 $L (= 6000 \text{ mm})$ 、実験時の音速 a_{∞} を用いて以下のように定義する。すなわち、 β は無次元化された過剰圧の差を、 γ は無次元化された到達時間の差を表す。

$$\beta = \frac{\Delta P}{\Delta P_{w/o}} - \frac{\Delta P_{ref}}{(\Delta P_{ref})_{w/o}} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{L/a_{\infty}} - \left(\frac{\tau_{w/o}}{L/a_{\infty}} \right) \quad (2)$$

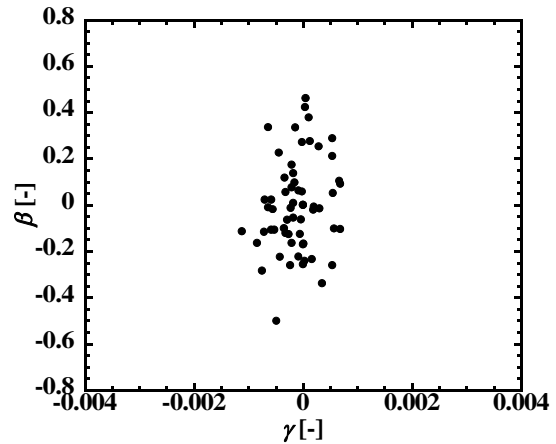
ただし

$$\overline{\Delta P_{w/o}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta P_{w/o} \quad (3)$$

$$\overline{(\Delta P_{ref})_{w/o}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta P_{ref})_{w/o} \quad (4)$$

$$\overline{\left(\frac{\tau_{w/o}}{L/a_{\infty}} \right)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tau_{w/o}}{L/a_{\infty}} \quad (5)$$

図 2 より、到達時間差や過剰圧差が大きくなばらつきをもちランダムに分布していることがわかる。相関係数は 0.18 であり、衝撃波の到達時間が遅くなるほど過剰圧が大きくなる傾向がある。これは実験室環境下で行われた先行研究⁽⁴⁾と同様の結果を示しており、乱流との干渉によって衝撃波面が局所的に変形していると考えられる。



(b) w/ turbulence

図 2 無次元到達時間（横軸）と無次元過剰圧（縦軸）の関係

以上のように、屋外火薬爆発を利用し、実験室内では実現困難な弱い垂直衝撃波と乱流との干渉実験を行った。多点で圧力波形を計測した結果、乱流との干渉により衝撃波の過剰圧と到達時間が局所的に変化することを確認し、衝撃波面が局所的に変形している傍証を得た。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 0 件)
なし

〔学会発表〕(計 2 件)

丹波高裕,古川大貴,青木勇磨,家弓昌也,岩川輝,佐宗章弘,松永猛裕,出雲充生,杉山勇太,松村知治,中山良男、衝撃波と乱流の干渉に関する屋外爆発実験、火薬学会 2015 年度春季研究発表会、2015 年 5 月 28 日、慶應義塾大学 日吉キャンパス(神奈川県横浜市) 優秀講演賞受賞

丹波高裕,古川大貴,青木勇磨,家弓昌也,岩川輝,佐宗章弘,松永猛裕,出雲充生,杉山勇太,松村知治,中山良男、屋外火薬爆発を利用した衝撃波-乱流干渉実験、平成 26 年度衝撃波シンポジウム、2015 年 3 月 9 日、ホテル天坊(群馬県渋川市)

〔図書〕(計 0 件)
なし

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40215752

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

横田 茂 (YOKOTA, Shigeru)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：30545778

酒井 康彦 (SAKAI, Yasuhiko)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20162274

長田 孝二 (NAGATA, Kouji)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50274501

中山 良男 (NAKAYAMA Yoshio)
独立行政法人産業技術総合研究所・安全科学
研究部門・研究グループ長
研究者番号：20357677