

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04306

研究課題名(和文)パルスパワーによるニトロメタンの反応制御とコンクリートの動的破壊

研究課題名(英文) Simultaneous initiation of nitromethane in two holes by pulsed wire discharge for crack control of a concrete block

研究代表者

田中 茂 (Tanaka, Shigeru)

熊本大学・産業ナノマテリアル研究所・助教

研究者番号：70505859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：金属細線を介したニトロメタン(NM)の電気加熱により、NMの爆発反応の制御と複数のNM装薬の同時斉発を達成する技術を開発した。この技術を、コンクリート供試体の破壊に応用し、モデル実験では任意の形状に分割できることを確認した。破壊の数値シミュレーションでは、モデル実験の最終破壊形状を再現する結果が得られた。さらに、装薬孔から発生した応力波の干渉により予定破断面に沿った引張応力場が生成されていることを明らかにした。NMの爆燃反応は、軽金属線の酸化反応熱がきっかけになっており、金属細線の元素種と線径の調整により、より少ない電気エネルギーで起爆できることも明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニトロメタン(NM)は、火薬類取締法の制限を受けない液体の可燃物であるが、点火エネルギーによっては、爆発的な燃焼反応を開始する。本研究では、金属細線を介してNMを急速加熱し、直ちに爆燃反応を開始する条件を明らかにした。制御されたNMの爆燃反応をコンクリート供試体の破壊に応用し、それを任意の形状に分割する技術を開発した。本研究は、倒壊したコンクリート構造物に人命救助ルートを迅速に開く技術へ発展可能性を有している。

研究成果の概要(英文)：The technique to control the explosion reaction of nitromethane (NM) and to achieve the simultaneous initiation of several NM charges was developed by using the method of electric heating of NM through the metal thin wire. This technique was applied to the fracture of a concrete specimen, and the model experiment confirmed that the specimen could be split into arbitrary shapes. The numerical simulation of the fracture reproduced the final fracture shape of the model experiment. Furthermore, the numerical analysis revealed that the interference of stress waves generated from the loading hole generated the tensile stress field along the planned fracture surface. The deflagration reaction of NM is triggered by the heat of oxidation reaction of the light metal wire, and by adjusting the element and wire diameter of the metal thin wire, less electric energy is required to achieve the initiation of NM.

研究分野：爆発加工

キーワード：コンクリート 動的破壊 ニトロメタン 爆燃 金属細線爆発 パルス細線放電

### 1. 研究開始当初の背景

災害が多い我が国において、倒壊したコンクリート構造物から、被災者救出ルートを迅速に作る技術開発が求められている。ニトロメタン (NM) の爆燃 (爆発的な燃焼) 現象を利用した放電インパルス破碎システム (EDICS) は、そのようなルートを作るための一つの方法である。EDICS では、金属細線爆発を用いて NM を起爆 (爆燃反応) している。そこでは、細い金属線を電気エネルギーで加熱し、それが蒸発する際に発生する衝撃波によって NM は加圧される。しかしながら、NM の起爆が熱的要因によるものなのか、圧力的要因によるものなのかは不明であった。また、NM の起爆に必要な電気エネルギーも不明であった。先行研究では、NM の爆燃によるコンクリートの破壊について、モデル実験と数値解析を行っているものがある。その数値解析は、NM が同時起爆するという前提条件で実施されたもので、応力波が装薬孔間で干渉する。亀裂の生成と破断面の形成過程は、応力波の干渉により、装薬孔間の中間領域の上下に圧縮応力帯が形成され、装薬孔から伸びるクラックが圧縮応力帯を避けて進行し、別の装薬孔から発生したクラックと連結することにより、装薬孔間に破断面ができると結論づけられていた。しかしながら、EDICS では、各装薬の起爆に遅延が生じるはずである。EDICS による各 NM 装薬の起爆遅延とコンクリートの音速を考慮すると、コンクリート破壊のための応力波の干渉現象には疑問がある。起爆遅延があれば、同時起爆の場合とは異なる応力波の干渉が起こるはずである。

### 2. 研究の目的

被災者が残る場面で、コンクリート構造物を爆薬等の高エネルギー物質を用いて爆砕することはできない。本研究の目的は、可能な限り少ないエネルギーでコンクリートを任意の形状に分割することである。具体的には、NM の爆燃反応を達成する電気エネルギー条件を求め、かつ応力波の干渉効果による亀裂の方向制御を実現する。

### 3. 研究の方法

- [1] 金属細線を介した NM の瞬間電気加熱実験を実施した。そこでは、NM 装薬×2 の起爆状況について、高速度ビデオカメラを用いた可視化計測を実施した。
- [2] コンクリート供試体を任意の形状に破壊するために、モデル実験を実施した。
- [3] 破壊現象の再現と破壊メカニズムを明らかにするために数値解析を実施した。
- [4] NM 爆燃反応のメカニズムを明らかにするために、加熱中の NM の反応挙動について、高速度ビデオカメラを用いて可視化した。

### 4. 研究成果

- [1] Fig. 1 には、二つの NM 装薬 (左右の発光円) の爆発状況を示す。発光は、NM の爆発反応により生成した爆発ガスの膨張過程を示し、金属細線を介した瞬間加熱により同時に爆発反応を開始している状況が確認された。なお、発光の膨張速度から、NM の反応形態は爆燃反応であることも確認された。

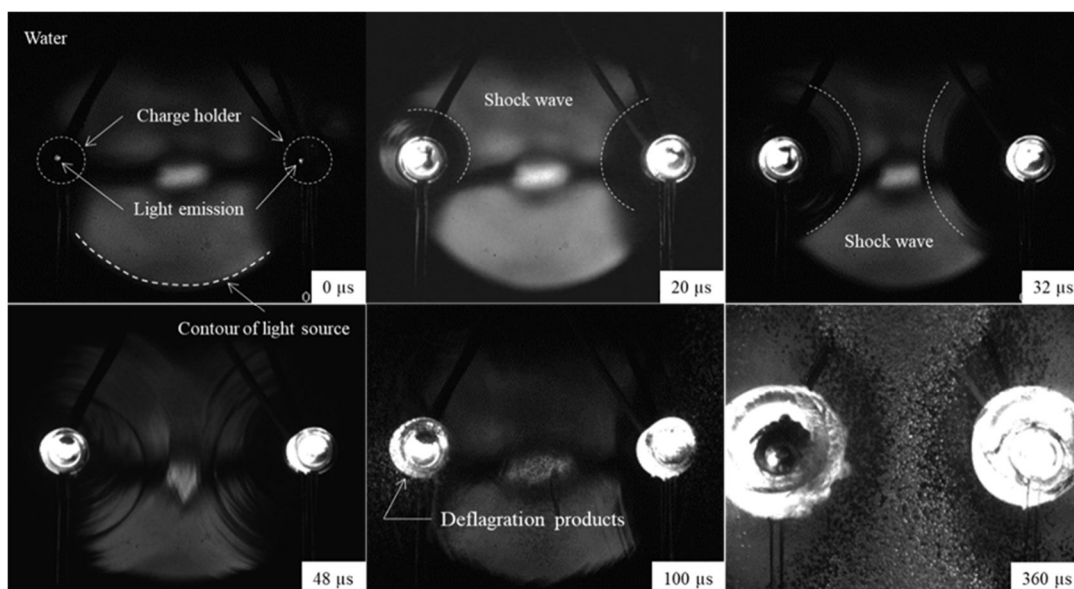


Fig. 1 Simultaneous initiation of NM and following phenomena with the electric explosion of wire.

- [2] Fig. 2 は、NM 装薬の同時起爆によって任意形状に分割されたコンクリート供試体

(500×500×80 mm)の最終破壊形状である。二つの孔は装薬孔であり、装薬孔間(予定破断面)に破断面が形成された。

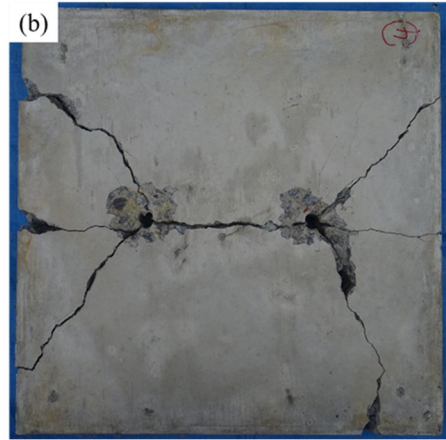


Fig. 2 Fractured concrete test-specimen.

- [3] Fig. 3 は、市販の解析ソフト Autodyn を用いて実施した数値解析結果である。(a)(b)は、装薬孔から発生した応力波の干渉を、(c)~(h)は、亀裂の生成と進展過程が示されている。解析にはひずみ速度効果を考慮した材料モデルが採用されている。応力波の干渉地点に引張応力場が現れ(b)、同時刻に亀裂が生成している(d)。多くの亀裂(赤ライン)が生じているが、破断面とならないマイクロクラックとみなされた。マイクロクラックが予定破断面に集中し(g)、モデル実験と同様な破断面が形成された(h)。この結果は、モデル実験の最終破壊形状と一致しており、先行研究とは異なる破壊メカニズムであることが確認された。

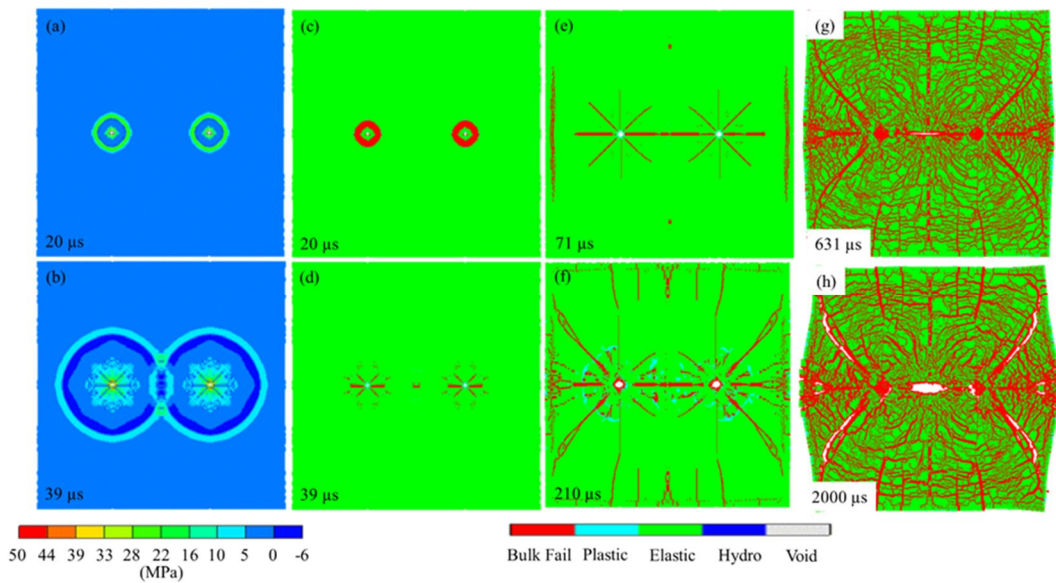


Fig. 3 Stress propagation and fracture process obtained by numerical analysis.

- [4] Fig.4 は、NM 中に配置された金属細線にパルス電流を印加した際の NM の爆発反応過程である。金属細線の二か所にキンクが設けられた。キンク部は電気抵抗が増加しており、電流密度が上昇する。放電開始から 12 $\mu$ s 後の画像では、キンク部の蒸発と、蒸発箇所を起点に起爆することが確認された。二か所のキンク部以外の金属線は溶融状態にあり、NM の爆発反応の開始は、蒸発箇所よりも遅れることが確認された。40 $\mu$ s の時点では、電気エネルギーの注入が終了していることが、可視化実験と同期して行われた電流・電圧計測によりわかっている。系へのエネルギー投入がないにもかかわらず、蒸発部は強い光を放出し続けたことから、金属線の酸化反応が持続することが確認された。蒸発熱の低い軽金属線とその線径を小さくすることにより、金属線はより小さな電気エネルギーで蒸発し NM の爆燃反応を誘起することが、金属線種と線径を変化した実験により確認された。金属線の蒸発に伴う酸化反応熱が、NM の急速励起を実現するものと結論付けられた。

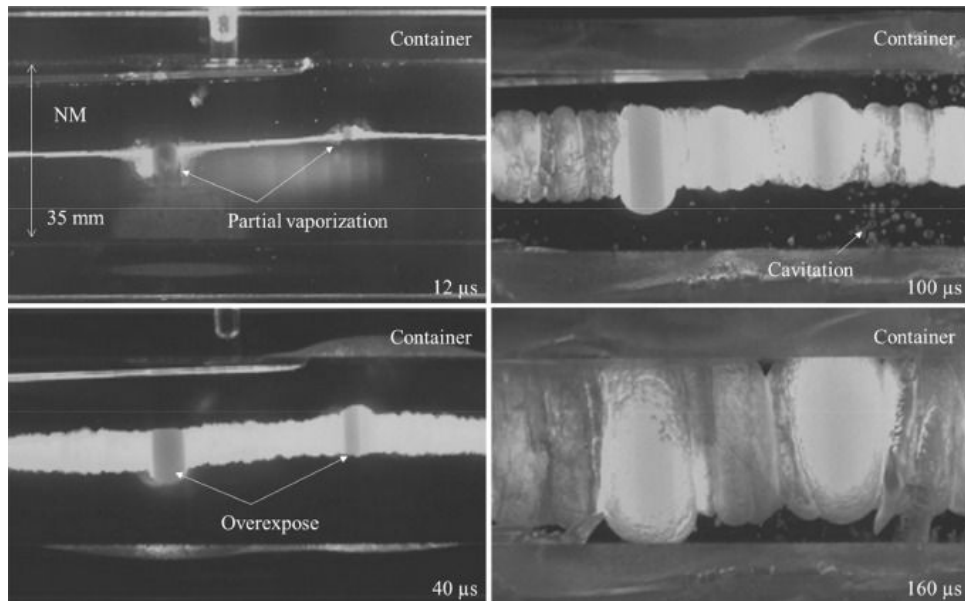


Fig. 4 NM undergoing deflagration reaction via partial vaporization of Al. Note the increased emission intensity of NM owing to oxidation.

NM の爆燃現象を応用した従来の放電破碎技術は、タングステン線を介して NM の加熱を行うものであった。タングステンは熱容量、溶解熱、蒸発熱が他の元素よりも大きく、NM を爆燃に至らせるために比較的大きな電力を必要としていた。そのため、コンデンサが主となる装置電源部の重量が 300kg と大きく、災害復旧現場へのアクセスを妨げる要因となる恐れがあった。本研究は、軽金属線の蒸発に伴う酸化反応熱を NM の爆燃反応の起点に利用し、従来技術よりも低い電気エネルギーで NM 起爆を達成するものである。さらに、複数の NM 装薬の同時起爆により破断面制御も可能にする技術開発を行ったものである。

#### 引用文献

- Fukuda T, Das Adhikary S, Fujikake K, et al (2018) Feasibility study on application of controlled electrical discharge impulse crushing system to lifesaving operations in earthquake disasters. *Pract Period Struct Des Constr*.
- Fukuda D, Moriya K, Kaneko K, et al (2013) Numerical simulation of the fracture process in concrete resulting from deflagration phenomena. *Int J Fract*. <https://doi.org/10.1007/s10704-013-9809-4>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shigeru Tanaka, Masatoshi Nishi, Makoto Yamaguchi, Ivan Bataev, Kazuyuki Hokamoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Simultaneous Initiation of Nitromethane in Two Holes by Pulsed Wire Discharge for Crack Control of a Concrete Block	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Dynamic Behavior of Materials volume	6. 最初と最後の頁 53-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40870-019-00227-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Shigeru, Bataev Ivan, Inao Daisuke, Hokamoto Kazuyuki	4. 巻 1-4
2. 論文標題 Initiation of nitromethane deflagration promoted by the oxidation reaction of vaporized metal wire	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applications in Energy and Combustion Science	6. 最初と最後の頁 100005 ~ 100005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jaecs.2020.100005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田中 茂
2. 発表標題 Simultaneous initiation of nitromethane in two holes by pulsed wire discharge for crack control of a concrete block
3. 学会等名 sixth international symposium on explosion, shock wave and high-strain-rate phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 信  (Yamaguchi Makoto)  (80570746)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・助教    (17401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	Novosibirsk state technical university			