

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560754

研究課題名(和文) 岩石コア中の流体挙動把握のためのキャパシタンス CT 法の開発

研究課題名(英文) Capacitance CT System for Visualizing Fluid Flow in Rock Core

研究代表者

塚田 和彦 (TSUKADA KAZUHIKO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10179971

研究成果の概要(和文):

岩石コア中のガス・水・油などの流体の内部での流動状態を直接的に可視化する新たな手法として、キャパシタンス CT 法の適用を検討したものである。円筒領域を対象としてその外面に多数設けた電極相互間の静電容量計測値から内部誘電率分布を可視化する方法であり、実際の計測システムを製作するとともに、内部可視化をほぼリアルタイムで実現する画像再構成アルゴリズムと、オフライン処理としての画像改善手法を提案した。

研究成果の概要(英文):

A capacitance CT system for visualizing electrical permittivity distribution in a cylindrical volume based on the measurements of capacitance between pairs of electrodes attached on the surface of the volume was developed. The system could be useful to visualize fluid flow in a rock core. Algorithms for the real-time visualization and the off-line processing for improving visualized permittivity image were proposed.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究代表者の専門分野：非破壊検査

科研費の分科・細目：総合工学・地球資源システム工学

キーワード：資源エネルギー，岩石コア実験，静電容量計測，誘電率分布，トモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

(1) 炭酸ガスの地中固定や放射性廃棄物の地層処分、メタンハイドレートの開発など、資源エネルギー分野における喫緊の研究課題の全てが、地下内部における流体の流動に関係するものである。それらに関する基礎研究として、岩石コアや地層モデルをつかって、砂質や岩質材料中のガス・油・水などの流動特性を調べる実験が多く行われている。しか

し、これらの実験においては、対象物の境界における流入・流出特性から内部の流動状態を推定しているのが現状であり、内部状態を直接的に観測できる手段の提供されることが求められている。

(2) 内部状態の可視化手法として、現時点では X 線 CT が唯一その可能性をもっており、一部ではその適用も試みられている。しかし、装置が大掛かりなこともあって、様々な形状

の対象モデルに対して、その動的流動状態をほぼリアルタイムで観測できるまでに高めるには、自ずと限界がある。したがって、より簡便かつ高速で、融通性のある計測手段が求められている。

(3) X線CT以外の内部可視化手法として、超音波CTや比抵抗CTなどの手法が提案されているが、それらの一つとして、電界を用いて内部誘電率分布を可視化するキャパシタンスCT法が、化学プラントにおけるパイプ内の気液混相流を対象として、90年代末に開発された。

(4) 本研究で対象とする砂質や岩質材料中の水やガスの分布状況の把握に対してキャパシタンスCT法の適用は、未だ試みられたことがないが、映像化しようとする物性値の構成要素間コントラストの大小と、計測の際に形成される場の非線形性の強さという2つの観点から考えて、キャパシタンスCT法こそが、比抵抗や超音波などを用いる方法よりもはるかに適していると考えられる。つまり、キャパシタンスCTは、解くべき問題としてX線CTほどには性質のよいものではないものの、求めるべき誘電率の構成要素間コントラストが中庸であって、そのコントラストが極端に大きい比抵抗CTなどに比べて、問題の非線形性が比較的弱く、内部可視化技術としてX線に次いで、有用な方法なる可能性をもっていると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、砂質あるいは岩質材料内部における水やガスの分布やその運動状況を、直接的に把握できる新たな計測手段を開発することにある。具体的には、円筒領域を対象として、その表面に設けた複数の電極によって各電極間の静電容量を計測し、その多数の組合せによる測定データにもとづいて、内部の各構成要素の分布を、誘電率の分布として、ほぼリアルタイムで画像化できることを目標とする。

3. 研究の方法

本研究の遂行においては、キャパシタンスCTシステムの試作と、数値シミュレーションにもとづくその最適化、実測データにもとづく逆解析とその手法の改良、これらの3つの研究フェーズ(下記に(1)-(3)として具体的内容を示している)を循環的に繰返しながら、それぞれを望ましい水準まで高めるという方法をとる。

(1) キャパシタンスCTシステムの試作：円筒領域内の誘電率分布の可視化を対象として、その円筒外面に複数の電極を配置し、それらの電極相互間の複数の組合せによる静電容量の計測値にもとづいて断面内の誘電率分布をほぼリアルタイムで画像化する自

動化システムを製作し、その性能を確認する。
(2) 数値シミュレーションにもとづくシステムの最適化：上記試作システムをベースとして、その電極の数・形状・寸法などが、内部可視化にどのように影響するか、FEMによる数値解析をベースとして検討し、精度と解像度の観点から、システムの最適化を行う。
(3) 断面内誘電率分布推定の逆解析アルゴリズムの開発：リアルタイム可視化を目的とする線形化インバージョンと、オフラインでの画像改善を目的とする非線形インバージョンの方法について、種々の方法の優劣について検討して、キャパシタンスCTにおける可視化技法を確立する。

4. 研究成果

(1) キャパシタンスCTシステムの試作

数値解析的な予備検討にもとづいて、円筒領域内の中央断面における誘電率分布を可視化するキャパシタンスCTの自動化システムを試作した。図1は、システム全体の外観を示す。なお、試作したセンシングヘッドの構造を図2に示す。

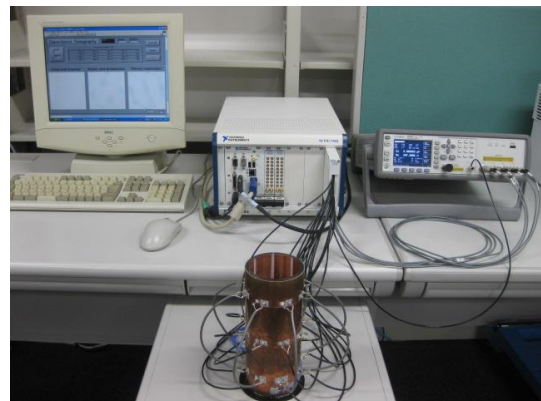


図1 キャパシタンスCTシステムの外観。(システムは、円筒形センシングヘッド、LCRメータ、コントローラ、ディスプレイから構成されている)

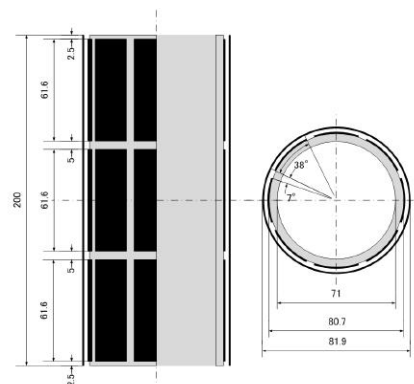


図2 センシングヘッドの構造。(周方向8枚×軸方向3段の電極配置のものを示す。)

(2) 断面誘電率分布再構成のアルゴリズム
リアルタイム可視化

リアルタイムに近い断面可視化を実現するためには、円筒面状での多数の組合せによる電極間キャパシタンス計測データから内部誘電率分布を求める逆問題解析に、単一ステップで解の得られる線形インバージョンの方法を用いる必要がある。正則化最小二乗解にもとづく方法が、もっとも良い再構成画像の得られることが分かった。

オフラインでの内部可視化画像の改善
オフライン処理として、非線形反復計算によって再構成画像をかなり改善すること、すなわち、偽像の少ないより明瞭な誘電率分布を求めることが示された。このことは、本手法が適用対象としている様々な実験に対して、リアルタイムでのモニタリングと、実験後の詳細解析という2段階の評価フェーズを提供できることを示すものである。

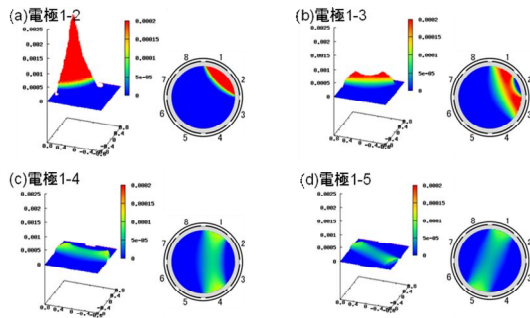


図3 電極の組合せごとの円筒断面内の感度分布。(なお、再隣接電極間の感度が極端に高く、悪影響しか与えないことが明らかになったため、再構成に用いないこととしている。)

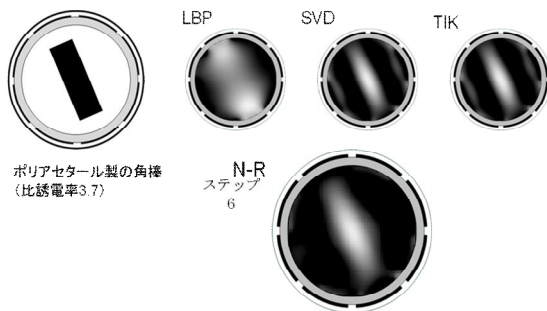


図4 断面内誘電率分布の可視化画像。(上段左端が与えた誘電率分布である。上段の3つの再構成画像が、単一ステップによる線形インバージョンの結果で、リアルタイムでの画像化である。TIKと記したティコノフ正則化を用いる方法が最も良い画像が得られている。下段はオフライン処理として、ニュートンラフソン型の反復計算による非線形インバージョンの結果で、ステップ6回で、偽像がなくなり画質がかなり改善していることがわかる。)

(3) 計測システムの最適化と円筒領域内の多断面可視化

内部誘電率分布の再構成画像の品質は、計測ヘッドに設ける複数の面状電極の数・寸法・配置に依存する。したがって、数値シミュレーションにもとづいて、これら形状パラメータの最適化を図り、その結果にもとづいて、3つの断面の同時可視化を可能とする計測ヘッド(各断面の電極数12)を製作した。そのシステムを用いた実験から、軸方向に誘電率分布が異なる構造の上下の動きを可視化することを試み、ある程度の解像度をもってその動的な変化を、約5秒/フレームの更新速度で画像化できることが示された。このことから、当初の目的としていた、岩石コアを用いた水・ガスなどの流動実験に対して、その動的な流動挙動観測への道が開かれたものと考えている。

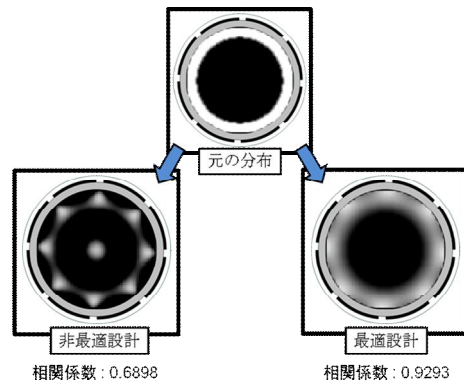


図5 電極配置の最適化による画像改善。(電極相互間のキャパシタンス計測にもとづく内部誘電率分布の再構成画像の品質は、計測ヘッドに設ける電極の寸法や配置のしかたによって大きく左右される。右下の図が最適化した計測ヘッドによって得られた画像である。)

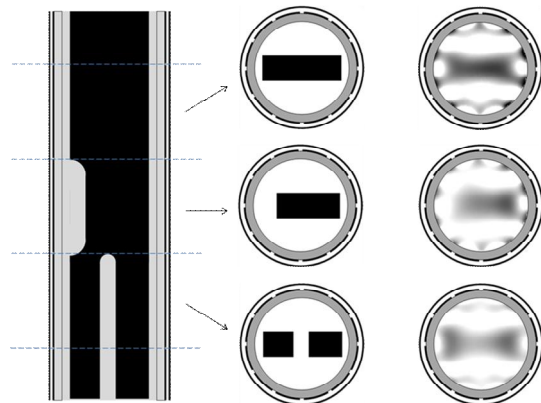


図5 縦方向3断面における動的可視化の結果。(左と中段の図は、与えた誘電率の3次元分布を、縦断面と3つの横断面で示したものである。右段が各断面における誘電率分布の可視化結果である。)

5. 主な発表論文等

[学会発表](計2件)

野口貴史, 金銅敬二郎, 塚田和彦

円筒領域内の物質流動可視化のためのキャパシタンス CT の設計と開発, 日本非破壊検査協会 / 表面探傷シンポジウム, 2011 年 3 月 12 日, メルパルク京都 (京都市)

野口貴史, 金銅敬二郎, 塚田和彦

キャパシタンス CT による内部誘電率分布の可視化, 日本非破壊検査協会 / 表面 3 部門合同研究集会, 2010 年 10 月 1 日, 滋賀県立大学 (彦根市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚田 和彦 (TSUKADA KAZUHIKO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10179971