解説記事

トモグラフィー技術と工業への適用* —視えれば修復可能—

スコット・デイビッド**

Applications of Tomography in Industry —If It Can Be Seen, It Can Be Improved—

David SCOTT

Abstract

Our modern standard of living depends strongly on the industrial process industry. The raw materials used to make consumer products are produced in complicated chemical reactions that are difficult to control. In order to increase efficiency and reduce waste, new process control schemes are needed. In recent years tomographic methods have been developed to see inside industrial chemical processes. The sensing mechanisms used in process tomography include electrical measurements (current, capacitance, or inductance) and absorption of various forms of energy. This data can be reconstructed to form cross-sectional images of the material in the process vessel, as demonstrated in three examples: Optical tomography is used to monitor the fuel spray pattern in internal combustion engines and to develop more efficient designs. Electrical resistance tomography has been used to study polymerization of nylon and to provide environmental monitoring at liquid storage facilities. These examples show that process tomography can help industry to protect the environment.

Keywords: Process tomography, environmental monitoring, process control, industry

1. はじめに

近年、身の回りの様々なところでトモグラフィー技術が使われるようになってきた。身近な例をあげると、人体内部の状態を見るためにCT (Computed Tomography) スキャンなどが用いられ、見ることが困難な頭の内部の様子をCT画像によって容易にかつ鮮明に見ることができ、多くの情報を得ることによって病気の早期発見に役立っている。この技術は種々の産業にも使われ始めているが、一般的にはまだよく知られていない。このトモグラフィーは比較的新しい可視化技術であり、多くの分野に適用可能であると考えられる便利な技術であるが、それとともに多くの疑問点や問題点も存在する。

本解説記事では、そもそもこのトモグラフィーとは何であり、どういった仕組みになっているのか、などといった疑問に答えることができるよう、具体的な例を挙げながら紹介し、産業分野への応用について検討する。

2. トモグラフィー

2.1 トモグラフィーとは

トモグラフィーとは、内部構造物の断面を非破壊非接触で画像化する技術である。先にも述べたように、現在

は主に医療分野で広く使われている。それではこの画像を作るために、どのように仕組みが使われているのだろうか。X線CTの例を挙げて解説すると、Fig. 1(a)に示すように、X線CTは物体を透過する放射線の量を計測して、投影情報を取得する。投影情報は投影方向に依存し、それぞれの投影は独特であるが、それにより断面の情報を得ることができる。そしてFig. 1(b)に示すように、すべての投影情報を組み合わせて、断面画像を構成する。この過程を再構成 (reconstruction) という。この再構成の手法にはいくつかの種類があるが、主に逆投影法 (Back-projection method) が用いられている。また、投影データから直接計算したり、モデル化する画像再構成法もある¹⁾²⁾。

ここで再構成画像の解像度は、下記のようなさまざまな条件によって制限される。

- 投影情報の方向数と投影情報要素の数
- 再構成に用いられる要素関数
- コントラスト
- 計測体積と対象物

2.2 プロセス・トモグラフィー²⁾³⁾

工業においては、原料を製品に変換する過程で化学反応が用いられる。化学反応の状況や均一性は大変重要で、製品の品質をより高くするためには、このプロセスの可視化計測が必要不可欠である。しかしながら、これらの

* 原稿受付 2005年12月9日

** 非会員 DuPont Company, Experimental Station E 304/A 212

(a) Example of X-ray CT.

(b) Image reconstruction.

Fig. 1 Mechanism of tomography.

プロセスにおける反応容器の中は、通常外側から見ることはできないため、このような場合にトモグラフィーが使われている。このように、トモグラフィー技術を工場のような産業分野で利用するとき、これをプロセス・トモグラフィーという。プロセス・トモグラフィーの計測対象としては、流量、濃度、成分などが挙げられる。

プロセス・トモグラフィーは、広範囲な条件下で作動するという特長を持っており、例えば圧力が20気圧以下で、温度が1200℃以下の環境であれば計測が可能である。また、毎秒3500フレーム程度まで画像を記録できるシステムもある。プロセスの長さスケールは1mmから100m以上まで、5桁以上異なる範囲で設定することができる。さらに3次元空間において、時間情報も入れて4次元の画像を見ることができるシステムも開発されている。トモグラフィーの適用対象としては、研究開発とプロセス制御があげられる。

Table 1のようにプロセス・トモグラフィーには、測定するシグナルの種類に応じて数多くの手法が開発されている。例えば光学トモグラフィー法を用いると、光吸収の変化を捉えることができる。Fig. 2に示すように四方から光を吸収し、その投影像を画像再構成する。また、電気抵抗トモグラフィー(ERT)法は、電気抵抗の変化を捉えることができる。Fig. 3に示すように、各電極間の電気抵抗を投影によって計測し、それを再構成して

Table 1 Examples of tomography methods.

コンピュータッド・トモグラフィー (CT)
電気容量トモグラフィー (ECT)
電荷トモグラフィー
電気インピーダンストモグラフィー (EIT)
電気インダクタンストモグラフィー
電気抵抗トモグラフィー (ERT)
超短波トモグラフィー
核磁気共鳴画像 (NMRI)
光学トモグラフィー
陽電子放射トモグラフィー (PET)
地震波トモグラフィー
超音波画像

Fig. 2 Optical tomography.

Fig. 3 Electrical resistance tomography.

画像化される。この図においては、電極1と4の間の電気抵抗を測定している。ERT法においては、導体が存在するときは電場が完全に遮断されてしまうので、測定は困難であり、計測場は対象物によって歪まされてしまうことがある。さらに、“soft”な場の計測はもっと複雑となり、特別な再構成が必要となる²⁾。

3. プロセス・トモグラフィーの適用例

3.1 内燃機関エンジンの設計

近年、環境保護への配慮から、自動車エンジンなどの内燃機関の効率化が求められている。エンジン内部の燃料の分布が良くないと燃焼効率が悪くなるため、その分布を安定させるために内部での燃料の分布を可視化し、

その結果に応じてエンジンの再設計を行っている。このような場合、計測対象が常に動いているため、そのスピードに対応できることが必要であり、このような場面に適用できる光学トモグラフィー法が、マンチェスター大学の McCann らによって研究されている⁴⁾。

光学トモグラフィー法においては、物質の分子構造によって、ある特定の波長の光だけが吸収される。例えば、まず波長 1700 nm のダイオードレーザーを用いて、ある特定の炭化水素による吸収を計測する。それに波長 1550 nm のレーザーを同時に照射して、ごみなどによるバックグラウンドの吸収を計測する。この2つの波長を使うことで、炭化水素の吸収だけを求めることができる。

また、オプティカルファイバーを用いることで、これらの近赤外線の吸収を計測することができる。Manchester 大学のシステムでは、4方向から8本（合計32本）の光線を用いており、投影は一面当たり4本しかないので、再構成画像の解像度は良くないが、それでも画像スピードは毎秒3500フレーム取ることが可能である。

Fig. 4では、噴射開始からの各時間における逆投影法による燃料噴射時の断面画像を示している⁵⁾。その際、再構成の際に用いるモデル化手法を適用すると、断面画像の質が向上する。また、Fig. 5に示したように、モデル化手法の画像は、エンジン内部のプロパンの拡がりを見せていることが分かる⁶⁾。このように近赤外光吸収によるトモグラフィーの適用は、エンジン内部の燃料噴射を計測することにより、設計の改善に貢献している。

3.2 高分子反応の制御

ナイロンの製造過程において、高分子反応が用いられる。そのプロセスは密閉容器内、また高温高压で生成されており、中を見ることができない。高分子反応において“froth”が発生するとナイロンの質が悪くなるため、デュポン社とマンチェスター大学が共同で、ERTトモグラフィーによる高分子反応と気泡の監視をするプロジェクトを行った⁷⁾。

高分子溶液の抵抗は、容器内部に設置した電極によって計測され、その得られた情報によって抵抗の断面画像を再構成する。デュポン社のウィルトンの工場（Wilton, U. K.）では、ERTトモグラフィーによって、産業分野における高分子反応の断面画像を世界で始めて見ることができた。Fig. 6(a)(b)は、その断面を1秒間隔で撮影した画像である。ここで、赤い色に近づくほど電気抵抗が大きいことを意味する。Fig. 6(a)は、加熱の効果を表すように、初めの段階で高分子溶液の変化が多く見られる。またFig. 6(b)は、減圧の時に泡ができ始めている状況を示している。このような方法により、高分子反応を監視することができる。

3.3 環境モニタリング

各自治体の様々な規則によって、環境汚染の状況を観察しなければならない場合が増えてきている。中でも、地中の環境汚染の状況を把握するためのモニタリングは

Fig. 4 Cross-section images of fuel spray⁵⁾.

Fig. 5 Model-based reconstruction images⁶⁾.

(a) Images of polymer solution during heating.

(b) Images of polymer during decompression.

Fig. 6 Cross section images of polymerization⁷⁾.

Fig. 7 Monitoring leakage from a settling pond⁹⁾.

難しいとされているが、ERTトモグラフィーは、地中電極によって地中に存在するタンクなどからの漏れを検出することができる。Daily らは、地面に塩水を放出させて電気抵抗を変化させ、それによってERTで可視化し、貯蔵タンク側壁からの漏れを模擬画像化した⁸⁾。また、工場の貯蔵池には、地下水への汚染を防いでいるライナーがある。このライナーに穴が開き、その中身が漏れることがしばしばあるが、そのライナーからの漏洩の場所と大きさを、Binley らはERTの手法で検出している⁹⁾。Fig. 7は実際の貯蔵池（4500 m³）の断面画像を示している。漏れのあった場所を点Aで示し、汚染の大きさを灰色で示している。これにより、汚染を検出した後でも漏れを直すことができる。

4. 結 論

トモグラフィーは、通常見ることのできない部分の構造を明らかにすることができる。そして現在、様々なトモグラフィー技術が利用されてくるようになった。トモグラフィー断面画像で得られる情報は、産業プロセスをモニタリングしたり、効率化したり、あるいは品質を改善したりするために利用されている。本解説記事では、高効率エンジン設計のための燃料分布の計測、廃棄物を減少させるための高分子反応の計測、環境を守るための地中への漏洩物質の検出などを紹介したが、他にも産業の至るところに適用されてきており¹⁰⁾、トモグラフィー技術はこのような可視化計測の分野において大変有効な手法であるといえる。

謝 辞

本解説記事の執筆にあたり、創価大学工学部松山達先生、日本大学理工学部武居昌宏先生、および日本大学大学院生長田裕行君にご協力いただきました。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Kak, A. C. and Slaney, M.: Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, (1988).
- 2) Scott, D. M. and Williams, R. A. eds.: Frontiers in Industrial

Process Tomography, AIChE, (1995).

- 3) Williams, R. A. and Beck, M. S. eds.: Process Tomography, Butterworth-Heinemann, (1995).
- 4) Hindle, F. P., Carey, S. J., Ozanyan, K. B., Winterbone, D. E., Clough, E. and McCann, H.: Measurement of Gaseous Hydrocarbon Distribution by a Near Infra-Red Absorption Tomography System, J. Electron. Imaging, Vol. 10 (2001), pp. 593–599.
- 5) Hindle, F. P., Carey, S. J., Ozanyan, K. B., Winterbone, D. E., Clough, E. and McCann, H.: Near-Infrared Chemical Species Tomography of Sprays of Volatile Hydrocarbons, Technisches Messen, 69 (2002) pp. 352–357.
- 6) Garcia-Stewart, C. A., Polydorides, N., Ozanyan, K. B. and McCann, H.: Image Reconstruction Algorithms for High-Speed Chemical Species Tomography, 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada, (2003).
- 7) Dyakowski, T. et al.: Imaging nylon polymerisation processes by applying electrical tomography, Chemical Engineering Journal, 77 (2000) pp. 105–109.
- 8) Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D. and Binley, A.: Detecting leaks in hydrocarbon storage tanks using electrical resistance tomography, Chapter 15 in Scott and Williams (1995), cited above.
- 9) Binley, A., Daily, W. and Ramirez, A.: Detecting leaks from waste storage ponds using electrical tomographic methods, 1st World Congress on Process Tomography, Buxton, U. K., (1999).
- 10) Scott, D. M. and McCann, H. eds.: Process Imaging for Automatic Control, CRC Press, (2005).