



低温工学協会
九州・西日本支部
Cryogenic Association of Japan

研究活動紹介

九州工業大学
小田部荘司、木内勝、松下照男

2011年4月23日
低温工学協会 九州・西日本支部設立10周年記念研究会
九州大学伊都キャンパス

研究内容

- ・ 配向Ni基板PLD法GdBCO (木内、松下)
- ・ TFA-MOD法YGdBCO (木内、松下)
- ・ PLD法GdBCO (木内、松下)
- ・ CVD法YGdBCO (木内、松下)
- ・ GdBCOの磁化損失(小田部、松下)
- ・ MgB₂の超伝導特性(木内)



研究内容

- 鉄系超伝導体の臨界電流密度評価(小田部)
- GPGPUによる数値計算(小田部)
- 遺伝的アルゴリズムを用いた計算(小田部)
- 高磁場で発酵させた日本酒(小田部)



配向Niクラッド基板を用いたPLD法GdBCO線材の臨界電流密度の印加磁界依存性

松下研究室
和田 純

中間層への特殊な処理がない

低コスト

結果及び解析

配向Niクラッド基板

ケーブル等への利用

超伝導層の厚さが異なる2つのコート線材の低磁界領域および印加磁界角度の臨界電流密度特性について調べる

試料及び実験

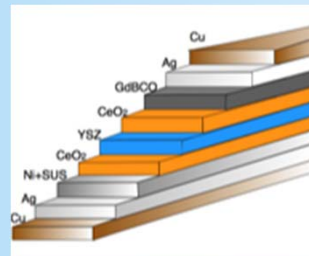
PLD法GdBCO線材(住友電気工業)

超伝導層の厚さ d [μm]	臨界温度 T_c [K]
-------------------------------	----------------

1.6	91.2
-----	------

2.1	93.4
-----	------

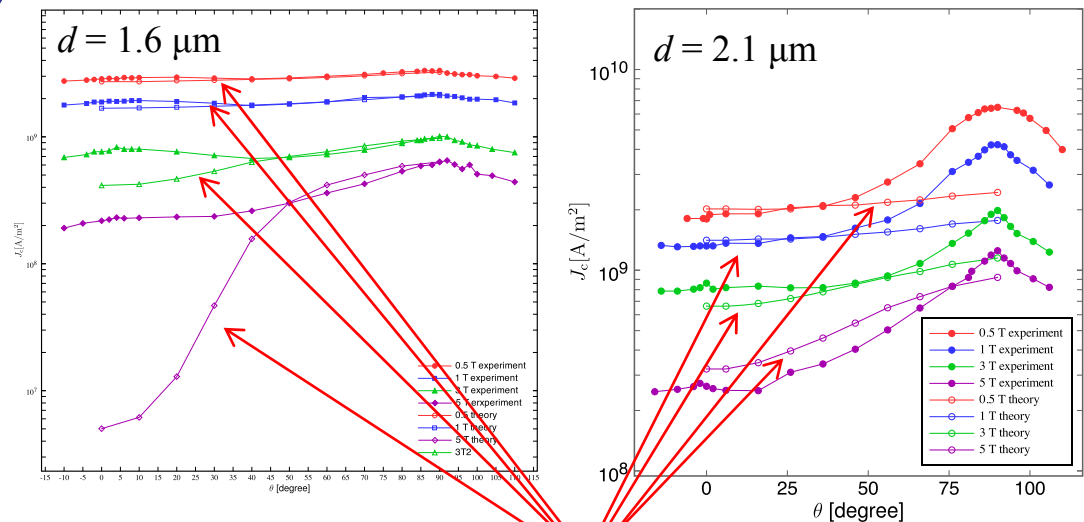
試料はマイクロブリッジ上に加工



→ 直流四端子法により $V-I$ 特製を測定

$\theta = 0^\circ$ ($B//c$), $\theta = 90^\circ$ ($B//ab$ 面)

・超伝導体の厚さにより J_c - θ 特性が異なる
→ 成膜時に積層欠陥の導入



磁束クリープ・フローモデルによる解析

・低磁界領域ではよく一致
・5.0 Tでは良い一致が得られていない
→ 高磁界領域では g^2 の影響を考慮する必要性



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

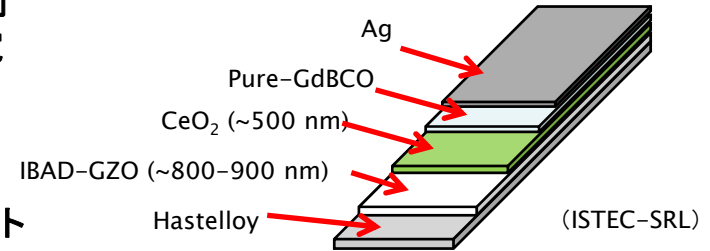
PLD法により作製されたGdBCOコート線材の臨界電流密度特性の印加磁界角度依存性

木内研究室
桑原政成

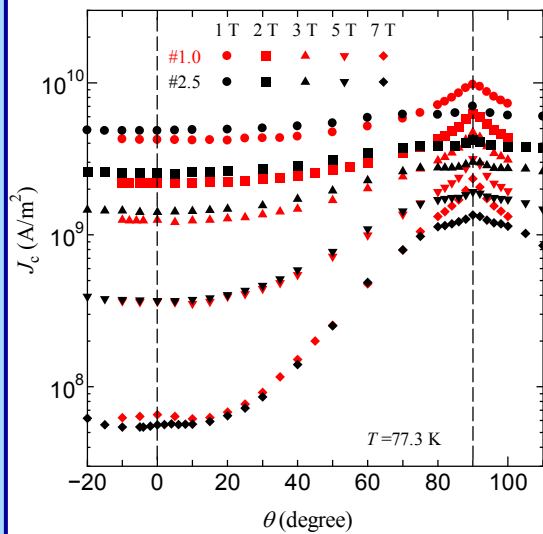
コート線材を用いて超伝導コイルを作製すると、線材には様々な方向からの磁界印加が加わる。したがって、様々な磁界方向下での臨界電流特性の評価が重要になる。



PLD法により作製された超伝導層の厚さが異なる2つのGdBCOコート線材の電流-電圧特性を測定し、臨界電流密度 J_c 特性の印加磁界角度依存性について調べた。

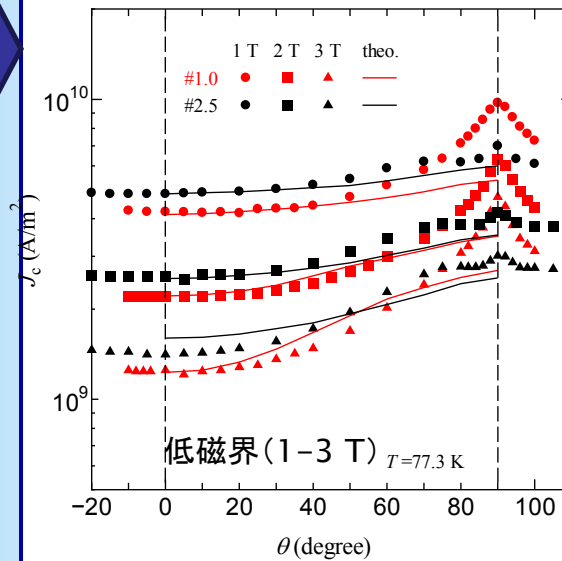


実験結果 (1.0 μm 、2.5 μm)

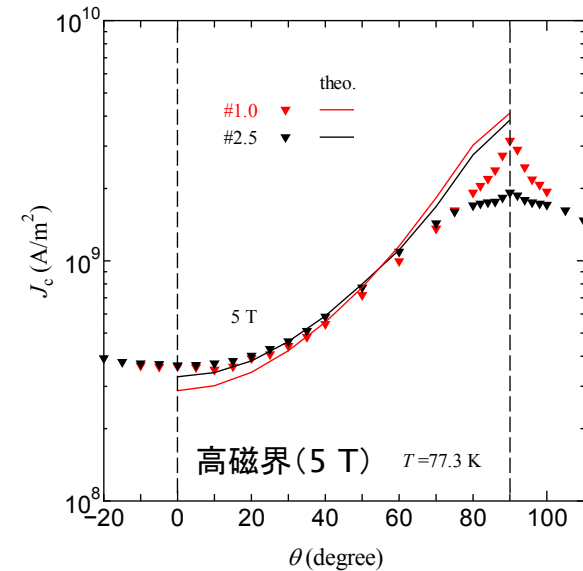


厚い試料の方が異方性が小さい

解析結果



低磁界領域は超伝導層の厚さ依存性で説明できる



厚さ依存性 + ピンカの最頻値 A_m の異方性が寄与

人工ピンを導入したTFA-MOD法YGdBCO線材の臨界電流密度の印加磁界角度依性

小田部研究室
永水 隼人

- 低磁界下では人工ピンの導入で異方性が改善することが分かっている
- 人工ピンを導入した線材の、高磁界下での特性評価が必要



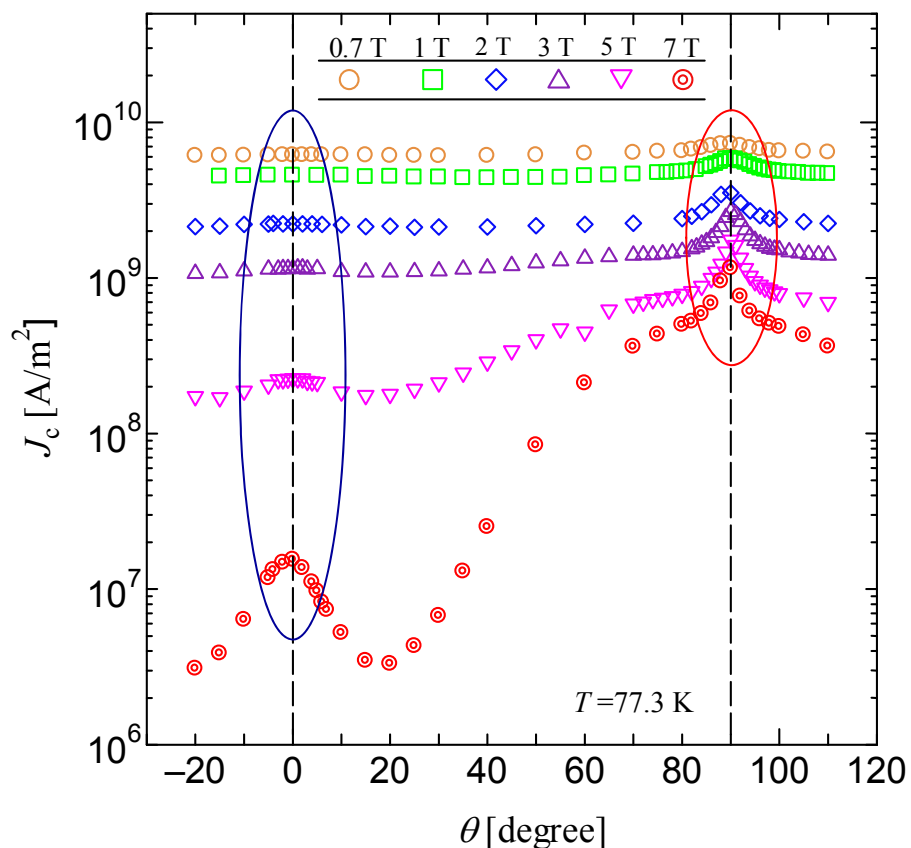
人工ピンとしてBZOナノ粒子が導入されたTFA-MOD法YGdBCO線材の J_c - θ 特性を測定

実験試料諸元

ISTEC-SRL提供

Process	Thickness d [μm]	T_c [K]
YGdBCO+BZO(1wt%)	0.76	89.5

➔ 直流四端子法により V - I 特製を測定



J_c の異方性 (1 T)

$$J_c(90^\circ)/J_c(0^\circ) = 1.27$$

➔ 異方性は小さい

YGdBCO pure
(1 T, $d = 0.65 \mu\text{m}$)
 $J_c(90^\circ)/J_c(0^\circ) = 6.48$

高磁界では $\theta = 0^\circ$ 、 90° に大きなピーク

➔ 高磁界で強力に作用するピン

$\theta = 90^\circ$:: 積層欠陥

$\theta = 0^\circ$: c 軸相関ピン



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

TFA-MOD法によるYGdBCO線材の緩和特性に対する超伝導層厚の影響

松下研究室
新 健一

背景

超伝導体YGdBCO (YGdBaCuO) コート線材は高温、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから応用機器への利用が有望視されている。

目的

本研究ではBZO(BaZrO₃)ナノ粒子を導入したTFA-MOD法により作製されたYGdBCO線材の超伝導層厚が超伝導特性、特に磁化緩和特性に与える影響について調べる

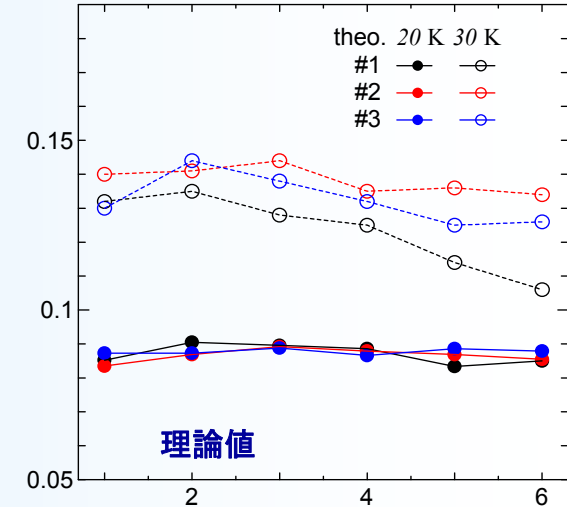
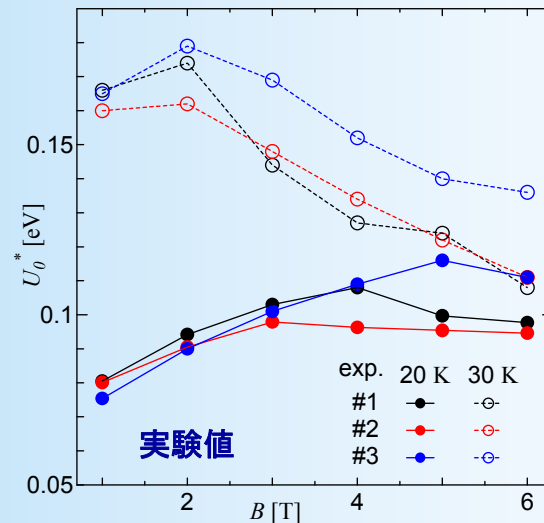
実験

試料(超電導工学研究所より提供)

試料	d (μm)	T_c (K)
#1	0.76	89.5
#2	1.26	90.2
#3	1.90	90.0

SQUID磁力計による測定
 直流磁化測定(20 - 77.3 K 0 - 7 T)
 - J_c - B 特性
 磁化緩和測定(20 K, 30 K 1 - 6 T)
 -磁化緩和特性

結果



まとめ

20 Kの U_0^* の磁界依存性

低磁界領域で薄い試料のほうが有利

高磁界領域では厚い試料のほうが有利

30 Kの U_0^* の磁界依存性

低磁界領域から厚い試料の U_0^* が大きい

高磁界領域になると U_0^* が減少する

中温・高磁界領域では超伝導層の厚い試料が有利



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

CVD法で作製されたYGdBCO線材の緩和特性に及ぼす超伝導層の影響

松下研究室
馬場竜太郎

- YGdBCO線材は高磁界での臨界電流特性に優れている
 - 応用例:SMES(Superconducting Magnetic Energy Strage)
 - ・ 超伝導を応用した電力貯蔵システム。
 - ・ 20 Kにおいて10 T程度の高磁界での利用が計画されている。

- CVD法によって作製されたYGdBCO線材の緩和特性に関して調査を行った
 - CVD(Chemica Vapor Deposition)法: 化学反応を応用した蒸着方法。生産コストに優れる作製法として注目される。
 - 緩和特性: 磁化が対数的な時間に対して減少すること。緩和特性が良いほどSMES等への応用に適している。
- 調査方法
 - SQUIDによる測定。および、その結果に対する磁束クリープフローモデルによる解析。

調査結果

試料諸元(提供:中部電力)

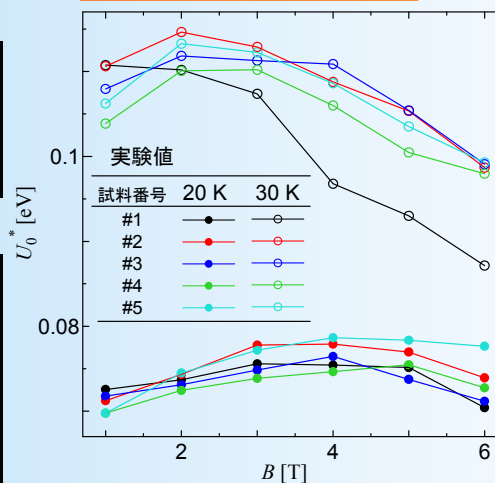
試料番号	#1	#2	#3	#4	#5
超伝導層厚 $d[\mu\text{m}]$	0.45	0.75	1.05	1.35	1.65
臨界温度 T_c [K]	90.8	90.5	90.2	91.1	90.3

解析より得られたフィッティングパラメータ

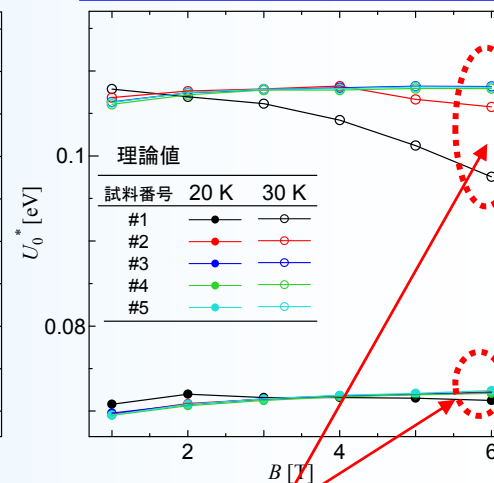
試料番号	ピン力の最頻値 A_m	ピン力の分布 σ^2	温度依存性 m	磁界依存性 γ
#1	4.45×10^{11}	7.30×10^{-3}	2.55	0.625
#2	5.32×10^{11}	7.41×10^{-3}	2.45	0.641
#3	4.40×10^{11}	7.33×10^{-3}	2.45	0.641
#4	4.10×10^{11}	7.30×10^{-3}	2.45	0.641
#5	3.88×10^{11}	7.19×10^{-3}	2.38	0.643

ピン力の最頻値: A_m
→ 薄い試料 > 厚い試料

実験結果から得られた緩和特性



解析結果から算出した緩和特性の理論値



高磁界での U_0^* (理論値)
→ 薄い試料 < 厚い試料

ピン力は臨界電流密度と関係性があることから、高磁界における緩和特性改善には、臨界電流密度よりも超伝導層厚の影響が大きい

SMESのように緩和特性が重要なパラメータとなる応用では超伝導層が厚い試料ほど有利



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

特性の異なるGdBCOコート線材を積層させたときの磁化損失の評価

小田部研究室
河野智也

背景

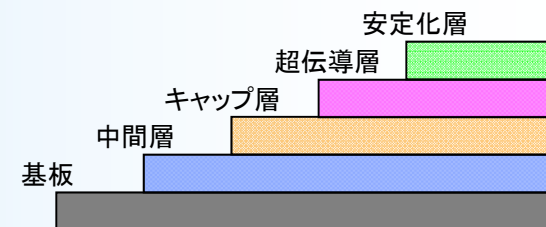
交流電力機器に積層コート線材を応用する場合、交流損失を正確に把握する必要がある。

積層・・・十分な電流容量を確保するため、線材を重ねる。

コート線材・・・GdBCO等のY系超伝導体は、結晶配向を実現するため層状に成膜される。

交流損失・・・磁化損失と通電損失の和

磁化曲線の面積から求められる。



コート線材の構成

目的

J_c が同じ試料を積層させると、積層枚数が増えるにつれ磁化損失が低減することが分かっている。



J_c は線材を切り出す場所によって変わる。積層順序は変わることがありうる。

特性の異なるGdBCOコート線材において、積層順序が磁化損失に及ぼす影響を調べる。

実験

磁気モーメント m を測定。直流磁化 M を求め、磁化曲線の面積から損失 W を評価。

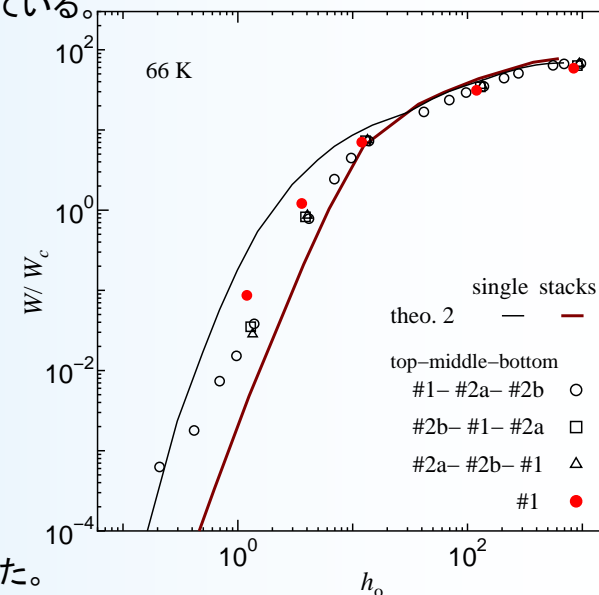
$$M = \frac{m}{V} = \frac{m}{n_t w l d} \quad W = \oint M dB$$

結果

- 積層順序の違いが交流損失密度に与える影響は、ほとんど無い。
- 特性が同じ試料を積層させたときと同じように、低磁界領域においては損失が低減された。

課題

有限要素法による数値解析の計算結果と比較した詳しい考察が必要。



規格化した損失 W と理論式の比較



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

金属超伝導体MgB₂のMgとBの比率の違いによる超伝導特性の評価

松下研究室
城戸 要

背景

MgB₂の実用化に向けては、より良いJ_c特性が必要となってくる。そのために現在、様々な作製工程が試みられている。

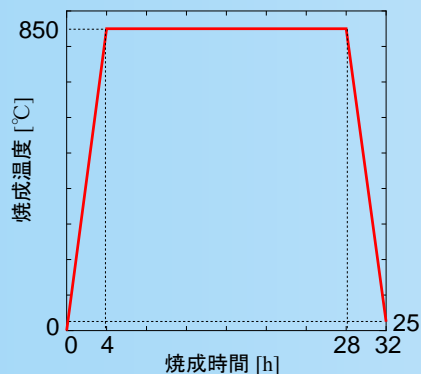
目的

本研究はMg:Bの比率の異なるMgB₂バルク試料を作製し、比率の違いによるJ_cへの影響について調べた。

実験

実験試料

- B粉末の量を固定し、Mg粉末の量を変えて、6種類の比率の違いによるMgB₂バルク試料を作製した。
- *in-situ* powder-in-closed-tube 拡散法を用いた。
- 焼成設定



- 焼成中の気圧 1.0 × 10⁻⁶ Torr (≒ 1.33 × 10⁻⁴ Pa)

試料諸元

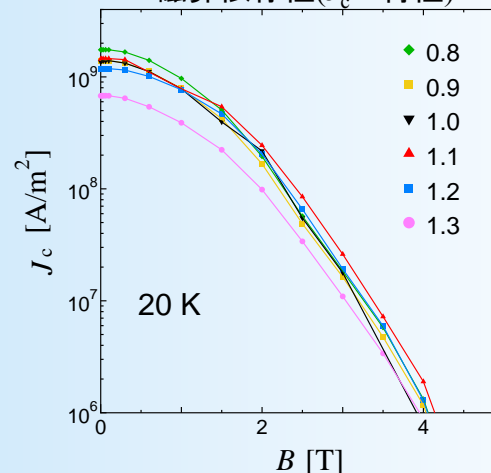
試料	x (Mg _x B ₂)
#1	0.8
#2	0.9
#3	1.0
#4	1.1
#5	1.2
#6	1.3

測定方法

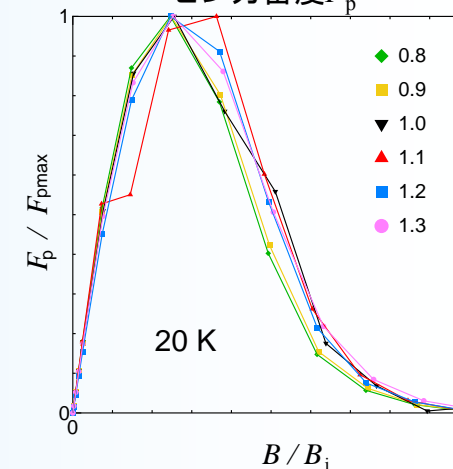
- SQUID磁力計(直流磁化法)
- 0 - 7 T までの磁気モーメントから
- J_cを算出する。
- 設定温度 20 K
- 不可逆磁界B_i: J_c = 1.0 × 10⁶ A/m²となる磁界

結果

磁界依存性(J_c-B特性)



ピン力密度F_p



- Mg比の低い試料は低磁界で高いJ_cを出した。
- Mg比の低い試料は高磁界でのJ_c低下が抑えられた。
- 高磁界ではMgの比率の高い試料の規格化F_pが比較的高い

考察

1. Mgの比率が低い試料

- 不純物MgOの生成される確率が低くなる
- MgB₂の充填率が高くなる

- 低磁界において高いJ_cを得た。

2. Mgの比率が高い試料

- Mgの比率が高いと、その分 MgOの生成される確率が高くなる。
- 充填率が低くなる。
- Mgを多く入れることで、ピンとなる物質が比較的多く生成されたと考えられる。

- 低磁界では、低いJ_cを出した。
- 高磁界ではピンが多く生成されたことにより、J_cの低下が抑えられた。



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

鉄系多結晶超伝導体の臨界電流密度評価に与える粒径分布の影響

松下研究室
眞弓哲青

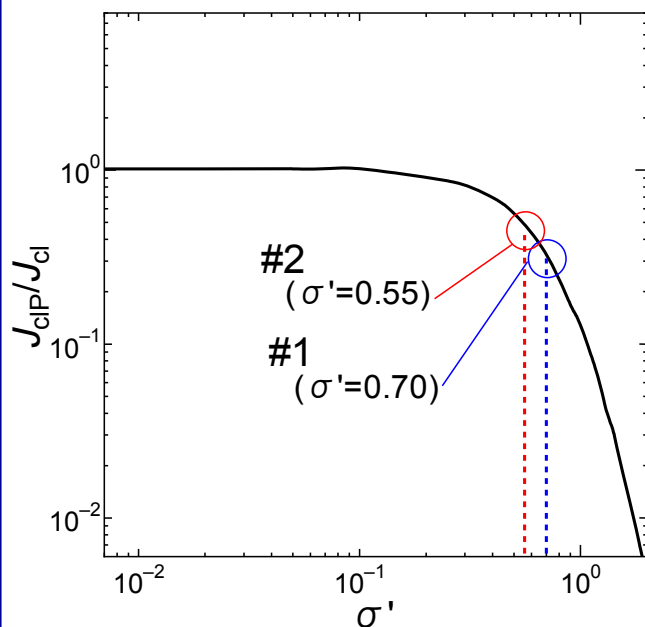
多結晶超電導体における粒内の臨界電流密度 J_{cl} に対する従来の評価法は粒径の分布を考慮していなかったため評価が正確ではない可能性があった。

→ 粒径の分布が J_{cl} の評価に与える影響を定量的に調査し、粒径の分布を考慮した粒内の臨界電流密度 J_{clP} を導出する。

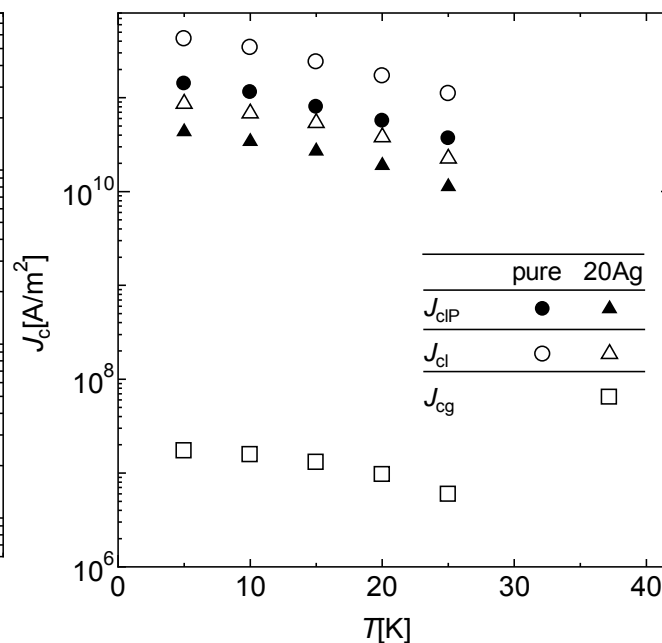


$Sr_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$ 超伝導体に銀を20 wt% 添加した試料(#1)と無添加の試料(#2)の残留磁化測定の結果を用いた。粒径の分布は対数正規分布に従うと仮定し、残留磁気モーメントより J_{clP} を導出。

※ σ' は対数正規分布における標準偏差



σ' に対する J_{clP}/J_{cl} の変化



導いた J_{clP} の温度変化

- ・ 銀の添加により σ' が減少した
- ・ 粒径の分布が広がる程、 J_{cl} が過大評価される
- ・ 試料の J_{cl} は過大評価されていた
- ・ $\sigma' = 0.10$ 以上の試料は粒径の分布を考慮した補正を行う必要がある



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

CUDAによる高速な磁束クリープ・フローモデルの数値計算と性能評価

松下研究室
石橋 知裕

背景

磁束クリープ・フローモデルを用いて超伝導体のピンニング特性を解析可能。

↓
ピンニングパラメータの探索は困難。

遺伝的アルゴリズムでパラメータの自動探索が可能となった。

↓
計算時間がかかり実用性が低い。

GPGPUは、GPUのマルチコアで汎用演算を並列演算することで、安価に小規模HPCを構成することが可能。

本研究では、GPGPUで磁束クリープ・フローモデルの計算を並列化し、高速な数値計算の実現を目的とする。

解析1

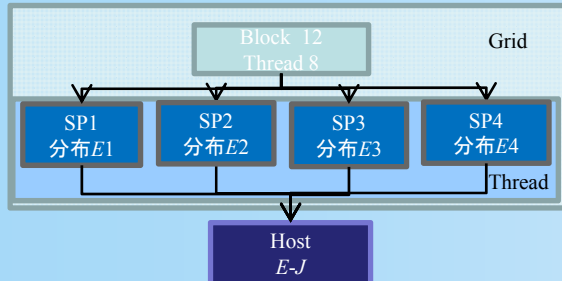
2種類の並列化で磁束クリープ・フローモデルの最適な並列計算法を求めた。

手法A (Simpson)

Simpson法で分割する計算をThread毎に計算。

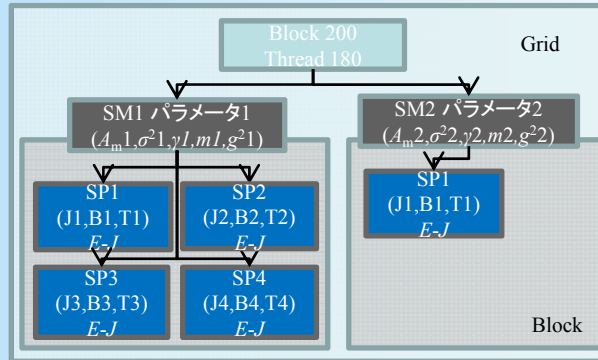
$$\int_a^b f(x) dx \simeq \frac{h}{3} \exp[f(x_0) + 2 \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} f(x_{2n}) + 4 \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} f(x_{2n-1}) + f(x_N)]$$

N: Simpsonの分割数



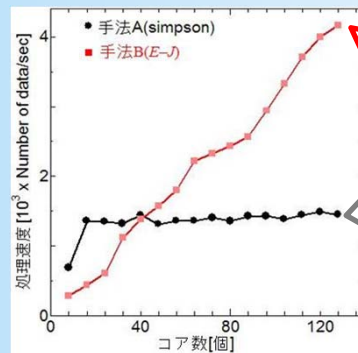
手法B(E-J)

1Threadで1回のE-J特性を求めた。



解析1-結果

プログラムの内容
Simpsonの分割数 90
E-Jを求める回数 10,000



・コア数に比例して処理速度も向上している。
・実行までの準備時間が短い。
・一度の実行で1つのE-J特性しか求められない。

・8個から16個へコアを増やした時にしか処理速度が向上していない。
・準備時間が長い。
・多数のE-J特性をまとめて計算できる。

解析2

解析1で求めた並列計算方法でGAによるピンニングパラメータの探索プログラムに組み込み高速化を行う。

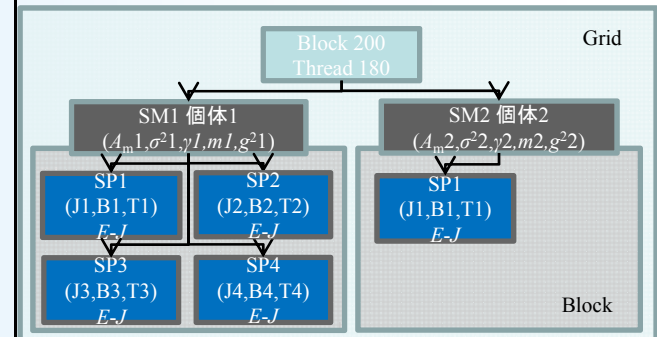
並列化

- 1Threadで1つのE-J特性を計算。
- 1Blockが1個体のピンニングパラメータを計算。
- 1Gridで島×個体のBlockを計算。
- GPUで1世代のE-J特性、島×個体×データ数を計算させる。

解析2-結果

プログラムの内容

- ・試行回数 50
- ・世代数 100
- ・島 10
- ・個体数 20
- ・データ数 180 (20×25×30K, 1-6T, 各10個)
- ・Simpsonの分割数 90
- ・GPUの計算内容
- 島×個体×データ数=36,000個のE-J特性を計算。



CPU(1コア)	GPU
720[min]	25[min]

まとめ

・GPGPUで高速なGAによる磁束クリープ・フローモデルのパラメータの探索プログラムを実装し、計算速度を30倍にできた。

今後の課題

・精度向上と共に、角度依存性や他のパラメータを考慮した探索アルゴリズムを作成し、手計算では難しい問題への解決策としての発展。



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

遺伝的アルゴリズムを用いた磁束クリープ・フローモデルのパラメータ解析における評価方法の検討

小田部研究室
瓜生幸太郎

磁束クリープ・フローモデルを用いて超伝導体の解析が可能

しかしパラメータの設定が必要不可欠であり時間がかかる

遺伝的アルゴリズムを用いてパラメータ探索の自動化が可能となった

本研究では評価関数に着目し、評価関数を変更することにより解精度や収束度の向上や、探索時間の短縮を検討することを目的とする

- 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)
 - 生物の進化の過程を模倣した近似最適化アルゴリズム
 - 変数を遺伝子、変数の集合を個体とみなす
 - 適用できる問題が多い

遺伝的アルゴリズムの大まかな流れ

ランダムに初期個体集団を作成

任意の評価関数を用いて個体の適応度を計算

集団に対し選択を適用

集団内のペアに対し交叉を適用

集団内の個体に対し突然変異を適用

遺伝的操作

1世代

規定回数繰り返す

評価関数が変わる

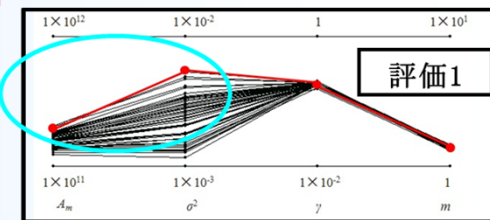
各個体の適応度が変わる

選別される個体が変わる

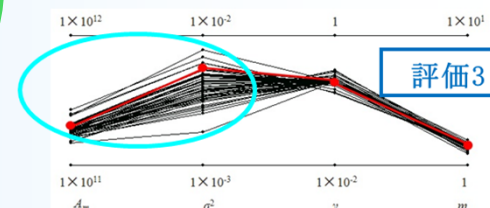
評価関数の設定が解探索を大きく左右する！！

1解析にかかる実行時間[sec]

評価1	900
評価2	190
評価3	910
評価4	310



前年度の評価



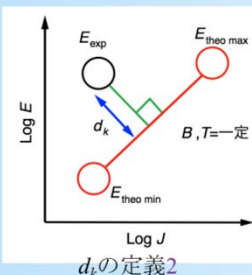
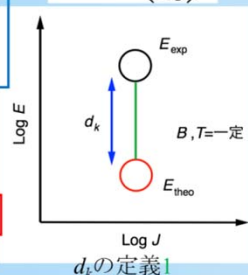
- 評価1(前年度の評価)
 - (1)式を用い、 d_k の定義は1
- 評価2
 - (1)式を用い、 d_k の定義は2
- 評価3
 - (2)式を用い、 d_k の定義は1
- 評価4
 - (2)式を用い、 d_k の定義は2

$$F = 1 / \left(\sum_{k=1}^N d_k^2 \right) \quad \dots (1)$$

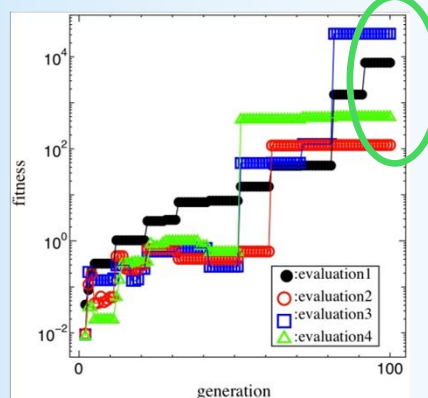
$$F = 1 / \left(\sum_{k=1}^N d_k^2 \sum_{l=1}^M \frac{|n_{expl} - n_{theol}|}{n_{expl}} \right) \quad \dots (2)$$

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n$$

E_c : 電界基準
 J_c : 臨界電流密度



以上4つの評価を比較する



各評価での適合度の推移

評価関数を変更することにより
遺伝的アルゴリズムを用いた磁束クリープ・フローモデルのパラメータ探索の解精度、
パラメータの収束度の向上、及び解探索にかかる時間の短縮が可能となった

A_m 、 σ^2 が最適解付近に収束する傾向が出た



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan

高磁場で発酵させた日本酒醪に関する研究

小田部研究室
倉富 慎也

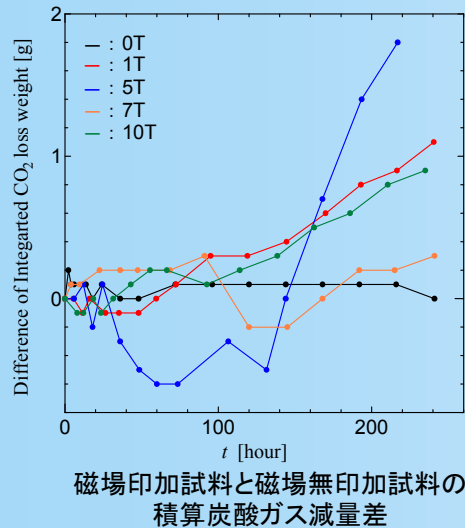
背景

- 日本酒醸造過程で用いる**日本酒醪**は、微生物である「**麹菌**」と「**酵母**」が重要な要素。
- 微生物は高磁場下において様々な影響を受けるとされている。

目的

一定温度の環境下で磁場を印加することで、日本酒醪が磁場から受ける影響について研究する。

酵母と乾燥麹を用いて日本酒醪を再現し、
積算炭酸ガス減量測定と化学定量分析を行った。



- 1, 5, 7, 10 Tの環境下で磁場印加試料、磁場無印加試料を準備
- それぞれを10日間同時に発酵させ、積算炭酸ガス減量を測定。

- 発酵終了後、磁場印加試料、磁場無印加試料を共に化学定量分析する。
- その結果、磁場印加試料(A)のエタノール濃度が高くなる。

全実験結果において、**磁場印加試料の発酵がより継続する傾向**が得られた。

全実験結果において、**アルコール濃度が高くなる傾向**が得られた。

成分名	1 T		10 T	
	A	B	A	B
グルコース[%]	1.3	1.3	2.1	2.1
グリセリン[%]	0.80	0.73	0.86	0.86
エタノール[%]	18.2	17.2	18.1	17.7

25℃での1、10T下実験試料の試料濃度

これより、アルコール度数の高い日本酒造りへの応用が期待される。

今後の課題として、

磁場が酵母の糖分解活動へ与える影響、突然変異株についての研究が必要。



低温工学協会
九州・西日本支部

Cryogenic Association of Japan