チタン箔溶断セラミックス接合における回路インダクタンスの効果

学生員 高田 良宏*

正 員 高木 浩一*

正 員 板垣 稔*

正 員 向川 政治*

正 員 藤原 民也*

正 員 大島 修三**

非会員 高橋幾久雄***

非会員 桑嶋 孝幸***

Effect of Circuit Inductance on Ceramics Joining by Titanium Foil Explosion

Yoshihiro Takada*, Student Member, Koichi Takaki*, Member, Minoru Itagaki*, Member,

Seiji Mukaigawa*, Member, Tamiya Fujiwara*, Member, Shuzo Ohshima**, Member,

Ikuo Takahashi***, Non-member, Takayuki Kuwashima***, Non-member

This article describes the influences of circuit inductance on alumina (Al_2O_3) tile joining using explosive titanium foil. Several kAs pulse current was supplied from 8.28 μF storage capacitor to the 50 μm thickness titanium foil which was sandwiched between the Al_2O_3 tiles with pressure of 8.3 MPa. The temperature of the foil was rapidly increased owing to ohmic heating with the large current, and then the foil was liquefied and vaporized. The Al_2O_3 tiles were successfully bonded when the input energy to the titanium foil was higher than the energy required for the foil vaporization. The bonding strength increases with increasing the energy input to the foil. However, the foil explosion cracked the tiles when the input energy exceeds a critical value. Increasing the circuit inductance from 1.13 μH to 64.8 μH , the critical energy of tile cracking increase from 160 J to 507 J, respectively. the maximum bonding strength of 330 kg was obtained when the circuit inductance was 21.8 μH . An investigation of the interfacial structure of the joints using electron probe micro-analysis revealed that distinct reaction areas existed in the interlayer.

キーワード: 接合, パルスパワー, セラミックス, アルミナ, チタン, 箔溶断

Keywords : joining, pulsed power, ceramics, Alumina, Titanium, foil explosion

1. はじめに

セラミックスは、耐熱性、耐食性、耐摩耗性に優れていることから機械部品材料に応用され、また、絶縁、誘電特性を持つことから電子材料としても用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、セラミックスは脆性があり加工性に劣っていることから、大型や複雑な形状のものを得ることが難しい。そのためセラミックスを機械部品材料や電子材料として使用する

場合、セラミックス同士の接合や、セラミックスと金属の接合が必要不可欠となってくる^{(3)~(5)}。

セラミックスの接合方法としては、機械的接合法、接着剤法、金属中間材法等がある。「ろう接法」は金属中間材法の1つであり、接合面が均一なこと、高温にも耐えられることから盛んに用いられている。この方法は、セラミックスとセラミックスの間に、ろう材と呼ばれる金属の中間材を挟み、真空中またはアルゴンガス雰囲気中で、セラミックスに 10 MPa 程度の圧力をかけながら数分から数時間の間、高温に加熱して接合するものである。しかしこの方法では、1) 使用できる中間材が炉の到達温度で制限される、2) 装置が大規模かつ高価になる、3) 接合時間が長く生産効率が悪い、などの欠点も有する。このため短時間で接合可能な、新しい接合方法の研究開発が望まれている⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

パルス電流を利用するセラミックス接合は、高融点の中間材が使用可能、大気中で行うことができる、接合時間が短いなどの利点を有する、新しい方法である^{(7)~(12)}。この方

* 岩手大学
〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5
Iwate University

** (財)いわて産業振興センター
〒020-0045 盛岡市盛岡駅西通 2-9-1
Iwate Industrial Promotion Center
2-9-1, Moriokaeki-Nishidoori, Morioka 020-0045

*** 岩手県工業技術センター
〒020-0852 盛岡市飯岡新田 3-35-2
Iwate Industrial Research Institute
3-35-2, Iioka-Nitta, Morioka 020-0852

法は、ろう材として導電性の金属箔をセラミックスの間に挟み、セラミックスに圧力を加えた状態で金属箔にコンデンサ放電によるパルス大電流を流し、金属箔を溶融させて接合させる方法である。しかし、この方法における接合に必要なエネルギーや、最適な回路パラメータなど、明らかにされていない点が多い。

本研究では、回路パラメータとして回路インダクタンスを増加し、衝撃波の発生を抑えつつ箔へエネルギーを投入することで、接合強度の改善を試みた。セラミックスにはアルミナを、金属箔にはアルミナへの濡れ性の良いチタンを用いた。接合強度は、引っ張り試験で測定した。また、接合界面の様子を EPMA(Electron Probe Micro-Analysis) で調べた。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験回路図を示す。実験装置は、高電圧供給部分、充電用コンデンサ、イグナイトロンスイッチ、コイル、接合台からなっている。高電圧供給部分では、交流電圧を交流電源からネオントランスを介して昇圧し、半波整流回路で直流高電圧を得てコンデンサを任意の電圧に調整した。充電電圧は、コンデンサに並列に挿入した高抵抗に流れる電流でモニターする。充電用コンデンサの静電容量は、 $8.28\mu\text{F}$ である。クロー징スイッチとしてイグナイトロンを用い、サイリスタを用いたトリガ回路でイグニタを点弧する。電流波形は、ロゴスキーコイル(Pearson 4997)を用いて測定し、電圧波形は高電圧プローブ(IWATSU HV-P30)を用いて測定した。回路インダクタンスの調整は、回路に直列にコイルを挿入することで行い、本実験で用いた回路インダクタンスの値は $93.1, 64.8, 38.5, 21.8, 1.13\mu\text{H}$ である。回路インダクタンスは、短絡負荷試験を行い、電流の振動波形の周期と減衰率から求められる。コイルを挿入しない場合の回路の抵抗とインダクタンスは、それぞれ $40.5\text{ m}\Omega$ 、 $1.13\mu\text{H}$ である。

チタン箔の形状を図 2 に示す。接合部分は長さ 20 mm 、幅 2.5 mm 、厚さ $50\mu\text{m}$ であり、この部分の抵抗値は $67.2\text{ m}\Omega$ である。アルミナの形状は、縦 $20\text{ mm}\times$ 横 10 mm 、厚さ 3 mm である。アルミナは、前処理として常温の王水で 3 分間洗浄し、その後、純水を用いた超音波洗浄を 15 分間行い、最後に 120°C に設定した電気炉に入れ、1 時間乾燥を行う。接合台を図 3 に示す。チタン箔を挟み込んだアルミナは、ゴム板を介してベーク板で挟み、4 本のねじを通してボルトで締め固定した。チタン箔の両端は銅板で挟んで、回路に接続する。

アルミナを押さえつける圧力は、4 本のねじの締め付けトルクをトルクレンチ(NAKAMURA N30FK : 測定範囲 $1\sim 30\text{ kg}\cdot\text{cm}$)で測定した。アルミナを押さえつける圧力と接合強度の関係は、圧力を強くすることで接合強度のばらつきが抑制され、接合強度が高くなることがわかっている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。実験では、最大の締め付けトルク $30\text{ kg}\cdot\text{cm}$ で締め付け、アルミナを押さえつける圧力を、 8.3 MPa としている。接

合強度は、接合した試料を図 4 の引っ張りせん断試験により測定した。

エネルギーの転送効率 η は、

$$\eta = \frac{E}{E_c} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

から求めた。

ここで、 E_c はコンデンサに充電されるエネルギー

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(C : コンデンサの容量 $8.28\mu\text{F}$, V : 充電電圧)

であり、 E はチタン箔に注入されるエネルギー

図 1 実験回路

Fig. 1. Experimental circuit.

図 2 チタン箔の形状

Fig. 2. Configuration of titanium foil.

図 3 接合台の構成

Fig. 3. Structure of stage for joining.

図 4 引っ張りせん断試験の様子

Fig. 4. Structure of shear strength test unit.

$$E = \int_0^{\infty} v(t)i(t)dt \dots\dots\dots (3)$$

($v(t)$: 箔に加えられる電圧, $i(t)$: 箔に流れる電流)

である。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 接合試料の概観 接合を成功させるには、注入エネルギーをコントロールすることが重要となる⁽¹⁰⁾。図5(a),(b)は、コンデンサの充電電圧 6.0, 6.7 kV で接合実験を行った後のアルミナサンプルの外観図である。(a)の場合は接合しているが、(b)の場合は金属箔の中心軸に沿って割れている。箔へのエネルギー注入が大きすぎる場合、アルミナは、箔の溶融・気化により生じる衝撃波⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾の影響を強く受け、破壊されることがわかる。図5(c)は、(a)の接合面であり溶融したチタン箔が付着している。溶融前のチタン箔の幅は 2.5 mm であり、アルミナの幅 10 mm の 1/4 であるが、大電流で溶融したチタン箔はアルミナ全面に広がっていることがわかる。

〈3・2〉 回路パラメータと電気的特性 衝撃波の発生と伝搬特性は回路パラメータに強く依存するため⁽¹⁶⁾、接合強度を上昇させるには加熱時間を増加し、衝撃波によるアルミナの破壊を起こさせないことが重要である。ここでは、回路のインダクタンスを制御することでチタン箔に流れる電流の立ち上がり時間やパルス幅を変え、システムの電気的特性や接合強度の変化を調べた。

図6に、回路のインダクタンス 1.13 μH , 充電電圧 6.0 kV のときの箔を流れる電流、箔に加わる電圧、及び箔の消費エネルギーの時間変化を示す。電流、電圧のパルス幅は約 10 μsec 程度であり、非常に短い加熱時間で接合が行われていることがわかる。電流の立ち上がり時間は 2 μsec である。充電電圧 6.0 kV は充電エネルギーに換算すると 149 J であり、このうち箔に注入される(消費)エネルギーは約 126 J (85%) となる。

図5 接合試料の様子 : (a) 充電電圧 6.0 kV, (b) 充電電圧 6.7 kV, (c) 接合面 ($V_C=6.0$ kV)
Fig. 5. Tiles after joining experiments : (a) $V_C=6.0$ kV, (b) $V_C=6.7$ kV, (c) Surfaces of the tile ($V_C=6.0$ kV).

図7に、回路インダクタンス 93.1 μH , 充電電圧 6.8 kV とした場合の電流・電圧波形及び箔の消費エネルギーの時間変化を示す。振動の周期は 172 μsec であり、回路インダクタンス 1.13 μH の場合と比べて加熱時間が増えている。電流の立ち上がり時間は 26 μsec であり、注入されるエネルギーは 106 J, エネルギー転送効率率は 55 %となる。

回路のインダクタンスが増えることで、コンデンサに蓄積されるエネルギーに対する箔へ注入されるエネルギーの割合が減ることがわかる。インダクタンス 93.1 μH のコイルの抵抗値は、約 19 m Ω である。この抵抗によるエネルギー消費が箔へ注入されるエネルギーの割合を減らす原因と考えられる。

図7において電流波形が振動しているが、その振動条件は、実験回路を RLC 直列回路と考え回路方程式を解くと、 $CR^2/4L$ が 1 より小さい場合は減衰振動、等しい場合は臨界制動、大きい場合は過制動となる。R は電流の減衰波形の周期と減衰率から求めると約 400 m Ω となり、これを振動

図6 箔の電流・電圧波形および消費エネルギーの時間変化

Fig. 6. Waveforms of voltage, current, and consumed energy of titanium foil ($L=1.13$ μH , $V_C=6.0$ kV).

図7 コイルを挿入した場合の電流・電圧波形, 消費エネルギーの時間変化

Fig. 7. Waveforms of voltage, current, and consumed energy of titanium foil ($L=93.1$ μH , $V_C=6.8$ kV).

図8 回路インダクタンスとエネルギー転送効率の関係
Fig. 8. Energy transfer efficiency as function of the circuit inductance.

条件に当てはめると、 L が $1.13 \mu\text{H}$ の場合は $CR^2/4L=0.29$ で臨界制動に近い減衰振動となる。 L が $21.8 \mu\text{H}$ の場合は $CR^2/4L=0.015$ となり、振動は減衰振動となる。

図8に、回路インダクタンスとエネルギーの転送効率との関係を示す。数値に多少のばらつきはあるものの、回路インダクタンスを増やすと転送効率が減少することがわかる。コイルを回路に挿入しない $1.13 \mu\text{H}$ において、エネルギーの15%が回路中の損失で消費される。コイルを挿入した場合の損失分の増加は、コイルにおけるエネルギー消費に相当する。

〈3・3〉 接合強度 図9は、回路インダクタンスをパラメータとした箔への注入エネルギーと接合強度の関係を示している。回路インダクタンス一定の条件下で箔の注入エネルギーを増大させると接合強度が増加することがわかる。この注入エネルギーが大き過ぎると、エネルギー注入時の衝撃波と熱応力によりアルミナが破壊される。 $93.1 \mu\text{H}$ の場合は、充電電圧に対する装置上の制約があるため注入エネルギーに上限が存在するが、この上限のエネルギーではアルミナの破壊は起こらない。本実験条件における最大の接合強度 330 kg は、回路インダクタンス $21.8 \mu\text{H}$ 、充電電圧 10 kV 、注入エネルギー 350 J の場合に得られた。この時の電流波形は、図7のように振動し、周期は $84 \mu\text{sec}$ 、電流が流れきるまでの時間は $348 \mu\text{sec}$ である。注入エネルギーが同じ場合、回路インダクタンスが小さいほど接合強度は大きい。注入エネルギー 150 J の場合を比較すると、回路インダクタンスが $1.13, 21.8, 93.1 \mu\text{H}$ の場合の接合強度は、それぞれ $170, 120, 82 \text{ kg}$ である。図から回路インダクタンスを増やすと傾きが小さくなり、接合強度は上昇しにくいことがわかる。従って接合強度を増すには、適当な回路インダクタンスを選ぶことが重要となる。

図10は、回路インダクタンスをパラメータとしたピーク電力と接合強度の関係を示している。回路インダクタンス 21.8 から $93.1 \mu\text{H}$ の範囲は、ピーク電力の増加に比例して接合強度が増すことがわかる。回路インダクタンス $1.13 \mu\text{H}$ の場合だけピーク電力が大きい、これは他の回路インダ

図9 回路インダクタンスを変えたときの接合強度と注入エネルギーの関係
Fig. 9. Shear strength as function of input energy for various circuit inductances.

図10 回路インダクタンスを変えたときの接合強度とピーク電力の関係
Fig. 10. Shear strength as function of peak power for various circuit inductances.

クタンスに比べて加熱時間が極端に短く、また電流の最大値が大きくなるためである。回路インダクタンスが $1.13, 21.8, 38.5 \mu\text{H}$ の場合の振動周期とピーク電流値は、それぞれ ($10 \mu\text{sec}, 9.6 \text{ kA}$)、($84 \mu\text{sec}, 5.1 \text{ kA}$)、($112 \mu\text{sec}, 4.8 \text{ kA}$) である。今後、回路インダクタンス 1.13 から $21.8 \mu\text{H}$ の間について調べる必要がある。

図11は、アルミナの破壊・非破壊の様子を回路インダクタンスと注入エネルギーをパラメータとして示した図である。○はアルミナが破壊しなかった場合、×は破壊した場合を表している。例えば、 $L=21.8 \mu\text{H}$ の場合、 $E_{in}=350 \text{ J}$ では接合に成功しているが、 $E_{in}=388 \text{ J}$ では破壊しており、破壊の臨界点はこの間に存在する。実線は、その臨界点の予想値をグラフ化したものである。箔へ注入できる最大エネルギーは、回路インダクタンス $1.13, 21.8, 38.5 \mu\text{H}$ に対して、それぞれ約 $160, 350, 430 \text{ J}$ と、回路インダクタンスの増加に対して増加していることがわかる。図11には、ピーク電力と回路インダクタンスの関係を重ね書きしてある。▲は、各測定点のピーク電力を示している。×の点に

図 11 回路インダクタンスと箔の最大注入エネルギーおよびピーク電力の関係

Fig. 11. Peak power and Critical energy input to the titanium foil as function of the circuit inductance (×:Fractured, ○:Not fractured).

相当するピーク電力は記載していない。注入エネルギーを増大すると、ピーク電力は増大する。ピーク電力は、回路インダクタンス 1.13 から 21.8 μH の範囲で急激に減少し、その後、緩やかな減少となる。

ろう接法による、アルミナと銀ろう (Ag : 69.9 %, Cu : 27.5 %, Ti : 2.54 %) の接合では、1688 kg の接合強度が得られ、これは我々の溶断接合法で得られる接合強度 330 kg の約 5 倍である。今回のろう接法は、真空焼結炉を用いて 860 $^{\circ}\text{C}$ まで 2 時間 23 分かけて温度を上昇させ、10 分間この温度を保持した後、400 $^{\circ}\text{C}$ まで 1 時間 12 分かけて冷却させ、その後、取り出せる温度まで下げるという方法である。溶断接合法は、極めて短い時間でチタンの沸点 3287 $^{\circ}\text{C}$ まで温度を上昇させるが、アルミナ(沸点:2977 $^{\circ}\text{C}$)との反応層の形成は難しく、また接合面が図 5(c)のように不均一となり、また衝撃波によりアルミナ中にマイクロクラックが発生してしまうことから接合強度が低下すると考えられる。

〈3・4〉 EPMA による接合界面の分析 接合におけるチタンとアルミナの反応状態を確認するため、EPMA (Electron Probe Micro-Analysis) による接合界面観測を行った。図 12 に接合界面の 2 次電子像とライン分析の結果を示す。接合条件は、回路インダクタンス 21.8 μH 、充電電圧 10.0 kV、注入エネルギー 350 J である。左側の領域がチタン層であり、右側の領域がアルミナ層である。この結果から、境界付近に μm オーダーの厚さの中間層(反応層)は確認できなかった。しかし、チタン層の中に球状の領域が存在しており、この領域では Ti の割合が減少して Al が増加していることがわかる。球状の領域は、チタンが溶融・気化した際にアルミナ表面の温度も上昇し、アルミナ中の Al がチタン層内に進入してできたものと考えられる。

図 13 に回路インダクタンス 1.13 μH 、64.8 μH の 2 次電子像を示す。充電電圧は、それぞれ 6.0 kV、15 kV である。チタン層内にある球状の領域の直径は、回路インダクタンスの増加と共に大きくなる。また、回路インダクタンス 1.13

図 12 接合界面の 2 次電子線像とライン分析

Fig. 12. Secondary electronic images of a junction interface, and line analysis ($L=21.8 \mu\text{H}$, $V_c=10.0 \text{ kV}$).

(a)

(b)

図 13 接合界面の 2 次電子線像

Fig. 13. Secondary electronic images of a junction interface : (a) $L=1.13 \mu\text{H}$, $V_c=6.0 \text{ kV}$, (b) $L=64.8 \mu\text{H}$, $V_c=15.0 \text{ kV}$.

図 14 チタン層（縦横 $30 \times 10 \mu\text{m}$ ）内の球状領域の大きさと数の回路インダクタンス依存性

Fig. 14. Number density and diameter of the sphere in the titanium foil as function of the circuit inductance.

μH の場合、チタン層とアルミナ層との間に亀裂が生じ、 $64.8 \mu\text{H}$ の場合は、境界面よりアルミナ側に少し入ったところに亀裂が生じることがわかる。亀裂は、主にチタンとアルミナ間の熱膨張係数の違いにより発生すると考えられる⁽⁶⁾。回路インダクタンスの増加により到達できる接合強度が上がる理由として、大きなエネルギーを箔に注入できることと、チタンとアルミナの境界面での亀裂の発生が小さいことが考えられる。

図 14 は、チタン層（縦横 $30 \times 10 \mu\text{m}$ ）内の球状領域の数、最大直径と回路インダクタンスの関係を示す。それぞれの観測条件は、 $1.13 \mu\text{H}$ ($V_c=6.0 \text{ kV}$)、 $21.8 \mu\text{H}$ ($V_c=10.0 \text{ kV}$)、 $38.5 \mu\text{H}$ ($V_c=12.0 \text{ kV}$)、 $93.1 \mu\text{H}$ ($V_c=15.0 \text{ kV}$) である。回路インダクタンスの増加に伴い球の直径は大きくなり、数は少なくなる。これは、回路インダクタンスの増加に伴い振動周期、電流が流れきる時間が増加して加熱時間が増大したことで、発生した小さい球状領域が数個集まり、1 個の大きい球状領域へと成長したためと考えられる。図 9, 14 より球状領域の径が大きい場合、接合強度は低下する傾向があることがわかる。これらの物性と強度との関係は、今後の課題である。

4. むすび

パルス電流を利用したアルミナとチタンの接合における、回路インダクタンスの影響と接合強度について調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

接合強度は、箔への投入エネルギーの増加に伴い上昇する。回路インダクタンスが小さい場合、箔に注入できるエネルギーは小さいが、エネルギー転送効率は高い。回路インダクタンスが大きい場合は、エネルギー転送効率は低い、箔に注入できるエネルギーは大きく、到達できる接合強度は上昇する。また、注入エネルギーが同じ場合、回路インダクタンスを大きくすると接合強度は減少する。回路インダクタンス $21.8 \sim 93.1 \mu\text{H}$ の範囲では、接合強度はピーク電力の増加に比例して強くなる。加熱時間は回路イン

ダクタンスに依存することから、接合強度は加熱時間により変化する。

本研究を進めるにあたり、ご助言をいただきましたフェローユムの小山稿一氏、実験にご協力いただきました岩手大学の加藤昭二氏に深く感謝いたします。また本研究は RSP 事業（H10-22）の一環として行われた。

（平成 14 年 9 月 12 日受付，平成 15 年 2 月 24 日再受付）

文 献

- (1) M. Salvo, P. Lemoine, M. Ferraris, M. Montorsi, and M. Merola : "Joining of carbon-carbon composites for thermonuclear fusion application", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 80, pp.206-212 (1997)
- (2) H. Aono, M. Sato, E. Traversa, M. Sakamoto, and Y.Sadaoka : "Design of ceramic materials for chemical sensors: effect of SmFeO_3 processing on surface and electrical properties", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, pp.341-347 (2001)
- (3) J. Zheng, O. Unal, and M. Akinc : "Green state joining of silicon carbide using polycarbosilane", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 83, pp. 168-1692 (2000)
- (4) Martinelli, R. Drew, E. Fancello, R. Rogge, and J. Root : "Neutron diffraction and finite-element analysis of thermal residual stresses on diffusion-bonded silicon carbide-molybdenum joints", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, pp.1787-1792 (1999)
- (5) M. Gopal, M. Sixta, L. De Jonghe, T. Perham, L. Jonghe, and G. Thomas : "Seamless joining of silicon nitride ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, pp.708-712 (2001)
- (6) 岩本信也・宗宮重行：金属とセラミックスの接合 日本における接合研究の現状，内田老鶴圃 (1998)
- (7) K. S. Yushchenko, V. S. Nesmikh, and I. V. Dubovetskii : "Application of conductor electric explosion to join ceramics", *Adv. Joining Newer Struct. Mater.*, pp.109-116 (1990)
- (8) J. Binner, P. Davis, J. Fernie, and I. Dubovetskii : "Characterisation of the join of electric discharge pulse welded ceramics", *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 15, pp.1037-1041 (1995)
- (9) S. Turan, I. Bucklow, and R. Wallach : "Capacitor-discharge joining of oxide ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, pp.1242-1248 (1999)
- (10) K. Takaki, Y. Fujimaki, Y. Takada, M. Itagaki, T. Fujiwara, S. Ohshima, K. Oyama, I. Takahashi, and T. Kuwashima : "A capacitor discharge technique with optimized energy for joining ceramics", *Vacuum*, Vol. 65, pp.457-462 (2002)
- (11) K. Takaki, Y. Takada, M. Itagaki, T. Fujiwara, S. Ohshima, K. Oyama, I. Takahashi, and T. Kuwashima : "Influence of energy deposition on bonding metal interlayer in capacitor discharge joining of oxidized ceramics", *Surf. Coat. Technol.* (on review)
- (12) K. Takaki, Y. Takada, M. Itagaki, T. Fujiwara, S. Ohshima, I. Takahashi, and T. Kuwashima : "Compact system for ceramics joining using explosive interlayer metal foil", *Proc. of 2002 Power Modulator Conference & High Voltage Workshop, Hollywood* (in print)
- (13) 溶接構造研究委員会：「異材接合界面の力学(Part1) 接合界面の力学的取り扱い及び界面強度評価と制御」，溶接学会溶接構造研究委員会技術資料，No.1 (1991)
- (14) I. Listsyn, T. Muraki, and H. Akiyama : "Feature of shock wave formation in a wire induced surface flashover", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp.1676-1678 (1997)
- (15) T. Tucker : "Behavior of exploding gold wire", *J. Appl. Phys.*, Vol.32, pp.1894-1990 (1961)
- (16) T.Kobayashi, K.Takaki, and T.Fujiwara : "Optical measurements of the development of shock waves from pulsed arc discharge", *The Papers of Technical Report, IEE Japan*, ED-98-211, pp.13-17 (1998) (in Japanese)

小林拓徳・高木浩一・藤原民也：「パルスアーク放電からの衝撃波進展の光学的計測」，電気学会放電研資 ED-98-211, pp.13-17 (1998)

高 田 良 宏

(学生員) 1978年12月1日生。2001年3月岩手大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士前期課程入学，現在に至る。主として，大電流通電法を用いたセラミックス接合に関する研究に従事。

藤 原 民 也

(正員) 1947年4月17日生。1973年3月東北大学大学院修士課程修了。同年4月一関高専電気工学科助手。1975年4月岩手大学工学部電気電子工学科助手，講師，助教授を経て1994年2月同教授。1987年3月～1988年3月マサチューセッツ工科大学客員研究員。工学博士。応用物理学会，電気設備学会，プラズマ・核融合学会会員。

高 木 浩 一

(正員) 1963年10月16日生。1988年3月熊本大学大学院修士課程修了。1989年4月大分高専電気工学科助手。1996年4月岩手大学工学部電気電子工学科助手，2001年3月同助教授，現在に至る。2000年10月～2001年9月マクマスター大学客員研究員。博士(工学)。IEEE，日本物理学会，静電気学会会員。

大 島 修 三

(正員) 1933年1月2日生。1958年3月北海道大学電気工学科卒業。同年日立製作所多賀城工場勤務。横浜工場，(株)日立水沢製作所取締役工場長を経て退職。岩手大学大学院工学研究科博士後期課程修了，現在，(財)いわて産業振興センター，科学技術振興事業団科学技術コーディネータ。博士(工学)，電気学会会員。

板 垣 稔

(正員) 1946年11月17日生まれ。65年3月黒沢尻工業高等学校卒業。同年4月岩手大学工学部電気工学科技術員，98年技術専門職員，現在に至る。主としてプラズマの生成制御に関する研究に従事。

高 橋 幾久雄

(非会員) 1944年11月21日生。1963年3月岩手県立黒沢尻工業高等学校卒業。岩手県工業技術センターに勤め，現在に至る。YAGレーザー加工，溶射加工，熔融亜鉛メッキ表面処理等に従事。

向 川 政 治

(正員) 1970年9月15日生。1998年3月広島大学大学院博士課程後期修了。同年8月広島大学ナノデバイス・システム研究センター講師(研究機関研究員)。2001年4月岩手大学工学部電気電子工学科助手。現在に至る。博士(理学)。応用物理学会，日本物理学会会員。

桑 嶋 孝 幸

(非会員) 1966年2月8日生。1988年3月岩手大学工学部金属工学科卒業。同年4月岩手大学大学院工学研究科入学。1989年4月同中退。同年4月岩手県工業試験場(現 岩手県工業技術センター入所)勤務，現在に至る。溶射，接合，レーザー加工に関する研究，企業支援に従事。日本溶接学会，高温学会，日本溶射協会会員。