食品管理に活用される産業用連続型インクジェットプリンタ

Industrial-use Continuous-type Inkjet Printer Utilized for Food Control

池川 正人^{*1}, 佐々木 洋^{*1}, 荻野 雅彦^{*2}, 相馬 憲一 (会員)^{*2}

Masato IKEGAWA, Hiroshi SASAKI, Masahiko OGINO, Kenichi SOUMA (Mem.)

Industrial, continuous inkjet printers (CIJP) have been widely used for growing needs of traceability of food. To apply the CIJPs on new print targets, the CIJP and ink for new specification must be developed. To develop new CIJPs, an ink particle flight simulation has been utilized. Ink composition is designed with the material of print target appropriately. Needs for the total marking system are growing due to recent requirement for traceability of foods.

Keywords: continuous inkjet, simulation, ink, food control

1 はじめに

産業用連続噴射式荷電制御型インクジェットプリンタ (以下 CIJP と呼ぶ) は、非接触で印字体までの距離が大きく取れる為に様々な形状の面に直接印字することができ、加えて多種のインクが使用できるので、金属、紙、ガラス、フィルムなど様々な物質の上に印字することができる。この特徴のため、食品のパッケージに、賞味期限や製造日、バーコード等を生産ライン上で高速に動いている製品へ直接印字するのに利用されている(図1 これにより、消費者も、缶ビールの底面、PET ボトルのキャップや食パンの包装紙等に CIJP で印刷された賞味期限等を確認することを日常茶飯事に行っている(Fig. 2)。このように CIJP は毎日の食の安全管理に活用されている。

一方、家庭やオフィスで文書の印字に利用されているインクジェットは、ピエゾ素子や瞬時加熱により一滴ずつインクを放出して印字するオンデマンド型(DOD)インクジェットプリンタ(DOD-IJP)と呼ばれるもので、CIJP とは異なる。CIJP は、DOD-IJP より、高速で距離を離して印字できるため、高速の生産ラインでの直接印字に活用されている。

歴史的には、CIJP の歴史は古く 1867 年 Lord Kelvin (英国) まで遡ることができる[1]。その後、多くの改良発明がなされ[2-3]、磁歪振動子あるいは圧電素子からの振動により液滴化のタイミングや分離状態を積極

的に制御し、液滴分離と偏向のための液滴への荷電を同期させる、いわゆる荷電偏向制御型の特許[2]が出願された。これが原型となり製品化され、その後、現在のような産業用 CIJP として進化発展を遂げてきた[4-6]。近年では、食の安全管理のニーズの増大と共に益々生産台数が増加している。

Fig. 1 CIJP (a) and In the production line (b).

Fig. 2 Print example by CIJP.

連絡先: 池川正人, 〒312-0034 ひたちなか市堀口 832 番地 2 (株)日立製作所日立研究所,
e-mail: masato.ikegawa.kv@hitachi.com

^{*1}日立製作所日立研究所 ^{*2}日立産機システム

Fig. 3 Schematic view of inkjet head of CIJP.

2 連続型インクジェットプリンタ

2.1 インク飛翔のメカニズム

CIJP のインクジェットヘッドの概略図を図3に示す。加圧ポンプにより加圧されたインクは、ノズルから連続的に噴出される。ノズルにはピエゾ素子を取り付けられており、インクを所定の周波数で励振する。その結果、ノズルから噴出しているインク柱はくびれ、やがてくびれが成長して液滴（インク粒子）が分離して形成される。例として、直径 $65\mu\text{m}$ のノズルから 20 m/s の速度でインク液を噴出させ、 75 kHz で励振させると、直径 $120\mu\text{m}$ の液滴のインク粒子が初期間隔 $270\mu\text{m}$ で連続的に生成される。分離したインク粒子に対し、帯電電極で印字する画像データに対応した帯電電圧が印加され、所定の電荷を帯電させる。この後、帯電したインク粒子は所定（一定）の偏向電圧が印加された偏向電極間を飛行し、帯電している電荷量に応じて偏向力を受け、印字体の所定の位置に到達し、文字のドットになる。印字以外は、常にインク粒子は無帯電のまま、直進してガター内に侵入し、回収されて再利用される。座標軸(X,Y,Z)を図のように設定した。ノズルの中心軸を Z 軸にとり、粒子の偏向面が YZ 面になるように Y 軸を設定し、YZ 面に垂直に X 軸を設定した。原点はノズル出口の中心とした。

近年では、ラインの省力化・高速化を図るため、従来以上の高速、高画質印字が要求されるようになり、印字体上でインク粒子のドットが隣のドットと重なったり、クーロン反発力により飛散することによる画質の低下、即ち印字歪が発生するので、それらの影響を予測し帯電量で印字歪を補正する必要がある。

このような製品の印字調整を個別に行うのでは、現代の製品サイクルに置いていけない。そこで、設計の

前段階で解析を主導させて、開発日程の遅延、後戻りを防止し、開発期間を短縮させるため、シミュレーションツールを開発してきた。

2.2 インク粒子飛翔シミュレーション

シミュレーションの対象は、図3の概要図において、液滴への粒子化と、インク粒子の飛翔である。液滴への粒子化に関しては、Rayleigh の解析[7]から始まって、多くの研究がなされてきた。最近では、計算機によりナビエ・ストークス方程式と呼ばれる流体方程式を直接計算して粒子化を予測できるまでになっている[8,9]。ところが、インク粒子の飛翔に関しては、印字歪に直接関係するにもかかわらず、1次元の計算のみしか研究がされてこなかった[10]。この原因として、この解析には電気力学と流体力学のマルチフィジックスが必要になること、多数のインク粒子の空力干渉を扱わなければならないことが挙げられる。上記のようにインク粒子間の距離は、インク粒子直径の3倍以下程度であるため、必然的に後続の粒子は前方粒子の空力干渉を受けるため、粒子周りの流体解析が重要であった。これに対し、最近、3次元の流体計算を取り込んだシミュレーションが開発された[11-12]。

インク粒子飛翔シミュレーションにおいては、所定の電圧を印加した上下の偏向電極間に形成される電界、インク粒子群が飛行することにより発生する空気流とそれが各インク粒子に与える影響、帯電したインク粒子間に働く電気力と粒子間クーロン力とを同時に非定常計算する（ここでは、粒子が静電界から受ける力を電気力、粒子間に働く電気力をクーロン力と呼ぶことにする）。その結果、各インク粒子に対して、軌道が計算でき、印字体へ着弾した際の時刻と位置が計算できる。そこで、その位置と理想着弾位置との差が印字歪である。

帯電電極間で帯電したインク粒子が、偏向電極間を通過し、印字体まで到達する際に粒子には空気抗力、電気力、粒子間クーロン力が働き、軌道の誤差に影響する。空気抗力は、インク粒子群が作る流れ場（気流）に対する相対速度の関数である。ここでは多数（500個以上）のインク粒子を扱うので、流れを気相の連続相と粒子の分散相として解析するラグランジュ混相流法を採用し、抗力係数と粒子間クーロン反発力のアルゴリズムを修正して加えた、気流とインク粒子の飛行軌道を同時に解析するプログラムを開発した[11]。粒

子の軌道は、気流を非定常で解析しながら外力を加えた質点の力学として計算される。

球形粒子の抗力係数は、レイノルズ数が 1 以下であれば Stokes の解が使用できるが、それ以上のレイノルズ数では、実験結果によるしかない。ここでは、先頭粒子の空気抗力係数に次の Beard の実験式[13]を用いている。

$$\begin{aligned} C_D &= (24/\text{Re}_d)(1+0.102\text{Re}_d^{0.955}) & (0.2 < \text{Re}_d < 2) \\ C_D &= (24/\text{Re}_d)(1+0.115\text{Re}_d^{0.802}) & (2 < \text{Re}_d < 21) \\ C_D &= (24/\text{Re}_d)(1+0.189\text{Re}_d^{0.632}) & (21 < \text{Re}_d < 200) \end{aligned} \quad (1)$$

但し、粒子レイノルズ数 Re_d は次のように定義される。

$$\text{Re}_d = \frac{|u - u_d|d_d}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 ν は空気の動粘性係数、 u は周辺の空気の流れ、 u_d は粒子の速度、 d_d は粒子直径である。

後続粒子の空気抗力係数は、前方の粒子との間隔 L が粒子直径 d_d の 6 倍以下になると、低下するという実験結果が報告されており[14]、これを式化してモデルに取り入れた。これは、競輪の選手が前方の選手の背後に隠れて、空気抵抗を減らすのと同じ現象である。

偏向正電極と負電極に電圧を設定し、偏向電極間の電界分布を事前に解析し、帯電量を与えた粒子を飛行させると、粒子には電気力が加わる。

また、各粒子からクーロン力を総和して外力として計算する機能を追加した。着目する粒子に働くクーロン力は、周りにあるすべての粒子とのクーロン力の総和である。そこで、着目する粒子に対し、周りにあるすべての粒子を探索し、その粒子までの距離、帯電量を求めてクーロン力を総和して求める。

以上のシミュレータを検証するため、連続する 2 個のインク粒子の速度と軌道を計算し、実験と比較した。空気抗力の影響を確認するため無帯電粒子 2 個の速度変化を調査し、電気力と粒子間クーロン力の影響を確認するため帯電粒子 2 個の軌道を調査した。これに対し、無帯電粒子と帯電粒子の飛行軌跡（位置と速度）を高速度カメラの撮影によってシミュレーションの検証をした。

図 4 にシミュレーションによる 2 個の無帯電粒子の飛行速度 W における Z 方向（ノズルから印字体へ向かう軸）への変化(Sim)を実験値(Ex)と比較して示す。インク粒子の初速 W_0 は 20.2 m/s である。粒子は Z 方向に進むに従って、空気抗力により速度が低下しており、

後続粒子 (Trailing) の速度が先行粒子 (Leading) より速くなっていることが分かる。これにより、後方粒子は先行粒子に追いつき、印字歪が発生する。また、 $Z=38$ mm のところで、先行粒子と後続粒子の速度が実験値で一致しているのは、2 粒子が合体 (マージ) したためである。実際の装置では、このような印字歪が発生しないように調整することになる。

図 5 にシミュレーションによる 2 個の帯電粒子の YZ 面における飛行軌道 (Sim) を実験値(Ex)と比較して示す。シミュレーションの結果は実験値と良く一致しており、偏向電極出口での誤差は数%以下であった。

以上のシミュレータを 7 ドット 1 ラインのインク粒子飛行解析に適用した例を示す。偏向電圧 4.1 kV のもとに非圧縮、層流の非定常計算を行った。帯電量は、 -7.735×10^{-13} C から -1.655×10^{-12} C までは等間隔に設定した。粒子は帯電量 -7.735×10^{-13} C のものから絶対値が高くなるように順に 7 個放出した。

図 6 に最初の帯電粒子がノズルを出てから 0.0022 s 後のシミュレーション結果を示す。(a)は全体の速度分布、(b)は粒子の位置の拡大図である。図(a)により、インク粒子の周りにインク粒子によって引きずられて生成された高速流れ (ジェット境界層) が生成されている。

Fig. 4 Change in ink-particle velocity W in Z -direction for two non-charged particles (Leading and Trailing ones, $W_0=20.2$ m/s).

Fig. 5 Trajectories for two charged ink particles (Leading and Trailing ones, $W_0=20.2$ m/s).

るのがわかる。図(b)から1列のインク粒子群が印字体に向かって湾曲しており、粒子間の間隔も等間隔でないことがわかる。これは、飛行中に粒子間の空力干渉が影響したもので、印字歪を発生させる原因となる。

図7にX方向に400 m/minの速度で移動している印字体上(XY面)での印字シミュレーション結果を示す。ドットは下から上へ順に印字している。ドットのラインは直線ではなく、湾曲している。これは、図6で示した飛行中の湾曲ラインに対応している。これらの印字歪を無くすため、計算機上でインクジェットヘッド構造や印字用インク粒子の配置や条件の最適化を図り、印字歪が無いCIJPが設計されている。

Fig. 6 Simulation of flow velocity distribution (a) and ink-particle position (b) for 1 line with 7 dots ($t=0.0022$ s).

Fig. 7 Print result by simulation of 1 line with 7 dots.

3 CIJP インクの特徴

3.1 インク組成

CIJP 用のインクのマテリアル構成は溶剤、樹脂、色材、導電剤、その他の添加剤からなる。それぞれの材料の添加率は材料の種類、インクの使用用途に応じて調整する。基材に付着後は溶剤が揮発し、図8のような印字ドットとなる。

溶剤：

溶剤は、樹脂、色材等を溶解、或いは分散させ、液状化するため用いられる。基材に印刷後は速やかに揮発する。溶剤の種類は、速乾性に優れる 2-ブタノン、低毒性のエタノール等がある。食品用途では徐々にエタノールが普及しつつあるが、2-ブタノン（慣用名：MEK）が主流である。

樹脂：

樹脂は印字ドットのマトリクスであり、色材の保持、及び基材へのドット固定の役割を果たす。CIJP はポリエチレン、ポリプロピレン、PET 等の樹脂製の食品容器に印字することが多く、これら基材はインクの浸透が期待できない。そのためマトリクスである樹脂をインク中に添加する。

インクに添加する樹脂はアクリル樹脂やビニル系の樹脂、或いは芳香族系のポリエステル系樹脂等々あるが、基本的には上記溶剤に溶解できることが前提となる。またインクの粘度を上げ過ぎるとインクが吐出しにくくなるため、通常種々の樹脂製品よりも低分子量の樹脂が用いられる。

色材：

色材は染料、顔料等が用いられ、印字ドットを発色させるために添加される。このうち染料は溶剤に溶解するものであればほとんど問題は無いが、用途や環境によって析出する場合があるため、溶解安定性をチェックしておく必要がある。顔料はノズル詰まりを起こさないよう、凝集せずに安定した分散状態を保つ工夫を要する。

Fig. 8. Schematic view of printing dot.

導電剤：

導電剤は CIJP 用のインクにのみ必要な材料である。CIJP はインク粒子に電価を与えて偏向させ、印字物を形成する。そのため、インクは導電性が必要となる。抵抗の目安としては概ね $1000 \sim 2000 \Omega \text{cm}$ 程度である。

導電剤は有機及び無機の塩構造を有する物質が一般的である。塩を形成している陽イオン化合物はアミン系の化合物が主流であり、陰イオン化合物はスルホン酸系、或いはカルボン酸系、有機リン系が一般的である。

添加剤：

添加剤は基材への密着性を向上させるための密着性向上剤、或いは印字ドットの形状を平坦化するための平坦化剤等が挙げられる。

平坦化剤は印字ドットを平坦化することにより、印字の視認性を向上させる。

また印字後の製品を梱包して輸送中、印字ドットが梱包容器表面と擦られた場合、ドットを平坦化することにより、耐擦性等の向上を図ることも可能となる。

3.2 インクに求められる機能

印字ドットを形成するインクに求められる最も重要な機能は、一般的には手で触れたり、輸送時、ダンボール等の梱包容器内での摺動によっても印字が剥離しない基材との密着性である。この機能を維持するため、先に記した平坦化剤とともにインク組成のうちでも特に樹脂は非常に重量な役割を果たしている。食品容器に多いポリエチレン、ポリプロピレンといった炭化水素系樹脂の基材は、元々密着性が低いので、印字が容易に剥離しやすい。そのため、樹脂としては塩素を含有する材料を用いるのが一般的である。また、容器のままお湯で温めるレトルパウチパックでは、耐熱性、耐水性の高い樹脂が用いられている。

このほか、印字直後に巻き取られる電線用インクにおいては、印字面に接触した電線に対し転写しない組成とする必要がある。

さらに、リサイクルボトルへの印字においては、リサイクル時に印字文字をアルカリ等で消去できるインクが用いられている。

また、飲料缶等では、品質管理用として、ブラックライトを照射したときのみ、文字が浮かび上がる不可視インクが使用されている。

以上のように、CIJP の用途は多岐にわたっており、

マーキング対象製品が印字物に必要な機能、インク組成により実現する必要がある。

4 おわりに・・・食の安全を支えるトレーサビリティマーキング

現在、農林水産省の指導によって、食の安全と安心の確保のためトレーサビリティシステムの導入が食品産業界に広まっている。このようなシステムに、食品の生産ラインの性格によって、本論文で紹介した CIJP や DOD-IJP によるマーキングが使用される。また、耐久性が要求される印字や、消費者が見ても気づかない社内管理用の印字の場合、レーザマーキングが使用される。また、これらの印字情報を管理するための印字検査装置も加えられたトータルマーキングシステムとしてのニーズも高まっている。

多様なニーズに対応したインクジェットプリンタとインクの開発と共に、今後益々商品のトレーサビリティのニーズに対応したネットワークによる情報管理システムがさらに重要になっていくと考えられる。

参考文献

- [1] W. Thomson (Lord Kelvin), "Receiving or Recording Instruments for Electric Telegraphs," *GB. Patent* 2147, 1867.
- [2] R. Sweet, "Fluid Droplet Recorder," *U.S. Patent* 3, 596, 275, 1963.
- [3] C.H. Herz, and S.I. Simonsson, "Ink-jet Recorder," *U.S. Patent* 3,416,153, 1966.
- [4] 松本章吾, 井上智博, 松野順一, 佐野清: 荷電制御型インクジェットプリンタにおけるインク粒子飛翔安定化, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol.62, No.596, pp.1467-1472, 1996.
- [5] 井上智博, 佐藤和恭, 滝澤芳治, 宮尾明, 連続型インクジェットプリンタのインク濃度制御機構, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.718, pp.1813-1816, 2006.
- [6] M. Okano, T. Inoue, Y. Takizawa, T. Matsuda, and A. Miyao, "A New Nozzle for Continuous Inkjet Printers," *J. Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.4, No.4, pp.764-772, 2010.
- [7] L. Rayleigh, "On the Instability of Jets," *Proc. London Math. Soc.* 10, pp.4-13, 1878.
- [8] S. Desai, and M. Lovell, "Computational fluid Dynamics Analysis of a Direct Write Manufacturing Process," *Int. J. Nanomanufacturing*, Vol.3, No.3, pp.171-187, 2009.
- [9] M. Ishikawa, E. Ishii, and M. Ikegawa, "Simulation of Gas-Liquid Free Surface Flows in a Refrigerant Distributor and a Nozzle of Continuous-Inkjet," *Proc. the ASME IMECE2013*, No.63955, 2013.
- [10] 渡辺敬三, 車峰, 武藤正行, インクジェットにおける液滴合体に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編) Vol.64, No.619号, pp.754-759, 1998.

- [11] M. Ikegawa, E. Ishii, N. Harada, and T. Takagishi, "Development of Ink-Particle Flight Simulation for Continuous Inkjet Printer," *Trans. of ASME, J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No.5, No.051021, 2014.
- [12] M. Ikegawa, E. Ishii, N. Harada, and T. Takagishi, "Ink-Particle Flight Simulation for Continuous Inkjet Type Printer," *Proc.of 30th International Conference on Digital Printing Technologies*, pg.176, 2014.
- [13] K.V. Beard, and H.R. Pruppacher, "A Determination of the Terminal Velocity and Drag of a Small Water Drops by Means of a Wind Tunnel," *J. of the Atmospheric Sciences*, 26, pp.1066-1072, 1969.
- [14] 辻裕, 森川敬信, 寺島幸三, 白神隆文, 二宮一, 二つの球の流体力学的干渉に関する実験, 日本機械学会論文集 (B 編) Vol.47, No.423, pp.2103-2110, 1981.