

化学工業や発電所などにしばしば現出する混相流の流動特性を詳細に定量評価して分析制御することは、設備の安定操業に直結する重要な課題である。このため過去様々な計測評価技術が開発されてきており、現在主流となっている混相流計測技術の基礎は二十世紀のうちに確立し、中にはLDAやPIVなど汎用ツールとして広く普及した技術もある。一方、近年のレーザー発振技術の成熟と小型化、センサ技術の高性能化と高機能化、計測データの後処理演算機能の高度化などのテクノロジーの発展により、従来の計測技術に別の機能を付加した多機能かつ高精度な計測が可能となっている。本特集ではそのような最先端の混相流計測技術を紹介する。
(編集担当：坂本明洋)†

電気抵抗方式トモグラフィ法を用いた 化学装置における混相流の可視化計測

上ノ山 周・一条 憲明・仁志 和彦・三角 隆太

1. はじめに

攪拌槽を始めとする化学装置において種々の混相系を対象とし、その流動挙動や分散状態を明らかにしようとする際、分散相が光不透過性となるため、光学的な計測手法の適用が著しく困難や不能となる場合が少なくない。また、高レベル放射性廃棄物等、安全性の面から通常の計測法が適用できない場合もある。このような系に対しては、数値流動解析や本稿で紹介するトモグラフィ計測法が、極めて有効な解析ツールとなる。



Visualization Measurements in Multiphase Flows in a Chemical Equipment using Electrical Resistance Tomography Methods
Meguru KAMINOYAMA (正会員)
1989年 横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期物質工学専攻修了
現在 横浜国立大学大学院工学研究院機能の創生部門 教授
連絡先：〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail kamin@ynu.ac.jp



Noriaki ICHIJO
2015年 横浜国立大学大学院工学府博士課程後期機能発現工学専攻修了
現在 (株)IHI 基盤技術研究所 熱・流体研究部 流体グループ
連絡先：〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地
E-mail noriaki_ichijo@ihi.co.jp

2016年4月28日受理

以下には電気抵抗方式トモグラフィ計測法に関して、まずその計測原理の概略を述べたのち、筆者らがこれまでに手掛けてきた1) 塑性流体におけるカバーン流動領域の計測事例¹⁾、2) 液-液系において分散相と連続相とが逆転する転相現象の計測事例²⁾、さらには3) ガラス溶融炉における高レベル放射廃棄物のモニタリング事例^{3,4)} について紹介する。

2. トモグラフィ計測手法の計測原理の概略

トモグラフィとは、ギリシャ語で“スライスする”意の tomos と英語の画法・記録法の意の graphy を合成した造語であり、断面撮影を意味する。トモグラフィ計測法には幾つかの種類がある⁵⁾ が、連続相が液体の場合には、電気抵

Kazuhiko NISHI (正会員)
1994年 東北大学大学院工学研究科博士課程後期化学工学専攻修了
現在 千葉工業大学工学部機械工学科 教授
連絡先：〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1
E-mail nishi.kazuhiko@p.chibakoudai.jp

Ryuta MISUMI (正会員)
2001年 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了
現在 横浜国立大学大学院工学研究院機能の創生部門 特別研究教員
連絡先：〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail r-misumi@ynu.ac.jp

† Sakamoto, A. 平成27, 28年度化工誌編集委員(8号特集主査)
新日鐵住金(株)技術開発本部プロセス研究所

抗方式トモグラフィ、ERT (Electrical Resistance Tomography) が適している。これは、連続相と分散相との電気抵抗の差を検知して分散相の濃度分布として表示するものである。装置内にセンサーを挿入することがなく、また点測定ではない非接触断面計測が、特長である。ちなみに連続相が気体の場合には、静電容量Capacitanceを計測するECT (Electrical Capacitance Tomography)法が、通常適用される。

図1にERT計測の水平断面の一例を示す。槽径0.2 mのアクリル樹脂製円筒槽の内壁面に10 mm²四方のステンレス電極を16個貼り付けている。1対の電極から交流を槽内に流し、これ以外の隣接する電極対の電位差を計測する。計測位置を一回りさせたら、電流を流す電極を一つずらしていく。これは隣接法と呼ばれるデータ取得法で、16電極の場合、 $n = 104$ 個の電位差データ $V(n)_{\text{meas}}$ を得る。この104個の境界電圧データをもとに槽内の分散相すなわち連続相である液体以外の異物の分布状態を表示する。この画像再構成法には、幾つか手法があるが、著者らはBack projectionと呼ばれる手法^{5,6)}を用いている。これは、有限要素法の枠組みで e 個に刻んだメッシュでの電場解析計算により作成される感度行列と呼ばれる行列 $S(e, n)$ を用いて遂行される。

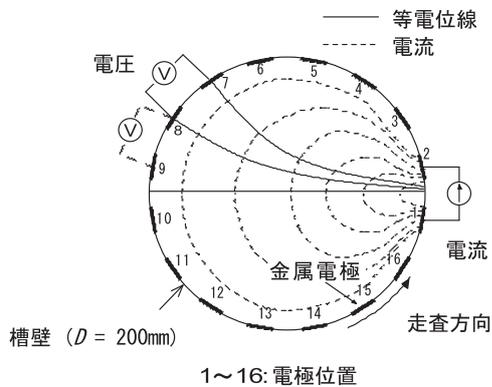


図1 トモグラフィ計測断面の一例

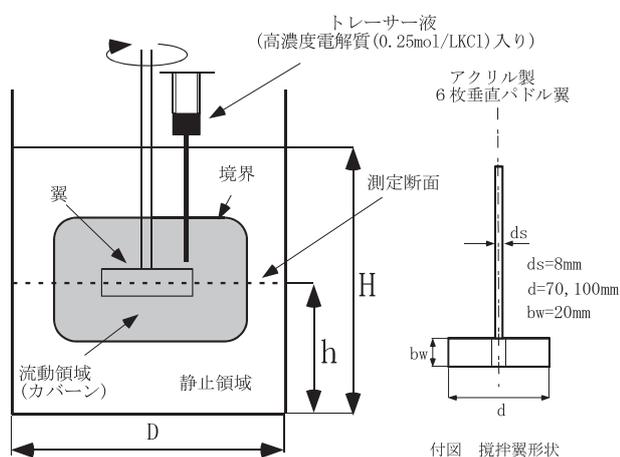


図2 カバールン領域トモグラフィ計測の実験手法概略

3. 攪拌槽におけるトモグラフィ計測事例

3.1 塑性流体におけるカバールン流動領域

攪拌槽内の塑性流体を小型翼により攪拌させる場合、翼廻りにだけカバールン (cavern) と呼ばれる流動領域が生じる。同領域をERT法により計測した事例について述べる。

図2には、実験手法の概略を示す。炭酸カルシウム懸濁スラリー内で翼を回転させ、カバールンを生成させたのち、カバールンの内外で、電気伝導度の差を付けるために、高濃度電解質 (0.25 mol/L KCl) 水溶液をカバールン内に注入する。垂直パドル翼は、上下対称のカバールンを生成するものとして翼中心高さから水平断面での計測を開始し、この断面でのカバールン径を算定する。

図3に示すように計測断面位置を5.0 mmずつ上方にトランスバースさせ、計測を繰り返し、立体的画像を構成する。

図4には翼回転数とスラリー濃度とを変えた場合の計測結果を示す。翼回転数が高いほどカバールン領域は増大し、逆にスラリー濃度が高いほど同領域は減少する様子が窺える。なお翼を傾斜パドル翼とした場合には、翼の上下で非対称となるカバールン領域を計測している。

3.2 液-液系における相逆転現象

攪拌槽の上下に油相と水相の2層を形成させ、油相側で攪拌するとき、油相は連続相となり、水相は分散相となる。翼回転数を増大させていくと水滴は合一して行き、ある回転数で水相が連続相に油相が分散相へと相が逆転する転相が起こる。筆者らは、槽の上中下3断面でERT計測をおこない、回転数を増大させていき、同現象を捉えることに成功している。

図5にはその計測結果を示す。200 rpmで転相の生じて

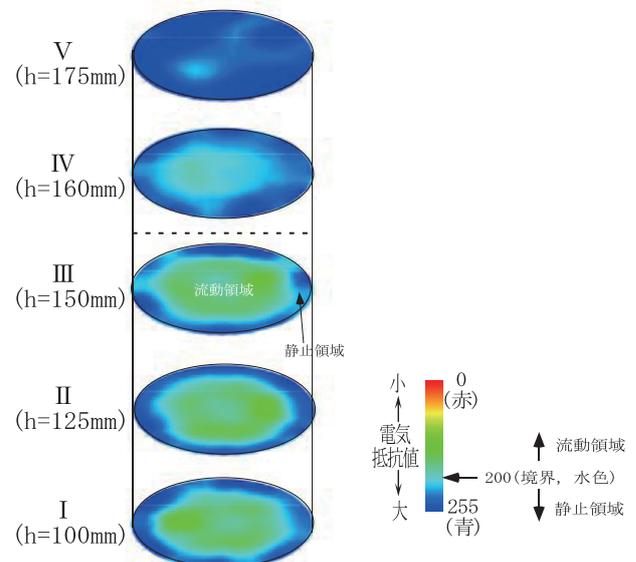
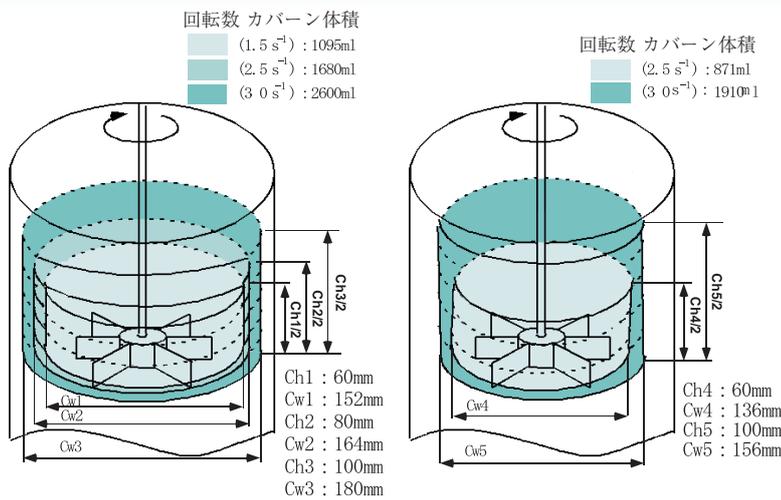


図3 トモグラフィ計測結果の3次元構成



a) 57.2wt%炭酸カルシウム懸濁水 b) 63.2wt%炭酸カルシウム懸濁水

図4 CaCO₃懸濁スラリーのカーボン領域3次元構成図

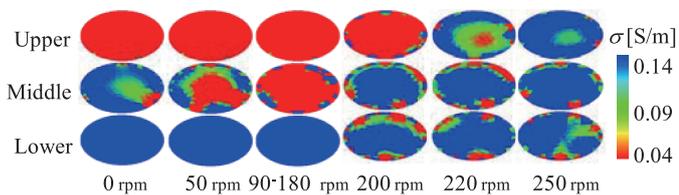


図5 各翼回転数におけるトモグラフィ計測結果

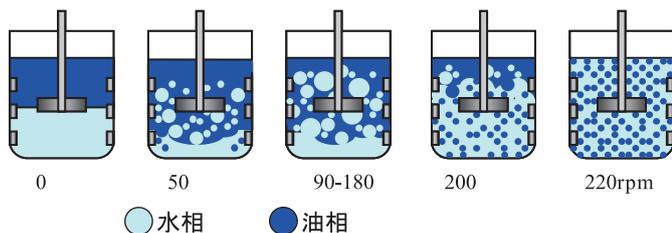


図6 翼回転数変化に伴う転相現象の模式図

いることが分かる。

図6には、前図の結果に基づき、翼回転数変化に伴う相逆転現象を模式的に図化して示している。

なお、転相は翼回転数だけではなく、翼位置高さを突変させることによっても起こるが、この現象についても、著者らはERTにより、計測している。

4. 高レベル放射性廃棄物ガラス溶融炉への適用

4.1 ガラス溶融炉適用の背景と概要

ERTの産業への適用事例として、図7に示す高レベル放射性廃棄物ガラス溶融炉内のモニタリング手法の検討を紹介する。ガラス溶融炉は、原子燃料サイクルの中で生成される高レベル放射性廃棄物を、安定したガラス固化体とすることを目的として使用されている。本工程中に高レベル廃液に含まれる白金族が壁面付近に堆積すると、導電率の

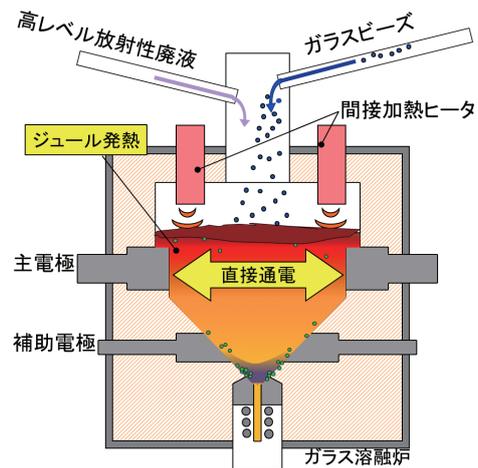


図7 高レベル放射性廃棄物ガラス溶融炉と炉底堆積白金族元素粒子のイメージ

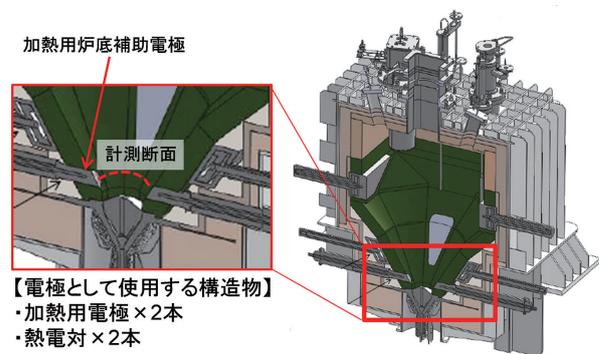


図8 ERT計測対象断面

高い白金族へ電流が流れやすくなり、加熱ムラが発生し、安定運転を阻害する恐れがある。そこで、炉内をモニタリングすることができれば、白金族堆積の兆候を検知し、安定運転に寄与できるため、これまでERTの適用検討^{3,4)}を進めてきた。

4.2 ERT適用に向けた課題と解決に向けた取組み

ガラス溶融炉へのERTの適用に向けては、他の既存構造物との干渉等の設計上の制約から、ERTのための電極が追加できず、従来手法を適用するのが難しい。そこで、数値シミュレーションと基礎実験を重ね、課題解決法として、従来手法に対して、以下の対策を実施した。

- ①ガラス溶融炉に既存の熱電対、加熱用電極をERT用電極としても併用した。そのため、計測対象断面は、同一高さにてERT電極として利用可能な構造物を最も多く(4本)持つ、炉底付近とした(図8)。
- ②電極数は4本で、画像取得のためにはデータ数が不足しているため、すべての電極の組合せを考慮し、従来の手法では2通りだった計測点数を16通りまで増加させた。
- ③画像再構成のためのメッシュは従来手法では図9(a)に示すように断面全域を画像化するが、モニタリングが必要な領域は壁面付近のみであるため、図9(b)に示すよ

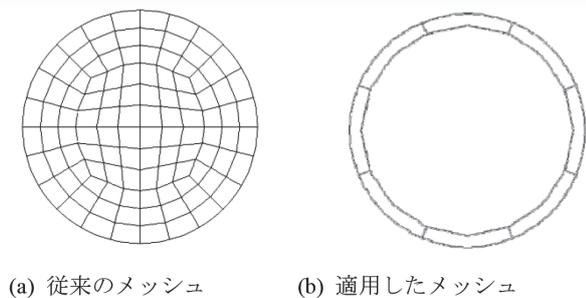
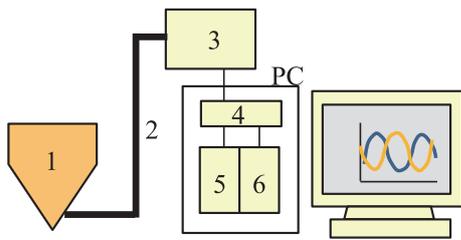


図9 画像再構成のためのメッシュ



- 1: ガラス溶融炉
- 2: ケーブル
(熱電対×2, 加熱用補助電極×2と接続)
- 3: 端子箱(ヒューズと接続)
- 4: スwitchingユニット
- 5: 電流供給源
- 6: データ取得ユニット

図10 ERT計測装置の体系図

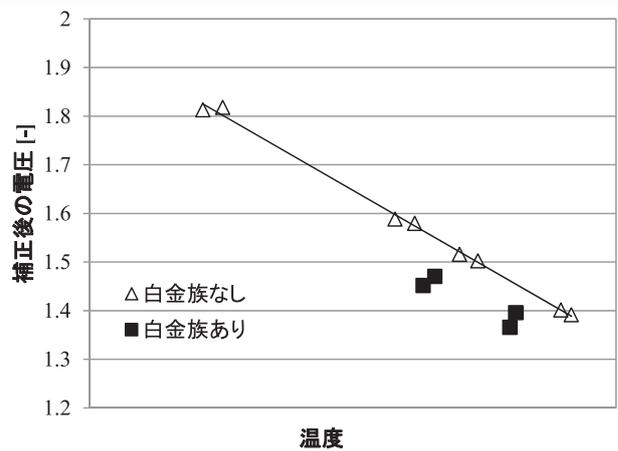


図11 温度と電位差の関係

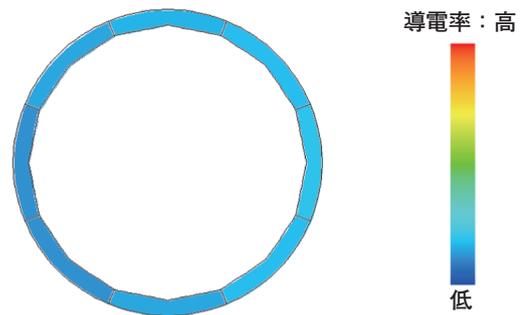


図12 再構成画像

うに、壁面付近にのみ作成し、中央付近は画像化しないこととした。

4.3 ERT計測の流れ

放射性物質の含まれない模擬廃液を用いて、実機と同スケールのモックアップ炉による試験の中で、ERT計測を実施した。機器の構成を図10に示す。取得した電位差波形に対し、FFTによるノイズの除去と、ケーブル抵抗の影響の補正を実施した。

計測は、白金族が含まれない運転状態(低模擬運転)、白金族が含まれる運転状態(高模擬運転)でそれぞれ実施した。電気抵抗は炉内の温度の影響を受けて変化するため、まず低模擬運転において、温度と電位差の関係を確認し、近似式を作成した。その後、高模擬運転において、作成した近似式によって温度の影響を除去し、白金族の影響のみを画像化した。

4.4 計測結果とまとめ

温度と電位差計測値の関係を図11に示す。低模擬運転のとき、温度と電位差はほぼ線形であり、直線近似が可能である。一方で、白金族の含まれる高模擬運転時の電位差計測値は、すべての点が低模擬運転時の電位差計測値よりも低い値となっており、白金族の影響により電位差が低下していることが示唆される。得られた16通りの電位差計測値から再構成した導電率の分布を図12に示す。わずかに白金族の存在している分布が認められるものの、高濃度

の白金族の局在等はないことが確認できた。これは、試験中常時モニタリングしていた他の抵抗値などのパラメータが示す傾向とも一致した。

以上の検討から、ガラス溶融炉内のリアルタイムモニタリングシステム開発に向けて、以下の成果を得た。

- ・ 妥当な計測のできる機器、ケーブル類の構成を確認した。
- ・ 溶融炉の形状、高温の条件下においてERTが適用可能であることを確認した。
- ・ 温度の影響を分離できる見通しを得るとともに、温度以外の炉内環境の変化を検知できた。

5. おわりに

攪拌槽等の化学装置において通常的手法では計測が困難となる異相系混相流の2, 3の事象につき、電気抵抗方式トモグラフィ計測手法により検討した事例を紹介した。今後、他の化学装置における異相系の計測に対しても同手法が適用されていくことを期待したい。

参考文献

- 1) Kaminoyama, M. : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **47**, 109-114(2014)
- 2) Kaminoyama, M., K. Kato, R. Misumi and K. Nishi : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **43**(1), 52-55(2010)
- 3) Ichijo, N. *et al.* : *J. Vis.*, **19**, 183-192(2016)
- 4) 一条ら：第20回動力・エネルギー技術シンポジウム, B123(2015)
- 5) Williams, R. A. *et al.* : *Process Tomography-Principles, Technics and Applications*, 301, Butterworth-Heinemann(1995)
- 6) Kotre, C. J. *et al.* : *Phys. Meas.*, A15, 1-12(1994)