



中性子応力測定法の基礎と実用例

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門

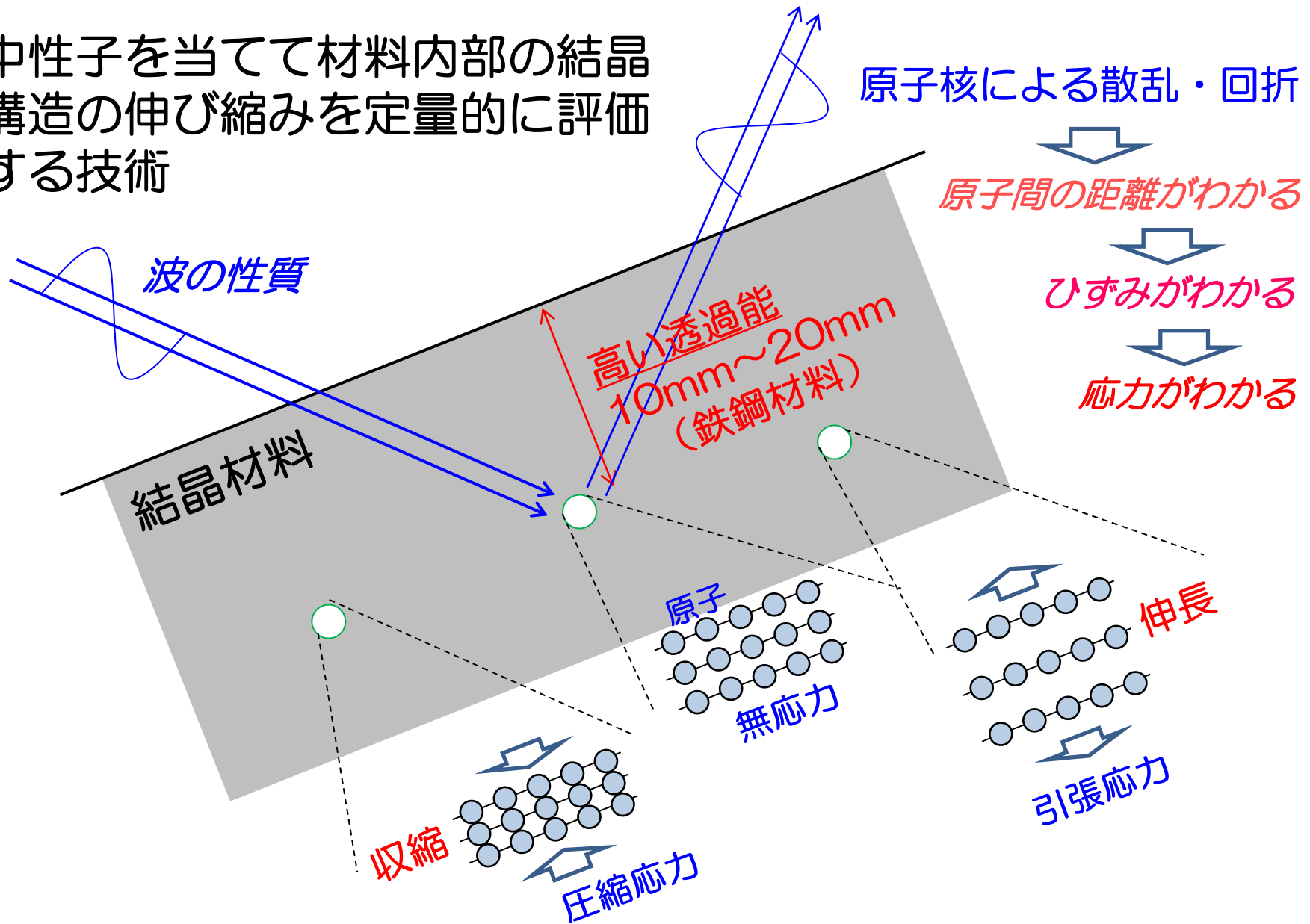
鈴木裕士

2008年8月26日

中性子回折法によるひずみ測定



中性子を当てて材料内部の結晶構造の伸び縮みを定量的に評価する技術



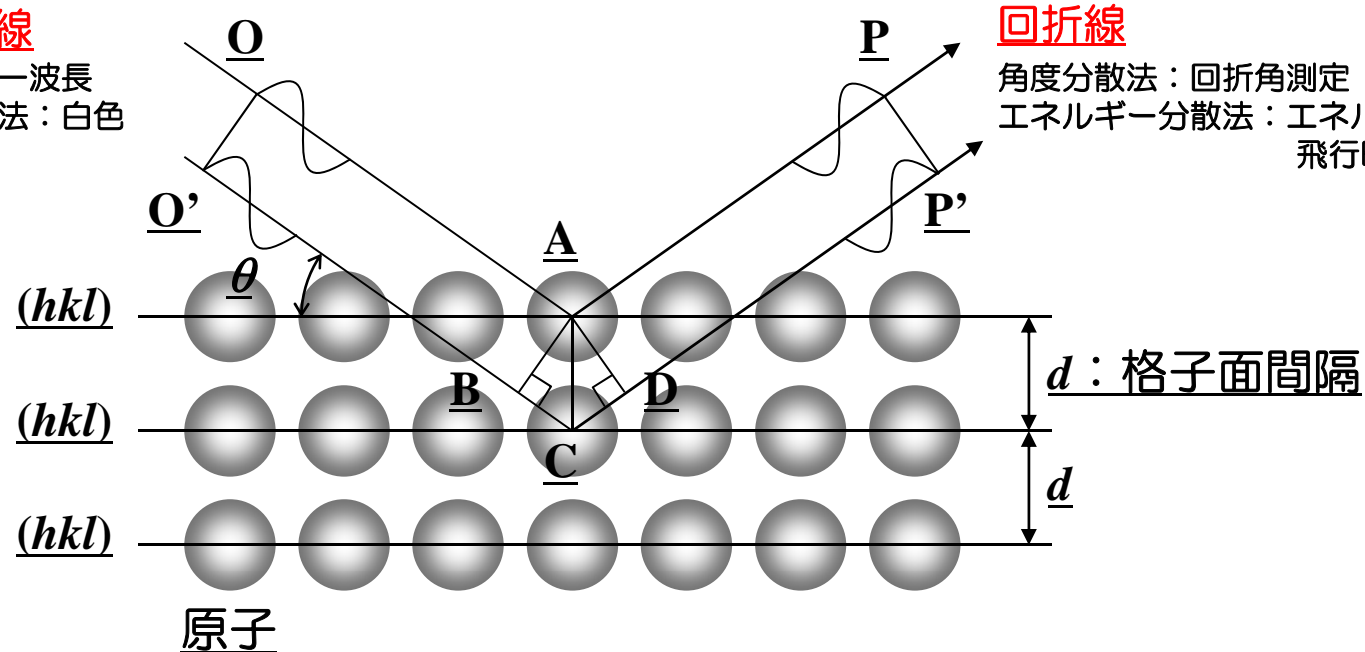
原子間の距離がわかる



材料深部の原子間距離を非破壊測定できる定規

入射中性子線

角度分散法：単一波長
エネルギー分散法：白色



回折線

角度分散法：回折角測定
エネルギー分散法：エネルギー測定
飛行時間測定

ブラッグの回折条件式

光路差BCDが波長の整数倍のとき回折線が得られる。

$$2d \sin \theta = \lambda$$



角度分散法（単一波長・波長固定）

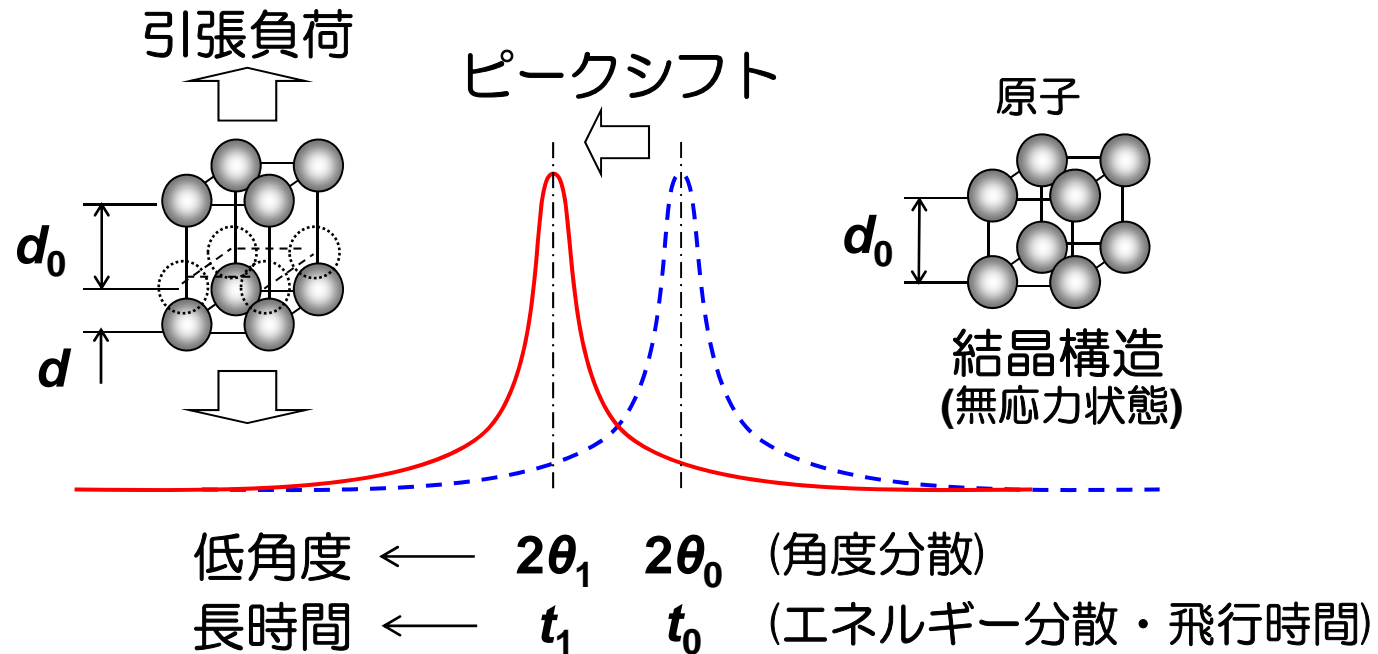
回折角 2θ を測定すれば、原子間の距離 d を求めることができる。

エネルギー分散法（白色・回折角固定）

エネルギー（波長 λ ）を測定すれば、原子間の距離 d を求めることができる。

ひずみがわかる

中性子回折法は原子レベルの非接触型ひずみゲージ



角度分散法
$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\Delta 2\theta}{2} \cdot \cot \frac{2\theta_0}{2}$$

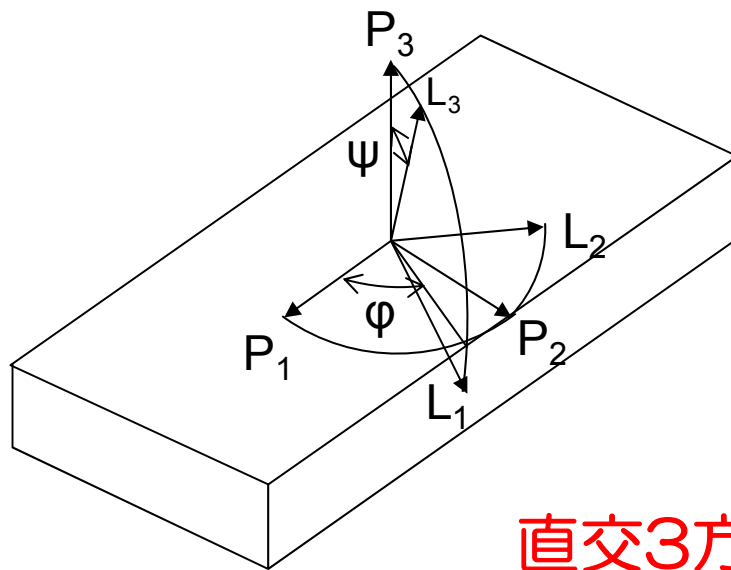
エネルギー分散法
飛行時間法
$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t - t_0}{t_0}$$

角度分散法では回折角変化 $\Delta 2\theta$ を、エネルギー分散法（飛行時間法）ではエネルギー変化（飛行時間変化） Δt を測定すれば、初期状態の回折角 $2\theta_0$ および飛行時間 t_0 との関係から「ひずみ ε 」を求めることができる。

応力がわかる



中性子回折法により求めたひずみとフックの法則により材料内部に発生する応力を定量的に評価することができる。

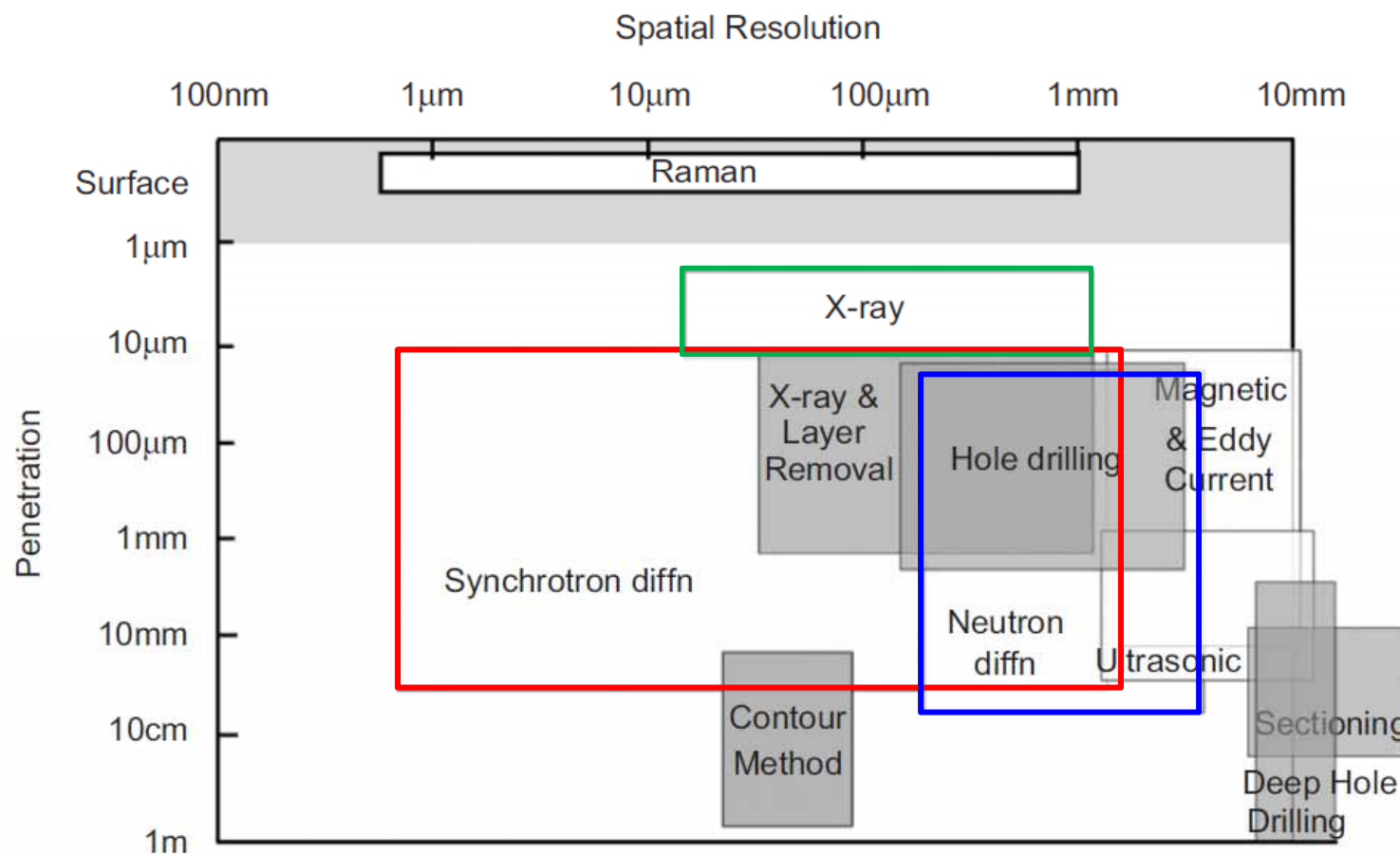


$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{1}{E} \sigma_{11} - \frac{\nu}{E} \sigma_{22} - \frac{\nu}{E} \sigma_{33} \\ \varepsilon_{22} &= -\frac{\nu}{E} \sigma_{11} + \frac{1}{E} \sigma_{22} - \frac{\nu}{E} \sigma_{33} \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{\nu}{E} \sigma_{11} - \frac{\nu}{E} \sigma_{22} + \frac{1}{E} \sigma_{33}\end{aligned}$$

直交3方向のひずみ ⇒ 直交3方向の応力

- ① 3軸応力状態を評価するには無応力状態の格子定数 d_0 が必要不可欠
- ② 平面応力状態を仮定できれば $\sin^2\psi$ 法の利用も可能
- ③ 主応力を求めるには6方向のひずみから6つの応力成分を求める必要がある

各応力測定技術の比較



X線回折法： 表面（数 μm ～数十 μm 深さ）の応力・ひずみ測定

中性子回折法： 深部（数十 mm 深さ）の応力・ひずみ測定

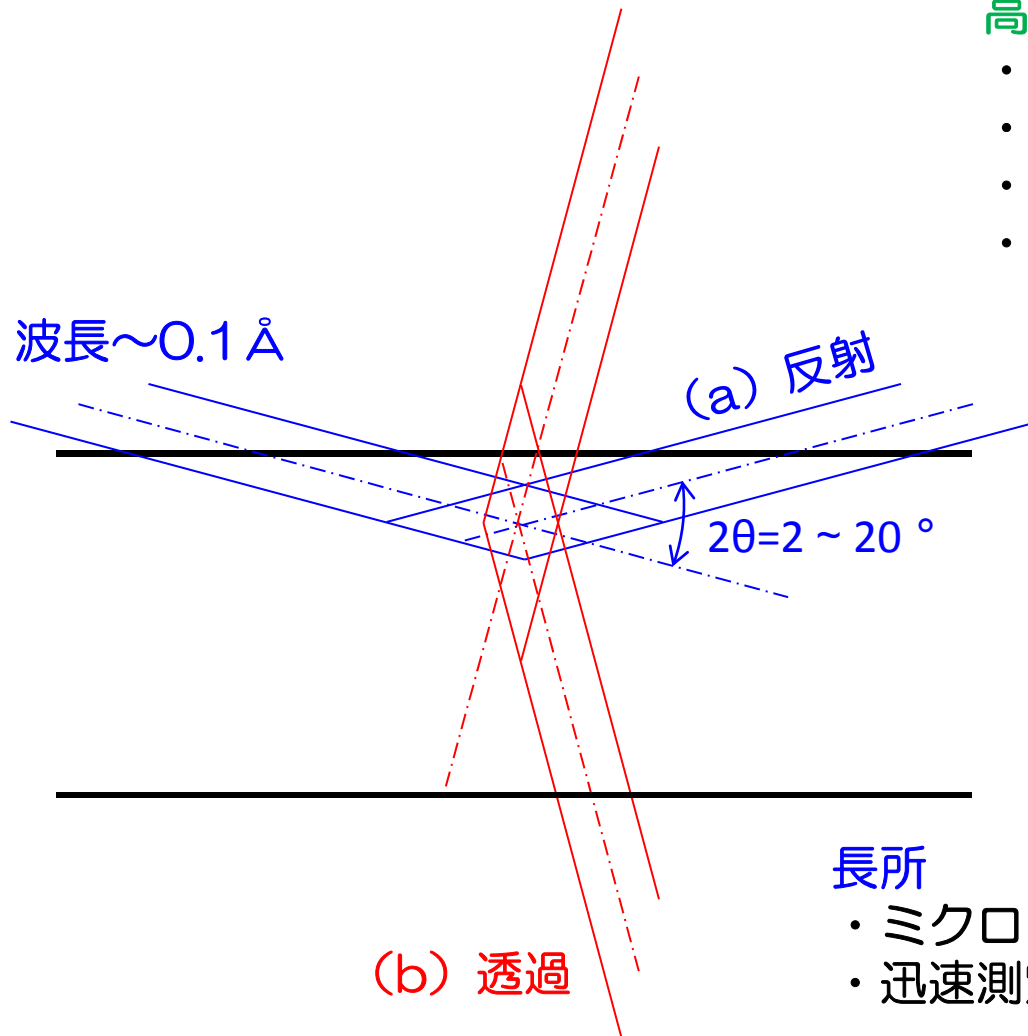
放射光： X線回折法と中性子回折法の間領域の応力・ひずみ測定

高エネルギー放射光の特徴



高エネルギー放射光X線回折法の特徴

- ・侵入深さは大
- ・高輝度、高平行度
- ・回折角度は低角度
- ・測定領域形状は扁平ひし形



短所

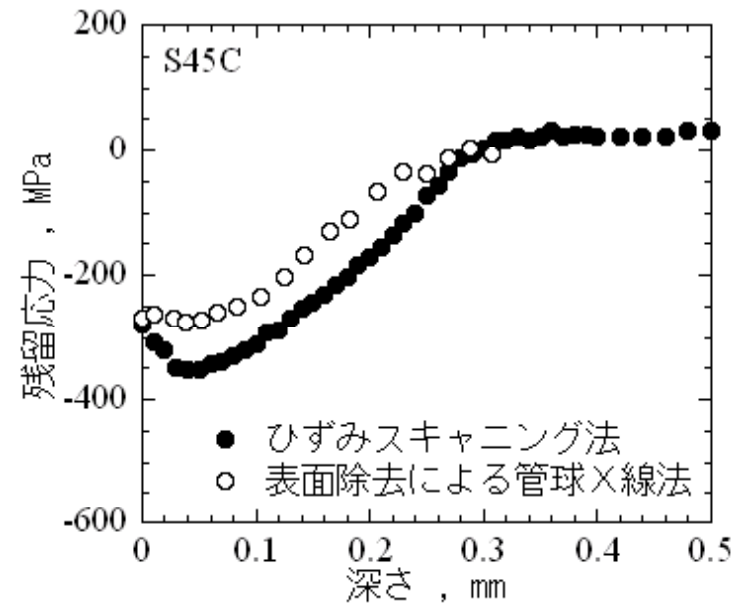
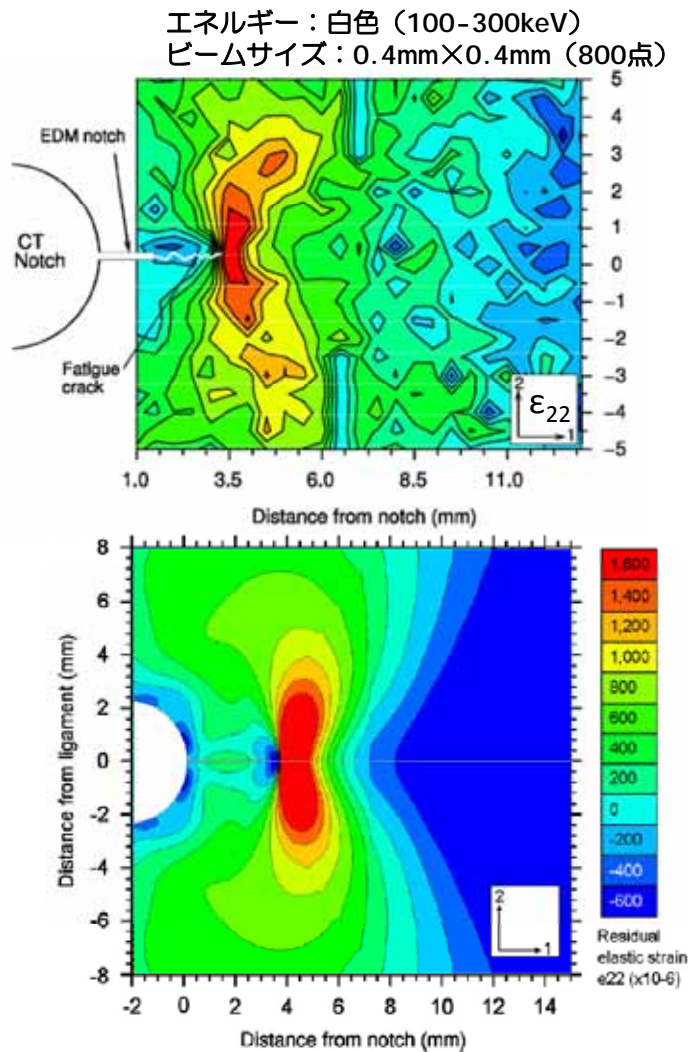
- ・反射と透過で同じ領域のひずみ測定ができない
- ・透過では深い領域のひずみが測定できるが、反射では深い領域のひずみ測定ができない
- ・応力計算に必要な3方向以上のひずみ測定が困難

長所

- ・ミクロンオーダーの局所ひずみ測定が可能
- ・迅速測定が可能

ひずみマッピング・微小部測定に適している

高エネルギー放射光によるひずみマッピング



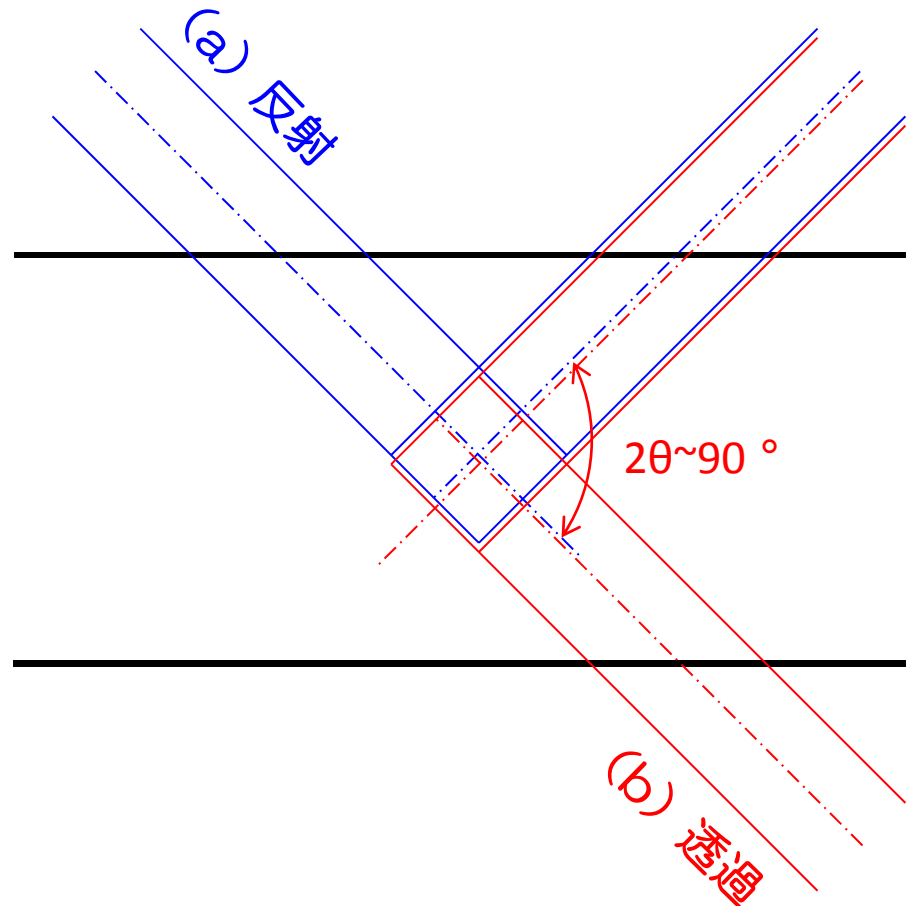
菅蒲敬久, 水木純一郎, 鈴木賢治, 秋庭義明, 田中啓介 :
材料, 55 (2006) 1, 101.

ショットピーニング材のひずみ分布

P.J. Withers et al. / International Journal of Pressure
Vessels and Piping 85 (2008) 118-127

き裂先端部のひずみマッピング

中性子回折法の特徴



中性子回折法の特徴

- ・回折角度は 90° 付近
- ・測定体積は立方体 or 直方体
- ・中性子強度は比較的low
- ・比較的大きいビームが得られる

短所

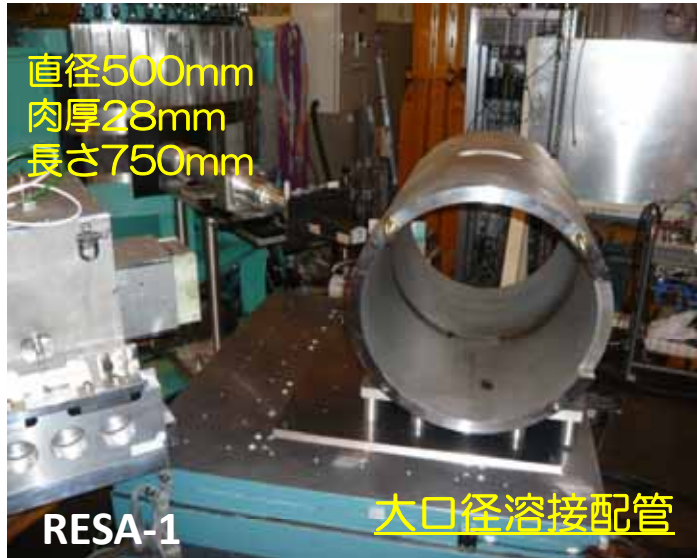
- ・局所ひずみ測定は不得意
- ・測定時間が比較的長い

長所

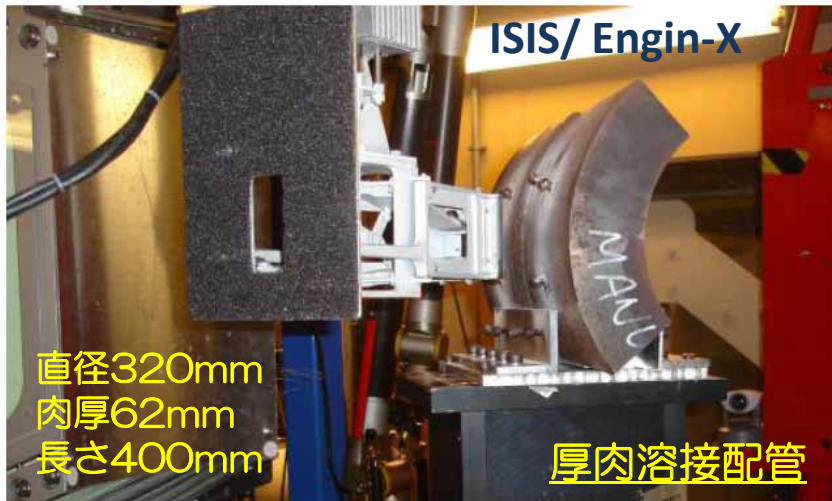
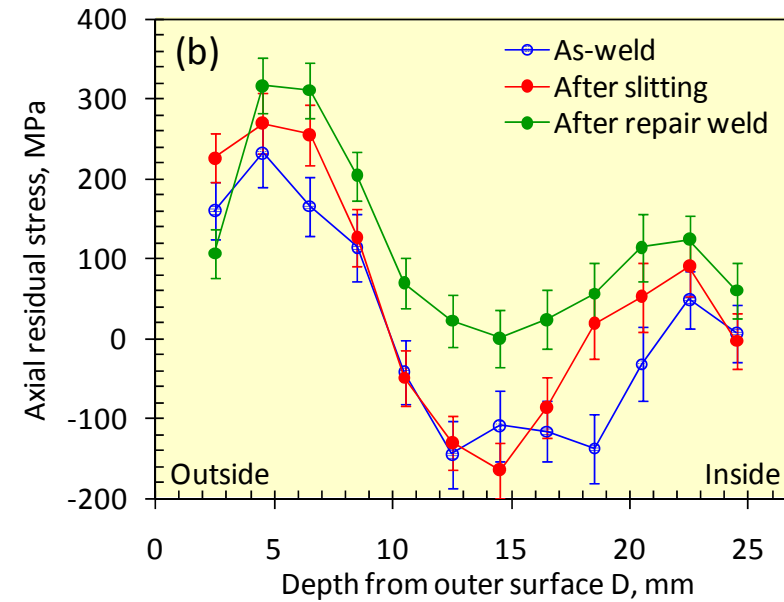
- ・反射と透過で同じ深さのひずみ測定が可能
- ・反射と透過で同じ領域のひずみ測定が可能
- ・応力計算に必要な3方向以上のひずみを測定できる

材料深部の応力分布測定・大型構造物の応力測定に適している

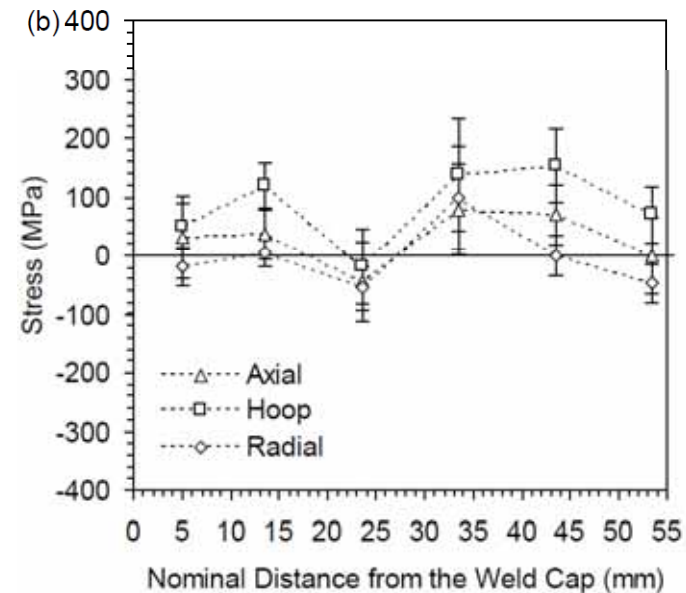
中性子回折法による応力分布測定



平成20年度原子力安全基盤調査研究



C. Davies et al./ Materials Science Forum Vol. 652 (2010) pp 321-326



回折装置の比較



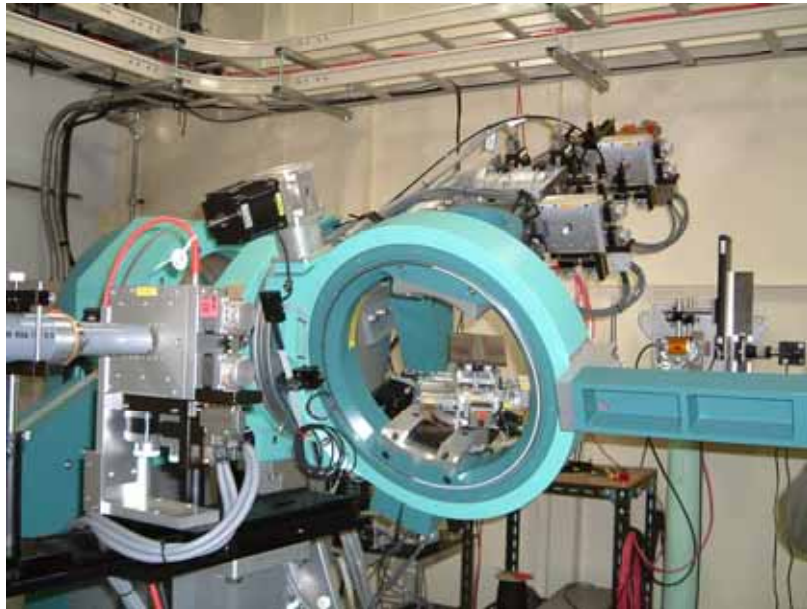
中性子工学回折装置

測定対象・条件

- ・ 小型～大型構造物
- ・ モデル試料（試験片）から実機試料
- ・ 局所領域のひずみ測定

回折装置

- ・ 専用装置の整備
- ・ 大型回折計



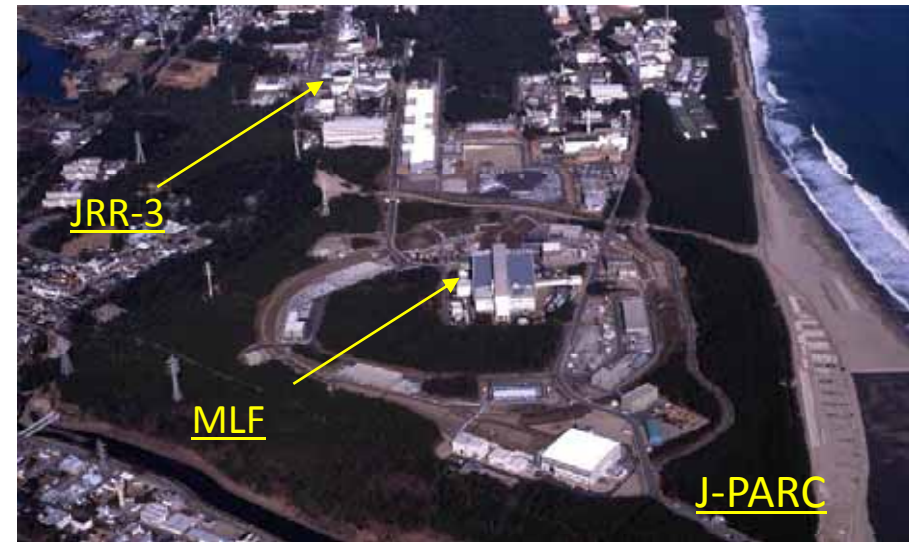
放射光X線回折装置

汎用回折装置の利用

- ・ 測定できる試料の大きさが限られる
- ・ 比較的小型の試料（主に試験片レベル）
- ・ 目的に応じて回折装置を選択



日本の中性子工学回折装置



国内の中性子工学回折装置は3台

日本原子力研究開発機構

研究炉JRR-3 (角度分散型)

RESA-1 : 小型~大型試料の応力測定

RESA-2 : 小型試料の応力測定

J-PARC/MLF (エネルギー分散型)

匠 : 小型~大型試料の応力測定

中性子工学回折装置の仕様



RESA-1 (JRR-3)



角度分散型回折装置

- 最高分解能 Dd/d : 0.4~0.5%
- 試料テーブル (800kgf) 水平 X-Y: ± 200 mm
上下 Z: 100mm
- 波長範囲: 0.16nm~0.20nm
- 検出器: 一次元検出器 (100mm \times 100mm)
- ラジアルコリメータ 0.5, 1, 2, 3, 5, 10mm

Ⅱ (J-PARC/MLF)



エネルギー分散型回折装置

- 最高分解能 Dd/d : 0.17%
- 試料テーブル (1ton) 水平 X-Y: ± 300 mm
上下 Z: 800mm
- d-レンジ:
 - 標準モード 0.5~2.7 Å
 - 広いdモード 0.5~4.7 Å
- 検出器: 水平 $\pm 15^\circ$ (中心が $2\theta:90^\circ$)
垂直 $\pm 15^\circ$
- ラジアルコリメータ 2mm width

国内における中性子工学回折装置の利用例

1. 中性子応力測定技術の高度化と応用

- ・自動車エンジン部品（ヘッド、燃料ポンプ、ギアなど）
- ・ロケットエンジン部品（燃焼器など）
- ・溶接部品（配管、継手など）
- ・鉄道部品（レール、車輪など）
- ・鉄筋コンクリート構造物



2. 材料工学研究への展開

- ・中性子回折用低温引張試験機（5K以下）の開発*（RESA）
- ・中性子回折用高温引張試験機（1000℃）の開発（匠）
- ・引張・圧縮変形中の構造材料の変形挙動評価（室温、低温、高温**）
- ・引張変形中の超電導材料の変形挙動評価（室温、低温）
- ・高温環境中の相変態挙動の評価***



*匠でも開発中 **圧縮は開発中 ***現在は主に匠で実施

3. ミクロ組織因子の定量評価技術の開発

- ・プロフィール解析技術の開発
- ・集合組織測定技術の開発*
- ・マイクロひずみの測定
- ・マイクロ組織因子の定量評価技術専用ソフトウェアの開発（RESA）
応用：圧延、強伸線材、ECAP材、HPT材など



*JRR-3 MUSASI-Lでも実施可能

当日の講演ではいくつかの測定例を紹介します。

最後に（X線回折との相補利用）



例えば…

表面残留応力：き裂の発生に影響

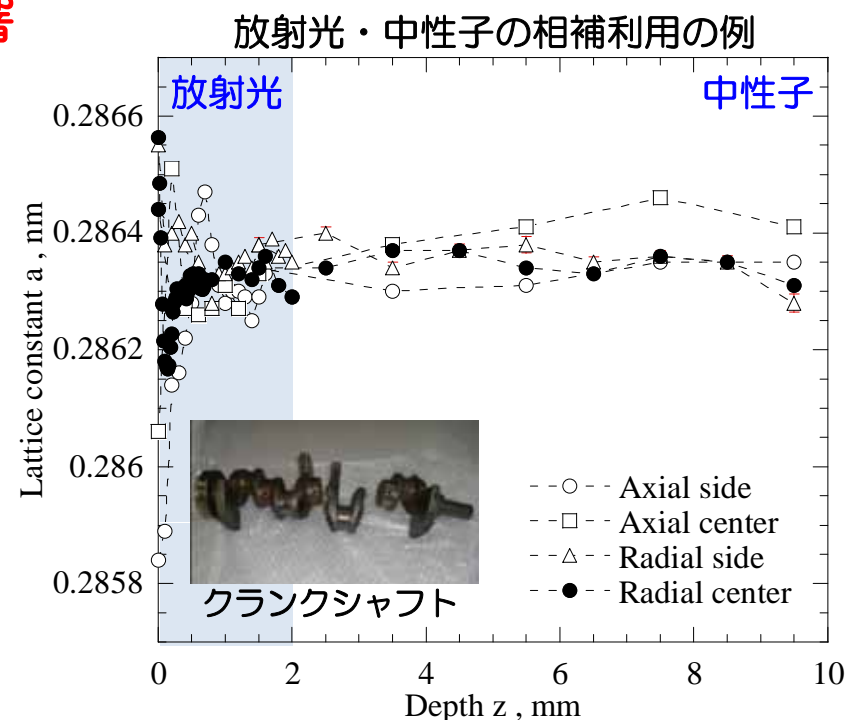
内部残留応力：き裂進展に影響

中性子回折法

- ◎材料深部の非破壊応力測定
- ×材料表面の応力測定
- ×極微小領域の応力測定

X線回折法

- ◎材料表面の非破壊応力測定
- ◎極微小領域の応力測定
- ×材料深部の応力測定



菅蒲他、第44回X線材料強度に関するシンポジウム、日本材料学会

材料の強度評価・寿命予測



X線回折法および中性子回折法を相補的に利用した
総合的な材料評価が必要不可欠