

トモグラフィーによる模擬炉内の固気液三相流の相分布と 温度分布の非接触 4D 可視化計測

代表研究者 千葉大学大学院工学研究科 教授 武居昌宏

1. 諸言

鉄鋼製鉄プロセスにおいては、品質向上のために不純物の除去がキーポイントであり、例えば、転炉では下部から気体を銑鉄に吹き込み、イオウ、リン、炭素などの不純物を酸化除去する。しかしながら、このような浴内の流れ場は、酸化不純物、非金属介在物、スクラップなどの粒子、急激に膨張した気体、および、熔融した銑鉄の粘性液体からなる固気液三相流となり、さらに、温度約 1500°C以上の激しい乱流場になる。このような高温で複雑な流れ場を理解するためには、固気液三相流場の体積分布と温度分布のリアルタイムな非接触可視化計測法の確立が必要不可欠である。例えば、プローブや熱電対が用いられているが、1点のみの接触計測技術であり、粒子・気泡体積分布と温度分布のリアルタイムな非接触可視化計測にはほど遠い。結果として、熱伝達や物質移動の評価はなされておらず、多くのプロセスが勘と経験に頼っているのが実情であり、イオウ、リン、炭素などの不純物が、効率よく除去されているとは言い難い。そこで、本研究代表者は過去の基礎研究において、粒子・気泡の体積分布の非接触計測方法を実現するために、粒子だけに応答する交流周波数(粒子体積緩和周波数) f_p 、または、気泡だけに応答する交流周波数(気泡体積緩和周波数) f_b を用いて、多点多断面のレジスタンス(気泡計測用)やキャパシタンス(粒子計測用)を非接触で計測し、画像再構成アルゴリズムにより、容器内の二相流の断面体積率分布のリアルタイムな非接触 4D(3D+時間)可視化計測に成功し、この方法をプロセス・トモグラフィー法(PT 法)と名付けた(JP 特許 4643832: 混相状態分布計測装置と混相状態分布計測方法)。PT 法は構造が簡易であり 1 画像あたり 1 ミリ秒の超高速で取得できる特徴を持ち、非定常非一様な場であっても体積分布の可視化計測が可能である。しかしながら、この PT 法は、ひとつの交流周波数 f_p 、 f_b を別々に使っているために、固気液三相流の粒子、気泡分布を同時には計測できず、現在まで鉄鋼製鉄プロセスには用いられていない技術であった。

そこで、本研究代表者はその問題を解決する方法として、粒子体積緩和周波数 f_p と、気泡体積緩和周波数 f_b の二つの交流周波数を用いて可視化計測することで、粒子・気泡・分布の同時可視化計測が可能であるとの発案に至った。本研究では、模擬炉内において、粒子と気泡の静的な状態において、体積分布が干渉せずに独立的に精度が高くなる最適な f_p 、 f_b とを確定し、その三つの交流周波数を用いた PT 法により、固気液三相流中の粒子体積分布、気泡体積分布とを、3D+時間の 4D でリアルタイム可視化計測し、製鉄炉内の粒子・気泡体積分布と温度分布の非接触可視化計測法を確立させることを目的とする。本報告書では、固気液三相流場の体積分布のリアルタイムな非接触可視化計

測法の確立に焦点を当て報告する。

2. 固気液三相流の相分布の可視化計測実験

2.1 電気抵抗トモグラフィ法

電気トモグラフィ法は大きく、電気容量トモグラフィ (Electrical Capacitance Tomography、ECT) 法と電気抵抗トモグラフィ (Electrical Resistance Tomography、ERT) 法に分けられる。いずれも対象周囲に貼り付けた電極間で電気計測を行い、得られた値から内部の電気パラメータ分布を画像再構成する手法である。これによって、混相流の相分布や濃度分布の可視化をすることが可能であり、これまでは反応、分離、混合などの産業プロセスにおける単位操作のモニタリングに応用されてきた[1-3]。ERT法では、電極を直接対象と接触させて電気抵抗を測定するため、浮遊容量などの影響は比較的小さくなる。ただし、ERT法では、バルク相が導電性である必要があり、測定対象はECT法よりも制限される。一般的に混相流の可視化用途においては、ERT法では、固液、気液系に対して用いられ、ECT方では加えて、固気、非導電性液体を含む気液系に対して用いられる。

ERTによる断面導電率分布取得プロセスは、電圧測定と画像再構成の大きく二つに分けることができる。Fig.1に電圧測定の概略図を示す。ERT法で用いるセンサは一般的に8、16、32枚程度の測定電極と1つの参照電極からなり、電極数は分解能と測定速度のトレードオフ関係がある。ERTにおける電気測定、再構成手法については、様々提案されているが、以下では特に本研究で用いた16電極隣接法に準じて説明する。まず、隣り合う電極のペア(16-1)に一定の電流を印加する。このとき、残りの電極のうち、隣り合う電極のペアすべて(2-3、3-4、... 14-15)に対して電圧を測定する。このとき、電流を印加する電極を含むペア(1-2、16-15)では、接触抵抗の影響があるので、電圧測定のペアには含まない。続いて、電流を印加するペアを隣(1-2)に移し、同様に電圧測定を行う。このように繰り返すと、電流印加ペアが16通り、それぞれについて13通りの電圧測定を行うことになるが、電流印加ペアと電圧測定ペアを入れ替えたものは相反定理により省略する。したがって $(16 \times [16 - 3] / 2 =) 104$ 通りの測定値が一枚の導電率分布画像のために得られる。このとき参照電極は軸方向に直径の

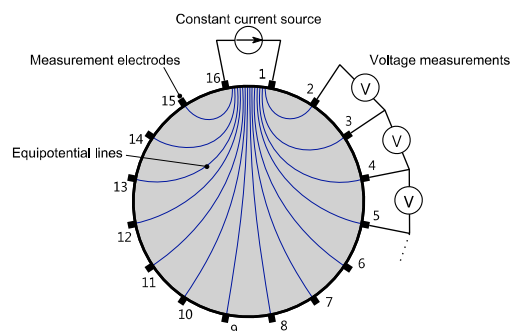


Fig.1 Schematic diagram of circular sensor geometry and measurement strategy

1/2 程度離れた管壁に取り付け、接地され、電圧の基準となる。得られた測定値から適切なアルゴリズムによって画像再構成が可能である。本研究では、 $20 \times 20 = 400$ ピクセルからなる正方配列のうち、円形のセンサ内を表す内接円に含まれない四隅の幾つかのピクセルを除いた 316 ピクセルを再構成格子として用いる。

ERT 法における画像再構成は、結果から原因を推定する不適切逆問題であり、あらかじめ順問題を解く必要がある。ここでいう順問題とは、すなわち導電率分布が既知であるときの測定電圧値を求めることである。測定電圧と導電率分布は線形関係を仮定すると、以下の連立一次方程式で表せる。

$$U = SC \quad (1)$$

ここで U^{104} は測定電圧ベクトル、 C^{316} は導電率分布ベクトル、 $S^{316 \times 104}$ は感度行列とし、ある 1 ピクセルの導電率が変化するとき、測定値がどれだけ変化するかを表し、数学的にはヤコビ行列として以下のように表される。

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial c_1} & \dots & \frac{\partial u_1}{\partial c_{316}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_{104}}{\partial c_1} & \dots & \frac{\partial u_{104}}{\partial c_{316}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 u 、 c はそれぞれベクトル U 、 C の要素である。この感度行列は、電流印加、電圧測定パターン、センサ形状、電極数に応じてあらかじめ有限要素法により計算する必要がある。すなわち 1 ピクセルのみが他のピクセルよりも一定量大きな導電率分布を持つときの測定電圧値を、有限要素法により離散的に求める。そのためには導電率分布を考慮して以下のラプラス方程式を解く必要がある。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (3)$$

ここで σ は導電率分布、 V は電圧分布である。その時の境界条件は電極での電流の出入り及び、管壁での絶縁を表す以下の式である。

$$\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = \begin{cases} i, & \text{on source electrode} \\ -i, & \text{on sink electrode} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

以上より、式(1)での未知数は導電率分布 C のみなので、この連立一次方程式を C について解くことによって、導電率分布が得られる。しかし、感度行列が逆行列を持たないため、一意の解を得ることが出来ないため、適当なアルゴリズムによって近似解を求

める必要がある。

$$C = S^T U \quad (5)$$

式(5)は近似解法の一つ、Linear Back Projection 法である。他の再構成アルゴリズムとして反復解法などを用いて再構成の精度を高める研究が行われている[4]。

実験で使用した ERT センサは一つあたり 16 枚の測定電極と 2 枚の参照電極から成り、測定電極は市販のステンレステープから切り出したものをフランジの中心に等間隔に 16 枚配置した。電極は軸方向に長さを持つため、得られた導電率分布画像は厳密には断面ではなく、この円筒区間の軸方向平均を表す。粒子充填層で ERT を用いる場合、電極は粒子との点接触であり接触抵抗が大きくなるため、一般的な導電性液体が満たされた場合で用いるセンサと比べて電極の表面積は大きく確保した。電極はそれぞれ管壁に開けられたネジ穴にかかるように貼り付けられ、内側からワッシャを通して低頭皿ネジによって貫かれ挟み込まれる。管壁を貫通したネジ部は、測定ケーブルで計測ハードウェアに接続される。ERT 計測では高周波電流を印加、測定するため、計測ハードウェアとセンサを接続するケーブルでの浮遊容量などのノイズの影響を留意する必要がある。そのため、本実験では高周波同軸ケーブル (RG-174/U) を使用した。ケーブル長は 1.2 m であり、シールド線は計測ハードウェア側で片端接地されている。ケーブルは計測器側がセントロニクス 36pin、センサ側がみのむしくリップとなっており、センサフランジ管壁の雄ねじを挟み込んで接続する。

2.2 実験装置と実験方法

実験装置は透明アクリルパイプ製フランジを多段に組み合わせており、そのうちいくつかは、内壁に貼り付けた測定対象に接触させた電極を持つ ERT センサ付きフランジである。次に実験方法について説明する。液体供給は、ローラーポンプによって一定流量で充填部の上から分配器によって点供給 (Point feed) で行い、中央のノズルより液体が粒子充填部に供給を行う。これによって液体の半径方向の分散挙動を観測することができる。そして、充填部底部にはステンレス製の網があり充填物を保持する。その下はリザーバーとなっており、充填部から滴り落ちた液体が蓄えられ、ここから液体はローラーポンプによって汲み上げられ再循環する。供給流量は最大 $Q_L = 100$ l/min、 $Q_G = 1000$ l/min であり高出力のマグネットポンプ (イワキ MX-401、0.75kW) とエアコンプレッサ (三井精機 Z155AS-R、15kW) を用いた。本実験では、運転条件のうち、気液流量と、粒子径、液体粘度、気体密度の影響を調査した。粒子は、A、B の 2 種類すなわち粒径の異なる ($d_p = 3.4$ 、 5.3 mm) アルミナである。管径は $D = 68$ 、 100 、 298 mm の三種類、液体粘度についてはグリセリンの添加により $0.9 \sim 19.4$ mPas の範囲であり、流動状態に影響を与えると思われる液体の表面張力と密度については、水とグリ

セリンで近い影響を無視した。気体密度は空気 (1.293 kg/m^3) 及びヘリウム (0.1786 kg/m^3) で比較した。ERT 計測においては、気液流動の非定常性を捉えるため、計測速度重視とし測定周波数 $f = 19, 200 \text{ Hz}$ であり、計測速度は 8 電極の $D = 68 \text{ mm}$ では 100 fps で、他は 40 fps である。計測 1 セット 1000 フレームで、時間にして 10 秒、25 秒となる。

2.3 実験結果と考察

脈動流の性質

ここで、観測された 3 種類の流動様式のうち、特に脈動流の性質について記す。Fig.2 は簡単のため、断面平均導電率の時間変化をグラフ化したもので、二断面 ($z = 780, 1020 \text{ mm}$) のデータを併記した。図の波形に着目すると脈動流は、平坦部 (ベース) と周期的に到達する三角波 (パルス) からなることがわかる。また、パルスのピークとベースの導電率も毎回ほぼ一定で、それぞれ約 1.7、2.3 となった。パルスの形状についても立ち上がりは鋭く、減衰はそれに比べて緩慢であり、前節の結果のとおり、パルスが三次元的には涙滴形状であることがわかる。また、パルスの発生周期もほぼ一定であり、脈動流に周波数が定義できる。また、上断面 (赤線) に対して、下断面 (青線) はほぼ遅れ波形となり、 $z = 780 \text{ mm}$ 地点で軸方向の助走距離が十分確保できているものと思われ、またパルスが一定の速さで流れていることがわかる。このように十分に発達した脈動流に対して、周波数と伝播速度という少なくとも 2 つの一次元量が定義できることがわかる。

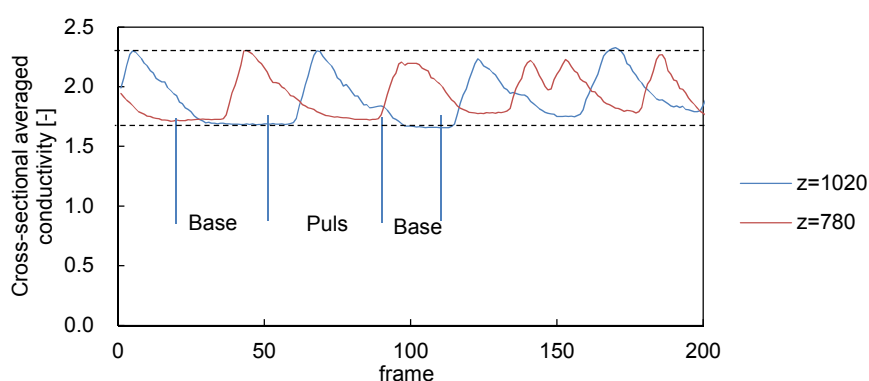


Fig.2 Time variation of cross-sectional averaged conductivity
($D = 68 \text{ mm}, d_p = 5.3 \text{ mm}, j_G = 38.2 \text{ cm/s}, j_L = 1.5$)

主脈動周波数については、1000 フレームのデータから脈動の主成分を数え上げて求めた。Fig.3 は、脈動流領域における、脈動周波数と気液流量の関係を図示したものである。脈動周波数は約 $1.2 \sim 2 \text{ Hz}$ で液体流量増加に伴い増加し、気体流量増加に対しては微増した。脈動伝播速度については、以下の式で二断面間の相互相関関数をとった。

$$M(\tau) = \sum_{t=1}^{1000} \{ \langle c(1020, t) \rangle - \overline{\langle c(1020) \rangle} \} \{ \langle c(780, t - \tau) \rangle - \overline{\langle c(780) \rangle} \} \quad (7)$$

上式のグラフ化の一例が、Fig.4 となる。

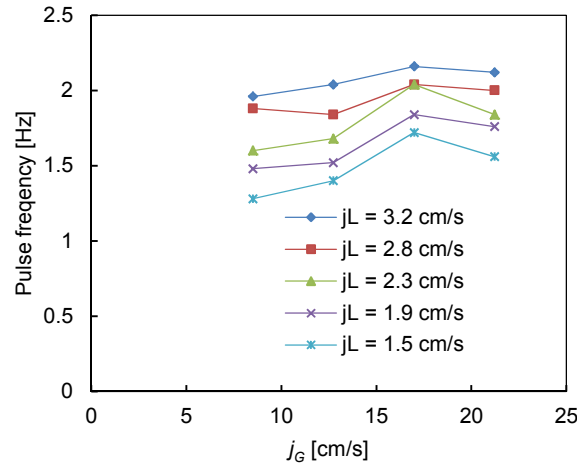


Fig.3 Pulse frequency variation on gas-liquid flow rate ($D=100\text{mm}, d_p=5.3\text{mm}$)

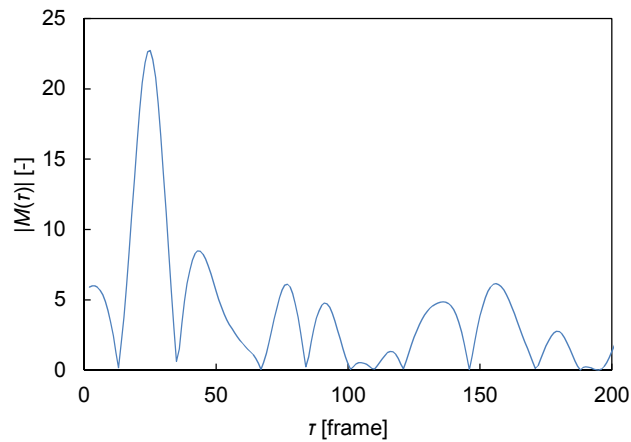


Fig.4 Cross-correlation function between $z = 780, 1020$ mm

互いに周期波形であるため、極大値を一定間隔でとるが、一番近い極大値すなわち $\tau = 24$ すなわち 240 ms で最大値をとっており、二断面間の距離が 240 mm であるから、パルス伝播速度はここでは 1 m/s というふうに伝播速度を求めた。一方で、気液供給流量が定まり、気体の圧縮性を無視すれば質量保存則より管断面での体積流量は断面位置 z によらず定まる。脈動流時に断面内で軸方向流速は一定、気液は交互に層をなし、気液二相の相対速度が 0 であると仮定すると、パルス速度すなわち、気液線速度 v_p は、次式で与えられる。

$$v_p = \frac{j_G + j_L}{\varepsilon} \quad (8)$$

ここで ε は充填層の空隙率であり、球形粒子不規則充填で 0.35 とした。

Fig.5 は横軸を気体流量、縦軸をパルス速度としたグラフであり、線色が液体流量に対応する。また、同液体流量時の式(8)のパルス速度の計算値を同色の破線で併記した。気体流量が増加するとパルス速度は増加し、液体流量が増加してもパルス速度は増加した。気体流量が液体流量に対して 10 倍程度多いため液体流量増加 ($j_L = 1.5 \sim 3.2$ cm/s) に対するパルス速度の増加量は計算値では 4.9 cm/s であるが、実測では 20 cm/s 増加した。

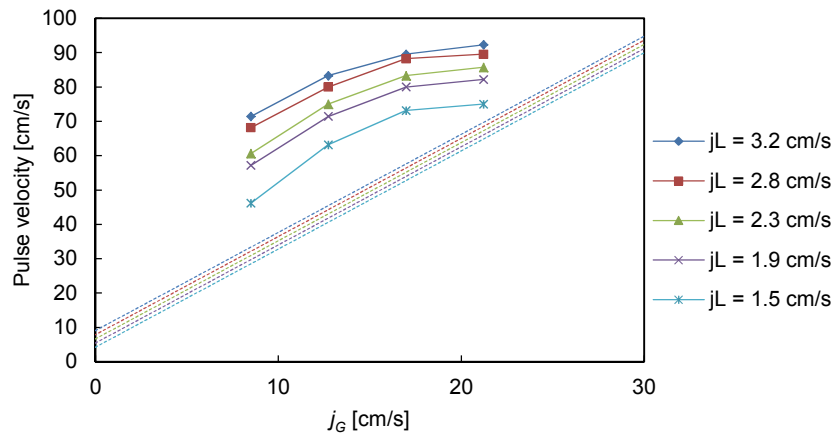


Fig.5 Pulse velocity variation on gas-liquid flow rate ($D = 100$ mm, $d_p = 5.3$ mm)

Fig.6 は、管径、粒径、気液性質を変化させたときの脈動周波数の比較である。粒径が小さい時に周波数が大きくなるなど条件によって値は異なるが、気体流量に対する周波数変化は小さく、液体流量増加に対して周波数が増加するという傾向は共通して見られた。

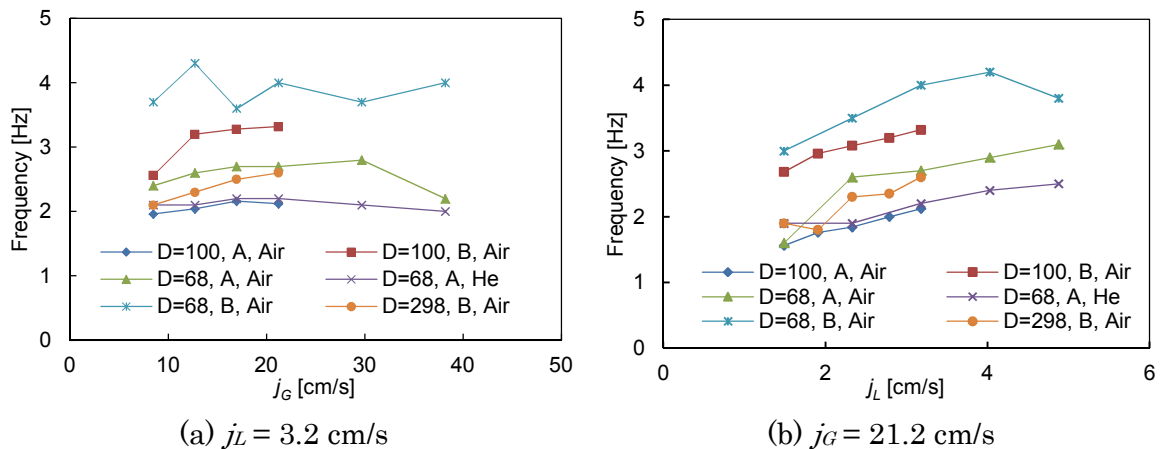


Fig.6 Comparisons of pulse frequency

同様に Fig.7 はパルス速度の比較である。粒径が小さい時に伝播速度が大きくなる傾向があり、気液流量の増加に伴い伝播速度も増加する傾向は共通であった。ただし、気体流量が増加した時、一部で実測値が計算値を下回った。

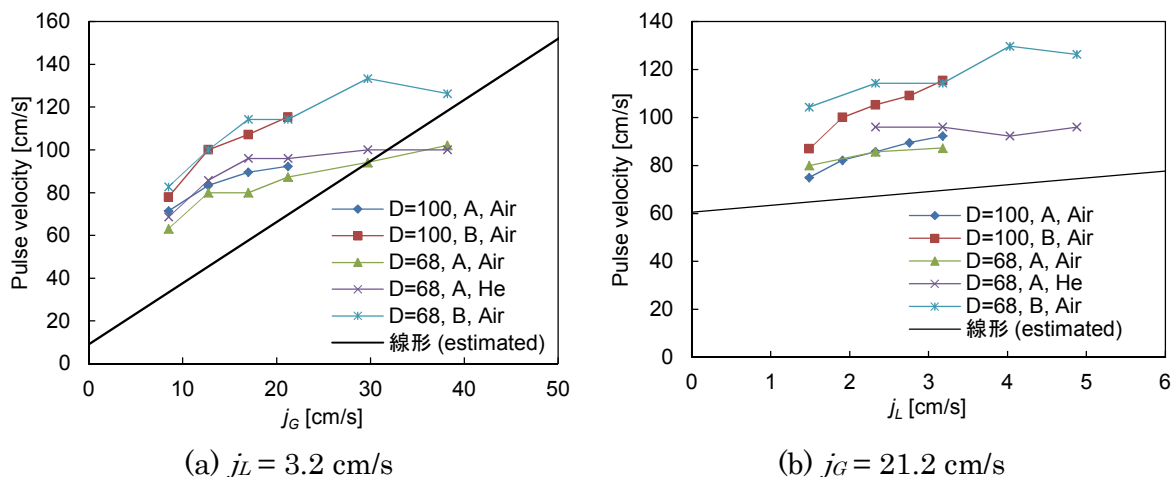


Fig.7 Comparisons of pulse velocity

ここでは、状態遷移点付近での気液の挙動、特に脈動流と気泡流間の状態遷移に対し、気体流量増加による遷移(i)と液体流量増加による遷移(ii)について考察した。Fig.8 は液体流量変化に伴う気泡流領域(BF)の状態遷移 (気体流量 : 3.2 cm/s) において、気泡流領域から気体流量一定で液体流量を減少させたときのスライス画像である。スライス画像とは、時空間的变化の比較を容易にするために、管断面の直径線上の導電率分布の時間変化を表しており、ここでは、左から右に向かって 2.5 秒間の時間経過を表す。Fig.9 は対応した断面平均導電率の時間変化である。液体流量が多いとき、分散気泡が黄緑の点として不規則的に発生しており、導電率波形は一定の波形を持たずに乱れている。脈動流の周波数が $1 \sim 2 \text{ Hz}$ 程度であるから気泡流における波形の周期は脈動流よりも短く、振幅が小さく、周期性が小さい。液体流量の減少とともに低導電率領域が占める割合が増加していき、一定流量 ($j_L = 1.5 \sim 1.7 \text{ cm/s}$) を境に気液両方とも連続相に遷移した。導電率波形は液体流量の減少とともに時間的な乱れと時間平均値が減少している。

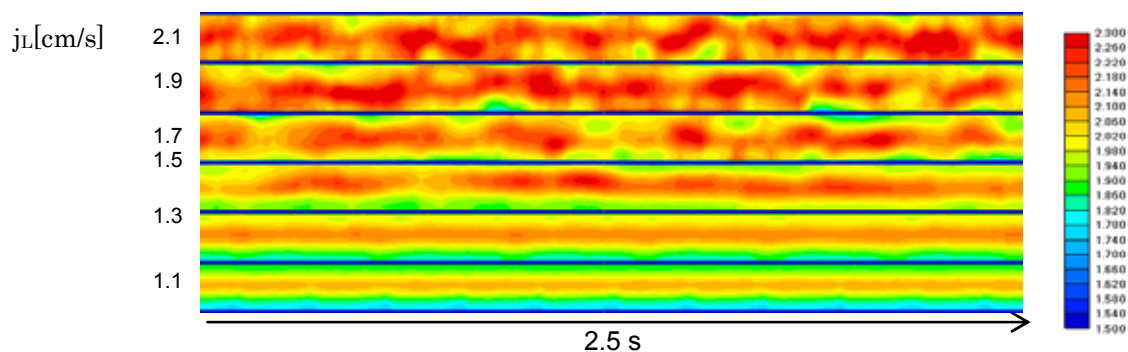


Fig.8 Sliced tomograms of transition from BF ($D=100 \text{ mm}$, $d_p=5.3 \text{ mm}$, $j_G=3.2 \text{ cm/s}$)

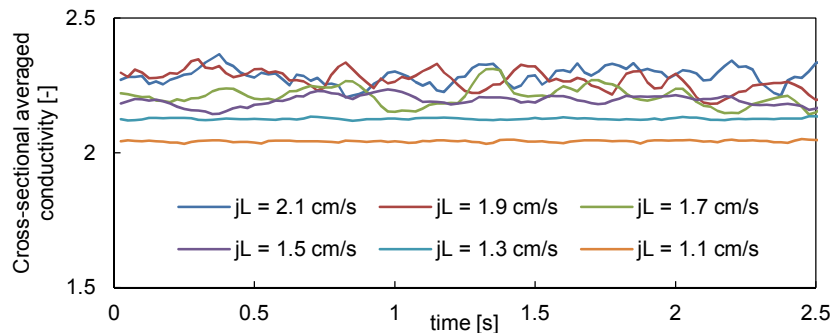


Fig.9 Time variation of conductivity of transition from BF
($D=100\text{mm}$, $d_p=5.3\text{mm}$, $j_G=3.2\text{cm/s}$)

3. 結言

本研究では製鉄炉内の固気液三相流場の体積分布のリアルタイムな非接触可視化計測法の確立を目的に、固気液三相流の気液分布を電気抵抗トモグラフィ法によって非接触可視化計測を行い、脈動流および流動状態遷移可視化実験について以下の知見を得た。

- 1) 気液流量に対する流動状態遷移境界は、管径および粒径によらない。しかし、管径が小さいほど脈動が明瞭になる。
- 2) 粒径が小さいと流動抵抗が大きいため、気液流量増加に伴い脈動強度分布が不均一となる。
- 3) 気体密度の低下は気相の運動量を低下させ、気泡流から脈動流への遷移に必要な気体流量を増加させる。

4. 謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団 2014 年度技術研究助成により行われました。ここに心より御礼申し上げます。

5. 参考文献

- [1] S. Hosseini, D. Patel, F.E. Mozaffari and M. Mehrvar: "Study of Solid-Liquid Mixing in Agitated Tanks Through Electrical Resistance Tomography", *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, pp. 1374-1384 (2010).
- [2] R.A. Williams, X. Jia, R.M. West, M. Wang, J.C. Cullivan, J. Bond, I. Faulks, T. Dyakowski, S.J. Wang, N. Climpson, J.A. Kostuch and D. Payton, "Industrial Monitoring of Hydrocyclone Operation Using Electrical Resistance Tomography", *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 10, pp. 1245-1252 (1999).
- [3] E. Fransolet, M. Crine, P. Marchot and D. Toye, "Analysis of Gas Holdup

in Bubble Columns with non-Newtonian Fluid Using Electrical Resistance Tomography and Dynamic Gas Disengagement Technique”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 6118-6123 (2005).

- [4] M. Takei: “GVSPM Image Reconstruction for Capacitance CT Images of Particles in a Vertical Pipe and Comparison with the Conventional Method”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 8, pp. 2104-2112 (2006).