

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560090  
 研究課題名（和文）  
 パルスレーザー誘起水中集束衝撃波による炭酸カルシウム試験片の破砕実験  
 研究課題名（英文） Experiment on Breaking CaCO<sub>3</sub> Specimen by Underwater Focusing Shock Wave Induced by Pulsed Laser Irradiation  
 研究代表者  
 鈴木 新一（氏名英字）Shinichi SUZUKI  
 豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号：60135415

## 研究成果の概要：

- パルスレーザーを用いて水中衝撃波を発生させる実験を行い、以下の研究成果を得た。
- (1) パルスレーザー誘起水中衝撃波の圧力波形は、理論的な圧力波形と定性的に一致する。
  - (2) パルスレーザー誘起水中衝撃波により、炭酸カルシウム試験片が破砕される。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 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) 医療工学における課題

人体内の腎臓結石破砕治療には、水中集束衝撃波が用いられている。この治療では、体外から結石に向けて集束する球面衝撃波を入射する。しかし、人体内では臓器毎に音速が異なる。そのため、臓器通過後は、衝撃波波面は球面ではなくなり、衝撃波は結石に同時には到達しない。その結果、結石に強い衝撃力を加えることが出来ず、効果的な破砕に繋がっていない。

## (2) パルスレーザー誘起水中衝撃波の発生と波面形状

細い棒の束を水中に設置し、その端面にパ

ルスレーザー光を照射する。すると、棒の束の端面形状と同じ波面形状を持つ衝撃波が発生する。棒をスライドさせることにより、端面形状を任意に変えることが出来るため、任意の波面形状を持つ衝撃波を発生させることが出来る。これは筆者らの独自の着想によるものであり、これまでの研究で実証されている。

## (3) レーザー誘起衝撃波による擬似位相共役法

上記のレーザー誘起水中衝撃波の方法を用い、結石に集束する衝撃波を発生させる。このとき、人体内の音速分布に合わせて、衝撃波波面を球面から少し変化させる。これに

より、人体内を通過して結石に到達する直前に衝撃波は球面となり、全ての衝撃波が同時に結石に到達する。したがって、結石により効果的に強い衝撃力を加えることが可能となる。

この方法は、筆者らの独自の着想による技術であり、特許を取得している。本研究の最も独創的な点は、上記のような特徴を持つレーザー誘起集束衝撃波を用いる点にある。

#### (4) 高速進展き裂の分岐現象

固体が衝撃的に破壊するとき、数百 m/s 以上の高速で進展するき裂が発生する。このような高速進展き裂は、き裂速度が十分速いとき、き裂先端が二つ以上に分岐する。したがって、腎臓結石に強い衝撃力を加えて、発生したき裂を分岐させれば、結石をより細かく破碎することが出来る。

申請者は、高速度ホログラフィ顕微鏡法を用い、高速進展き裂の分岐現象を実験的に研究してきた。このように、動的破壊力学の研究成果を実用に繋げようとする点が、本研究の特色である。

### 2. 研究の目的

- (1) 水中に設置した平面，円筒面，球面にパルスレーザー光を照射し、衝撃波（パルスレーザー誘起水中衝撃波）を発生させる。
- (2) シャドグラフ法を用いて衝撃波を可視化し、衝撃波の伝播過程を明らかにする。
- (4) 衝撃波の圧力波形を測定し、理論的に得られる圧力波形と比較する。
- (3) 炭酸カルシウム製の試験片を水中に設置し、パルスレーザー光を集光して試験片が破碎される領域の大きさを明らかにする。
- (4) パルスレーザー誘起水中衝撃波により、炭酸カルシウム試験片が破碎される領域の大きさを明らかにする。

### 3. 研究方法

- (1) パルスレーザーによる衝撃波の発生
 

水中に設置された不透明な固体の表面にパルスレーザー光を照射すると、パルスレーザー光のエネルギーが固体表面で吸収され、固体表面の温度が瞬間的に上昇する。これにより急激な熱膨張が起こり、水中に衝撃波が発生する。この衝撃波の波面は、固体表面と同じ形状を持つ。したがって、固体の表面形状を変化させることで、任意の破面形状を持つ衝撃波を生成することができる。

本研究では、平面，円筒面，球面にパルスレーザー光を照射し、平面衝撃波，円筒集束衝撃波，球面集束衝撃波を発生させる。

- (2) 衝撃波の可視化と圧力測定
 

発生した球面集束衝撃波をシャドグラフ法により可視化する。パルスレーザーによ

る衝撃波の誘起とシャドグラフ光学系を図 1 に示す。また、衝撃波の圧力波形を、高速応答小型圧力計で測定する。

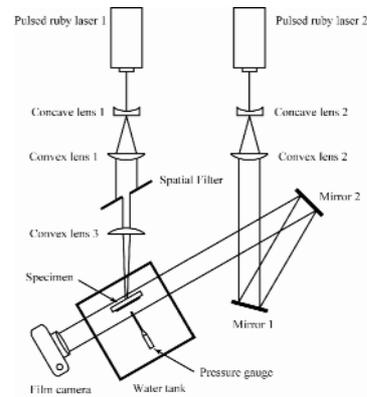


図 1 水中衝撃波発生とシャドグラフ法光学系

#### (3) 炭酸カルシウム試験片の破碎実験

以下に記す 2 種類の破碎実験を行い、その結果を比較する。

- (i) レーザー誘起水中衝撃波により炭酸カルシウムを破碎する。
- (ii) 水中に設置された炭酸カルシウム試験片にパルスレーザー光を直接照射し破碎する。

### 4. 研究成果

#### (1) TEACO<sub>2</sub> レーザーによる平面衝撃波の発生と可視化・圧力測定

波長 10 $\mu$ m, パルス幅約 70ns の TEACO<sub>2</sub> レーザー光を、ZnSe と PMMA に挿まれた薄い水の層に吸収させる実験を実施した(図 1)。

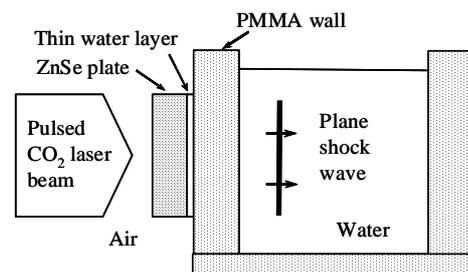


図 1 TEACO<sub>2</sub> レーザーによる水中衝撃波の発生。

その結果、TEACO<sub>2</sub> レーザー光を直接水に吸収させることによって、PMMA 壁に隣接する水中に平面衝撃波が発生することが確認された(図 1, 2)。

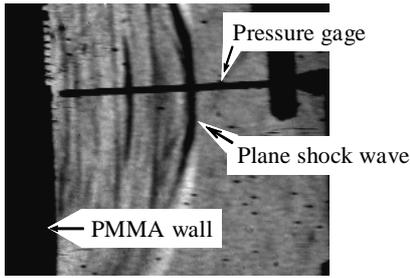


図2 パルスCO<sub>2</sub>レーザーによって誘起された水中衝撃波

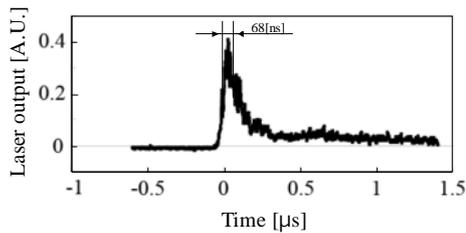


図3 TEACO<sub>2</sub>レーザー光の出力波形.

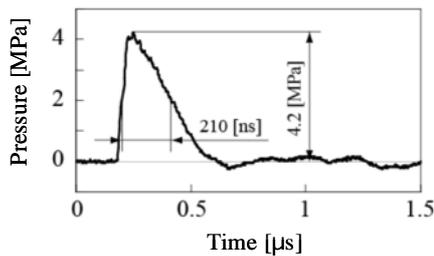


図4 平面衝撃波の圧力波形.

また、発生した平面衝撃波の圧力波形を測定した結果、衝撃波の圧力波形は、TEACO<sub>2</sub>レーザー光の出力波形と相似であることが明らかになった(図3, 4)。

(2) ルビレーザーによる平面衝撃波の発生と可視化・圧力測定

PMMA 平板の表面に黒色塗料を塗布してルビレーザー光の吸収層を形成し、それを水中に設置する(図5)。その吸収層にルビレーザー光を照射し、平面衝撃波を発生させる。

図6は、使用したルビレーザーの出力波形である。半値幅は、約30nsである。ルビレーザー光は、吸収層内を5μm伝播する間に、そのエネルギーの約98%が吸収される。

図7は、発生した衝撃波のシャドウグラフ写真である。ルビレーザー光吸収層は、PMMA 平板の右側表面に形成されている。

したがって、衝撃波はPMMA 平板の右側表面で発生する。衝撃波1は、吸収層で発生し、右側の水中に伝播した衝撃波である。衝撃波2は、吸収層で発生し、PMMA を通過した後、左側の水中に伝播した衝撃波である。衝撃波3は、吸収層で発生したあとPMMA 中を左方向に伝播し、PMMA 平板の左側表面で反射した後、右方向に伝播した衝撃波である。

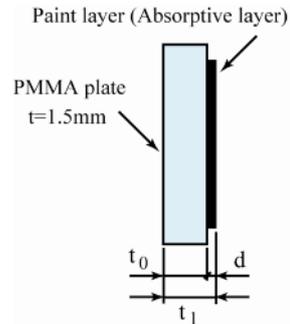


図5 PMMA 表面に作られたレーザー光吸収層

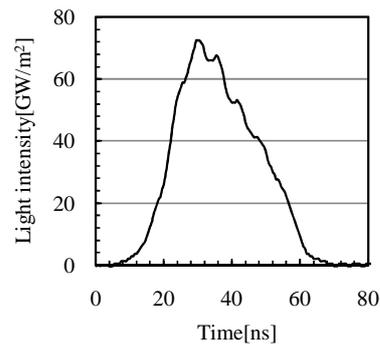


図6 ルビレーザー光の出力波形

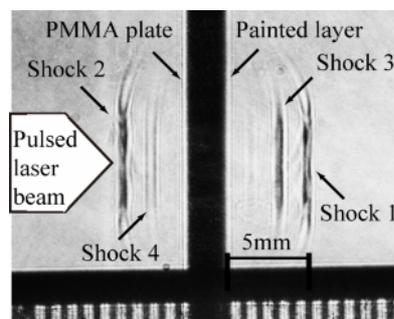


図7 パルスルビレーザーによって誘起された水中平面衝撃波。

図8は、吸収層の厚さを21μmから70μmまで変化させときの衝撃波の圧力波形の測定結果である。吸収層の厚さを変化させても、

衝撃波の圧力波形は変化しないことが分かる．これは、吸収層がレーザー光を吸収する距離（ $5\mu\text{m}$ ）に比べて、吸収層の厚さが十分厚いことによる．

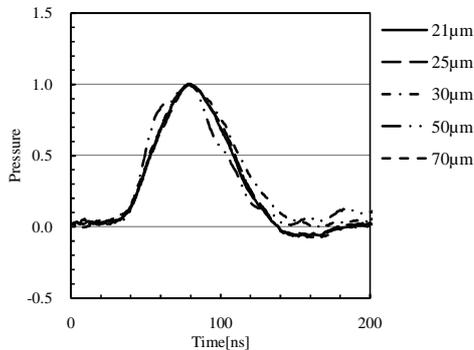


図 8 パルスレーザー誘起水中平面衝撃波の圧力波形．

図 6 のレーザー出力波形を用い、波動方程式から理論的に予測される圧力波形と図 8 の圧力波形とを比較した．その結果、両者は定性的に一致することが確認された．しかし、圧力波形の半値幅に関しては、定量的な一致が見られなかった．このことから、衝撃波発生メカニズムが、単なる熱膨張だけではないことが推察される．

### (3) 円筒集束衝撃波におけるパルスレーザー光強度分布の影響

水中に設置された円筒凹面にパルスレーザー光を照射し、円筒軸に集束する衝撃波を発生させる（図 7）．また、集束した衝撃波の圧力波形を測定する．

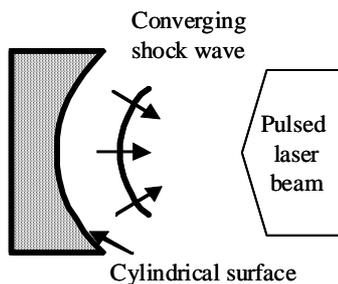


図 9 円筒集束衝撃波の発生．

集束衝撃波の圧力を測定する際、円筒面上におけるパルスレーザー光の光強度分布を図 8 の様に変化させる．これにより、集束衝撃波の圧力波形に及ぼすパルスレーザー光強度分布の影響を明らかにする．

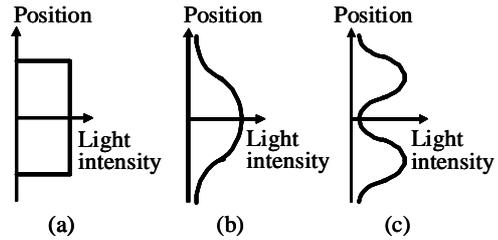


図 10 円筒面上における光強度分布．

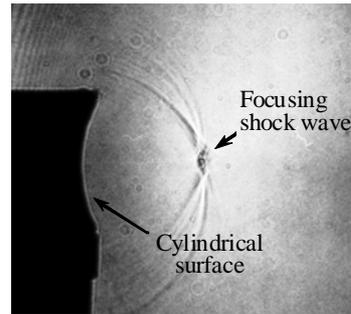


図 11 円筒軸上に集束した衝撃波．

図 11 は、集束衝撃波の可視化写真である．円筒表面で発生した衝撃波が、円筒軸上に集束しているのが分かる．

図 12 は、集束衝撃波の圧力波形の測定結果である．正の圧力波の後ろに、負の圧力波が現れている．この負の圧力波は、結石治療の際に、臓器に損傷を与える可能性があることが指摘されている．

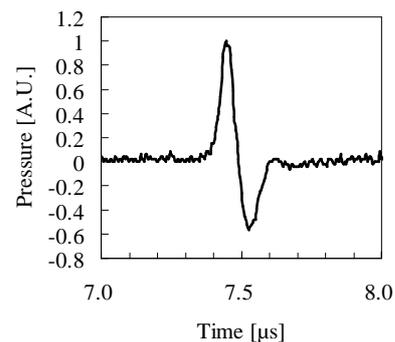


図 12 円筒軸上に集束した衝撃波の圧力波形．

図 12 における正圧のピーク値に対する負圧のピーク値の比の絶対値を  $R$  とする．図 6 は、比  $R$  のレーザー光強度分布に対する依存性を示している．図 6 から、レーザー光強度

分布が変化しても、比  $R$  に大きな変化がないことが分かる。そのことから、集束衝撃波の圧力波形は、パルスレーザー光のエネルギー密度分布の影響をあまり受けないと言える。

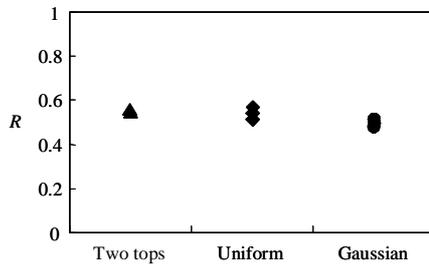


図 12 正圧に対する負圧の比のエネルギー分布依存性.

(4) ルビーレーザーによる球面集束衝撃波の発生

水中に設置された凹球面にパルスレーザー光を照射し、球中心に集束する衝撃波を発生させ、その圧力を測定した(図 13, 14). 測定された圧力波形は、理論的に予測される圧力波形と相似であることが明らかになった。

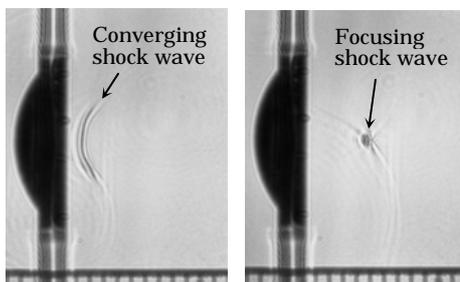


図 13 パルスレーザー誘起水中集束球面衝撃波

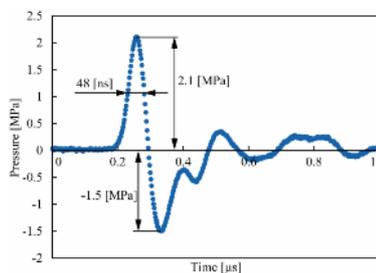


図 14 球面集束衝撃波の圧力波形.

(5) パルスレーザー照射による破砕

パルスレーザー光を水中の炭酸カルシウム試験片に直接照射した。その結果、炭酸カ

ルシウム試験片が破壊されることが確認された。

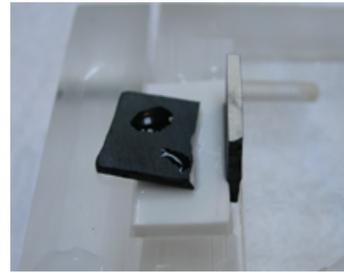


図 13 パルスレーザー照射により破砕された炭酸カルシウム試験片.

(6) レーザー誘起衝撃波による破砕

水中の固体表面にパルスレーザーを照射して球面衝撃波を発生させ、その衝撃波により、炭酸カルシウム試験片が破壊されることを確認した(図 14).



図 14 レーザー誘起水中衝撃波によって破砕された炭酸カルシウム試験片.

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) Shinichi SUZUKI and Kazuya IWANAGA, An Approximate Method to Measure Crack Opening Displacement of Fast Propagating Crack in Araldite B, *Strain*, (2009) (in printing), 査読有.
- (2) Shinichi SUZUKI, Tomotaka MIYASHITA, Hideyuki KIMURA and Shouhei NISHIKITA, A Method to Eliminate Measurement Error Caused by Residual Strain of Grating in Moiré Interferometry, *Journal of Solid Mechanics and Material Engineering*, 3-5 (2009), (in printing), 査読有.

- (3) Shinichi SUZUKI, Daisuke SUZUKI, Tatsuhiro ITO and Naoki HASE, Converging Pressure Wave in Water Induced by Pulsed Laser Irradiation on cylindrical Solid Surface, *Computational Fluid Dynamic Journal*, 16-1 (2007), 75-82, 査読有.
- (4) 鈴木新一, 岩永和也, アラルダイト B 中を高速進展するき裂のき裂開口変位の一測定法, 実験力学, 7-2, (2007), 42-47, 査読有.
- (5) Shinichi SUZUKI, Daisuke SUZUKI and Tatsuhiro ITO, Generation of Underwater Focusing Shock Wave by Pulsed Laser Irradiation, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007, Japan Society of Mechanical Engineers, (2007), OS08-2-1, CD-ROM, 査読有.
- (6) Shinichi SUZUKI and Kazuya IWANAGA, A Method to Measure Crack Opening Displacement of Fast Propagating Cracks in Araldite B, The 13th International Conference on Experimental Mechanics, European Association for Experimental Mechanics, (2007), 687-688 and CD-ROM, 査読有.

〔学会発表〕(計 9 件)

- (1) 鈴木新一, 山口徹, 吉武春樹, 成田紘之, 光弾性法を用いたプラスチックメガネレンズのひずみ測定, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集(横浜国大), 日本機械学会, No.08-1, (2008), 47-48.
- (2) 鈴木新一, 吉田佑介, Mohamad Sharul Mizan Bin, レーザー誘起水中集束衝撃波の圧力波形に及ぼすレーザー強度分布の影響, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集(横浜国大), 日本機械学会, No.08-1, (2008), 75-76.
- (3) 鈴木新一, 松田淳, 佐宗章弘, 吉田佑介, 吉武春樹, TEACO<sub>2</sub> レーザー照射により誘起される水中衝撃波の可視化と圧力測定, 日本実験力学会 2008 年次講演会講演論文集(北海道大学), 日本実験力学会, (2008), 166-168.
- (4) 鈴木新一, 小林隆, ルビーレーザー誘起水中衝撃波の可視化と圧力測定, 日本実験力学会 2008 年次講演会講演論文集(北海道大学), 日本実験力学会, (2008), 169-172.
- (5) 鈴木新一, 宮下友貴, モアレ干渉法を用いた切欠周辺の変位場計測(回折格子の残留ひずみの影響とその除去), 第 39 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウ

- ム講演論文集(大田区産業プラザ, 東京都), 日本非破壊検査協会, (2008), 151-156.
- (6) 鈴木新一, 山口徹, 小林隆, 瀧俊秋, 擬似位相共役法を用いた水 PMMA 混合媒質中におけるレーザー誘起衝撃波の集束, M&M2007 材料力学カンファレンス(東京大学生産技術研究所), 日本機械学会, (2007), CD-ROM.
- (7) 鈴木新一, 宮下友貴, モアレ干渉法による分岐切欠の開口変位と応力拡大係数測定, M&M2007 材料力学カンファレンス(東京大学生産技術研究所), 日本機械学会, (2007), CD-ROM.
- (8) 吉武春樹, 加藤雅大, 鈴木新一, 水ゼラチン混合媒質中におけるレーザー誘起球面衝撃波の発生と伝播, 高速度撮影とフォトにクスに関する総合シンポジウム 2007 アブストラクト集(名工大), 高速度撮影とフォトにクスに関する総合シンポジウム 2007 実行委員会, (2007), 5-8.
- (9) 鈴木新一, 岩永和也, アラルダイト B 中の高速進展き裂における欠損幅とエネルギー解放率の測定, 高速度撮影とフォトにクスに関する総合シンポジウム 2007 アブストラクト集(名工大), 高速度撮影とフォトにクスに関する総合シンポジウム 2007 実行委員会, (2007), 79-82.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木新一 (SUZUKI SHINICHI)

豊橋技術科学大学・機械システム工学系・准教授

研究者番号: 60135415

### (2) 研究分担者

末次正寛 (SUETSUGU MASAHIRO)

鈴鹿工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号: 50259884

### (3) 連携研究者