

実用超伝導線材の応力ひずみ効果およびその履歴の影響

Stress/strain characteristics and their hysteretic effect of practical superconducting wire

笠場 孝一¹, 小黒 英俊², 淡路 智²

¹富山大・工, ²東北大・金研

K. Kasaba¹, H. Oguro², S. Awaji²

¹ Faculty of Engineering, University of Toyama

² Institutes for Materials Research, Tohoku University

1. 緒言

Nb₃Sn 線材は高い T_c と B_{c2} を持ち高磁界超伝導マグネット用線材として豊富な実用実績を持つが、臨界電流 I_c などの超伝導特性は応力/ひずみに対して、敏感に変化する特徴がある。本研究では内部拡散法およびブロンズ法で作製された ITER(国際核融合炉)の TF(トロイダル)コイル用 Nb₃Sn 実導体の、臨界電流に及ぼす応力/ひずみの影響を調べる。昨年より、磁場中での応力/ひずみ効果を測定するための試験ロッドの改良を引き続き行っており、その状況も併せて報告する。

2. 実験

供試材は ITER に実際に使用される、JASTEC 社製のブロンズ法線材、および中国製の内部拡散法線材である。ともに周囲の安定化銅と内部導体の比はほぼ 1:1 である。核融合科学研究所にて 650°C200 時間の生成熟処理を施したものである。

高磁場中で、超伝導線材の応力/ひずみ効果を調べる実験は、マグネットボア内の磁場中心に置いた線材に引張り負荷を与えることが出来る図 1 のようなロッドを用いて行う。ボア径を考えると、試験片全長が短いものしか装着できないため、要求される極低温磁場中での変位測定の精度は非常に高い。測定には複数のひずみゲージを貼ったクリップゲージを用いるが、実験中のクリップゲージが目視出来ず、先端のつめ部分の引っ掛かりの安定性など、その状態は不明である。よって、ロッドにはクリップゲージ校正金具を取り付け、実験中にその状態を間接的に把握することになっている。昨年度実験した同じ Nb₃Sn 内部拡散法の線材の測定ひずみは、ブロンズ法のものよりも非常に小さかったが、後述する今年度の結果を踏まえると、これは、前述したクリップゲージの先端つめ部分(図 1 の点線で囲った部分)が磁場下での電磁力で接点ずれを起こしていると考えの方が妥当である。図 2 は今回の実験で、電磁力の影響を最も受けたケースの応力ひずみの測定結果であるが、強磁場下で応力/ひずみを測定する際には多かれ少なかれ、常に現れる挙動である。しかし、影響を受けたとしても負荷過程の傾きが中断後も維持する結果が出てきているなら、みかけのひずみを除去する補正で、真のひずみを見積もることができると考えている。なお接点ずれの対処として、クリップゲージはその先端部を曲げ加工するのではなく、ゲージ板全体を一体で放電加工するものを、新たに自作している。

この実験での臨界電流測定はナノボルトマルチメー

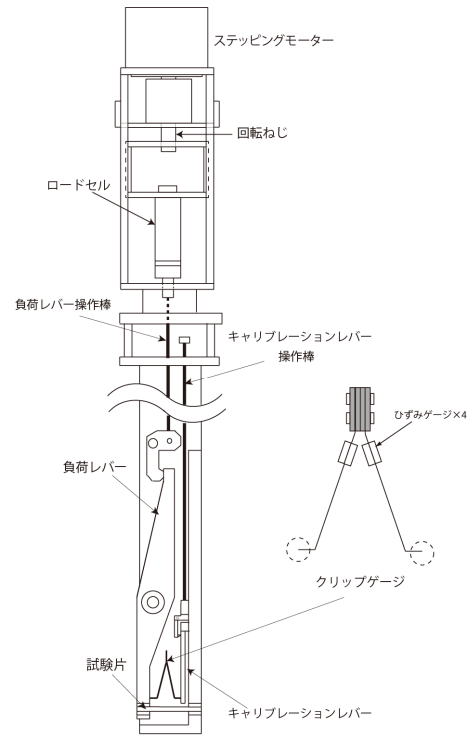


図 1 試験ロッドとクリップゲージ

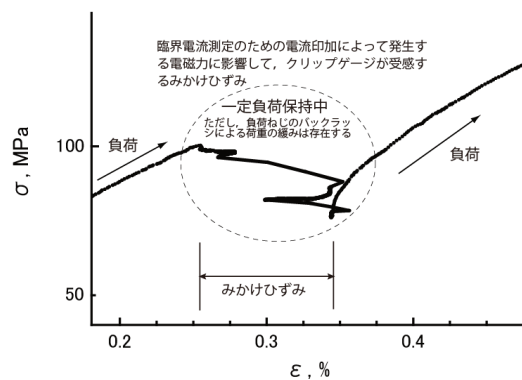


図 2 応力ひずみ線図に現れる電磁力の影響

タを使用し4端子法で、線材 1cm あたりに 1 μ v の電圧発生で定義している。線材に、強磁場下で電流を流すと、電磁力の影響は図2の応力ひずみの他に $V-I$ 信号にも図 3 で示す程度のノイズを生じる。またボア径の制限から試験できる線材長が短く、電圧端子がはんだ付けされ

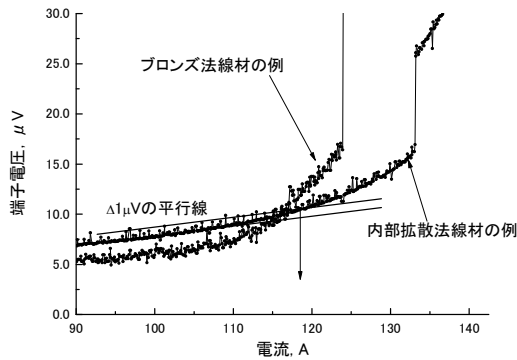


図3 臨界電流測定例(今回の実験より)

た両端ターミナルからあまり離せない。そのためターミナル部の発熱の影響を受け、超伝導下でも図のようなトータルで1μVを上回る電圧上昇がある。そこで臨界電流は、その電圧上昇を考慮して、ベースとなる右上がりの近似直線に対してΔ1μVの平行線を求めて、それとの交点で定義している。今回の内部拡散法線材は図3で示すように、電流が一旦バイパスするパスがあるのか、クエンチを定義した後のある値で電圧上昇が一度緩む瞬間があることが観察された。

3. 結果および考察

図4および表1は2種類の線材の、今年度の実験結果、そして2006年に入手のブロンズ法線材の結果を示す。 I_0 は初期臨界電流、 I_{c0} は最大臨界電流、 ϵ_m は I_{c0} でのひずみであり、固有ひずみが0となる時、つまり冷却時の予圧縮ひずみの大きさを表す。なお、両線材は表に示すように線径が異なっていると、安定化銅の比率の違いから I_c に表に示したような違いがある。昨年度の内部拡散法線材のひずみ測定では、その値が過小なものとなっており、同じ応力でのひずみがブロンズ法のものよりかなり低く、 ϵ_m も0.15%ほどしか示さなかった。よって、内部拡散法が高い強度を有していると判断したが、今年度得られたその応力ひずみ曲線は、ブロンズ法のもの、また2006年のブロンズ線材とも大差ないものとなった。よって昨年度の結果はクリップゲージの先端つめ部分(図1)が不安定になっていると考える方が妥当である。一方で今年度の線材は2種類とも、 ϵ_m は2006年のものよりかなり上昇しており、予圧縮量はかなり大きくなっている。これは安定化銅との比率にも関わっており、今年度の2種類の線材は I_c そのものよりも、応力/ひずみ効果に利がある線材だと位置づけられる。ブロンズ法と内部拡散法の比較では、 I_c/I_{c0} の曲線の傾きを比較すると、内部拡散法のものの方が、ひずみに対して敏感な性質を有していることがわかる。

なお、今後は以上の結果を踏まえ、試験前後の線材の詳細観察を行う予定でいる。

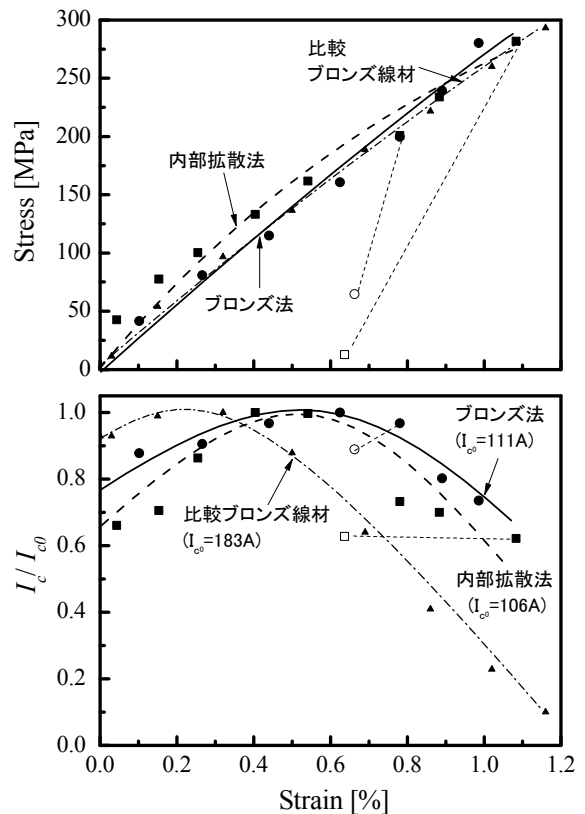


図4 応力ひずみ効果実験結果

表1 結果データ(図3より)

	内部拡散	ブロンズ	比較ブロンズ
ϕ [mm]	0.9		1.0
I_0 [A]	70	88	169
I_{c0} [A]	106	111	183
ϵ_m [%]	0.53	0.47	0.32

4. 結言

- (1) 両線材ともに一般的な Nb_3Sn 線材と同様、冷却による予圧縮効果が見られた。そのひずみ ϵ_m は2006年度入手の銅安定化ブロンズ法の線材ものよりも、かなり大きい。 I_c 自体はそれ程大きくないが、 ϵ_m の大きさから、両線材のひずみに対する裕度はかなりあると判断できる。
- (2) 今回の内部拡散法線材は、ブロンズ法線材よりもひずみに敏感であった。
- (3) 十分すぎる安定化がなされていることの表れか、今回の内部拡散法線材は、クエンチを定義した後のある値で電圧上昇が一度緩む瞬間があることが観察された。