

核磁気共鳴物理探査技術の最近の動向

中島 善人¹⁾

1. はじめに

核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance, NMR) の厳密な学問的定義は、「外部磁場におかれた原子核の磁気モーメントのゼーマン準位間の共鳴遷移を、共鳴周波数の電磁波をもちいて計測する分光学」です。しかし、これではなかなかイメージが湧きませんね。ひらたく言えば、磁石と高周波コイルからなるマイクロフォンをもちいて、原子核のささやきを聞く手法です(第1図)。実際は、核のささやきは音波ではなく電磁波なのですが、第1図は核の歳差運動(みそすり運動ともいいます)を磁石と高周波コイルというセンサーでファラデーの電磁誘導の法則に基づいて計測



第1図 プロトン核磁気共鳴計測のイメージ。H₂O分子の水素原子核の歳差運動(円錐形の軌跡)を、磁石とコイルで構成されているマイクロフォンで聞き取っています。

するという本質は外していません。

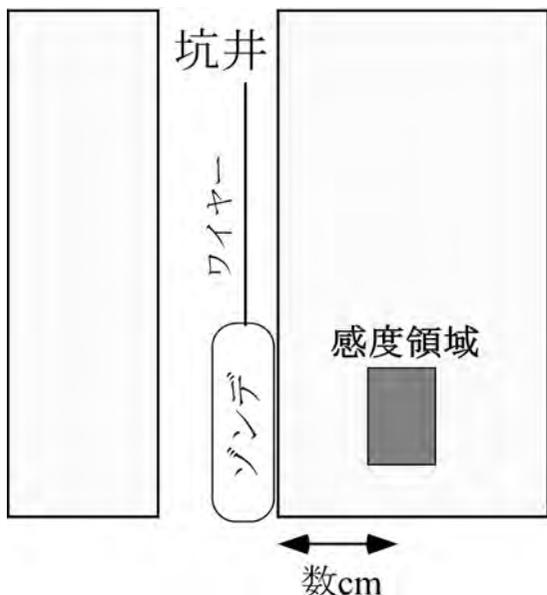
核磁気共鳴物理探査とは、軽水素 (¹H) の原子核 (プロトン) を対象とした物理探査です(中島, 2002)。¹Hは、太陽系の主要構成核種であり、地球表面においては水、石油、天然ガス、含水鉱物として豊富に存在しています。たとえば、水は地殻内部では地下水・熱水として地層中にふんだんに存在し、地滑りなどの地盤災害の原因あるいは農業・地熱発電の資源として重要な役割を演じています。また、石油や天然ガスがどの深度のどれだけ空隙率や浸透率の高い(生産性の高い)貯留層に埋蔵されているかは、資源開発上必要な情報です。このように、プロトンをターゲットにした核磁気共鳴物理探査は、地層中の含水素流体(地下水や石油)を対象とした探査に適しています。核磁気共鳴は、波長の長い電磁波を使うので、概して感度の低い分光学です。しかし、幸運なことに¹H核はあらゆる安定原子核のなかで最も核磁気モーメントが大きい核種です(したがって計測が容易です)。この点、私たちはこの宇宙を造りたもうた造物主に感謝せねばなりません。このため、¹H核磁気共鳴物理探査は60年以上の開発史を誇り、現在では地下水、石油など水素を含む液体を原位置でほぼリアルタイムに非破壊定量計測できる技術として非常にユニークな存在になりました。小論では、最近の核磁気共鳴物理探査に関する学会やワークショップ資料から得た最新の技術動向、および私たちの研究グループの最近の成果を紹介します。

2. 核磁気共鳴検層

検層とは、坑井の内部に計測機器を降ろして孔壁に露出している地層の状態を調査する作業のことです。たとえば、掘削した油田の経済性の評価では欠

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: NMR, 核磁気共鳴, 地下水, 検層, 非破壊検査, 土壌汚染



第2図 プロトン核磁気共鳴検層の概念図。永久磁石と高周波コイルを搭載したゾンデを坑井に降ろし、ワイヤーで引き上げながら孔壁から数cm～数10cm奥にある水や石油の分子を計測します。

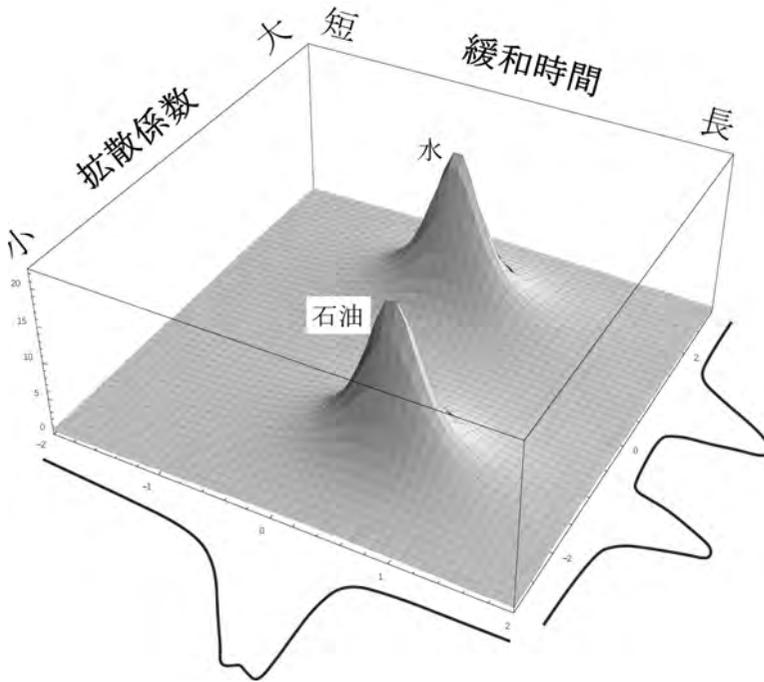
かせない作業です。核磁気共鳴検層の概念図を第2図に示します。第2図のゾンデの中には、検層システムの心臓部分であるところの核磁気共鳴センサー（永久磁石とコイル）が内蔵されています。まず永久磁石で多孔質な地層中の間隙にある水分子や石油分子中の水素原子核を巨視的に磁化させます。次にコイルから1MHz程度の高周波を照射して核スピンを励起し、同じコイルで核スピンの熱平衡状態に回帰する過程（緩和過程）を計測します。緩和波形の振幅の大小から水素の量（すなわち空隙率）、緩和時間の長短から空隙サイズや浸透率を推定します。詳細はCoates *et al.* (2001), Dunn *et al.* (2002)を参照ください。空隙率は石油の埋蔵量評価に必須の情報であり、空隙サイズや浸透率は坑井の石油生産能力に直結する物理量なので、核磁気共鳴検層は石油資源開発の分野で重宝されています。

「核のささやきを聞くのが核磁気共鳴」と冒頭で書きましたが、そのささやきはとても小さい声量なので、いくらHが最強の核種とはいえ、高度な計測システムを構築しないと、ノイズの海に埋もれてしまいます。核磁気共鳴検層装置の開発は、このシグナル・ノイズ比の改善に尽きるといっても過言ではなく、磁石やコ

イルの構造およびパルス系列（核の運動を計測するためにコイルから放射される電磁波パルスのパターン）で各社とも特許を多く出願しています。私たちのグループも、ささやかですがこの開発を行っています（中島・宮木, 2007）。

さて、核磁気共鳴検層に特化した学会が、2006年10月に中国の桂林（Guilin）で開催されました（SPWLA Topical Conference on NMR logging）。中国は言うまでもなく屈指の産油国で、油田の生産性評価や石油埋蔵量推定に結びつく浸透率や空隙率を計測できる核磁気共鳴検層を重要視しており、5日間の会期中に口頭発表だけで約60件もの核磁気共鳴検層に関する講演がありました（やや余談ですが、日本国内では核磁気共鳴検層の成果は、おもに日本地層評価シンポジウム（<http://www.geocities.jp/ymmiya/>）で発表されるようです）。

桂林の学会でとくに目を引いたものが、2次元核磁気共鳴スペクトルの実用化でした（Zhaobin and Wei, 2006）。それは、従来緩和時間の解析だけ行っていたもの（1次元）に自己拡散係数を追加して2次元にするというものです。油田開発では、多孔質岩石中に胚胎する流体が石油なのか水なのかを識別することは、地層の経済的価値の評価上とても重要です。しかし、プロトン緩和時間の長短だけでは識別不可能というケースがままあります。これは、多孔質岩石中の間隙流体のプロトン緩和時間が、流体の種類（水か石油か）だけでなく、空隙サイズや造岩鉱物の種類にも敏感に依存するからです。一方、間隙流体の自己拡散係数は、流体分子自身のバルクとしての粘性係数でほぼ決まってしまうので粘性係数が桁違いに異なる水と石油を容易に識別できます。自己拡散係数は、ゾンデ内の磁石がつくる定常磁場勾配を利用すれば緩和時間計測用の既存のパルス系列を少し修正するだけで比較的短時間に計測できます。詳しい計測原理は、Freedman and Heaton (2004) や Freedman (2006) をご覧下さい。第3図に2次元スペクトルの概念図を示しました。ご覧のように、緩和時間軸に投影した従来の1次元データでは、緩和時間が似かよっているために石油と水のシグナルの分離は困難です。しかし、拡散係数の軸から眺めれば、自己拡散係数の高い水と低い石油のシグナルを明確に識別可能です。このように、2次元核磁気共鳴スペクトル法は豊富な情報量で間隙流体の識別を可能にし、今後



第3図

プロトン緩和時間と自己拡散係数を変数とする、水と石油を両方含む多孔質岩石サンプルの2次元スペクトルのイメージ。水と石油の2つのピークが見えます。それぞれの変数の軸方向に積算した1次元スペクトルも実線で表示してあります。緩和時間の軸から見ると両者のピークはほとんど重なってしまい識別困難ですが、自己拡散係数の軸から見れば明瞭にピーク分離できます。

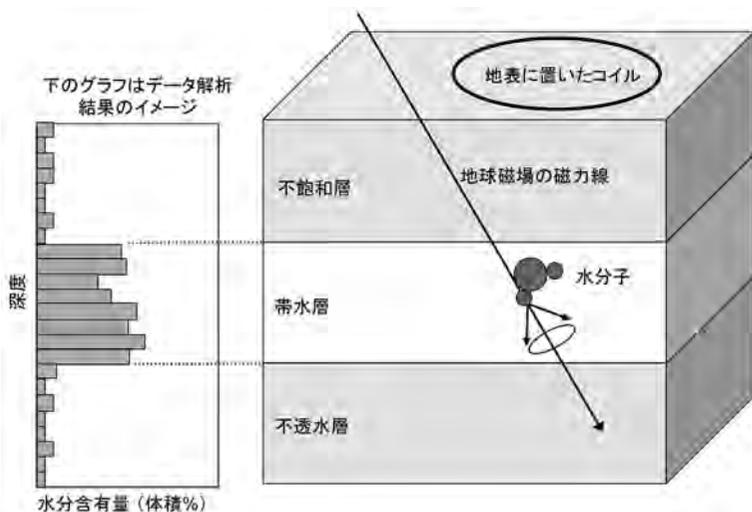
の地層評価作業におおいに貢献することと思われます。

核磁気共鳴検層は、均質な多孔質岩石の空隙率、浸透率、間隙流体の自己拡散係数を計測するケースが主流です。しかし、私たちは、亀裂の入った不均一な地層からでも有益な水理学的な情報を計測できないか研究しています。具体的には、核磁気共鳴検層による亀裂幅の定量計測というやや特殊な使い方です。そもそも地層中の開口している亀裂は、地下水および地下水に溶存している汚染物質の遠距離輸送ルート(水みち)として重要です。亀裂幅は、水みちの物質輸送能力を支配する重要な水理学的量なので、定量計測の必要性があります。私たちは、亀裂を胚胎する国内の溶岩層で実際に核磁気共鳴検層を行い、掘削中に掘削泥の全量逸水が発生した深度で見つかった亀裂の開口量を推定することに成功しました(Nakashima and Kikuchi, 2007)。核磁気共鳴検層は、亀裂型の水みちの評価が必要な、たとえば地熱貯留層評価、放射性廃棄物の地層処分場候補地の調査、CO₂地中貯留分野への応用が可能といえましょう。核磁気共鳴検層は、歴史的には石油を胚胎する地層の評価のために発展してきた技術ですが、油田評価以外の応用が見出されようとしています。

3. 地磁気を用いた地下水探査

磁石磁場を用いない、非常にユニークな核磁気共鳴物理探査法(Magnetic Resonance Sounding)があります。それは、永久磁石の代わりに地球磁場を使う超低磁場核磁気共鳴法です。第4図に概念図を示しました。地表に直径100m前後のコイルを展開し、そのコイルから約2kHzの電磁波を照射して、地下数10mにある帯水層の水分子のプロトンからシグナルを得るシステムです。高価で重い希土類永久磁石が不要なので、持ち運びが容易かつ安価という特徴があり、砂漠での地下水探査法等として実用化されています。European Association of Geoscientists & Engineersが出版している学術雑誌の特集号(Near Surface Geophysics 2005, Volume 3, Numbers 3-4)で、この地磁気核磁気共鳴探査法が詳しく紹介されています。また、最新の研究結果は、スペインのマドリッドで2006年10月に開催された3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding Methodという研究集会で発表されています。その集会では、3日間で29件の口頭発表がありました。

地磁気を用いた核磁気共鳴物理探査は、非常に興味深い技術です。数100 Gaussもの強磁場を使用して



第4図
地球磁場を用いた地下水探査のイメージ。直径100mものループ状大型コイルを地上に展開し、地下の帯水層の水分子の歳差運動を検出します。データを解析すると、水分量の深度分布がわかります(左のグラフ)。

いる第2図の検層ゾンドの探査深度(コイルから感度領域の中心への距離)が数cm~数10cmしかないのに対して、地磁気を用いた第4図のシステムは、コイルの直径や地盤の電気伝導度にもよりますが、探査深度が約100mもあるからです。核スピンの緩和波形のシグナル・ノイズ比は磁場強度にほぼ比例します。したがって、1 Gauss程度しかない弱い地磁気で核磁気共鳴計測を試みると、ファラデーの電磁誘導の法則でコイルに発生する生シグナルのレベルはわずかなボルトのオーダーにすぎず、したがってノイズの海にシグナルが埋没してしまい、計測は到底不可能と思いがちです。しかも、地磁気強度を計測するプロトン磁力計で採用されているプリ・ポーラリゼーションというシグナル増強のテクニックは、サンプルが大きすぎて使えません。にも拘わらず、感度領域である帯水層のサイズが数1,000m³もあるという利点を生かし、また8の字型ループ・コイルなどのノイズ低減法を援用することでこの問題を解決し、しかも1次元ながらイメージングまでできたというのは、著者にとっては驚きのテクノロジーです。

ところで近年、土壤汚染が深刻な社会問題になっています。汚染された土壤の修復作業を立案するにあたって、まず、汚染の現状(汚染物質の地盤内での分布)や、その地盤の水理学的環境(帯水層つまり地下水脈がどの深度にあるか)を調査する必要があります。私たちの研究グループでは、この調査に使える物理探査技術を開発しています(横田ほか, 2007; 光

畑ほか, 2007; Seol et al., 2007)。

著者の知る限り日本での実施例はないようですが、地磁気を用いた核磁気共鳴物理探査は、地下数10mまでの帯水層を第4図のグラフのような形で1次元イメージングできるポテンシャルがあるので、土壤汚染問題への適用を検討するに値する物理探査法です。ただし、上記のマドリッドでの研究集会でもしばしば指摘されていますが、探査が成功するためには、電磁波のバックグラウンドノイズレベルが許容値以下である必要があります。そうでないと、非現実的なまでに莫大な回数のシグナル積算作業が必要になります。そこで、まず予備調査として、関東地方のいくつかの地点で微小ループアンテナを用いたノイズ計測を行いました。残念ながら、茨城県つくば市の産総研構内(第5図)では、許容値より1桁弱高いノイズレベルだったので、つくばでこの地磁気核磁気共鳴物理探査を実施するのは難しそうです。しかし、千葉県九十九里浜や東京都新島のノイズレベルは許容レベルを下回っていましたので、そこならば帯水層が地下数10mにあれば検出できる可能性があることがわかりました。生憎つくば(東京郊外)ではノイズレベルが高かったのですが、ベルリンから30kmの郊外で帯水層の計測に成功したという海外の例もありますので、日本の都市近郊でも計測可能なポイントは探せばあると思います。今後とも日本で初めての実施に向けて、努力していきたいと思っています。



第5図 産総研つくば構内での、2kHz付近の電磁波のバックグラウンドノイズ強度の計測風景。一辺が6.25mの正方形の微小ループアンテナ(20巻き)に誘起される電圧を計測しました。なお、アンテナ工学において、「微小」とは、電磁波の波長(2kHzなら150km)に比して、アンテナサイズ(6.25m)が桁違いに小さいことを意味します。

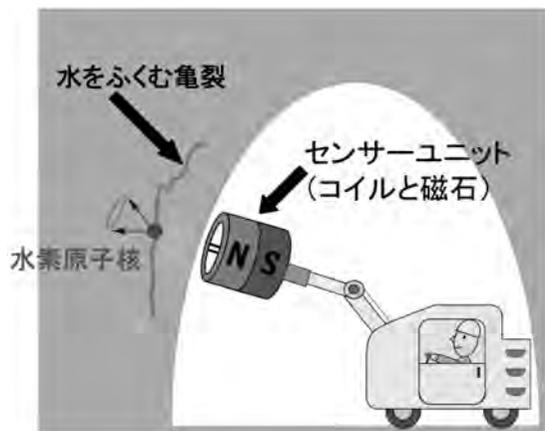
4. 核磁気共鳴表面スキャナーの自主開発

私たちは、第2図の検層ゾンデのように、巨大な試料の表面をスキャンして内部の状態を非破壊かつリアルタイムで計測できる核磁気共鳴装置を開発中です(中島, 2007a)。用途は、土木建造物のメンテナンスです。コンクリートに代表される土木建造物中の水を含む亀裂は、鉄筋の変質、コンクリートの溶解、凍結による亀裂進展を引き起こすので大変危険な存在です。打音、赤外線、地中レーダなどの従来の物理探査手法では、なかなか水を含んだ亀裂を定量計測できません。そこで、水の定量能力に抜きん出た核磁気共鳴物理探査を使ってみてはどうか、というのが研究の発端です。

開発中のプロトタイプを第6図に示します。磁石は直径40cm高さ10cmの円筒形をした、鉄・ネオジム・ホウ素系の強力な希土類永久磁石です。この円筒磁石の端面の上に、プロトンの共鳴周波数である4.1MHzにチューニングされた高周波コイルを置いて、センサーユニットとなります。分光器自体は、従来の室内実験用のものを転用しただけですが、このセンサーユニットには、表面スキャナー特有のさまざまな工夫がちりばめられています。現在の進捗状況は、プロトタイプ開発をほぼ終えて、探査深度1~4cmの条件で



第6図 物理探査研究グループで開発中の核磁気共鳴表面スキャナー(プロトタイプ)。センサー部分(希土類磁石とコイル)と分光器本体を黒いBNCケーブルで接続しています。コイルの上にはテスト用試料が置いてあります。

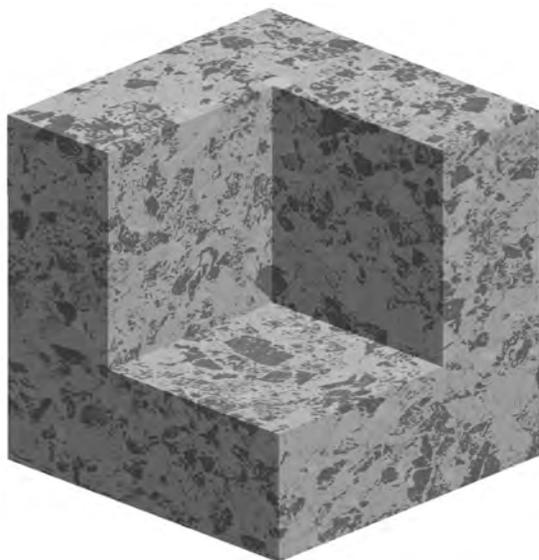


第7図 第6図の装置の屋外での使用イメージ(ただし、第6図の分光器は省略してあります)。トンネルのコンクリートや岩盤内部に隠れている含水亀裂を非破壊でリアルタイムに検出します。

亀裂幅の計測精度の確認中です(中島・宇津澤, 2007)。屋外試験はほとんど実施していませんが、いずれは第7図のような状況で実地試験を行う予定です。

5. 物理探査データ解釈のための室内実験

物理探査という職業は、機器を開発したり野外でデータを取ることが仕事の中心です。しかし、それだけでは不十分なので、私達の研究グループでは、幅



第8図 群馬県多胡産の多孔質砂岩試料(有効空隙率19%)のシンクロトンX線CT画像。暗い部分(X線の吸収が弱い部分)が空隙で、明るい部分は固体(石英などの造岩鉱物)です。画像サイズは、403³画素=2.3³mm³。内部構造を見せるため、立方体画像の一部を切り取りました。

広いスペクトルの研究テーマを追っています。たとえば膨大な観測データを短時間で処理するために、高速で安定な計算アルゴリズムを開発することも大切な仕事です(上田, 2007)。また、生データの正しい解釈のためには、地盤や岩盤の物性を室内で系統的に計測することが必要です。砂地盤の電気抵抗(Jinguiji *et al.*, 2007)や岩石の弾性波速度(Nishizawa and Kitagawa, 2007)を計測し、データ解釈で誤処理がないよう、あるいは、野外でのベストな計測条件を提示できるように努力しています。

核磁気共鳴物理探査に関係する物性としては、プロトン緩和時間が、浸透率や空隙率の推定精度を左右する一番重要な量です。多孔質媒体の微小な空隙に閉じ込められた液体分子の熱運動によるランダムウォークが、核スピンの緩和時間の値を支配することがわかっています(Dunn *et al.*, 2002)。そこで、私たちは、高分解能X線CTで第8図のような多孔質岩石の空隙構造を撮影して、そのデジタル画像上でランダムウォークシミュレーションを行っています(Nakashima and Kamiya, 2007)。将来的には、間隙流体分子が造岩鉱物と衝突する際の相互作用を考慮するという形

でシミュレーション内容を発展させ、プロトン緩和時間を計算機で再現できるところまで持っていく計画です。また、地磁気という超低磁場でのプロトン緩和時間の鉱物依存性・温度依存性は、その重要性にもかかわらず、計測が技術的に困難なためにデータがほとんど整備されていないのが現状です。私たちは、粘土や砂などの実際の地質試料を用いて超低磁場での緩和物性を系統的に計測する実験も始めています。

物理探査そのものではありませんが、核磁気共鳴装置をオンサイト分析(現場で試料の簡易分析を行うこと)に使うことも有意義です。たとえば、揮発性成分をふくんだ軟弱な土壌コアは、組成が変質しやすく空隙構造も変形しやすいので、できるだけコア採取直後に現場で迅速に分析することが望まれています。ガソリンなどの鉱物油で汚染された土壌のコア試料を、ポータブル核磁気共鳴分光装置を用いて掘削現場付近に駐車した計測車両内で迅速に計測し、第3図のような二次元スペクトル法で水分と油を定量識別して地中レーダや、電気・電磁探査法による土壌のイメージング結果と比較すれば、総合的な土壌汚染評価手法の高度化に貢献できると思います。

6. おわりに

プロトン核磁気共鳴物理探査という、耳慣れない、しかし非常に役に立つ物理探査技術の最近の動向を当研究グループの研究成果とともに簡単に紹介しました。この物理探査法は、サイズ無限大の試料の表面をなぞり、内部に隠れている水や油を非破壊定量できます。冒頭で述べたように、プロトンは太陽系の主成分であり、地殻だけでなく人体や農林水産物の主要構成核種でもあります。これらの点をよく勘案すると、応用先は地質学に限らないことに気がつきます。私たちは、社会のために真に役立つ製品を提供するため、地質学以外のさまざまな応用先(中島, 2007b)も模索中です。

謝辞：New Mexico Resonance研究所の宇津澤慎博士(産総研外来研究員)には、桂林で開催されたSPWLA Topical Conferenceに関する資料を提供頂きました。第8図のX線CT画像は、(財)高輝度光科学研究センターの大型放射光施設(SPring-8)のピー

ムラインBL20B2のCTシステム「SP- μ CT」で撮影されました(課題番号2000B0462-COM-np)。その画像処理では、中野司博士の協力をいただきました。本研究の一部は、環境省委託研究「鉱物油等に起因する複合的な土壤汚染の環境リスク評価手法に関する研究」のもとで実施されました。

文献リスト

- Coates, G.R., Xiao, L. and Prammer, M.G. (2001) : NMR Logging Principles and Applications. Gulf Professional Publishing, Houston.
- Dunn, K.-J., Bergman, D.J. and LaTorraca, G.A. (2002) : Nuclear Magnetic Resonance Petrophysical and Logging Applications. Pergamon, New York.
- Freedman, R. and Heaton, N. (2004) : Fluid characterization using nuclear magnetic resonance logging. *Petrophys.*, 45, 241-250.
- Freedman, R. (2006) : Advances in NMR logging. *J. Petrol. Technol.*, 58, 60-66.
- Jinguuji, M., Toprak, S. and Kunimatsu, S. (2007) : Visualization technique for liquefaction process in chamber experiments by using electrical resistivity monitoring. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 27, 191-199.
- 光畑裕司・横田俊之・内田利弘・今里武彦・高木一成・西脇淳子・駒井 武 (2007) : 油分土壤汚染調査における電気・電磁探査法の適用研究. 物理探査学会第117回学術講演会.
- 中島善人 (2002) : NMR物理探査の原理. *物理探査*, 55, 105-126.
- 中島善人 (2007a) : 多孔質媒体の微小空隙構造測定のための物理探査用核磁気共鳴表面スキャナーの改良. GREEN NEWS (地圏資源環境研究部門広報誌) No.18, p.3. および科学技術振興機構のサイエンスチャンネル, シリーズ「偉人たちの夢」第104回 ジュール・ヴェルヌ(2007年5月17日放映).
- 中島善人 (2007b) : 特願 2007-043142.
- 中島善人・宮木 智 (2007) : 特願 2007-114796.
- 中島善人・宇津澤慎 (2007) : コンクリートのメンテナンス用片側開放型NMR表面スキャナーの開発. 第11回NMRマイクロイメージング研究会講演要旨集, pp.51-52.
- Nakashima, Y. and Kikuchi, T. (2007) : Estimation of the apertures of water-saturated fractures by nuclear magnetic resonance well logging. *Geophys. Prospect.*, 55, 235-254.
- Nakashima, Y. and Kamiya, S. (2007) : Mathematica programs for the analysis of three-dimensional pore connectivity and anisotropic tortuosity of porous rocks using x-ray computed tomography image data. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44, 1233-1247.
- Nishizawa, O. and Kitagawa, G. (2007) : An experimental study of phase angle fluctuation in seismic waves in random heterogeneous media: time-series analysis based on multivariate AR model. *Geophys. J. Int.*, 169, 149-160.
- Seol, S.-J., Yokota, T., Mitsuhata, Y., Kwon, H.-S. and Uchida, T. (2007) : Application of ground penetrating radar in detecting water leakage from artificial sandy ground. *Near Surface Geophys.*, 5, 301-308.
- 上田 匠 (2007) : 電気・電磁探査法数値解析における連立方程式数値解法の基礎研究. 物理探査学会第117回学術講演会.
- 横田俊之・光畑裕司・内田利弘・駒井 武 (2007) : 油分土壤汚染調査における地中レーダ探査の適用研究. 物理探査学会第117回学術講演会.
- Zhaobin, G. and Wei, L. (2006) : 2D NMR map logging. Proceedings of the SPWLA Topical Conference on NMR logging (Guilin, Guangxi, China), 26-35.

NAKASHIMA Yoshito (2008) : Trends in nuclear magnetic resonance geophysical exploration.

< 受付 : 2007年10月13日 >