

電子磁気共鳴画像計測

— 不対電子分布の画像化 —



研究ノート

池谷元伺*

1. はじめに

不対電子のミクロな濃度分布をCRT上に画像表示するのが、「ESR顕微鏡」である。ESR（電子スピン共鳴）とは、不対電子を持つ常磁性イオンや欠陥を磁場を印加した下でのマイクロ波吸収で調べる磁気共鳴の手法をいう。

物理学科に新設された「地球物性学」というミクロな物性とマクロな地球を結ぶ境界領域の研究を進める講座で、鉱物と化石の観察のため誕生したESR顕微鏡が、化学や生物、医学の領域で、セラミックスや半導体、高分子の研究にどのように利用でき、生産と技術の現場でニーズに応える装置に育つであろうか。

2. 磁気共鳴画像(MRI)とESR

磁気共鳴画像(MRI)とは核磁気共鳴の断層撮影(CT-NMR)を意味し、臨床医学で威力を発揮している。MRIでは磁場勾配(dH/dx)を与えることにより、空間の各位置で磁場強度が変わり、共鳴周波数が変わることを利用する。位置(x, y, z)を共鳴周波数の変化に換算して、核スピンの分布を求める。

自然放射線により化石や鉱物に生じる不対電子や食品など有機物の劣化による不対電子を検出し、その蓄積量から年代値や経過日数を求める「ESR年代測定法」を開発してきた。歯牙や貝殻ボタンを試料として放射線の計測もできる。このような研究にも半導体やセラミックのESRにおいても、不対電子濃度のミクロな画

像化、ミクロな線量計測は興味深い。

2.1 CT-ESR(断層観察用)

図1(a)は、局所高磁場勾配を用いたESR顕微鏡の概念を示した。電流の方向が逆のコイル対(アンチ、ヘルムホルツコイルという)を小型の磁場勾配発生コイルとして空洞共振器内に置くと磁場勾配 $\partial H/\partial z$ が実現する。

図1(b)は、放射線により生じる不対電子濃度分布の計測例である。軟X線の自己吸収効果のため濃度は $e^{-\mu x}$ で減少していることが判る。セラミックス中での Mn^{2+} などの拡散や合成樹脂の表面劣化などの検出に利用できるであろう。最近、筆者の研究室では、超電導コイルを用いて600mT/cmの勾配を実現している。

2.2 局所磁場走査型ESR顕微鏡

(a) 局所磁場変調型(表面観察用)

筆でなぞるとその下の部分のスピン濃度が判るのが走査型顕微鏡である。通常のESRの測定では、100kHzの磁場をz方向にかけて変化させ、マイクロ波吸収の100kHz成分のみを増幅して位相検波する。ここでは、図2(a)に示すように局所的な位置にのみ微小なコイルで変調磁場を加え、磁場変調コイルまたは相対的に試料を機械的にX-Yステージや圧電素子アクチュエーターで走査して、試料表面のスピン分布を測定する。

(b) ミクロ配線加工による静磁場走査

この方式は、図2(b)に示すように、一次元に並べたn本の配線の末端を接続し、i目とj目の配線に往復電流を流して局所磁場を発生させ、

*池谷元伺(Motoji IKEYA), 大阪大学理学部, 物理学科, 地球物性学講座, 教授, 工学博士, 地球物性学

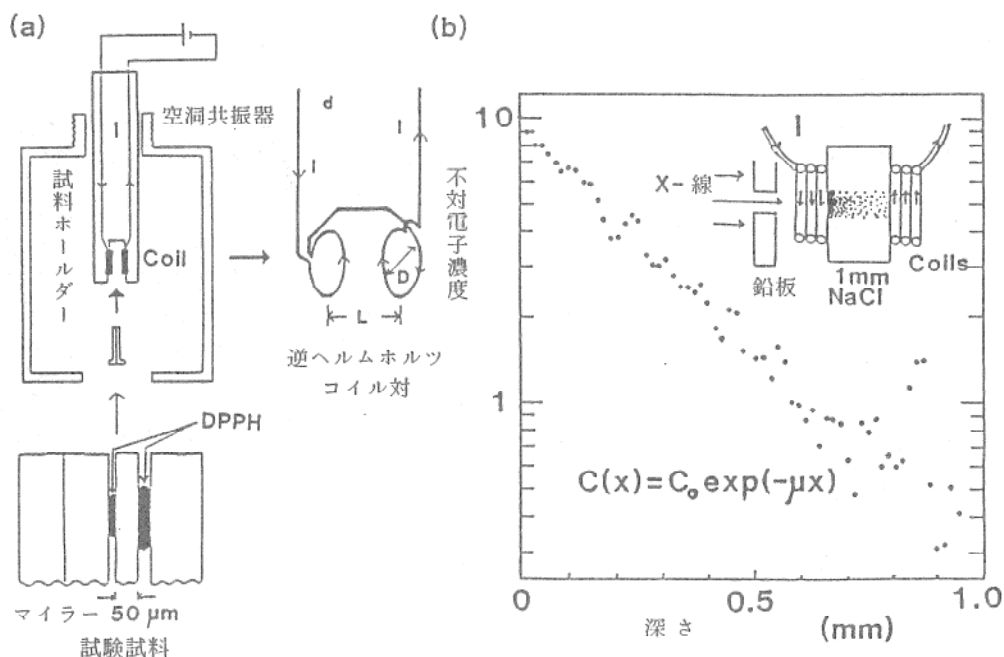


図1 (a)磁場勾配型CT-ESR顕微鏡と、(b)X線によるミクロな不対電子分布

次々とスイッチングすることにより走査を行うものである。半導体工学で用いられる微細加工配線の技術を利用し、石英基板上に図に示すような配線を描いたものでメッシュ状の配線により、2次元の画素を取り込む。

2.3 局所マイクロ波走査表面顕微鏡

ここでは、図3(a)に示すように電磁波を微小領域に絞り局所的に走査する。切断試料の表面しか測定できないが、マイクロ波空洞共振器に入らない大きな試料でも測定できる。ここでは、

小型可搬のESR顕微鏡を実現するために、住友特殊金属製の世界最強の磁石材料NdBFe(N E O M A X)を用いた。

3. 分解能の限界は？

地球物性の研究例として化石の断面内のスピン分布写真を図3(b)に示す。クリノイド(海ゆり)は約4億年前の化石で、主成分は炭酸カルシウムであり、その茎部分は5つの花弁状をした透明なCaCO₃微結晶からなる。ESR信号

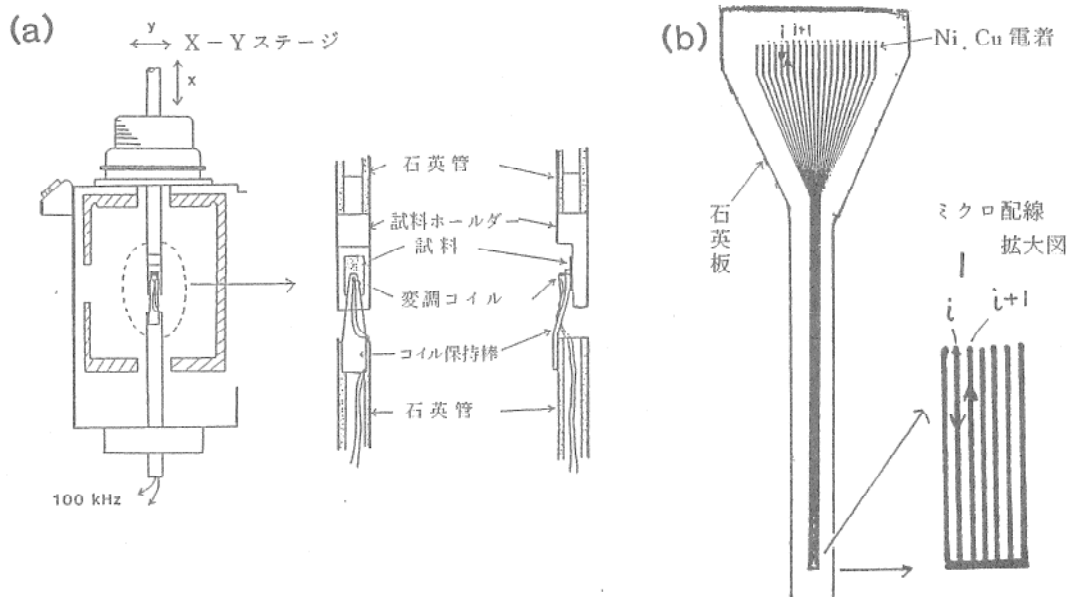


図2 (a)局所磁場変調コイル走査型と、(b)マイクロ配線局所静磁場走査型の表面顕微鏡

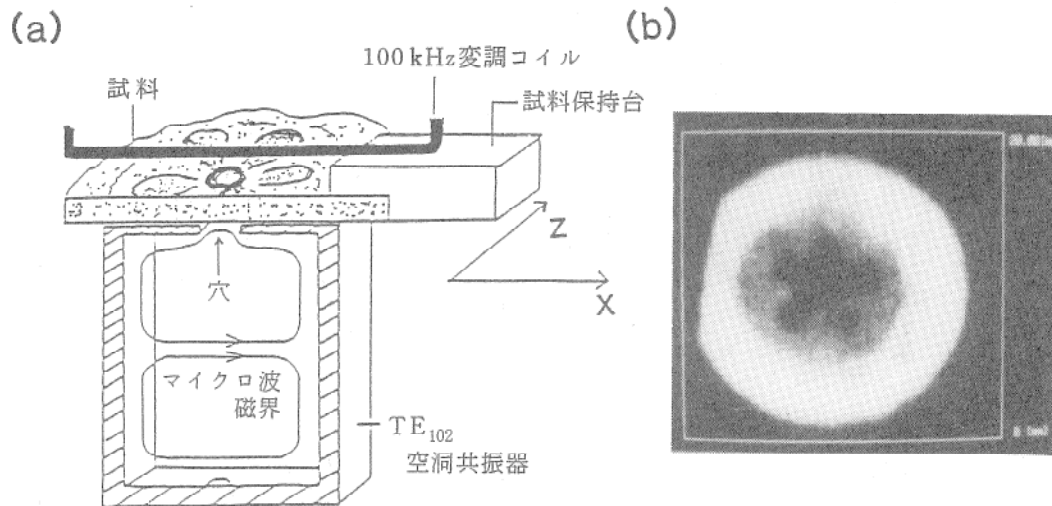


図3 (a)マイクロ波収束走査型表面顕微鏡と、(b)海ユリ(クリノイド)断面の Mn^{2+} 分布像写真

を調べると外側の部分では Mn^{2+} の信号が強く、内側の部分には、 Mn^{2+} がなく放射線損傷度による信号が見られる。

分解能は、そのままでは穴の直径程度である。走査のステップを細かくして、点状の試料でとった穴の各位置での信号強度を装置関数として処理をすれば、ステップの距離までの高い分解能を得ることができる。波長が数cmの電磁波で μm の分解能を得るので、顕微鏡において電磁波の波長以下の分解能を得ることができないと考えるのは誤解である。この研究は、院生の古沢

昌宏、石井博君と三木俊克博士の協力による。

参 考 文 献

- 1) 池谷元伺：「ESR年代測定」，アイオニクス，東京(1987)，p. 198.
- 2) K. Ohno: Appl. Spectro. Rev., 22 (1986) 1.
- 3) 三木俊克，池谷元伺：第2回ESR応用計測研究発表会(1987)。
- 4) M. Furusawa and M. Ikeya: Ana. Sci., 4 (1988) in press.