

## 超高度磁気センサを医療に 医工連携の実践者⑦ 安藤康夫 東北大学教授

脳の神経細胞が突然激しく興奮

して体をコントロールできなくなる「てんかん」に対して近年、原因となっている脳の一部を切除する外科手術が積極的に行われるようになってきている。良好な治療成績を期待できるものの、闇雲に脳を切除するわけにはいかず、どの部位が異常に興奮して発作の原因となっているのか、可能ならば切除前に確認しておきたい。これが、なかなか難しい。

脳の働きを非侵襲的に検査する

には、細胞の活動に伴って発生するイオン電流を体表面で測って記録する方法が広く用いられている。おなじみの脳波計だ。ただし血液や髄液、骨、皮膚など体組織の導電率がそれぞれ異なるため、体表面まで伝播してくる間に変化して、発生部位を特定する空間分解能が低い。つまり外科手術の位置決めには向かない。

感度の磁気センサが必要なためだ。

1980年代に極低温での超伝導現象を利用したSQUID（超伝導量子干渉素子）センサと測定装置が開発され、感度の問題はクリアされたが、後述するような課題があつて、検査中にてんかん発作が都合よく起きる確率は低い。装置自体も広く普及するに至っていない。

原子数個（1nm）程度の極薄絶縁

膜を強磁性金属膜で挟み込んだものだ。絶縁膜は複数枚でも構わず、プラス1枚の金属膜で挟む。磁気ディスクへの情報書き込みや読み取りを行う磁気ヘッドとしてすでに広く用いられており、次世代コンピュータメモリの主役になると見られる「磁気抵抗メモリ（MRAM）」の基盤技術でもある。

一方、活動電流と不可分に発生

する生体磁気なら、体内組織の透磁率がほぼ一定のため、電流源から体表面まで影響をほとんど受けずに届く。もし計測できたなら空間分解能が非常に高い。

ここで計測できたならと留保がつくのは、脳の生体

磁気は地磁気と比べて8ケタ以上も小さく、極めて高

この領域で4月、注目すべき論文が「Scientific Reports」誌に掲載された。

トンネル磁気抵抗（TMR）素子のセンサを頭皮に着け、脳神経細胞の発火に伴って生じた磁界の計測に室温で成功したというものだ。この成功によって、日常生活に近い環境で長い時間、脳の働きを確認できるようになる日が近づいた。

TMR素子の名称を初めて目にしたという方も少なくないだろう。

### 磁力で電気抵抗が変わる

北大学大学院工学研究科応用物理学専攻の安藤康夫教授（写真）は、このTMR素子を医療用センサとして活用する研究に長年取り組んできた。

SQUID装置は装置本体が高額なのに加えて、冷却するための液体ヘリウム費も高額であり、ま



た液体ヘリウム容器が壁となってセンサを体表面に密着させられず、理論値ほどには空間分解能が高くならない。地磁気の影響を排除するためのシールドルームも必要で、日常生活時の脳の活動を調べるようなことは不可能だ。このため使い勝手が悪く、一部の大病院や大学など研究目的の施設にしか導入されていない。

一方、今回のTMR素子センサは、小さく薄く室温で使える。頭皮に密着させられるため、コストパフォーマンスを含めた使い勝手ですべて圧倒的に勝る。

さて、電子デバイスは、電荷としての電子の流れを制御すること、さまざまな機能を発現させている。そして電子は上向きか下向きで必ずスピンしており、量子力学に従うナノサイズの世界では磁石としての性質も示す。この磁石としての電子も制御できれば、異次元の性能を持つ電子デバイスを生み出せると考えられており、「スピントロニクス」と呼ばれる工学分野となっている。

TMR素子に垂直方向の電圧をかけると、電気を通さないはずの

絶縁膜をわずかに電気が流れる。絶縁膜が量子力学に従うほど薄い、負極側にある金属膜の自由電子が正極側の金属膜へと絶縁膜を通り抜ける（トンネル効果）のだ。このとき電圧と電流量から素子の電気抵抗を導き出せる。

TMR素子は、この電気抵抗が、絶縁膜の両側にある強磁性体2層の相対的な磁化方向によって大きく変化する。強磁性体の相対的な磁化方向とは、2層中の電子のスピンが同じか逆かということと同義だ。一般に金属膜2層の電子が同じ向きにスピンしている（平行状態）場合に抵抗は低く、お互い反対（反平行状態）だと高い。この電気抵抗の変化する割合（磁気抵抗比 $\parallel$ MRR比）が測定ノイズに埋もれないくらい大きければ、電気抵抗の高低を測ることで、2層の磁化方向が揃っているか反対か、つまり0か1かのデジタル情報を検出できることになる。

ただ温度が上がると粒子は揺らぎ、電子の磁化方向も安定せず、一般にMRR比は大きくならない。94年、安藤氏の元上司である宮崎照宣・東北大学教授（当時）などが、

2層の鉄の間に酸化アルミニウムを挟み込む接合でMRR比18%を実現してから、TMR素子は一気に注目されるようになった。それぞれの膜で、厚さに比べて面積が圧倒的に大きいため大量の電子が動き、熱ゆらぎの影響を相対的に小さくできていたと考えられている。現在ではMRR比が1000%を超える接合も見つかっている。

強磁性体のスピン状態を替える磁力の強さは、物質の組み合わせによって設計可能で、それ以上の磁力でスピン状態をコントロールすればデジタル情報を書き込んだことになり、逆に磁力を受けない限り状態は固定されるので、後から電気抵抗を測ればその情報を読み出すことができる。だからメモリとして使える。一方、外部磁界の影響で容易に電子のスピン状態が替わるよう設計すれば、電子数個を動かす程度の磁気すら抵抗値の変動によって検出できる高感度センサとなる。

### 奇縁がつながる

安藤氏は61年、総合電機メーカー

勤務の父と専業主婦の母との間の長男として、千葉県鎌ヶ谷市に生まれた。4歳違いの姉がいる。気付いたときには好んで星を眺めており、家にあった百科事典の天文の巻は、小学校に入る前に隅から隅まで読んでいた。

地元市立小中学校を経て、父の転勤で中2の3学期から新潟県村上市に転居した。1年後に新潟市内へ転居、高校は県内一の進学校である県立新潟高校へ進んだ。漠然と良さそうに感じて79年、東北大学工学部応用物理学科へ進学した。3年生からは、レベルが高く指導も厳しいと学生からは不人気だった高橋實教授の研究室をあえて選んだ。助手をしていたのが、宮崎氏（91年から高橋氏の後任教授）だった。

修士課程へと進み、博士課程に残らないかと誘いを受けたものの、学者になるつもりはなかった。教室の先輩が在籍していた小西六写真工業（翌年から社名はコニカ現・コニカミノルタ）へ86年に入社した。日野工場に配属され、高精度ビデオテープの開発に携わった。2年後輩として入社してきた

のが、後に共同で医療用センサ開発に取り組むこととなる西川卓男氏（故人）だった。

5年勤めている間に、コニカのビデオテープ事業は、業績不振から先行きが怪しくなってきた。ちょうど誘いもあつたので、ある研究所に転職しようかと動き始めた。すると教授になつたばかりの宮崎氏から会社へ電話があり、よそへ行くくらいなら研究室に戻つて来いと言うので91年11月から助手になった。

宮崎氏の名前が、スピントロニクス分野をリードする存在として轟いたのは合流後すぐのことで、以後もTMR素子の性能向上に取り組み、高密度HDDの開発などに成功している。そんな宮崎氏を支えた安藤氏は00年に助教となり、07年、定年退職した宮崎氏を継いで教授となった。

助教時代から、TMR素子を医療用センサとして使えるのなのかとアイデアを温めていた。とはいえ、企業との共同研究にしないと実現の可能性は低そうだったので、教授になってから接点を持った企業10社以上に声をかけたが、

良い返事をくれるところはなかった。新規事業開発の担当になつたからと会いに来た西川氏だけは面白がつてくれて、こうしてコニカミノルタとの共同研究がスタートした。

すると共同研究のことを知つた西川氏の後輩が、妹の夫も似たような研究をしていると紹介してくれた。さらにその上司として紹介されたのが、東北大学医学系研究科の中里信和教授だった。10年に我が国で初めて設置された「病院てんかん科」の診療科長であり、SQUID装置をてんかん治療に活かそうと20年以上も工夫を重ねていたが、限界を感じていたところだったらしい。同じ大学ながら互いにまったく存在を知らず、偶然つながつた縁だった。

このメンバーで11年、科学技術振興機構（JST）の戦略的イノベーション創出推進プログラムに「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発」を応募して採択された。10年間で研究費計7億円という巨大プロジェクトだった。

プログラムでまず15年、室温で動作する高感度かつ高分解能の心磁計開発に成功した。ちなみに心臓の生体磁気は脳より2ケタ大きく、TMR素子で検出される波形状が地磁気と大きく異なりノイズキヤンセル可能なため、シールドルームは不要だ。被験者が動きながらの測定も原理的に可能であり、将来的には24時間型心電図計に取って代わるかもしれない。

17年には、素子の性能をさらに上げてリアルタイム計測が可能な感度を実現するとともに、同時にMRI撮影も可能であることを実証した。

翌18年、TMR素子を作製する専門企業としてスピンセンシングファクトリー株式会社を設立した。さらに翌年19年には「東北大学先端スピントロニクス研究開発センター」が設立されている。

## 日本企業の救いの神か

先ほどの説明でも何となくおわかりのように、TMR素子のメモリ（MRAM）は、電源を切っても情報が消えない、だから消費電

力が低い、という2つの大きな利点を持つため、次世代コンピュータメモリの主役と見做されている。一方、MRAMの競争には世界のライバルがひしめいており、製造技術には半導体との類似点も多い。たとえ日本勢が一時的にリードすることができても、かつての液晶や半導体がそうだったように、集中的に投資を行つてコストを下げてくる海外勢にやがて体力負けする危険性は高い。

対してセンサなら、測りたいものに応じて細かく特性を制御する必要があり、そんな調整型製品のほうが日本企業の特性に合っているのではないかと、安藤氏は言う。

半導体敗戦を経て国内に埋もれてしまった技術や技術者を掘り起こしてTMR素子の世界に巻き込んでいくことも、いまなら間に合う。その第一歩として、今回のセンサを活用したてんかん用診断装置の実用化に漕ぎ着けるとともに、多くの産業が立ち上るよう、産業界を本気にさせる魅力的なデータを次々と出していくことが使命と思っている。

口ハスメディア 川口恭