

極低温におけるパルス状微小エネルギー放出の測定法

Experimental Techniques to Determine Pulsive Energy Release at Cryogenic Temperatures

藤田 博之*・岩佐 幸和**

Hiroyuki FUJITA and Yukikazu IWASA

1. はじめに

絶対零度近傍の極低温においては、超電導・超流動現象などの常温では見られない現象が生じ、従来はもっぱら物理学の研究対象となっていた。しかし今日では、その工学的応用が、次々と開けている。たとえば超電導マグネットや超電導送電、超高速電子デバイス、極低雑音電子機器など多彩な分野が、今後ますます発展してゆくとと思われる。この中で超電導マグネットは、核融合用プラズマ閉じ込め装置、磁気浮上鉄道、高エネルギー物理用粒子加速器、核磁気共鳴装置 (NMR) 等に必須の技術であり、特に NMR は X 線 CT に替わる医用断層撮影装置や生体高分子の 3 次構造決定に用いられ、今や生命科学の発展に欠かすことができない。

しかし NMR や粒子加速器の応用で要求される高性能超電導マグネットは、超電導の臨界値 (この値以上の磁界・電流密度・温度では、超電導状態が喪失し常電導状態に転移してしまう限界値) に近い条件で設計される。このため、高性能超電導マグネットの安定性が必ずしも十分でないという問題が生じている。¹⁾ すなわちマグネットに通電中に、コイルの一部が何らかの原因で臨界温度以上に上昇すると、その部分でのジュール発熱によりコイル全体が常電導になってしまう現象 (クエンチ現象) が発生する。この部分的温度上昇の原因について多くの報告がされ、²⁻⁵⁾ 初期の最大の問題であったフラックスジャンプは、超電導体の多フィラメント化により解決された。しかし、導体の微小な運動による摩擦⁶⁾ や、その運動を抑制するための充填材であるエポキシ樹脂の割れ等の機械的擾乱に伴う温度上昇^{7,8)} は、いまだ未解決の問題である。

このため本研究では、上記の機械的擾乱に伴うパルス的なエネルギー放出を定量的に測定するために、高感度エネルギーセンサーを開発した。このセンサーにより、超電導マグネット中で発生するエネルギーパルスの定量

的な分布を知り、設計上不可欠のデータを収集することが可能となる。さらに、このセンサーを液体ヘリウムの沸点 (4.2 K) 以外の温度でも使用できるように動作範囲を拡張し、材料強度試験や相変態の観察に応用の途を開くことを試みる。

2. エネルギーセンサ

ある液体、たとえば液体ヘリウム、を定体積の容器内に密閉し、その中に熱エネルギーを与えたとする。このとき、液体の温度は与えた熱量に応じて上昇し、圧力も上昇する。そこで、この圧力上昇を鋭敏な圧力センサで検出すれば、エネルギーを測定することができる。

体積 V_0 の容器内の液体ヘリウムに、あるエネルギーを与えたときの圧力上昇は、次の値から計算できる。

$$V_0(\partial p/\partial u)_v = 12.3 \text{ atm cm}^3 \text{ J}^{-1} \quad (1)$$

この値を基に、1 mJ 当り 1 Torr の感度を得るための容器体積を計算すると、約 10 cm³ になる。この容器の気密性は重要で、液体ヘリウムが徐々に浸入して容器を満たす程度に開放的で、瞬間的なエネルギー放出による短時間の圧力上昇に対しては閉鎖的である必要がある。

次に圧力センサは、液体ヘリウム中でも使用可能なものを開発した。センサ部は、キャパシタンス型など種々の方式が考えられるが、極低温への適用の容易さからピエゾ圧電変換素子を採用した。図 1 にその概念図を示す。圧電変換素子を、サーキットボード (グラスファイバー

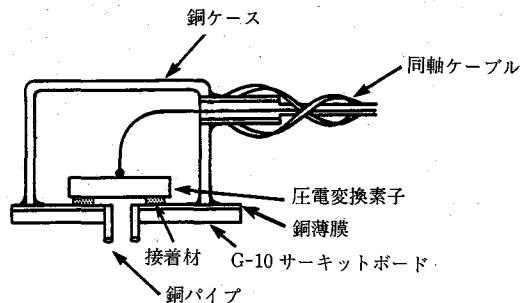


図 1 圧力センサの構造

* 東京大学生産技術研究所 第 3 部

** マサチューセッツ工科大学

研究速報

とエポキシ樹脂の複合材料の板上に、銅薄膜を接着したもの)に接着し、さらに銅のケースで覆って電気的・機械的に保護する。また、サーキットボードに空けた穴を容器と結び、圧電素子の片面に圧力を導く。圧電素子の出力は同軸ケーブルで常温部に導き、高入力インピーダンス(～100 MΩ)の増幅器で40 dB程度増幅する。

3. ヒータによる校正

エネルギーセンサを校正するために、図2のような配置を用いた。圧力センサを一端に付けた容器の中に、黄銅の電熱線で作ったヒータ(抵抗は約30 Ω)が入っている。このヒータにパルス発生器からの方波電圧パルスを印加し、パルスの高さや幅を変化して望みの入力エネルギー量を与えた。

3.1 液体ヘリウム中の校正

体積8 cm³の容器を用い、液体ヘリウム中で得た波形が図3である。上がセンサの出力波形で、下が電圧パルス(幅0.1 ms, 高さ28 V)である。センサ出力は、大半が振動分で、わずかに指数関数的に減衰する直流分が重畳している。

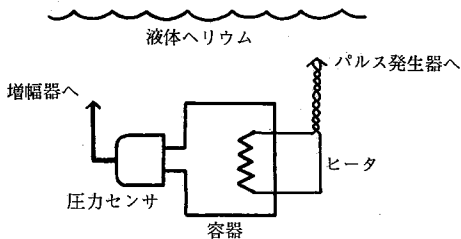


図2 校正用の実験配置

センサ出力の指標として、振動分のピーク・ピーク値に着目し、入力エネルギーとの関係を示したものが図4である。入力エネルギーが2桁変化しても、出力との関係は1つの曲線(両対数目盛上の直線)で表せる。またパルス幅の影響も、ほとんど見られず、最長の1 msのパルスに対してのみやや出力が小さい傾向があるに止まる。すなわち、0.5 msより短い瞬間的なエネルギーの放出に対し、このセンサーはエネルギー総量に対応した一様な出力を与えることが確かめられた。

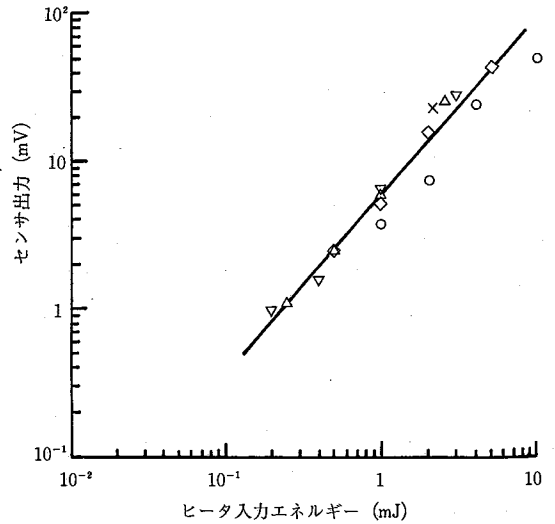


図4 液体ヘリウム中の校正曲線。電圧パルス幅: 1 ms(O), 0.5 ms(◇), 0.25 ms(△), 0.1 ms(▽), 25 μs(×)

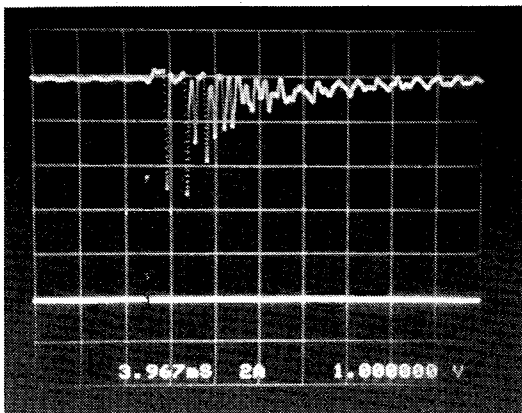


図3 液体ヘリウム中での校正。上: エネルギーセンサ出力 (10 mV/div). 下: 電圧パルス (10 V/div). 時間軸: 4 ms/div.

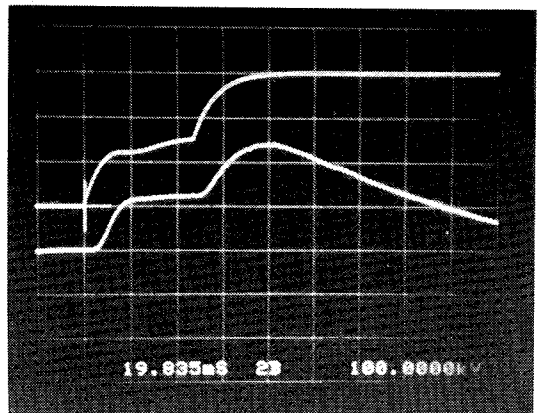


図5 液体窒素中での校正。上: 入力エネルギー (0.15 J/div). 下: エネルギーセンサ出力 (10 mV/div). 時間軸: 20 ms/div.

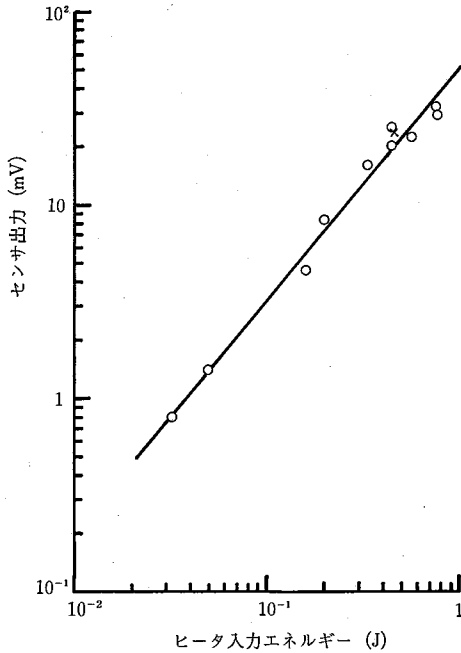


図6 液体窒素中での校正曲線。電圧パルス幅：26 ms (○), 48 ms (×)。

3・2 液体窒素中の校正

図2に示すものと同じ配置で、液体だけをヘリウム(4.2 K)から窒素(77 K)に替えて同様の校正を行った。また、この場合の容器の体積は5 cm³とした。図5にそのときのオシログラムを示す。上側の波形は入力エネルギー波形(パルス幅が長いので、方形波から歪みを生じた)で、次式によって表される。

$$E(t) = \int_0^t \left[\frac{V(\tau)^2}{R} \right] d\tau \quad (2)$$

ここで、 $V(t)$ は印加電圧波形、 R はヒータの抵抗である。下側の波形はエネルギーセンサの出力で、直流分の減衰によるたるみを除けば、良く入力に追従している。減衰の時定数を図5から推定すると、90~100 msとなり、図3の直流分の減衰よりもずっと長い。これは、容量が違うための密閉性の差というよりも、液体ヘリウムが窒素に比べ非常に漏れやすく、封じ込め難い液体であるためと考えられる。また逆にとらえれば、液体ヘリウム用の容器については、さらにシール等に改良の余地が残されていることになる。

図6は、液体窒素を用いたときの校正曲線である。時間幅26 msと48 msの電圧パルスに対し、同一の対応関係が得られた。この校正曲線(両対数目盛上で直線として表されている)の傾きは、液体ヘリウムの場合図4と液体窒素の場合図6と一致している。

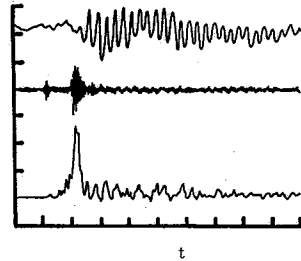


図7 液体ヘリウム中での摩擦運動の観測。上：エネルギーセンサ出力(2.5 mV/div)，中：AE(1.25 mV/div)。下：速度(0.7 mm s⁻¹/div)，時間軸：2 ms/div。

3・3 液体ヘリウム中の摩擦運動への適用

このエネルギーセンサの適用例として、液体ヘリウム中での金属面(銅)の摩擦運動を観測した。極低温での摩擦運動は、1 μm程度の小さな滑り(マイクロスリップ)が次々と生じることで巨視的な動きが生じることが知られている。⁹⁾文献9)に詳説されている実験装置を用い、このマイクロスリップの1事象をとらえたものが図7である。波形は、上からエネルギーセンサ出力、アコースティックエミッション(AE)、滑り面の相対速度⁹⁾の順である。AE信号の検出と速度信号の立ち上がりが良い一致しているのが分かる。速度信号を積分して得られるステップの大きさ(Δx)は0.6 μmであり、このときの引張り力($F=830$ N)とこの値の積は、滑り面に対する仕事(ΔW)に等しい。すなわち、

$$\Delta W = F\Delta x \quad (3)$$

上述の値を代入すると、 $\Delta W=0.5$ mJを得る。一方、エネルギーセンサの出力を図4からエネルギーへ変換すると、0.44 mJとなり ΔW と良く一致する。

4. おわりに

4.2 Kと77 Kの低温での瞬間的なエネルギー放出を定量的に測定する、微小エネルギーセンサを開発した。このセンサは液体ヘリウム中で、0.1 mJ以上が測定可能な高感度のものである。さらに、このセンサを極低温における摩擦運動の実験に適用し、その有用性を確認した。

(1985年7月29日受理)

参 考 文 献

- 1) Iwasa, Y., "Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coils. Part 1: General introduction", *Cryogenics* 25, 304-306 (1985)
- 2) Goldsmid, H. J. and Corsan, J. M. "Flux compression in hard superconductors", *Phys Lett* 10, 39 (1964)
- 3) Hancox, R., "Stability against flux jumping in sinter-

- 研究速報
- ed Nb₃Sn", *Phys Lett* 16, 208 (1965)
- 4) Easton, D. S., Kroeger, D. M. and Moazed, A., "Thermomechanical heat generation in copper and a Nb-Ti superconducting composite", *Appl Phys Lett* 29, 382 (1976)
 - 5) Pasztor, G. and Schmidt, C., "Dynamic stress effects in technical superconductors and the 'training' problem of superconducting magnets", *J Appl Phys* 49, 886 (1978)
 - 6) Maeda, H., Tsukamoto, O. and Iwasa, Y., "The mechanism of friction motion and its effect at 4.2 K in superconducting magnet winding models", *Cryogenics* 22, 287-295 (1982)
 - 7) Iwasa, Y., Bobrov, E. S., Tsukamoto, O., Takaghi, T. and Fujita, H., "Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coils. Part 3: Fracture-induced premature quenches", *Cryogenics* 25, 317-322 (1985)
 - 8) Fujita, H., Takaghi, T. and Iwasa, Y., "Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coils. Part 4: Prequench cracks and frictional motion", *Cryogenics* 25, 323-326 (1985)
 - 9) Fujita, H. and Iwasa, Y., "High-resolution experimental techniques for cryomechanics — A study of mechanical behavior of materials at 4.2 K", submitted to *Experimental Mechanics*

