

研 究 論 文

パルスグライディングアークにおける直列インダクタンスの影響

豊橋技術科学大学

大研化学工業
栗田製作所
新東ブレーター志岐 肇、齋藤春樹
桶真一郎、須田善行
滝川浩史
山中重宣、大川 隆
西村芳実、菱田茂二
薄木英二

Influence of Series Inductance in Pulsed Gliding Arc Discharge

Hajime SHIKI, Haruki SAITO, Shinichiro OKE, Yoshiyuki SUDA, Hirofumi TAKIKAWA,
Shigenobu YAMANAKA*, Takashi OKAWA*, Yoshimi NISHIMURA**,
Shigeji HISHIDA**, Eiji USUKI***

Toyohashi University of Technology, *Daiken Chemical Co., Ltd.,

Kurita Seisakusho Co., Ltd., *Sintobator Ltd.

Abstract

Gliding arc (GA), including pulsed gliding arc (PGA) discharge, is available to treat the surface of various materials. The multiple PGA discharge system has been developed by employing the series inductances connecting in each discharge circuit. However, the influence of the series inductance on feature of PGA has not been investigated well. In the present study, in case of single PGA, the discharge aspect, radiation spectra, surface treatment ability, and voltage/current waveform, were investigated as a function of series inductance (0 - 60 mH). It was found that when the series inductance was employed, the discharge current, radiation, and diameter of arc column decreased. On the other hand, the voltage between electrodes increased and the energy of plasma particles were increase. With 30-mH inductance, the electric power, treatment ability, treatment width, and treatment temperature were maxima and the relative number density of active NO was indicated to be the largest.

Keywords: Atmospheric pressure plasma jet, Pulsed gliding arc, Series inductance, Radiation spectra, Surface modification

1. はじめに

開放大気空間へ発生できる放電プラズマの一つにグライディングアーク (Gliding Arc : GA) がある^{1, 2)}。GA の基本構造と動作は次のとおりである。ガス流中に配置した2個の末広がり電極間に高電圧を印加し、電極間の最短ギャップ位置でアーク放電を発弧させる。アークはガス流で押し流され、末広がり電極に沿って下流へと移動し、アーク維持電圧が入力電圧を超えるとアークは消弧する。そこで、高電圧を連続的

あるいは断続的に印加し、アークの発弧・移動 (gliding)・消弧の過程を連続的あるいは断続的に繰り返すと、GA は電極間が構成する二次元空間に擬似的な平面プラズマを形成する。アーク陽光柱の上・下流には非平衡プラズマ状態のプルームが形成され、ガス流速・流量が十分であれば、電極端を越えてプラズマジェットが伸びる。

GA は、当初、直流や交流電源を用いて発生させられ、大気汚染物質である H₂S などの分解

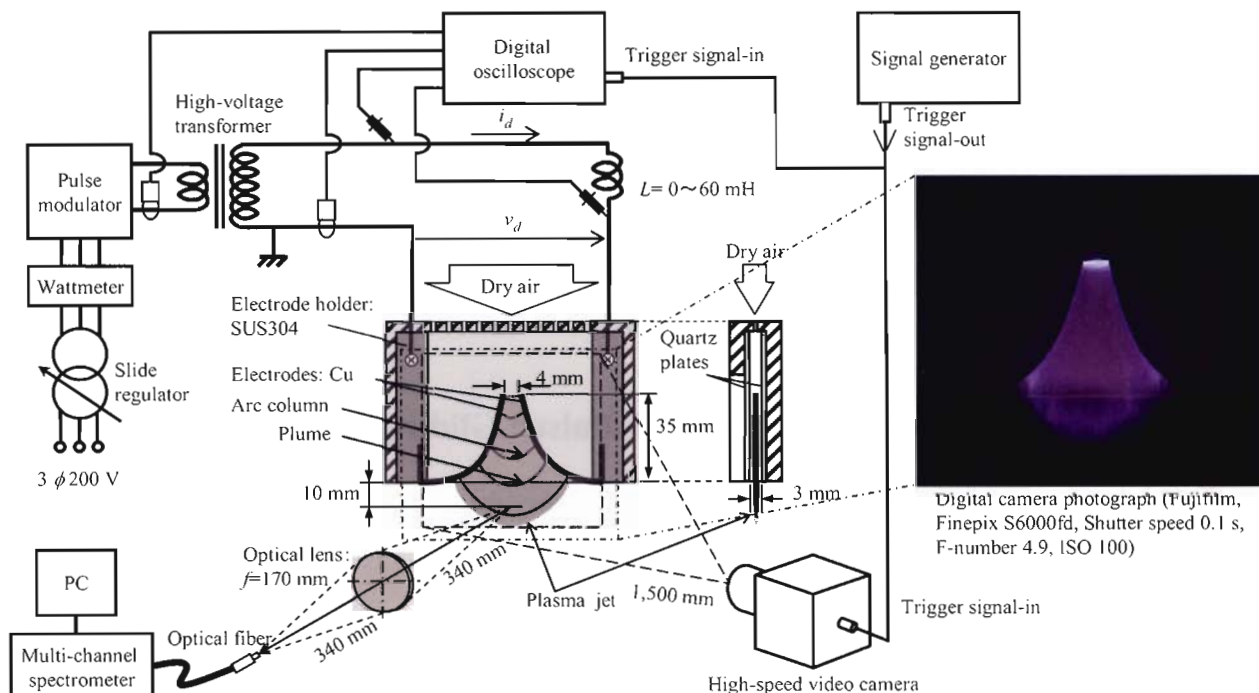


Fig.1 Pulsed gliding arc (PGA) generating system and measurement system.

が検討された¹⁾。最近では、高周波パルス電源を用いた方法も提案され、樹脂やガラス、金属などの表面処理への応用が示されている³⁾。筆者らも、高周波パルス電源を用いた大気圧プラズマジェットとしてPEN-Jet (Plasma ENergized-Jet)⁴⁻⁸⁾やGA⁹⁻¹¹⁾の開発を進めてきている。その過程で、一台のパルス電源を用いて、複数のGAやPEN-Jetを同時に発生する放電回路を提案している⁶⁻⁹⁾。同回路は、アーク放電回路へインダクタンスやキャパシタンスを直列に接続するものである。例えば、二つのGAを同時に発生させる場合、片方のGAが発生しても、インダクタンスによってもう片方のGAの電極間にも高電圧が印加され放電が開始する。しかしながら、これまで、このインダクタンスやキャパシタンスの最適化や放電現象への影響などについての検討を行っていなかった。

以上のような背景から、本論文では、パルスアークの複数同時発生やマルチ内部電極PEN-Jet⁶⁾に接続する回路定数を最適化する前準備

として、単一のパルスグライディングアーク (Pulsed Gliding Arc; PGA) に関し、直列インダクタンスを接続したときの放電の様子、放射スペクトル、表面処理効果、および電流・電圧波形の変化について検討した。なお、キャパシタンスについては、0~10,000 pFを接続してみたが、放電状態に及ぼす影響がほとんど見られなかったため、回路に接続しない(0 F)こととした。

2. 実験

PGA発生装置をFig.1に示す。PGAの電極は銅線(Cu、直径:1.5 mm)を用い、同図のような形状とした。電極間の最短ギャップは4 mmとした。この電極対を2枚の石英板(板厚:1 mm、50 mm×60 mm)の間に配置した。石英板間の間隔は3 mmとした。動作ガスは空気とし、ドライヤ付きスクロール型コンプレッサ(Hitachi、PSD5.5A)で室内空気をリザーバタンク(Hitachi、ST150C)に貯め、圧力レギュレータおよびデジ

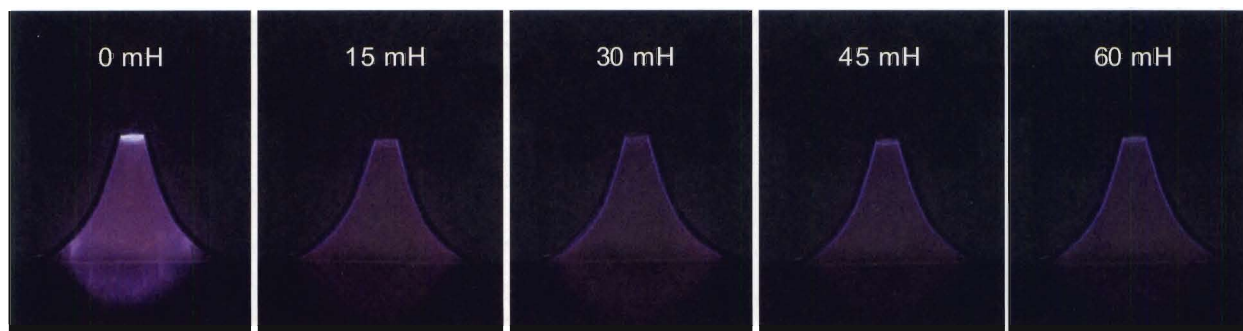


Fig.2 Photographs of PGA for different inductance. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s)

タル流量計（キーエンス製、SEF-21A）を介して PGA 装置に供給した。

電源は、出力可変用スライドレギュレータ（松永製作所、S3-2413：5.2 kVA、200 V）、両極性パルスモジュレータ（栗田製作所：6 kW、30 A）、および高電圧トランス（栗田製作所：最大 12 kV）で構成した。パルスモジュレータへの入力電力を、PGA システム全体への入力電力とみなし、クランプ電力計（Hioki、3168；クランプ電流プローブ（Hioki、9694））を用いて測定した。電極間電圧（＝放電電圧）、および放電電流を、高電圧プローブ（North Star、Model PM12、プローブ比 1000：1）と電流プローブ（Pearson、model 110、0.1 V/A）を介し、デジタルオシロスコープ（横河電機、DL-1540L）を用いて測定した。

今回の実験では、パルスモジュレータへの入力電力を 300 W、パルスモジュレータ出力電流のパルス幅を 2 μ s、パルス周波数を 30 kHz（連続発振）、空気流量を 40 ℓ /min とした。なお、パルスモジュレータへの入力電力は放電の状況によって変化するため、そのつど、スライドレギュレータによって入力電力 300 W 一定となるようにした。これらの条件で発生させた PGA の様子の一例を Fig.1 の挿入図に示す。

Fig.1 には、PGA のプラズマジェット部から放射されるスペクトルの分光計測システムの構成、および PGA の高速度ビデオ撮影の装置構成も示す。分光計測は、ジェット中心軸上におい

て、装置出口から 10 mm の位置でジェット平面から垂直方向へ放射される光に対し、石英レンズおよび石英ファイバを介し、マルチチャンネル分光器（相馬光学、Fastvert S2400；スリット幅 30 μ m、分解能 1.3 nm）を用いて行った。計測条件は露光時間を 500 ms、積算回数を 50 回とした。高速度ビデオ撮影は、高速度カラービデオカメラ（Photron、Fastcam-Spectra/UV；フレーム速度 40,500 FPS、撮影画素 64×64 pix）を用いた。アーク陽光柱の動きと電圧・電流波形とを同期して計測するために、シグナルジェネレータ（エヌエフ回路設計ブロック、WF1944）の出力端子を分岐して、高速度ビデオカメラとオシロスコープのそれぞれのトリガ入力端子へ接続し、シグナルジェネレータからパルス波を出力することで、高速度ビデオカメラおよびオシロスコープのトリガとした。

放電回路へ接続する直列インダクタンス L には、4 個の空芯コイル（1 個あたり 15 mH、巻線抵抗：20 Ω ）を用い、15、30、45、60 mH と変化させた。

表面処理効果を比較するため、ポリエチレンテレフタレート（PET；50 mm×20 mm、1 mm 厚）基板に対して PGA を照射した。基板は PGA 出口から 10 mm 下流に配置し、照射時間は定点で 5 s とした。照射直後、接触角計（協和界面化学、Dropmaster 300、液体：蒸留水、1.5 μ l）を用いて、蒸留水の接触角を測定した。

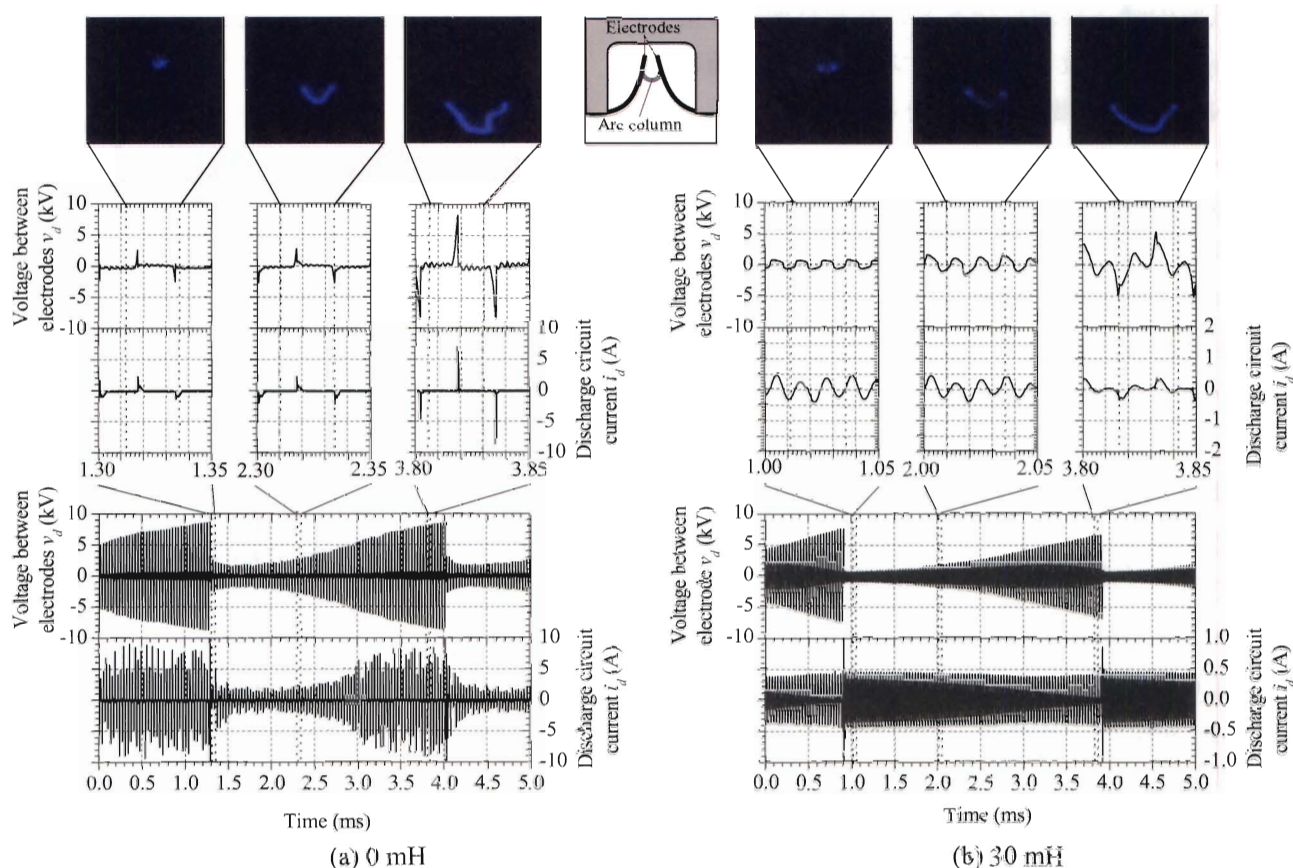


Fig.7 High-speed video-camera shots, voltage and current waveforms of PGA without inductance and with 30-mH inductance. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s)

(アズワン、TM-300)を用いて計測した。PGA装置出口-基板間距離は10 mmとした。その結果を **Fig.6** に示す。表面温度は 0 mH のとき 150°Cであったが、インダクタンスが増加するに従い上昇し、30 mH のとき最大となり、220°Cを示した。さらにインダクタンスを増加させると基板温度は低下した。

4. 考察

インダクタンスを接続することによって、プラズマジェットの様相が変わり、表面処理効果に変化した。一方、冒頭で述べたように、GAは、巨視的時間スケールにおいてアークの発弧・移動・消弧を周期的に繰り返す断続的な放電である。電源周波数はその周期よりも早いいため、発弧から消弧までの電氣的な状況も把握する必要がある。**Fig.7** に、インダクタンスを接続

しない場合 (0 mH) と接続した場合 (30 mH) の電極間電圧 v_d および放電電流 i_d の波形と PGA の高速度ビデオカメラ写真を示す。アーク陽光柱の長さが伸びるに連れて、放電開始電圧および維持電圧が上昇するため、巨視的時間スケールで見た電極間電圧波形は、のこぎり波状になる。のこぎり波の周期は、最短ギャップにおけるアークの発弧から、アーク陽光柱が下流で消弧までの時間に対応している。この周期は 0 mH の場合では 2.7 ms、30 mH の場合では 3.0 ms である。つまり、30 mH の方が長いアーク陽光柱を維持していることを示している。また、高速度ビデオカメラ写真からは、30 mH の方が 0 mH の場合に比べてアーク陽光柱の直径が小さいことが見て取れた。

微視的時間スケールの電圧・電流波形を見ると、以下のことがわかる。0 mH の場合、パ

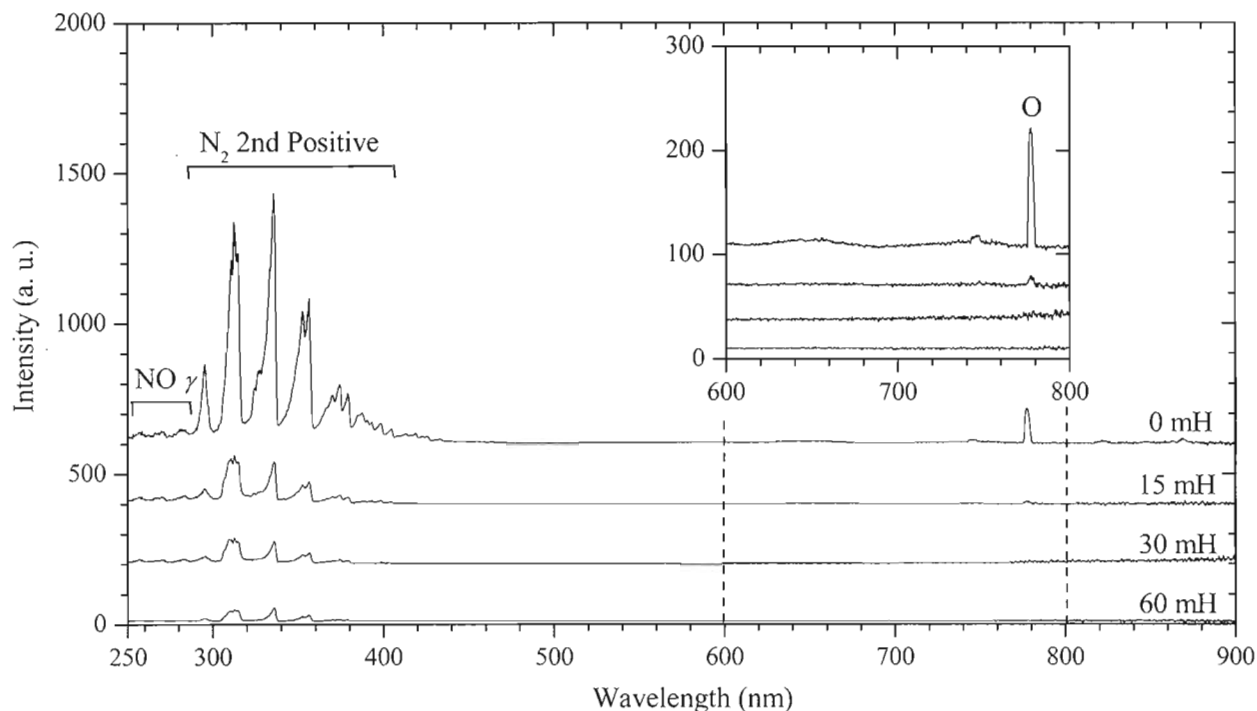


Fig.3 Radiation spectra at 10 mm downstream from the exit as a function of series inductance. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s)

3. 実験結果

3.1 PGA の様相

Fig.2 にインダクタンスを変えた場合の PGA の様相を示す。同一の撮影条件（富士フィルム製デジタルカメラ、Finepix S6000fd；シャッター速度 0.1 s、F 値 4.9、ISO 100、視感度フィルターなし）で撮影したものである。インダクタンスが増加すると、0～30 mH の間ではプラズマジェット伸びと幅が拡大した。しかし、さらにインダクタンスを増加させると、プラズマジェットの伸びと幅は若干縮小した。また、プラズマジェットからの放射の強さは、0 mH の場合がもっとも強く、インダクタンスが増加するにつれて弱くなった。

3.2 PGA からの放射スペクトル

Fig.3 に、PGA の出口から 10 mm 下流の位置のプラズマジェットから放射されるスペクトルを示す。全ての条件における放射スペクトルから、窒素 (N_2 Second Positive バンド ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$))

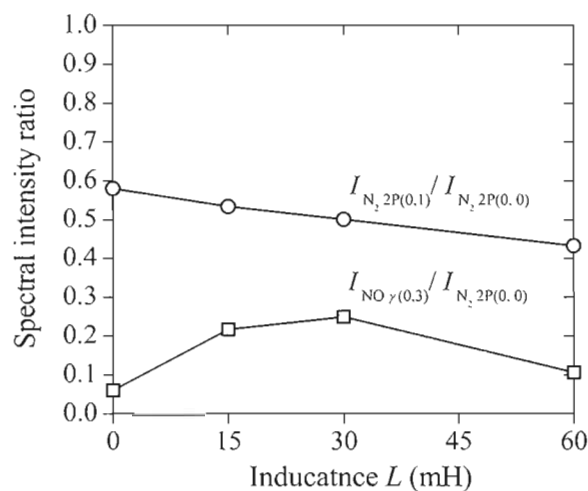


Fig.4 Spectral intensity ratio as a function of series inductance. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s)

と一酸化窒素 ($NO\ \gamma$ バンド ($A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$)) の分子スペクトルが観測された。0 mH と 15 mH の場合は、酸素の原子スペクトルが観測されたが、30 mH 以上では観測されなかった。インダクタンスが増加するに従い、観測されたスペクトルの強度は全体的に減少した。これは、インダクタンスが増加するにつれてプラズマジェットが

らの放射の強さが弱くなるという写真撮影の結果 (Fig.2) と一致しており、プラズマ中の励起した NO や N_2 が減少したことを示している。

Fig.4 に N_2 Second Positive バンドの (0, 1) と (0, 0) の強度比 $I_{N_2\ 2P(0,1)} / I_{N_2\ 2P(0,0)}$ 、および NO γ バンド (0, 3) と N_2 Second Positive バンド (0, 0) のスペクトルの強度比 $I_{NO\ \gamma(0,3)} / I_{N_2\ 2P(0,0)}$ のインダクタンス依存性を示す。 $I_{N_2\ 2P(0,1)} / I_{N_2\ 2P(0,0)}$ は、インダクタンスが増加するにつれて減少している。両バンドスペクトルの r-centroid $\bar{r}_{(v,v')}$ (平均核間距離) はそれぞれ、 $\bar{r}_{(0,0)} = 0.1184$ nm、 $\bar{r}_{(0,1)} = 0.1147$ nm と、 $\bar{r}_{(0,0)}$ の方が大きいことがわかっている¹²⁾。従って、核間距離が長い N_2 粒子、つまり、振動温度の高い N_2 粒子が、相対的に増加したと判断できる。また、 $I_{NO\ \gamma(0,3)} / I_{N_2\ 2P(0,0)}$ は、30 mH のとき最大となった。このとき、プラズマ中の NO 粒子が相対的に増加し、最大となったことを示している。

3.3 表面処理効果

PET 基板へ PGA を照射後、照射中心を 0 mm の位置として、10 mm 刻みに離れた位置の基板表面の接触角を測定した。その結果を **Fig.5** に示す。0 mH の場合、中心位置での接触角は 30° であった。中心から ± 10 mm 離れた位置では 50° 以上であった。一方、30 mH の場合、中心位置で約 17° 、 ± 10 mm の位置で約 20° となり、中心位置と 10 mm 離れた位置での接触角が、0 mH の場合の中心位置での接触角よりも小さくなった。つまり、プラズマの表面処理効果および処理範囲の両方の点で 0 mH より向上したといえる。これは 30 mH のインダクタンスを接続したことで、プラズマジェットの幅が拡大したこと、および表面処理反応に寄与すると考えられる NO 粒子⁶⁾が相対的に増加したことの 2 つの現象に起因すると判断できる。しかし、60 mH の場合、中心位置の接触角が 27° 、 $+10$ mm の位置で約 30° 、 -10 mm の位置で約 40° となった。つまり、0 mH の場合より処理効果が現れ

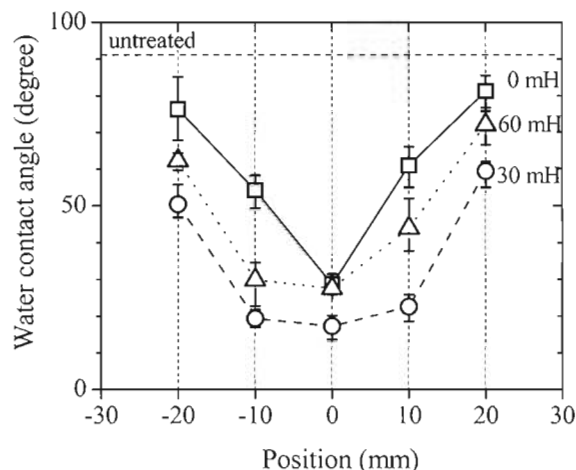


Fig.5 Distribution of water-contact angle on PET substrate immediately after PGA irradiation. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s; plasma irradiation, 5 s)

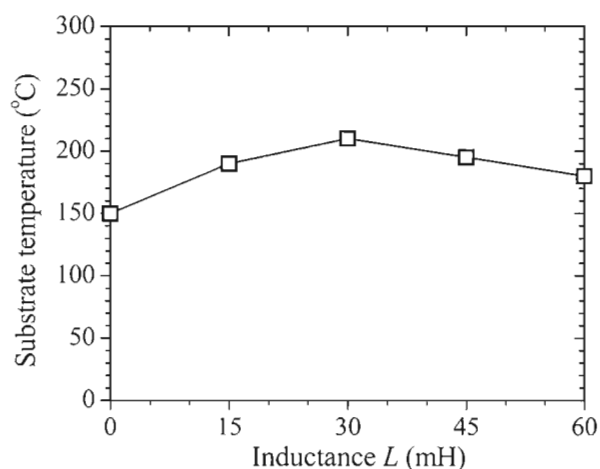


Fig.6 Ceramic substrate temperature at PGA irradiation center. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s; plasma irradiation, 120 s)

ている範囲は広いものの、30 mH の場合より処理効果は低いと言える。これは、60 mH の場合では、0 mH の場合に比べ、プラズマジェットの幅が広がったことで処理範囲も拡大したものの、NO 粒子が 30 mH の場合に比べて低下したために処理効果が低下したと考える。

3.4 PGA 照射後の基板温度

セラミック基板 (Al_2O_3 ; 100 mm $\times$ 100 mm、厚さ 8 mm) の中央に 120 s 間 PGA を定点照射し、PGA 照射中心の基板温度を熱電対式温度計

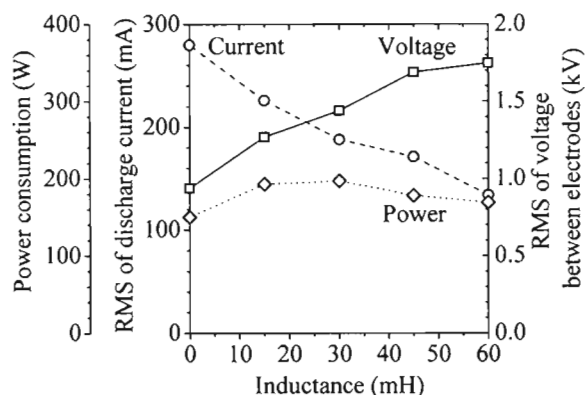


Fig.8 Root mean squares (RMS) of discharge current and voltage between electrodes, and power consumption of PGA. (Power supply, 300 W, 30 kHz, 2 μ s)

ルス状の電極間電圧 v_d が印加され、放電開始電圧に達すると、アーク放電が発生し、放電電流が流れる。アーク放電が生じている間は、電極間電圧は低下する。アーク放電はパルス電圧が印加されている間だけ生じるため、微視的時間スケールにおいても断続的である。一方、30 mH の場合、電極間電圧 v_d と放電電流 i_d は、パルス形状波形というよりも交流波形に近い。これは、比較的、持続的な放電であることを示している。接続したインダクタンスと回路の浮遊容量とによる発振作用によって交流的になったと解釈している。交流的な持続放電となることによって、アーク陽光柱の維持が容易となり、プラズマジェット伸びと幅が拡大したと考える。

インダクタンスを変化させたときの放電電流の二乗平均値（放電電流の実効値に相当）と電極間電圧の二乗平均値（電極間電圧の実効値に相当）、および電流・電圧波形の掛け算を時間平均して求めた消費電力を **Fig.8** に示す。インダクタンスが増加すると、放電電流は減少するが、電極間電圧は増加する傾向がわかる。電流の減少は、全体の放射が弱くなること、およびアーク陽光柱の直径が細くなることの原因として解釈できる。一方、消費電力は 30 mH で最大となり、基板温度が最も高くなる、および表面処理

効果が最もよい、という傾向と一致している。

5. まとめ

パルス電源を用いた GA (PGA) において、PGA の回路にインダクタンス (0~60 mH) を直列に接続したときの影響について、放電様相、放射スペクトル、処理効果、および放電波形などの観点から実験的に評価した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) インダクタンスを接続すると、放電が交流的となり、放電電流が減少し、全体放射強度が低下し、アーク陽光柱が細くなった。
- (2) 消費電力（放電電力）は 30 mH のときに最も高い。このとき、活性力の高い NO 粒子が最も多くなる傾向が示唆された。また、処理温度が最も高く、処理効果も最もよく、処理幅も広がった。

以上を技術的応用面から換言すれば、PGA をインダクタンスなしで利用するよりも、適切な直列インダクタンスを接続することで、プラズマのマルチ化のためだけでなく、処理効果の向上のために利用できることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」、豊橋技術科学大学未来技術流動研究センター重点研究プロジェクト、ベンチャービジネスラボラトリプロジェクト研究、未来ビークルリサーチセンタープロジェクト研究、JSPS の拠点大学交流事業（日韓協力事業「次世代半導体開発」、日中協力事業「先進核融合炉の炉心と炉工学に関する研究」）、平成 19 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「高機能、高感性を有するスポーツ衣料素材の開発」、および平成 20 年度シーズ発掘試験（A：発掘型）などの支援を受けて行われた。

References

- 1) A. Czemichowski: Gliding arc. Applications to engineering and environment control, *Pure and Applied Chemistry*, **Vol.66 No.6** (1994) pp.1301-1310.
- 2) A. Fridman, S. Nester, L. A. Kennedy, A. Saveliev, O. Mutaf-Yardimci: Gliding arc gas discharge, *Progress in Energy and Combustion Science*, **Vol.25** (1999) pp.211-231.
- 3) K. Matsunaga K. Yukimura: Application reports of the atmospheric plasma generated by unique pulsed power suppliers, *The Papers of Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Jpn.*, **ED-01-265** (2001) pp.11-18 (in Japanese).
- 4) J. Toshifuji, T. Katsumata, H. Takikawa, T. Sakakibara, I. Shimizu: Cold-plasma jet under atmospheric pressure for surface modification, *Surface and Coating Technology*, **Vol.171** (2003) pp.302-306 (in Japanese).
- 5) H. Shiki, J. Motoki, H. Takikawa, T. Sakakibara, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Okawa, T. Ootsuka: Electrode erosion in pulsed air-arc meso-plasma jet under atmosphere, *Transactions on the Institute of Electrical Engineers of Japan A*, **Vol.127 No.10** (2007) pp.567-573 (in Japanese).
- 6) H. Shiki, Y. Ito, H. Takikawa, E. Usuki, T. Okawa, S. Yamanaka, Y. Nishimura, S. Hishida: Fundamental properties of 4-in-1 Plasma ENergized-Jet at atmospheric pressure, *Vacuum*, **Vol.83** (2008) pp.29-33.
- 7) H. Shiki, J. Motoki, Y. Ito, H. Takikawa, E. Usuki, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, Y. Nishimura, S. Hishida: Development of atmospheric-pressure plasma-jet with multi-inner-electrodes, *J. Institute of Applied Plasma Science*, **Vol.15, No.1** (2008) pp.23-28 (in Japanese)
- 8) H. Shiki, H. Saito, S. Oke, Y. Suda, H. Takikawa, E. Usuki, T. Okawa, S. Yamanaka, Y. Nishimura, S. Hishida: Individual control of discharge current of inner electrodes in 4-in-1 PEN-jet, *J. Institute of Applied Plasma Science*, **Vol.16, No.1** (2008) pp.69-72 (in Japanese)
- 9) H. Shiki, J. Motoki, H. Takikawa, G. C. Xu, T. Sakakibara, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Nishi, T. Okawa: Pluralization technique of gliding arc plasma, *J. Institute of Applied Plasma Science*, **Vol.12** (2004) pp.41-46 (in Japanese).
- 10) H. Shiki, J. Motoki, Y. Ito, H. Takikawa, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, E. Usuki, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Sakakibara: Development of split gliding arc for surface treatment of conductive material, *Thin Solid Films*, **Vol.516** (2008) pp.3684-3689.
- 11) Y. Ito, H. Shiki, H. Takikawa, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, E.Usuki: Low-temperature sintering of indium tin oxide thin film using split gliding arc plasma, *Japanese Journal of Applied Physics*, **Vol.47 No. 8** (2008) pp.6956-6959.
- 12) A. Loufthus, P. H. Krupenie: The spectrum molecular nitrogen, *J. Physics and Chemical Reference Data*, **Vol.6** (2007) pp.113-307.