超電導マグネットに生ずる機械的擾乱(Ⅱ)

——エポキシのクラックや接着破壊による擾乱——

前 田 秀 明, 岩 佐 幸 和*

東芝総合研究所 川崎市川崎区浮島町4-1

* Francis Bitter National Magnet Laboratory, MIT,
Cambridge, MA., 02139, USA

(1982年4月26日受理)

Mechanical Disturbances in Superconducting Magnet (II)

——Epoxy cracking or debonding in an epoxy impregnated magnet——

Hideaki MAEDA and Yukikazu IWASA*

Toshiba Research and Development Center, 4-1, Ukishima-cho,
Kawasaki, Kanagawa

* Francis Bitter National Magnet Laboratory, MIT, Cambridge,
02139, MA., USA

(Received April 26, 1982)

Synopsis:

Energy released following cracks and bond failures were measured for an EPON epoxy near 4.2 K. Crack events were monitored with an acoustic emission sensor; the energy released by each crack or bond failure was calculated from the temperature rise measured with thermocouples. Cracking was observed to be load dependent; this may account in part for the training phenomenon observed in bringing epoxy-impregnated superconducting magnets to full design field.

1. まえがき

本論文は、前編にひき続き¹⁾、超電導マグネットに生ずる機械的擾乱にかかわるものであるが、その中でも特に、エポキシ含浸マグネットに特有な、エポキシ樹脂に微小クラックや接着破壊が生ずる事に伴う擾乱を取扱う。この様な擾乱は、含浸マグネットのクエンチ特性に大きな影響を与えていると言われていたが^{2)~5)}、それを詳細に研究し、実証した例はない⁶⁾。

本実験では、薄いエポキシの層に引張りせん断応力を加え、その時発生する微小クラックや、エポキシと銅の間の接着破壊などを測定する。これらの event を検知するために、アコースティックエミッション（以下 A E と略す）技術を用いた。クラックや接着破壊に

伴う系の温度上昇も、併せて測定した。力をくり返し増減すると、不可逆的なクラックの発生が見られる。この現象と、エポキシ含浸マグネットのトレーニングとの関係も論じた。

2. 実験装置と実験方法

エポキシ含浸した超電導マグネットでは、エポキシ樹脂が巻き線間の空間をうめている。マグネット冷却時の熱収縮や、マグネット励磁時のローレンツ力によって、エポキシマトリクスには圧縮、引張り、せん断などの応力が加わる。マトリクスの一部で、応力が臨界値を越えると、エポキシにクラックが発生したり、導体との接着が破壊したりする。本実験では、この様な状況を模擬するために、薄いエポキシの層に引張り

Fig. 1(a) Schematic diagram of the experimental apparatus.

Fig. 1(b) Schematic showing a pair of copper plates and an epoxy resin.

せん断応力を加え、そのとき発生する微小クラックや、接着破壊の様子を詳細に調べたものである。実験装置を Fig. 1(a) に示す。ステンレスのブロック（図ではM

で表示）の両側に、銅の面を外側に向けたサーキットボードをネジ止めした後、接着固定した。これに他の1組のサーキットボードを、銅板を内側に向けて、エポキシで接着し銅／エポキシ／銅のサンドイッチ構造をブロックMの両側に作った。後者のサーキットボードは、力の支持系にあらかじめ取り付けられている。

引張り力は、クライオスタット外部のフランジに固定した圧力シリンダーから供給した。この力は、ステンレスの棒を通じて、ブロックMに伝えられる。接着破壊直後にブロックMが急速に動くので、その動く距離を制限し、摩擦発熱をおさえる様に、ストッパーを取り付けた。エポキシ層（ボンダA）の詳細をFig. 1(b)に示す。引張り力を加えると、銅板同士を接着している薄いエポキシ層に、せん断応力が加わる様になっている。

引張り力、 $2F_t$ は、圧力シリンダー付近に取り付けた、圧力交換器により測定した（Fig. 1参照）。静止側のサーキットボードに、AEのセンサーを取り付け、エポキシに微小クラックや接着破壊などが生じた時に発生するAE波を、感知するようにした。クラックが発生すると、エポキシ層がわずかに変形（弾性的）するので、ブロックMと静止側のサーキットボードとの間に、相対運動が生ずる。この微小変位を、ブロックMの下に取り付けた、速度計で検知した。この速度計は、第I編に述べた様に、永久電流モードの超電導ヘルムホルツコイルとピックアップコイル対から成る（Fig. 1(a)）^{11,7),8)}。微小クラックや接着破壊により、エポキシや銅板の温度が上昇する。これをとらえるために、クロメル／金の熱電対を、静止側のサーキットボードの銅板に取り付けた。

●実験方法

エポキシ樹脂（Epon 815）と硬化剤（Epon V-40）を混合した後、銅板間に塗布してクランプし、数日間硬化させた。エポキシ層の厚みは0.3～0.5mmである。

エポキシ含浸マグネットでは、大部分のエポキシは液体ヘリウムに直接さらされておらず、断熱状態にある。エポキシ層をこの様な断熱的環境に近い状態におくために、エポキシ層をいったん完全に液体ヘリウム中にひたした後、液体ヘリウムをヒーター加熱により蒸発させて、エポキシ部を液面上に露出させ実験を行った。熱電対のreference部は、液体ヘリウム中で、4.2Kに保った。

応力を一定の速度で増加し、その途中で、次のデー

ターを4チャンネルのトランジェントレコーダーで測定した。(1)サーコイル出力電圧、(2)AEバースト信号、(3)熱電対出力電圧(ボンドAとボンドBの各々について)。エポキシ層は液体ヘリウムの中にひたされていないので、温度がゆっくりと上昇する。この温度上昇を、実験中チャートレコーダーで記録した。

3. 実験結果と検討

エポキシ層と銅との接着は 5 MPa のせん断応力で破壊した。この値はエポキシ樹脂について 4.2K で報告されている引張り強度 (100 MPa)⁹⁾ に比べて、はるかに小さい値である。接着破壊は多くの場合、エポキシと銅との界面で生じており、最終的にエポキシ自身にせん断が生じたのではなく、エポキシが銅からはく離したものであると考えられる。破壊応力が、本実験の場合 5 MPa と、引っ張り強度 (100 MPa) に比べて著しく小さいのは、この様に、はく離が支配的であるからであると考えられる。同様な結果が、Brechna⁹⁾ らにより報告されている。エポキシ層中には、無数の小さなクラックが生じていたが、大きな割れはほとんど見られなかった。微小クラックの発生と接着破壊とを、以下に分けて取り扱う。

●微小クラックの発生

引っ張り力を増加していく過程で、多くの AE のバースト信号が見られたが、これらはエポキシ層中に微小クラックが生じていることにより現われると推定される¹⁰⁾。この他エポキシと銅板の界面に微小なはく離が生じ、それが AE を発生している可能性も考えられる。4 MPa のせん断応力下で得られた信号の例を Fig. 2 に示す。この応力は、接着破壊強度 (5 MPa) よりも 1 MPa だけ低い値である。

図の様に次の3つの信号が同時に現われた(Fig. 2)。(1)サーコイル出力電圧 (1番上の信号)、(2)AE信号 (2番目の信号)、(3)ボンドBの熱電対出力信号 (1番下の信号)。ボンドAからの熱電対信号 (上から3番目の信号)と比較することにより微小クラック (または微小なはく離) は、ボンドBで生じていることがわかる。

応力を 0 Pa から徐々に増加し、接着破壊に到るまでの過程で、5〜10の温度スパイクが観測された。Fig. 2に示す、2 Kにも及ぶスパイクは、極めて大きいスパイクの例である。多くの場合には、Fig. 3に示す様に、温度スパイクは0.1〜0.2 K程度であった。

クラックが発生した場合、その熱エネルギーは、当

Fig. 2 Extensometer output, AE, and thermocouple outputs for both plates, all vs. time for an epoxy crack event.

Fig. 3 Extensometer output, AE, and thermocouple outputs for a stationary plate A, vs. time for an epoxy crack event.

初は局所的に集中しており、これが銅板に届くまでに、エポキシ層で多くが消費されると推定される。それ故、クラック発生による温度スパイクの大きさは、原クラックのエネルギーだけではなく、銅板とクラックの位置関係にも依存するであろう。Fig. 3 と Fig. 2 の信号が微小クラックによるものと仮定すれば、Fig. 3 は銅板から遠い場所に生じたクラックによるものであると推定され、Fig. 2 は丁度銅板とエポキシ層の界面付近で生じたクラックによるものであると推定される。

本実験では微小クラック（または微小はく離）により放出された熱エネルギーの値を、正確に計算することはできなかった。しかしながら、温度スパイクのピーク温度に基いて、微小クラック（または微小はく離）部に、当初生じた熱エネルギー密度 (E_{crack}) は、次の様な範囲に限定できると考えられる。

$$E_{\text{crack}} \geq \delta \int_{T_i}^{T_p} C dT \quad (1)$$

ここで、 δ はエポキシの密度、 C はエポキシの比熱 T_i と T_p は各々初期温度とピーク温度である。液体ヘリウム温度付近におけるエポキシの比熱は次式の様になる¹¹⁾。

$$C = 3 \times 10^{-2} T^3 \text{ (J kg}^{-1} \text{K}^{-1}) \quad (2)$$

式(2)を(1)に代入し、 $\delta = 1.2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ を用いれば、Fig. 2 については、 $E_{\text{crack}} \geq 18 \text{ kJ m}^{-3}$ となる。一方 Fig. 3 については、 $E_{\text{crack}} \geq 1 \text{ kJ m}^{-3}$ が求まる（ただし $T_i \sim 5.2 \text{ K}$ ）。

応力印加の history が、微小クラック（または微小は

く離）の形成に及ぼす効果を、AE センサーを用いて調べた。Fig. 4 は4回の連続した応力サイクルについての AE のデーターである。各サイクルでは、前のサイクルで到達した最大応力を少し越えるレベルまで、応力を印加した。図には、Kaiser 効果と一般に呼ばれる不可逆性が、現われている。

この不可逆的な振舞いのメカニズムについては、これらの AE の大部分が微小クラックによるものと仮定すれば、次の様に説明できる。エポキシ層の中には、硬化過程で形成された多くの微小なボイドやキズがある。応力を印加すると、これらのボイドやキズの周囲で応力集中が生じるが、この応力が臨界値を越えると、クラックが発生する。大きなボイドほど、低い印加応力でクラックが発生する。それ故、漸増する応力を印加すると大きなボイドから徐々にクラックが発生し、応力が大きくなるに従って、徐々に小さなボイドやキズの周辺で、クラックが発生する様になる。一度クラックが発生すると、応力集中が取り除かれるので、その付近では再びクラックが発生しにくくなる。

Fig. 3 の様に、これらの微小クラック（または、はく離）の大部分による温度上昇は極めて微弱であり、マグネットをクエンチさせることは考えにくい。しかしながら、実験中ごくまれに生じる Fig. 2 の様な大きなクラックでは、クラックの発生により、マグネットがクエンチする可能性を否定できない。本実験では、この様に大きなクラックは、接着破壊に到るまでにわずかに1度しか得られなかったが、実際の含浸マグネットでは、エポキシマトリックスの占める体積は、本実験のそれよりもはるかに大きなものであるから、マグネット内部でこの様に大きなクラックが、励磁中に何回も発生する事はありうる事である。それ故、Fig. 4 に示したような効果が、エポキシ含浸超電導マグネットで見られるトレーニング現象の原因になることもありうる、と推定される。

●接着破壊

エポキシ層と銅板の接着破壊時における、サーチコイル出力電圧、AE 信号、熱電対信号などを、Fig. 5 に示す。接着破壊直後に、ブロックMは急速に上方に動く。この時生ずる摩擦発熱を低くおさえる様に、ストッパーを使用して、ブロックの可動距離を 0.2 mm 程度におさえた。

温度スパイクは、1次成分と2次成分の2成分に分けることができる。1次成分については、接着破壊自身に起因するものであり、一方2次成分はその後のブ

Fig. 4 Epoxy crack event vs. shear force F_t for the four consecutive runs. Each vertical bar represents one epoxy crack event.

Fig. 5 Extensometer output, AE, and thermocouple outputs for both plates, all vs. time, for a conductor debonding event.

ロックの上方への運動に伴う摩擦発熱によると考えられる。ボンドB側の温度スパイク (Fig. 5 の一番下の図) には、2つの成分が明確に示されている。ボンドA, B共に1次成分は0.8~1Kであるが、2次成分の大きさは異なっている。ボンドBの2次成分は、Aより高温まで上がる。この様に、2次成分の大きさが異なっているのは、移動距離が両ボンド間でわずかに異なっている事によると考えられる (移動距離が、両ボンドで等しくなるためには、両ボンドについて、その界面が完全に平行でなければならない)。「2次温度成分が摩擦熱による」という以上の推測は、ブロックMの上方への可動距離をさらに大きく設定すると、2次成分が増加することにより確認される。例えば、2 mmに設定すると、2次成分として7 Kが得られた。

Fig. 5の1次成分にもとづいて、接着破壊に伴う発熱エネルギーを近似的に計算できる。計算にあたって次の2つのことを仮定する。(1)熱はエポキシと銅板の間のはがれ面に、一様に作られる。(2)発生した熱は、エポキシ全体にわたって一様に分布する。式(1), (2)を用いれば、1次成分に基づいて、熱エネルギーの密度が 3 kJ m^{-3} と求まる。ただし銅板の熱容量は無視し

ている。一方エポキシ層中に貯えられている弾性エネルギー密度は次式で与えられる。

$$E_{\text{elastic}} = \frac{\tau^2}{2G}$$

ここで τ はせん断力、 G はせん断に対するヤング率である。はく離時の応力は $\tau = 5 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ である。エポキシ樹脂の、4.2 Kにおける引張りのヤング率 E は、約 $8 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$ ¹²⁾である。ポアソン比 ν を0.3と仮定すると¹³⁾、 G は次の様になる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 3 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

これを用いれば、 $E_{\text{elastic}} = 4 \text{ kJ m}^{-3}$ となる。計算で使った定数の誤差を考慮すれば、両エネルギーは良く一致していると言える。単位面積のはがれ面を作るために使われた弾性エネルギーを求めると0.6 Jとなる。これは fracture の場合 ($100 \sim 300 \text{ J m}^{-2}$) に比べて、2桁以上小さな値である^{13) 14)}。

4. 結 論

エポキシの薄い層に、漸増する引張りせん断応力を加え、その時発生する微小クラックと接着破壊を、AEセンサー、速度計、熱電対などを用いて測定した。微小クラックや接着破壊に伴い温度スパイクが現われた。このスパイクはマグネットをクエンチさせるのに充分なものでありうる事が明らかになった。くり返し応力を印加すると、エポキシ含浸超電導マグネットに生ずるトレーニング現象と、良く似た現象が、微小クラックの形成について見られた。

本研究は米国 DOE, Fossil Energy/MHD Program の援助により、MIT Francis Bitter National Magnet Laboratory において行った。実験遂行に協力いただいた、Vasco Brandeo 氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 前田, 塚本, 岩佐: 低温工学「超電導マグネットに生じる機械的擾乱(I)」J.
- 2) P.F. Smith and B. Colyer: Cryogenics **15** (1975).
- 3) M.N. Wilson, R.B. Hopes, and R.L. Roberts: MT-5 (1975) 511.
- 4) Evans and B.F. Colyer: Proc. 6th Int. Cryogenics Eng. Conf. (1976) 473.
- 5) V.W. Edwards and M.N. Wilson: Cryogenics **18** (1978) 423.

- 6) H. Maeda and Y. Iwasa: Cryogenics (1982) 473.
- 7) O. Tsukamoto, H. Maeda and Y. Iwasa: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 918.
- 8) H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: Cryogenics (1982) 287.
- 9) H. Brechna and H. Turowski: MT-6 (1978) 597.
- 10) O. Tsukamoto, J.F. Maguire, E.S. Bobrov, and Y. Iwasa: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 172.
- 11) B. Colyer: Rutherford High Energy Laboratory Report, RHEL/R 264 (1972).
- 12) G. Hartwig: "Nonmetallic materials and components at low temperature", Plenum Press, New York (1979) 33.
- 13) G. Hartwig: IEEE Trans. MAG-11 (1975) 536.
- 14) B. Colyer, M.T. Ball and M.P. Campbell: Cryogenics **14** (1974) 281.