

非破壊材料信頼性評価

志波 光晴

(独)物質・材料研究機構
材料信頼性評価ユニット

非破壊材料信頼性評価

志波 光晴

(独)物質・材料研究機構・材料信頼性評価ユニット 非破壊評価グループ

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

SHIWA.Mitsuharu@nims.go.jp

非破壊材料信頼性評価とは、非破壊的な計測手法を用いて材料の信頼性を評価しようとするものであり、(独)物質・材料研究機構(NIMS)においては、非破壊評価グループが設立された2008年より取り組まれてきた。本講演においてはその背景と課題、及び具体的な取り組みについて述べる。

信頼性工学は、機械、エレクトロニクス、システムあるいはシステムの部品の試験データや故障に関するデータをもとに、システムの供用年数の期待値や期待故障率、あるいは故障から故障までの時間間隔の期待値などを予測するために発展し、構造物においては多くの部位・部材から構成されている一つのシステムとして、各要素の状態をデータ化し、供用中の故障寿命分布、信頼度関数、故障率が求められてきた。一方、「非破壊検査」は、材料や構造物の有害な欠陥を超音波や放射線等の計測手法を用いて非破壊的に検出することを目的に行われてきた。さらに、非破壊検査で用いられてきた計測技術を中心に詳細な計測や解析を行うことで、材料組成、強度や靱性等の力学特性、寿命等を評価する「非破壊評価」がある。非破壊検査や非破壊評価における欠陥の判定基準として用いられているのが「破壊力学」である。「材料力学」では、欠陥(き裂)を有しない材料を対象に強度等の力学特性評価が行われるのに対し、破壊力学では、欠陥(き裂) a を有する材料の破壊強度(破壊靱性 K_{Ic})を負荷応力 σ との関係($K_{Ic} = \sigma(\pi a)^{1/2}$)により評価が行われている。非破壊検査や評価においては、許容寸法以上の欠陥 a を検出しの種類(例えばクラックかボイドか)、位置、寸法等を定めることで合否が判定される。

その中であって、「材料信頼性」は、疲労、腐食、クリープ等の時間依存型破壊に対する材料を、主に破壊試験によって評価が行われていた。平滑材のき裂や損傷の発生から進展挙動については、途中止め試験による断面組織観察等の冶金学的な手法により評価が行われてきた。非破壊材料信頼性評価においては、破壊の起点となる初期欠陥を同定し、その発生(crack nucleation)から合体(crack initiation)・進展(crack propagation)を非破壊的に検出し、解析を行うことで損傷度、余寿命といった信頼性に関する諸特性を評価しようとするものである。検出対象となる欠陥寸法や諸現象は、非破壊検査で検出する寸法に比べて、1桁以上小さく材料組織とほぼ同じスケールとなることから新たな計測手法の開発から現象に対する理解が必要となることも多い。

NIMS内においては、疲労、クリープ、腐食等の材料試験グループ、計測デバイス開発グループ、材料開発グループ、計算機シミュレーショングループ、データベース・データシートと連携した分野横断の非破壊評価クラスターをつくり共同研究を行ってきた。

同時にNIMS外においては、(独)産業技術総合研究所(AIST)と、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)が研究開発するロケット等を対象とした高度信頼性が要求されるような非破壊信頼性評価手法をNIMSが保有する物質・材料評価技術、AISTが保有する先端計測技術と構造物の検査技術を基礎技術として融合させ、従来にはなかった材料-構造-システムと一体化した応用技術の開発を行ってきた。

これらの成果はまだ開発途上のものが多いが、クリープ、疲労、腐食及びロケットを対象とした構造物検査の具体的な事例について紹介する。

非破壊材料信頼性評価

志波 光晴
非破壊評価グループ
(独)物質・材料研究機構

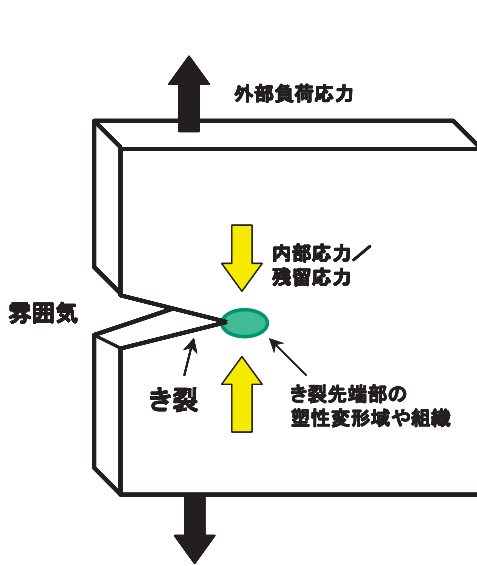
2014/01/16

第24回RACEコロキウム

1

目次

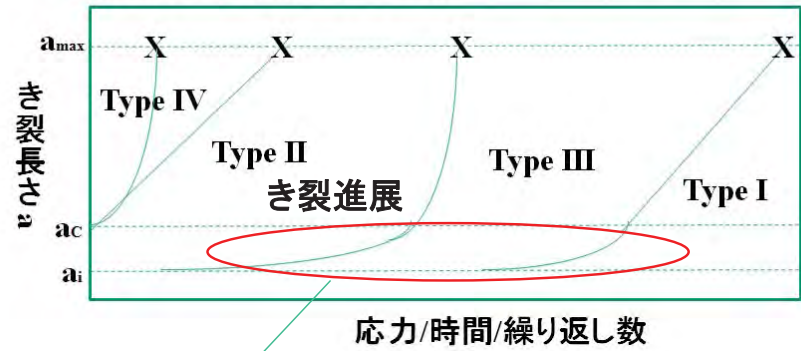
- **はじめに -非破壊材料信頼性評価とは-**
 - 材料劣化とき裂進展挙動・非破壊測定の原理と手法
 - 非破壊材料信頼性評価の概念
 - 検査とクライテリアの考え方 -破壊力学/信頼性工学的検査、モニタリング-
- **非破壊材料信頼性評価研究例**
 - クリープ: 溶接部の溶接後熱処理温度、クリープ損傷評価
 - 疲労: 超音波疲労試験時の損傷進展評価(非線形超音波・AE)
 - 腐食: 液滴SCC試験によるき裂進展評価(AE、VMS)
- **構造物検査、社会インフラへの取り組み**
 - NIMS-AIST-JAXA非破壊信頼性評価に関する研究成果
 - 今後の研究課題



き裂進展Type例

- Type I: 健全材の平滑材試験
- Type II: 健全材の切り欠き材試験
- Type III: 短時間の疲労・クリープ
- Type IV: 長時間の疲労・クリープ・SCC

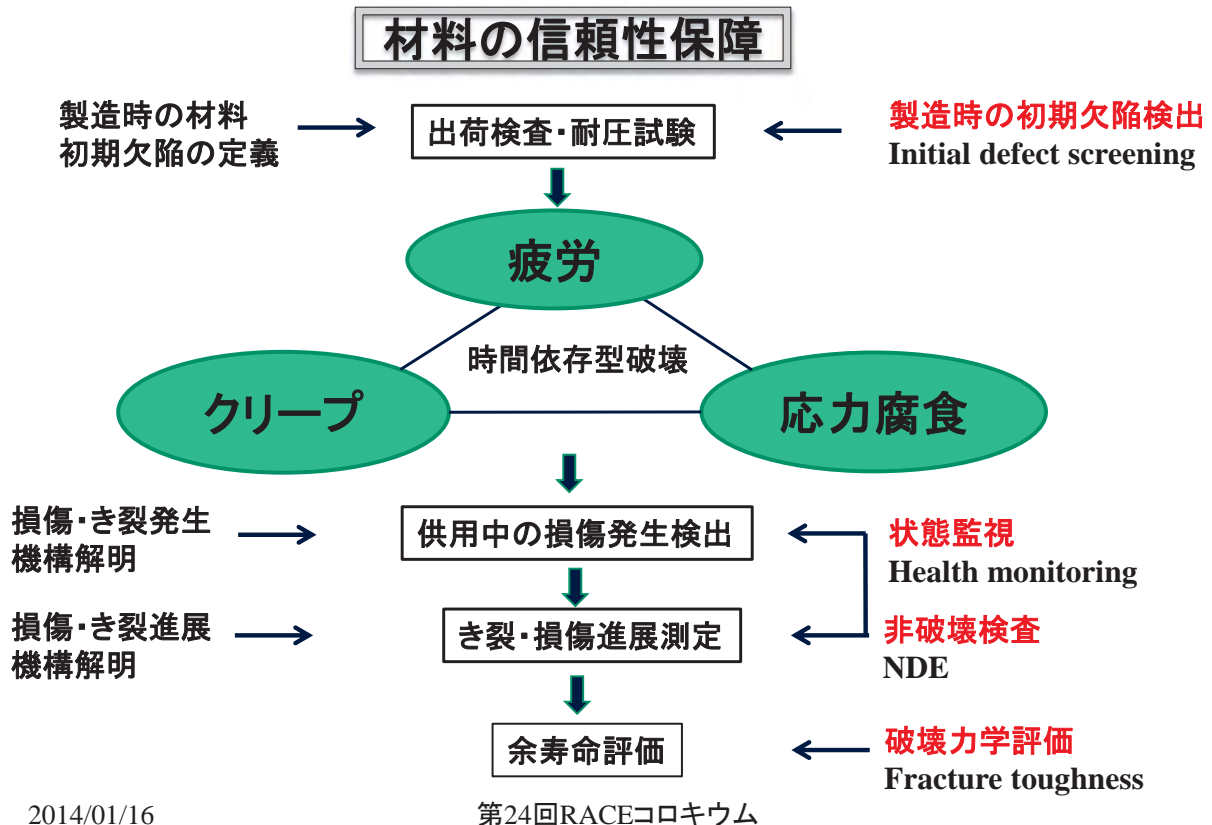
		き裂(初期欠陥)	
		なし	あり
劣化	なし	Type I	Type II
	あり	Type III	Type IV



き裂核生成(劣化・損傷進展)

原理	手法	基本パラメータ	備考
弾性波	振動、音波、超音波、アコースティック・エミッション(AE)	透過、反射、減衰、吸収、散乱、定在波、共振、高調波、分調波、AE事象	力学特性である弾性や非弾性特性と関連
電気	直流電圧・電流、交流電圧・電流、	導電率(電気抵抗)、複素導電率、位相、浸透深さ、高調波、渦電流、表面電位	欠陥検出、材質評価、材料組織や転位と関係
磁気	直流磁化、交流磁化	透磁率、複素透磁率、磁気抵抗、自発磁化、漏洩磁束	欠陥検出、材質評価、材料組織や転位と関係
電磁波	可視光、紫外線、赤外線、テラヘルツ波、マイクロウェーブ	透過、反射、減衰、吸収、散乱、複素導電率、複素誘電率、干渉	欠陥検出、材質評価
放射線	X線、γ線、中性子線	透過、反射、減衰、吸収、散乱、干渉	欠陥検出、応力・残留応力測定

非破壊材料信頼性評価



破壊力学的検査法 -鋼構造物の非破壊検査とクライテリア-(1-1)

・蒸気機関のボイラー事故

18世紀のイギリス産業革命時の主役で、多くの爆発事故を引き起こした。材料・機械の分野で安全設計、信頼性保証の研究が続けられてきた。

・材料力学による構造物の強度評価

欠陥や損傷の発生がない臨界応力 σ_c を応力 σ 、弾性率 E 、ひずみ ε より、

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\sigma \geq \sigma_c$$

・破壊力学による評価

欠陥 a や損傷が存在する材料・構造物の臨界応力拡大係数 K_c を、

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}$$

$$K \geq K_c$$

・非破壊検査によるき裂寸法測定法の進展

原子力発電設備の疲労き裂を対象に維持規格が制定
(Boiler and Pressure Vessel Committee (ASME) Section XI)
米国石油協会(API)においても制定

・非破壊検査による欠陥寸法測定と破壊力学によるクライテリアを 基にした診断法

Risk Base Inspectionとして鋼構造のプラント機器の検査

・橋梁等の鋼構造物の主な損傷形態

常温における腐食や疲労
検出欠陥寸法は大きいものの検査対象領域が広がる
産業機器の手法をそのまま適用するには大きな課題
広範囲で高速な損傷・欠陥検出手法が求められる。



瀬戸大橋の車道を支える鉄製の溶接継手部分にあったき裂＝本州四国連絡高速道路提供

ポルトランドセメント(現代のコンクリートに使用)

鋼とほぼ同じく19世紀に発明されたモルタル材料

コンクリート

モルタルに骨材を加えた粒子強化複合材料
引張強度はほとんどなく圧縮強度が設計に用いられる。

鉄筋コンクリート

コンクリートに引張強度を持たせるために複合材料化されたもの
材料としての構造は繊維強化複合材料に近い

破壊進展過程

累積損傷: 単一のき裂の発生、進展ではなく、複数のき裂が発生して合体、進展して破壊に至る



破壊力学的検査法

-鋼構造物の非破壊検査とクライテリア-(1-4)

非破壊検査法の課題

破壊力学によるクライテリアをそのまま適用するには多くの課題
き裂検出と寸法測定による金属材料の非破壊検査法をそのまま適用できない
コンクリート構造物はFRPなどの繊維強化複合材料と同様の課題

複合材料の破壊のクライテリア

損傷力学の損傷量(硬さ、ダメージゾーン寸法等)
非破壊的に測定する手法が未確立

複合材料の非破壊検査の課題

検出対象とする欠陥が単一のき裂ではない
金属材料で確立された位置や大きさを測定する非破壊検査法を用いても、対象とする欠陥を検出することにはならない
材料の個々の欠陥を検出できたとしても、複合材料特有の**累積損傷機構**に対応した**合理的な合否判定基準**がないため「測定」できても「検査」できない

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

9



信頼性工学的検査

-複合材料構造物の健全性評価 -(2-1)

信頼性工学

機械、エレクトロニクス、システムあるいはシステムの部品の試験データや故障に関するデータ

システムの供用年数の期待値や期待故障率、故障から故障までの時間間隔の期待値などを予測

橋梁などの構造物を多くの部位・部材から構成されている一つのシステムとし、各要素の状態をデータ化、供用中の故障寿命分布、信頼度関数、故障率

構造物の安全性

構造物の信頼性理論(theory of structural reliability)

安全性理論(theory of structural safety)



それに関係する様々な量のばらつきや不確実性を考慮して、確率論的な立場から評価する方法

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

10

荷重－耐力係数設計法

耐力や荷重のばらつきを簡便な形で構造計算のなかに取り入れる
安全性の合理的な確保として世界の構造物計算規定に
基礎パラメータ
構造部の**強度(耐力)**、**負荷**となる**外力**

コンクリートの耐力

円柱コアの圧縮破壊試験
非破壊的評価法: 弾性波の音速や反発硬さ(シュミットハンマー等)
局所的な**サンプリングデータ**により、統計手法を用いて全体を評価

荷重－耐力係数設計法に基づく検査

金属材料のように初期欠陥を含む供用中の欠陥検出と寸法測定による「**最弱部位**」の**決定論的評価**ではなく、
サンプル部位の強度情報による**統計論的な最弱部の損傷推定**(損傷発生確率)

機械診断

検査のクライテリアを力学的に設定できない例
化学プラントの回転機等においては、加速度計等で振動を測定
傾向診断: 定期的に測定を行いその変化傾向から異常値を設定して判定する

破壊力学的検査法や信頼性評価的検査法

→ **力学特性と測定量の相関**から評価を行う

機械診断法

→ ひとつの測定パラメータの負荷条件に対する変化傾向や**時系列変化**といった**応答特性の自己変化量**に基づく検査法



自己変化量検査法

-機械診断、オンラインモニタリング-(3-2)

民間航空機ジェットエンジンのモニタリング情報ビジネス

エンジン本体設置した圧力、温度、振動等の複数のセンサーのデータ
全世界に設置した無線基地局ネットワークを通じてデータセンターで収集
トレンド分析や設定された異常値をしきい値とする損傷発生解析

データ解析結果は、24時間体制で航空会社に提供
運行中のタービンブレードの損傷に起因する緊急着陸
着陸時の緊急整備といった突発事故回避
効率的な定期清掃及び定期修繕(部品交換)

安全性を維持しながら経済的な保全を行う手法として活用

現状の診断

タービンブレードなどの主要部品の劣化評価には至っていないが、大量データの蓄積(ビッグデータ)と解析(データマイニング)による劣化評価法の開発が進められている。

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

13



自己変化量検査法

-機械診断、オンラインモニタリング-(3-3)

モニタリング分野

センサー情報化ネットワーク
ビッグデータとデータマイニングが大きな技術・ビジネストレンド

力学等の分野では、従来の解析解では解けない問題を有限要素法や差分法等の数値計算で解くのと同様に、モニタリング分野では大量のデータより現象の支配方程式や判定基準を導き出すデータマイニングのアプローチが盛んに行われている。

各種センサーを用いた時系列計測データの相関関係及び傾向分析に基づくクラテリア開発が新しい診断法の特徴

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

14

- はじめに -非破壊材料信頼性評価とは-
 - 材料劣化とき裂進展挙動・非破壊測定の原理と手法
 - 非破壊材料信頼性評価の概念
 - 検査とクライテリアの考え方 -破壊力学/信頼性工学的検査、モニタリング-
- **非破壊材料信頼性評価研究例**
 - **クリープ**: 溶接部の溶接後熱処理温度、クリープ損傷評価
 - 疲労: 超音波疲労試験時の損傷進展評価(非線形超音波・AE)
 - 腐食: 液滴SCC試験によるき裂進展評価(AE、VMS)
- **構造物検査、社会インフラへの取り組み**
 - NIMS-AIST-JAXA非破壊信頼性評価に関する研究成果
 - 今後の研究課題

- **製造時における評価**
 - 溶接後熱処理(PWHT)
 - 残留応力除去、韌性回復(溶接金属)
 - **施工後の溶接後熱処理温度(=組織)**を簡便に評価
- **供用時における評価**
 - **組織観察(レプリカ)法より簡便なクリープポイド検出方法**
 - **クリープ損傷**
= 熱時効(組織変化) + 応力負荷(非弾性変形)
 - **熱時効の影響を考慮した損傷評価方法が必要**

・ PWHT温度評価

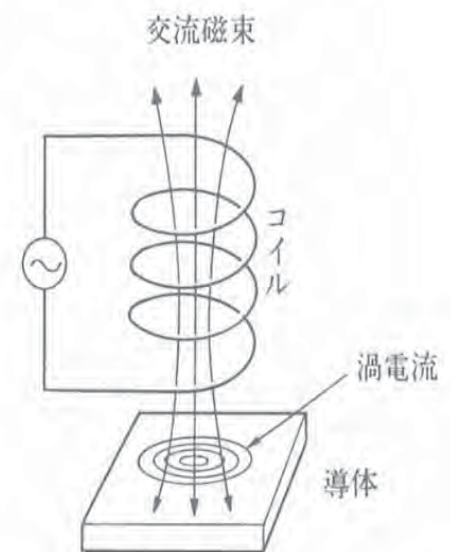
- 材 料:板継手(2.25Cr-1Mo)、管継手(1.25Cr-0.5Mo)
- 対 象:溶接金属
- PWHT条件:853-1063K(1H)

・ クリープ損傷評価

- 材 料: 2.25Cr-1Mo鋼
- 対 象:母材, 再現HAZ
- PWHT温度:なし、953K、993K、1033K
- クリープ:873K, 39&54MPa

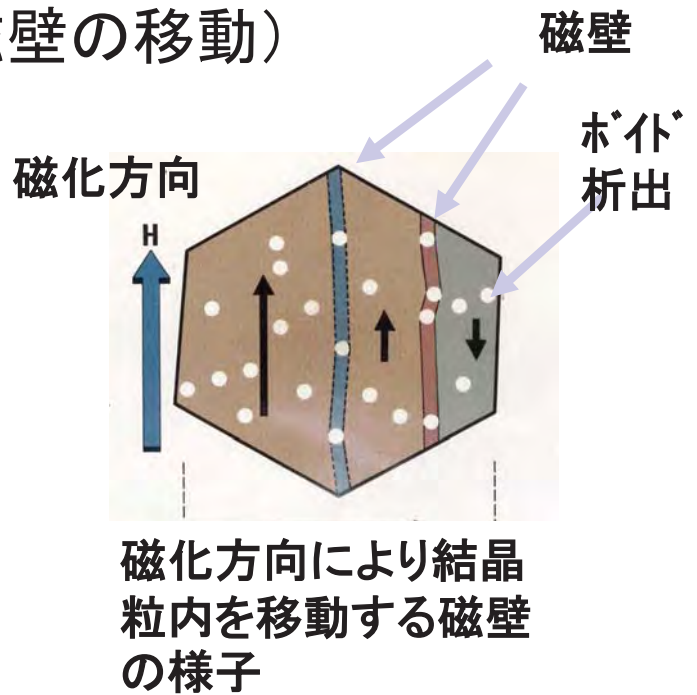
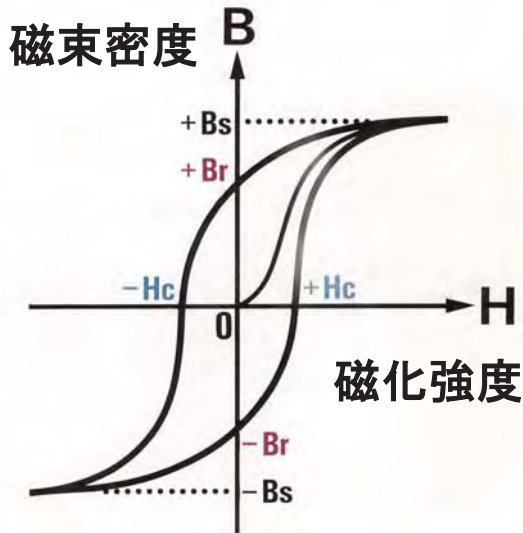
金属の磁化特性

特 性		材料例	磁化特性	
			渦電流	磁束変化
金 属	強磁性	炭素鋼 合金鋼	中	大
	常磁性	ステンレス鋼 アルミニウム	大	小

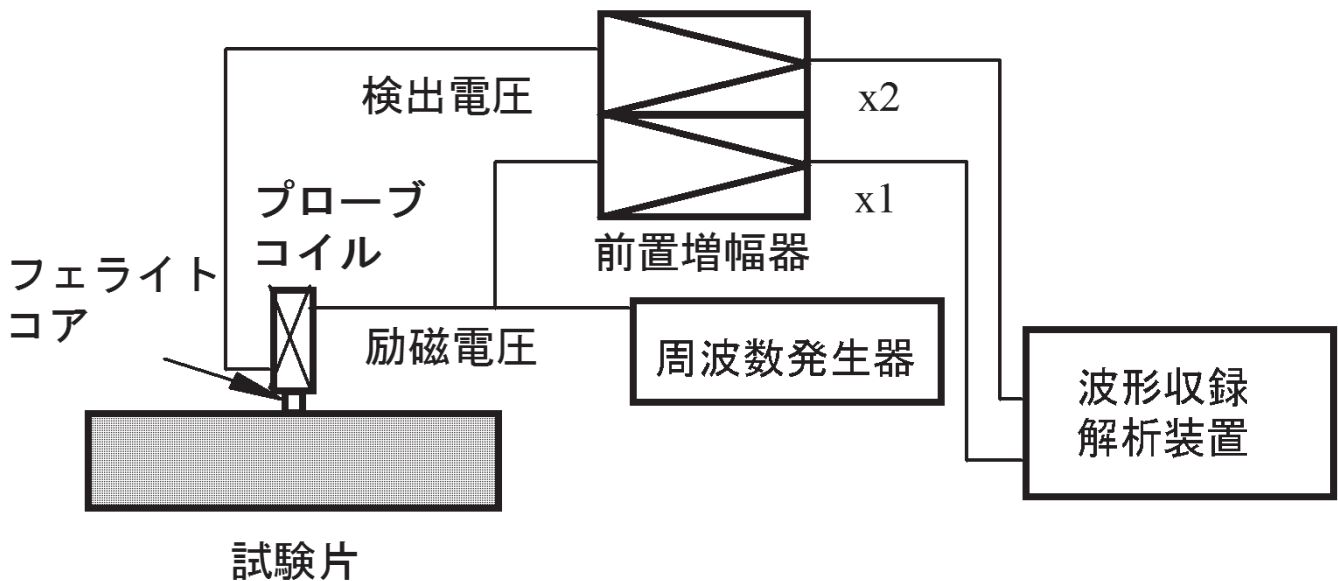


コイルによる磁化

磁化曲線と材料組織(磁壁の移動)



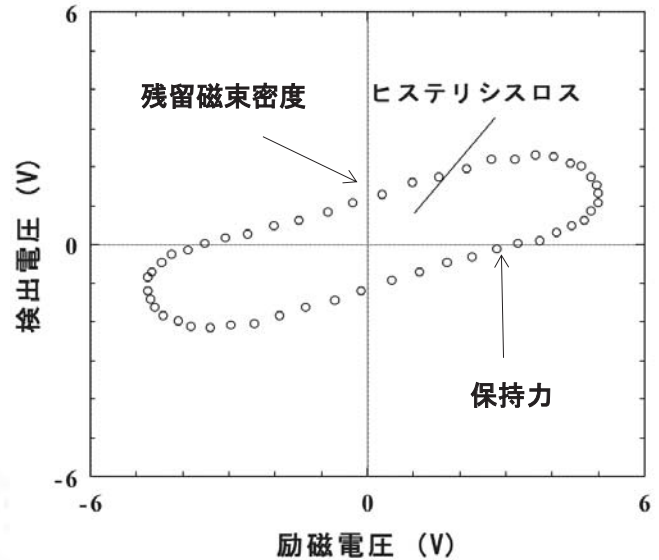
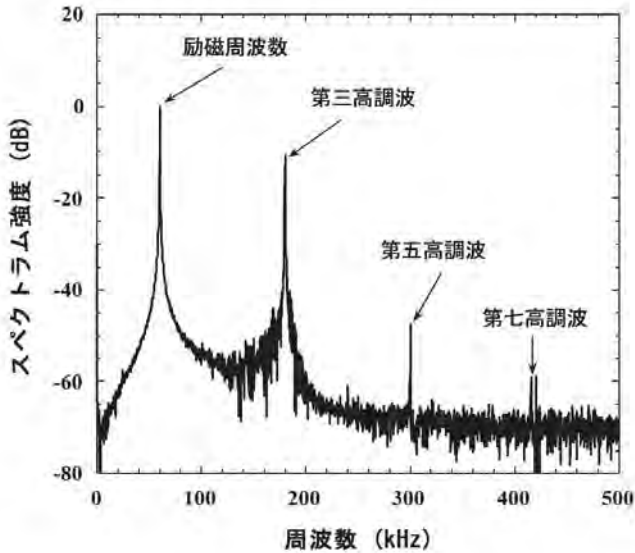
磁化による磁束密度の変化曲線は、クリープボイドや析出物により変化する



交流磁化法の測定装置構成

測定原理

強磁性材の交流磁化特性

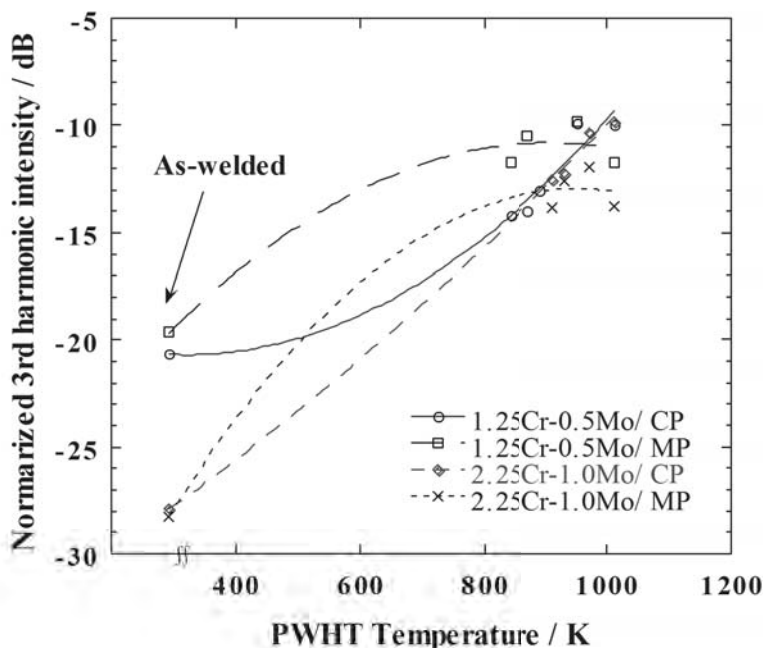


2014/01/16

第24回RACEコロキウム

21

PWHT温度と第三高調波比



試験片の表面状態

CP:酸洗

MP:機械研削

酸洗、回帰曲線

1.25Cr-0.5Mo (Fh_3^1) and 2.25Cr-1Mo (Fh_3^2)

T:温度

$$Fh_3^1 = -18.24 - 0.015T + 2.367 \times 10^{-5} T^2 \quad (1)$$

$$Fh_3^2 = -33.51 + 0.017T + 6.234 \times 10^{-6} T^2 \quad (2)$$

相関係数: (1) = 0.98, (2) = 0.99.

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

22

- Addition to these two components, an **anhysteretic magnetization** M_{an} is introduced,

$$M_{an} = M_s \left(\frac{\coth(H_e)}{a} - \frac{a}{H_e} \right) \quad (1)$$

$$H_e = H + \alpha M \quad (2)$$

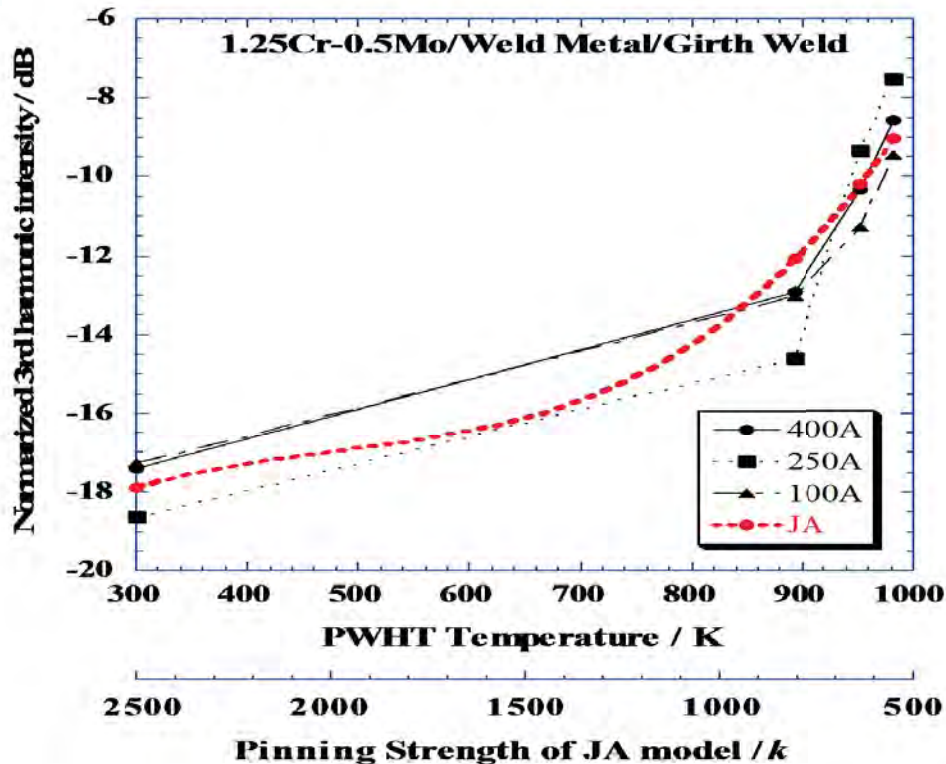
H : the applied magnetic field,
 H_e : the effective field,
 M_s : the saturation magnetization,
 a : a coefficient scaling the H_e ,
 α : a coefficient evaluating the interaction of domains statistically.

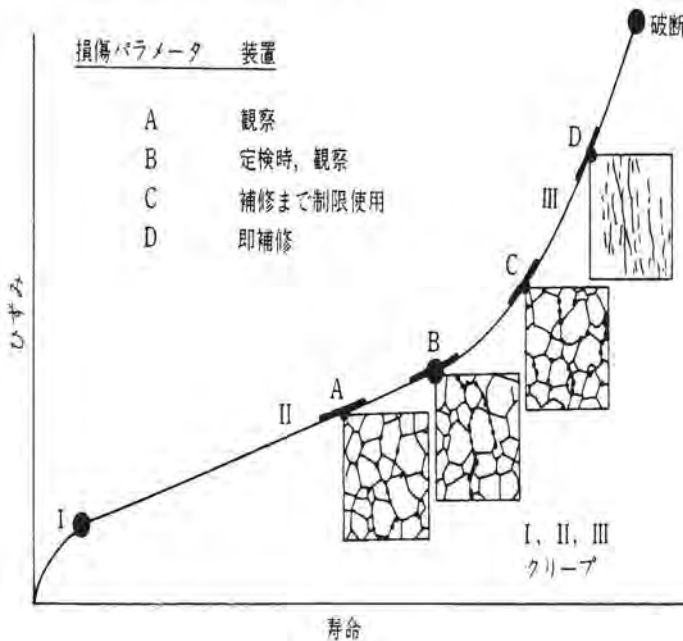
- Based on the M_{an} the **magnetization** M is formulated as,

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{1}{\delta k / \mu_0 - \alpha(M_{an} - M_{irr})} (M_{an} - M_{irr}) \quad (3)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad M = M_{irr} + M_{rev} \quad (4)$$

Where $\delta = \pm 1$, depending on whether the H is increasing or decreasing, the coefficient k represents the **pinning strength** and the coefficient c quantifies the **share of the reversible component** of the total magnetization.



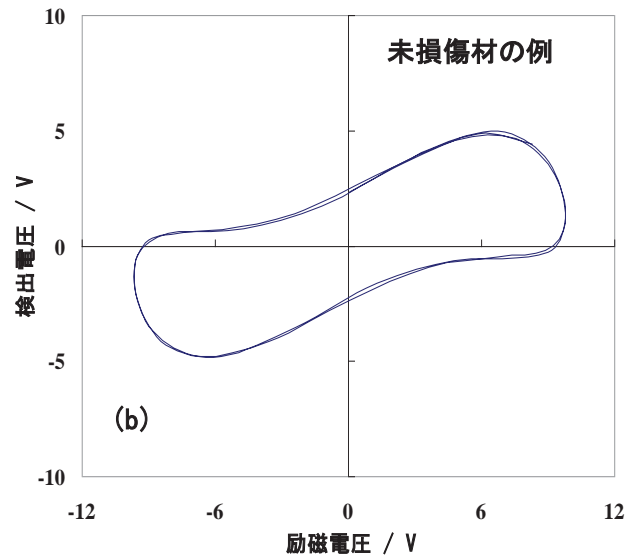
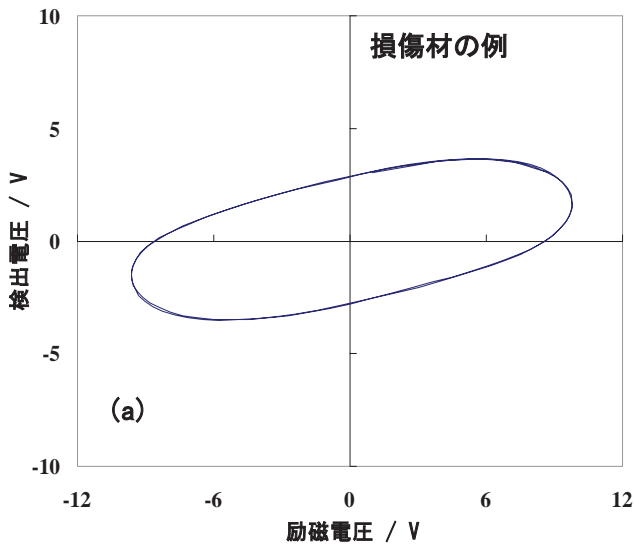


損傷形態	非破壊損傷検出法
IV. き裂	<ul style="list-style-type: none"> 超音波探傷 浸透探傷 磁粉探傷 電気抵抗 渦流探傷 放射線透過試験
III. 微小き裂	<ul style="list-style-type: none"> 組織観察(レプリカ)法 物理特性測定法 超音波特性、電磁気特性 放射線特性
II. クリープポイド	<ul style="list-style-type: none"> 組織観察(レプリカ)法 物理特性測定法 超音波特性、電磁気特性 放射線特性
I. 組織変化	<ul style="list-style-type: none"> 組織観察(抽出レプリカ)法 電気化学的試験 物理特性測定法 硬さ、X線回折、電磁気特性

大友、木原、北川、明石:「プラント機器の損傷評価と余寿命予測技術・例」、第3版、(1992)、応用技術出版、p59。

機構		金属組織の現象	非破壊評価法	備考
クリープ損傷	熱時効	軟化 析出 粒粗大化	硬さ測定 組織観察 組織観察	表面のみの特性
	応力損傷	塑性変形 粒性状変形 ポイド・割れ	— 組織観察 組織観察	表面研磨 腐食等前処理必要

簡便な測定で表面近傍の評価が可能な非破壊評価法が求められる

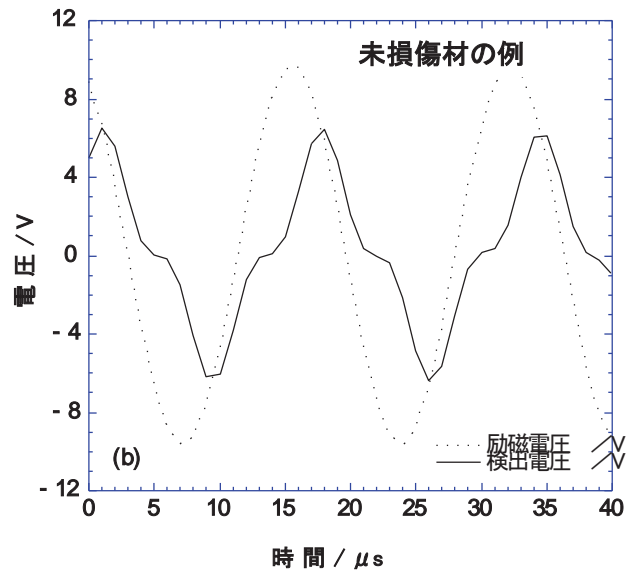
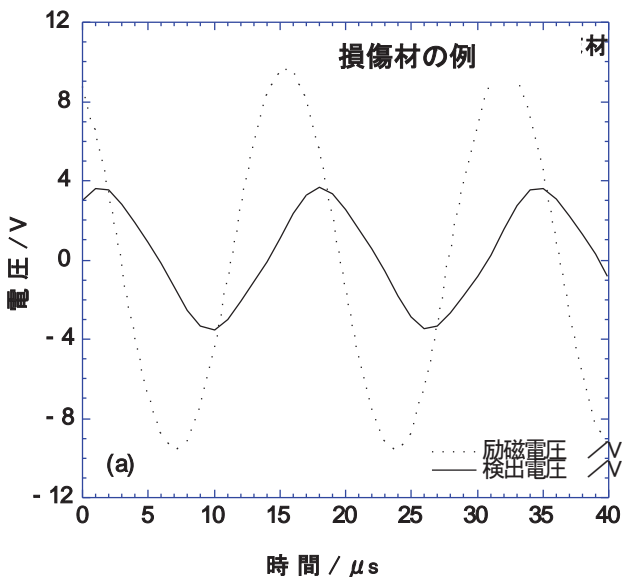


交流磁化法のリサーチ波形例

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

27



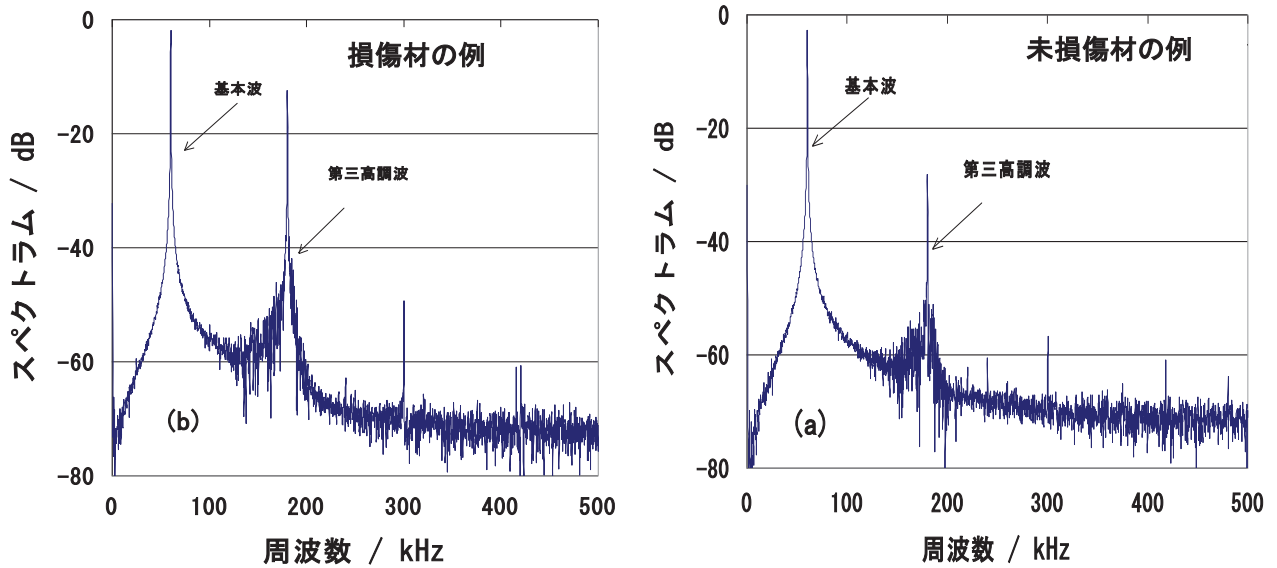
交流磁化法の励磁・検出波形例

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

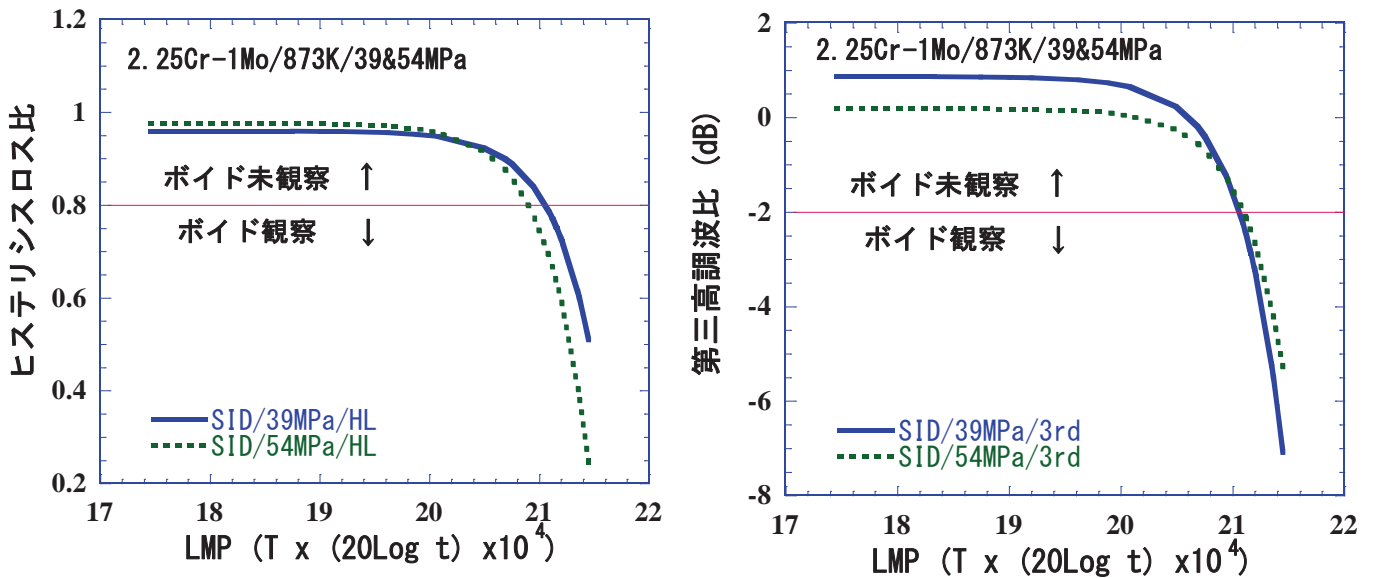
28

交流磁化法による評価(5)



励磁・検出波形例

交流磁化法による評価(6)



2.25Cr-1Moのクリープ損傷評価(ボイド検出)

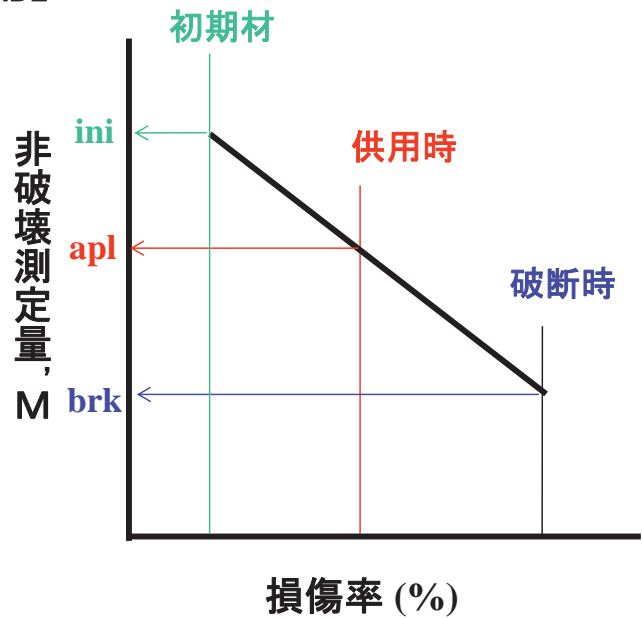
非破壊的なクリープ損傷率 D_{NDE} (%)

$$D_{NDE} = \frac{(M_{apl} - M_{ini})}{(M_{brk} - M_{ini})} \times 100$$

非破壊的な余寿命 R_{NDE} (%)

$$R_{NDE} = 100 - D_{NDE}$$

- M_{ini} : 初期材の非破壊測定量
- M_{brk} : 供用応力 σ における破断時の非破壊測定量
- M_{apl} : 供用時の非破壊測定量



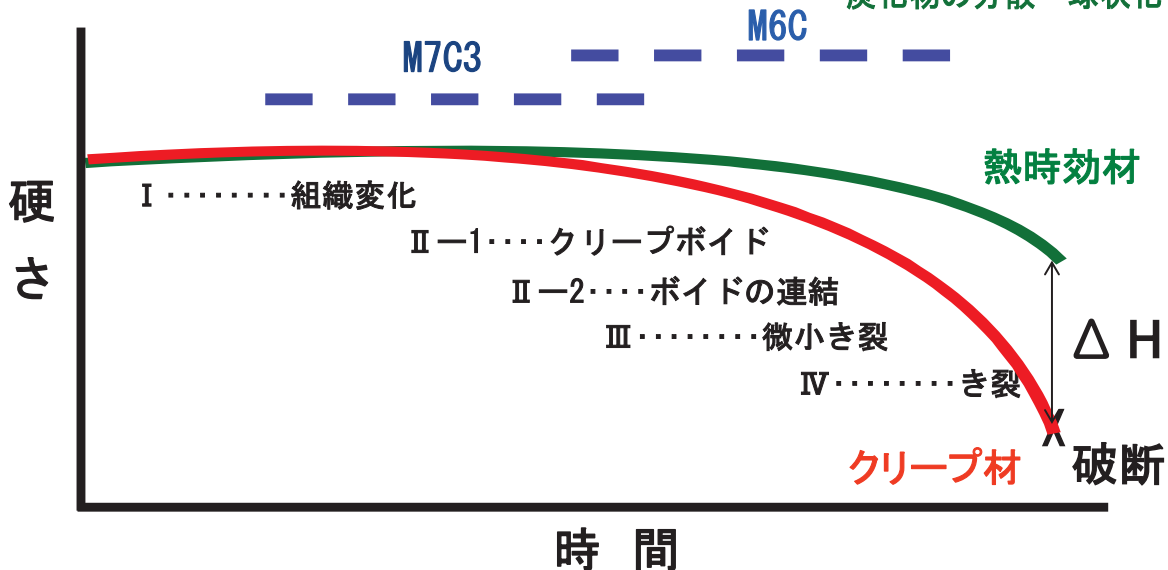
硬さ比による評価(1)

炭化物の析出

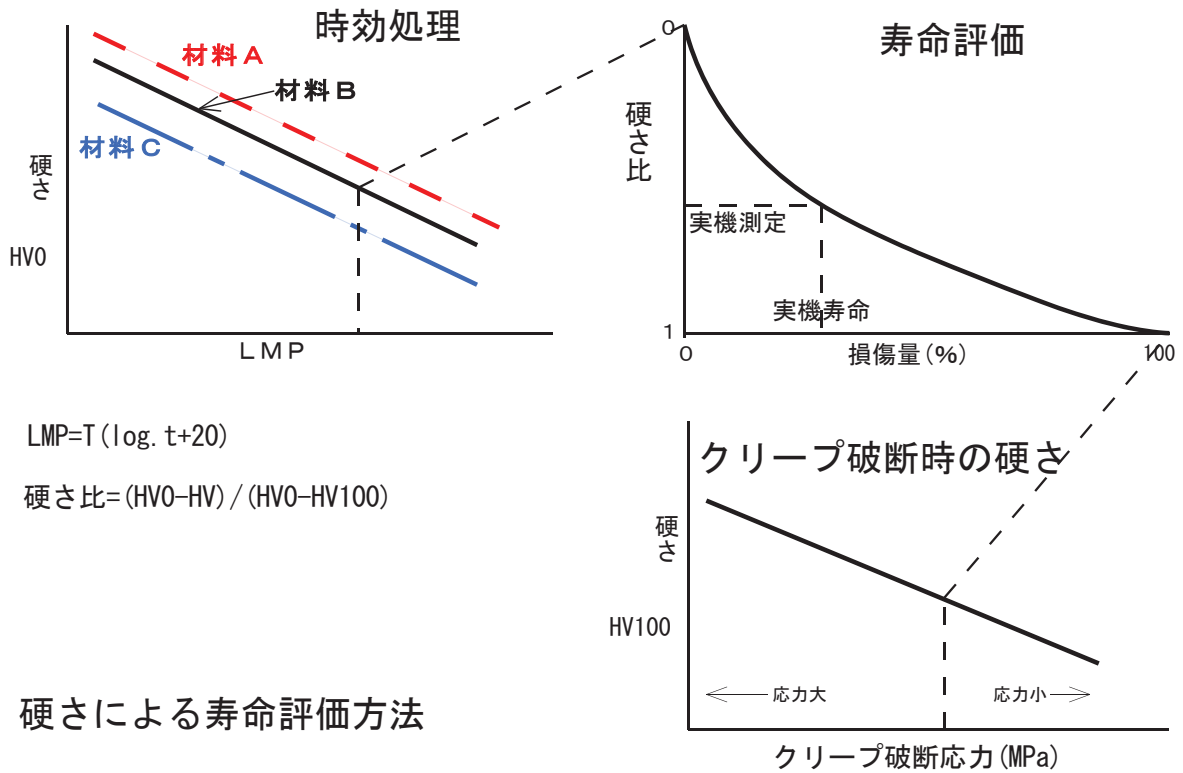
マルテンサイトラス境界炭化物分散・球状化
マルテンサイトラスの消失

炭化物の凝集・粗大化

炭化物の分散・球状化・均一化



硬さ比による評価(2)



2014/01/16

第24回RACEコロキウム

33

非破壊クリープ測定量

・クリープ時の非破壊測定量の時間変化の挙動において、組織変化に対する測定量の変化を基準(Case)に、応力損傷による影響をまとめたもの

事象	Case I (変化なし)			Case II (時間とともに減少)			Case III (時間とともに増加)		
	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIc	IIIa	IIIb	IIIc
熱時効: 軟化・析出・粒粗大化	→	→	→	↘	↘	↘	↗	↗	↗
応力損傷: 転位・塑性変形・ポイド	→	↗	↘	→	↗	↘	→	↗	↘
クリープ測定量	→	↗	↘	↘	→	↘	↗	↗	→

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

34

損傷分離(応力支配型損傷)によるクリープ損傷非破壊評価方法

$$M^{crp} = M^{agn} \otimes M^{SID}$$

$$M^{SID} = M^{crp} \otimes (M^{agn})^{-1}$$

M^{crp} :クリープ損傷時の非破壊的測定量

M^{agn} :熱時効時の非破壊的測定量

M^{SID} :応力支配型損傷量

非破壊的なクリープ損傷率 D_{NDE}^{SDI} (%)

$$D_{NDE}^{SDI} = \frac{(M_{apl} - M_{agn}^{LMP})}{(M_{brk} - M_{agn}^{brk})} \times 100$$

非破壊的な余寿命 R_{NDE}^{SDI} (%)

$$R_{NDE}^{SDI} = 100 - D_{NDE}^{SDI}$$

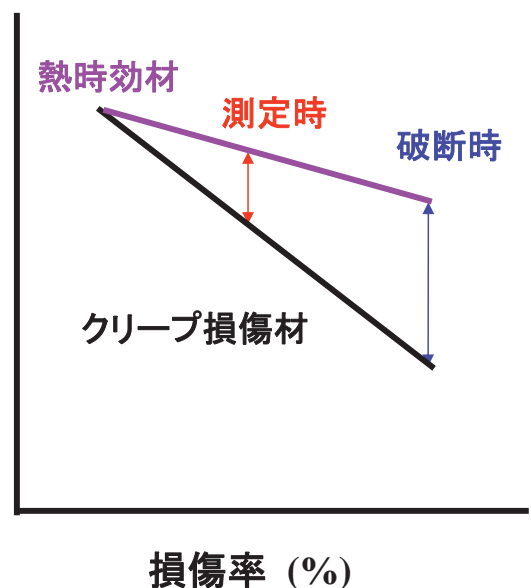
M_{brk} :破断時の非破壊測定量

M_{apl} :測定時の非破壊測定量

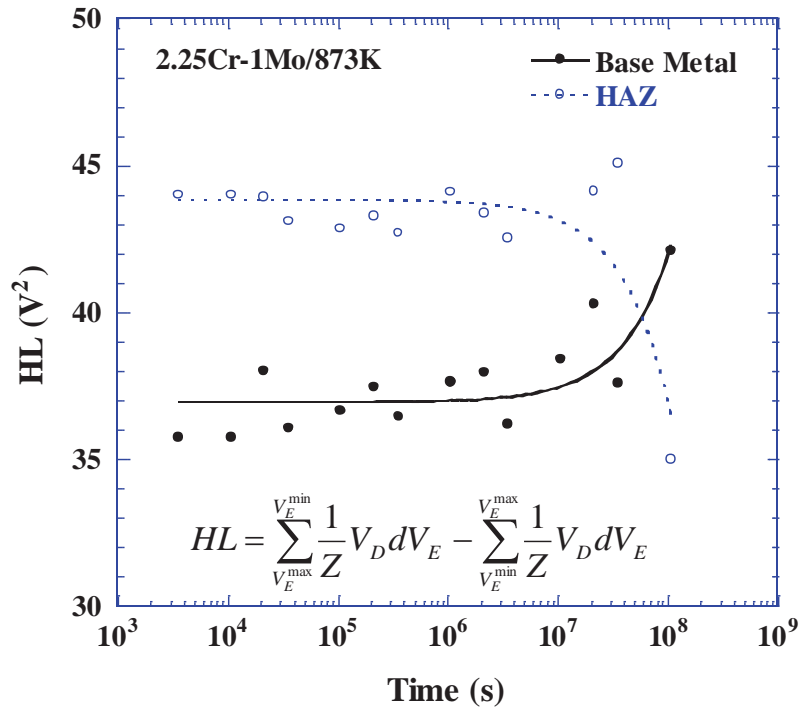
M_{agn}^{LMP} :測定時LMP熱時効材の非破壊測定量

M_{agn}^{brk} :破断時LMP熱時効材の非破壊測定量

非破壊測定量, M



クリープ損傷評価1： ヒステリシスロス特性(熱時効)

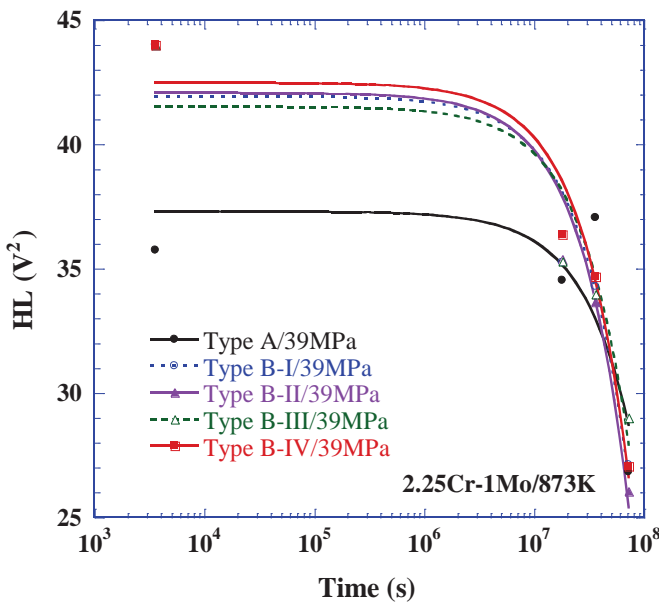


2014/01/16

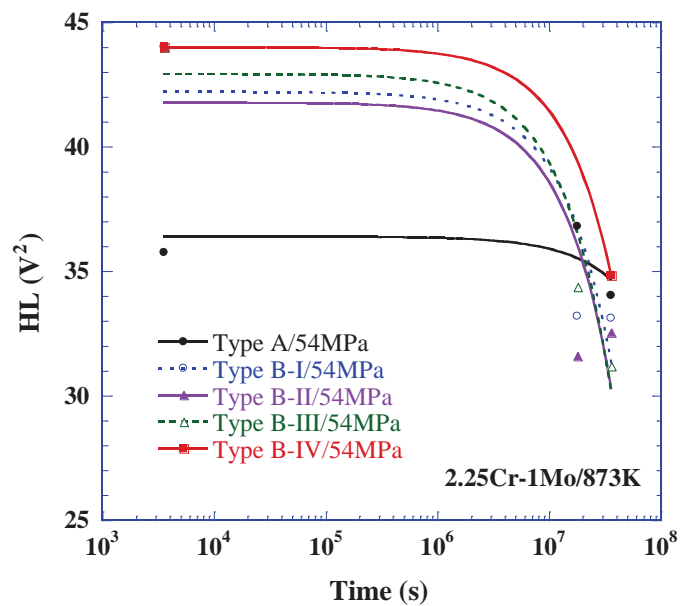
第24回RACEコロキウム

37

クリープ損傷評価2： ヒステリシスロス特性(クリープ)



(a) 39 MPa



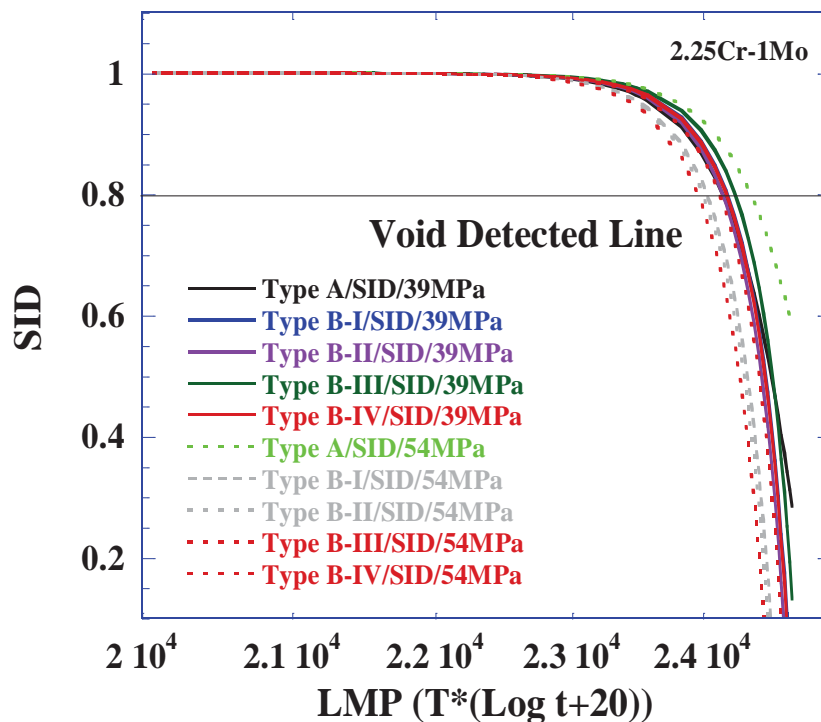
(b) 54MPa

回帰直線: $HL = a + bt$

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

38



2014/01/16

第24回RACEコロキウム

39

• 目的

- クリープ寿命を非破壊測定量に基づき評価する手法開発
- 非破壊測定量によるクリープ変形・損傷の素過程、素変数

• 背景(必要性、課題)

- 短時間で10万時間等のクリープ特性を評価する方法がない
- 高温クリープひずみ速度: 温度、負荷応力・ひずみ速度で変化
- 測定: 交流(AC)負荷変形より直流(DC)負荷変形特性を導出

• 新規性(解決方法、アプローチ)

- **内部摩擦** (Internal friction) より非破壊測定条件を導出
- 動的変形特性(波動)から静的クリープ特性を評価するモデル

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

40

高温クリープひずみ $\varepsilon_T(t)$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_T(t) - (\varepsilon_e + \varepsilon_a)$$

ε_e : 弾性ひずみ, ε_a : 非弾性ひずみ
 ε_p : 塑性ひずみ.

非弾性ひずみ ε_a のクリープ

$$\varepsilon_a(t) = Ct^{n_1} \quad \sigma < \sigma_{ys}$$

C : 温度依存係数
 n_1 : 弾性域での定数

クリープコンプライアンス $J_T(t)$ と損失コンプライアンス $J_2(\omega)$

$$J_T(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1(t)}{\sigma} = J_U(1 + ct^{n_1})$$

$$\frac{dJ_T(t)}{dt} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty J_2(\omega) \sin(\omega t) d\omega$$

$\varepsilon(t)$: 時間依存ひずみ; J_U : 負荷中のコンプライアンス

クリープと内部摩擦の関係

内部摩擦の式 (Debye)

$$\text{Tan}\phi(\omega, T) \approx \frac{J_2(\omega)}{J_U}$$

$$\text{Tan}\phi(\omega, T) = A \left[\omega \exp\left(\frac{H}{kT}\right) \right]^{-n}$$

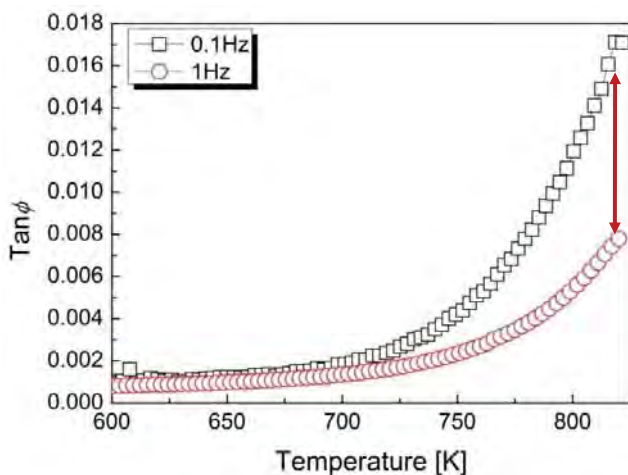
クリープと内部摩擦

$$\frac{dJ_T(t)}{dt} = \frac{2}{\pi} J_U \int_0^\infty \text{Tan}\phi(\omega, T) \sin(\omega t) d\omega$$

$$n_1 = n$$

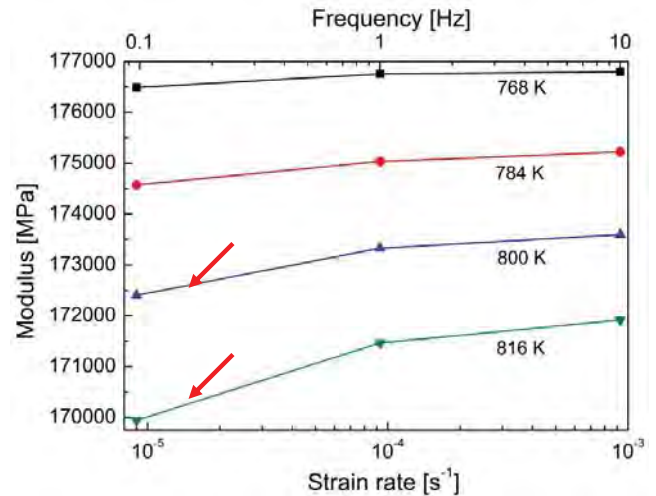
$$c(T) = \frac{2}{\pi n} \exp\left(\frac{-nH}{kT}\right) A \Gamma(1-n) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

内部摩擦

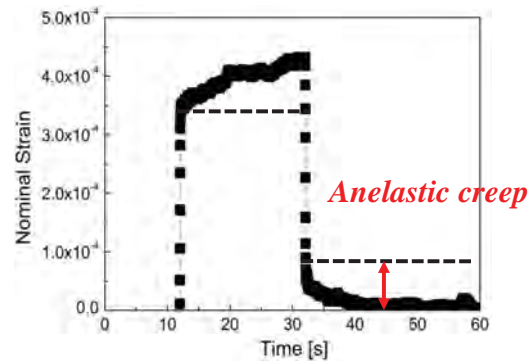
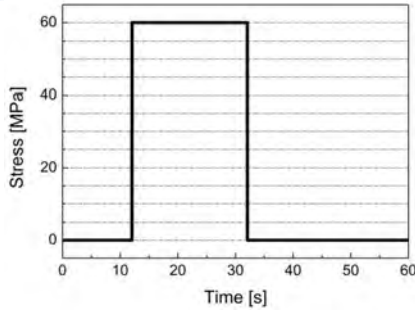


Influence of temperature on the internal friction of A542M (2.25Cr-1Mo) steel at 0.1Hz and 1Hz.

高温弾性率



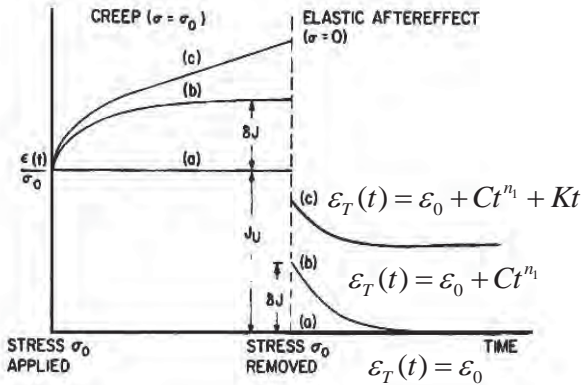
Effect of frequency on the modulus of A542M steel at different temperatures.



A542M steel, $\sigma_{ys}=343\text{MPa}$ at 873K

内部摩擦と高温瞬間引張り試験結果

$$\epsilon_a(t) = Ct^{n_{10}} \quad \sigma < \sigma_{ys}$$



Creep behavior at a given stress,
(a) ideal solid, (b) anelastic creep and (c) viscoelastic creep.

Method	A	H/eV	n_1	C
Internal friction	7332	2.8	0.31	5.14×10^{-13}
ASL testing	-	-	0.30	5.05×10^{-13}

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

43

目次

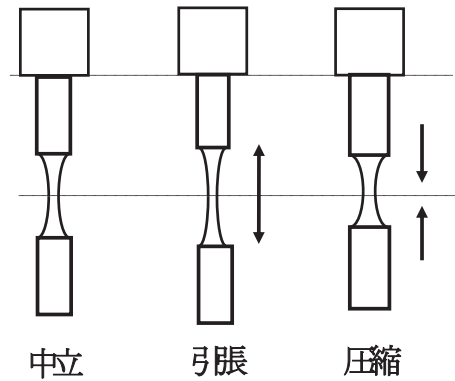
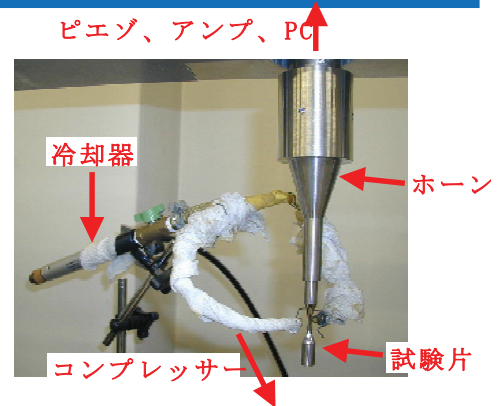
- はじめに -非破壊材料信頼性評価とは-
 - 材料劣化とき裂進展挙動・非破壊測定の原理と手法
 - 非破壊材料信頼性評価の概念
 - 検査とクライテリアの考え方 -破壊力学/信頼性工学的検査、モニタリング-
- 非破壊材料信頼性評価研究例
 - クリープ: 溶接部の溶接後熱処理温度、クリープ損傷評価
 - 疲労: 超音波疲労試験時の損傷進展評価 (非線形超音波・AE)
 - 腐食: 液滴SCC試験によるき裂進展評価 (AE、VMS)
- 構造物検査、社会インフラへの取り組み
 - NIMS-AIST-JAXA非破壊信頼性評価に関する研究成果
 - 今後の研究課題

1. 緒言 (1)超音波疲労試験

超音波疲労試験

- ・超音波疲労試験
 - 超音波ホーンを用いて振幅を増幅
 - 20kHz程度で試験片を共振
 - 正弦波による両振り(R=-1)
 - 試験片長手方向自由共振定在波で験中央部に応力付加

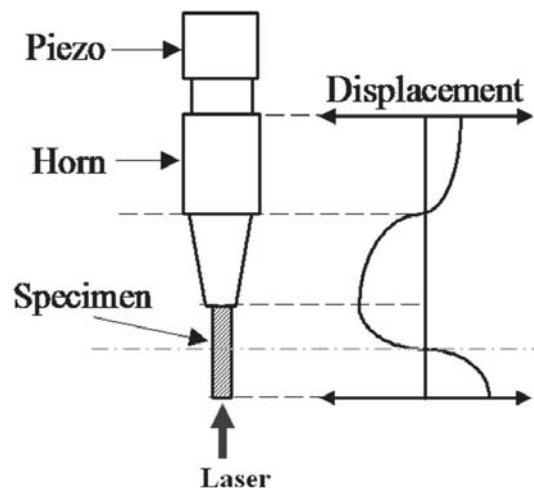
- ・NIMSにおける研究
 - 高強度鋼を対象に、ギガサイクル疲労特性や内部破壊(フィッシュアイ破壊)の起点となる介在物の寸法を評価する手法として実用化



1. 緒言 (2)超音波疲労の非破壊評価

非線形超音波・AE法

- ・非線形超音波法
 - 疲労損傷&大振幅の正弦波
 - 振動波形を試験片の自由端において検出
 - レーザ振動計: 広帯域で連続的に波形収録
 - 分調波や高調波による非線形超音波
 - アコースティック・エミッション(AE)解析
- ・疲労損傷進展の非破壊によるその場観察
 - 非弾性変形挙動
 - 転位挙動、塑性変形、双晶、変態
 - き裂生成、き裂進展挙動
 - 材質変化・劣化情報
 - 軟化、加工硬化、き裂核形成からき裂の発生、進展までを総合的評価。

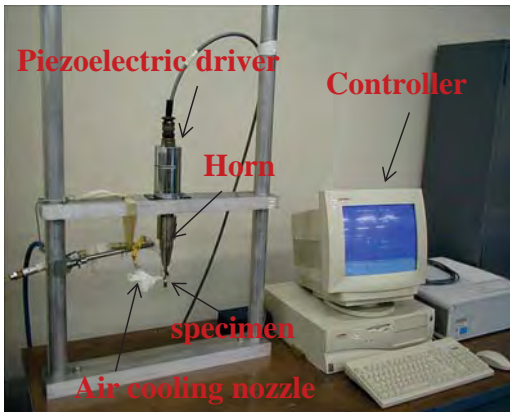
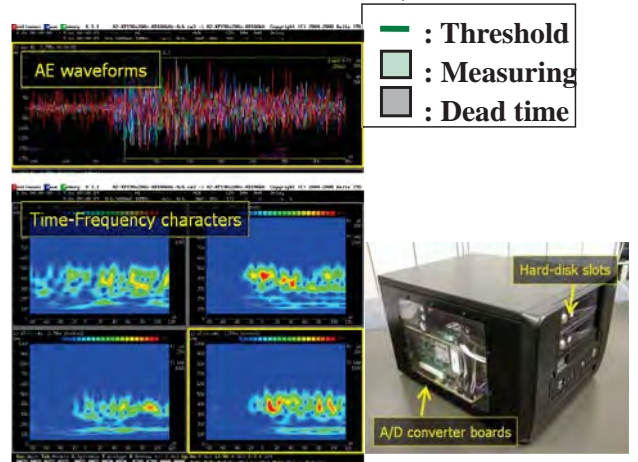
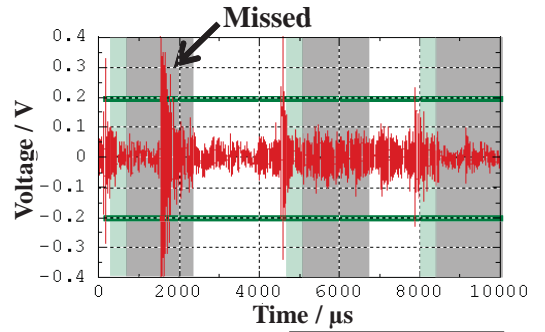


■ CWM system

- Continuous recording of waveform
- **NO** preset threshold and **NO** dead time
- Repeatables analyses by replaying of continuous waveform

■ Analysis

- Noise cut: continuous FFT & Wavelet
- AE: parameter calculation for events
- UT: Velocity, Attenuation
- Non-linear ultrasonic: Harmonics and Sub-harmonics
- Photo Acoustic Spectroscopy



Ultrasonic Fatigue Testing + LVM

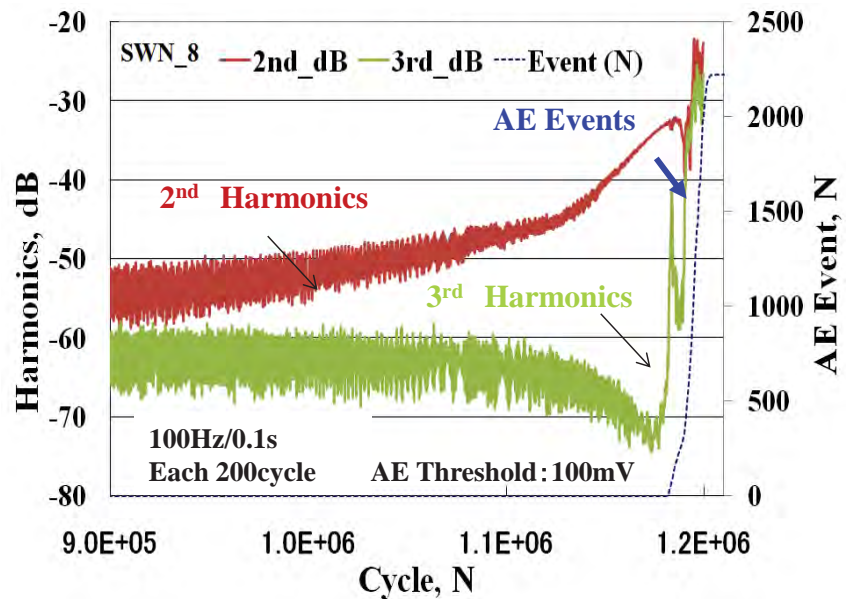
- Frequency : 20kHz
- Stress : 180-420MPa
- Measurement Freq. : 100Hz-1MHz

High strength low alloy steel (JIS SCM440)

Quenching: 1153K(30min)

Tempering: 473K(60min)

Vickers hardness : Hv:550-560



- 2nd Harmonics → Dislocation separate from pinning site
- 3rd Harmonics → Multiplication of dislocations
- AE (over 100kHz) → Micro crack generation

液体窒素環境の課題

- ・沸騰と安定冷却
77Kと常温に比べて200K以上低い
クライオスタット外部の超音波振動子は、超音波ホーンを介した進入熱源
沸騰対流により液面が変化して試験片の安定冷却が困難
- ・ミストの発生によるレーザ光路遮断
超音波振動により大粒の粒子によるミストが発生

対策

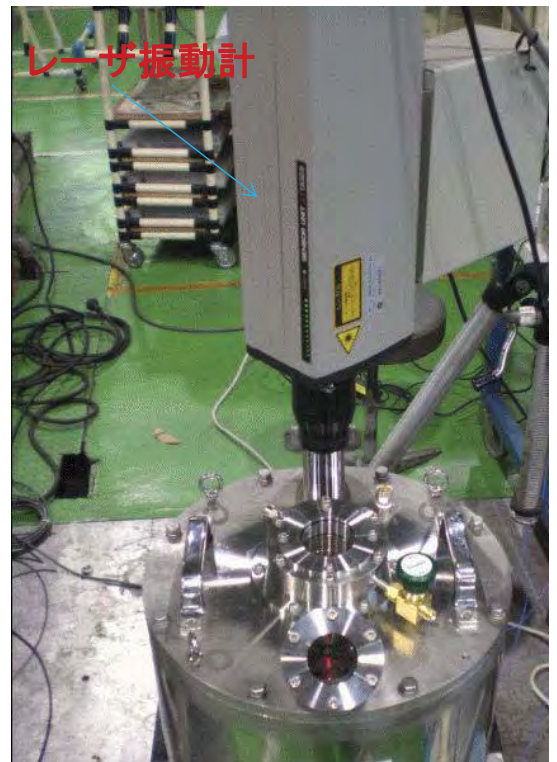
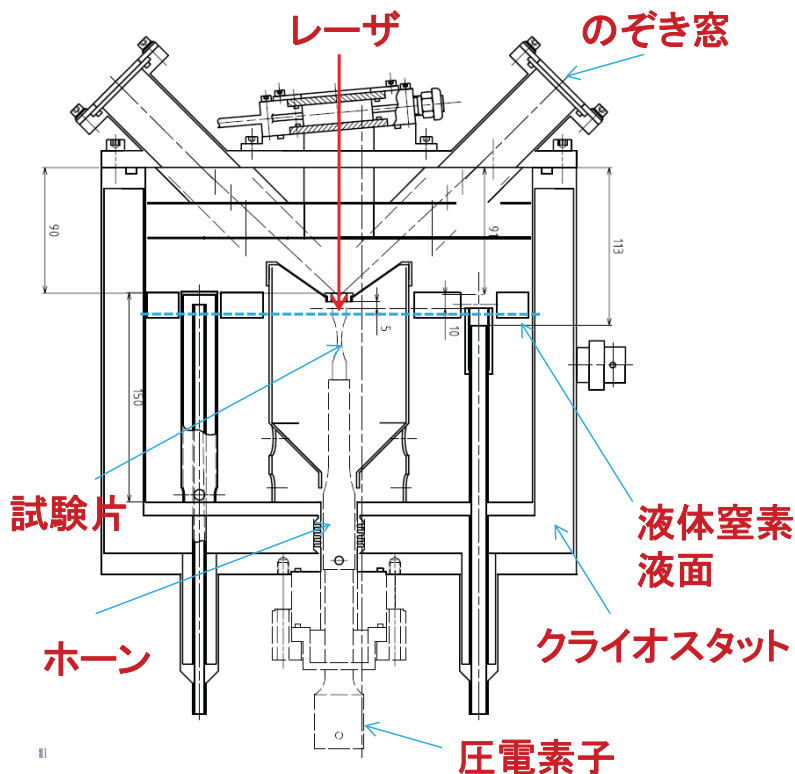
- ・液面高さミストシールド
沸騰時に液面を制御する特殊なふたを設ける
レーザ光路をミストがさえぎらないようにミストシールド機構を開発
- ・信号処理によるノイズ除去法
AEの応力位相に注目

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

49

低温試験用クライオスタット

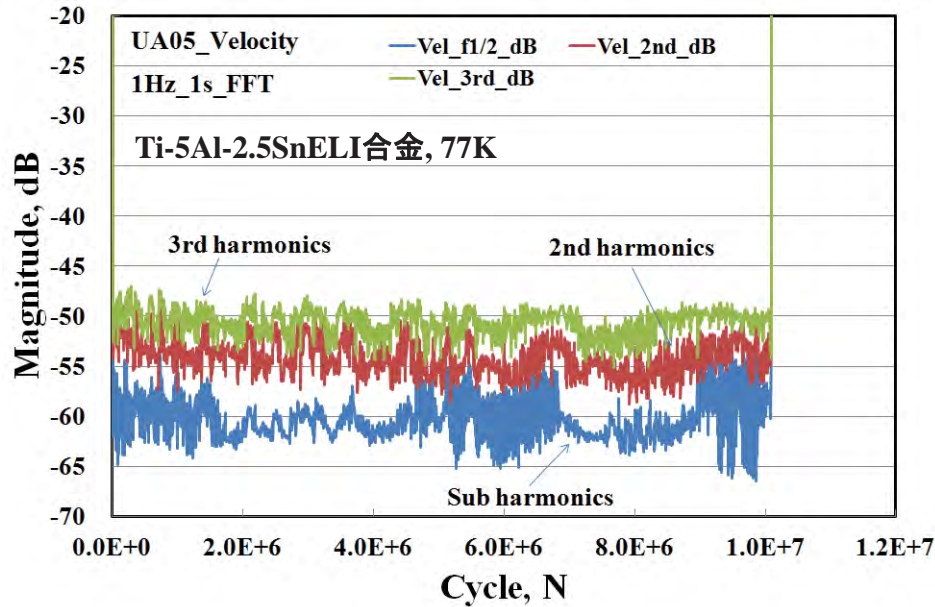


2014/01/16

第24回RACEコロキウム

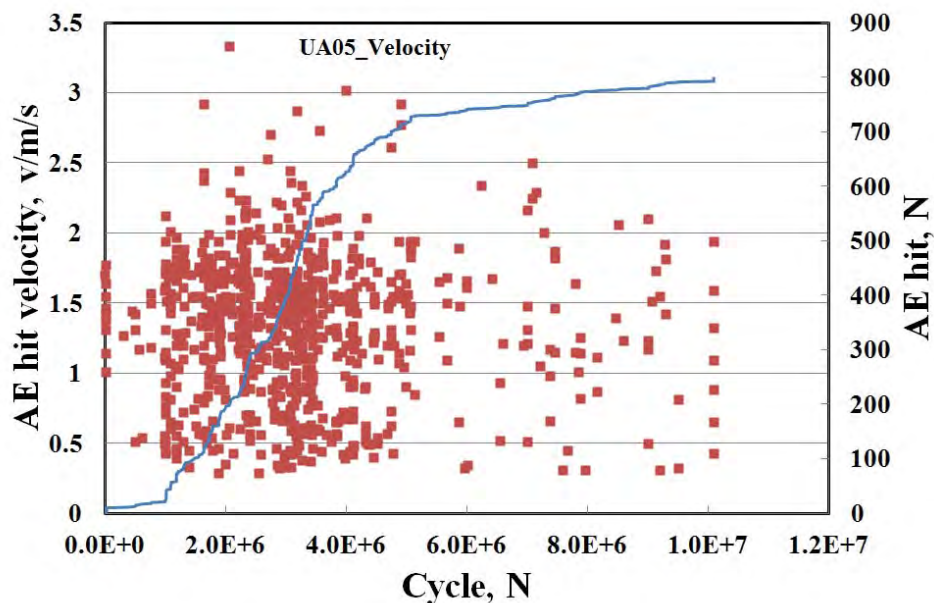
50

低温試験時の非線形超音波

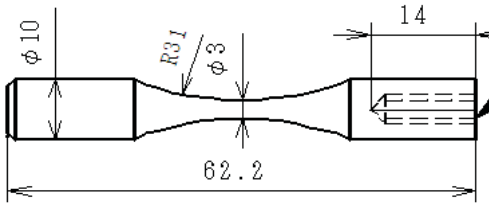


Ti合金試験片における超音波疲労試験中の振動波形を1Hz分解能、1sステップで連続FFTにより抽出した分調波、第二高調波、第三高調波強度を示す。第二高調波、第三高調波は試験中に大きな連続的な変化は見られなかったが、分調波は変動幅が大きな領域と小さな領域が見られ破断前の 9.0×10^6 以降にわずかな上昇が見られた。

低温試験時のAE

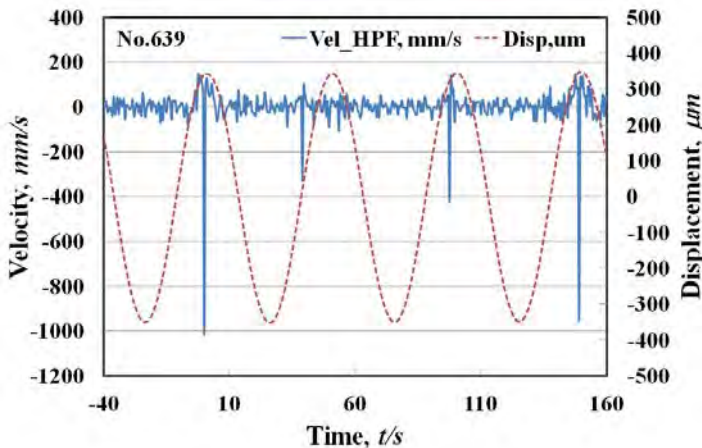
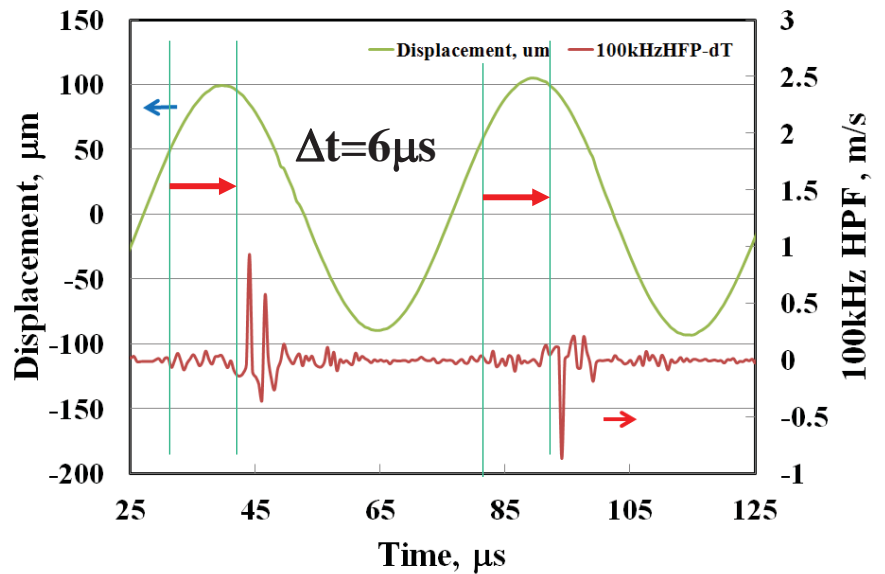


Ti合金試験片における超音波疲労試験中のAEヒット及び各ヒットの速度(AE振幅に対応)を示す。AEは、試験の前半に多く検出された。

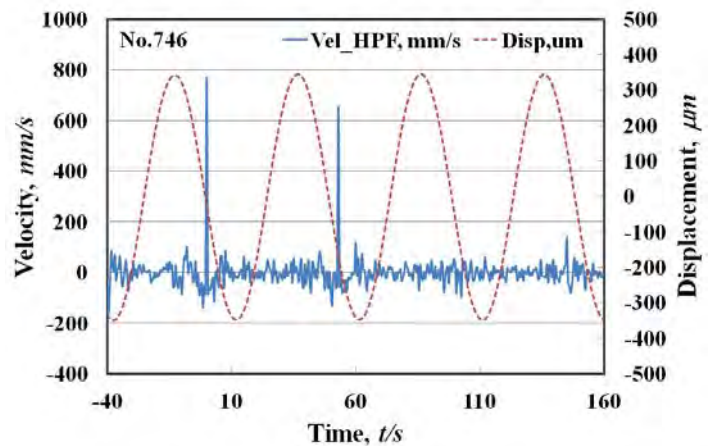


$$\Delta t = L/v_L$$

$$31\text{mm}/5000\text{m/s} = 6.2\mu\text{s}$$

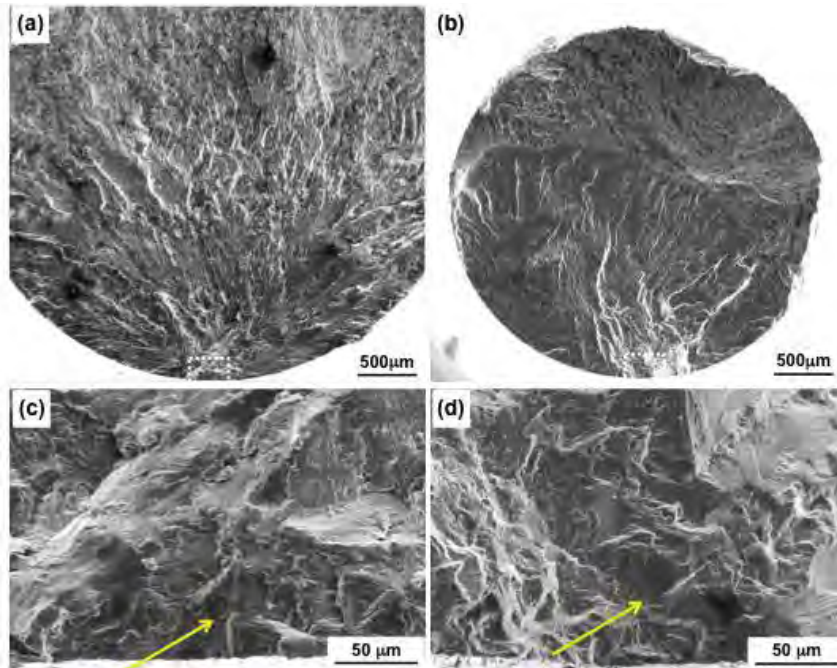


(a)



(b)

(a)に試験初期に、(b)に試験中期以降に検出された代表的な2つのタイプのAE波形を示す。抽出されたAEは、(a)では引張応力位相時、(b)では0クロス近傍または圧縮応力位相時に多く見られ、複数の周期に渡ってAEが検出された。



(a), (c)は、油圧疲労試験片の破面。(c)は(a)中破線部の拡大。(φ4.5mm, $\sigma_a=500$ MPa, $N_f=1.082 \times 10^6$ cycles)
 (b), (d)は、超音波疲労試験片の破面。(d)は(b)中破線部の拡大。φ3mm, ($\sigma_a=500$ MPa, $N_f=4.185 \times 10^7$ cycles)
 $R=-1$ なので、破面が試験中にぶつかって見にくくなっているが、どちらも起点部にはファセットを確認。

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

55

まとめ

低温環境における超音波疲労試験機を用いたAE 及び非線形超音波評価解析

- ・き裂発生に対応するファセット → ピークロードAE
- ・き裂進展に伴う割れ → ピークロードAE
- ・発生した破面のたたき合い → オープニングAE・
クロージャージョーAE
- ・分調波 → き裂の発生に対応
- ・AE応力位相解析結果 →
単一周期中ではなく複数の周期に検出され、き裂面の振
動状態に対応する分調波の振幅変動との関係の要検討

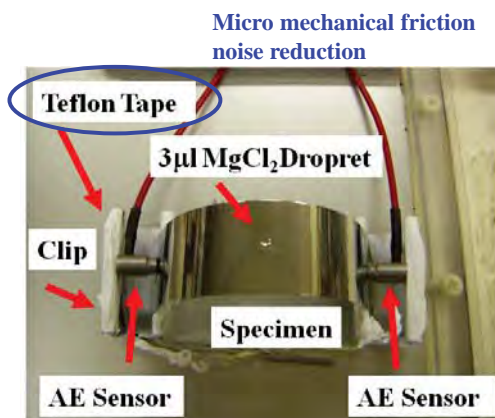
2014/01/16

第24回RACEコロキウム

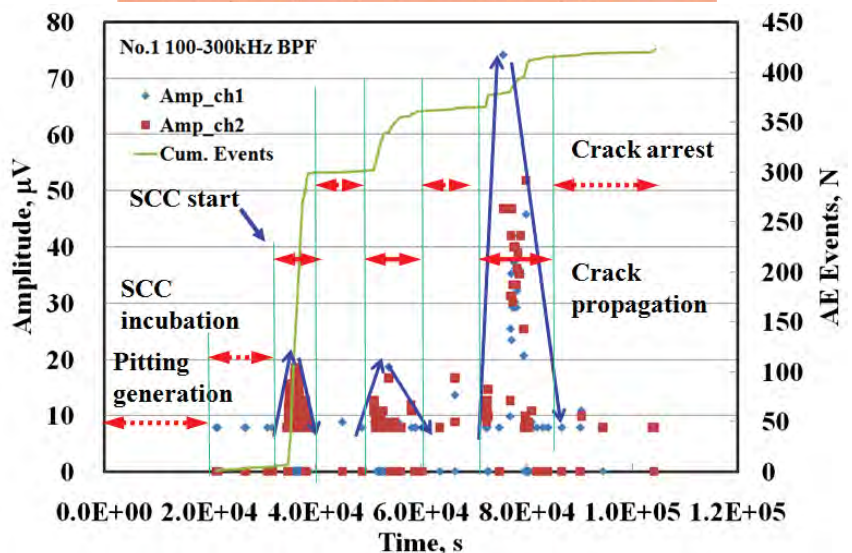
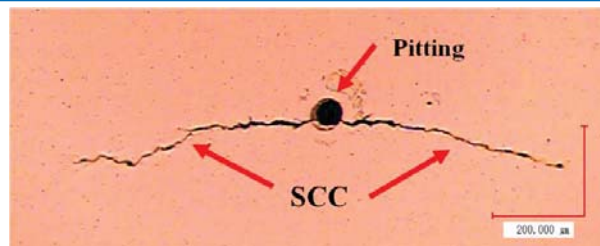
56

- はじめに -非破壊材料信頼性評価とは-
 - 材料劣化とき裂進展挙動・非破壊測定の原理と手法
 - 非破壊材料信頼性評価の概念
 - 検査とクライテリアの考え方 -破壊力学/信頼性工学的検査、モニタリング-
- 非破壊材料信頼性評価研究例
 - クリープ: 溶接部の溶接後熱処理温度、クリープ損傷評価
 - 疲労: 超音波疲労試験時の損傷進展評価(非線形超音波・AE)
 - 腐食: 液滴SCC試験によるき裂進展評価(AE、VMS)
- 構造物検査、社会インフラへの取り組み
 - NIMS-AIST-JAXA非破壊信頼性評価に関する研究成果
 - 今後の研究課題

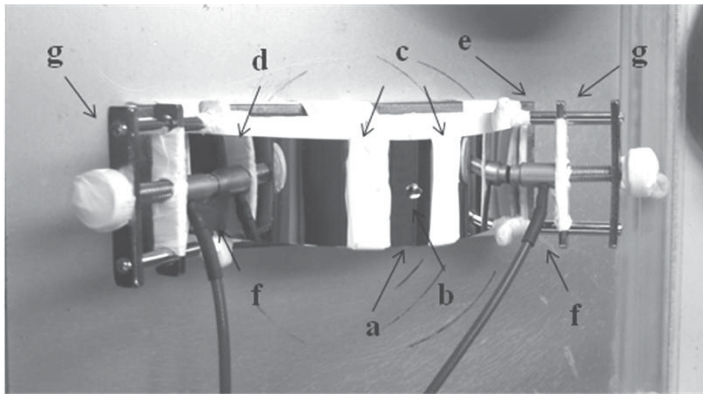
液滴SCC試験時のAE計測



SUS304 stainless steel was used and two specimens of No. 1 and No. 2 were cut into thin plates of 100 mm×20 mm× 0.2 mm. The Vickers hardness of them was HV420. A tensile stress of 1000 MPa was applied to the specimens forced to U-bend. A 3 µl droplet of 25 % MgCl₂ solution was set on the surface at maximum tensile stress of specimen.



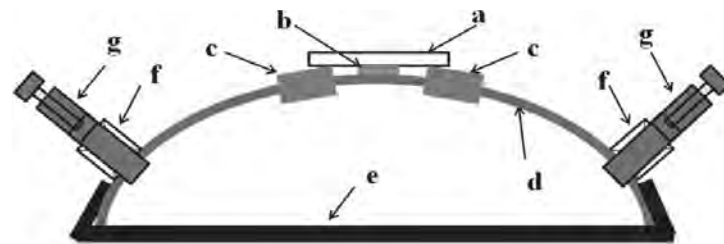
実験方法: 液滴SCC試験



試験片
 SUS304薄平板(100x100x0.2mm³)
 加工硬化材: Hv433(421-442)
 溶体化処理材: Hv205(197-210)

SCC試験条件
 25mass%MgCl₂液滴(2μl)
 温度: 343K, 湿度: 30%
 曲げ応力(MPa)
 加工硬化材: 1000MPa
 溶体化処理材: 600MPa

AE計測条件
 利得: 74dB
 AE変換子: M204A(180kHz共振型)x2
 周波数フィルタ: 10kHzHP
 サンプリング: 2MHz/12bit/2ch
 しきい値: 40μV
 2chヒットのみ抽出



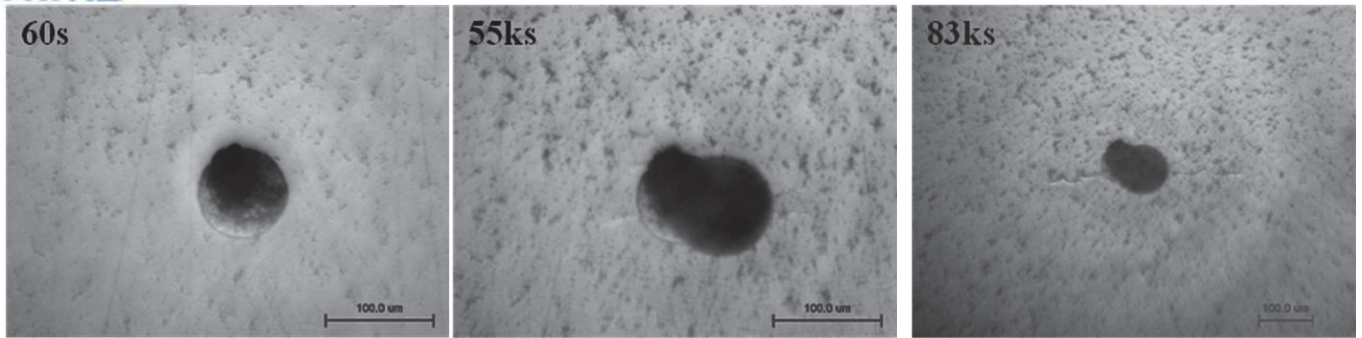
a: cover glass, b: droplet, c: PTFE tape spacer, d: specimen,
 e: Bending force plate, f: AE sensor, g: AE sensor mounting jig

実験方法: SCCのその場観察

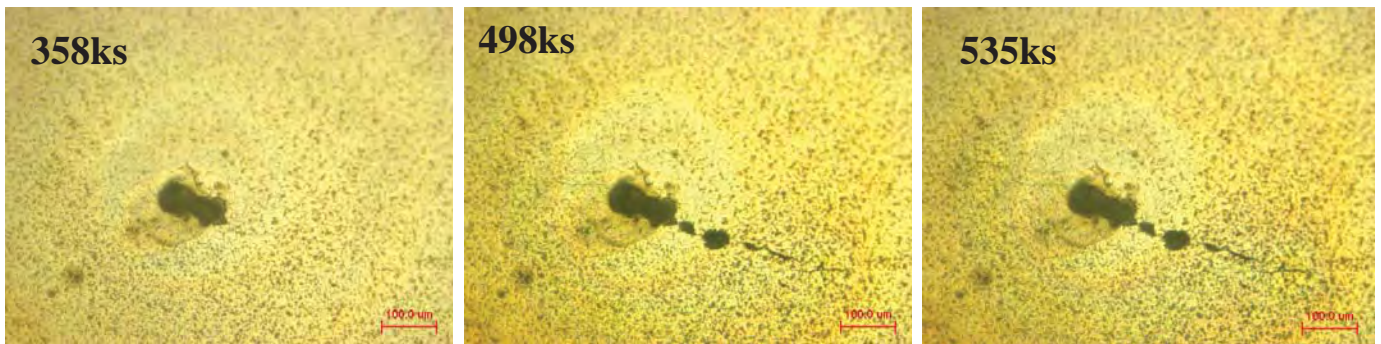


VMS: キーエンスVB7010+VH-Z250R (X200-2000)

実験結果: VMS (1)

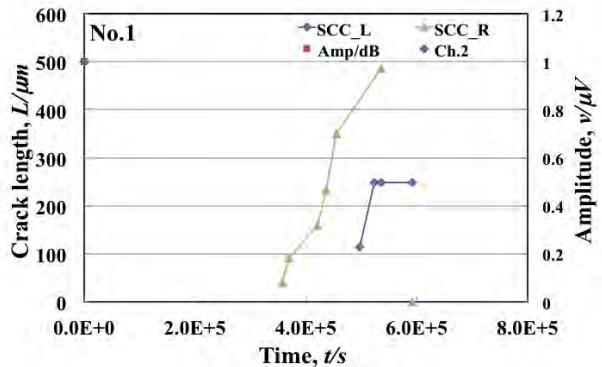
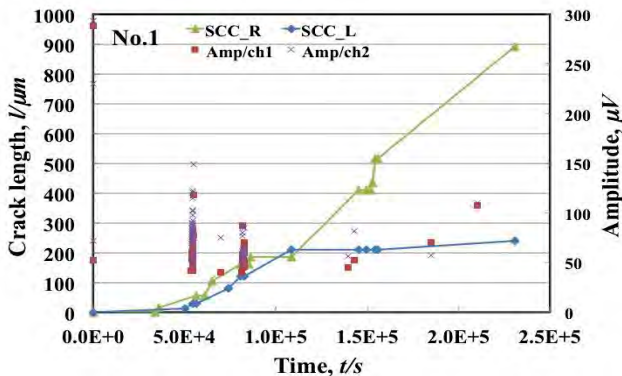
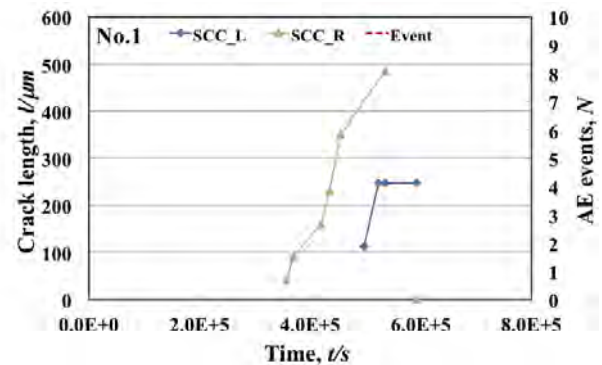
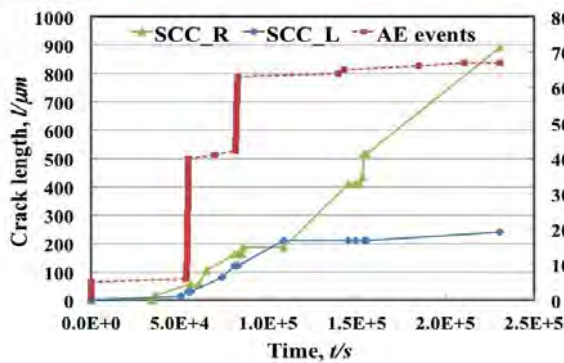


加工硬化材



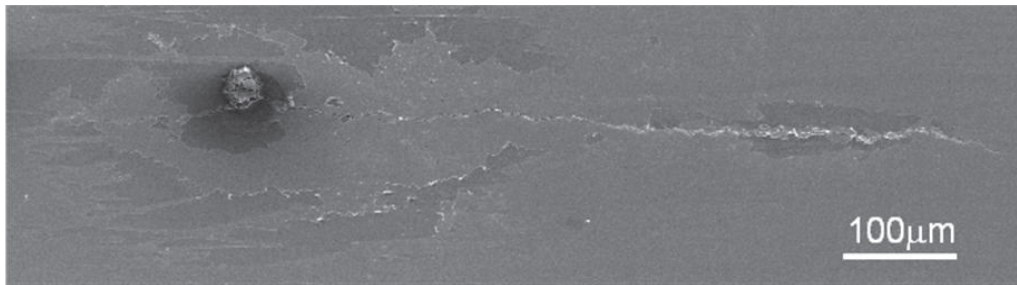
溶体化処理材

実験結果: SCC進展とAE

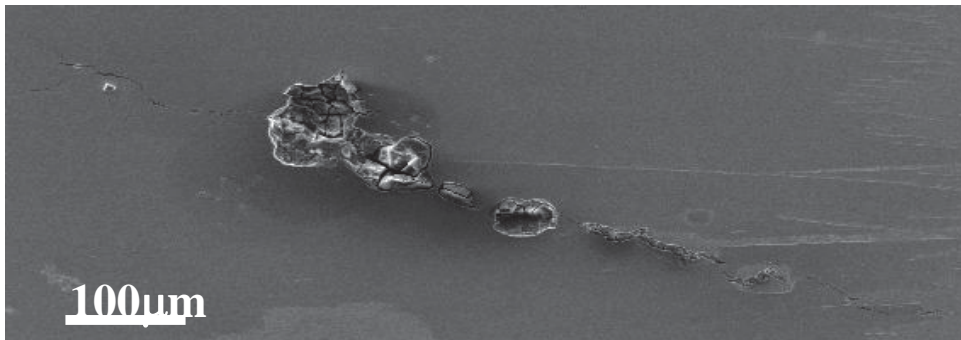


(a) 加工硬化材

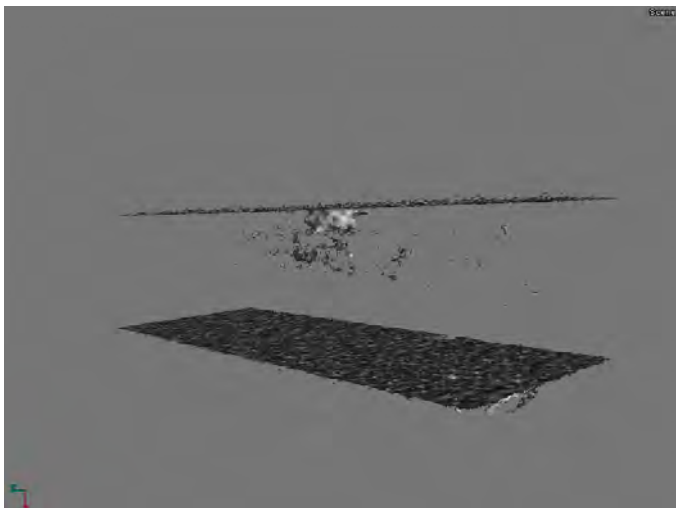
(b) 溶体化処理材



加工硬化材



溶体化処理材



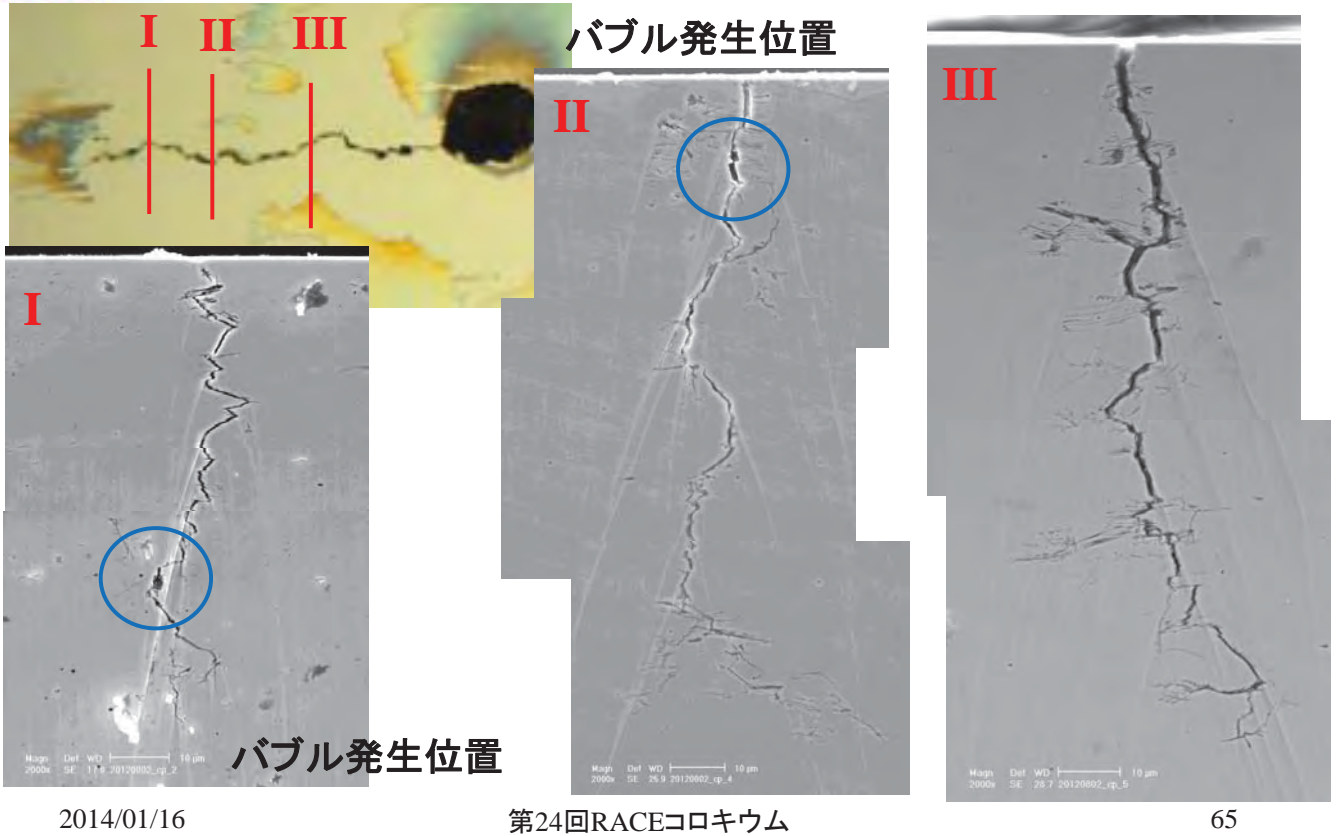
加工硬化材



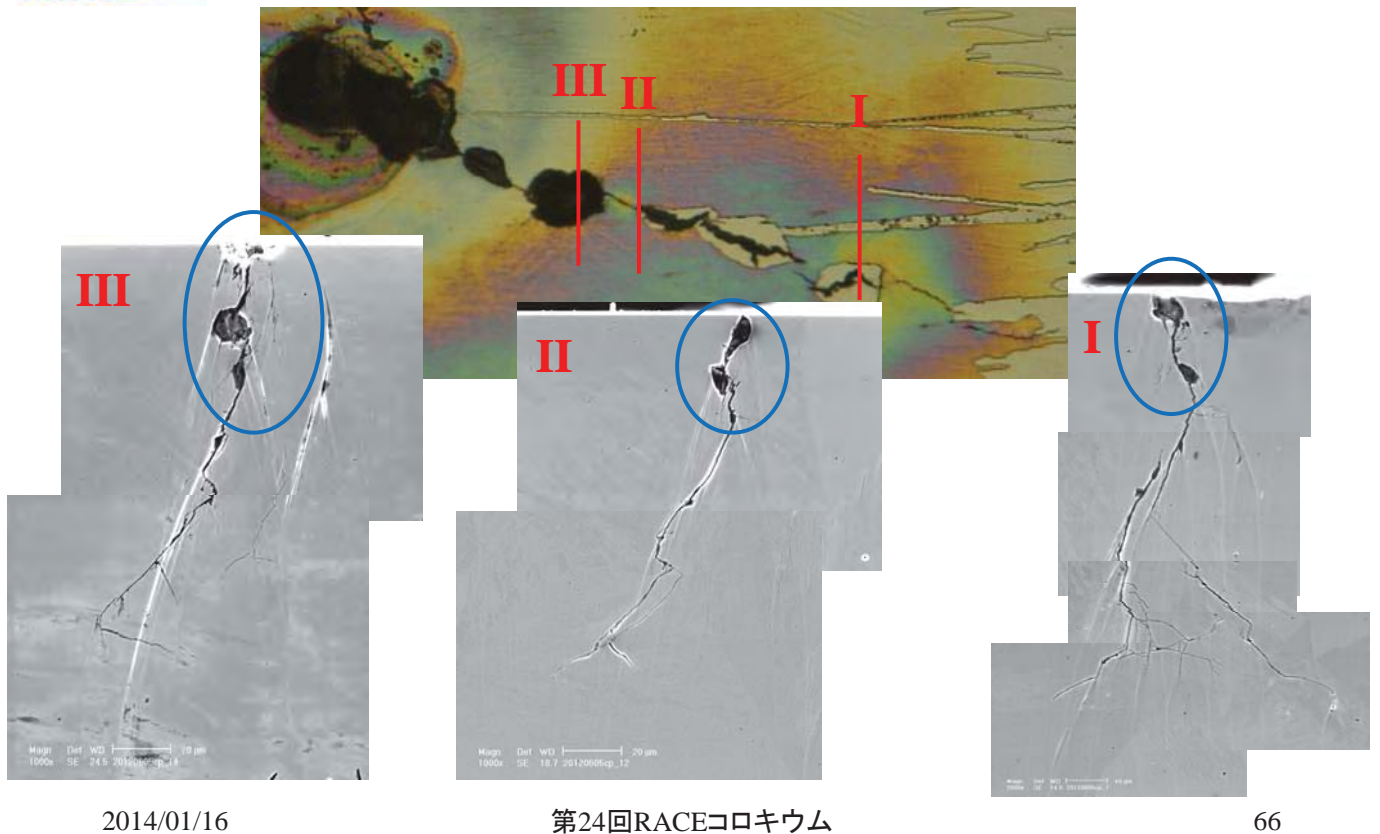
溶体化処理材

CT撮影条件
X線 72kv 100power
SID200mm, SOD4.3mm
オフセットスキャン

実験結果: CP_SEM(加工硬化材)



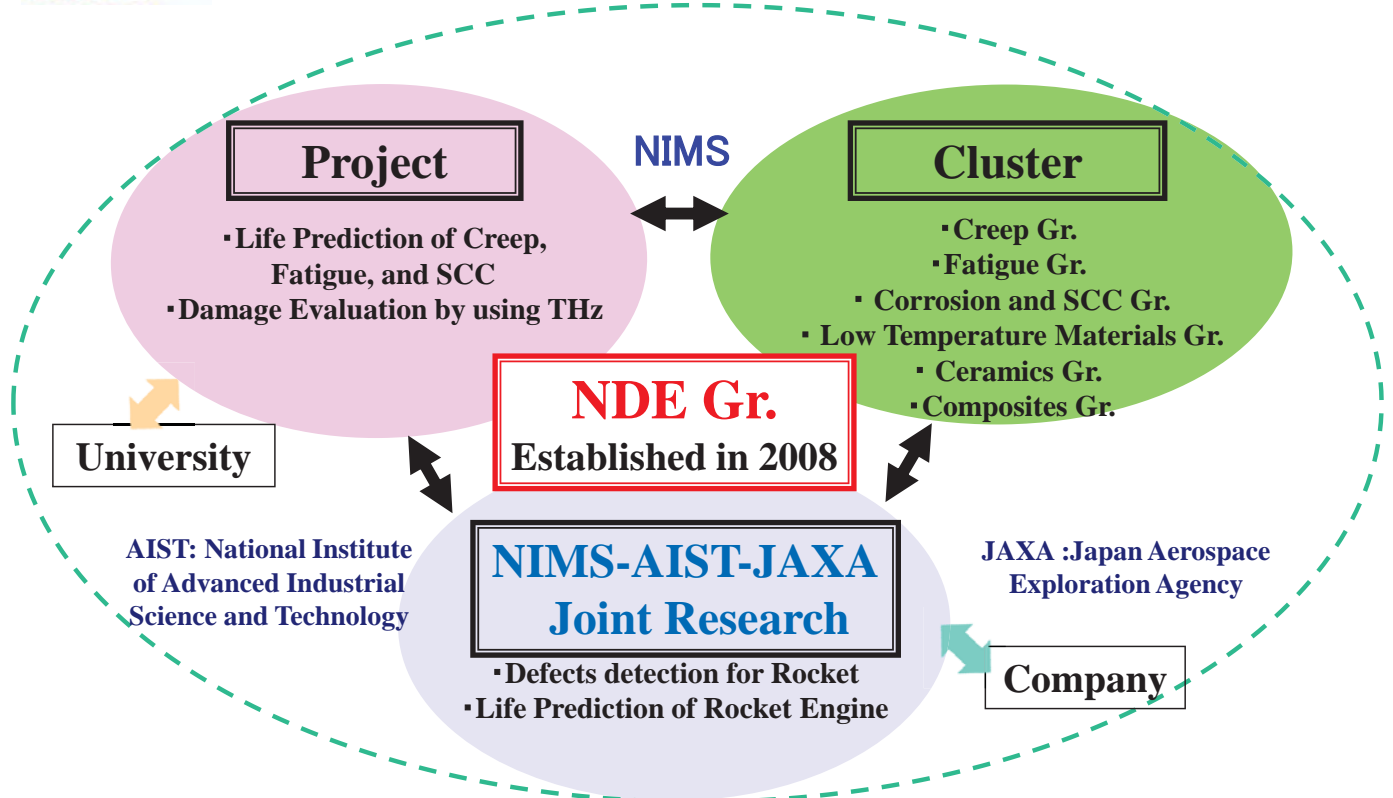
実験結果: CP_SEM(溶体化処理材)



SUS304の加工硬化材のSCC試験時に見られたバブル発生の原因を、加工硬化材及び溶体化処理材のX線CT及び断面SEM観察により行った。

- 1)X線CTによるSCCの性状は、加工硬化材及び溶体化処理材ともき裂性状は検出できなかったが、表面開口ピットに加え内部ピットが検出された。
- 2)加工硬化材及び溶体化処理材の断面SEM観察において、き裂性状は溶体化処理材に比べて加工硬化材はジグザグや横割れが多く複雑であった。
- 3)溶体化処理材のき裂は、多くの開口ピットに含んでいたのに対し、加工硬化材ではき裂の内部にピットが多く見られた。
- 4)加工硬化材のSCC試験時に見られたAEは、き裂のピット内に堆積した水素圧が上昇してバブルとして吹き出したことによると考えられる。

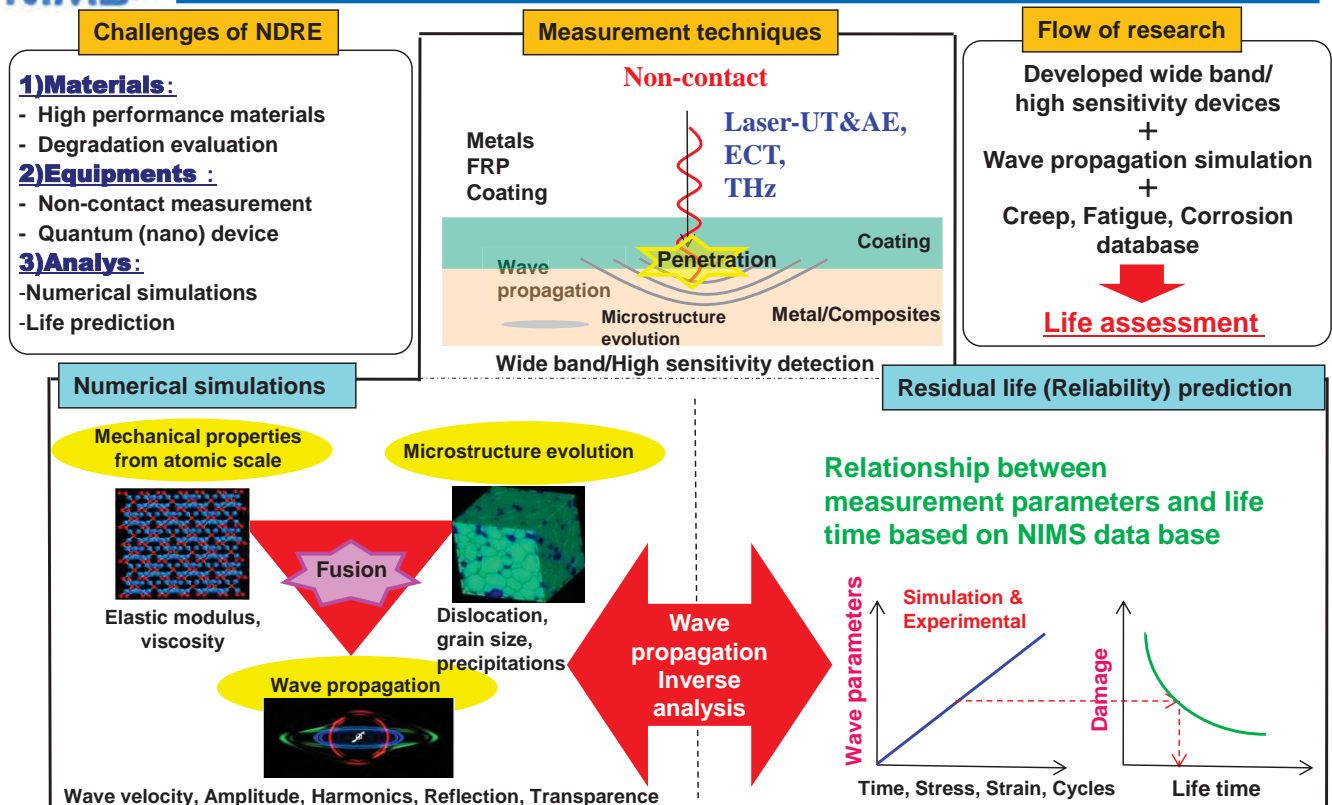
- **はじめに -非破壊材料信頼性評価とは-**
 - 材料劣化とき裂進展挙動・非破壊測定の原理と手法
 - 非破壊材料信頼性評価の概念
 - 検査とクライテリアの考え方 -破壊力学/信頼性工学的検査、モニタリング-
- **非破壊材料信頼性評価研究例**
 - クリープ:溶接部の溶接後熱処理温度、クリープ損傷評価
 - 疲労:超音波疲労試験時の損傷進展評価(非線形超音波・AE)
 - 腐食:液滴SCC試験によるき裂進展評価(AE、VMS)
- **構造物検査、社会インフラへの取り組み**
 - NIMS-AIST-JAXA非破壊信頼性評価に関する研究成果
 - 今後の研究課題



2014/01/16

第24回RACEコロキウム

69



2014/01/16

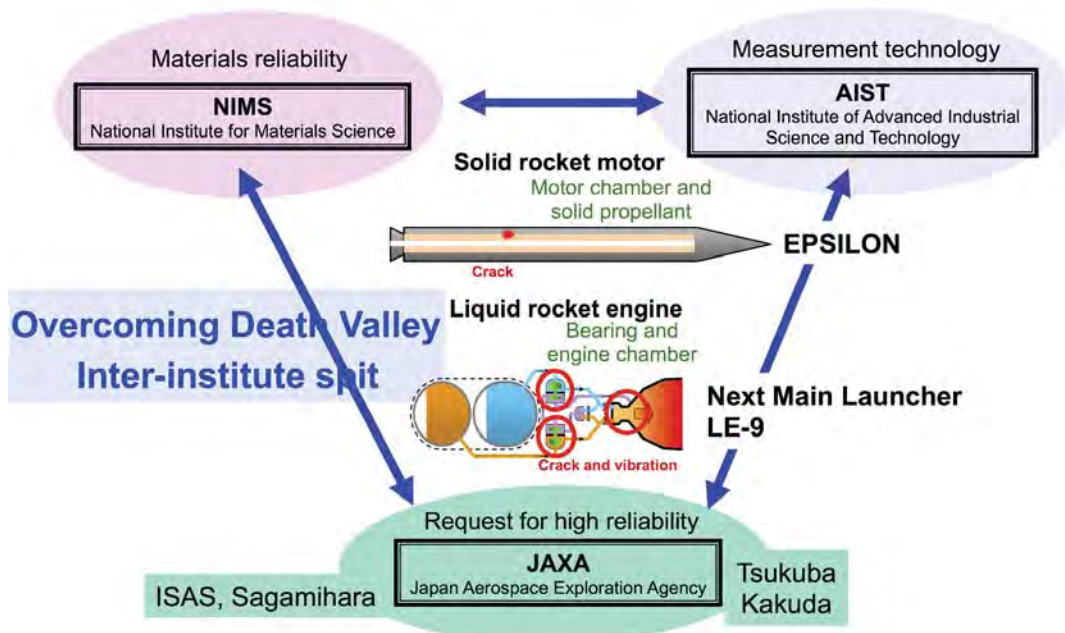
第24回RACEコロキウム

70

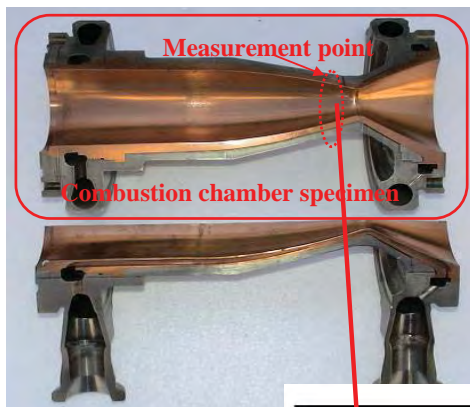
NIMS-AIST-JAXA

Research partnership in NDE

Collaborative research activities among NIMS-AIST-JAXA for non-destructive reliability evaluation started in 2008



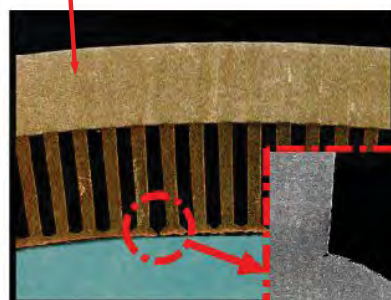
Key in Reliability of Combustion Chamber of Liquid Fuel Rocket Engine



Outer wall (Ni)

Electroforming Cu = Coolant Channel

Chamber wall (Cu)



Creep damage

Application of Numerical Simulation for Ultrasonic Wave Propagation

Two step elastic wave equations using two variables of particle **velocity** and **stress**.
(New method & FDTD method)

Elastic wave equation using **displacement variable**.
(Traditional TD method)

1-D. expr.

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = C \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\left(\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad T = C \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

2-D. expr.

$$\rho \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\rho \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial t} \\ \frac{\partial T_{yy}}{\partial t} \\ \frac{\partial T_{xy}}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

Computer simulation method using combination of two-step elastic wave equation and simple model of elastic materials

Elastic wave equations using two variables of **particle velocity** and **stress**.

Simulation model of elastic materials.

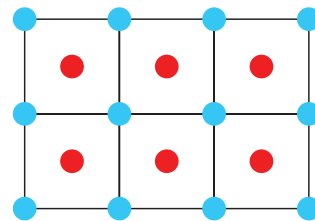
General notation.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{T} \quad \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \mathbf{C} \nabla_s \mathbf{v}$$

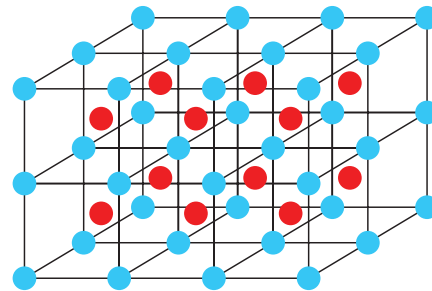
2-D. notation

$$\rho \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial t} \\ \frac{\partial T_{yy}}{\partial t} \\ \frac{\partial T_{xy}}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$



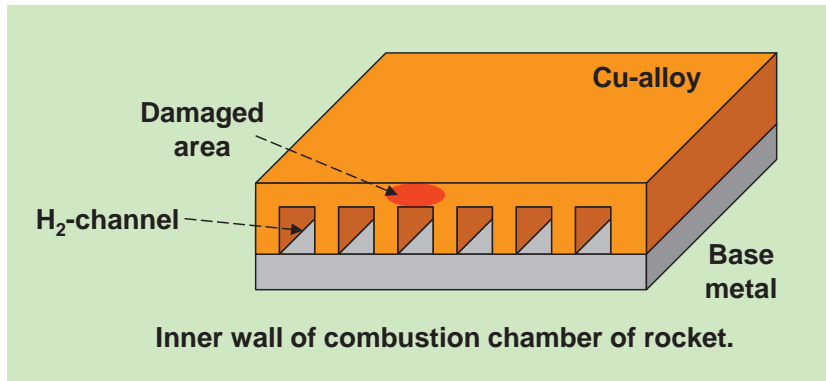
2-D. model



3-D. model

- Displacement / Velocity
- Stress

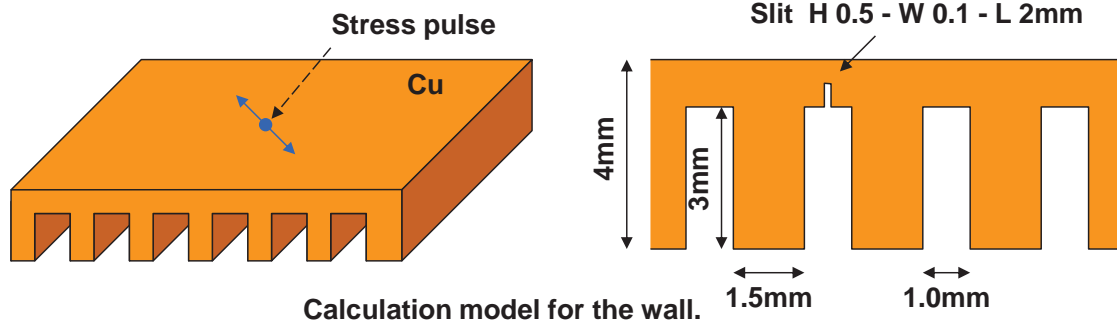
3-D simulation of ultrasonic wave propagation for copper plate with groove and model defects



$$\rho = 8.92e3 \text{kg/m}^3$$

$$c_{11} = 2.24e11 \text{Pa}$$

$$c_{44} = 4.60e10 \text{Pa}$$

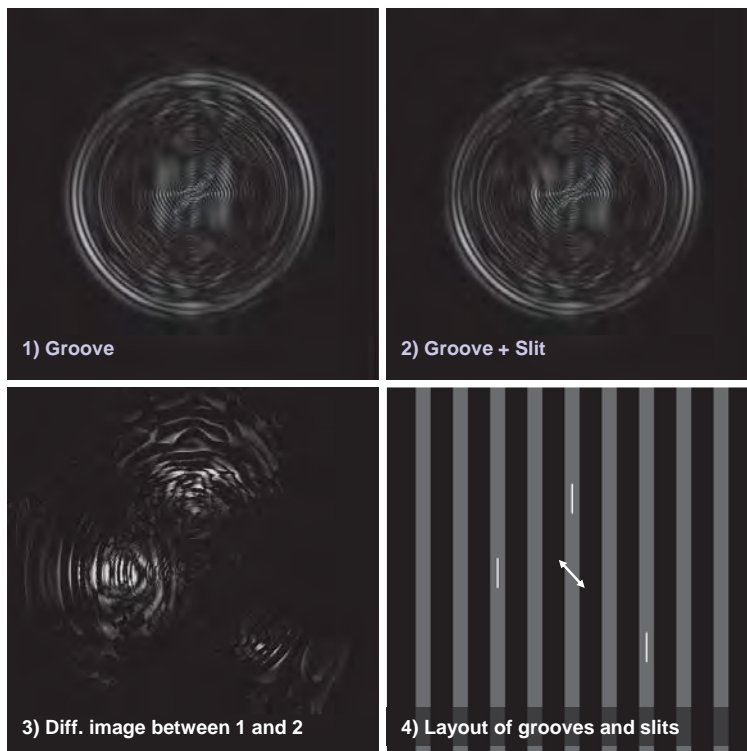


2014/01/16

第24回RACEコロキウム

75

Ultrasonic wave propagation in copper plate with grooves (Inverse Analysis to detect defect signal)



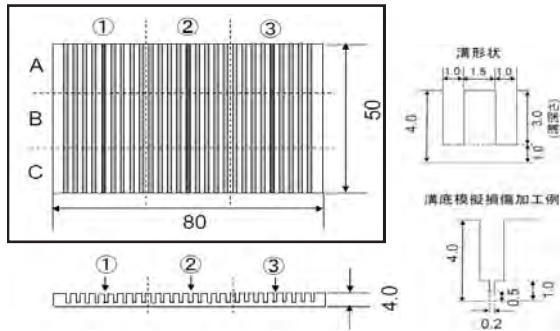
Only displacements normal to the surface is displayed.

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

76

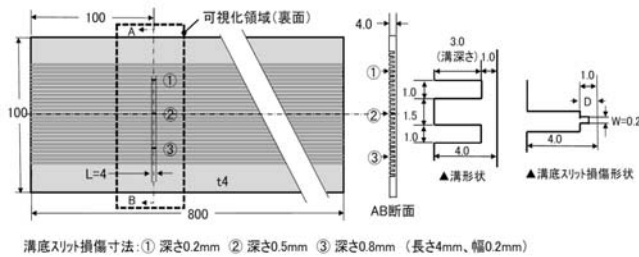
a). The specimens



Copper alloy chamber with grooves and defects

Length: 2mm, 5mm, 10mm
Depth: through, 70%, 50%, 30%

Aluminum plate with grooves and defects



Copper alloy plate with grooves and defects

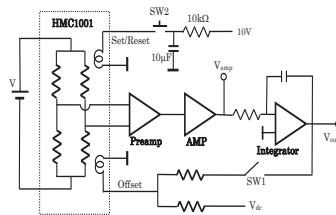
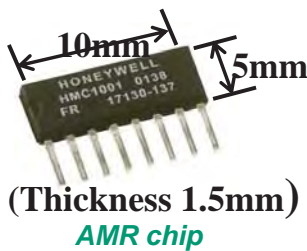
2014/01/16

第24回RACEコロキウム

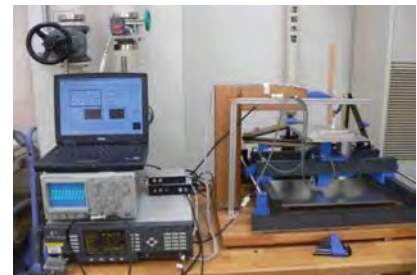
77

AMR sensor and ECT system

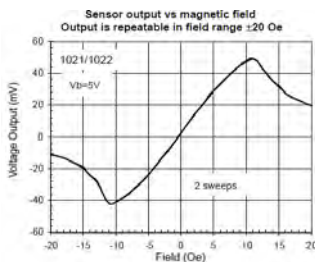
AMR: anisotropic magneto resistive



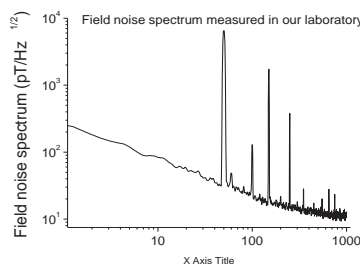
Driving circuit for AMR



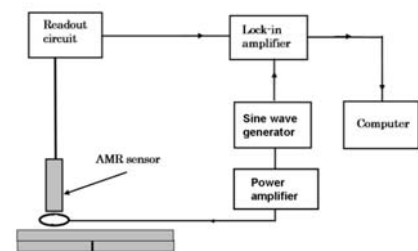
ECT equipment with AMR



Field response of AMR



Noise spectrum of AMR



Block diagram of ECT



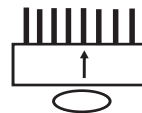
Circular excitation coil

2014/01/16

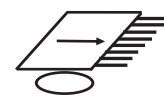


Differential excitation coil

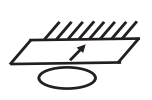
第24回RACEコロキウム



Z direction (a)



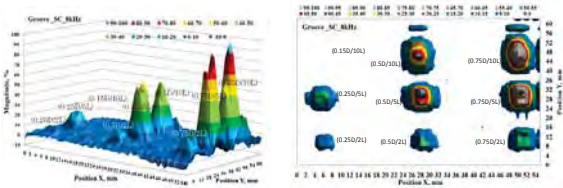
X direction (b)



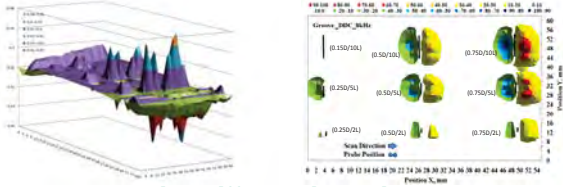
Y direction (c)

78

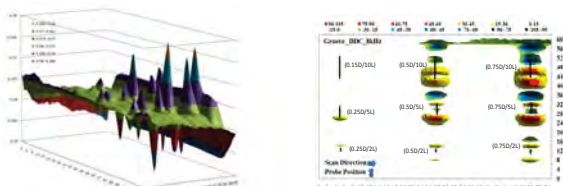
a). Results of Al plate



Results with circular coil



Results with differential coil

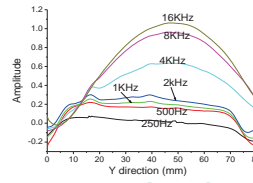


Results with differential coil

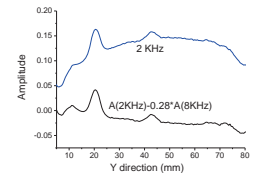
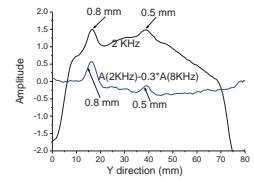
2014/01/16

第24回RACEコロキウム

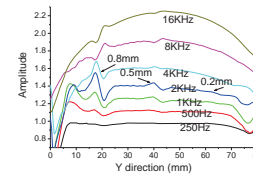
b). Results of Cu plate



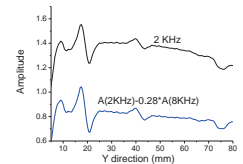
Z direction AMR sensor



X direction AMR sensor

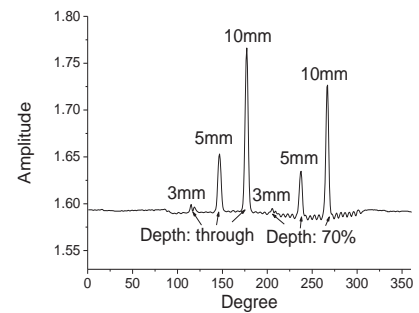
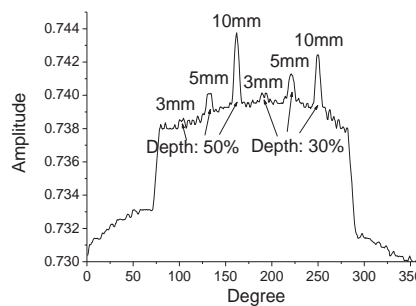


Y direction AMR sensor

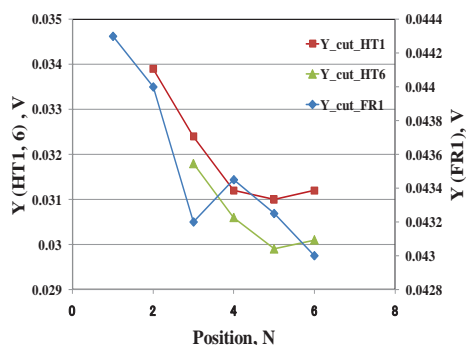


79

c). Results of Crack detection



d). Damage evaluation of Cu-alloy



In the vector impedance by ECT, the relative conductivity could be used to identify the temperature condition, the relative permeability related to the applied strain by FEM.

2014/01/16

第24回RACEコロキウム

80

- **材料**
 - 材料の初期欠陥
 - 損傷の定義

- **計測**
 - 損傷発生(微小欠陥・材質変化)の検出
 - 巨視的き裂・損傷の定量化

- **評価**
 - 材料試験と構造物検査
 - その場試験としてのオンライン・モニタリング