

アコースティック・エミッションの新しい応用分野と研究の動向

New Applications and Recent Researches of Acoustic Emission

藤田博之*

Hiroyuki FUJITA

1. はじめに

アコースティック・エミッション(以下、AEと略す)とは、固体材料の力学的破壊の前駆現象に伴って発生する超音波と、それを利用した非破壊検査法として当初定義されていた。しかし、現在ではより広く、何らかの現象に伴う音波を受動的に検出して、設備診断や破壊現象の解明に役立てる方法を総称して、AE技術と呼んでいる。ここでは、AEの新しい応用分野と最近のAE信号処理手段について紹介する。

2. 超電導マグネットへのAEの応用

超電導マグネットは、核融合炉・磁気浮上鉄道・NMR(核磁気共鳴)装置等に不可欠の技術であるが、高性能の超電導マグネットは現在その安定性が必ずしも十分でない。すなわち超電導導体の一部の温度が、何らかの原因で臨界温度(超電導が常電導に転移する温度)以上に上昇すると、常電導部分のジュール発熱により波及的にコイル全体が常電導状態になってしまう現象(クエンチ現象)が生ずる。マグネットを小型高性能でかつ安定に設計するには、この部分的温度の原因を究明する必要がある。現在温度上昇の原因として、強大な電磁力による導体の摩擦運動・充填材(エポキシ)の割れ・絶縁物(マイカ)の層間剝離・構造材の塑性変形が考えられている。これらの事象はいずれもAEを伴うので、これを計測することにより、各事象ごとの生起時刻・発生場所・大略の放出エネルギー量等を知ることができる。

マサチューセッツ工科大学の岩佐博士の研究室では、AEを用いて超電導マグネット中のエポキシの割れの研究と、金属やFRPの摩擦運動の研究を行っていた。エポキシ樹脂は、導体の間の空隙を充填しその動きを抑制する目的で使用されるが、極低温では脆化し割れが発生する。割れの発生箇所がコイル端部のせん断応力集中部であろう、との仮説に基づきモデルコイルを作成し、2つのAEセンサへの信号到着時間差による発生位置標定を行った。モデルコイルの形状を変えるとAEが集中的に発生する箇所も変化するが、その位置が各コイルのせん

断応力集中部と一致することがわかった。さらにせん断応力がほとんど発生しないコイル形状では、AEが計測されなかった。以上の結果に基づき、NMR分析器用のマグネットをせん断応力が最小の形状で製作したところ、超電導線固有の臨界電流までクエンチが発生せず、大層良好な成績を収めたとのことであった。また、摩擦現象についてもAEを用い、いわゆる滑り運動は決して滑らかなものではなく、1 μ mほどの瞬間的な動き(マイクロスリップ)を多数含む不連続的な運動であることがわかったという。

また、チューリッヒ工科大学のツェンゲル教授の研究室でも、超電導マグネットから発生するAEの周波数スペクトルに関する研究を行っていた。見学に行ったときには、すでに担当の博士課程の学生が卒業した後のことで、装置はすべて解体されていた。得られた成果について聞いたところ、実物のマグネットを対象に発生源におけるAEの周波数スペクトルと、それが伝搬路でどのように減衰するかを調べたとのことだった。クエンチに結び付くAEと他の原因による雑音とを、周波数スペクトルから判別する目的があったが、どうもAE単独ではそれが難しいとの結論になったという。これは、他のAE計測に一般に言えることで、AE単独でなく、他の情報と組み合わせるときに、効果的な適用が可能となる場合が多い。

超電導巻線(エポキシで充填していないもの)のAE伝搬特性については、米国コーネル大学のムーン教授も研究していた。ちょうど渦巻パネを緩く巻き上げ、層間のすき間に薄い絶縁物を挿入したような形の、パンケーキ巻線と称する巻線形状があるが、そのパンケーキ巻線を対象に、線に沿って渦巻状に伝わるAE波と、導体間に挿入された絶縁物を介して放射状に伝わるAE波との伝搬減衰を比較した。巻線間の圧着力を幾通りか変えて実験したが、放射方向の減衰は非常に大きく、3~4層伝わりと実質上検出不能になるとのことだった。また、渦巻状に伝搬する波は伝搬距離が長い時間遅れが過大になり、やはり検出には向かない。このため、センサ近傍の極めて小さな範囲だけが監視可能になるとの意見だった。筆者の見るところでは、ムーン教授の用いたパルス

* 東京大学生産技術研究所 第3部

は非常に急峻で、高い周波数成分がほとんどのため、このように悲観的結果が得られたのだと思われる。一般的に低周波については、高周波に比べ減衰が小さいことが知られている。

その他、アルゴン国立研究所のキム博士は、パルス励磁の超電導マグネットを研究していた。これまで述べた直流マグネットに比べ、パルスマグネットは設計・製作が難しく、巻線各部の電圧分担やクエンチ発生計測すらも容易でない。キム博士の話によれば、AE計測に大変興味があり、導入を検討してみたいとのことであった。

3. 放電現象に伴う AE

高電圧用の変圧器やキャパシタの AE を計測し、機器中に部分放電が生じているか否かを判定する方法を研究中の、ウェスティングハウス社ハロルド博士と話をすることがあった。現在 EPRI のプロジェクトとして、電力用キャパシタの健全性を活線状態で診断する問題に取り組んでいるとのことだった。しかし、キャパシタ自体に圧電効果があり、その共振周波数と交流電圧の高周波が一致する場合に大きな雑音が発生し、部分放電検出が難しいと話していた。筆者が 4th Intern'l Symp. on High Voltage Engineering で発表した、固体中の部分放電からの AE 計測について議論したところ、部分放電電荷量と AE 波高値に対応関係が認められる点は大層興味深いとの意見であった。

この固体中の放電からの AE については、前述のムーン教授とも議論した。彼の意見では、放電に対し多数の方向から AE を計測して、音源からの波動の放射形式を決定することにより、放電が固体に加える力の分布を推定可能であろうとのことだった。また、ムーン教授は AE の擬似音源として火花放電を用いることを検討中で、電極と金属表面間に火花放電を起こし、超音波を励振することを試みていた。この励振機構について検討したところ、放電時に飛散する金属粒子の反作用として波動が発生することが明らかになったという。

4. AE 信号処理

従来 AE の信号処理というと、雑音の除去を主眼とするものが多かったが、近年 AE の個々の波形に含まれる情報に着目し、そこから破壊に関する情報をより多く引き出そうとする試みがある。この試みにも大別して 2 つの流れがあり、1 つは波高値、立ち上がり、持続時間といった特徴値を基に個々の AE を分類して発生源と対応させようという方向、もう 1 つは AE 波形そのものに逆

たみ込み手法を適用し、センサや伝搬路の影響を取り除いた「原波形」を求めようとする方向である。

まず、第 1 の方向については筆者が生研第 3 部山口研究室に共力して得たデータを、6th International Conference on NDE in the Nuclear Industry で発表した。この発表は、高速増殖炉の配管の実物大モデルを用いた疲労破壊実験時の AE 計測結果について、AE の特徴値 (AE マイクロデータ) による分類が、疲労き裂進展挙動と AE データを対応させるうえで非常に有用であることを述べたものである。この会議の後にあった、ドイツ非破壊検査研究所の見学のときにも、やはり同様の AE 特徴値を収集する装置があり、世界的にも AE 計測が精密化する方向にあることがわかった。しかし、ドイツの装置はかなり大型で集約度が十分でないと思われた。

次に、第 2 のいわゆる原波形解析に関しては、コーネル大学のパオ教授、サクシ教授と話をした。パオ教授は無限平板中の AE 伝搬特性を、近距離についてはレイ理論で、遠距離についてはノーマルモード理論で計算し、ある与えられた音源に対する検出点での波動の時間変化を定量的に求める方法を開発した。さらに、この方法で求めた AE 伝搬・検出系のグリーン関数を用いて、検出波形から逆に発生源での力の向きと時間変化とを反復的に求める手法を研究中とのことであった。またサクシ教授は、ガラスに発生するき裂の再現性が良いことに着目し、き裂からの AE 波動について詳細な計測を行い、実測値と理論値が非常に良く対応することを示した。これらの解析は、理想的な AE 源と伝搬媒体形状についてのみ可能であるが、材料試験におけるき裂の動的進展機構の解明や、前述の AE 特徴値解析の基礎固めに重要な意義がある。また、極微小の変位やエネルギーの定量的で時間分解能のよい計測手法として、他分野への応用も期待される。

5. おわりに

以上の研究調査は、筆者の米国滞在中に奨励会三好研究助成金の援助により、米国およびヨーロッパにて行ったものである。各地の研究者と、親しく討論する機会を得たことは、これからの研究遂行上たいへん有意義であった。貴重な機会を与えて下さった奨励会の皆様に厚く感謝する次第である。

なお、米国滞在中にあたっては鹿島学術振興財団の援助を受けた。記して感謝の意を表す。

(三好研究助成報告書 1985 年 11 月 20 日受理)