

定年を迎えて
—皆様との出会いに感謝、複合材料研究の40年—

来し方に 木洩れ陽深し 定年期
いまここにある 幸を思いて

2012年8月4日

終戦直後の団塊の世代に生まれる



5歳 お稚児さん



戦前の風情を残した小学校の校舎
(彦根市立城北小学校)

中学時代

戦後の混乱は落ち着いてきた。
まだ物は不足していたが、三丁
目の夕日のような生活。



彦根市立西中学校

高校時代

東京オリンピック:2年生のとき開催

日本全体が上昇機運

理工科ブーム



滋賀県立彦根東高校

学部、修士課程、博士課程:金属材料学研究室(村上陽太郎先生)

昭和52年2月～昭和62年7月

工学部金属系教室助手(村上先生、長村先生、山本先生)

昭和62年8月～平成4年6月

工学部金属系教室助教授(長村先生、山本先生)

平成4年7月～平成14年3月

工学部(平成10年から工学研究科)附属メゾ材料研究センター教授
(北條先生、酒井先生、諸岡先生、黒川先生)

平成14年4月～平成19年9月

京都大学国際融合創造センター(平成19年7月から産学連携セン
ター)創造部門教授 (奥田先生)

平成19年10月～平成24年3月

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻教授(奥田先生)

複合材料との出会い (M1)



村上先生 Kelly先生

*国内外で、材料工学、機械
工学、航空工学、化学、電気
工学、物理など多彩な分野の
研究者と出会う。



複合材料が縁となって、ケルン
のドイツ宇宙航空研究所(DLR)・
材料研究所留学

* 複合材料を研究テーマにしたおかげでドイツ宇宙航空研究所に留学できた。

* Bunk教授にはメゾ材料研究センターの外部評価に委員長として来ていただいた。

* 後にハンブルグ・ハールブルグ工科大教授になったSchulte氏とはDFG-JSPSの日独科学協力事業を2回実施。

* 帰国後もDLR関係者と共同研究で19編の論文

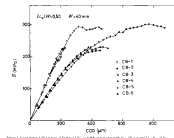
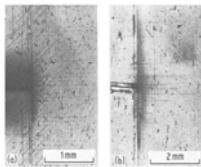


ドイツ航空宇宙研究所時代の研究(1979,1980)



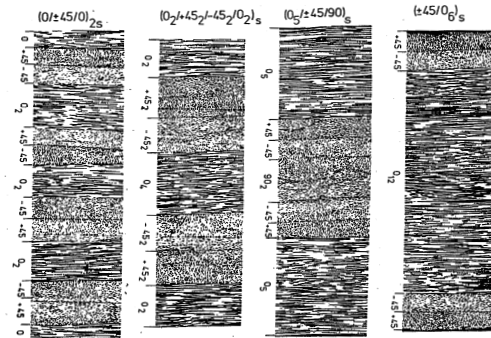
エアバスA320
垂直尾翼(1984年): 炭素繊維強化エポキシ積層型複合材料

CF/Epoxy積層材のエアバス垂直尾翼への実用化が進められていた。実機への新規複合材料の搭載に、研究者・技術者も使命感・高揚感を持っていた。そのような環境のなかで研究でき、かけがえのない経験を得た。



ドイツDLR時代の研究テーマ: 炭素繊維強化エポキシ積層型複合材料の破壊

ドイツ時代の積層複合材試料



研究テーマ

・複合系材料の組織形成、力学特性・機能特性に関する研究

- * 一方向繊維強化複合材料の損傷多体間相互作用・破壊プロセスのモデリング・シミュレーション
- * 一方向、積層型、織物型繊維強化複合材料の特性評価
- * 粒子強化合金、ウイスカ強化合金の熱膨張、耐摩耗性および変形破壊
- * 高強度・高機能複合材料の創製
- * 小径繊維(直径5-20 μ m)へのFIBによるき裂導入と破壊靱性評価
- * 表面被覆金属材料(自動車鋼板、陽極酸化アルミニウム等)の破壊はく離
- * 合金・アモルファス・半導体の組織形成過程
- * 強力X線による残留ひずみ測定および残留ひずみの集積過程解析
- * 発泡金属の弾性率・変形・破壊
- * 超伝導複合材料の応力環境下での超伝導特性評価およびモデリング・シミュレーション、超伝導臨界電流の統計解析、応力ひずみ曲線を使った超伝導特性の解析・予測

共著者(約300名、苗字のみ、敬称略)

青木、青山、秋元、浅野、足立、安達、安部、兩宮、鮎山、新井、荒池、綾井、安藤、Ahn、Andersons, Almajid, Aly, Amundsen 飯田、井川、五十嵐、池田、石川、石田、井沢、磯部、市坪、伊藤、井上、井戸本、入江、岩崎、岩下、岩本、Ilyin、上田、上原、宇佐美、碓井、睦崎、浦川、Ekin、遠藤、大井、奥、大沢、大高、大野、大森、岡村、小川、奥田、沖、奥村、長村、小田部、越智、小野、Oh, Otto、加藤、梶井、横田、片桐、柏谷、勝村、川口、河口、川崎、河田、加茂、Kim、菊池、喜多、岸田、北井、北口、北島、北原、木村、日下、楠井、楠本、久野、熊谷、久原、久保、窪島、久保田、黒川、黒崎、黒澤、黒田、黒倉、桑原、Clickner, Kwon, Gagel, Gao, Gang, Goldacker, Gu, Gustafson, 神郷、河野、小金谷、小滝、小村、近藤、才田、酒井、坂田、阪本、榎井、佐々木、佐藤、澤田、志田、柴田、下川、下村、富井、城山、進藤、神保、Shi, Shonaike, Joffe、曹野、鈴木、Schulte, Seiber, Sha, Shi, H.S.Shin, S.Shin, J.K.Shin, Shonika, Soenowski, J.Sun, J.Q.Sun, Toener, Toplosky, 関川、関野、太朗、高島、高田、高橋、高谷、高山、竹下、武田、田中、田畑、田淵、田村、津崎、辻岡、津島、寺島、土屋、時来、富井、土工、戸田、富田、Dudek, Thoener, 長井、永井、中尾、中岡、中川、中島、中崎、中谷、中西、中野、永野、中村、中山、生田目、西野、丹羽、布谷、野崎、野田、能登、野中、則武、Ni, Nijhuis, Nylas、橋本、濱田、Ha, Haessler, ten Haken, Hampshire, Harley, Hobbiebrunken, Hu, Hyin, 林、樋口、廣澤、広沢、広田、深澤、榎本、藤井、藤倉、藤田、藤本、藤原、Fiedler, Fluekiger, 宝野、保上、細田、本間、北條、本城、堀内、古坂、辺見、Peng, Peters, Predel, Promstitt, Prusseit, 前川、牧野、増永、又野、町家、町田、松井、松倉、松岡、松下、松田、松永、松本、松林、丸山、Malozemoff, Mai, 水原、宮下、宮崎、宮村、三谷、三村、向井、武藤、村上、村瀬、森合、森下、森谷、龍治、J.Lee, H.Lee, Leucht, 六角、和久、和田、渡辺、Walsh, Weiss, Weijers, Wu, Yao, Yin, 矢野、八木橋、矢田、弥富、山尾、山下、山田、山崎、山村、山本、横江、横田、横武、横山、吉原、米永、M. Zhang、W.Zhang, W.L.Zhang,

原著論文 350編
国際会議発表 182編
解説, 教科書, 参考書 60編

計 592編

研究室スタッフ、研究室卒業生、学内外の共同研究者、学会や研究会での討論や交流を通じて情報や研究のヒントを与えていただいた同分野の皆様、に感謝

すべての研究に愛着も思い出もあるが、今日はそのいくつかを紹介する。

時間がないので結果を紹介できない卒業生には申し訳ありません。また研究をやってくれた人の名の挙げたいところですが、省略して話を進めます。乞謝

UD繊維強化複合材料の変形・破壊シミュレーション法の開発と応用

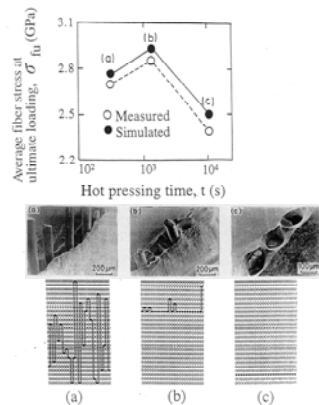
B/AI複合材

ホットプレス時間の増加に伴う界面状態変化が

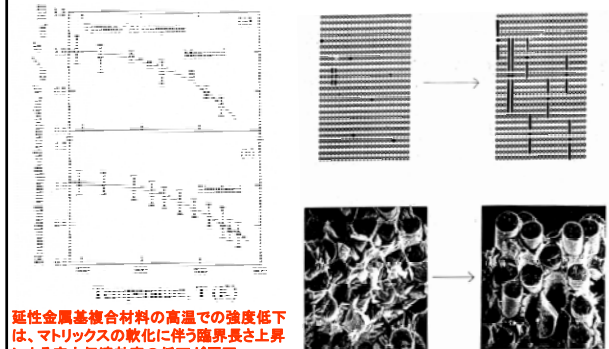
* 複合材引張強度での繊維平均強度

* 破壊形態

に及ぼす影響



SiC/AI複合材料の強度の温度依存性



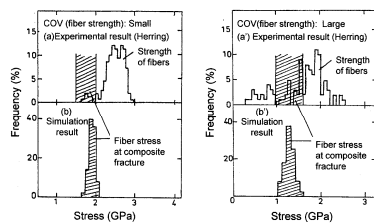
延性金属基複合材料の高温での強度低下は、マトリックスの軟化に伴う臨界長さ上昇による応力伝達効率の低下が原因。

繊維強度のばらつきと複合材の破壊強度

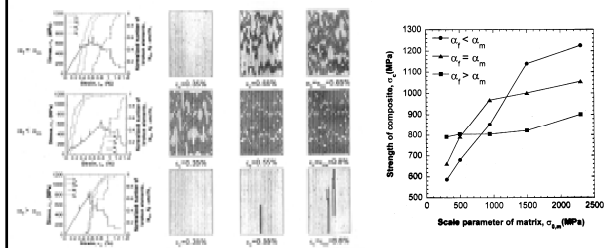


スペースシャトルの骨格はボロン繊維強化アルミニウム複合材料 (B/AI) 複合材のパイプ

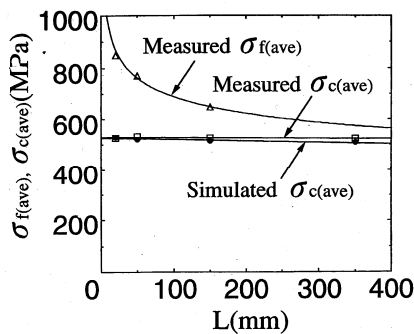
NASAのB/AI複合材のデータを再現



残留応力の影響 (シミュレーション例: マトリックスが繊維より弱い場合のセラミック基複合材料)

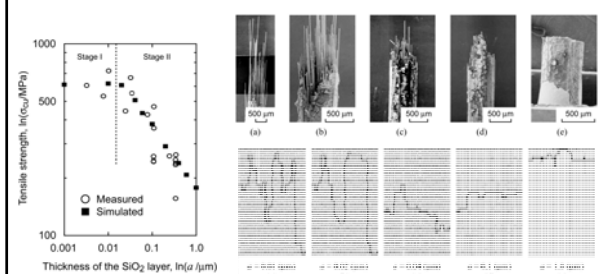


Nb₃AlフィラメントおよびNb₃Al/Cu超伝導複合線材の平均強度の長さ依存性

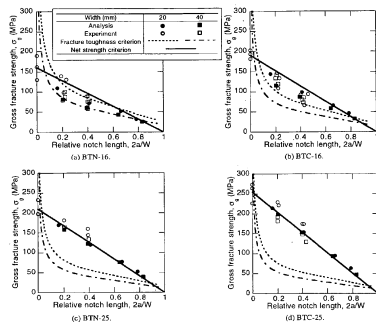


フィラメントは長くなると強度が低下するが複合材にすると長くなっても低下はわずかなになる。

大気暴露SiC/SiC複合材料の強度と破壊形態



繊維C/C複合材料への応用(修正シェアラグアナリシス法では位置による物性の違いを組み込むことを利用)



界面強度を変えた繊維C/C複合材の切欠強度は、

(1)界面強度が高い場合は、試験片幅の増加と共に、破壊靱性基準による予想強度曲線側に移行すること、

(2)界面強度が低くなるにしたがって、破壊応力が正味断面破壊応力基準側に移行することを

修正シェアラグ計算と破壊力学に基づくAverage stress criterionを組み合わせて、再現。

CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の層間剥離

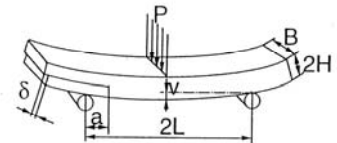


図1 端部切欠き曲げ (ENF) 試験

ENF試験によるモードII層間は離れ疲労に及ぼす樹脂靱性の影響や水環境の影響などの解明

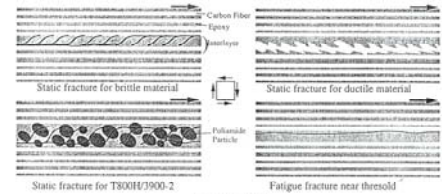
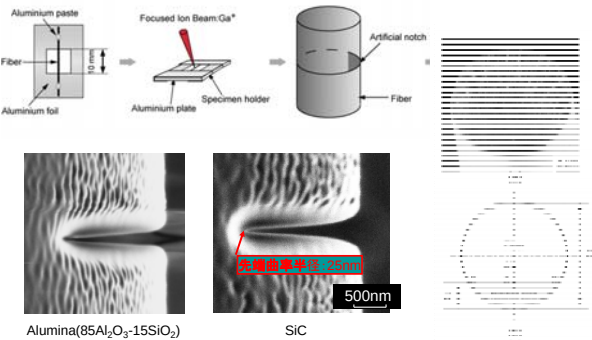
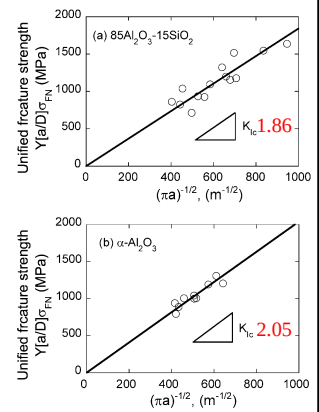
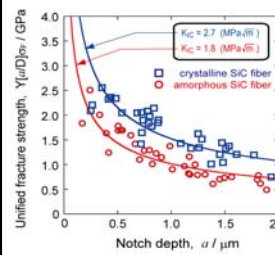


図8 破壊機構の検討

細径繊維の破壊じん性評価 FIB(集束イオンビーム)による人工ノッチ導入と引張試験+FEM解析



2種類の SiC繊維および2種類のアルミナ繊維の破壊じん性



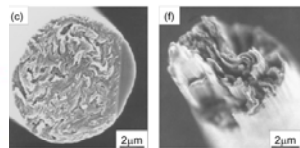
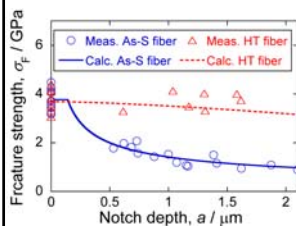
繊維にFIBで人工ノッチを導入して破壊試験

炭素繊維の基本的な構造

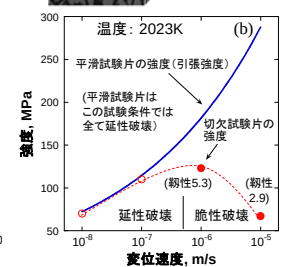
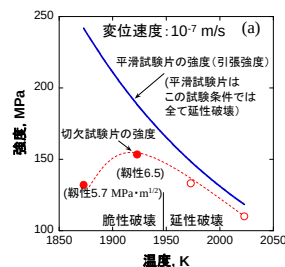
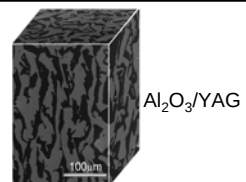
熱処理しない繊維(ヤング率350GPa): ノッチ進展で破壊、破壊靱性 $K_{IC}=1.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
Ar中、3000°Cで熱処理した繊維(ヤング率約870GPa): ノッチinsensitive, 正味応力基準で破壊



S.C. Bennett and D.J. Johnson (1978)

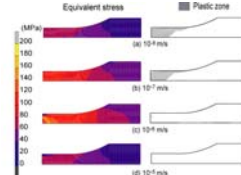
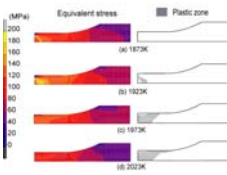
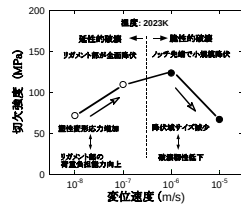
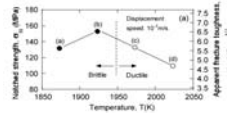


超高温でのAl2O3/YAGの平滑および切欠試験片強度の温度、変位速度依存性 (○は延性破壊, ●は脆性破壊)



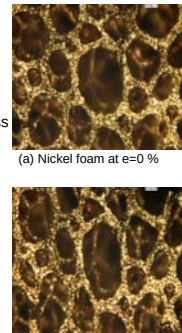
Al₂O₃/YAGの切欠強度に及ぼす温度および変位速度の影響

解析結果: 切欠先端の降伏状況に着目



発泡金属のヤング率に及ぼす変形破壊の影響

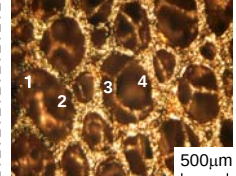
Stress



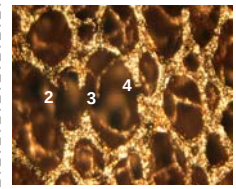
(a) Nickel foam at e=0 %

形態変化
(ヤング
率を上げ
る)

Strut破壊(下げる)

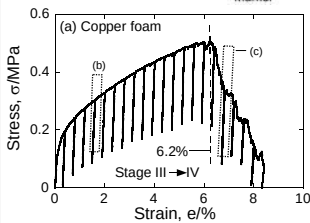
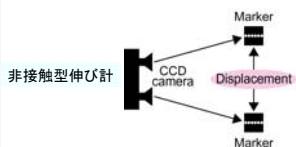


(a) Stage III

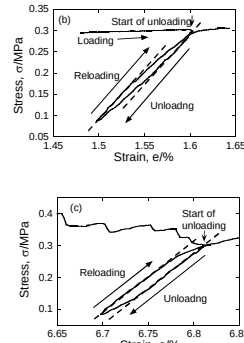


(b) Stage IV

発泡金属のヤング率評価



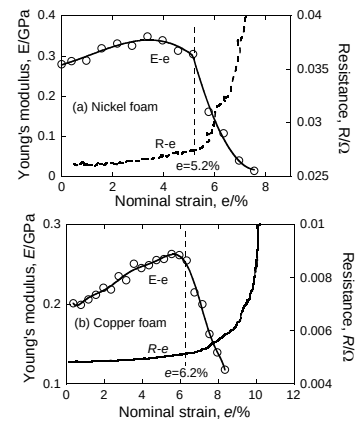
除荷初期の弾性変形からヤング率を求める。



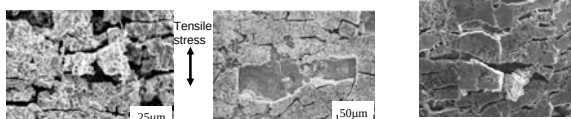
ヤング率の負荷ひずみ依存性(測定値)

* ヤング率は負荷ひずみと共に増加し、最高値を示した後、低下。

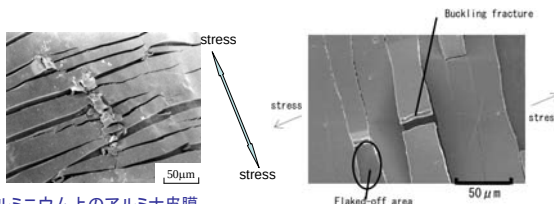
* ヤング率はセルの縦長への形態変化による上昇効果とstrut破壊による低減効果の競合で決定される。



金属表面皮膜の多重破断・はく落



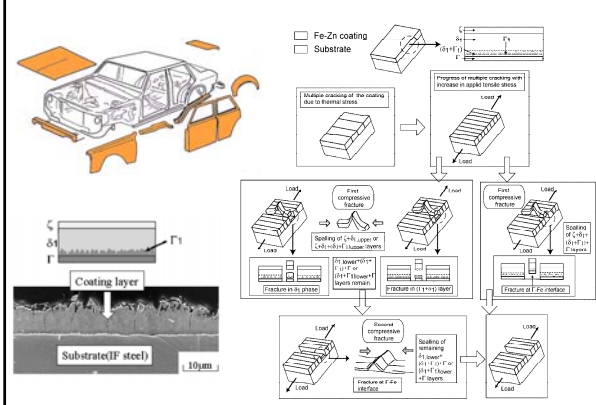
自動車鋼板 (GA鋼板) 上のFeZn金属間化合物皮膜



アルミニウム上のアルミナ皮膜

Hastelloy基板上のDyBCO超伝導皮膜

自動車鋼板皮膜の破壊・はく離過程



自動車鋼板皮膜強度評価 (基材鋼から皮膜への応力伝達、FEM解析)

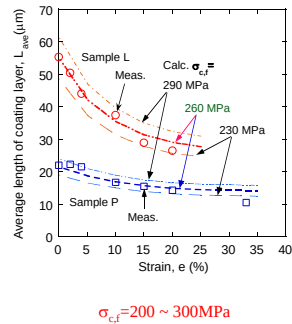
* 平均クラック間隔 L_{ave} と臨界長さ L_c の関係
 $L_{ave} = (3/4)L_c$ (1)

* 応力伝達効率
 Sample S (皮膜厚さ=5 μm)
 $\sigma_{c,max}/L = 9.06 + 29.6e-48e^2$ (2)

Sample I (皮膜厚さ=10 μm)
 $\sigma_{c,max}/L = 3.54 + 23.4e-38e^2$ (3)

$\sigma_{c,max} = \sigma_{ci}$ (皮膜強度), $L = L_c$ を式(2)(3)に代入すると L_c がひずみの関数として求められる。

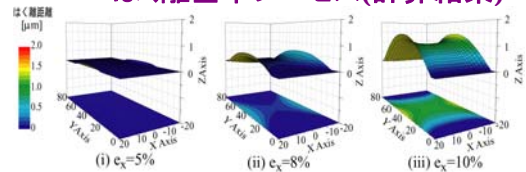
L_c を式(1)に代入すると、 L_{ave} がひずみ e の関数として求められる。



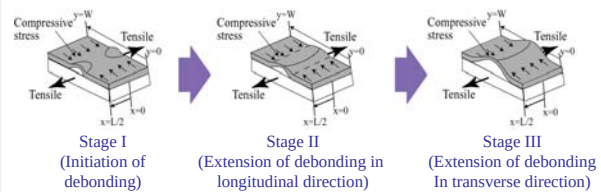
$\sigma_{ci} = 200 \sim 300 \text{ MPa}$

はく離基本プロセス(計算結果)

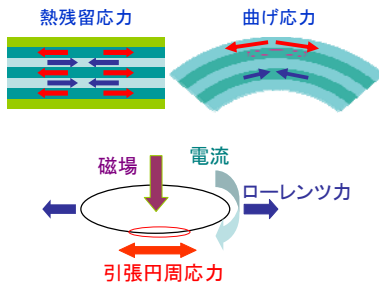
Distance from interface



Distance of debonded coating layer from interface



力学的見値からの超伝導特性評価



超伝導複合テープ材には作製および使用時に、機械的、電磁気学的応力が負荷される。

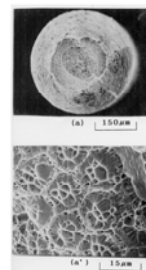
超伝導フィラメントの引張破壊ひずみ

Bi2223 : およそ 0.1%
 Nb₃Sn (A15): 0.5~1.2%,
 Nb₃Al (A15): 0.6~1.0%
 Nb-Ti (合金): 約 2%

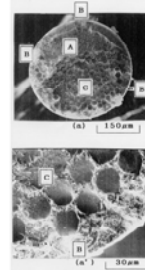
力学的見地からの超伝導特性評価は不可欠

Nb-Ti/Cu, Nb₃Al/Cu複合線材の疲労と超伝導特性

静的破面



疲労破面



疲労き裂



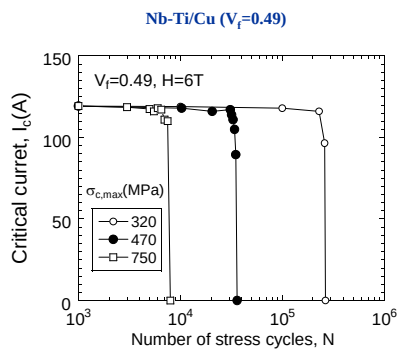
疲労破面では、Nb-Tiフィラメントはディンプルパターンを示さず、平滑破面を示す。

負荷応力レベルにより、main-crackの他、sub-crackが形成される場合がある

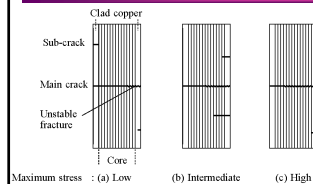
Main crack が臨界電流に及ぼす影響 (高 V_f 材)

* 臨界電流は疲労寿命後期に低下。

* 一旦、main crackが電流を輸送するフィラメントが存在するコア部にまで進展すると、その後は急激に進展する。

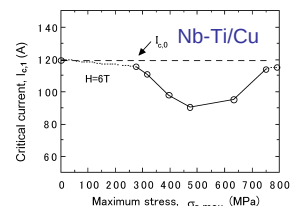
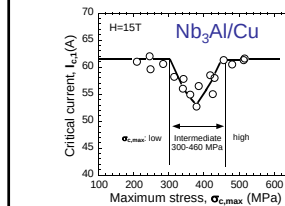


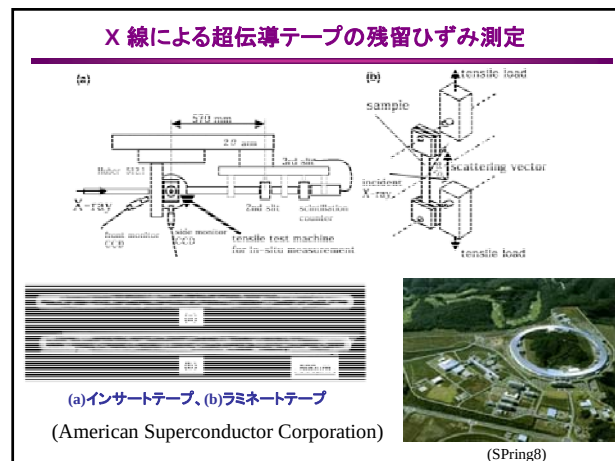
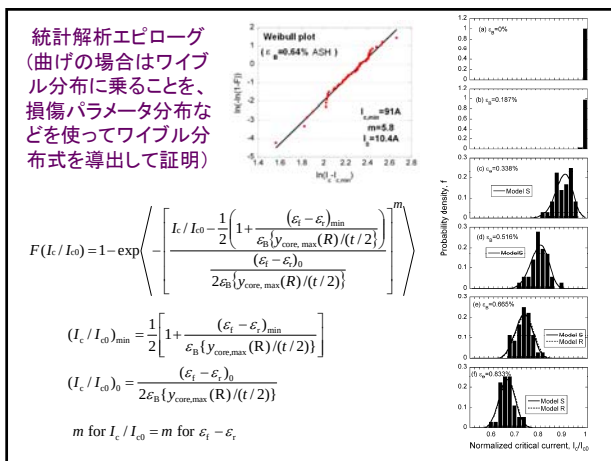
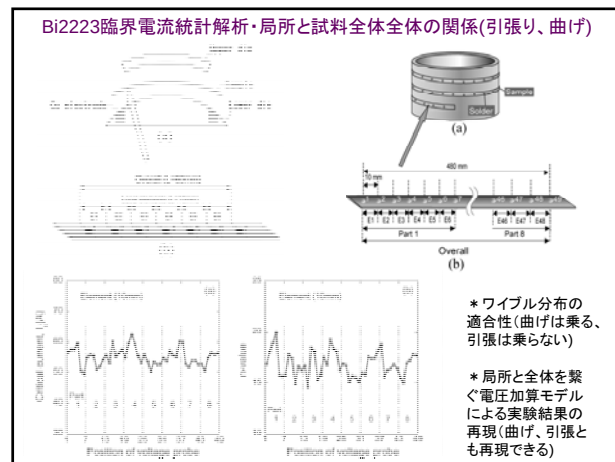
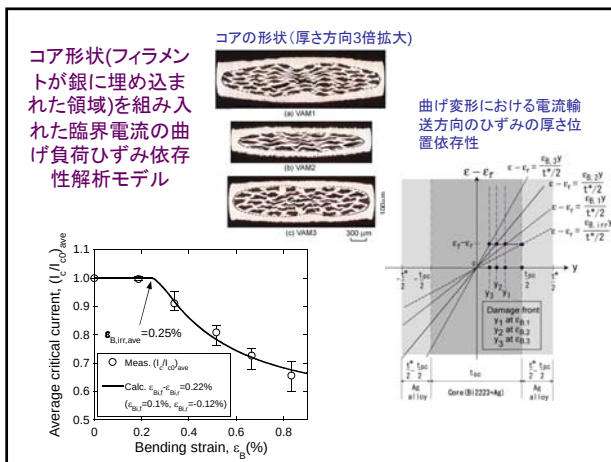
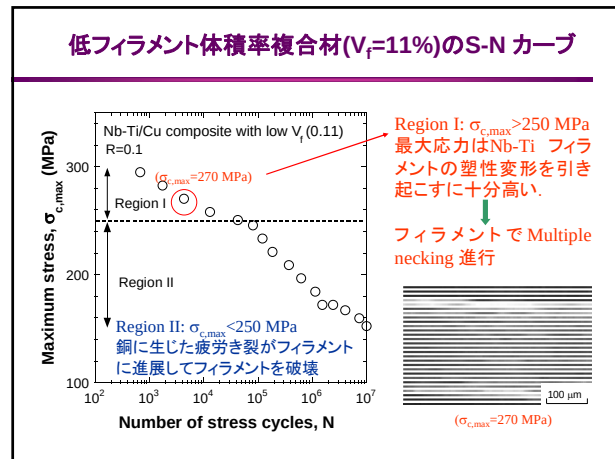
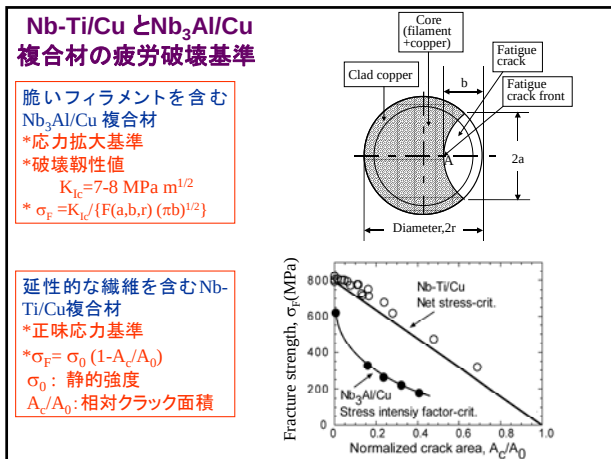
臨界電流に及ぼす sub-cracks の影響



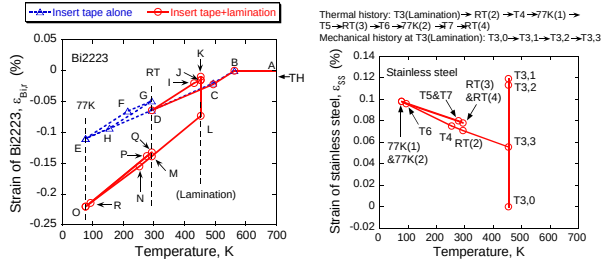
中央力域でのみ、フィラメント破壊を伴うsub-cracksは形成される。

Sub-cracksは中央力域でのみ臨界電流を低下させる。

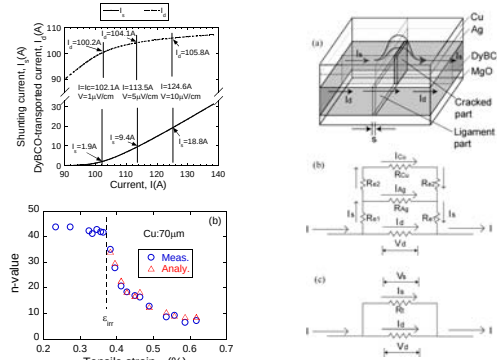




インサートテープとラミネートテープにおけるBi2223超伝導フィラメントの残留ひずみ集積過程

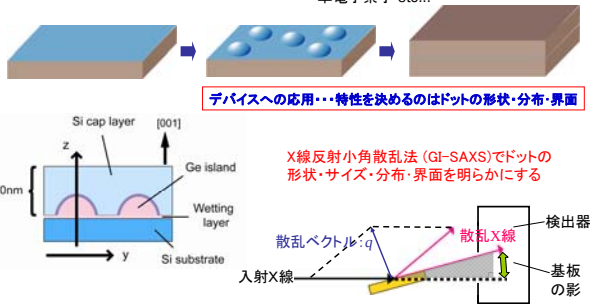


コーテッドコンダクターにおける超伝導層クラック部での電流迂回および超伝導特性評価

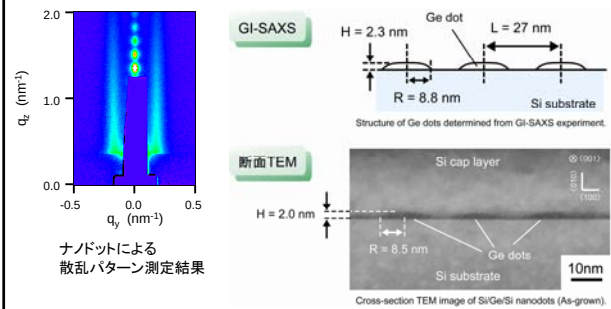


Si/Ge/Siナノドット

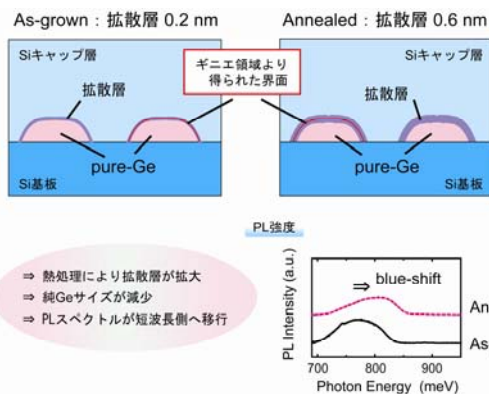
ナノドット・・・半導体原子などからなる10nm程度のクラスター
 新たな半導体デバイスとして期待
 ・半導体レーザー
 ・単電子素子 etc...



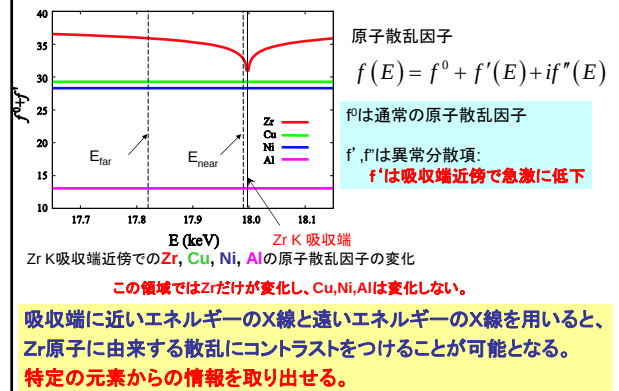
GI-SAXS法で得たナノドットのサイズ、形状およびナノドット間距離と透過電顕観察結果



GI-SAXS実験結果とシミュレーションより求めた界面拡散層

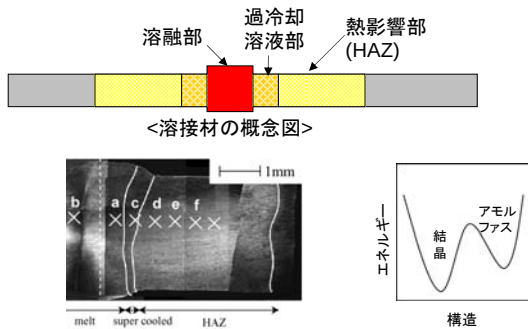


散乱強度と異常分散効果

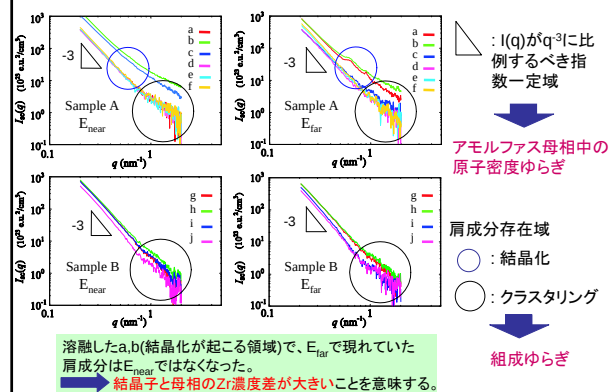


異常分散効果を使った微細構造評価

例:金属ガラスの溶接部の微細構造を調べる



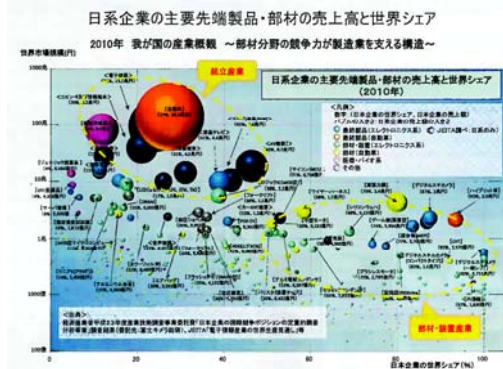
実験結果 (Zr K 吸収端)



材料・機械は社会基盤を支えている



日本は物づくりが命



皆さんの活躍に期待

我が国の諸科学技術分野における国際的なポテンシャル比較

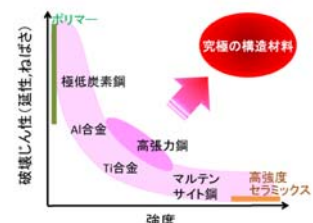


定年後の仕事と連絡先

国家課題対応型研究開発推進事業
元素戦略プロジェクト

構造材料元素戦略研究拠点

京都大学がセンター拠点
東京大学、
物質・材料研究機構(NIMS)、
大阪大学、
産業技術総合研究所(AIST)、
日本原子力研究開発機構(JAEA)、
ファインセラミックスセンター(JFCC)
などと連携

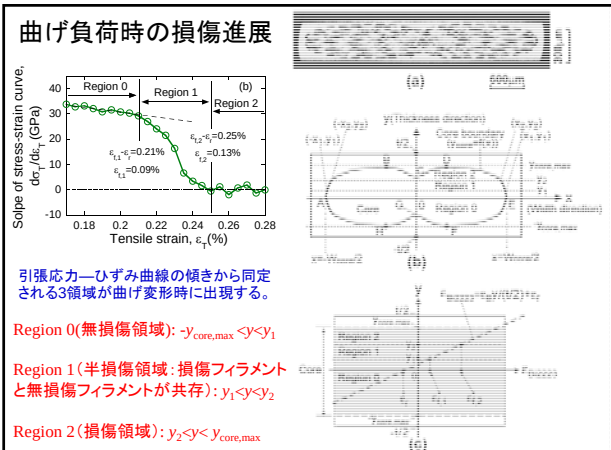
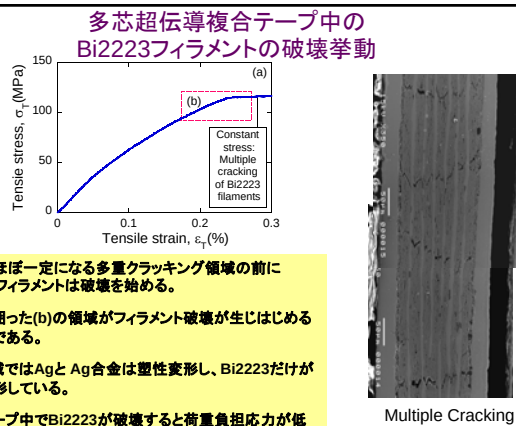
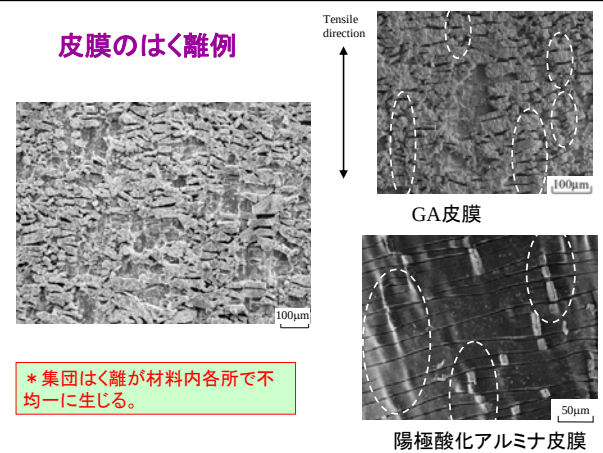
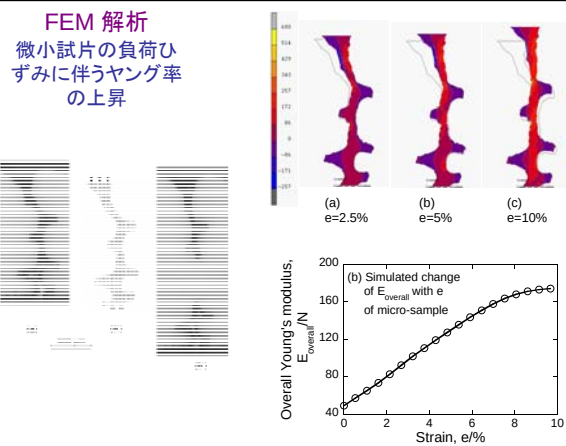


落合連絡先
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学工学研究科材料工学専攻内
構造材料元素戦略研究拠点
Tel: 075-753-4834
Fax: 075-753-4841
E-mail: shojiro.ochiai.54n@st.kyoto-u.ac.jp

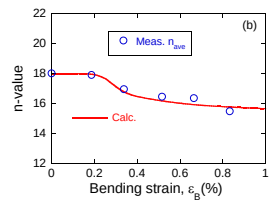
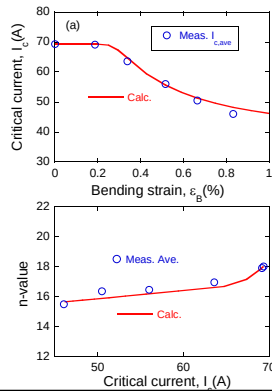
皆様に感謝

約40年、研究・教育に励むことができました。

研究室スタッフ、研究室配属学生の皆様のおかげです。ありがとうございました。

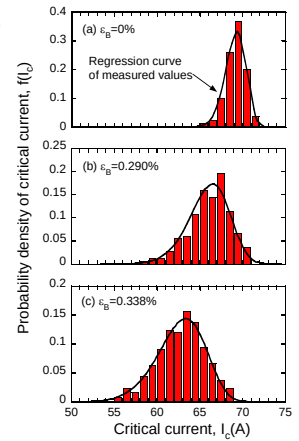
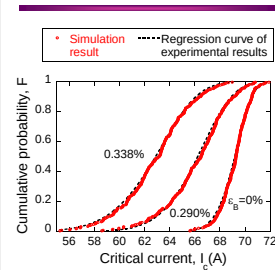


測定値(各負荷曲げひずみでの平均値)とモデル解析結果
領域0, 1, 2は並列回路、V-Iカーブを計算して臨界電流と n 値を算出



応力-ひずみ曲線を使って、
臨界電流および n 値(超伝導から常伝導への遷移の鋭さを示す値)の曲げひずみ依存性、および臨界電流と n 値の相関が記述できる!

臨界電流分布を記述するための
損傷パラメータを組み入れた統計的手法の提案
シミュレーション結果と実験結果の比較(Bi2223)



中学時代(1)



中学時代(2)

映画「青い山脈」のロケが3年生時にあり、

吉永小百合、芦川いずみ、二谷英明、田代みどりなどが来た。

今でもカラオケの青い山脈の画像に使われている。



想
い
出

青い山脈のロケ

高校時代

日本全体が上昇機運

東京オリンピック:2年生
のとき開催



弓道部に
入っていました

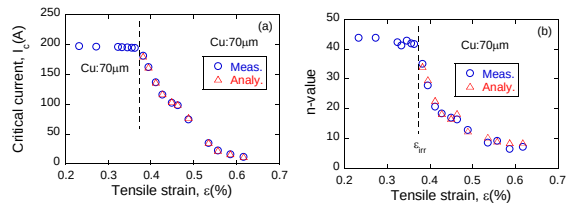


ライン河のほとりに住み、ケルンの地ビールに酔い、土日は散歩を楽しめた。

(仕事もしっかりしていました。論文は3報書いています。)



臨界電流とn値の解析値と測定値の比較



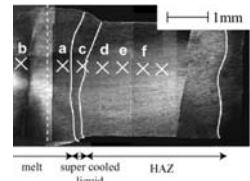
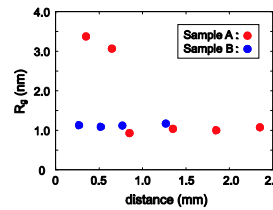
肩成分の解析 (結晶子、クラスターのサイズ評価)

散乱強度から密度ゆらぎに由来していると考えられる指数成分を差し引き、組成のゆらぎに由来すると考えられる肩成分のみの散乱プロファイルを取り出し、ギニエプロットして慣性半径をもとめた。

ギニエ (Guinier) 近似

$$\ln I(q) \approx \ln I(0) - \frac{1}{3} R_g^2 q^2$$

R_g : 慣性半径

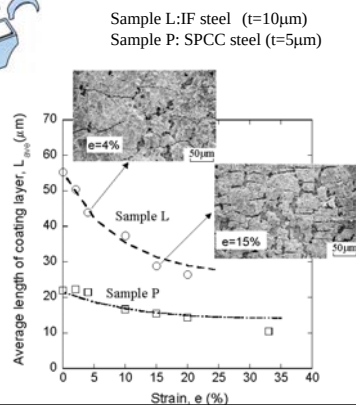


析出している結晶とクラスターの慣性半径:

* 結晶(a,c域)の慣性半径はおよそ3nm.

* クラスター(熱影響部)の慣性半径は測定位置、すなわち熱履歴によらず、およそ1nmで大きさが変わらない。

引張負荷ひずみ下での
多重破壊による
GA皮膜の平均
長さの変化



UD繊維強化複合材の 変形破壊モデリング・シミュレーション

一方向複合材料の繊維・マトリックス破断や界面剥離などの損傷は、空間的にばらついて生じる。

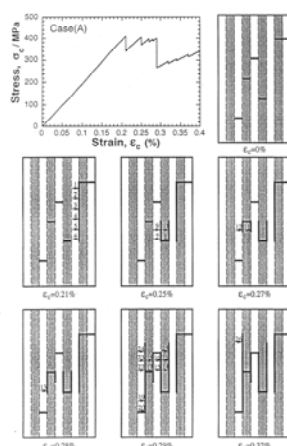
損傷はお互いに相互作用しながら進行し、材料全体の挙動・特性を決定する。

多体問題を解く

近似解をシェアラグアナリシス法とモンテカルシミュレーション法を組み合わせる

多体問題の例

損傷間相互作用
用例: 界面はく
離進行



繊維強化複合材料における多体問題の解法 繊維破壊時の応力計算法: シェアララグアナリシス法

従来の方法と問題点の修正

(A) 均質系を取り扱っていた。

* 繊維直径のばらつき、繊維配列の不均一性を組み入れられない。

(B) マトリックスは応力伝達媒体としてのみ働くとし、繊維軸方向へのマトリックス応力は無視されていた。

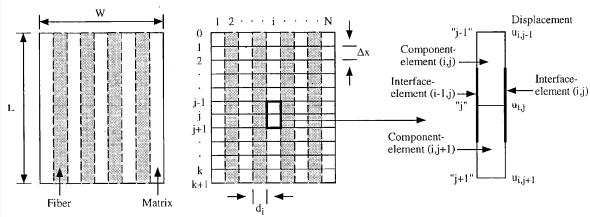
* ポリマーや極めて柔らかい金属がマトリックスの場合は適用できるが高強度金属やセラミックがマトリックスの場合は適用できない。

* 残留応力が組み入れられない。

(C) 線形挙動が対象になっていた。

* 実際に生じて問題となる非線形挙動が記述できない。(例えば金属マトリックスの塑性変形が組み入れられていない、界面剥離後の界面摩擦が組み入れられていない、など)

シミュレーション法



* 要素(i,j)の応力状態は修正シェアラグアナリシス法で解く。

* 繊維やマトリックスの強度の空間分布はワイブル分布関数とモンテカルロ法で与える。

変位に関する連立差分方程式 (セラミック繊維強化セラミックマトリックス複合材料)

$$B1(i,j)u_{i,j-1} + B2(i,j)u_{i-1,j} + B3(i,j)u_{i,j+1} + B4(i,j)u_{i+1,j} + B5(i,j)u_{i+1,j+1} = B6(i,j)$$

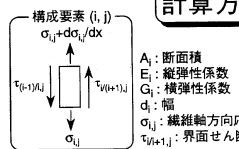
$$\begin{aligned} B1(i,j) &= 4\tau_{ij}/((2\tau_{ij} + \tau_{i,j+1})\Delta x^2) \\ B2(i,j) &= 2\alpha_{i,j}(G_{i+1}G_{i+1} + G_{i+1}G_{i+2})/b(A_iE_i) \\ B3(i,j) &= 4\tau_{ij}/((2\tau_{ij} + \tau_{i,j+1})\Delta x^2) - 2\alpha_{i,j}(G_{i+1}G_{i+1} + G_{i+1}G_{i+2})/b(A_iE_i) \\ B4(i,j) &= 4\tau_{ij}/((2\tau_{ij} + \tau_{i,j+1})\Delta x^2) \\ B5(i,j) &= 2\alpha_{i,j}(G_{i+1}G_{i+1} + G_{i+1}G_{i+2})/b(A_iE_i) \\ B6(i,j) &= (\beta_{i,j}(1-\alpha_{i,j})\beta_{i,j+1}(1-\alpha_{i,j+1}))^2 A_i A_{i+1} 4\tau_{ij} \tau_{i,j+1} (\tau_{i,j+1} + \tau_{i,j})^2 ((2\tau_{ij} + \tau_{i,j+1})\Delta x) \end{aligned}$$

B1(i,j)～B6(i,j) は以下の情報を含む

- * 構成材の弾性定数
- * 各構成要素の断面積、繊維体積率
- * 残留応力
- * (i,j)-界面が剥離しているか否か($\alpha_{i,j}$)
- * (i,j)-構成要素が破断しているか否か($\beta_{i,j}$)
- * 剥離界面での摩擦せん断応力の方向(τ_{ij})

計算方法

(セラミック繊維強化セラミックマトリックス複合材料)



パラメータ
界面はく離パラメータ $\alpha_{i,j}$
 $\alpha_{i,j}=1$ (界面要素(i,j) : はく離)
 0 (界面要素(i,j) : 未はく離)
界面摩擦パラメータ $\beta_{i,j}$
 $\beta_{i,j}=1$ ($U_{i+1,j} - U_{i,j} > 0$)
 -1 ($U_{i+1,j} - U_{i,j} < 0$)
要素破断パラメータ $\gamma_{i,j}$
 $\gamma_{i,j}=1$ (構成要素(i,j) : 破断)
 0 (構成要素(i,j) : 未破断)

• 応力釣り合い方程式
$$A_i \left[\left(\sigma_{ij} + \frac{d\sigma_{ij}}{dx} \right) - \sigma_{ij} \right] + h(\tau_{i+1,j} - \tau_{i-1,j}) dx = 0$$

• 界面せん断応力
界面要素(i,j) : はく離
$$\tau_{i+1,j} = \frac{2G_i G_{i+1}}{d_i G_{i+1} + d_{i+1} G_i} (U_{i+1,j} - U_{i,j})$$

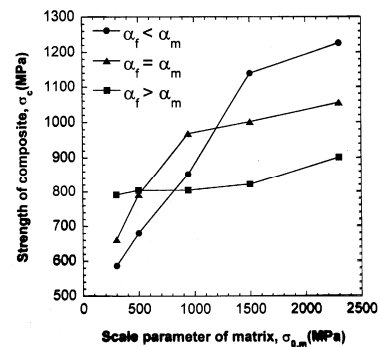
界面要素(i,j) : 未はく離
$$\tau_{i+1,j} = \tau_i$$

 τ_i : 界面摩擦応力

• 応力釣り合い方程式
$$A_i E_i \frac{d^2 U_{i,j}}{dx^2} + \left[\frac{2\alpha_{i,j} G_i G_{i+1} (U_{i+1,j} - U_{i,j})}{d_i G_{i+1} + d_{i+1} G_i} + \beta_{i,j} (1 - \alpha_{i,j}) \tau_i \right] h = 0$$

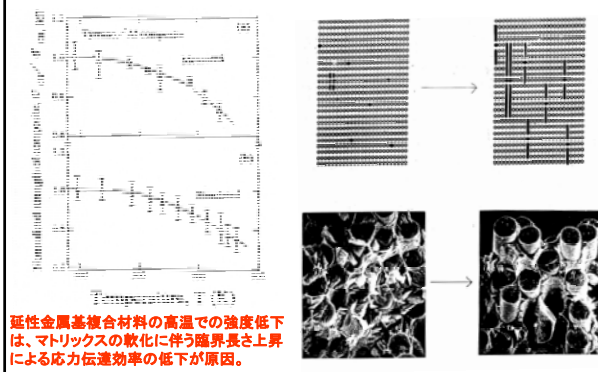
$$- \left[\frac{2\alpha_{i-1,j} G_{i-1} G_i (U_{i,j} - U_{i-1,j})}{d_{i-1} G_i + d_{i-1} G_{i-1}} + \beta_{i-1,j} (1 - \alpha_{i-1,j}) \tau_i \right] h = 0$$

残留応力の影響 (シミュレーション結果)



SiC/Al 複合材料の強度の温度依存性

1500Kまでは強度の温度依存性を持たないSiC繊維が強度を担っているにもかかわらずAl基複合材では温度が高くなると複合材強度は低下する。なぜか？

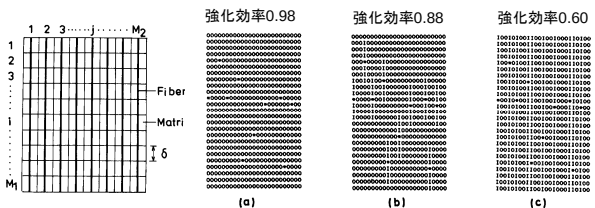


延性金属基複合材料の高温での強度低下は、マトリックスの軟化に伴う臨界長さ上昇による応力伝達効率の低下が原因。

マトリックスの軟化や界面強度の低下に伴う臨界長さの増加および強化効率の低下

- * : 破壊要素、
- 1: 非有効要素(破壊していないが応力を負担できない要素)
- 0: 有効要素(応力を負担できる要素)

条件: 各断面で荷重は同じ。
強化効率: 同一負荷ひずみ下での損傷を受けた複合材の応力と破壊要素がないと仮定した場合の応力の比



B/AI複合材料(NASAの実験結果とシミュレーション結果)



スペースシャトル

耐熱煉瓦はSiを充填した
C/C複合材

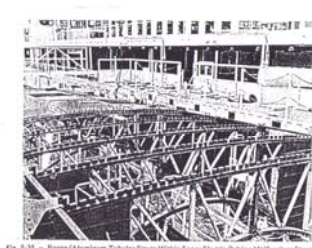
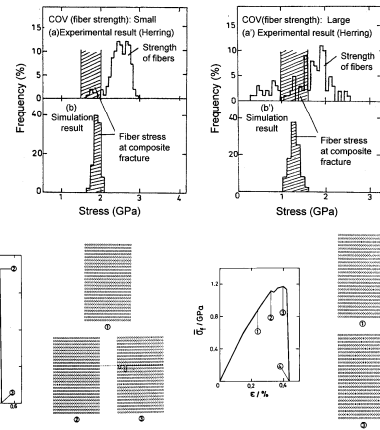


Fig. 5-35 - Boron/Aluminum Tubular Space Shuttle Main Engine Orbiter Structure

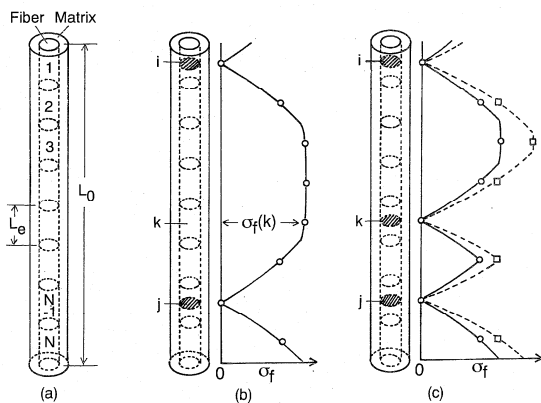
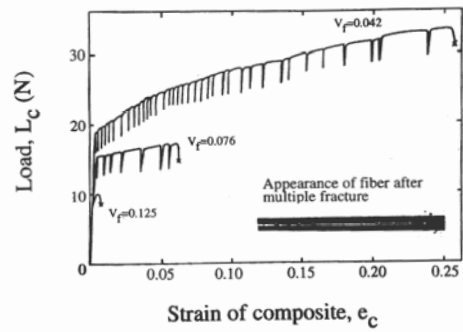
スペースシャトルの骨格はボロン繊維強化アルミニウム複合材料(B/AI)複合材のパイプ

繊維強度のばらつきと複合材の破壊強度

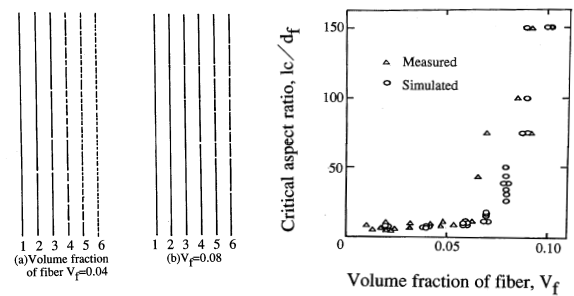


多重破断現象
(多重クラッキング現象)

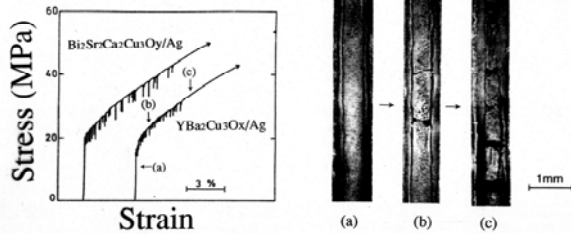
W繊維を銅に埋め込んだときの
荷重-ひずみ曲線と繊維の多重破断



臨界アスペクト比
実験およびシミュレーション結果

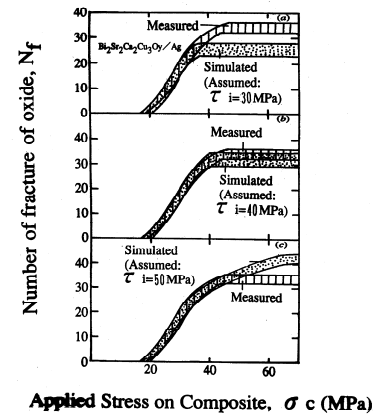


高温酸化物超伝導単芯線材における酸化物 フィラメントの多重破壊からの界面強度評価

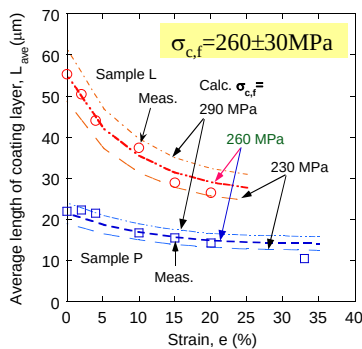


多重破断からの 界面せん断 強度評価

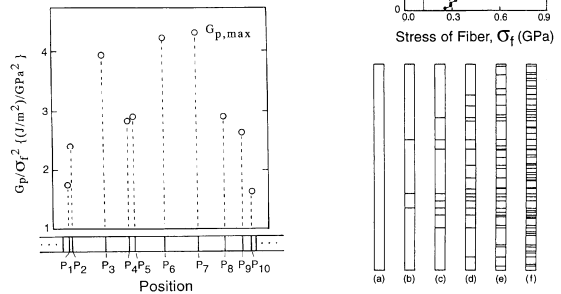
$$\tau_i = 40 \text{ MPa}$$



測定した平均クラック間隔 L_{ave} の ひずみに伴う変化からの皮膜強度評価



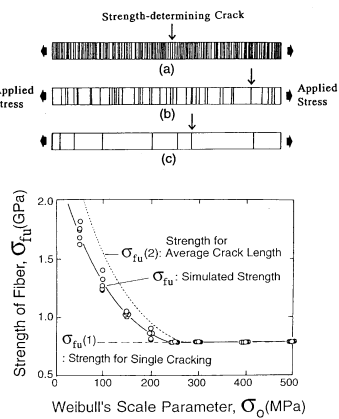
脆性繊維／脆性コーティング系にお けるクラック間の干渉 コーティング層の多重クラッキング 進行と各クラックの繊維への進展の エネルギー解放率



脆性繊維／脆性コー ティング層におけるク ラック間の相互作用 を利用した強度低下 の軽減

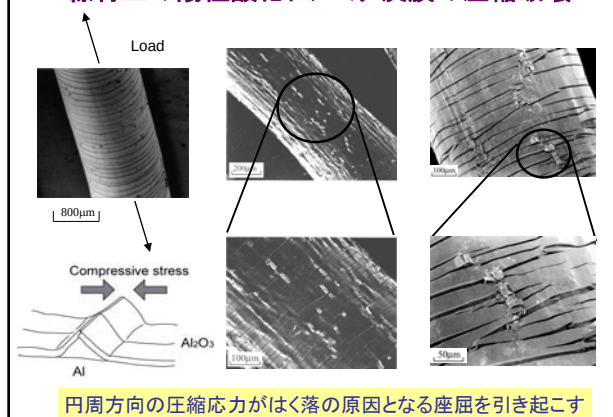
* コーティング層を小さく壊
せばクラック進展による繊
維強度低下は軽減できる

* 強いものを組み合わせて
も強くなるとは限らない



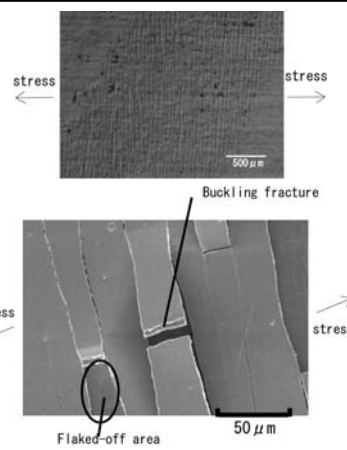
延性金属上皮膜の 多重破断後に生じる破壊・はく落

Al線材上の陽極酸化アルミナ皮膜の圧縮破壊

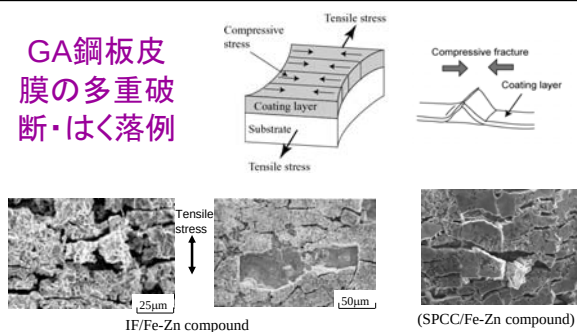


他材料における皮膜のはく落例 (DyBCO 超伝導テープ)

引張方向と垂直の試料幅方向の圧縮応力がはく落の原因となる座屈を引き起こす。



GA鋼板皮膜の多重破断・はく落例



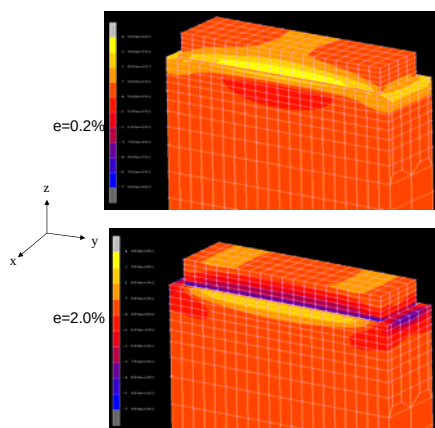
皮膜の破壊・はく落プロセス

- * 皮膜はまず多重破断する。
- * その後、試料幅方向の圧縮応力が、はく落の原因となる座屈を引き起こす。

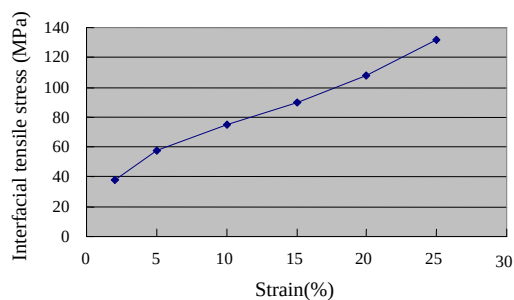
試料幅方向(y方向)の応力分布計算例

0.2%引張りひずみ負荷下では皮膜は引張応力のみ、界面で近傍で最大(残留ひずみのため)

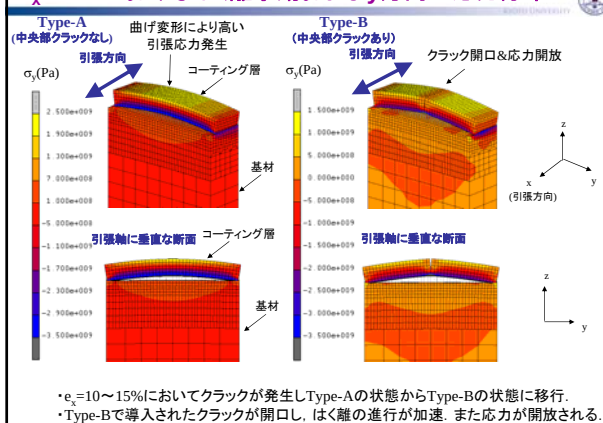
2%引張りひずみ負荷下界面近傍に圧縮応力が発生する。(ポアソン比の差のため)

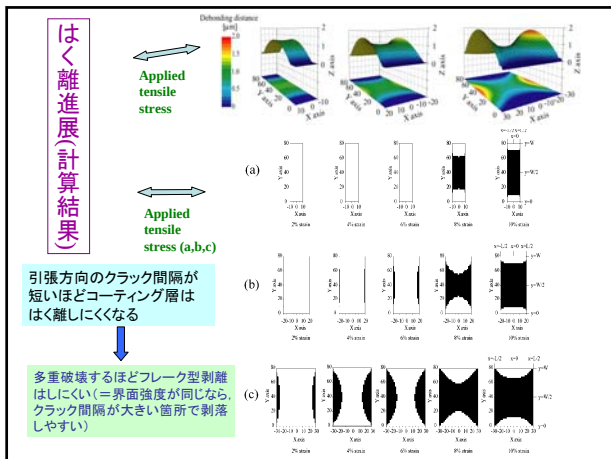


皮膜-基材界面にかかる引張応力計算結果例(軟鋼)



$e_x=15\%$ におけるはく離挙動およびy方向の応力分布



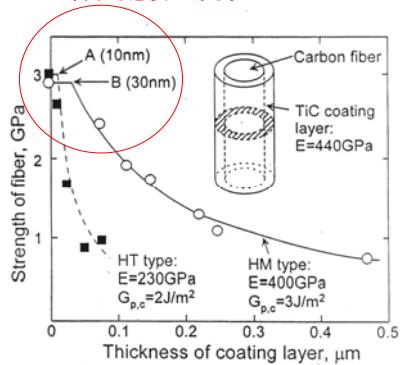


高強度・高機能複合材料の創製

界面強度制御の必要性

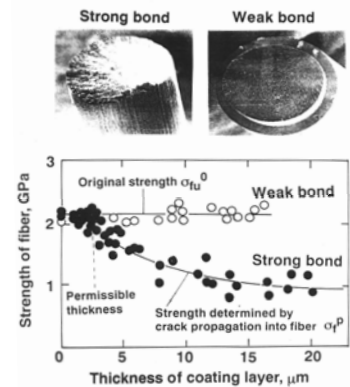
TiC層をコーティングした炭素繊維
(HT:高強度タイプ,
HM:高弾性タイプ)の強度とTiC
層厚さの影響

界面が強い場合は、繊維本来の強度を活かすには数十nm以下に欠陥を制御する必要がある。



界面強度制御の必要性

繊維強度に及ぼすコーティング層厚さと界面強度の影響
(金属タンガステン合金繊維を用いたシミュレーション実験結果:セラミック繊維では該当コーティング層厚さは二桁小さくなる)

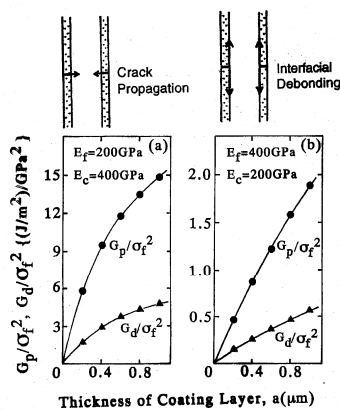


界面制御(この単繊維-コーティング層複合体の例では界面を弱くする)により繊維本来の強度が利用できる。

界面はく離のエネルギー解放率 G_d と繊維へのモードI進展エネルギー解放率 G_p の比は約0.3。

クラックが繊維に進展する前に界面はく離が生じる条件

$$G_{d,c}/G_{p,c} < 0.3$$



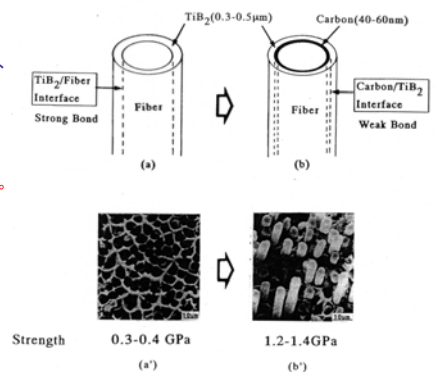
界面領域制御による4倍の高強度達成例(CF/Al)

(通産省大阪工業研究所(現産総研)、関西大学と共同)

目的:工業的に最も有用な製造法で複合材を作製するため、繊維表面TiB₂をコーティングしめれ性を上げる。

一次試験結果:繊維とTiB₂の界面は強い。低強度しか得られない。

界面領域制御結果:繊維に熱分解炭素をコーティングし弱界面にすることで4倍弱の高強度を達成



高弾性率、高強度、高熱伝導複合材料の開発
(ATM社、FJコンポジット社と共同)

3000°Cで焼成した炭素繊維で強化したC/C複合材料のポアにMgを充填

- * ヤング率: 520 GPa
- * 強度: 1.0 GPa
- * 比重: 2.0
- * 繊維方向熱膨張: ほぼゼロ
- * 繊維方向の熱伝導率: 450 W/m・K (銅(390 W/K・m)よりも高い)

超伝導複合材料

(Central Japan Railway Company) Linear motor car MLX01-01

(Osaka University Hospital)

医療診断

MRI
(Magnetic Resonance Imaging)

(NASA)

磁気浮上列車

これら以外にもエネルギー問題の緩和に向けた
* 電力貯蔵
* スマートグリッド
(高効率電力ネットワーク) などへの応用

超伝導複合材料により大規模かつ均一磁場を実現

超伝導材料における量子化磁束とピン止め

量子化磁束
間隔(Nb₃Sn)
49nm (1T)
11nm (20T)

ローレンツ力

量子化磁束間隔に適合するようピン止め中心を導入
↓
高臨界電流

Nb₃Snでは低磁場では結晶粒界がピンサイトであることはわかっていたが、高磁場で結晶粒界がどの程度効くかはわかっていなかった。

Nb₃Sn超伝導線材におけるピンカ F_p と結晶粒径 d の関係

ピンカの上部臨界磁場依存性を取り除いて、ピンサイト密度に対応するようにした値:
磁場によらずほぼ一定

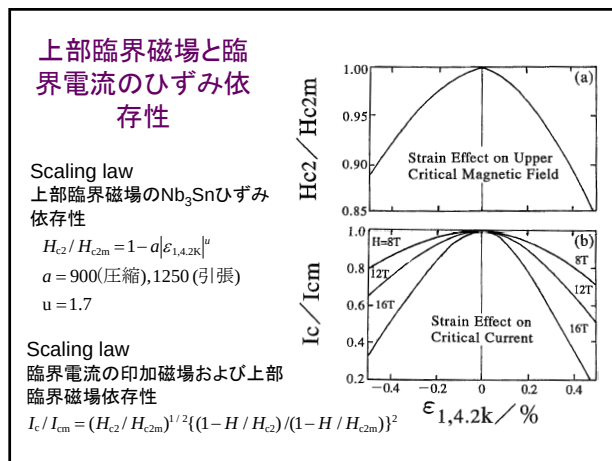
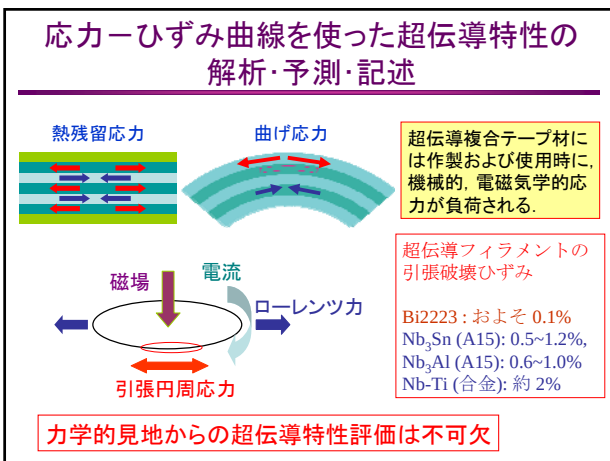
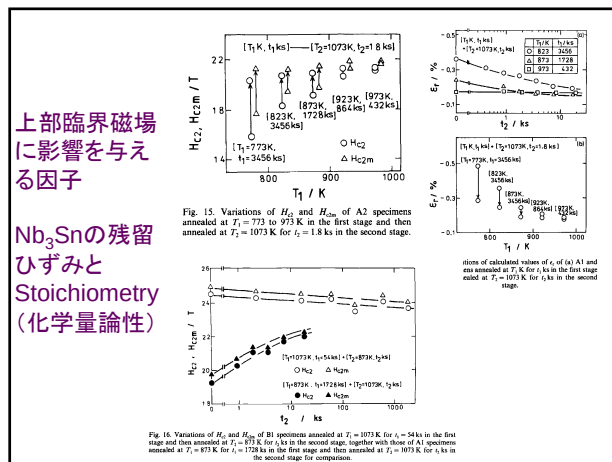
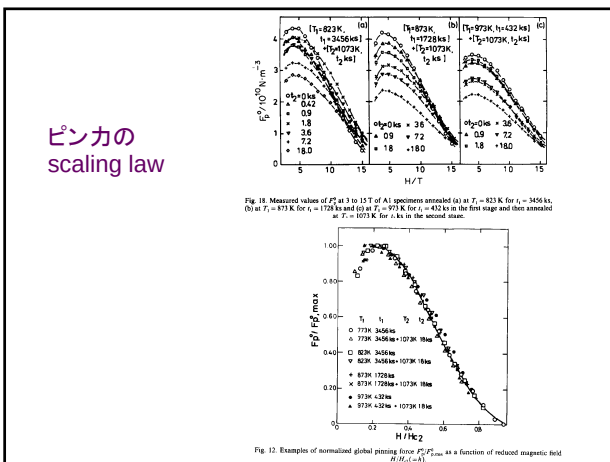
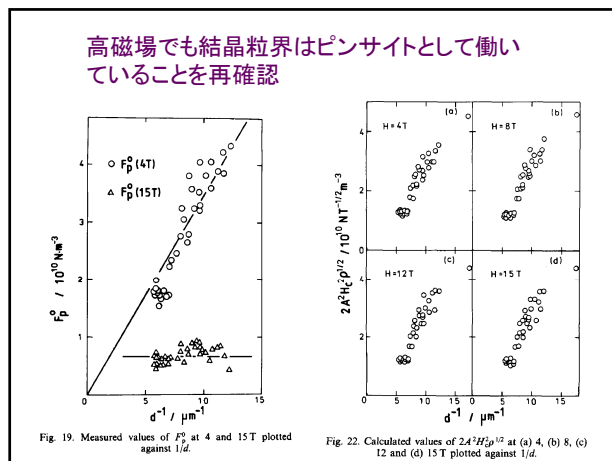
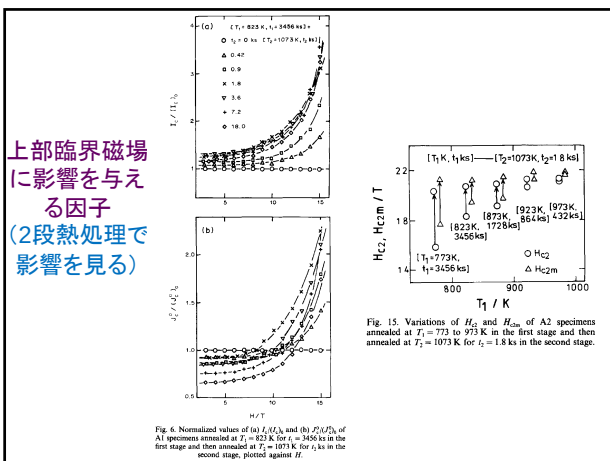
試料ごとに異なる H_{c2} の影響を取り除くため、Kramer plotから上部臨界磁場を求め、規格化磁場 $h = H/H_{c2}$ をつかってピンサイト密度依存量のみを算出。

上部臨界磁場の影響を取り除いたピンカ: $F_p^0 / (1-h)^2 h^{1/2}$ (ピンサイト密度にのみ依存)

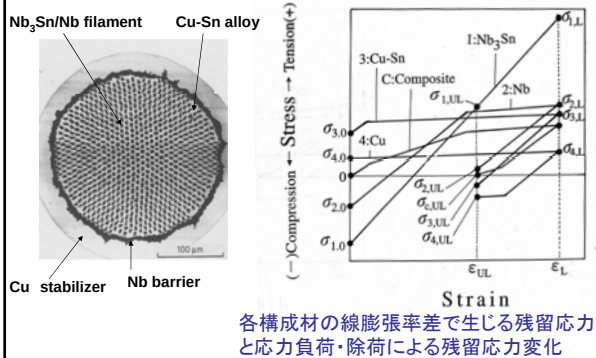
T/K	1/Ks	T/K	1/Ks
873	173	973	864
873	432	973	1730
973	35	1073	22
973	86	1073	86
973	432	1073	432

高磁場でも結晶粒界はピンサイトとして働いている。高磁場で働いていないように見えたのは上部臨界磁場の向上が結晶粒径増大の影響を隠していたため。

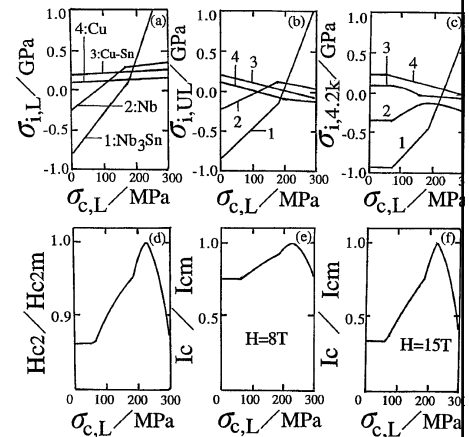
縦軸はピンサイト密度依存量 (Suenaga の式を応用)



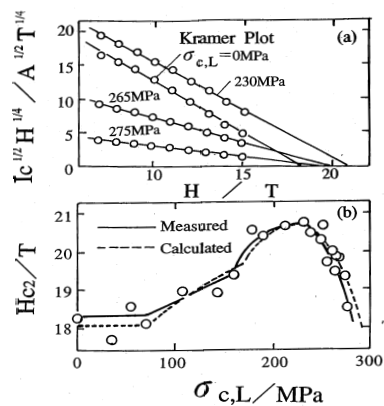
素材の力学的特性差を利用した 超伝導材料の高性能化



室温での荷重
除荷が4.2Kでの
上部臨界
磁場、臨界
電流に及ぼ
す影響(計算
結果)



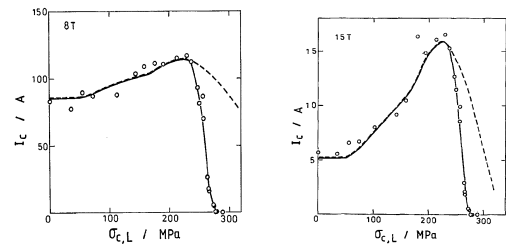
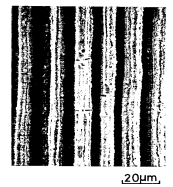
残留ひずみ制
御による Nb_3Sn
超伝導複合材
の上部臨界磁
場 H_{c2} の向上



残留ひずみ制御による 臨界電流の向上

室温での荷重除荷処理で特に高磁場での臨界電流は大幅に向上させることができる。

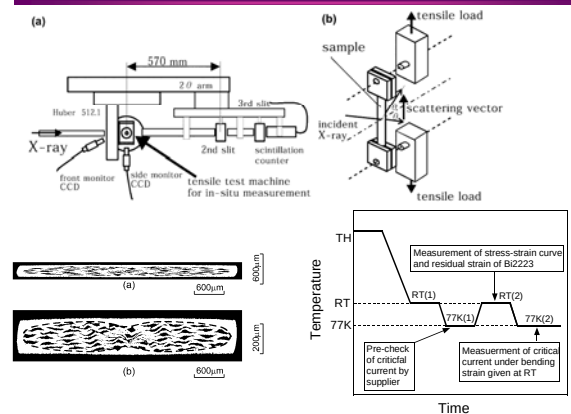
高応力側で実験値(実線)が計算値(点線)より低くなっているのは室温での応力負荷時に Nb_3Sn の破壊が生じているためである。⇒課題 Nb_3Sn の高強度化



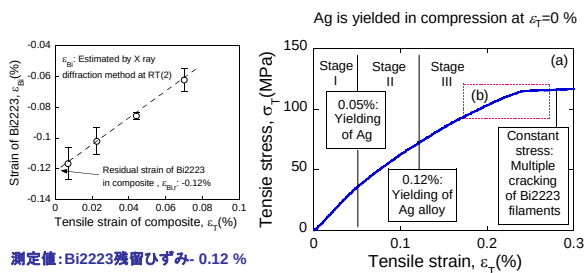
応力-ひずみ曲線を利用した超伝導 特性の損傷依存性評価

(BSCCO超伝導テープの臨界電流の
曲げひずみ依存性を例にとって、応力
-ひずみ曲線から予測する。)

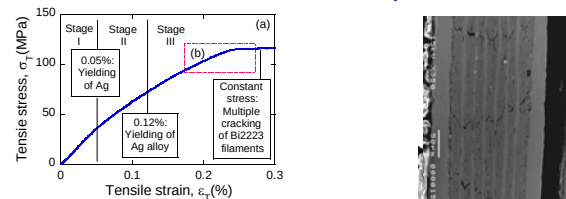
Bi2223フィラメントの残留ひずみ測定(SPring 8)



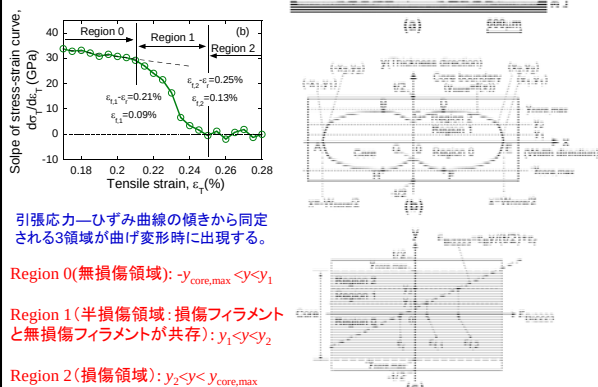
Bi2223の残留ひずみ測定結果 および応力-ひずみ曲線解析



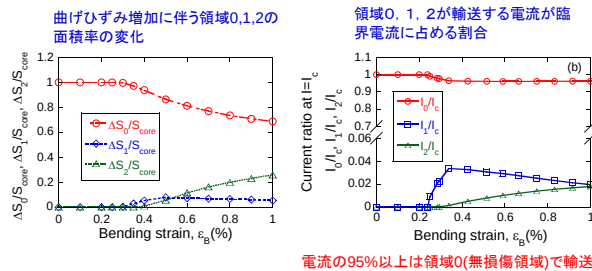
多芯超伝導複合テープ中のBi2223フィラメントの破壊挙動 (Bi2223残留ひずみ-0.12%)



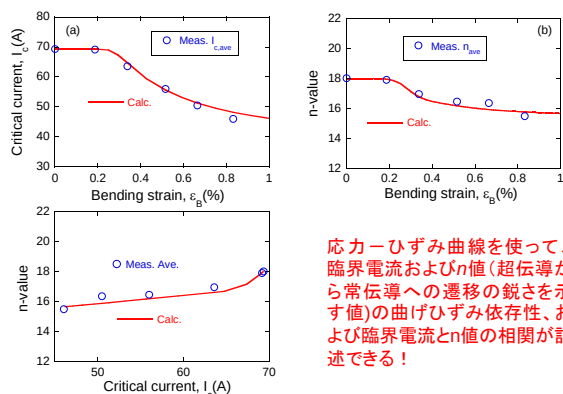
曲げ負荷時の損傷進展



領域0, 1, 2の面積率 と輸送する電流が臨界 電流に占める割合



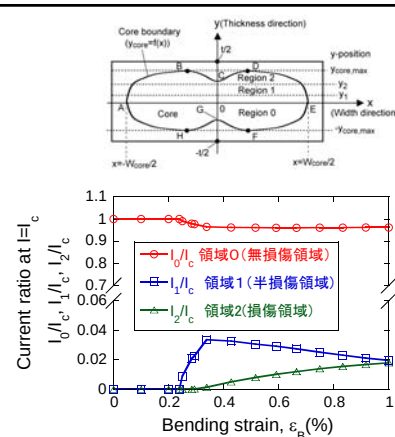
測定値(各負荷曲げひずみでの平均値)とモデル解析結果 領域0, 1, 2は並列回路、V-Iカーブを計算して臨界電流とn値を算出



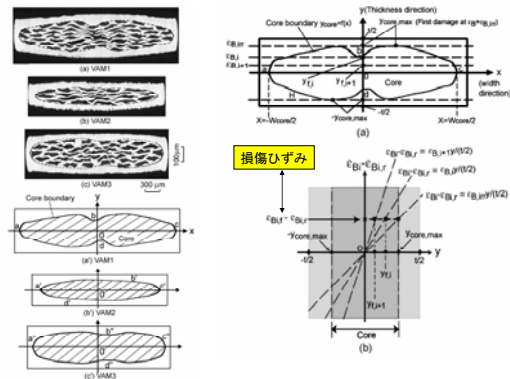
臨界電流の95% 以上は領域0(無 損傷領域)で輸送 される。

臨界電流は応力 -ひずみ曲線から 予測可能

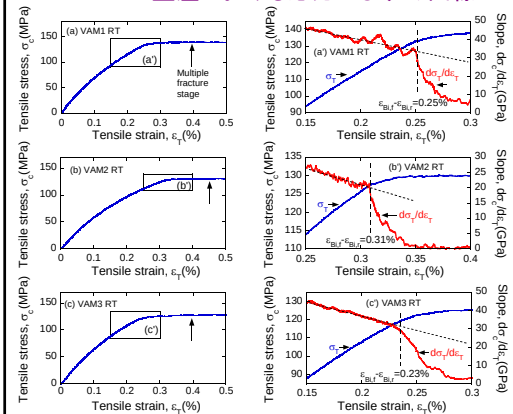
他社の仕様の異 なる試料で以下確 認する。



曲げ変形での損傷は試料長さ方向の引張ひずみで生じる。
損傷位置計算に基づく未損傷域の面積から、臨界電流が予測できる。

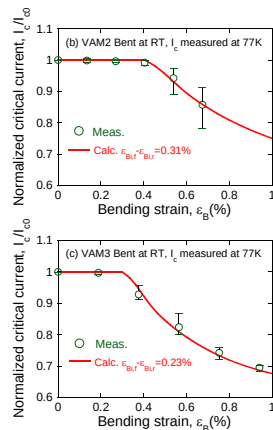
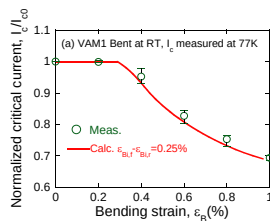


室温における応力-ひずみ曲線



曲げでは
損傷域、
半損傷域、
未損傷域
が存在する
ので、
損傷を引き
起こす
引張ひず
みは傾きが
10%
低下した
ひずみで
取る。

室温の引張応力-ひず
み曲線から77Kでの超伝
導特性の曲げひずみ依
存性が予測できる！



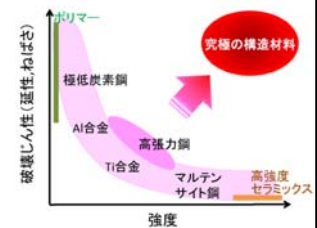
定年後の仕事と連絡先

国家課題対応型研究開発推進事業
元素戦略プロジェクト

構造材料元素戦略研究拠点

特任教授(予定)・企画マネージャー

京都大学がセンター拠点
東京大学、
物質・材料研究機構(NIMS)、
大阪大学、
産業技術総合研究所(AIST)、
日本原子力研究開発機構(JAEA)、
ファインセラミックスセンター(JFCC)
などと連携



連絡先
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学工学研究科材料工学専攻内
構造材料元素戦略研究拠点
Tel: 075-753-4834
Fax: 075-753-4841
E-mail: shojiro.ochiai.54n@st.kyoto-u.ac.jp