

## 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 3 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560079

研究課題名（和文） 機械構造要素の爆発破壊機構と機能保全構造に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Explosively Driven Fracture Mechanism and Function Sustainable Structures for Machine Structural Components

研究代表者

廣江 哲幸（HIROE TETSUYUKI）

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：90218826

研究成果の概要（和文）：

独自の爆薬起爆技術を応用し、鉄鋼、軽合金製の構造要素：円筒、球、円環を一様・軸対象に膨張・分裂破壊させ、また平板要素については衝撃波反転で剥離破壊させ、更に円筒壁の2重化と、平板の表面切欠加工によって分裂・剥離の破壊防止条件について評価・検討した。その結果、構造要素の分裂挙動はエネルギーモデルで、破片飛散防止設計は平板貫通実験式で評価でき、切欠付平板では数値解析援用の剥離破壊防止形状図の提案をした。

研究成果の概要（英文）：

Explosive loads are applied to uniformly expand symmetrical structural components s: tubular cylinders, spherical shells and rings of a steel and light alloys to fragmentation and transfer planar shock waves into plates to spallation with unique explosive initiation techniques, and in addition damage reduction measures: wall doubling of cylinders and notch machining effects on the free surfaces of the plates are evaluated experimentally and numerically. As the results, applicability of a fragmentation model and a penetration model to the fracture of components and the shatterproof of wall doubling cylinders are confirmed, and a spall damage evaluation chart are suggested for damage reduction of plates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：破壊

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外動向：容器の爆発破片形成に関する研究は、国内外ともほとんど円筒を対象とし、端部からの雷管点起爆によって爆発され、破片の大きさ・質量を統計的に整理・検討する研究が主体となっている。またスペースデ

ブリ等を考慮した研究では弾丸衝突による平板の飛散に関する実験が行われて同様な破片処理がなされており、円筒の分裂モデルの開発や円板のスポール破壊に関する研究は米国の Grady, D. M. Goto, W. D. Reinhardt, 他 Los Alamos Nat' l labs グループ等で盛

んに研究されているが、本研究報告者のように衝撃大電流による細線爆発を利用した正確な対称膨張変形を実現しての爆発分裂破壊や平行細線列爆発を利用した平面爆轟波の入射によるスポール破壊研究例はなく、米国応用物理学会・凝縮体衝撃圧縮会議 (APS-SCCM) や超高速衝突学会 (HVIS) 等の学会発表で申請者の研究は評価・注目を得てきたと考えている。

(2) 着想に至った経緯: 円筒の爆発エネルギーと膨張速度の関係は近似的には Gurney 式があり、また、これまでの申請者の研究から、破片幅  $S$ 、破壊時のひずみ速度  $\dot{\epsilon}$ 、素材密度  $\rho$  と素材の分裂エネルギー  $\Gamma$  (降伏応力と破断ひずみの積に近い) の間には Grady の式に修正係数  $\alpha$  (切欠、材質変化要因等の導入係数) を乗じた関係がほぼ成立することが分かった。しかし分裂モデルの実用化のためには、実際の容器の基本構造要素であり、応力・ひずみの多軸性が異なる球殻、円環 (容器補強リング) について膨張・分裂挙動を把握し、拡張モデルを導出することが必要であり、さらに機能保全構造の開発に発展・応用することが有用と考えた。円板の剥離破壊についても、円板側面を傾斜させた予備実験を行うことで、破壊原因である表面反射波の制御を可能とする構造が存在するとの着想を得た。予備実験で実施した円錐台底面から入射させた衝撃波による剥離破壊実験結果から自由表面に平行な剥離が側面傾斜で緩和され、中心部の軽微な損傷に変化した。これから表面に突起構造を形成することによる剥離防止の着想を得た。

## 2. 研究の目的

(1) 円筒のこれまでの爆発分裂研究に合わせ、主として SUS304 材で製作した球殻と円環を対象として PETM 爆薬を用いた爆発分裂破壊実験を行い、変形計測と回収破片形状調査から応力・ひずみの多軸性を考慮した円筒、球殻、円環の統一的超高速分裂モデル構築について検討する。

(2) 円板の爆轟波入射面の反対側の面を複数の傾斜面で形成されるような突起構造とした平板 (素材: SUS304、A2024) を対象とし、PTEN からの入射衝撃波の突起状自由表面での反射による剥離 (スポール) 破壊防止条件を実験と数値解析により把握する。

(3) (1), (2) を応用した機能保全構造の開発として爆発分裂に対する構造としては2重壁円筒を、平板の剥離破壊に対しては衝撃透過面の反射面の突起構造化を提案し、実験・解析により有効性を確認する。

## 3. 研究の方法

(1) 銅細線の一斉爆発を利用した SUS304 製構造要素の一樣爆発膨張・破断と平板のスポール剥離破壊はこれまでの技術を応用する。

円環については円筒爆発を利用する方法と円環集合体を直接爆発破壊させる方法、さらに分離設置した円環を直接爆発する3種を用いる。

(2) 円筒壁2重化による破片の飛散防止は SUS304 と A5052 について焼量を変えて実験を行い得られた飛散防止条件から評価手法を提案する。

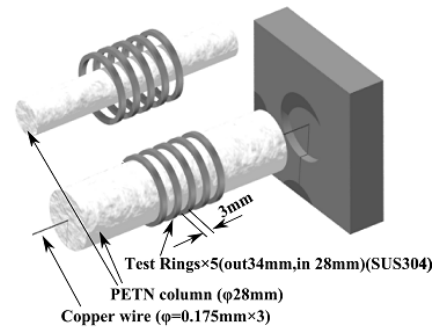
(3) SUS304 と A2024 製平板の自由表面に高さやピッチを変えた V ノッチ列の切欠加工を施しスポール実験を行い、破損防止形状を把握するとともに、数値解析のみによる防止構造設計の信頼性についても検討する。

## 4. 研究成果

(1) 機械構造要素の爆発分裂破壊機構の解明

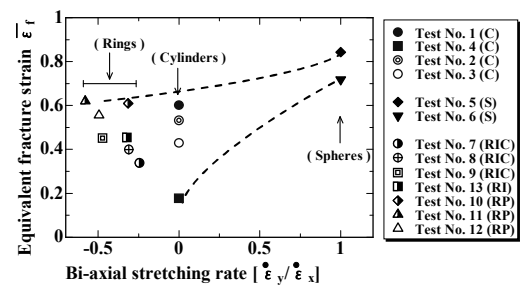
① 実験装置の開発/円筒、球、円環の3要素を PETN 爆薬の銅細線爆発利用起爆技術を用いて超高速一樣膨張・分裂破壊させる装置を開発した。円筒は中心軸、球は中心点、で正確に起爆でき、円環は3種類の手法を用いた。

(1例下図)



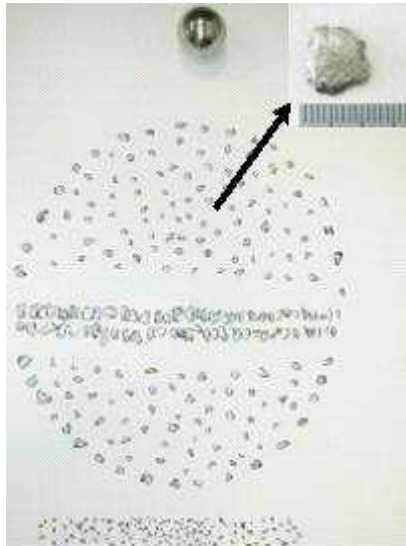
② 基本要素の破断延性を把握

膨張変形の多軸性と相当破断延性の関係を各基本3要素で得た。(下図)

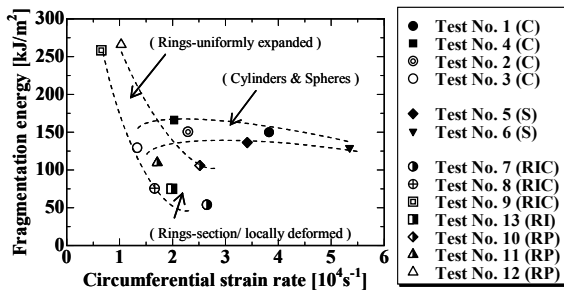


静的破壊とは異なる特性を示すことが判った。また上図で、円環は試験法の影響を内包していると考えられる。

③ 破片回収と基本要素の分裂モデル適応性  
破片回収爆発実験では回収チャンバー内の破片を大略 80-95%の回収率で回収した。(1例下図)



円筒対象のGradyの分裂モデルを拡張適用した結果、円筒、球については有効であることが判明したが、円環は断面変形の影響が大きく今後の課題となった。(下図)

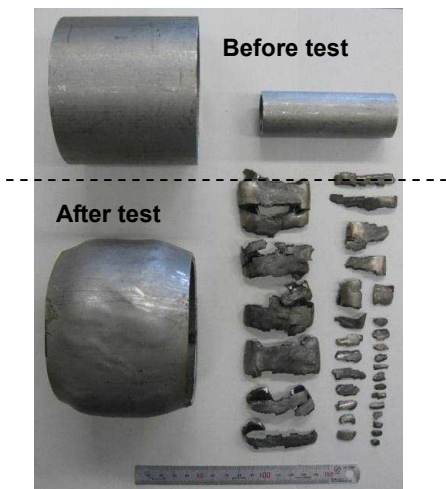


(2) 円筒壁 2重化による機能保全 (分裂破片の飛散対策)

① 実験装置の開発 (A5052&SUS304 円筒)

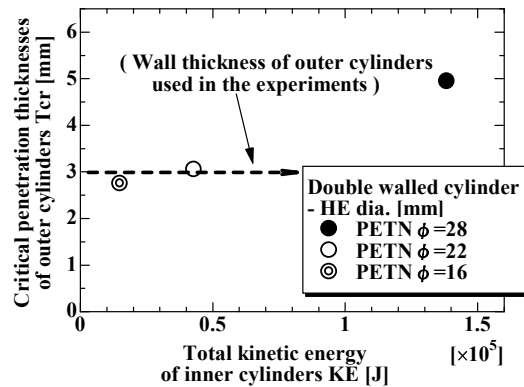
② 飛散防止実験結果

内円筒の薬量を変化させた実験で飛散防止を実現できた。(1例下図)



③ 飛散防止限界評価法の提案

実験結果の解析から破片貫通モデルの有効性を確認 (1例下図)



ただし、外筒と内筒で異材料を用いた場合は貫通モデルのみでは評価できないケースもあり、将来的には爆轟ガスの効果も加味したモデルの修正が必要となる。

(3) Vノッチ列表面構造による機能保全 (剥離破壊対策)

① 実験装置の開発 (A2024, SUS304)

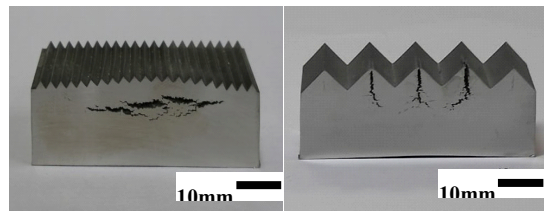
平行銅細線列の一斉起爆で発生する平面爆轟波を用いて平板状試験片に剥離破壊 (スポール) を発生させる装置を開発した。

② 各種予備実験による形状決定

スポール破壊損傷の軽減を図るために、円錐、円錐台、表面突起加工 (四角錐、Vノッチ列) 試験片等で予備実験を行い、自由表面のVノッチ列加工が有効との結論を得た。

③ Vノッチ試験片の系列実験

薬厚と板厚が一定でVノッチのピッチと深さを変化させた供試体を用意し、実験を行った。その結果、平板のスポールと同じ水平剥離 (Horizontal Spall)、ノッチ部の垂直剥離 (Vertical spall)、水平・垂直の混合型 (Mixed Spall)、剥離破壊なし (No Spall) のタイプに分類できることが判った。(1例下図)



④ 数値解析による実験結果の再現

Autodyn2D による実験結果の数値シミュレーションを試み、良好に再現できることを確認した。

⑤ Vノッチ平板のスポール破壊評価線図

実験結果と数値解析補完により A5052 と SUS304 材のVノッチ平板に対するスポール破

壊評価線図を作成した。(1例下図)

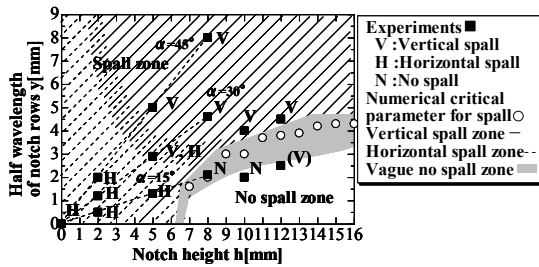


Figure 13 Spall damage evaluation chart by machining V notch rows on the surface

⑥ 実用スポール破壊防止設計の提案

本研究のVノッチ平板が破壊防止に極めて有効であることが明らかになったが、大表面の一般産業機器の爆発剥離防止にはモーメントムトラップの応用が望ましい。この場合のネックとなる表面密着が不要な薄い水層を介して接触させる案を提案したい。数値解析では効果を確認しているので実験確認が必要である。

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6件)

- ① T. Hiroe, K. Fujiwara, H. Hata, K. Nakasato and K. Mizokami, Damage Reduction of Explosively Driven Spallation by Machining V-Notch Rows on the Surfaces of 304 Stainless Steel Plates, Engineering Transactions , 5, 5-13, 2011, 査読有
- ② Tetsuyuki Hiroe, Kazuhito Fujiwara, Hidehiro Hata, Kiyotake Tsutsumi, Takuya Igawa and Wataru Yamashita , Explosively Driven Fragmentation Behavior for Structural Components and Shutterproof Effect of Wall Doubling, Materials Science Forum, 673, 191-196, 2011, 査読有
- ③ T. Hiroe, K. Fujiwara, H. Hata, M. Yamauchi, K. Tsutsumi and T. Igawa , Explosively Driven Expansion and Fragmentation Behavior for Cylinders, Spheres and Rings of 304 Stainless Steel, Journal of Materials Science Forum, 638-642, 1035-1040, 2010, 査読有
- ④ T. Hiroe, K. Fujiwara, H. Hata, H. Takahashi, Deformation and fragmentation behavior of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations, International Journal of Impact Engineering , 35 , 1578-1586, 2008, 査読有
- ⑤ Tetsuyuki Hiroe, Kazuhito Fujiwara, Hidehiro Hata, and Kenjiro Watanabe, Mechanical changes in metals caused by transmission of explosive shock waves and a

consideration to fragmentation energy in cylinder explosions, Science and Technology of Energetic Materials, 69, 99-107, 2008, 査読有

- ⑥ Tetsuyuki Hiroe, Kazuhito Fujiwara, Hidehiro Hata, and Keisuke Sashima , Experimental and numerical study on dynamic buckling of 304 stainless steel cylinders impacted by explosively driven flyer plates, Science and Technology of Energetic Materials, 69, 76-81, 2008, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① Tetsuyuki Hiroe, Explosively Driven Fracture and Damage Reduction Measures for structural Components, 2011 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Sept. 20-23, 2011 Hanyuan Mansion, Nanjing, China.
- ② Tetsuyuki Hiroe , Damage Reduction of Explosively Driven Spallation by Machining V-Notch Rows on the Surfaces of 304 Stainless Steel Plates , 7<sup>th</sup> International Symposium on Impact Engineering, July 4-7, 2010 , Sofitel Victoria Hotel, Warsaw, Poland.
- ③ T. Hiroe, Explosively Driven Expansion and Fragmentation Behavior for Cylinders, Spheres and Rings of 304 Stainless Steel, International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, August 26, 2009、Martim Hotel, Berlin, Germany
- ④ K. Nakasato, The effect of slanting Side surfaces on spall fracture behavior of metallic plates induced by explosive shock waves and its application to novel plate structures for damage reduction, September 11, 2008, Kumamoto University, Kumamoto, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣江 哲幸 (HIROE TETSUYUKI)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：90218826

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

藤原 和人 (FUJIWARA KAZUHITO)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：50219060

波多 英寛 (HATA HIDEHIRO)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号：30381007