

# 光ファイバセンサを用いた放電点近傍変形挙動の観察\*

明松圭昭\*\* 影山和郎\*\*\* 毛利尚武\*\* 村山英晶\*\*\* 松尾雅子\*\*\*\*

Measurement of Deformation Behaviour near Discharge Point by using Optical Fiber Sensor

Yoshiaki AKEMATSU, Kazuro KAGEYAMA, Naotake MOHRI, Hideaki MURAYAMA and Masako MATSUO

Recently, electrical discharge machining (EDM) is widely used for manufacturing various kinds of die and molds. However, the mechanism of material removal in EDM has not been sufficiently clarified. In order to clarify the mechanism of material removal, the transitions in the melted and vaporized regions should be precisely examined as well as the transitions in the impulsive forces acting on a work. We attempted to examine the mechanism by measuring the generation and propagation of elastic wave in a work by single pulse discharge. The elastic wave by the single pulse discharge was measured by using an optical fiber sensor and a piezoelectric sensor on the work. Simultaneously, the discharge current and voltage were measured. The measured results of the optical fiber sensor were compared with those of the piezoelectric sensor. It was found that optical fiber sensor was not affected the electromagnetic noise unlike the piezoelectric sensor. Moreover, the optical fiber sensor was useful in the measurement of the elastic wave, including high frequency of several MHz. As the results, the elastic wave detected by optical fiber sensor was Lamb wave. It is expected that the mechanism of material removal by discharge will be clarified using the optical fiber sensor.

**Key words:** elastic wave, optical fiber sensor, single pulse discharge, piezoelectric sensor, displacement

## 1. 緒 言

放電加工において放電が生じると電極材料や加工液が蒸発し体積が急激に増加する。その際、周りの慣性や粘性に抗して膨張する高圧力の気泡が流体運動を伴いながら形成されるため加工物に高圧力が加わる<sup>1)</sup>。高圧力および流体運動は溶融部除去に大きく影響するため、単発放電に伴って発生する圧力および流体運動の測定に関して様々な研究が行われている。放電に伴い発生する力を弾性棒にひずみゲージを貼り付け計測する研究<sup>2,4)</sup>では比較的容易にひずみ計測が可能であるが、弾性棒を介するため高速で微小なひずみを正確に計測することは困難である。放電点付近を高速カメラで観察する研究<sup>5)</sup>では音波発生空間分布を観察することが可能であるが、発生する圧力の大きさは測定できない。さらに圧電効果を利用したセンサにより加工物を伝播する弾性波の挙動を調査した研究<sup>6) 10)</sup>では高感度で計測可能であるが、圧電素子は放電により発生する電磁ノイズの影響を受けるため放電点近傍での測定が困難であるなど圧力および流体運動が正確に計測されているとは言い難い。

近年、我々は0.1Hzから数MHzまでの広帯域の速度成分を電磁ノイズの影響をほとんど受けずに計測可能な光ファイバセンサを開発した<sup>11)</sup>。本研究では電磁ノイズの影響をほとんど受けず弾性波計測が可能な光ファイバセンサに着目した。光ファイバは可とう性に優れているため、センサ形状を自由に設計できる。センサ形状を中空の円形にすれば円形センサ内部で発生させた放電を測定することが可能であると考えた。また今回使用した光ファイバセンサはドップラー効果を利用して計測する

ため、巻き数を増加させることによりS/N比の向上が図れる<sup>11)</sup>。センサ形状を円形に設計することおよび巻き数を増加させることにより、比較的小さな電気エネルギーでも放電実験が行えると考えられる。本稿では加工現象を調査するために光ファイバセンサを用いた放電点近傍変形挙動の観察を試みた結果について述べる。

## 2. 光ファイバセンサ計測原理

図1に光ヘテロダイン方式を用いた光ファイバセンサの計測原理図を示す。光源から射出した光波( $f_0$ :周波数)はハーフミラーで信号光と参照光に分割される。弾性波がセンサ部を通過する際、信号光はドップラー効果により周波数が変化( $f_D$ :ドップラーシフトした周波数)する。参照光は音響光学素子(AOM)により周波数変調( $f_M$ :変調周波数)させる。受光器は信号光と参照光の周波数成分の差を取り出す。取り出した周波数成分の差を電気信号に変換することにより光ファイバセンサが変位する速度を計測する。図2に本研究で使用した光ファイバセンサを示す。線径約150 $\mu\text{m}$ の光ファイバを巻いて直径約16mmの円を形成し製作した。図3に光ファイバセンサが変形することにより湾曲した導波路で周波数変化が生じる原理

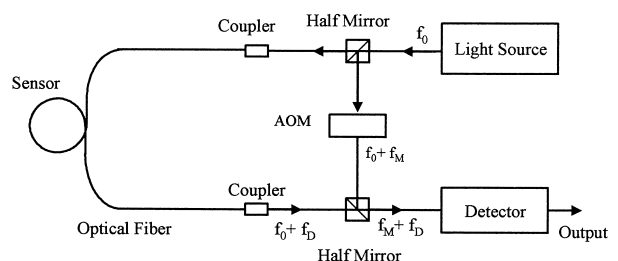


図1 Schematic view of optical fiber sensor system

\* 原稿受付平成15年8月18日

\*\* 正会員 東京大学(東京都文京区本郷7-3-1)

\*\*\* 東京大学(東京都文京区本郷7-3-1)

\*\*\*\* 学生会員 東京大学大学院(現,(株)Canon)

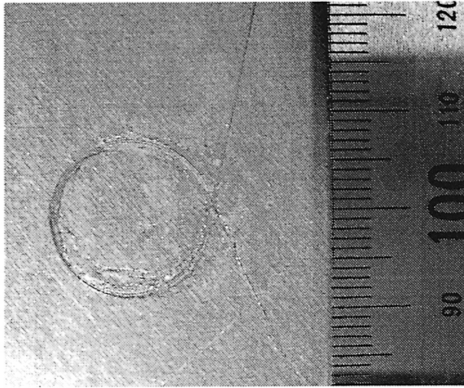


図 2 Schematic view of optical fiber sensor

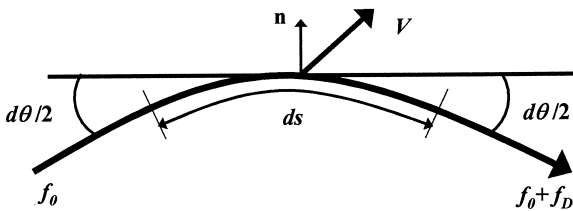


図 3 Principle of Doppler effect in curved waveguide

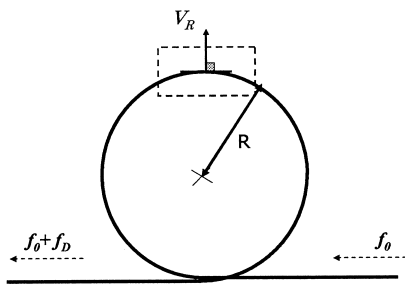


図 4 Optical waveguide in curved optical fiber

図を示す。光ファイバ内の光波は、コアとコアを包むクラッドの屈折率の差により反射を繰り返し伝播する。光ファイバセンサ部を弾性波が通過するとセンサ部が変形（伸縮）しドップラー効果が生じる。図 4 に本研究で用いたセンサのモデル図を示す。波の周波数、波長および速度の関係は(1)式で表される。さらに本センサが検知する速度成分は(2)式で求められる。

$$f_D = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dL}{dt} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} d\theta \quad (2)$$

ここで、 $f_D$ ：ドップラーシフトした光の周波数[Hz]、 $\lambda$ ：光の波長[m]、 $dL/dt$ ：光ファイバセンサが変形する速度[m/s]、 $\mathbf{V}$ ：光ファイバの局部速度[m/s]、 $\mathbf{n}$ ：法線ベクトル、 $d\theta$ ：進行方向変化角度である。よって微小長さ  $ds$  間で生じるドップラーシフト量は(3)式により求められる。長さ  $L$  のセンサ間で生じるドップラーシフト量は(4)式により求められる。

$$f_D = \frac{n_{eq} \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}}{\lambda_0} d\theta \quad (3)$$

$$f_D = \frac{n_{eq}}{\lambda_0} \int_L \kappa \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} ds \quad (4)$$

ここで、 $n_{eq}$ ：光ファイバの等価屈折率、 $\lambda_0$ ：真空中を伝播する光の波長[m]、 $\kappa$ ：曲率である。

放電を円形センサの中心で行うことおよび加工物が均質であると仮定することにより、光ファイバセンサの周上で検知される変位速度は(5)式で示すように一定である。

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = V_R \quad (5)$$

ここで、 $V_R$ ：法線方向の速度である。そのためドップラーシフト量は(6)式により求めることができる。

$$f_D = \frac{2\pi n_{eq}}{\lambda_0} V_R \quad (6)$$

本センサは変位速度を計測するためセンサ周上で同じ速度成分を計測する場合にはセンサ各部における速度成分の違いを考慮する必要がないため、音源の動的変形挙動を解明するのに有効ではないかと考えられる。そこでセンサ周上で計測される速度成分が同じ場合と異なる場合で計測されるセンサ信号を比較した。音源には一般的に校正音源<sup>12)</sup>として用いられるシャープ

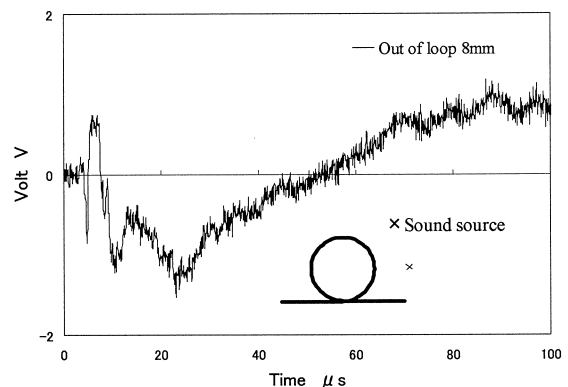
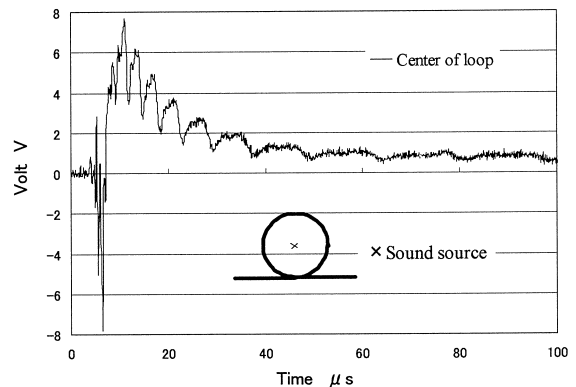


図 5 Detected waveform by the optical fiber sensor

ペンシルの芯を圧折する手法を用い、音源位置がセンサ中心および外の違いによる光ファイバセンサの検知信号を比較した。試験片にはアルミニウム薄板(400×500×1mm)を用いた。光ファイバセンサ(直径16mm, 巻き数2)は左上隅から200×200mmの位置に瞬間接着剤で固着させた。圧折位置はセンサ中心およびセンサ中心から24mmの位置で行った。

図5に芯を圧折することにより光ファイバセンサが検知した信号を示す。図5よりセンサの中心で圧折した場合のほうがセンサ中心から24mmの位置で圧折した場合より振幅値が高い。さらに信号の収束も早いことが分かる。これは音源がセンサ中心になる場合には、光ファイバセンサの周上で検知される変位速度は一定であるが、センサの外側に音源がある場合にはセンサの各点で変位速度は異なり波が干渉するため見かけ上、収束するのが遅く計測されると考えられる。よって原波形解析を行う場合には音源がセンサ中心にあることが望ましいことが確認された。

### 3. 実験方法

数μs以下の短い放電持続時間の放電特性を得るためにコンデンサ放電回路を作製した。電源は直流電源(高砂製作所 KX-100H, 出力150V), 抵抗は1MΩ, コンデンサ容量は65.8nFを用いた。放電電極には銅(直径1mm), 加工物にはアルミニウム薄板(400×500×1mm)を用い加工物の四隅を支持した。実験装置の概略図を図6に示す。円形光ファイバセンサ(直径16mm, 巻き数2)は左上隅から200×200mmの位置に瞬間接着剤で固着させた。放電は光ファイバセンサの中心で行った。圧電素子(PZT)センサ(DIGITAL WAVE社製)は放電箇所から50mmの位置に設置した。電流, 電圧および光ファイバセンサ信号はデジタルオシロスコープ(YOKOGAWA製: サンプルレングレート10MHz, 12ビット, データ長1k)を用いてA/D変換を行い, パソコンに取り込み解析を行った。PZTセンサ信号はプリアンプで40dB増幅後, AE解析装置MISTRAS2001(PAC社製: サンプルレングレート10MHz, 16ビット, データ長1k)に取り込み解析を行った。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 コンデンサ特性

図7に電極極性が陽極の時に検出される電流および電圧波形を示す。図7より電流は1μsの間に約13Aまで増加した後・5Aまで減少し, 0に収束した。電圧は1μsの間に約75Vから・20Vまで減少した後, 0Vに収束する。これらの

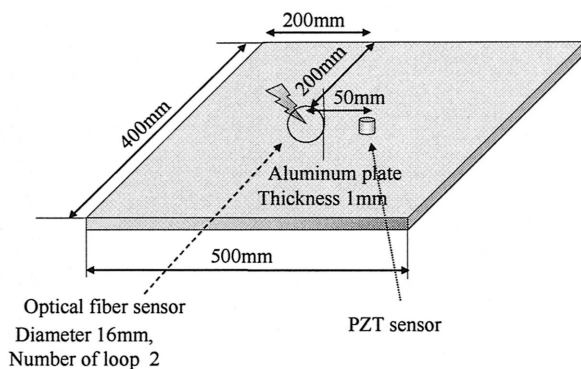


図6 Experimental setup

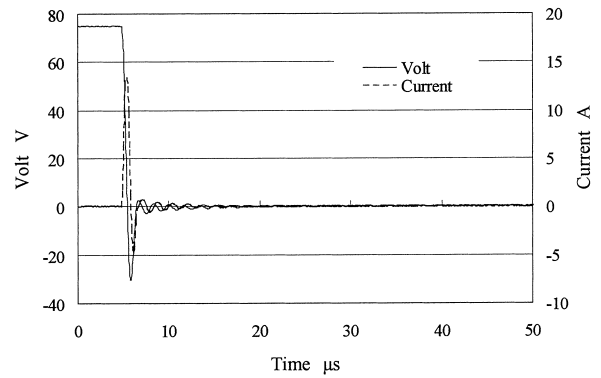


図7 Typical waveform of the discharge voltage and current

表1 Theory of discharge

C: Condenser capacity [μF]	$\tau_p$ : Pulse duration [μs]	L: Inductance [μH]
$18.8 \times 10^{-3}$	0.5	1.3
$64.8 \times 10^{-3}$	1.0	1.6
$300 \times 10^{-3}$	2.0	1.4

挙動はコンデンサ放電の場合に観察される代表的な電流および電圧挙動<sup>13)</sup>である。一般に放電持続時間, インダクタンスおよび静電コンデンサ容量には(7)式のような関係がある<sup>13)</sup>。

$$\tau_p = \pi(LC)^{1/2} \quad (7)$$

ここで $\tau_p$ : 放電持続時間[μs], L: インダクタンス[μH], C: コンデンサ静電容量[μF]である。

作製した放電回路の妥当性を検討するために静電コンデンサ容量を変化させ(7)式によりインダクタンスを算出した。表1に静電コンデンサ容量, 実験によって計測された放電持続時間およびインダクタンスを示す。静電コンデンサ容量を18.8nFから64.8nFまで増加させたとき, 算出されたインダクタンス値に最大0.5μHの違いが計測された。コンデンサ容量を変化させることによりインダクタンスは1.6μH程度であることがわかる。インダクタンスはほとんど同じ値であるため放電回路の違いによる影響は少ないと考えられる。

#### 4.2 放電信号

図8に放電が起こったときに観察された光ファイバセンサ信号およびPZTセンサ信号を示す。図8より光ファイバセンサは放電開始時間から約2μs後に約1.35mm/sの小さな変位速度が検出された。アルミニウムを伝播する縦波の速度は約6300m/sであり, センサ径までの距離から算出される到達時間とほぼ一致する。よって放電に伴い発生した弾性波を検知していると考えられる。一方, PZTセンサは放電開始と同時に約0.06Vの信号を検知している。PZTセンサは放電箇所から約50mmの距離に設置しており, 放電開始と同時に測定された信号は放電に伴い発生した電磁ノイズであることが判る。放電開始から約9μs後に約

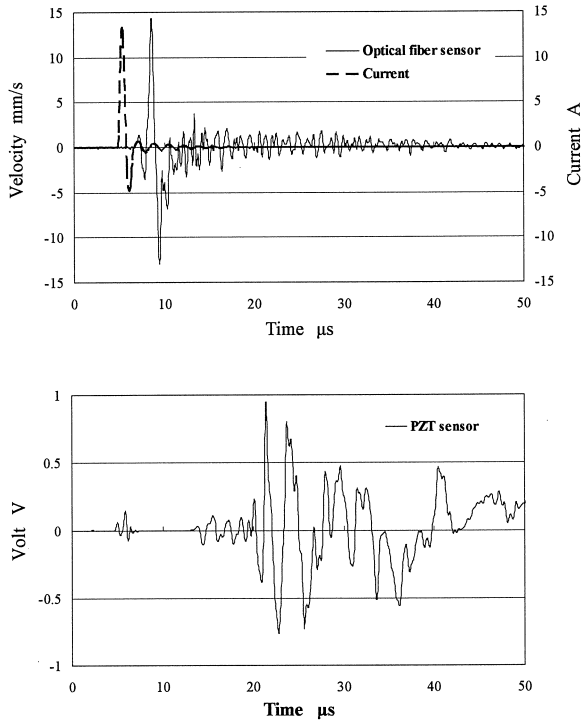


図 8 Detected waveforms of discharge current, optical fiber and PZT sensor

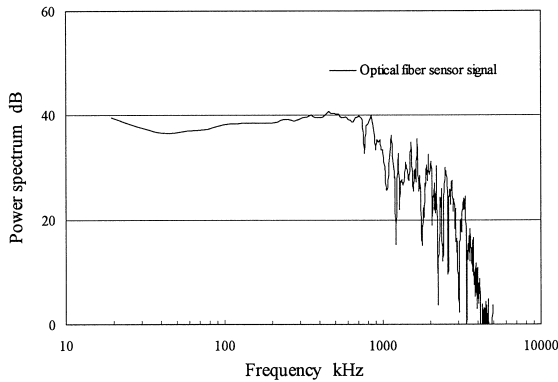


図 9 Frequency spectra of detected elastic wave with optical fiber sensor

0.03V の信号を検知している。放電位置と PZT センサまでの距離から求めた到達時間より放電に伴い発生した弾性波を検知していると考えられる。光ファイバセンサは PZT センサと比較して放電時に発生する電磁ノイズに強いことが確認された。

図 8 に光ファイバセンサによって検知された変位速度信号のスペクトル解析結果を示す。図 8 より放電に伴い発生する弾性波は持続時間が約 1 $\mu$ s の短いパルス信号であるため広帯域の周波数成分を含み、1MHz 付近までの周波数帯域ではパワースペクトルに数 dB 程度のばらつきは観察されるが平坦である<sup>14)</sup> ことがわかる。図 9 に弾性波伝播のモデル図を示す。一般に固体中を伝播する弾性波には縦波と横波の 2 種類が存在し、これらの波が境界面にあたると表面波と呼ばれる表面にそって伝播する波が発生することが知られている。

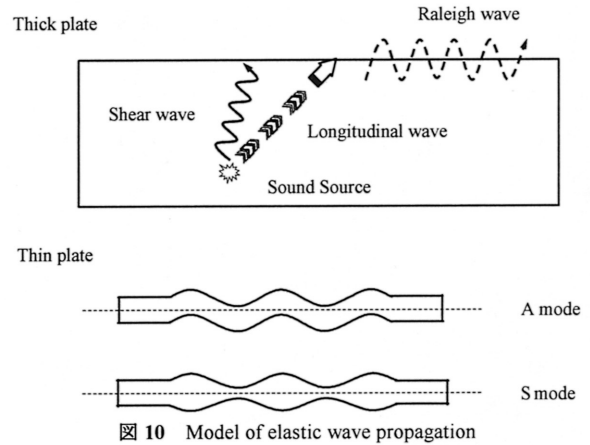


図 10 Model of elastic wave propagation

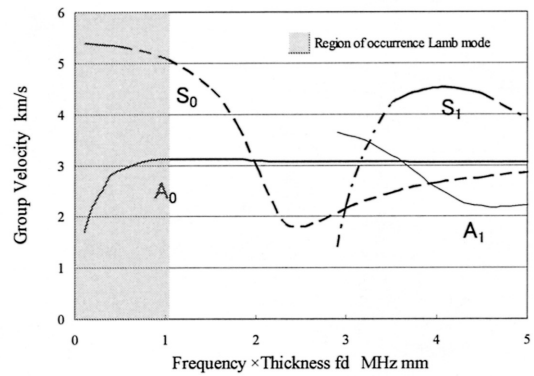


図 11 Group velocity for an aluminum plate<sup>15)</sup>

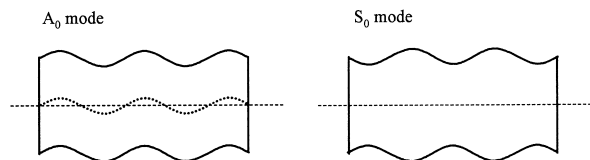


図 12 Lamb wave mode

境界を有する固体を伝播する弾性波においては境界面の間で縦波および横波が多重反射を繰り返し伝播するため複雑である。中でも薄板の中を伝播する弾性波をラム波という。ラム波は板の中心軸に対して非軸対象の変位挙動をする A モード (Anti-symmetric) と軸対象の変位挙動をする S モード (Symmetric) が発生する。これらは反射のたびに縦波と横波の相互間にモード変換があるため、 $A_0, A_1, \dots, A_n$  および  $S_0, S_1, \dots, S_n$  で示される多次数の複雑な特性を有する弾性波が伝播する。このラム波の挙動は固体の板厚および伝播する弾性波の周波数に強く依存する<sup>15)</sup> ことが報告されている。図 11 に林らにより報告されたアルミニウム薄板を伝播する各ラム波モードの速度と周波数に板厚を掛けたときの関係<sup>15)</sup> を示す。本研究で計測された周波数は 1MHz 以下であり板厚は 1mm を使用しているため伝播するラム波のモードは  $A_0$  および  $S_0$  の基本モードであることが判る。さらに放電開始から 3.5 $\mu$ s 付近で 14mm/s の変位速度が計測されたことより、計測された変位速度信号から薄板中を伝播する速度を求めると約 2300m/s となる。よって図 11 と比較すると発生した弾性波の支配的なモードは図 12 に示す非軸対象の基本モード ( $A_0$  モード) であると推測された。

図 13 に光ファイバセンサによって計測された速度波形 (図 8 中の光ファイバセンサ波形) を積分することにより求めたセンサ固着部の変位挙動を示す。図 13 よりセンサ固着部の円周方向への変位は放電開始から約  $3.5\mu\text{s}$  後に約  $5.6\mu\text{m}$  広がっていることが観察された。その後、比較的長い周期で収縮していることが観察された。光ファイバセンサは変位挙動を広帯域で検知できることが判った。

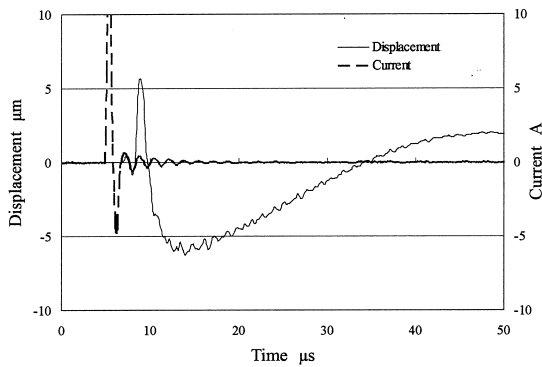


図 13 Displacement behavior

## 5. 結 言

単発放電に伴い発生する弾性波の伝播特性を調査するために光ファイバセンサの適応を試みた。その結果、光ファイバセンサは PZT センサと比較して電磁ノイズに強いことが確認された。放電など電磁波が発生する環境での現象解明には圧電素子より光ファイバセンサのほうが有利であると考えられる。また板厚が  $1\text{mm}$  のアルミニウムを用いることにより放電により発生する弾性波は  $S_0$  および  $A_0$  モードのラム波であり、伝播速度の関

係より  $A_0$  モードが支配的であることが推測された。光ファイバセンサは変位挙動を広帯域で検知することができるため、高速現象の解明に有効であることが判った。

## 参 考 文 献

- 1) 国枝正典：放電加工の基礎と将来展望-I 基礎一，精密工学会誌，**71**，1(2005)58.
- 2) 戸部俊美，加藤正名，小原治樹：細線爆発液中放電成形における発生圧力波について，日本機械学会誌，**44**，384，(1978)2908.
- 3) 土屋八郎，井上友一，森勇藏，井川直哉：液中放電による圧力波の発生と伝ばに関する研究(第3報)，精密機械，**48**，9(1982)1213.
- 4) 土屋八郎，井上友一，森勇藏，井川直哉：液中放電による圧力波の発生と伝ばに関する研究(第4報)，精密機械，**48**，10(1982)1330.
- 5) 渡辺好章，大谷隆彦，卜部泰正：火花放電および細線爆発により発生する衝撃波のシュリーレン法による観察，日本音響学会，**37**，6(1981)267.
- 6) 三宅裕，板東潔，赤崎琢也：水中火花放電による圧力波の発生とその伝ば，日本機械学会 B 編，**57**，541(1991)3267.
- 7) T. Bengtsson, M. Leijon, L. Ming, B. Jonsson: Directivity of acoustic signals from partial discharge in oil, IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, **142**，1(1995)85.
- 8) T. Boczar: Identification of a Specific Type of PD from Acoustic Emission Frequency Spectra, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **8**，4(2001)598.
- 9) 武藤一夫，二村昭二，堤正臣：AE センサを利用した放電加工現象のモニタリング，日本機械学会 C 編，**58**，549(1992)1521.
- 10) 武藤一夫，二村昭二，堤正臣：広帯域 AE センサによる放電現象の検出に関する基礎研究，非破壊検査，**40**，12(1991)784.
- 11) 影山和郎：構造モニタリングのための新規光ファイバセンサ，非破壊検査，**52**，4(2003)174.
- 12) 尾上守夫：アコースティック・エミッションの基礎と応用，コロナ社，(1976)15.
- 13) 斉藤長男，毛利尚武，高鷲民生，古谷政典：放電加工技術—基礎から将来展望まで，日刊工業，(1997)35.
- 14) 柴山秀雄，福永一保，城戸健一：測定用パルス音源の提案，日本音響，**40**，3(1984)152.
- 15) 林高弘，川嶋絢一郎：多重モードラム波からの単一モードの抽出と欠陥検出への応用，日本機械学会 A 編，**67**，664(2001)1959.