

数学的手法を用いて医療や 非破壊検査における逆問題を解く

東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授

奈良 高明

研究課題「函数論に基づく間接計測の数理基盤構築」



東京大学大学院情報理工学研究科システム情報学専攻教授の奈良高明は、長年にわたって逆問題の計測・数理を研究してきたスペシャリストだ。「さきがけ」では脳磁場逆問題などの脳や人体の非侵襲計測、発電所の配管や構造物の非破壊検査、埋没者を探索する災害救助などの事例で応用に取り組み、大きな成果を残した。

社会とのつながりを意識して 数学に取り組む

「数学を利用することで初めて思いつくことができる工学的的方法論を開発したかったんです」

こう語る奈良高明は工学部計数工学科の出身である。数学の好きな奈良が「21世紀の科学技術の創出に向けた『普遍的な原理・方法論』の構築」を標榜する計数工学科を選んだのは、社会とのつながりを重視したからだ。それから四半世紀が経過した今も、変わらず応用数学と計測に心血を注いでいる。

その奈良が専門とする逆問題は、ある現象を観測することで原因を推定する問題である。順問題が原因から結果を導き出すのに対し、逆問題は原因と結果の因果関係を逆にたどる。その応用範囲は医療や非破壊検査など幅広い。

しかし、一般に逆問題を解くのは順問題よりはるかに難しいとされている。まったく異なる原因からほとんど同じ結果が得られることが多々あるからである。また、最初に設定する初期値によっては求めるべき最適解を見つけれない場合があり、大きな課題となっている。

それに対し、奈良の手法は「本質的な情報を如何に少数のパラメーターで表すか、それをどのような構造で計測するか」を主眼に置き、それを数学として定式化するというものだ。つまり、数学モデルと計測手法を組み合わせた逆問題解法の開発である。現在はこの手法を使い、さまざまな応用展開を図っている。

脳磁場の非侵襲計測で 難治性てんかんの治療に貢献

外界からの刺激に対して脳のどの部位が活動するかを高い時間・空間分解能で推定することは、脳科学において非常に重要なことだ。脳が活動すると脳の神経細胞（ニューロン）に電流が流れ、それによって周囲に電磁場が発生する。電磁場は脳内だけでなく外側にも漏れ出てくるので、それを電極や高感度の超伝導磁場センサーを使って計測することで、脳のどの部位が活動しているかを推定できる。

医療への応用としては、てんかん病巣の位置同定が挙げられる。てんかんとはニューロンに突然激しい電気的な興奮が発生し、それによって発作を起こす病気である。特に服薬しても発作を抑えることのできない難治性てんかんの場合は病巣部を切除する外科手術を施す必要があるため、事前に病巣部や電流が流れている場所をできる限り正確に特定する必要がある。

しかし、現在、磁場の空間分布だけでは電流が流れている領域を特定できないので、難治性てんかんの手術では、脳に直接電極を装着して切除すべき病巣の部位を調べている。もし脳磁計による計測の信頼性が担保されれば、脳に直接電極を装着するプロセスを省略もしくは低減でき、患者の負担を軽減できる可能性がある。

順問題では、電流が流れるという原因に対し、空間中にどのような磁場が発生するかという結果をマックスウェル方程式という手法で求める。それを踏まえて奈良が「さきがけ」で取り組んだのが、磁場の分布という結果から電流の流れという原因を推定し、電流が流れている範囲を特定するという逆問題だ。

脳の表面には多くのしわがあり、病巣領域の形状を表

すのが困難だ。そこで奈良は写像を使って脳の複雑な曲面と球面を1対1で対応させることにより球面における円領域を求め、それを脳の曲面に変換することで、脳の病巣部の領域を高精度で特定できるようにしようと考えた(図1)。

通常、複雑な曲面の場合、少数のパラメーター(変数)では領域を特定することができない。それに対し、円領域で考えることのメリットは、円の中心の緯度と経度、円の半径というたった3つのパラメーターを指定するだけで、球面上における円領域を特定することができるという点にある。

3つのパラメーターの値は、最適化と呼ばれる手法で決定することにした。最適化には円の中心の緯度と経度、円の半径という3つの未知数で構成される評価関数を用いた。ある領域を電流が流れている場合、どのような磁場が発生するかはマクスウェル方程式を使って理論的に求められることから、理論的な磁場データと観測によって得られた実際の磁場データが近くなるように、評価関数の3つのパラメーターの値を決定するのである。これが最適化と呼ばれる作業だ。これにより、実際の磁場データから理論値に最も近いパラメーターの値を導き出すことができ、脳の病巣部の領域を特定することができる。

評価関数には共同研究者から提供された実際のてんかんの患者さんの脳磁場の計測データを用いた。そして、このデータに対し奈良の手法で推定した結果と、頭蓋内電極で計測した結果を比較してみたところ、非常に高精度で推定ができていたことが確認された。

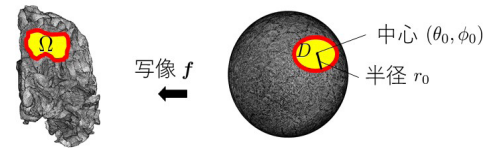
この成果から、まずは病巣の切除手術の前段階で、電極の装着位置や範囲を絞り込めるようになった。将来的には直接脳に電極を装着するプロセス自体をなくし、直に切除手術ができるようになることが期待される。

非破壊検査で火力発電所の配管中にある欠陥を見つけ出す

現在の日本では原子力発電所に代わって火力発電所がフル稼働しているため、老朽化する発電装置の保守点検の重要性が増している。特に熱交換器の配管内部で発生した亀裂などの欠陥の検出には非破壊検査が必要で、奈良は電磁気を使った非破壊検査に取り組んでいる。

熱交換器や石油や天然ガスのパイプラインの配管は強磁性体と呼ばれる金属材料でできており、欠陥がある場合、強磁性体のパイプに交流磁界を流すと欠陥部から磁束が外部に漏れ出るといった現象が起こる。これを「漏洩磁束」といい、現在はこの漏洩磁束を磁気センサーで検出することで、欠陥の有無と場所を検出している。

複雑な曲面上の領域をどうやってパラメータで表示するか？



皮質上領域 Ω を球面上の円形領域の像と捉える： $\Omega = f(D)$



球面上の円の3パラメータ (θ_0, ϕ_0, r_0) を最適化で求める

図1 写像により脳の複雑な曲面と球面を1対1で対応させることで球面上における円領域を求め、それを脳の曲面に変換することにより脳の病巣部の領域を高精度で特定。

検査プローブ

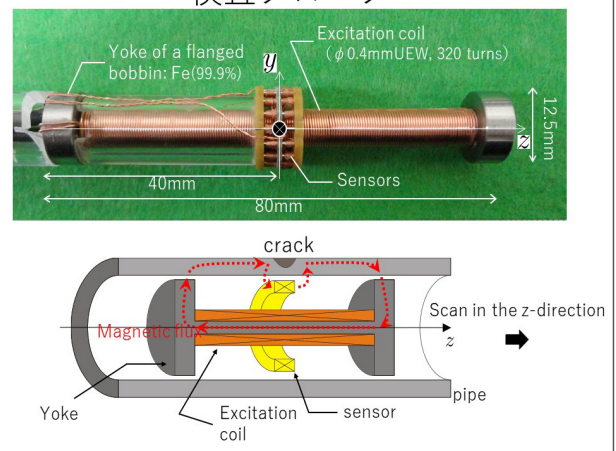


図2 2個の磁気センサーを装備した検査プローブを用いてスキャンしていくと、パイプのどの場所に欠陥があるか特定できる。

しかし、熱交換器は直径10~15mmの細いパイプが100本ほど束になった構造をしており、それらをすべて検査しなければならない。パイプ1本あたり例えば16個の磁気センサーを使って検出したとして、仮に100本同時に検出するとなると多くの磁気センサーが必要な上、そのための配線も大変だ。

それに対し、奈良は数学的な理論を構築。その結果、1本あたりに必要な磁気センサーは2個で十分であるという結論を導き出した。また、その理論に基づく磁気センサーも開発した。

具体的には、開発した2個の磁気センサーをパイプ内に配置し、パイプの長さ方向にスキャンしていくと、漏洩磁束が最大になる点の分り、かつパイプのどの場所に欠陥があるかを式から求めることができるというものだ(図2)。

漏洩磁束に関しては、フーリエ係数と呼ばれる2つの量を磁気センサーで計測していく。その計測データを奈良の導いた式に代入するだけで、欠陥の有無と位置を推定することができるのだ。従来は円周上に多くの磁気センサーを並べて計測していたが、フーリエ係数を計測する

ことで、たった2個の磁気センサーさえあれば、欠陥の位置を特定できることが実証された。

雪崩や土砂、瓦礫中の埋没者を探索

逆問題の応用例として、瓦礫中の埋没者探索にも取り組んでいる。これは、大地震などにより倒壊した建物の瓦礫の下に埋まっている被災者を探索するというもので、雪崩や土砂崩れにも適用可能だ。

従来、瓦礫中の埋没者の探索には、ロボットの先端にカメラやCO₂を検出するセンサーを搭載する方法が提案されてきた。しかし、ロボットに探索させるには時間がかかるうえ、広範囲を探索するのは難しい。レーダーを使う方法もあるが、装置が大がかりなうえ、高周波の電波を使う場合に金属による反射の影響が大きいなどの難点を抱えている。そのため、小型の装置で金属による反射の影響が少なく、広範囲を一気に探索できる方法が求められていた。

それに対し、奈良は低周波の磁場を使う方法を考案した。これはスマートフォンに搭載されている磁気センサーを活用するというものだ。まず探索者が磁石を回転させて、回転磁気を広範囲に発生させる。すると、埋没者が所持しているスマートフォンの磁気センサーがその回転磁気を検知する。これにごく簡単な演算をするだけでスマートフォンの位置を割り出し、探索者に通信で知らせることで、埋没者を探し出すという流れである(図3)。ここでは熱交換器の非破壊検査同様、回転磁気に関するフーリエ係数を計測することで、スマートフォンの位置を特定している。

現在、奈良はこうした応用例の実用化に向け研究を進めているほか、新たな研究分野の開拓も検討している。

「工学にはこのような逆問題分野が多くあります。そこで新たな方法論を切り開いていきたいですね」

当領域での経験と成果を踏まえ、奈良はさらなる課題解決へと突き進んでいく。

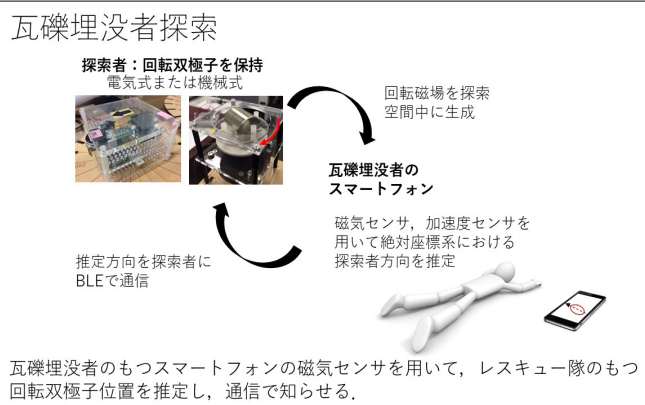


図3 スマートフォンの磁気センサーを利用し、瓦礫の中にある埋没者を広範囲にわたり探索できる。