

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 2 4 年 3 月 3 1 日現在

機関番号：3 2 6 1 2

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：2 0 2 4 1 0 4 0

研究課題名（和文） 管内爆発の物理：安全評価のための実験的及び解析的研究

研究課題名（英文） Experimental and numerical investigation on explosion in tube

研究代表者

松尾 亜紀子（MATSUO AKIKO）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70276418

研究成果の概要（和文）：工場や発電所施設などにおける配管内、特に曲がり管で発生する爆発事故を想定し、衝撃波を伴う燃焼波の特性について、実験とシミュレーションによって調査した。燃焼波の特徴ある伝播形態は各種パラメータを変更することで調べられ、配管内部の圧力、化学組成、管の内径などへの依存性を明らかにした。曲がり部において多大なる圧力負荷が生じることや消えることなく伝播を維持する可能性が高いことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：We experimentally and numerically investigated detonations propagating into the bend tube in the industrial facility. The characteristics of detonation in the bend tube were clarified by changing some parameters, such as an initial pressure and gas component in the tube and an inner diameter of tube. The results indicated the high pressure loading on the bend area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2009 年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2010 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
総計	38,200,000	11,460,000	49,660,000

研究分野：社会システム工学・安全システム

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学, 社会システム工学・安全システム

キーワード：衝撃波, 爆発, 燃焼, 火災, 自然災害

1. 研究開始当初の背景

安全工学を念頭に置いた爆燃/爆轟の爆発現象に関する研究例は少なく、今後その一層の充実が必要である。この問題の困難さは、爆発現象そのものが予見できない事故であることや規模が大きく、対象とする場が様々

な意味で理想的ではないことに起因している。また、爆発現象を考えると、閉鎖的空間と開放的空間において生じる燃焼形態や爆発現象の時間的发展について違いがある。本研究課題では、閉鎖的空間、その中でも管内における爆発現象に着目して研究をすすめる。これは、原子力発電所や水素貯蔵施設

など燃料の漏洩を嫌い気密性が重要とされる施設の事故において、配管内部における爆発発生により施設に多大なる損害が生じたこと事故報告がなされているからである。

2. 研究の目的

本研究課題では、閉鎖的空間、その中でも管内における爆発現象に着目して、数値実験及び物理実験の両方から爆発現象の詳細解明を目指し研究を進める。特に、爆発現象の物理実験においては、現象の詳細を解明するために衝撃波面の可視化に焦点を絞り、実験結果の取得を目指す。

3. 研究の方法

研究内容は、大きく2つのテーマに分けられる。1つめは、曲がり管内における爆発波（爆風/燃焼波）の問題である。施設内の配管は直管部が主であるが必ず曲がり部を有している。そしてそのことが配管内部における爆発発生時において多大なる圧力負荷がかかることとなり配管破断に陥り、施設に多大なる被害を及ぼすこととなる。2つめは、事故発生時の被害予測として不明な点が多い爆轟波と液相との干渉である。配管内部に滞留している液相（水など）に爆轟波が入射した場合には、反射と透過が起こり、反射による管壁への圧力増大と液相との干渉による相変化などが予想される。これらの内容については、実験と数値解析において条件を合わせることで、現象の細部にわたる比較検討を行い、爆発現象とその被害発生を科学的に取り扱うことを目指す。そして、数値解析技術により、現象再現の可能性を明らかにすることを目的とする。

4. 研究成果

施設内の配管は直管部が主であるが必ず曲がり部を有している。そしてそのことが配管内部における爆発発生時において多大なる圧力負荷をかけることとなり配管破断に陥り、施設に多大なる被害を及ぼすこととなる。本課題では、主に曲がり管に着目し、管内を伝播する衝撃波及びデトネーション波面の伝播特性と波面構造の解明を目指し、研究を推進した。

(1) 曲がり部を通過する衝撃波/爆轟波
曲がり部を通過する衝撃波/デトネーションの様子を観察するとともに、数値的再現によりその詳細過程について明らかにした。実験において、曲がり管内の曲がり部における衝撃波/デトネーションの伝播過程の実験的解明のため、任意曲率半径・管幅を設定で

きる曲がり管観測装置を設計・製作した。また、高速度カメラ（島津製作所 HPV-1）を新規購入し、シャドウグラフ光学系を用いて高空間時間分解能で、曲がり管内のデトネーションの伝播過程の可視化に成功した。デトネーションの曲がり部での回折、再開過程を可視化し、曲がり部の曲率が無限大から有限曲率へ変化した場合と、デトネーションの代表長さであるサイズが変化した場合の現象の分類を行った。

数値解析においては、1段階反応モデルを扱う解析コードを用いた曲がり管内の曲がり部における衝撃波/デトネーションの伝播過程の解析を行った。曲率半径やデトネーション中の三重点を変化させて、壁面にかかるピーク圧力及びインパルスの評価を行った。三重点の位置及び伝播方向によって曲がり部通過後の三重点の消失が観察されることが分かった。また、曲率が大きくなるほどピーク及びインパルスは減る傾向が示され、一定の値になることがしめされた。

(2) 曲がり部でのデトネーションの伝播挙動
事故発生時の被害がもっとも顕著に見られると思われる曲がり部でのデトネーション波の伝播挙動に焦点を当て、実験と数値解析の両面から現象の解明と被害予測を行った。実験によるアプローチとしては、曲がり部における管直径や曲率の違いによるデトネーション伝播の特徴について高速度ビデオによる非定常な波面の撮影を行い、世界で始めてその詳細構造を明らかにすることができた。その結果から、ある一定の曲率を下回ると伝播する曲がり部におけるデトネーション波面は、ほぼ一定の形状をしたまま伝播することが明らかとなった。これはデトネーション波が各波面位置において CJ 速度を維持したまま伝播するために波面を大きく歪めるという事実を示したものである。つまり、曲がり部においてデトネーション波は減衰することなく安定して伝播を続けており、管内におけるデトネーション発生時には、被害が広域に拡大することを予見している。

実験においては可視化技術について改良を重ねた後、波面に現れる三重点の振る舞いを記録が可能となり、その時間発展データを用いることでデトネーション波の伝播構造の詳細について明らかにした。実験で用いた条件としては、曲がり部を有する矩形管の幅を固定し、可燃性気体の初期圧力と曲がり部の曲率半径をパラメータとして数多くの実験を行った。実験的観察に基づき Curved Detonation の伝播特性と安定性を明らかにした。また、曲がり管を伝播するデトネーション波面の連続写真を用いた詳細解明に取り組み、図1に示すように波面に位置する三重点の軌跡やデトネーションの再着火現象

を実験的観察から明らかにした。また、混合気体条件によって特性長さが異なることで波面に現れる非定常機構が異なることについても明らかにした。また管内でのデトネーション発生の詳細についても可視化を行うことで特性について検討を行った。

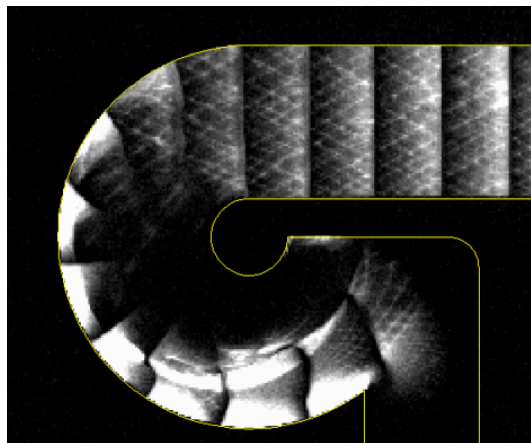


図1 曲がり管を伝播する爆轟波面（実験）

数値解析によるアプローチとして、管直径が小さい場合に生じる非定常な波面変化を捉え、局所的及び局時的な壁面への負荷の存在が明らかとなった。以上より、実験観察と数値解析の両面から曲がり部を伝播するデトネーション波の波面構造の詳細が解明された。

反応特性距離である半反応距離の150倍の管幅を持つ曲がり管でのデトネーションの伝播特性について、曲がり部における曲率半径と反応モデルとして用いた1段階反応モデルにおける活性化エネルギーをパラメータとして伝播特性を明らかにした(図2)。出現した燃焼波面の形態は5つに分類され、その特徴はこれまでに示されたことがないのであった。特に、デトネーション波面において外側管壁近傍では過駆動状態のデトネーションが維持され、それよりも内側での管内を伝播するデトネーション波面とは異なる伝播形態を持つことが明らかとなった。この傾向は2つのカテゴリーにおいて現れ、今後の詳細な検討が必要であることが示唆された。

数値解析結果に基づき、曲がり管を伝播するデトネーション波面について非定常解析データから非定常メカニズムの解明と発生条件の特定を行った。そして、直接起爆現象の数値解析結果を通して、球形に広がるデトネーション波面と曲がり管波面との関連について検討を行った。また、実現象への適用を目指して、不均一な予混合気体中でのデトネーションの伝播についても解析と検討を行い、安定性の指標を得た。

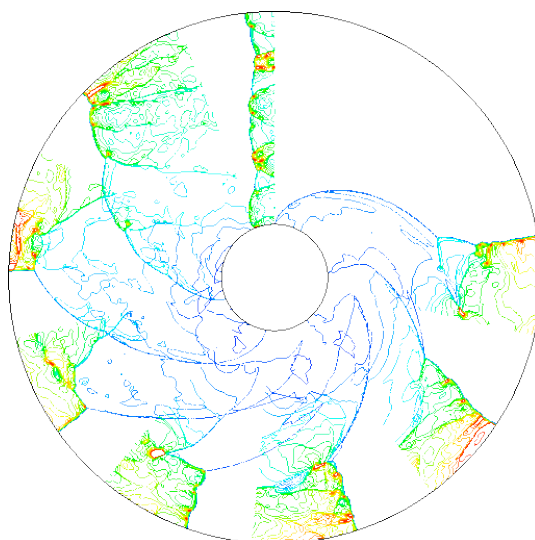


図2 曲がり管を伝播する爆轟波面（解析）

(3) 不均一な混合気体条件下における伝播状態の解明、直接着火過程の理解

本課題のこれまでの成果において、曲がり管内部を伝播するデトネーションの伝播過程に関して実験及び数値解析によって多くの知見を得ている。よって、これまでの成果の更なる発展を目指し、不均一な混合気体条件下における伝播状態の解明、直接着火過程の理解についても併せて行った。これらの内容については、実験と数値解析において条件を合わせることにより、現象の細部にわたる比較検討を行い、科学的に解明した。特に、実験的観察における画像撮影と波面伝播機構の解明については進展を得た。

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11件)

- ① Kudo, K., Nagura, Y., Kasahara, J., Sasamoto, Y., and Matsuo, A. "Oblique Detonation Waves Stabilized in Rectangular-Cross-Section Bent Tube s", Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol.33,2011, pp.2319-2326, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2010.08.008>
- ② Nakayama, H., Moriya, T., Kasahara, J., Matsuo, A., Sasamoto, Y., and Funaki, I. "Stable detonation wave propagation in rectangular-cross-section curved channels", Combustion and Flame, 査読有, Vol.159, 2011, pp.859-869, doi:10.1016/j.combustflame.2011.07.022

- ③ 那須野雄介, 松尾亜紀子, “圧縮性流体と多粒子系膜モデルを用いた膜物体の連成計算手法”, *ながれ*, 査読有, Vol.30, 2011, pp. 229-239
- ④ 那須野雄介, 松尾亜紀子, “不足膨張噴流による膜物体の大変形シミュレーション”, *ながれ*, 査読有, Vol.30, 2011, pp. 325-335
- ⑤ Sugiyama, Y., and Matsuo, A. “On the Characteristics of Two-dimensional Double Cellular Detonations with Two Successive Reactions Model”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol.33, 2011, pp.2227-2233
- ⑥ Yageta, J., Shimada, S., Matsuo, K., Kasahara, J., and Matsuo, A., “Combustion Wave Propagation and Detonation Initiation in the Vicinity of Closed-Tube End Walls”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol.33, 2011, pp.2303-2310
- ⑦ Kudo, K., Nagura, Y., Kasahara, J., Sasamoto, Y., and Matsuo, A., “Oblique Detonation Waves Stabilized in Rectangular-Cross-Section Bent Tubes”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol.33, 2011, pp.2319-2326
- ⑧ Maeda, S., Kasahara, J., Matsuo, A., and Endo, T., “Analysis on Thermal Efficiency of Non-Compressor Type Pulse Detonation Turbine Engines”, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 査読有, Vol.53, No.181, 2010, pp.192-206,
- ⑨ Sugiyama, Y., and Matsuo, A., “Numerical Investigation on Propagation Mechanism of Spinning Detonation in a Circular Tube”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol. 32, 2009, pp.2331-2337
- ⑩ Kasahara, J., Hirano M., Matsuo, A., Daimon, Y., and Endo, T., “Thrust Measurement of a Multi-Cycle Partially Filled Pulse Detonation Rocket Engine”, *Journal of Propulsion and Power*, 査読有, Vol.25, No.6, 2009, pp.1281-1290
- ⑪ 山口 敬之, 松岡 健, 八桁 純, 笠原 次郎, “パルスデトネーションエンジン用入口流体駆動バルブに関する研究”, *日本航空宇宙学会論文集*, 査読有, 第57巻, 第663号, 2009, pp.141-147
- ⑫ 中山久広, “環状矩形流路におけるデトネーション波の安定伝播”, 第51回航空原動機宇宙推進講演会, 2011年3月4日, 広島YMCAホール
- ⑬ Miura, H., “Numerical Investigation for Pressure Mitigation Effects of Dike on Blast Wave”, *8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 2010年9月9日, 慶應大学(横浜)
- ⑭ Sasamoto, Y., “Numerical Analysis of Detonation Waves Structure in Bend Tube”, *8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 2010年9月7日, 慶應大学(横浜)
- ⑮ Sugiyama, Y., “Theoretical and Numerical Investigations on the Detonation Limit in a Circular Tube”, *8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 2010年9月6日, 慶應大学(横浜)
- ⑯ Sugiyama, Y., “On the Characteristics of Two-dimensional Double Cellular Detonations with Two Successive Reactions Model”, *The 33rd International Symposium on Combustion*, 2010年8月2日, Tsinghua University(北京)
- ⑰ 笹本裕也, “曲がり部を有する矩形管内におけるデトネーションの数値解析”, 平成23年度衝撃波シンポジウム, 2012年3月8日, 東京大学柏キャンパス
- ⑱ Nakayama, H., “Front Shock Behavior of Stable Detonation Waves Propagating Through Rectangular Cross-section Curved Channels”, *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012年1月10日, Gaylord Opryland Convention Center
- ⑲ Nakayama, H., “Study on Detonation Waves Propagating through Curved Channels”, *2011 International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 2011年7月28日, University of California
- ⑳ Sasamoto, Y., “Wave Front Structure of Curved Detonation in Bend Tube”, *13th International Conference on Numerical Combustion*, 2011年4月28日, Aquis Corfu Holiday Palace Hotel(米)
- ㉑ 杉山勇太, “曲管を伝播するデトネーションの波面形状へ管の曲率が及ぼす影響に関する数値解析”, 平成23年度衝撃波シンポジウム, 2012年3月8日, 東京大学柏キャンパス

[学会発表] (計 14 件)

- ① 杉山勇太, “曲管を伝播するデトネーション

第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 2 日, 札幌コンベンションセンター (北海道)

- ⑪ 笹本裕也, “直角曲がり管内を伝播するデトネーションが管に与える影響”, 安全工学シンポジウム 2009 講演予稿集, 2009 年 7 月 9 日, 機械振興会館 (東京)
- ⑫ Sugiyama, Y., “Numerical Investigations of Spinning Detonations in a Circular Tube by One-step Reaction Model”, 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2009 年 7 月 27 日, Oktyabrskay Square Centre (Minsk, Belarus)
- ⑬ 笹本裕也, “曲がり部を有する矩形管内におけるデトネーションの数値解析”, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 2 日, 札幌コンベンションセンター (北海道)
- ⑭ 笹本裕也, “直角曲がり管内を伝播するデトネーションが管に与える影響”, 安全工学シンポジウム 2009 講演予稿集, 2009 年 7 月 9 日, 機械振興会館 (東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 亜紀子 (MATSUO AKIKO)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 70276418

(2) 研究分担者

笠原 次郎 (KASAHARA JIRO)
筑波大学・システム情報工学研究科
・准教授
研究者番号: 60312435

三浦 啓晶 (MIURA HIROAKI)
慶應義塾大学・理工学部・助教
研究者番号: 30513296

(3) 連携研究者

該当なし