D103 粒子帯電を利用したトモグラフィシステムの開発

町田 雅志[○] (出光興産(株) 中央研究所)

Development of tomography system of electrostatic charge sensors

Masashi MACHIDA

ABSTRACT

Sensor is a very important part of process tomography system. Tribo-electric tomography system, it is also called electrodynamic tomography system, bases on sensing of electrostatic charges carried by particles. This sensor is passive and number of measurements is quite small comparing to other tomography system with same number of sensors. This restriction brings poor and coarse image by least square image reconstruction method for its large division of sensing zone with small number. Although back projection method is highly underdetermined, it gives better results than least square method. Other method, like iterative method or the combination of the above two, must be developed in future.

Keywords: process tomography, electrodynamic sensor, reconstruction algorithm

1. 緒 論

プロセストモグラフィの歴史を概観する。¹⁾

プラント機器の内部状態を観察する試み、特に密度や温度といったプロセス変数が機器内部でどのような二次元分布や三次元分布を持っているかを測定する試み、は古くから行われており、X線撮影や放射性同位体トレーサー等が有名である。

現在「プロセストモグラフィ」と呼ばれる一連の流れは、1980年代半ばに始まった。トモグラフィそのものはレントゲン断層写真撮影術と日本語訳される場合もあり、その源は上記の放射線法にあるが、プロセストモグラフィの場合は産業用、特にプロセス制御を目的とする側面が強く、「安価」「高速」である事から電気的検知法がその主流となっている。もちろん、トモグラフィ技術そのものは「被測定物の周囲をセンサーで取り囲み」

「数多くの測定を行い」「それらのデータから被測定物の内部情報を抽出する」事が可能であれば、検知手段を選ぶものではない為、現在のプロセストモグラフィの学会では電気法、放射線法以外に超音波法、磁気共鳴法などの数多くの手法によるトモグラフィが開発されている。

1980年代半ばに始まった静電容量測定によるトモグラフィシステム (electrical capacitance tomography: ECT) 開発のひとつはマンチェスター工科大学(UMIST)で始まり、もう一つは米国の Morgantown エネルギー技術センター (METC) で始まった。UMIST の開発の対象は油田から汲み上げられた油-水-ガスの混相流のオンライン計測であり、配管内部を流れる3成

分をある断面で測定し、それぞれの流量を同時にモニタリングすることであった。UMIST は同じ時期にプロセストモグラフィによる空気輸送配管 (気固二相流) のモニタリングシステムの開発も行った。METC は流動層 (気固二相流) を開発対象とし、流動層内のボイド率のリアルタイム測定を行った。また、同時期に電気抵抗測定によるトモグラフィシステム (electrical impedance tomography: EIT あるいは electrical resistance tomography: ERT) が医療用の分野で注目され、この流れを受けて UMIST で EIT によるベッセル内部の流体のイメージングが行われた。また、フランスではマイクロウェーブによるトモグラフィの開発がEUの支援の元で実施された。

80年代をプロセストモグラフィの黎明期とするならば90年代は順調な発展期であった。90年代入ってからは4年間の期間で European Concentrated Action on Process Tomography が開始され、この活動の成果のひとつとして、92年には英国マンチェスターで初めてのプロセストモグラフィのワークショップが開催された。95年にはプロセストモグラフィに関する初の系統的な成書「Process Tomography」が刊行された。この後の学会活動は着実に伸び、95年と97年にはプロセストモグラフィ欧州学会、99年と2003年にはプロセストモグラフィ国際学会が開催され、現在に至った。

各種プロセストモグラフィの特徴を Table 1 にまとめる。これは97年欧州学会論文: Process Tomography - The State of The Art²⁾の付表を部分的に抜粋し和訳したものである。

Table 1 Process tomography systems
(Process Tomography - The State of The Art より部分的に抜粋)

名称	測定対象	測定速度	解像度	断層厚さ
静電容量 トモグラフィ (ECT)	静電容量 (1MHz)	100 frames/s	容器径の 5~10%、 100pixel分割	25mm以上、 または容器径の 1/10
電気抵抗 トモグラフィ (ERT)、(EIT)	電気抵抗 (1~ 500kHz)	10frames/s	容器径の 3~6%、 100pixel分割 (定量性あり) 1000pixel分割 (定量性なし)	容器径の1/10
インダクタンス トモグラフィ (EMT)	相互コンダ クタンス (透磁率と抵 抗:50~ 5MHz)	ECTと同等	ECTと同等 :推定	容器径の1/5 :推定
マイクロウェーブ トモグラフィ	複素誘電率 (2.45GHz)	ECTと同等	使用波長の1/10 程度	容器径の1/10程 度か
γ線トモグラフィ	フォトン減衰	30frames/s	1mm	5mm以下
X線トモグラフィ	フォトン減衰 または Compton散 乱	数秒/frame	1mm以下	5mm以下
光透過 トモグラフィ	光の強度	高速	1~2mm、 50×50pixel 分割	1~2mm
光回折 トモグラフィ	屈折率	15秒程度	50×50pixel 分割	2mm
陽電子 トモグラフィ	γ線	3次元イメ ージを得る為 に1時間	3次元で 8mm	3次元で 8mm
陽電子 トレーサー法	トレーサ粒 子からのγ 線	100回/s	トレーサ移動速 度に依存 1m/sで5mm :3次元	トレーサ移動速 度に依存 1m/sで5mm:3 次元
核磁気共鳴 トモグラフィ	磁気スピン	25frames/s 程度か	10~40μm	1mm以下
音波トモグラフィ (高周波)	音波の反 射、散乱 (1MHz)	音速の限界 (0.2mで 50frames/s)	容器径の 3%程度か	15mm程度か
音波トモグラフィ (低周波)	音速	音速の限界	8×8pixel分割	—
粒子帯電 トモグラフィ	粒子荷電	粒子に依存	3mm程度か	3mm程度か

2. 粒子帯電トモグラフィ

2.1 センサーの検出機構

帯電粒子からの電気力線により導体表面に誘導電荷(表面電荷)が現れる。この表面電荷は粒子の移動に応じて変化し、変位電流が導体表面を流れる。導体の一部をセンサーとして電気的に分離するとセンサーに信号が現れる (Fig. 1)。

Fig. 1 Induction model of electrodynamic sensor

2.2 トモグラフィシステム

このセンサーを配管周囲に配置し電流を検出することによりトモグラフィシステムを構成できる。センサーからの信号は増幅されPCに取り込まれ、フーリエ変換で各センサーの信号強度が得られる。測定場内の各位置

(pixel)における各センサーへの感度は前もって計算しておき、測定で得られた信号強度と感度から内部の粒子荷電の分布を推定する。(Fig. 2)

Fig. 2 Signals in tomography system

2.3 イメージ再現アルゴリズム

イメージ再現の方法としては Back-Projection 法や最小自乗法、収束法が主に用いられる。Back-Projection 法の場合、連続的でスムーズなイメージを得る為に測定数: N に比べてはるかに多い数の pixel が定義される事が多い。最小自乗法の場合は測定数以下の数で測定領域を分割する必要があるので、数学的には正しいが、得られたイメージは離散的である。特にこの粒子帯電法はセンサーが受動型であるためにセンサー数: n が測定数: N と等しくなり、分割数不足が大きな問題となる。(能動型の場合、センサー間の組み合わせで測定するために、測定数: N = n(n-1)/2 となり、分割数不足の問題は緩和される。) Fig. 3 に最小自乗法と Back-Projection 法の比較を示す。データは実測値ではなく、モデルデータを使用し、11 センサーのシステムを想定した。最小自乗法の場合は分割数の少なさが誤差となっていることが解る。モデルとする対象物が小さくなる程、分割エリアの大きさによる誤差は増大する。

Fig. 3 Image reconstruction results

Back-Projection 法の結果を初期値として収束計算を行って誤差を減少させイメージを改善する収束法が実際的な手法として考えられ、今後適用検討する必要がある。

3. 結論と今後の方針

粒子帯電トモグラフィは検出方法が他の電氣的検出法と異なる為にイメージ再現など独自に開発すべき部分が多いが、他の電氣的検出法で確立された手法を取り入れて引き続き改良を行う必要がある。

参考文献

- 1) R.A. WILLIAMS, M.S. BECK, Process Tomography: Principals, Techniques and Applications, Butterworth Heinemann
- 2) M.S.Beck, T.Dyakowski, R.A.Williams, Process Tomography - The State of The Art, In Proc: Frontiers in Industrial Process Tomography II, Delft, NL, pp.357-362