

超電導臨界電流の一軸圧縮/引張歪依存性とその非対称性
=工業化技術の完成に向けて=
**Uniaxial Compressive/Tensile Strain Dependence of Superconducting
Critical Current and Its un-symmetric Behavior**
= Technical Clarification for Industrialization =

長村 光造^a, 町屋 修太郎^b, 金 新哲^c, 菖蒲 敬久^d
K. Osamura^a, S. Machiya^b, X. Jin^c, T. Shobu^d

^a応用科学研究所, ^b大同大学, ^c理化学研究所, ^d日本原子力研究開発機構
^aReserch Institute of Applied Sciences, ^bDaido University,
^cThe Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN), ^dJapan Atomic Energy Agency

超電導特性が応力/ひずみに敏感であり、このことが実用化するうえで大きな障害となっている。この問題の共通する学問的、技術的課題は実際に超電導相に生起する局所歪を正確に評価し、制御する方法を見出すことである。実用超電導線は複合材料であるため回折法により非破壊で局所歪を計測することが不可欠である。本実験ではスプリングボードを用いて、一軸性引張/圧縮歪下で超電導層に生起する局所歪を測定し、熱歪、force free strain を推定したので報告する。

キーワード： REBCO、超電導線材、X線回折、局所歪、熱歪

背景と研究目的：

超電導技術は今後の科学・技術の要として最重要キーテクノロジーのひとつであり、これまでに加速器、大容量送電ケーブル、超電導リニアモーターカー、熱核融合炉 ITER の不可欠な要素として用いられてきている。これらの機器には数十キロメートルにおよぶ長尺の超電導線が使われるが、現在実用化が進められている実用超電導線材の共通する特徴は脆弱な金属間化合物である Nb₃Sn, MgB₂ や酸化物 REBCO(REBa₂Cu₃O_{6+d}, RE=希土類元素)、BSCCO((Bi, Pb_{x-1})₂Sr₂Ca_xCu_{x+1}O_{5x}, x=1, 2)を如何に安定して利用するかが問題となっており、その解決のため延性のある金属と複合化する対策が取られている。金属との複合体にすることにより超電導成分に生起する局所歪の状態は複雑となるので、製造過程や電磁力が発生する動作中の機械—超電導特性を正確に把握することが極めて重要となる。学問的見地からも、実用超電導材料で可逆領域における臨界電流の歪依存性を統一して取り扱える理論の構築が望まれている。

これまでに特殊な曲げ変形治具であるスプリングボードを用いた一連の研究の第 1 報として BSCCO 線材の結果を公表した[1]が、本研究では、REBCO 線材について、このスプリングボードを用いて引張と圧縮ひずみを連続的に印加した状態で線材中の REBCO 層に生起する局所歪を引張から圧縮までの過程を連続に計測すること、および曲げ変形を与えた状態の REBCO パンケーキコイル中での局所歪分布を検出することを目的とした。

実験方法：

今回用いた試料は 4 種類の実用 REBCO 線材であった。それらを記号 SP, SU, AM, FU で示すことにする。そのうち FU 線材の複合構造を模式的に図 1 に示す。Hastelloy 基板上に buffer として Gd および Ce の酸化物層があり、その上に非常に配向性のよい超電導層 GdBCO が結晶成長されている。超電導層を保護するために Ag が蒸着され、最上部に Cu あるいは Ni-Cr 金属テープがハンダ付けされている。本研究では超電導層の局所歪を測定することを目的にしている。試料は複合材料であるため局所歪は構成成分の影響を受けるため複雑な変化をする。なお SP, SU, AM 線材では線材軸方向に<100>配向してるが、FU 線材では<110>配向となっている。

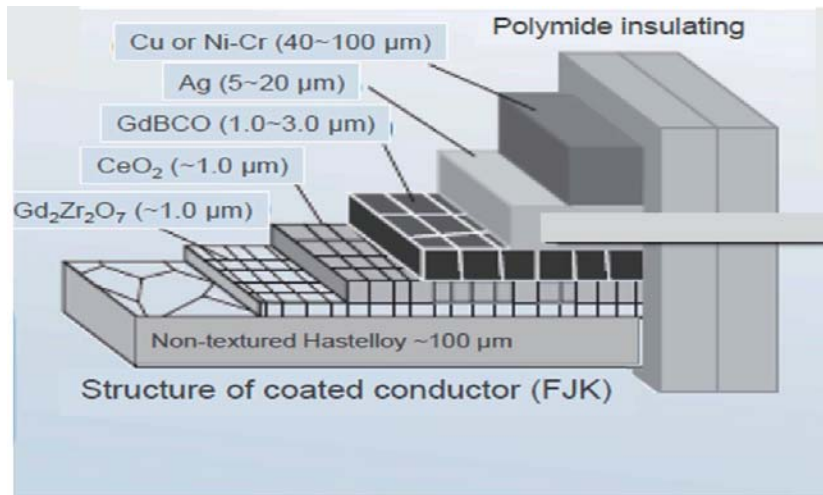


図 1. FU 社製実用 REBCO テープ線材の複合構造

局所歪測定は BL28B2 で行った。一般に薄い材料の圧縮実験では、座屈の影響があるため直接の圧縮実験は難しい。そこで、ダラム大が開発した特殊な「曲りはり(スプリングボード)」を用いて連続的に引張・圧縮ひずみを与えひずみ測定を行った。このスプリングボードを用いて引張 0.4%、圧縮-0.3%の一軸歪範囲内で行った。入射ビームはスリットで 0.3x0.3 mm とした。受光側は、第一スリットを 0.3 mm とし、検出器前の第二スリットは十分開け、実質的なシングルスリット系とした。回折角は 6 deg とした。

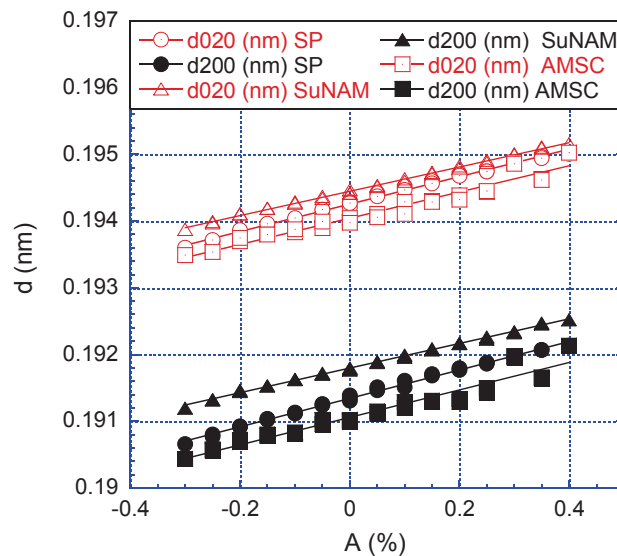


図 2. (020), (200)面間隔の一軸歪依存性

実験結果および考察：

図 2 に 3 種類の線材の(020), (200)面間隔の一軸歪依存性を示す。測定した歪範囲内では印加歪に対して面間隔は直線的に変化し、超電導層は弾性的に変化していることがわかる。これらのデータから、後で述べる force free strain の位置での格子面間隔を求めると表 1 のようになった。一般に本結晶では b 軸方向に酸素原子の優先配向があるため a 軸に較べて b 軸のほうが面間隔が広い。表 1 に示したように製造メーカーにより用いる超電導元素の種類が異なる。REBCO 構造中でのイオン半径は Gd の方が Y より大きい。観測された面間隔が SU 社の線材のほうが大きいことと整合する。SP 社のカタログによれば(Y, Gd)の混晶が用いられているようであるがその組成は記載されていない。表 1 の値を見ると確かに AM 社と SU 社の間の値をとることがわかる。

表 1. 3 種類の REBCO 線材の(020), (200)面間隔

Manufacturer	do (nm)		SC Layer
	(020)	(200)	
AM	0.19450	0.19168	Y
SP	0.19484	0.19206	(Y,Gd)
SU	0.19494	0.19241	Gd

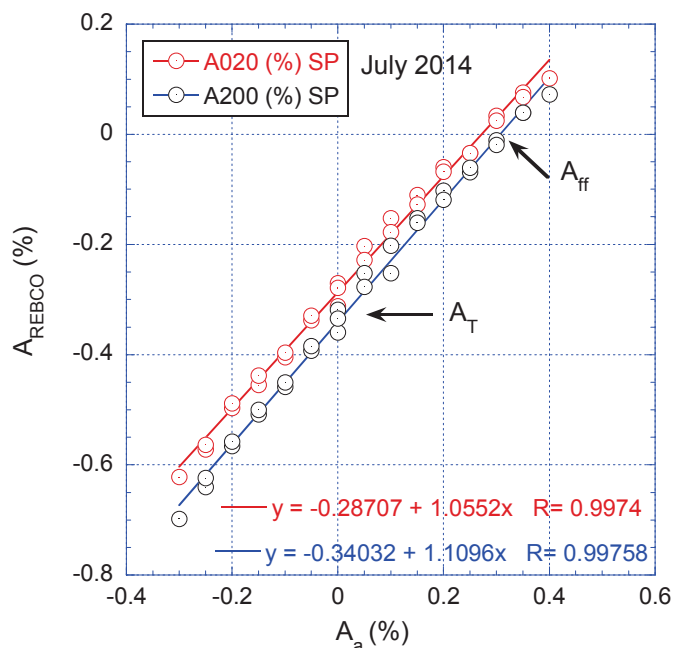


図 3. SP 線材中の超電導層に生起する局所歪の印加歪依存性

図 3 に SP 線材中の超電導層に生起する局所歪(A_{REBCO})の印加歪依存性を示す。ここで示されるように $A_a=0$ のときの値を熱歪 A_T と呼び、また $A_{REBCO}=0$ すなわち超電導層に生起する局所歪がゼロの印加歪を A_{ff} で表し、force free strain と呼ぶことにする。図中に示すように直線回帰解析を行い、その結果より A_T, A_{ff} を求めた。その結果を表 2 に示した。〈110〉配向する FU 線材については今回の実験では軸立てが難しくデータを得ることができなかった。なお表 1 に示した面間隔は A_{ff} のときの、つまり局所歪がゼロとみなされるとき値である。

一方複合則を基礎に熱歪を計算で求めた結果も表 2 に示してある。ここで計算結果が線材ごとに異なるのは、基板およびラミネート材の材質および厚さの影響である。ただし Y および Gd 超電導層の熱膨張係数は異なるはずであるが、Gd 相の熱膨張係数は未知であるため、Y 超電導層と同じであると仮定した。超電導層に生起する熱歪の計算値と実測値を比較すると、すべて圧縮歪であり、 $-0.23 \sim -0.35\%$ 範囲にあることが定性的に明らかになった。ただし詳細に検討すると(1)計算値と実測値との系統的な変化、(2)(020), (200)から求められた熱歪が異なること等については今後の詳細な解析によって明らかにしたい。

本研究は背景と研究目的で述べたように、複合材料である実用超電導線材の臨界電流の歪依存性を解明し、よって超電導特性の改良を図ることが主題である。本報告の局所歪の測定と並行して臨界電流の歪依存性の実験を行っている。図 4 は本研究で新しく提案するチャンネルモデルを基礎に理論的に計算した結果(実線)と SU 社製の線材に対する測定結果(丸印)の比較である。両者はよく一致しており理論の妥当性が示唆される。印加歪依存性についてみると臨界電流が極大となる歪はゼロよりわずかに圧縮側にあり、極大の左右の歪依存性は非対称である。この傾向は AM, SU, FU 線材でも同様であった。ただし理論で取り扱う歪はパラメータとして実験値にフィッティング

するように決められたものであり、その意味を解釈するためには、放射光実験で求められる局所歪の詳しい解析が必要となる。

表 2. 超電導層に生起する熱歪の計算値と実測値の比較

Manufacturer	A_T (Calculated) (%)	A_T (Observed) (%)	
		(020)	(200)
SP	-0.24	-0.28	-0.34
AMSC	-0.32	-0.23	-0.30
SuNAM	-0.35	-0.27	-0.33
Fujikura	-0.25	-	-

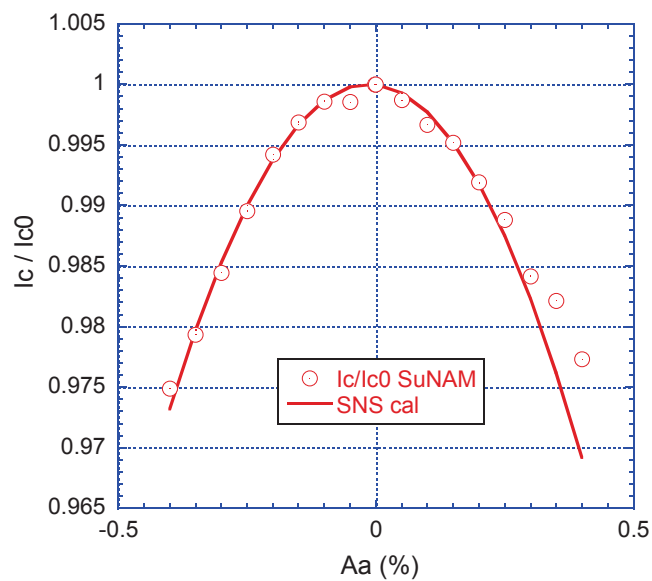


図 4. チャンネルモデルが予測される臨界電流の印加歪依存性と実験値の比較

さらに REBCO パンケーキコイルについてテープ内層から外層にわたる一層ごとの円周方向の局所歪の測定を行った。樹脂の含浸の有無について比較を行ったところ、含浸材では歪の変化が抑制されていることが明らかとなった。

まとめ：

本実験により、3種類の実用 REBCO 線材について引張・圧縮の連続した歪シーケンス下での局所歪測定を行った。印加歪に対し超電導相の局所歪はほぼ線形に対応しており、熱歪(A_T)および force free strain(A_{ff})を決定することができた。これらのパラメータの定量的な知見は臨界電流の歪依存性の解析に必要不可欠なものであった。またコイルの状態での局所歪の測定手法を確立することができた。

参考文献：

[1] K. Osamura et al., *SUST*, **27**, 085005, (2014).