

## 研究論文

グライディングアークの出射孔サイズが  
樹脂フィルム印字面前処理に及ぼす影響

豊橋技術科学大学 内田裕也、須田善行  
滝川浩史  
北九州工業高等専門学校 田上英人  
大三紙業株式会社 山本五男

**Influence of Exit Aperture Size of Gliding Arc  
on Pre-Treatment of Polymer Film prior to Ink Jet Printing**

Yuya UCHIDA, Yoshiyuki SUDA, Hirofumi TAKIKAWA,  
Hideto TANOUE\*, Itsuo YAMAMOTO\*\*

Toyohashi University of Technology

\*Kitakyushu National College of Technology

\*\*Daisan Films Converting Co., Ltd.

**Abstract**

A method to improve the adhesion of a best-before date or expiration date on food packaging printed by ink-jet printer is employment of pretreatment, such as plasma irradiation. One of the candidates to be used in this process is the gliding arc which is a kind of atmospheric pressure plasma. In this paper, the effect of exit aperture size of gliding arc was investigated. The experimental parameters were short- and long-sides lengths of the rectangular aperture. Treated width and residual ratio of printed ink after rubbing test was measured. Maximum treatment width was about 40 mm and maximum residual ratio of printed ink was over 60%. The tendency of the effect of the aperture size was considered from downstream gas velocity and normal and high-speed observation of the plasma and its irradiation aspect. As a result, it was found that the arc column played dominant role for this surface treatment.

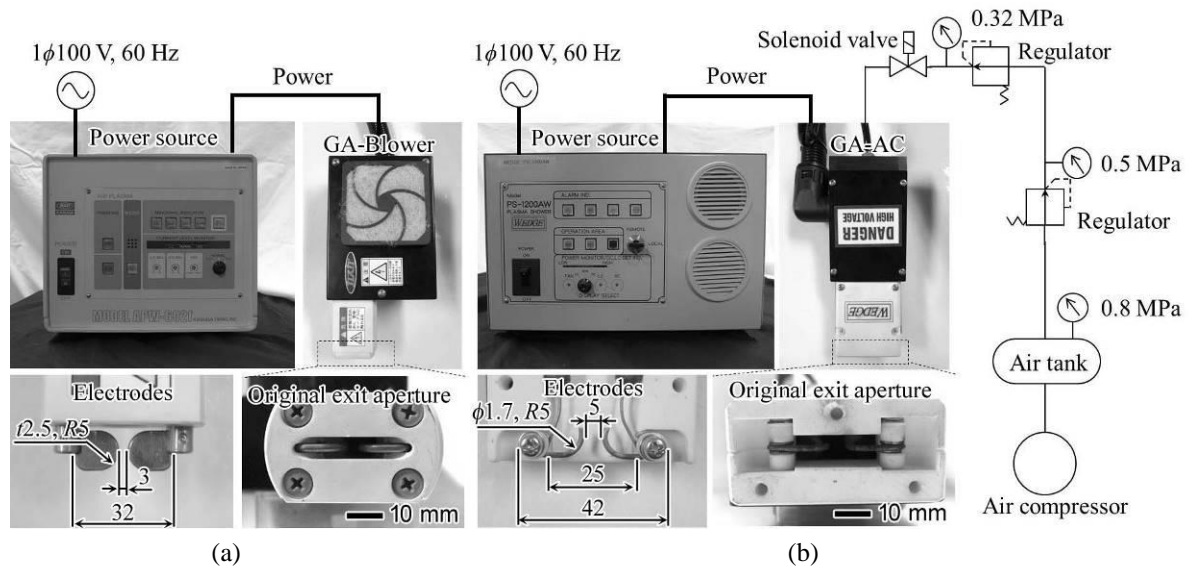
**Keywords:** Atmospheric pressure plasma, Gliding arc, Exit aperture size, Polymer film, Ink jet print, Pre-treatment

**1. 緒言**

食品包装には、賞味期限や消費期限などの期限表記が付されている。期限表記は包装へ直接印字することが多く、産業用インクジェットプリンタ<sup>1-2)</sup>などが用いられている。包装資材には一般にポリプロピレン (Polypropylene, PP) などの高分子樹脂フィルムが用いられているが、表面エネルギーが小さく、不活性であるため、インクとの密着性が低い。その結果、製品の流通過程で印字が脱落してしまう場合があるという問題がある。その防止策として、樹脂フィルムに表面処理を施すことでインクの密着性を向上させる手法がある。乾式の表面処理法として、紫外線 (UV) 照射法<sup>3)</sup> やプラズマ照射法<sup>4)</sup> などがある。後者は低圧プラズ

マ<sup>5)</sup> と大気圧プラズマ<sup>6-14)</sup> とに大別される。大気圧プラズマは、単純な装置構成、簡単な操作、低いランニングコスト、高い処理速度および連続処理性といった工業生産上の様々な利点から注目されている。

大気圧プラズマの発生方法には、コロナ放電<sup>8)</sup>、グロー放電<sup>9)</sup>、誘電体バリア放電<sup>10)</sup>、アーク放電<sup>11)</sup> などがある。一般に、樹脂フィルムの表面処理はコロナ放電<sup>8)</sup> が主流である。コロナ放電処理装置は、高電圧電極と接地電極とで構成され、電極間にプラズマを発生させ、その領域に被処理物を通過させて処理するものである。装置構成が簡単で、高速処理が比較的容易である。しかし、これを既存の製造ライン装置へ組み込む場合、被処理



**Fig.1** Gliding arc (GA) systems used in this study; (a) GA with air supplied by blower (GA-Blower), and (b) GA with air supplied from air compressor (GA-AC) (size unit; mm).

物を挟むように電極を配置する必要があり、設置が容易とは限らない。

ところで、大気圧プラズマの一種にグライディングアーク (Gliding Arc, GA)<sup>12-14)</sup>がある。GAは、末広がり状対電極の最短ギャップ間発生したアーク放電が、ガス流によって電極形状に沿って下流側にスライドし、出射孔からプラズマジェットとして噴き出すものである。ジェットの形状は通常平面状であり、従って、円筒状のプラズマジェットよりも幅広の処理が容易であるという特徴がある。また、被処理物を挟む対電極が不要であるため、既存の製造ラインへの組み込みが容易であると考えられる。これまで本研究室ではGAに関し、マルチ化技術<sup>13)</sup>、導電性物体のダメージフリー処理用スプリット型装置<sup>14)</sup>の開発などを行ってきた。これまでの経験に基づけば、GAの処理効果は、GAの出射孔のサイズに影響を受ける可能性がある。そこで、本研究では、2種類のGAを用い、出射孔のサイズの影響を追究した。

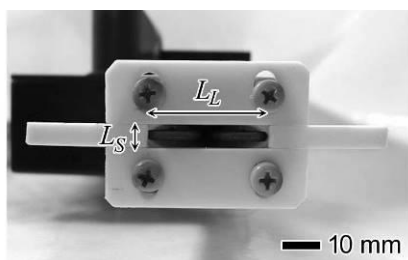
## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 GA 装置および条件

実験に用いたGA装置をFig.1に示す。今回、動作ガスである空気の供給方法が異なる2種類のGAを用いた。一つは、汎用的な供給方法である

ブロワ型 (以下、GA-Blower)、もう片方は圧縮空気供給型 (以下、GA-AC; Air compressor) である。GA-Blowerには、春日電機製 (APW-602f) を用いた。ブロワ (山洋電機製: 109BF12HC2、フェザーファンタイプ、ファンサイズ:  $\phi 74$  mm、最大風量: 780 L/min、定格入力: 7.2 W) がGA発生部に直接取り付けられているタイプである。GA-ACには、ウェッジ製 (PS-1200AW) を、圧縮空気を利用できるように改造したものを用いた。圧縮空気はドライヤ付コンプレッサ (HITACHI、PSD-5.5A) で雰囲気空気を圧縮してタンク (HITACHI、ST-150C、150 L) に貯め、GA電源部に設置されたレギュレータで0.32 MPaに調整してGA-AC本体に供給した。無負荷出力電圧と放電出力は、各装置の仕様の都合上、GA-BlowerとGA-ACとで、それぞれ、17 kV、600 W、および10 kV、1,200 Wとした。

GAの出射孔は、4枚のポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 板 (厚さ3 mm) を組み合わせ構成した。四角形状の出射孔に関して、電極の配置方向と垂直方向を短辺 (short side)、電極間方向を長辺 (long side) と呼ぶことにする。Fig.2にGA出射孔の一例を示す。各装置のオリジナルの出射孔サイズを踏まえ、短辺長さ  $L_S$  および長辺長さ  $L_L$  を、それぞれ、2~10



**Fig.2** Photograph of test exit aperture of GA-Blower in case of  $L_S=6$  mm/ $L_L=35$  mm.

mm および 5~40 mm の範囲で変化させた。

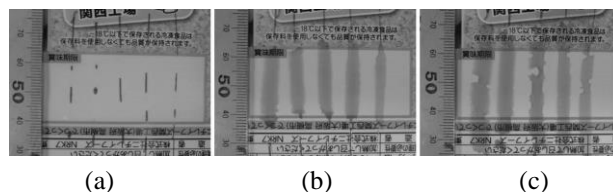
照射実験は、GA をロボットアーム (YAMAHA、PXYx) に取り付け、台座にテストフィルムを張り付けて、その上に GA をトラバースさせて行った。トラバース速度は 700 mm/s とし、トラバース動作は一方向 1 回とした。GA 出射孔-テストフィルム間距離は 5 mm とした。テストフィルムは、食品包装用の PP フィルムとした。

## 2.2 処理幅の計測

期限表記が印字される領域を長手方向に一度に処理するとすれば、処理幅が約 20 mm 以上であることが要求される。そこで、GA 処理後に、テンションチェッカ液 (春日電機 : TC-R-34.0 ; 濡れ張力指数 34.0 mN/m) を用いて処理幅を計測した。テンションチェッカ液は、濡れ性が良い箇所では濡れ広がり、悪い箇所では弾いたような様相を呈するものである。テンションチェッカ液を塗布した一例を **Fig.3** に示す。GA の処理方向 (トラバース方向) に対して垂直に、テンションチェッカ液を含ませた綿棒で約 10 mm おきに 5 箇所直線的になぞったものである。未処理の場合、すべての箇所薬液は濡れ広がらなかった。これに対し、GA-Blower 処理の場合、 $L_S=6$  mm/ $L_L=10$  mm および  $L_S=6$  mm/ $L_L=35$  mm で、平均処理幅はそれぞれ 20 mm および 40 mm であった。

## 2.3 インクジェット印字とラビング試験

印字には産業用インクジェットプリンタ (Domino、A100PLUS ; 黒インク) を用いた。印字パターンは、ABC...XYZ のアルファベット 26 文字横 1 列とした。印字条件は、インク滴下量 : 0.77 nL/dot、文字高さ : 3 mm、文字列長さ : 44 mm とした。

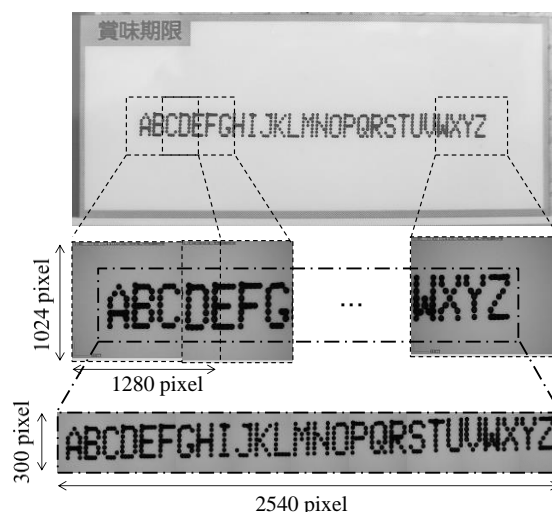


**Fig.3** Tension checker test to evaluate treated width; (a) untreated, (b) and (c) treated with GA-Blower in cases of apertures with  $L_S=6$  mm/ $L_L=10$  mm and  $L_S=6$  mm/ $L_L=35$  mm, respectively.

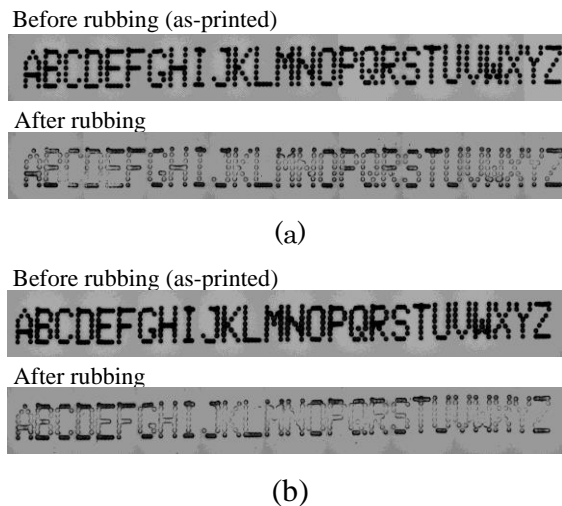
印字脱落の主な原因は擦れである。そこで、連続加重式引掻強度試験機 (新東科学、トライボギア TYPE:18L) を用いてラビング試験を行った。ラビング材にはプラスチック消しゴム (PLUS、48-104) を用いた。ラビング条件は、荷重 : 500 g、掃引速度 : 100 mm/s とし、ラビング回数は同一方向に繰り返し 50 回とした。

## 2.4 印字インク残存率

ラビング試験後の印字インクの残存性は、画像処理を行って数値的に評価することにした。**Fig.4** および **Fig.5** を用いて説明する。まず、**Fig.4** に示すように、ラビング試験前の印字部を、マイクロスコープ (AnMo Electronics Co.、AM413ZT) を用いて 9 分割 (カラー) で接写した。撮影条件は、倍率 55 倍、画像サイズ 1024×1280 pixel とした。次に、接写写真をつなぎ合わせて合成し、その合成画像から印字領域の 300×2540 pixel を切り出した。合成切り出し画像に対し、明度レベルを 256



**Fig.4** Explanative illustration of procedure of test pattern image processing to evaluate treatment performance.



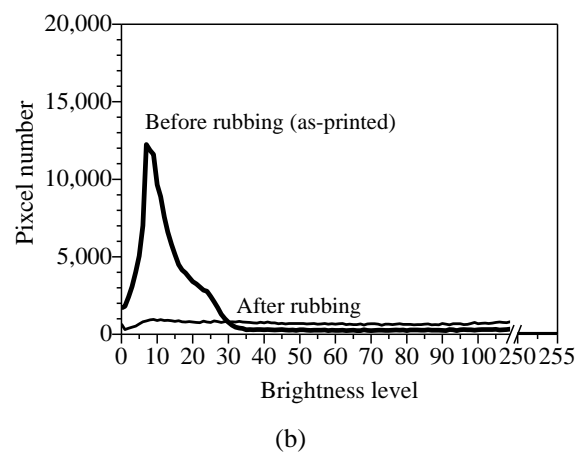
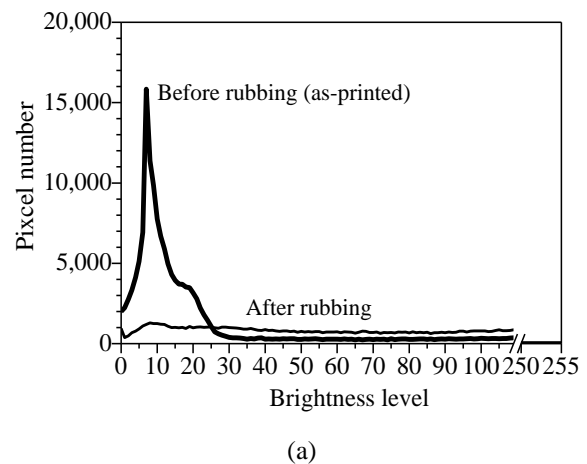
**Fig.5** Gray-scale montages of test patterns before and after rubbing test. (a) GA-Blower ( $L_S=6$  mm/ $L_L=20$  mm) and (b) GA-AC ( $L_S= 6$  mm/ $L_L=20$  mm).

段階に分割して表現するグレースケール処理を施した。これらの写真画像の合成およびグレースケール処理は Power Point (Microsoft, Version 2010) で行った。同処理を施した合成写真の一例を Fig.5 に示す。同図 (a) および (b) のどちらの場合も、ラビング試験後に印字の一部が脱落したり、薄れたりしていることがわかる。

グレースケール処理を施した合成画像に対し、画像分析ソフト Image-Pro (Media Cybernetics, Version 5.1) を用いて、明度レベル毎のピクセル数を表すヒストグラムを求めた。同ヒストグラムでは、明度レベルが低い方が黒いことを示す。従って、低明度レベルの数値が高いほどインクの残存性が良いことを意味する。Fig.5 の場合の結果を Fig.6 に示す。ラビング前と比較し、ラビング後は低明度レベルのピクセル数が減少し、印字が脱落したことが明確に判断できる。そこで、明度レベル 0~100 を黒画素とみなして積算し、その積算値のラビング前後の比をとったものをインク残存率とすることにした。

## 2.5 プラズマジェットの挙動観察と流速計測

出射孔サイズを変えると、出射孔から吹き出すガスの挙動が変わり、その結果、プラズマジェットの挙動も変化すると考えられる。そこで、まず、静止状態の GA から吹き出すプラズマジェットの様相を、デジタルスチルカメラ (Nikon, D5200)



**Fig.6** Grayscale pixel histogram; (a) treated with GA-Blower ( $L_S=6$ mm/ $L_L=20$ mm) and (b) treated with GA-AC ( $L_S=6$ mm/ $L_L=20$ mm).

および高速度ビデオカメラ (Phantom, Miro eX2 4GB モデル) を用いて撮影した。スチルカメラの撮影条件は、シャッタースピード: 1/30、絞り: f 2.5、ISO 感度: 100、ホワイトバランス: プリセットマニュアル (光源: 蛍光灯、ホワイト基準被写体: PTFE シート)、撮影距離: 約 0.5 m とした。レンズは標準レンズ (Ai AF Nikkor 50mm f/1.4D) を用いた。高速度ビデオカメラの撮影条件は、撮影速度: 10,000 fps、露光時間: 97  $\mu$ s、撮影解像度: 256 $\times$ 128、撮影距離: 0.5 m とした。レンズはスチルカメラと同じく、標準レンズ (Ai AF Nikkor 50mm f/1.4D) を用いた。

また、GA を発生させない状態で、出射孔から吹き出す動作ガスの流速を、4 枚フィン式流速計 (CUSTOM, CW-50) を用いて計測した。GA 出射孔から流速計入口までの距離は 5 mm とした。

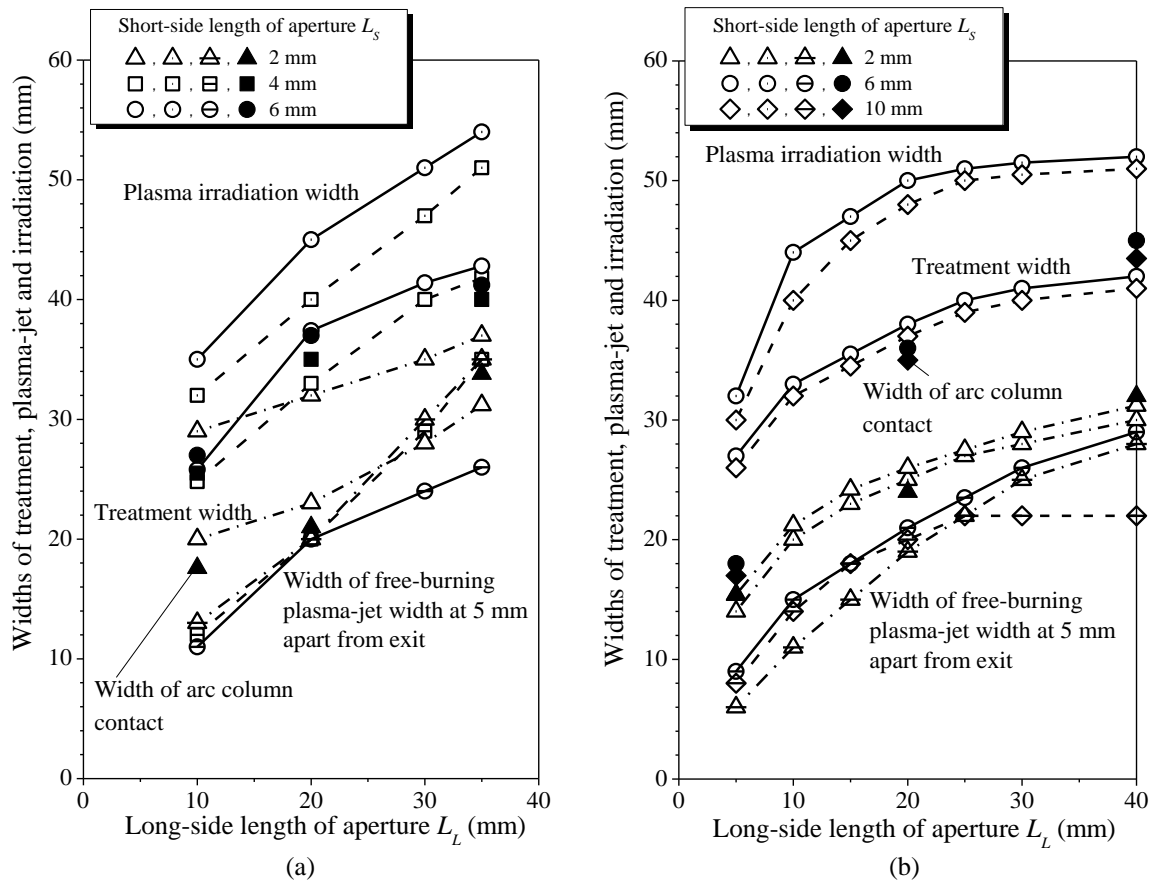


Fig.7 Widths of treated, free-burning plasma-jet, and plasma irradiation; (a) GA-Blower and (b) GA-AC. Solid symbols indicate width of arc column contact obtained from high-speed video frames.

### 3. 結果および考察

#### 3.1 処理幅

処理幅の結果を Fig.7 に示す。GA-Blower の場合、 $L_S$  と  $L_L$  に関わらず、20 mm 以上の処理幅を得た。 $L_L$  を長くするほど処理幅は増加した。 $L_S$  についてみると、2 mm の場合より、4 および 6 mm の方が広い処理幅が得られたが、4 mm と 6 mm とでは大差はなかった。実験範囲内の最大  $L_S$  と最大  $L_L$  で、最大処理幅 42 mm が得られた。一方、GA-AC の場合、 $L_S=2$  mm/  $L_L=5$  mm で、処理幅は 20 mm 以下であったが、それ以外では 20 mm 以上の処理幅が得られた。処理幅は、 $L_L$  が長い方が広い傾向にあり、 $L_S$  も長い方が広がった。6 mm と 10 mm とでは大差はなかった。また、実験範囲内の最大  $L_S$  と最大  $L_L$  で、最大処理幅 40 mm 以上が得られた。これらの結果から、GA-Blower と GA-AC とで、 $L_S$  と  $L_L$  に対する処理幅の傾向は同じであることがわかった。

以上の結果をスチルカメラで撮影した GA の様

相から考察してみる。Table 1 に GA-Blower の場合の一例を示す。フリーバーニング時および処理時の様相を、正面（面方向の観察）と側面（厚さ方向の観察）から撮影したものである。フリーバーニングの様相を見ると、プラズマジェットは  $L_L$  が長い方が幅広であり、 $L_S$  が長い方が平面的である。一方、処理時の様相を見ると、 $L_S$  が長い方が、プラズマが処理物に接触してから側方に広がり、照射幅が広がっているように見える。Table 1 のような写真から、プラズマジェットの幅と照射幅とを求めてみた。プラズマジェットの幅は、フリーバーニングにおいて、出射孔から 5 mm の位置で、正面から見た幅とした。プラズマジェットの照射幅も正面写真から読み取った。Fig.7 にそれらの結果も示した。同結果から次のことがわかる。フリーバーニングのプラズマジェット幅は、 $L_L$  が長いほど増加する傾向にあり、 $L_S$  にはあまり依存しない。その幅は、実測した処理幅より狭い。一方、照射幅については次のような傾向がみられる。

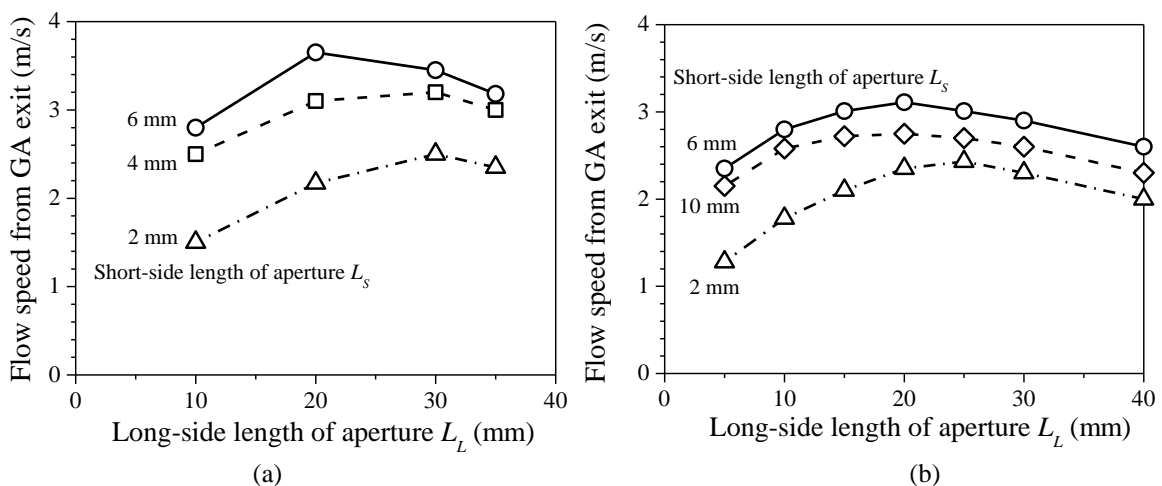
**Table 1** Typical photographs of free-burning and treating GA-Blower in front and side views.

$L_S$ (mm)	$L_L$ (mm)				
	10		35		
	Front view	Side view	Front view	Side view	
2	Free-burning				
	Irradiation to test film				
6	Free-burning				
	Irradiation to test film				

$L_L$ の増加に伴い、照射幅は広がる。GA-Blowerの場合、 $L_S$ が長い方が照射幅が広い。GA-ACも同様な傾向が見られるが、 $L_S$ が6および10mmで大差はない。照射幅は、処理幅とほぼ同じかそれより大きい。以上の要約は次のとおりである。処理幅は、フリーバーニングのプラズマジェット幅より広く、写真から見たプラズマ照射幅より狭いか同程度である。

プラズマを発生させない場合の出射孔から5mm下流での空気流速を Fig.8 に示す。GA-Blower

の場合、 $L_S$ が長いほど流速は高い。これは、 $L_S$ が長いほど出射孔の抵抗が小さく、空気の流れが良いことを意味しており、その結果として処理幅が広がったと判断してよいであろう。GA-ACの場合、 $L_S$ に関してしてみると、2mm、10mm、6mmの順に流速が高くなっており、Fig.7に示した処理幅の傾向と一致している。なお、 $L_L$ については、ある $L_L$ 以上で流速は遅くなるようになる。これは、空気の供給量つまり流量に対して出射孔の開口が大きくなりすぎたためと考えられる。しかし、



**Fig.8** Speed of air exiting from aperture without arc discharge; (a) GA-Blower and (b) GA-AC.

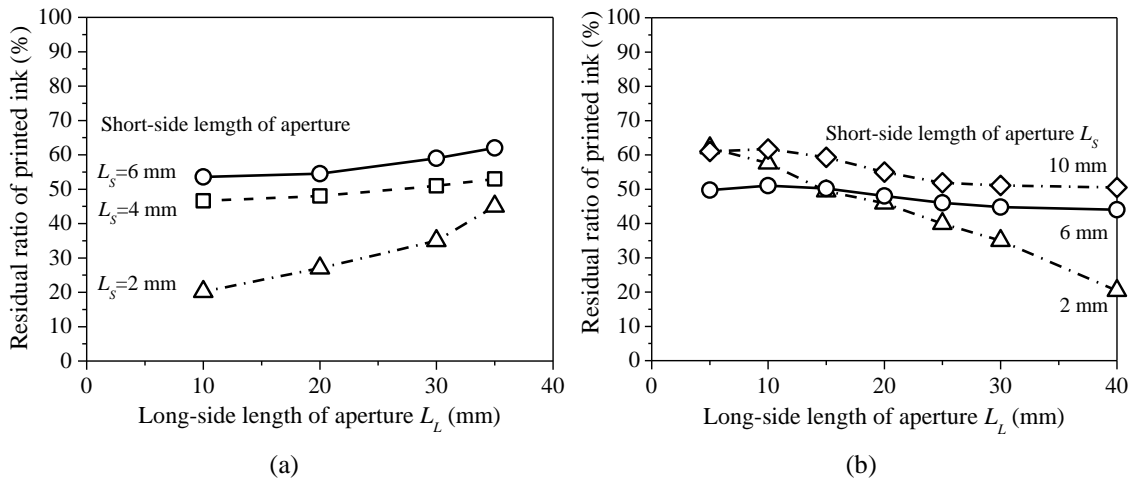


Fig.9 Residual ratio of printed ink on films treated by (a) GA-Blower and (b) GA-AC.

$L_L$  が長くなることで GA 自体が広がるため、処理幅は広くなったと解釈できる。

### 3.2 印字残存率

インク残存率の結果を Fig.9 に示す。GA-Blower の場合、インク残存率は  $L_S$  が長い方が高い。 $L_S$  が 2 mm の場合、 $L_L$  が長くなるとインク残存率が顕著に増加するが、 $L_S$  が 4 および 6 mm の場合、増加は緩やかである。 $L_S$  および  $L_L$  が長いとき、インク残存率が 50% 以上であった。

GA-AC の場合、 $L_L$  が 20 mm 以下であれば、インク残存率が概ね 50% 以上となった。それより長くなると減少傾向となった。これは、先に示した空気流速が減少しだす  $L_L$  と同じであり、流速の減少が一因だと判断できる。なお、 $L_S$  が 2 mm では、 $L_L$  が長くなるにつれ、インク残存率は極端に減少した。

以上の結果をアークコラムの挙動から考察してみる。Table 2 に高速度ビデオカメラで撮影した映像のコマ写真の一例を示す。各 GA においてインク残存率が低い条件 (GA-Blower:  $L_S=2$  mm/ $L_L=10$  mm、GA-AC:  $L_S=2$  mm/ $L_L=40$  mm) では、

アークコラムがテストフィルムから浮き上がり、ほとんど接触していなかった。一方、インク残存率が高い条件 (GA-Blower:  $L_S=6$  mm/ $L_L=35$  mm、GA-AC:  $L_S=10$  mm/ $L_L=5$  mm) では、アークコラムは全体的に隙間なくテストフィルムに接触していた。そこで、高速度ビデオカメラの映像から、アークコラムがテストフィルムに接触している時間を求めてみた。Table 3 に、電源の一次側 6 周期 (60 Hz の 6 周期=100 ms) あたりに、アークコラムがテストフィルムに接触した時間の一例を示す。100 ms の間にアークコラムがフィルム表面に接触する時間は、インク残存率がおおよそ 50% の場合、25 ms 以上であり、残存率 60% を超える場合は 40 ms 以上だった。これに対し、インク残存率が 20% 程度の場合、接触時間は 10 ms 未満と短かった。なお、高速度ビデオカメラの映像を観察したところ、接触時間が短い場合、Table 2 で示した様相のように、テストフィルムからアークコラムが浮き上がっている時間が長いことがわかった。つまり、高いインク残存率を得るためには、比較的薄いプラズマ状態であるブルームを

Table 2 High-speed video frames of arc column irradiating to test film.

GA-Blower		GA-AC	
$L_S=2$ mm/ $L_L=10$ mm	$L_S=6$ mm/ $L_L=35$ mm	$L_S=10$ mm/ $L_L=5$ mm	$L_S=2$ mm/ $L_L=40$ mm

**Table 3** Contact time of arc column.

Type	$L_S$ (mm)	$L_L$ (mm)	Contact time (ms/100 ms)	Residual ratio of ink (%)
GA-Blower	2	10	6	20
	2	35	21	45
	6	10	28	54
	6	35	42	60
GA-AC	2	5	48	62
	2	40	7	20
	10	5	43	61
	10	40	31	50

含めた見た目ではなく、比較的濃いプラズマ状態で、プラズマジェットの核であるアークコラムが、フィルム面に十分な時間接触している必要があり、そのためにはアークコラムが浮き上がらないような条件にする必要があることがわかった。

また、高速度ビデオカメラ映像のコマ写真から、フィルムに接触するアークコラムの最大幅を求めてみた。その結果を Fig.7 に黒塗りつぶしのプロットで示す。処理幅（白抜きプロット）とアークコラム接触幅（黒塗りつぶしプロット）とはほぼ一致していることがわかる。このことから、アークコラムの接触が支配的な役割を果たすことがわかった。

#### 4. まとめ

GA を用いた包装用樹脂フィルムの印字面前処理に及ぼす出射孔サイズの影響について追究した。得られた主要な結果を以下に記す。

処理幅はアークコラムの接触幅とほぼ一致する。出射孔の短辺長さ  $L_S$  がある程度長く、長辺長さ  $L_L$  が大きいほうが処理幅が広い。これは、同じ傾向で流速が早くなるためであることが示唆された。

インク残存率は、GA-Blower の場合、短辺長さ  $L_S$  および長辺長さ  $L_L$  が長いほど大きく、GA-AC の場合、短辺長さ  $L_S$  が長く、長辺長さ  $L_L$  が短い大きかった。このようなインク残存率の傾向は、アークコラムがフィルム表面へ接触する時間に強く支配されていることを明らかにした。

#### 謝辞

本研究の一部は、豊橋イノベーション創出等支援事業などの支援を受けて行われた。

#### References

- 1) S. Hori, Syokuhin youki houso ni youto kakudai no ink jet printer, *Japan food science*, Vol.32, (No.2), 1993, p67-73 (in Japanese)
- 2) S. Hori, Syokuhin youki houso eno ink jet printer riyou no genjou to gijutsu douko, *Japan food science*, Vol.36, (No.2), 1997, p49-54 (in Japanese)
- 3) J. A. J. Reche, J. M. M. Martínez, Selective surface modification of ethylene-vinyl acetate and ethylene polymer blend by UV-ozone treatment, *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol.43, 2013, p42-53
- 4) T. Ogawa, T. Satou and S. Osawa, Improvement of adhesion properties of low density polyethylene sheets and poly(ethylene terephthalate) films by various surface treatments, *Koubunshi Ronbunshu*, Vol.57, (No.11), 2000, p708-714 (in Japanese)
- 5) K. N. Pandiyaraj, V. Selvarajan, R. R. Deshmukh and C. Gao, Adhesive properties of polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) film surfaces treated by DC glow discharge plasma, *Vacuum*, Vol.83, 2009, p332-339
- 6) C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochim. Acta B.*, Vol.61, (No.1), 2006, p2-30
- 7) L. Bárdos, H. Baránková, Cold atmospheric plasma: sources, processes, and applications, *Thin Solid Films*, Vol.518, (No.23), 2010, p6705-6713
- 8) S. Saito, Surface modification by corona discharge, *Nippon Gomu Kyokaishi*, Vol.70, (No.6), 1997, p333-339 (in Japanese)
- 9) R. Prat, Y. J. Koh, Y. Babukutty, M. Kogoma, S. Okazaki and M. Kodama, Polymer deposition using atmospheric pressure plasma glow (APG) discharge, *Polymer*, Vol.41, 2000, p7355-7360
- 10) C. Wang, X. He, Polypropylene surface modification model in atmospheric pressure dielectric barrier discharge, *Surf. Coat. Tech.*, Vol.201, (No.6), 2006, p3377-3384
- 11) J. Toshifuji, T. Katsumata, H. Takikawa, T. Sakakibara, I. Shimizu, Cold arc-plasma jet under atmospheric pressure for surface modification, *Surf. Coat. Technol.*, Vol.171, 2002, p302-306
- 12) A. Czernichowski, Gliding arc. Applications to engineering and environment control, *Pure & Appl. Chem.*, Vol.66, (No.6), 1994, p1301-1310
- 13) H. Shiki, J. Motoki, H. Takikawa, G. Xu, T. Sakakibara, Y. Nishimura, S. Hishida, T. Nishi and T. Okawa, Pluralization technique of gliding arc plasma, *J. of IAPS.*, Vol.12, 2004, p41-46 (in Japanese)
- 14) H. Shiki, J. Motoki, Y. Ito, H. Takikawa, T. Ootsuka, T. Okawa, S. Yamanaka, E. Usuki, Y. Nishimura, S. Hishida and T. Sakakibara, Development of split gliding arc for surface treatment of conductive material, *Thin Solid Films*, Vol.516, 2006, p3684-3689