

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 24 年 6 月 13 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560188

研究課題名（和文） 高次精度適合格子法による爆熱爆轟遷移現象の数値解析

研究課題名（英文） Numerical Study on Deflagration-to-Detonation Transition using an AMR Technique

研究代表者

小川 隆申 (OGAWA TAKANOBU)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：50338571

研究成果の概要（和文）：解適合格子に基づく反応流体解析手法を開発し，爆燃爆轟遷移 (DDT) 現象を数値的に解析した．それにより，空間内に置かれた障害物の配置や形状が火炎伝播から DDT に至るまでに与える影響について調べた．特に，自由空間に障害物がある場合の DDT 現象を再現し，火炎伝播がその伝播方向によって速度や加速が異なること，DDT が特定の方向で早く発生することを明らかにした．

研究成果の概要（英文）：Deflagration-to-Detonation Transition is numerically studied by using an AMR mesh method. We simulate flame acceleration and its transition to detonation in an open space with obstacles. The result shows that the flame speed and acceleration depend on the direction of flame propagation. The flame speed delays in the directions where the flow loses more momentum. In these directions, however, the flame quickly accelerates due to more shock-flame interactions, which also trigger DDT.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・数値流体力学

キーワード：流体，流体工学，数値流体力学，衝撃波，反応流

1. 研究開始当初の背景

非常に強い衝撃波を伴った燃焼現象である爆轟は，偶発的に発生した場合，甚大な被害をもたらすため，その発生を抑制あるいは制御することは工学的に非常に重要である．その発生過程の一つに爆燃爆轟遷移現象 (Deflagration-to-Detonation Transition, 以下，DDT) と呼ばれる現象がある．これは緩やかな燃焼形態である爆燃から衝撃波を伴った激しい燃焼形態である爆轟への遷移過程であり，その基本的なメカニズムは次のように説明されている．まず，火炎が衝撃波，

乱流，境界層などと干渉することによって流れ場の中に Hot spot と呼ばれる反応誘起時間の空間的勾配が生じる．すると，最も反応誘導時間の短い点を中心に反応が始まり，反応誘導時間の勾配に沿って燃焼波が広がり，同時に圧力波が発生する．この圧力波は燃焼によって強められて衝撃波となり，Hot spot が十分に大きければ，最終的に爆轟に至る．

過去に障害物と火炎との干渉による DDT 現象について数多くの研究が実験を中心に行われてきた．その多くはチャンネル内に障害物を規則的に配置し，その中を伝播する火炎が

加速して DDT に至るといものである。このとき、障害物の形状や配置が DDT に大きく影響することがわかっている。

ただし、実際に事故の起こりうる状況では空間的に広がりがあるため、チャンネル内のように一方向だけに伝播するわけではない。空間的に広がりながら火炎や衝撃波が伝播する場合の DDT については、そのような状況を実験で再現したり測定したりすることは大きな困難を伴うこともあって系統的な研究が行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、DDT に与える障害物の影響を数値的に解析する。特に従来ほとんど研究事例のなかった空間的に広がりのある場における DDT 現象を数値的に再現し、その発生メカニズムについて明らかにする。また、そのために不可欠となる任意形状に対応した適合格子法による解析プログラムも開発する。

3. 研究の方法

DDT 自体は非常に短い時間スケールの現象で、しかも、その発生場所を事前には知ることが難しいため、実験より数値解析が有効な手段となる。ただし、DDT 現象を数値的に再現するためには数値解析手法にも様々な要件がある。DDT を捉えるには火炎面あるいは爆轟波を 10^{-5} m 程度の空間解像度で解像する必要がある一方、計算領域全体は $0(1)$ m 程度の大きさとなるため、大きく異なる空間スケールを扱わねばならない。そのため、高い空間解像度が必要となるところで計算格子を動的に分割する解適合格子法 (図 1) が非常に有効になる。

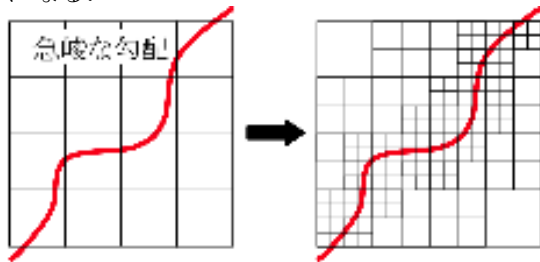


図 1 : 解適合格子

また、障害物形状の影響を調べるためには任意形状を扱う必要がある。上記のような直交格子に基づく解適合格子法では多くの場合、格子線に沿う物体壁面しか取り扱うことができなかった。そこで Embedded boundary method を用いることで任意の壁面形状を解析で取り扱えるようにする。その上で様々な障害物の形状と配置でパラメータスタディを行う。

4. 研究成果

DDT について調べる前にまず爆轟そのものが障害物付きチャンネル内を伝播する解析を行った。その結果、障害物の影響によって爆轟

波が回折によって消滅するような条件であっても、障害物間隔を狭めてゆくと爆轟が消滅しないだけでなく、爆轟波の背後に二次的な衝撃波が爆轟波と同じ速度で伝播することが見出された。この二次的な衝撃波の発生メカニズムが障害物間で発生する爆轟によって既燃気体内に放射される衝撃波 (retonation) であることを示した。その考えを基に、先行する爆轟波と二次衝撃波との間隔を予測する式を導出し、予測結果が妥当であることを数値解析結果から検証した。(学会発表2)

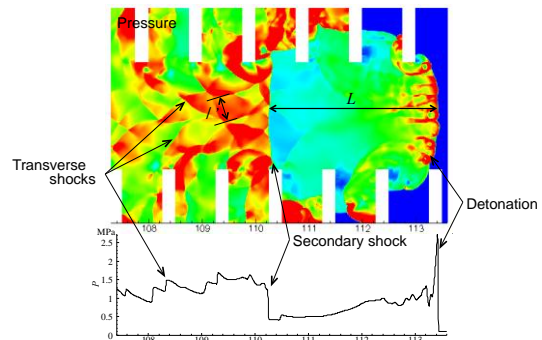


図 2 : 密な障害物付きチャンネルにおける爆轟背後の衝撃波

次に、図 3 に示すように 2 次元空間内に矩形障害物を格子状に配置し、そこに未燃気体を充填させ、初期に一部を着火して火炎が円筒状に伝播する様子を数値的に解析した。

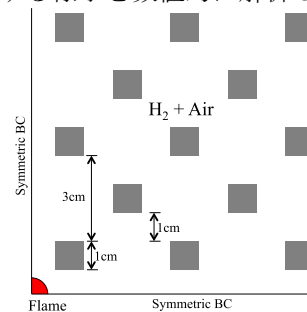


図 3 : 矩形障害物群内における DDT 解析

当初、この条件では火炎が等方的に円筒状に広がってゆくものと想像していたが、実際には伝播する方向によって火炎伝播速度が異なり、その結果、図 4 のように火炎面のフロントが円形ではなく凹型を組み合わせた形状になることが見出された。

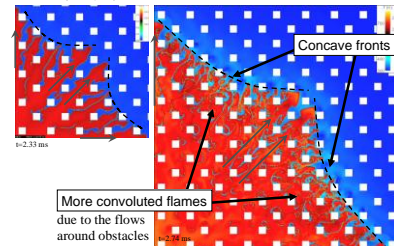


図 4 : 矩形障害物群中を伝播する火炎更にこの原因が障害物配置によって運動量損失が火炎伝播方向あるいは流速方向に大きく

依存するためであることも明らかになった。また、運動量損失が大きい方向では同時に圧力変動も大きくなり、先行衝撃波が形成された後は逆にこの方向で火災が急激に加速し、図5に示すように最終的に最も早くDDTが生じることもわかった。(雑誌論文1, 学会発表1, 3)

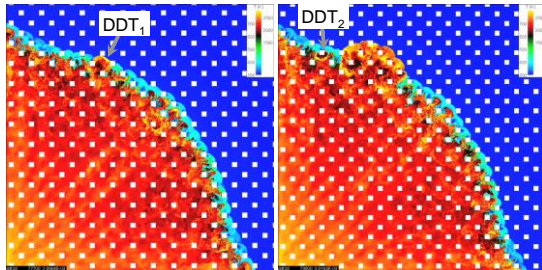


図5：矩形障害物群内におけるDDT

上記の結果から、障害物配置と形状が爆燃および爆轟に大きく影響を与えることがわかったため、当初計画していた乱流混合によるDDT解析の計画を一部変更し、これまで用いていた流体解析プログラムにEmbedded boundary法を導入することによって任意形状の壁面を掲載で再現できるようにした。これにより、任意形状の障害物の任意の配置でのDDT解析が可能となった。任意形状を有する解析例を図6に示す。適合直交格子により円柱を過ぎる衝撃波を擬似的な波の発生を生じることなく捉えていることがわかる。(学会発表4, 5, 6, 8)

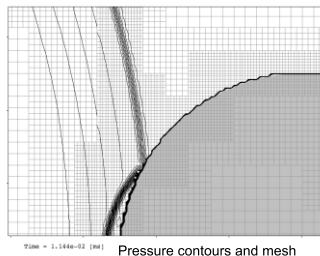


図6：Embedded boundary法による解析例
(円柱を過ぎる衝撃波と格子分布)

解析手法に関する研究としては更に、これまで様々なDDT解析に用いられてきた総括一段化学反応モデルの検証を行った。DDTにおいては、様々な強さの衝撃波背後で燃焼が起こる。そこで、図7に示すように、衝撃波の強さをパラメータとして層流火炎速度と年商遅延時間を実験結果および詳細反応モデルの結果と比較した。図からわかるように、簡易なモデルであってもDDTを再現するのに必要な燃焼現象の特性を再現できていることがわかる。(雑誌論文1)

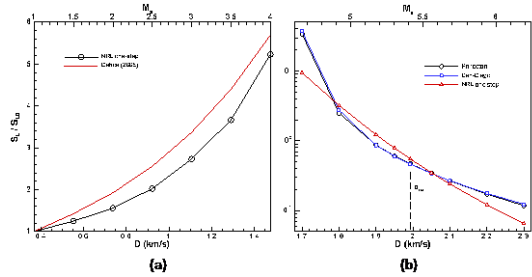


図7：様々な強さの衝撃波背後における層流火炎速度(a)と火炎遅延時間(b)

次に、開発した任意形状を取り扱える解析プログラムを用い、火炎伝播やDDT発生に与える迎角の影響を排除すべく、円柱群内におけるDDT解析を行った。その結果、方向によって火炎加速に違いが生じる点、火炎加速が遅い方向で爆轟遷移が生じる点(図8)など矩形による解析結果と共通した現象が確認できた。(雑誌論文2, 学会論文7)

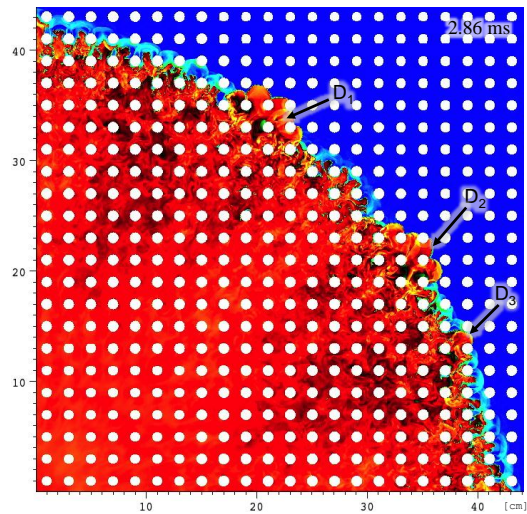


図8：円柱群内におけるDDT

更に、円柱群への角度が火炎伝播およびDDTに与える影響をより明確にするため、図9のような状況でDDT解析を行った。すなわち、規則的に配置した円柱群をチャンネル内にある角度で傾けて設置し、そこに初期に平面である火炎を伝播させる。図8のように円筒状に広がる条件では円柱群に対する角度の影響が相互に干渉するのに対し、図9ではその干渉を排除して現象を観察できる。なお、上下端の境界は周期境界条件を設定することにより、有限な計算領域で解析を実行できるようにした。

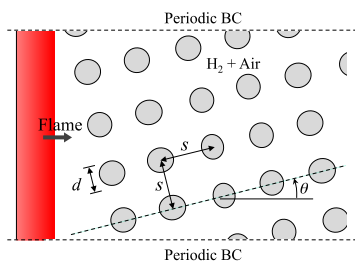


図9：円柱群内におけるDDT解析の条件設定
(火炎面が初期に平面の場合)

解析結果を図10に示す. 本解析においては円柱の大きさや間隔は同一であるにもかかわらず, 円柱群を傾ける角度によって火炎加速が大きく影響を受けることが示された. また, その主な原因が角度の変化に伴う流速場の変化によって火炎表面積の伸張が異なってくるためであることも明らかになった. また, 先行衝撃波が形成された後, いずれの角度の場合も局所的な爆発が生じるのであるが, 角度0度の場合には図10のようにDDTが生じることなくChoking regimeと呼ばれる状態になるのに対し, それ以外の角度では局所的な爆発によってDDTが生じることも明らかになった. (雑誌論文2)

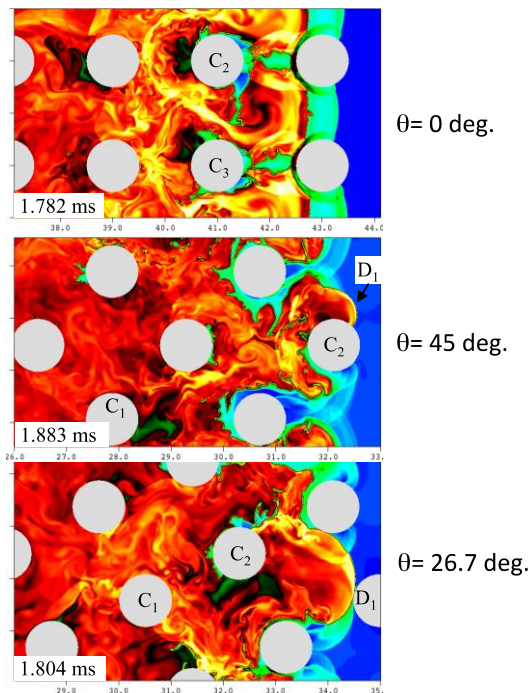


図10：円柱群内における火炎伝播およびDDT

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2件, うち1件査読中)

1. T. Ogawa, V. N. Gamezo, and E. S. Oran, "Numerical study on flame acceleration and

DDT in an inclined array of cylinders using an AMR technique," submitted to Computers and Fluids, 2012

2. T. Ogawa, V. N. Gamezo, and E. S. Oran, "Flame Acceleration and Transition to Detonation in an Array of Square Obstacles," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 10.1016/j.jlp.2011.12.009, 2011.

[学会発表] (計8件)

1. 小川隆申, 「AMRとEmbedded boundary法を用いた爆燃爆轟遷移解析」, 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011.
2. T. Ogawa, V. N. Gamezo, and E. S. Oran, "Flame Acceleration and Transition to Detonation in an Array of Cylinders," 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2011.
3. 小川隆申, 佐藤 崇, 「円柱群内における二次元爆燃爆轟遷移解析」, 第16回計算工学講演会, 第16回計算工学講演会, 2011.
4. 北川慧太, 小川隆申, 「EBChomboを用いた物体まわりの非圧縮性流れ解析」, 第16回計算工学講演会, 第16回計算工学講演会, 2011.
5. 荒木晴信, 小川隆申, 「障害物付きチャンネル内爆燃爆轟遷移現象の解適合直交格子による並列解析」, 第15回計算工学講演会, 2010.
6. T. Ogawa, V. N. Gamezo, E. S. Oran, "Flame Acceleration and Transition to Detonation in an Array of Square Obstacles," Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 2010.
7. T. Ogawa, V. N. Gamezo, E. S. Oran, "Detonations in Densely Obstructed Channels," 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2009.
8. V. N. Gamezo, T. Ogawa, E. S. Oran, "Deflagration-to-Detonation Transition in Obstructed Spaces," 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 隆申 (OGAWA TAKANOBU)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：50338571