



## 磁場応用のための材料評価技術の開発～機械的性質～

片桐一宗<sup>1)</sup>, 笠場孝一<sup>1)</sup>, 吉野泰弘<sup>1)</sup>, 岩淵明<sup>1)</sup>, 村上雅人<sup>2)</sup>, 手嶋英一<sup>3)</sup>

溶融凝固法による単結晶希土類系バルク超電導体の強力永久磁石などへの応用のために必要な機械的性質を室温および極低温において評価する技術を開発し、これにより市販および開発中の種々の高性能バルク超電導体の評価を行なった。いくつかの試験法から得られた種々の評価パラメータ間の相関を明らかにすると共に、得られたデータから機械的性質を支配する因子を抽出して、製造プロセスへのフィードバックを図るとともにバルク応用機器の信頼性を確保するためのデータベースを構築し、本共同研究事業でおこなわれた熱物性のそれと共に web に公開した。

<http://paris.mech.iwate-u.ac.jp/sc-bulk/database.html>

### Development of material evaluation technique for application of magnetic field

K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Yoshino, A. Iwabuchi, M. Murakami, E. Teshima

The techniques for evaluating mechanical properties at room and cryogenic temperatures in high performance single-domained rare-earth based bulk superconductors fabricated by melt growth process have been developed. Data have been accumulated and the parameters, which control the mechanical properties of the bulk, were extracted. The database constructed is to be fed-back to the fabrication process and utilized as a tool for assuring the reliability of the instruments of bulk application.

#### 1. はじめに

溶融凝固法による単結晶希土類系バルク超電導体(以下バルク)は、磁束ピン止めに基づく強力な永久磁石として、また大容量電流リード、限流器などとして種々の分野での応用が進められている。バルクの磁場応用に際し、極低温における着磁の際の大きな電磁力や温度変化に伴う熱応力、使用中の機械的な振動などにより、破損にいたることが報告されており、バルク応用機器の信頼性確保のためには機械的性質を室温および極低温において評価する必要

がある。多数の空洞や微視き裂を持つ単結晶セラミックスであるバルクの機械的諸性質を評価する技術はまだ確立されておらず、利用できるデータは限られ、体系的なものが求められている。

本研究では市販および開発されつつある種々のバルクについて、室温および極低温における引張り、曲げ、圧縮、破壊靱性、疲労、硬さなどの試験法を確立するとともに、バルクの機械的性質を代表するパラメータを評価し、これらを支配する因子を抽出した。評価したパラメータは硬さ、各種負荷モードにおける破壊強度のほか任意の形状のバルク内の

---

所属：<sup>1)</sup>岩手大学(Iwate Univ.)，<sup>2)</sup>超電導工学研究所(ISTEC-SRL)，<sup>3)</sup>新日鐵先端技術研究所(Nippon Steel Company Ltd)



応力解析に必要なヤング率およびポアソン比などの弾性係数である。また異なる評価方法により得られる機械的特性パラメータ間の相関やこれらに及ぼす組織などの影響について解析した。一方、破壊面の巨視的および微視的観察を行い破壊の起点の同定と破壊過程を解明した。これらの結果をまとめて提案型データベースとして 2004 年 8 月から、<http://paris.mech.iwate-u.ac.jp/sc-bulk/database.html> に公開し、バルク応用機器設計の用に供するとともにバルク製造プロセスへのフィードバックを図った。さらにバルクの大型化を目指す方法の一つとして注目されているバルクの接合について、その強度を評価して実用の可能性を探った。

本編では、前編の後に得られた結果を中心に、これまでの成果をまとめて記述する。

## 2. 研究方法

2.1 試験片 トップシード溶融凝固 (TSMG) 法により作製された直径 46 ~ 20mm、高さ 25 ~ 10mm のシングルドメインバルク(末尾データベース Top page 参照)から低速精密切断機を用いて種々の方位の試験片を切り出して試験に供した。

### 2.2 弾性係数、破壊強度および硬さの評価

容量 2kN の電気油圧サーボ方式の万能試験機および 5kN のインストロン型引張り試験機を用いてクロスヘッド速度 0.15mm/min、室温 (RT) および液体窒素中 (77K) で試験を行った。引張り試験片の寸法は 3x3x4mm を基準としたが、長さの効果を明らかにするため 8 および 12mm の長さのものについても測定した。試験片の端面をアルミ合金棒にエポキシ系の接着剤で接合し、ユニバーサルジョイントを介して負荷した。負荷方向およびそれに直角の方向のひずみは他の試験の場合と同様に、ゲージ長さ 1mm のひずみゲージの対を直接試料に貼り付けてデータロガーにより記録した。3 点曲げ試験ではセラミックスに関する JIS 規格に従い 4x3x36mm の試験片を用い、支点間距離を 30mm とした。圧縮試験

は 4x4x12mm の試験片の長手方向に圧縮荷重を加えた。室温試験では固体潤滑材を端面に用いたが、77K では使用できなかった。破壊靱性試験として、上記引張りおよび曲げ試験片の長さ中央にノッチを入れて引張りおよび曲げ (SEVNB 法) により評価を行った。試験片の厚さに対するノッチ深さの比が 0.25 から 0.6 程度、V ノッチ底曲率半径を約 20  $\mu$ m としたが、15 から 50  $\mu$ m の範囲で影響のないことを確認した。同一の試験機を用い、応力比 0.1、繰返し速度 5 Hz で引張りおよび曲げの繰返しによって、 $5 \times 10^4$  回までの疲労試験を行った。破断しない試験片は、1 段階応力レベルを上げて、疲労試験を続け破断にいたるまでこれを繰返した。Er 系または Ag 添加 Y 系焼結体により <110> 方向に接合した 2 種類の Y 系バルクの接合体の強度を引張試験により評価した。

GM 冷凍機に接続された試料台、ピッカーズダイヤモンド圧子押込み機構、試料観察用スコープを取込んだ真空容器と容器上部に取付けられた圧子移動機構 (XY ステージ) 並びに真空排気装置から構成される伝導冷却型極低温硬さ計 (RT ~ 40K) を開発し、硬さを測定した。また、ヤング率および求められたピッカーズ硬さと圧痕の四隅から生じたメディアンき裂の長さを用いておよびインデンテーション法破壊靱性値を算出した。

セラミックス単結晶からなるバルク超伝導体は脆性的である上に、多くの欠陥を含んでいるため機械的性質には大きなばらつきが見られる。ばらつきの程度を示すものとして、Weibull 統計の係数のひとつ  $m$  値が破壊データから求められる。この値は、欠陥を持つ材料固有のものであり、大きいことはばらつきの小さいことを示し、一般的な構造材料では 5 ~ 10 以上である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 機械的特性の異方性 (RT)

バルク単結晶本来の異方性ばかりでなく、作製過



程の相変態に伴い必然的に導入される c 軸に垂直な潜在微小き裂が存在するため、き裂の開閉口あるいは、き裂の低速進展などにより弾性係数、あるいは強度特性に異方性が認められる。

#### 引張試験による機械的特性とその試料長さ依存性

バルクの c 軸に垂直 ( c ) な方向の応力-ひずみ曲線は、ほぼ線形挙動を示すが、c 軸方向のそれは顕著な非線形挙動を示す。

c 軸方向のヤング率は c 方向のそれよりも低い。c 面内で結晶成長 ( a/b 軸 ) 方向 ( サブグレインが伸びている方向 ) のヤング率と a/b 軸に垂直 ( a/b ) な方向のそれとの間に顕著な違いはない。c 方向の縦ひずみと c 軸方向の横ひずみによるポアソン比は 0.1~0.2 程度であり、c 方向の横ひずみによるそれ ( 0.3~0.4 程度 ) よりも小さい。試験片端部が拘束されているため、マトリックスの横方向の収縮に伴い c 軸に垂直な微小き裂が開くためと考えられる。c 方向の横ひずみによるポアソン比も拘束の影響を受ける。細長比 4 程度以上の試験片を用いることにより、拘束の影響を緩和できる。図 1 に引張強さの長さ依存性を示す。c 軸方向の引張強さは、c 方向のそれよりも低い。a/b 軸方向の引張強さと a/b 方向のそれとの間に顕著な違いはない。

#### 曲げ試験による機械的特性

試験片に作用する垂直応力が c 方向となるように c 軸方向に 3 点曲げ負荷したヤング率は 134 GPa 程度であり、c 方向に負荷したそれ ( 139 GPa 程

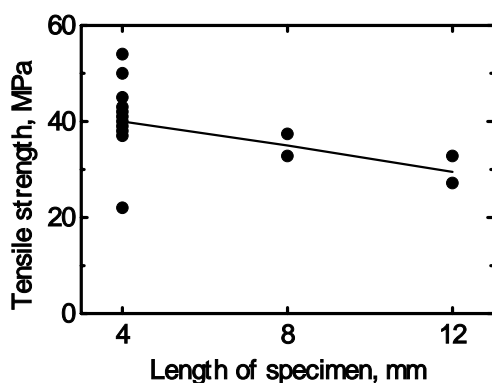


図1 引張強さの試験片長さ依存性

度)との間に顕著な違いはない。また、c 軸および c 方向に負荷した場合の曲げ強さは、107 および 101 MPa 程度であり、前者の方がわずかに大きい。

#### 圧縮試験による機械的特性

図 2 に圧縮試験における応力-ひずみ特性を示す。長さ 8 あるいは 12 mm の試験片による c 軸方向のヤング率は c 方向のそれよりも低い。c 軸に垂直な微小き裂の負荷に伴う閉口が影響を及ぼしていると考えられる。c 方向の圧縮強さ ( Sm17 では 335、Sm29 では 275 MPa 程度 ) は、c 軸方向のそれ ( Sm17 では 350、Sm29 では 400 MPa 程度 ) よりも低い。前者は粉碎型、後者は a-b 面に沿う縦割れ剥離型の破壊モードを示した。

#### SEVNB (Single edge V-notched beam) 法および引張試験による破壊靱性

SEVNB 法では、き裂の進展方向と潜在微小き裂が直交する c ノッチによる破壊靱性は、a/b ノッチによるそれよりも高い。Sm 系バルクでは大きくはないものの明確な差異が認められ、引張試験においても同様な傾向が認められたが、Y 系のものでは違いは認められなかった。

#### 3.2 繰返し応力効果 (疲労)

Y(図3)およびGd系バルクのLNTにおける $5 \times 10^4$ 回の耐久限度はいずれもおおよそ 70MPa となった。この値は引張り強度のばらつきの中の最低値に、また平均値の 80~70%に相当する。このことから、応力繰返しによって、微視き裂の進展などの何らか

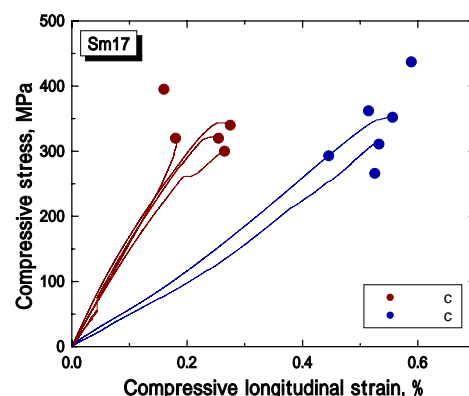


図2 圧縮試験における応力-ひずみ特性



の損傷が蓄積していることがわかる。

### 3.3 硬さ試験による機械的特性

図4にNEG系バルクの(001)面と(010)面に圧子を押し込んだビッカース硬さを示す。(001)に圧子を押し込んだ場合、温度低下にともなって硬さは4,000MPaから10,000MPa程度まで増加し、約2.5倍の増加率を示した。一方、圧子の押し込みを(010)面に行うと、ビッカース硬さは温度低下にともなってわずか1.3倍程度の増加を示した。図5はビッカース硬さと圧痕から生じたメディアックラック長さから求めた破壊靱性を示している。(001)面の破壊靱

性はほぼ一定(0.95MPa m)であるが、(010)面の値は1.2MPa mから1.0MPa m程度まで減少し、(001)面の値より若干高いことがわかる。

このように大きな異方性が現れた原因としては、(010)面に水平に存在する微視き裂が影響していると考えられる。潜在微視き裂が圧痕から生じるメディアックラックの進展を抑制する傾向がSEM観察からも認められている。

### 3.4 曲げ、引張試験および圧縮試験によるヤング率・破壊応力の関係 (RT)

#### 曲げ試験と引張試験

#### ヤング率

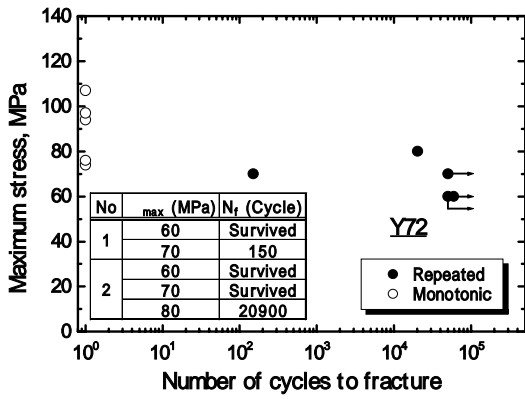


図3 S-N曲線(Y系バルク)

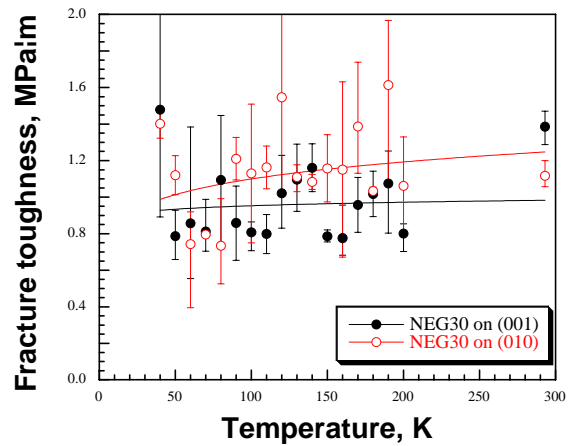


図5 破壊靱性の異方性

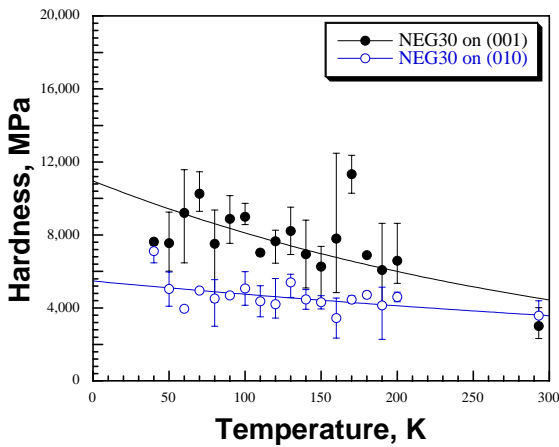


図4 ビッカース硬さの異方性

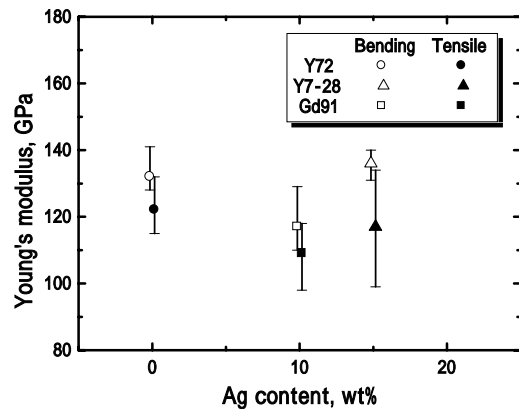


図6 曲げおよび引張りによるヤング率



曲げ試験によるヤング率は、引張試験によるそれよりも高い(図6)。曲げ試験では横断面内の半分には圧縮応力領域があり、後述のように、圧縮試験によるヤング率は、引張試験によるそれよりも高いためであると考えられる。

### 破壊応力

曲げ試験による破壊応力は、引張試験によるそれよりも高い(図7)。引張試験では試験片内部に一律な応力が作用するのに対し、曲げ試験では引張最大応力の作用する体積が限られているためである。

曲げ強さのワイブル係数と引張強さのそれは同程度の場合および曲げ強さの方が引張試験によるそれよりも著しく大きい場合が見られた(図8)。この

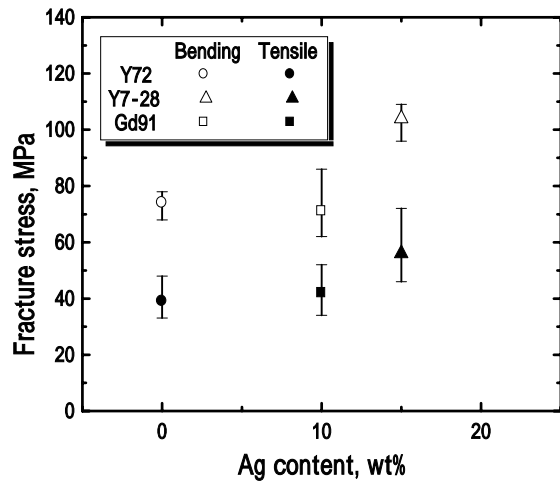


図7 曲げおよび引張り強度

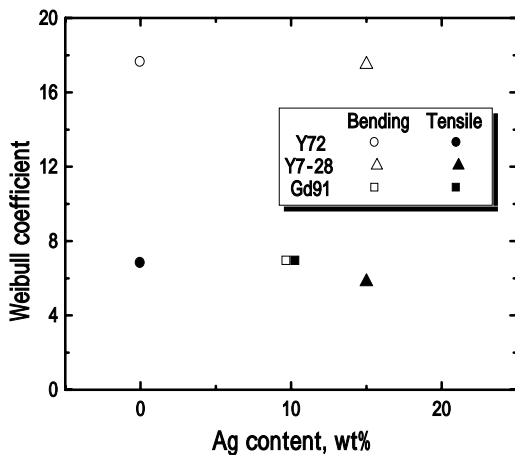


図8 曲げおよび引張り強度のワイブル係数

ような場合、曲げ強さの平均値からワイブル分布と有効体積の概念を用いて推定した引張強さの平均値と実際の引張試験によるそれとの差異は大きくなる。

### 引張試験と圧縮試験による機械特性の関係 (RT)

#### ヤング率

圧縮試験によるヤング率は、引張試験によるそれよりも高い(図9)。負荷方向に垂直なき裂は圧縮負荷では閉口し、引張負荷では開口するため、引張試験での試験片正味の断面積は、圧縮試験でのそれよりも小さいためであると考えられる。

#### 破壊応力

一般に圧縮試験による破壊応力は引張試験によるそれよりも高いが、バルク超電導体ではその違いが顕著である(図10、211粒子を17mol%含有したバルク材 Sm17 では11倍、約29mol%含有したそれ Sm29 では9倍程度)。

### 3.4 曲げ試験(SEVNB法) 引張試験および圧子押し込みによる破壊靱性の関係 (RT)

Sm系バルクではVノッチを導入した試験片の3点曲げ試験による破壊靱性値の平均値は引張試験によるそれよりも58%程度高いがY系ではほぼ同じである(図11)。後者では引張試験による結果のばらつきは3点曲げ試験によるそれよりも顕著である。圧子押し込みによる破壊靱性値は低く、曲げ試験の

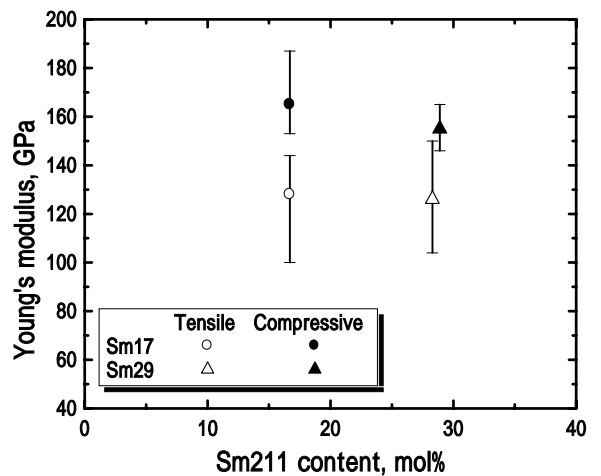


図9 引張りおよび圧縮によるヤング率



その 40%程度、引張りによるものと比べて 50% から 70%程度となる。

### 3.5 組織の影響

#### 211 相体積分率依存性 (RT)

##### 引張試験および圧縮試験によるヤング率

211 相 mol 分率が多くなるに従い、引張りヤング率はわずかに上昇する場合および低下する場合が見られる。123 マトリックスよりもヤング率の高い 211 相粒子の複合則による寄与、および 211 相と関連した微細き裂の分布の影響が考えられる。圧縮試験によるヤング率は 211 相の多いほうが低い (図 9)。

##### 引張強さおよび破壊靱性

211 相が多くなるに従い、引張強さは低下する。破面観察から推察される第 2 相粒子のはく離強度が低いこと、負荷方向に垂直な先在き裂や第 2 相粒子の偏在の増加などがその理由と考えられる。20 mol% 近傍に引張り強さのピークがあるとする文献もあり、これ以下でも低下する。Weibull 係数は 1 ~ 2 程度の NEG の場合を除けば、4.5 から 7 程度である。

一般には 211 相の増加に伴い破壊靱性が向上するとされているが、Sm123 の引張試験による破壊靱性には変化が認められなかった。

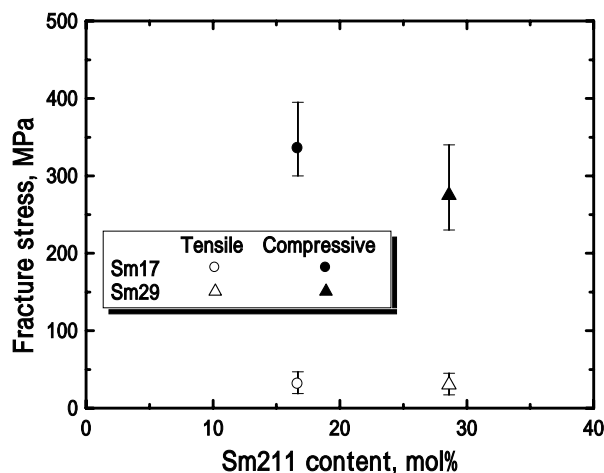


図 10 引張りおよび圧縮強度

### 硬さ試験

Sm 系バルクの結果によると、ASm17 と BSm29 のピッカース硬さおよび破壊靱性は室温においてはあまり変わらないが、211 粒子含有量の増加にともなって温度低下に伴う硬さの増加率が増し、破壊靱性値の低下が増す傾向が認められた。211 粒子がき裂進展を抑制するか逆に助長するかは、211 粒子と関連する微視き裂やポイドなどにも関連していると考えられる。

#### 銀添加量依存性 (RT)

##### ヤング率

銀添加したバルクの 3 点曲げおよび引張試験によるヤング率は、添加していないもののそれらとの間に顕著な違いは見られない (図 6)。

##### 破壊応力

3 点曲げおよび引張強さは、銀添加量に伴い上昇する (図 7)。銀添加した Y 系バルクの 3 点曲げ強さのワイブル係数と添加していないもののそれとの間には、顕著な違いは見られない。NEG の引張強さのワイブル係数は添加によってわずかに低下した。

### 硬さ試験

Ag 添加のない場合、硬さは温度低下にともなって 19,000MPa まで、約 3.5 倍の増加を示した。一方、

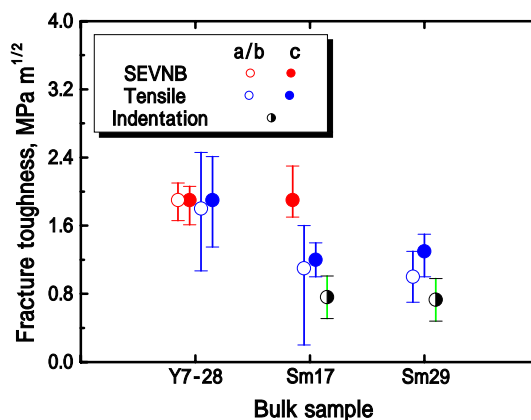


図 11 曲げ、引張りおよび押し込みによる破壊靱性破壊靱性



Ag 添加を行うと、硬さは 8,000MPa まで、約 2.2 倍の増加を示した。Ag 添加のない場合、破壊靱性値は温度低下にともなって 1.0MPa√m から 0.6MPa√m まで減少した。一方、Ag 添加した場合、1.2MPa√m から 0.8MPa√m までの減少を示した。

### 3.6 温度依存性 (RT and LNT)

#### 3 点曲げ試験によるヤング率

Y 系バルクの LNT におけるヤング率は、RT におけるそれよりも高く、その理論的な温度依存性と一致する。Gd 系バルクでは例外的にこの傾向からわずかにずれている。

#### 3 点曲げ強さ

LNT における 3 点曲げ強さは、銀添加の有無にかかわらず RT におけるそれよりも高く、ヤング率と同様に理論的な温度依存性と一致する(図 12)。LNT における 3 点曲げ強さのワイブル係数は RT におけるそれらよりも著しく低い。RT におけるワイブル係数の低い Gd 系では、LNT におけるものとほぼ同一である。

#### 引張り強さ

引張り強さは理論的な温度依存性や、上記の曲げ強さの結果と異なり、多くのバルクにおいて、LNT の方が RT のそれより低い。これにはアルミニウム

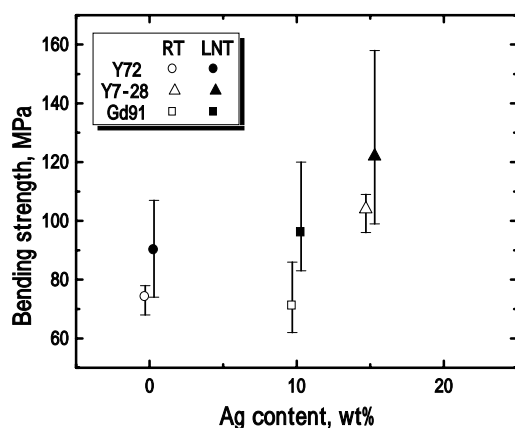


図 12 曲げ強度の温度依存性

ロッドに試料を接着している試験法に問題があり、有限要素法による熱応力の解析によると、LNT では引張り軸方向の大きな引張り残留応力が、接着部から少し離れた領域に発生していることが判明している。従って低温における引張り強さは大きく過小評価していることになるが、接着に伴うこのような現象はバルクの実応用においては十分に注意すべき事柄であり、応力解析による検討が要求される。

#### 引張試験による破壊靱性

LNT における破壊靱性と RT におけるそれとはほぼ一致するが、LNT における破壊靱性のばらつきは室温のそれより大きい。しかし、最近得られた Y 系バルクの曲げ試験の結果では、LNT における破壊靱性(1.6 MPa√m)の方が、RT のそれ(1.5 MPa√m)よりわずかに高いことが示されている。

#### 硬さおよび圧子押し込み破壊靱性

図 5, 6 より温度低下に伴い硬さは上昇し、破壊靱性は同じか、わずかに低下する。

### 3.7 接合体の引張り強度

図 13 に接合体の強度を示す。2 枚の YBCO バルクの(110)面を ErBCO 焼結体を溶剤として熱処理による ErBCO 中の結晶成長によって接着した接着部の強度 27 MPa は ErBCO の強度の 79%であり、Y バルクのそれ 41 MPa の 66%の強度を維持しており比較的良好である。

10 wt%の酸化銀を添加した YBCO バルク超電導体(YBCO/Ag)の引張り強さは 52 MPa であった。被接合体に YBCO バルク超電導体、接合材料にはボールミル粉碎した 211 粒子を含む銀添加 Y 焼結体を用いた Y-Y/Ag 接合体の引張り強さの平均値は 27 MPa であった。接合材の引張り強さより高くならなかったが、この値は、ErBCO の焼結体を用いて接合した 20 mm のものと同様、30 mm のものの 2 倍の値であった。破断後のサンプルの組織観察をしたところ、接



合部の界面付近で破壊していた。また、a-c 面には液相が固化したと考えられる領域が確認され、これの発生を抑制すれば接合体の機械的特性が改善されると考えられる。

### 3.8 弾性率および強度のバルク内位置依存性と欠陥の分布

バルクの表面から 12 mm 程度の底付近から切り出した試料の a/b 軸方向の応力-ひずみ曲線は非線形挙動を示し、ヤング率は低い。この領域にはかなり大きな潜在き裂が見られることが多く、これによると考えられる。バルクの中心から半径方向に離れた位置でのヤング率は高い。一方、ヤング率とは対照的に、強度はバルクの中心から半径方向に離れた位置で低い。これらは、外周部では第 2 相粒子の密度が中心部に比べて高いためと考えられる。

### 3.9 フラクトグラフィ

低い強度を示した試験片の巨視的な破断面の凹凸は、高い強度を示したもののそれよりも大きい。破断面の凹凸は複数の先在き裂やサブグレイン境界などにより誘起されるものと考えられる。

き裂の進展に伴い形成される破断面の微視的流れ状の模様をたどることにより、近接する複数の空洞の間やサブグレインと考えられる長方形のファセットからき裂が発生した形跡が観察された。き裂の起点であるファセットには、き裂のフロントを示す弓状の模様が第 2 相粒子により阻止されている形跡が

観察され、第 2 相粒子が初期のき裂進展を抑制する証拠が得られた。破断面には第 2 相粒子のはく離によるくぼみが多数見られ、はく離が容易なことが示された。20 μm 以下の空洞は銀で完全に満たされており、破断に伴い銀が変形した形跡が見られたが、大きいものは完全には満たされていなかった。銀の添加に伴う機械的特性の向上は、主として小さい空洞を満たした銀のブリッジング効果によると考えられる。バルクの底付近から切り出した試験片の破断面には、き裂の起点としての第 2 相粒子の偏在が観察された。

### 3.10 データベース

以上の成果を機械特性データベースとしてまとめ、2004 年 8 月から Web 上での公開を始めた <http://paris.mech.iwate-u.ac.jp/sc-bulk/database.html>。これまでに述べてきたようにこのデータベースの特徴はデータに関する解説 (comments) にある。末尾に実際のデータベース Top page およびさらにそこからその詳細にいたる例をしめした。

### 3.11 今後の展開

バルクの機械的性質測定のためのノウハウと評価方法を標準化試験法案としてまとめるとともに、構築した機械特性に及ぼす影響因子とその学問的な裏づけなどの解説も含め、バルク応用のニーズに合わせた提案型のデータベースを継続的に拡充する。とくにバルク応用に必要なバルクと他の材料との接合強度などの複合特性のデータを蓄積するとともに、その有限要素法による応力解析を行う。また、バルクの機械特性と熱物性や電磁特性など他の特性との相関についても明らかにする。さらに、いわてネットワークサービス(INS)の活動の一環として定期的な研究・情報交換会をとおして地域 COE を構築する。

## 4. まとめ

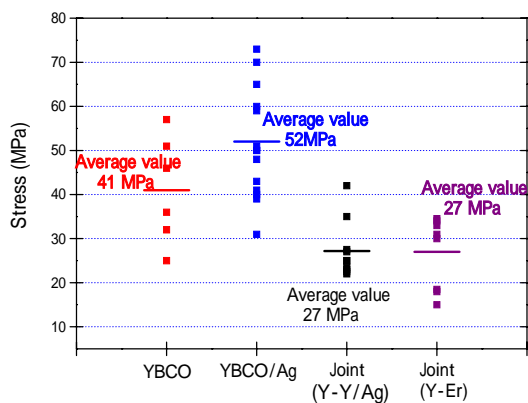


図 13 接合体の引張り強度



本研究により以下の成果が得られた。

1. 引張り試験を始めとする機械的性質を示す各種パラメータを評価する方法を確立して、1元系および多元系の各種希土類バルクの機械的特性について、室温および 77K における特性評価を行った。弾性係数、強度、破壊靱性などの場所依存性、温度依存性、製造プロセスにおける酸素分圧依存性などを明らかにするとともにポイドや添加銀粒子、211 相粒子の影響、破壊面の特徴と破壊起点の同定など破壊機構についての検討を行った。
2. GM 冷凍機伝導冷却型極低温硬さ計を開発し、硬さおよび破壊靱性の荷重依存性、結晶方位依存性、バルク中の硬さ分布、温度依存性を明らかにした。
3. 上記に基づき、ヤング率と引張り強さなどのパラメータ間、あるいは異なる評価法で得られる評価値間の相関などについて明らかにし、提案型データベースを構築した。

成果展開可能なシーズ、用途等は以下の通りである。

1. 各種機械的特性評価の装置、評価法に関するノウハウ。
2. 評価結果に基づき、各種評価法、パラメータの影響とその発現機構を検討した、応用に適した提案型のデータベース。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ISTEC-SRL 村上雅人 第3研究部長(現芝浦工大教授)、新日鐵先端研究所 手嶋英一主任研究員をはじめとする皆様には共同研究を通して大変お世話になった。岩手大学工学部、正路良孝技術専門官、岩手大学大学院工学研究科博士後期課程村上明君(現弘前大学助手)をはじめ工学部機械工学科大学院・学部学生諸君には実験の遂行に協力をいただいた。記して謝意を表する。

### データベースのURL

[YBaCuO](#)  
Tensile test  
Bending test  
Fracture toughness (tensile)  
Fracture toughness (bending)  
Hardness test

[GdBaCuO](#)  
Tensile test  
Bending test

[SmBaCuO](#)  
Tensile test  
Bending test  
Compression test  
Fracture toughness (tensile)  
Fracture toughness (bending)  
Hardness test

[\(NEQ\)BaCuO](#)  
Tensile test  
Hardness test

[YBaCuO/ErBaCuO Joint](#)  
[YBaCuO/YBaCuO<sub>2</sub> Joint](#)  
Tensile test

[Comments](#)  
[References](#)

Index

- ◆ Bulk complex
- ◆ Specimens and test conditions
- Tensile test
- Bending and bending fatigue tests
- Compression test
- Fracture toughness test
- SEM
- Tensile test
- Vickers indentation
- ◆ Anisotropy of mechanical properties (MRI)
- Tensile mechanical properties
- Stress-strain curve
- Stress-transverse strain curve
- Young's modulus
- Elastic's ratio
- Tensile strength
- Bending mechanical properties
- Stress-strain curve
- Young's modulus
- Bending strength
- Compressive mechanical properties
- Stress-strain curve
- Stress-transverse strain curve

Stress-strain curves in the c-axis and the direction perpendicular to the c-axis

While the stress-strain curves in the direction perpendicular to the c-axis are almost linear, those in the c-axis are nonlinear. This nonlinear behavior is easily ascribed to the anisotropic nature of the c-axis.

Reference:  
The mechanical properties of GdO<sub>2</sub> and cerium-doped GdO<sub>2</sub> thin films. J. Appl. Phys. 81, 10 (1997) 5100-5102.

Stress-strain curves in the a-b-axis and the direction perpendicular to the a-b-axis



## 業績 (前編以降)

### 論文

- 1) Effects of Ag content on the mechanical properties of (Nd,Eu,Gd)-Ba-Cu-O bulk superconductors, K. Katagiri, A. Murakami, R. Kan, K. Kasaba, K. Noto, M. Muralidhar, N. Sakai, and M. Murakami, Physica C, 392-396 Part 1, 2003, 526-530
- 2) Fracture toughness evaluation of YBCO bulk superconductor, T. Okudera, A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, N. Sakai, and M. Murakami, Physica C, 392-396 Part 1, 2003, 628-633
- 3) Mechanical properties of Sm-Ba-Cu-O bulk superconductors at room temperature A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, N. Sakai, and M. Murakami, Physica C, 392-396 Part 1, 2003, 557-561
- 4) Mechanical properties of Y-Ba-Cu-O blocks welded by Er-Ba-Cu-O solder, T. Kaneko, K. Iida, J. Yoshioka, N. Sakai, M. Murakami, A. Murakami and K. Katagiri, Physica C, 392-396 Part 1, 2003, 673-676
- 5) Fracture toughness of SmBaCuO bulk superconductors at cryogenic temperatures, Y. Yoshino, A. Iwabuchi, N. Takahashi, K. Katagiri, K. Noto, N. Sakai and M. Murakami, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2 in press.
- 6) Fracture toughness of Sm123 bulk superconductors evaluated by tensile and bending tests K. Katagiri, A. Murakami, T. Okudera, Y. Yoshino, A. Iwabuchi, K. Noto, N. Sakai and M. Murakami, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2 2004 in press.
- 7) Mechanical properties of Gd123 bulk superconductor at liquid nitrogen temperature A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, H. Teshima, M. Sawamura, M. Murakami, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2 2004 in press.
- 8) Deformation and fracture behavior of Sm123 bulk superconductors by compressive loading at room temperature, R. Kan, K. Katagiri, A. Murakami, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, N. Sakai, and M. Murakami, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2 2004 in press.
- 9) Low temperature mechanical properties of Y123 bulk superconductor fabricated by the modified QMG process, A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, K. Noto, H. Teshima, M. Sawamura, N. Sakai, M. Murakami, Physica C, 2004 in press
- 10) Mechanical properties of Y-Ba-Cu-O blocks welded by silver added Y-Ba-Cu-O solder, T. Kaneko, K. Iida, T. Kono, N. Sakai, M. Murakami, N. Koshizuka, K. Katagiri, Physica C, 2004 in press
- 11) Superconducting properties of silver added Er-Ba-Cu-O bulk superconductors, K. Iida, T. Kaneko, K. Katagiri, N. Sakai, M. Murakami, N. Koshizuka, Physica C, 2004 in press
- 12) Tensile and bending mechanical properties of bulk superconductors at room temperature, K. Katagiri, A. Murakami, Y. Shoji, H. Teshima, M. Sawamura, A. Iwamoto T. Mito, and M. Murakami, Physica C, 2004 in press

### 【口頭発表】国内

- 1) YおよびSm123バルク超電導体の破壊靱性評価、片桐一宗、村上明、奥寺太一、吉野泰弘、岩淵明、能登宏七、村上雅人、第67回2003年度春



- 季低温工学・超電導学会、産業技術総合研究所 つくばセンター、2003年5月21日
- 2) 室温圧縮負荷による Sm123 バルク超電導体の変形・破壊挙動、片桐一宗、菅隆司、村上明、笠場孝一、正路良孝、能登宏七、村上雅人、第 67 回 2003 年度春季低温工学・超電導学会、産総研 つくばセンター、2003 年 5 月 22 日
- 3) Gd123 バルク超電導体の液体窒素温度における機械的特性  
村上明、片桐一宗、笠場孝一、正路良孝、能登宏七、手嶋英一、澤村充、村上雅人  
2003 年度春季低温工学・超電導学会、産業技術総合研究所 つくばセンター、2003 年 5 月 21 日
- 4) 希土類系バルク超電導体の低温引張り試験方法の検討、片桐一宗、佐藤元、笠場孝一、村上明、村上雅人、坂井直道、手嶋英一、沢村充、第 70 回 2004 年度春季低温工学・超電導学会、横浜国立大学、2004 年 5 月 24 日
- 5) Sm123 バルク超電導体の圧縮特性に及ぼす試験温度の影響、菅隆司、村上明、宮田寛、片桐一宗、正路良孝、能登宏七、岩本晃史、第 70 回 2004 年度春季低温工学・超電導学会、横浜国立大学、2004 年 5 月 24 日
- 6) 液体窒素温度における Y123 バルク超電導体の破壊靱性、佐藤司、片桐一宗、笠場孝一、正路良孝、村上明、能登宏七、手嶋英一、第 70 回 2004 年度春季低温工学・超電導学会、横浜国立大学、2004 年 5 月 24 日
- 【口頭発表】国際
- 1) Advanced Applications of Magnetic Fields in Japan  
K. Noto, K. Shimizu, M. Yoshizawa, K. Katagiri, H. Fujishiro, T. Oka, K. Yokoyama, The 18<sup>th</sup> International Conference on Magnet Technology (MT-18) [ PC], Morioka, 2003.10.23
- 2) Fracture toughness of SmBaCuO bulk superconductors at cryogenic temperatures,  
Y. Yoshino, A. Iwabuchi, N. Takahashi, K. Katagiri, K. Noto, N. Sakai and M. Murakami, The 18th International Conference on Magnet Technology, 2003.10.23, 2003, 4D-p76
- 3) Fracture toughness of Sm123 bulk superconductors evaluated by tensile and bending tests K. Katagiri, A. Murakami, T. Okudera, Y. Yoshino, A. Iwabuchi, K. Noto, N. Sakai and M. Murakami, The 18th International Conference on Magnet Technology (MT-18) [2C-a01], Morioka, 2003.10.21
- 4) Mechanical properties of Gd123 bulk superconductor at liquid nitrogen temperature A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, H. Teshima, M. Sawamura, M. Murakami, The 18th International Conference on Magnet Technology (MT-18) [2C-a02], Morioka, 2003.10.21
- 5) Deformation and fracture behavior of Sm123 bulk superconductors by compressive loading at room temperature, R. Kan, K. Katagiri, A. Murakami, K. Kasaba, Y. Shoji, K. Noto, N. Sakai, and M. Murakami, The 18th International Conference on Magnet Technology (MT-18) [4D-P75], Morioka, 2003.10.23
- 6) Low temperature mechanical properties of Y123 bulk superconductor fabricated by the modified QMG process, A. Murakami, K. Katagiri, K. Kasaba, K. Noto, H. Teshima, M. Sawamura, N. Sakai, M. Murakami, 16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003) [BSP-22], 2003.10.28, Tsukuba
- 7) Mechanical properties of Y-Ba-Cu-O blocks welded by silver added Y-Ba-Cu-O solder, T. Kaneko, K. Iida, T. Kono, N. Sakai, M. Murakami, N. Koshizuka, K. Katagiri, 16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003) [BSP-23], 2003.10.28, Tsukuba
- 8) Superconducting properties of silver added Er-Ba-Cu-O bulk superconductors, K. Iida, T. Kaneko,



K. Katagiri, N. Sakai, M. Murakami, N. Koshizuka,  
16th International Symposium on Superconductivity  
(ISS2003) [BSP-7], 2003.10.28, Tsukuba

- 9) Tensile and bending mechanical properties of bulk  
superconductors at room temperature, K. Katagiri, A.  
Murakami, Y. Shoji, H. Teshima, M. Sawamura, A.  
Iwamoto T. Mito, and M. Murakami, 16th International  
Symposium on Superconductivity (ISS2003) [BS-8],  
2003.10.28, Tsukuba