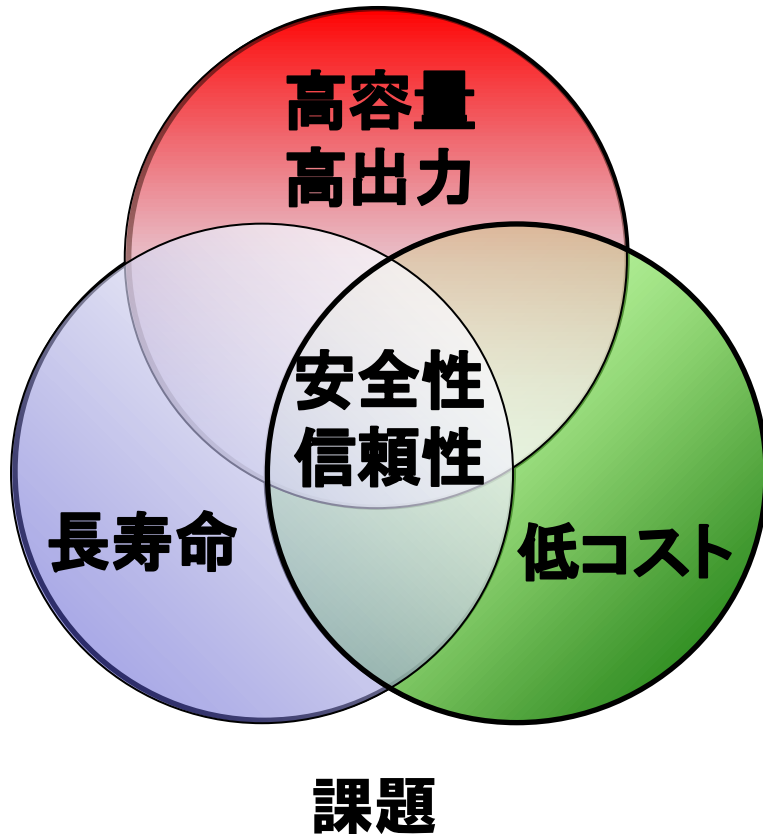

その場X線回折による溶接時の相変態と応力測定

2016/2/1 第11回金属材料評価研究会

株式会社 日立製作所 研究開発グループ
基礎研究センター 平野辰己

Contents

1. 緒言
2. 実験条件
3. その場X線回折によるTIG溶接時の相変態
4. その場X線回折によるTIG溶接時の応力
5. 結言



- 従来は解体分析や静的挙動の計測が主流
- 見る・測るから現象の理解
- 非平衡・不均一性・動的な挙動の多くは未解明
- 作動下における計測手法の確立へ

自動車、鉄道車両、建設機械、プラント、
原子力設備、火力設備

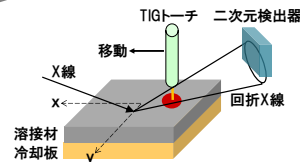
設計指針の提示

3. 溶接部の熱履歴モデル

2. 熱履歴-疲労DB

4. 実機の疲労強度モデル

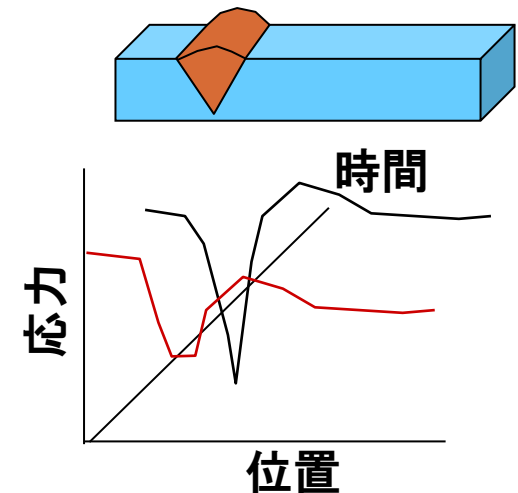
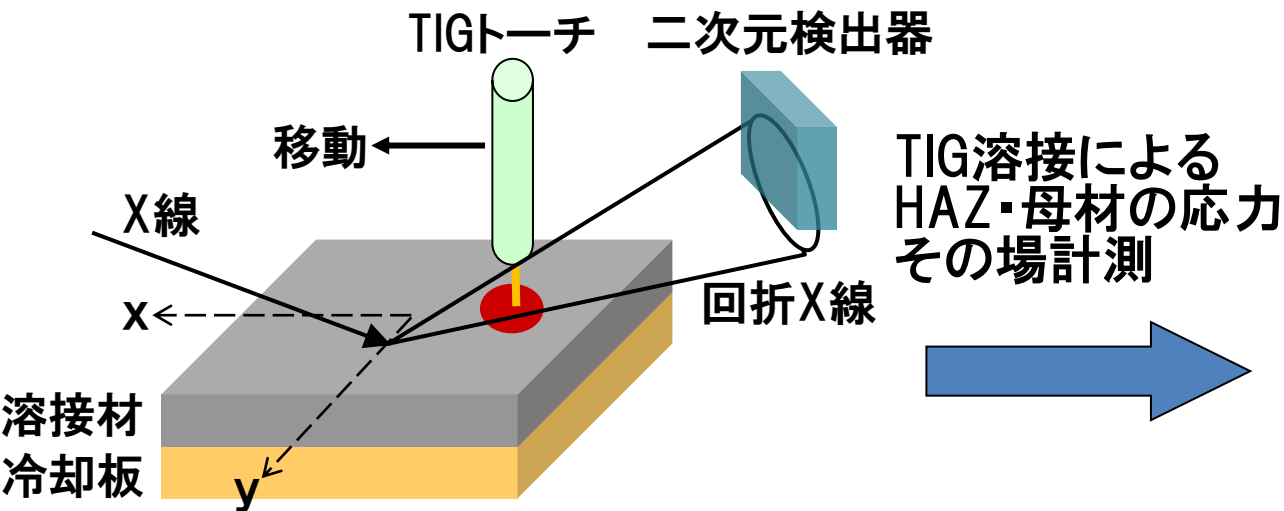
1. 熱履歴-組織-疲労メカニズム



溶接その場計測(大型施設)

溶接条件と疲労強度の関係を解明

1-4 実験の概要と目的



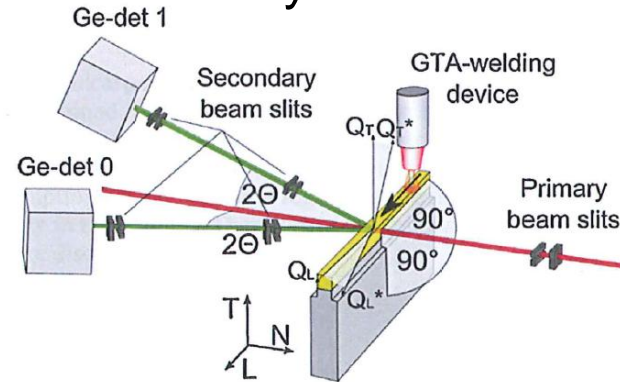
■ 溶接時の相変態・応力・温度のその場計測とシミュレーションの検証

Neutron diffraction



D. Dye et. al., Metall. Mater. Trans. A, 45A (2014) 2038.

X-ray diffraction

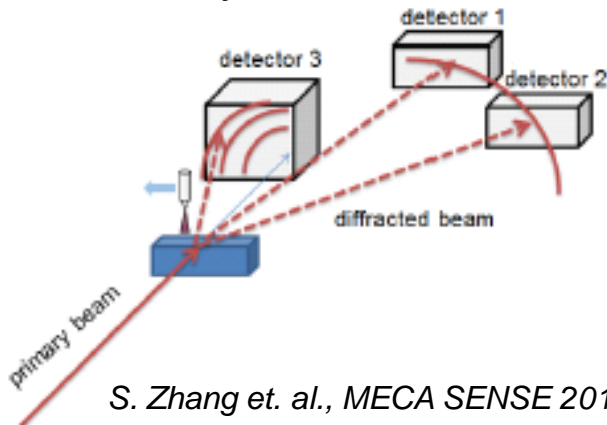


J. Gibmeier et. al., J. Mater. Process. Technol., 214 (2014) 2739

$$\text{Strain } (\varepsilon = \frac{a(T) - a_0(T)}{a_0(T)}) \text{ to Stress}$$

a: lattice parameter
T: Temperature

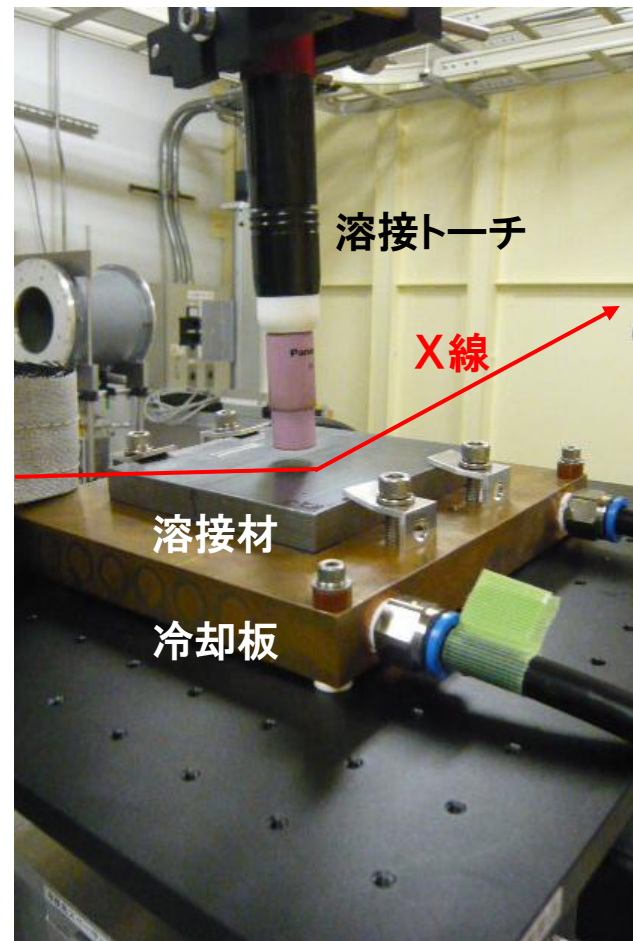
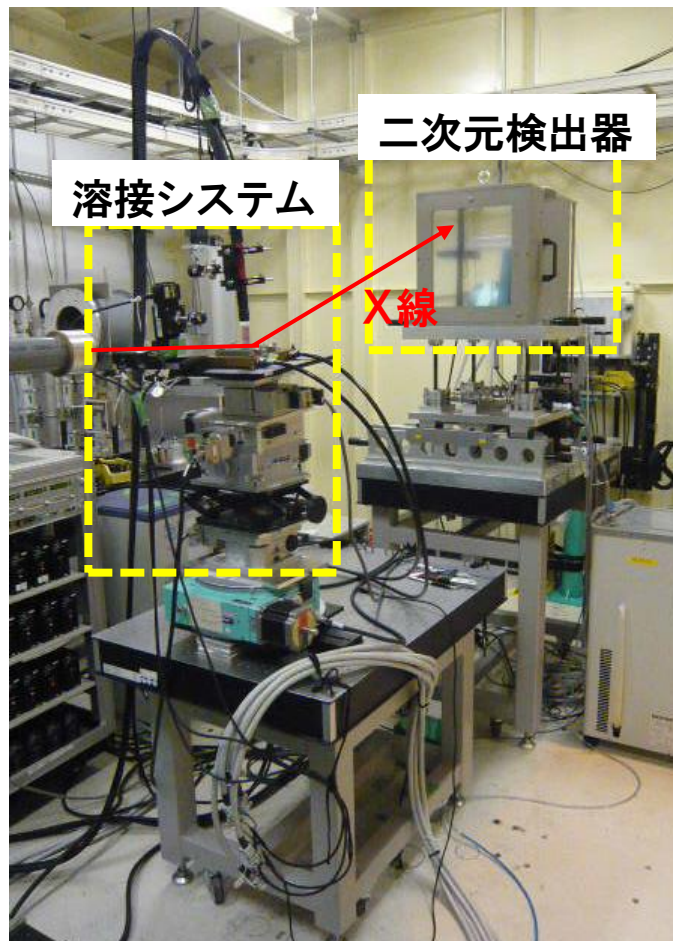
X-ray diffraction



S. Zhang et. al., MECA SENSE 2013

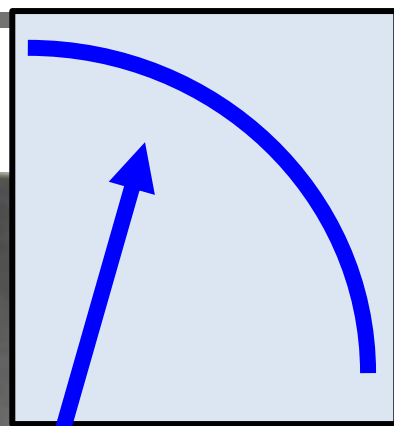
Isolation of a and stress using $\sin^2 \psi$ technique.

- TIG溶接のその場X線回折。
- 原子力研究開発機構、SP8産業利用推進室と共同で実験。
- 大型放射光施設のSPring-8: BL46XU。
- 試料: SS400(フェライト)。100mm角×12mm厚さ。
- ビームサイズ: 500 μ m(H)×50 μ m(V)。X線エネルギー: 30keV。入射角: 5度
- TIG溶接の電流: 150A。アーク長: 3mm。
- 溶接トーチ: -40~40mm。速度: 1mm/秒。
- 二次元検出器: PILATUS2M。1475(水平)×1679(鉛直)、0.172mm角/素子。
- 溶接開始から0.1秒毎、300秒間、連続露光。
- 溶接ビード幅: ~6mm、溶接試料板: 水冷した銅板上に固定して冷却。
- X線照射位置: x=0 mm、y=0、2、3、4、5、6、7、8、12 mm。y方向の歪に対応。
- トーチと試料板が一体となったステージをCCWに90度回転して測定。x方向の歪。
- 各点毎に試料板交換。
- CeO₂(420)の回折線から校正したカメラ長: 1005 mm。



2-3 SS400のTIG溶接 (150A、アーク長:3mm)

トーチ
x:-40→40mm
1mm/秒
ビード幅:6mm



PILATUS2M
→0.1秒露光
0~300秒

回折X線
→y、x方向の歪

SS400:
・低炭素鋼
・100×100×12mm



測定位置(y):
0,2,3,4,5,6,7,8,12mm
測定点毎に試料交換

入射X線(E=30keV)
0.5mm(水平)×0.05mm(垂直)

3-1 溶接中央(y=0mm)での相変態

溶接前 $\alpha(211)$

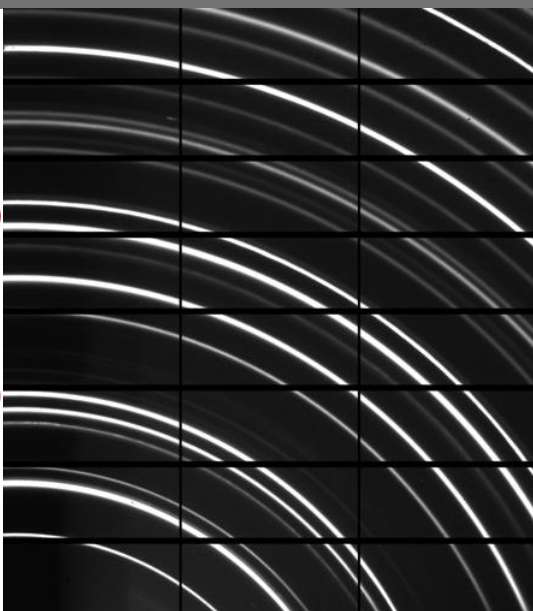
Fe₃O₄(444)
Fe₃O₄(622)
Fe₃O₄(533)
Fe₃O₄(620)

$\alpha(200)$

Fe₃O₄(440)
Fe₃O₄(511)
Fe₃O₄(422)

$\alpha(110)$

Fe₃O₄(400)
Fe₃O₄(222)
Fe₃O₄(311)
Fe₃O₄(220)



熔融直前

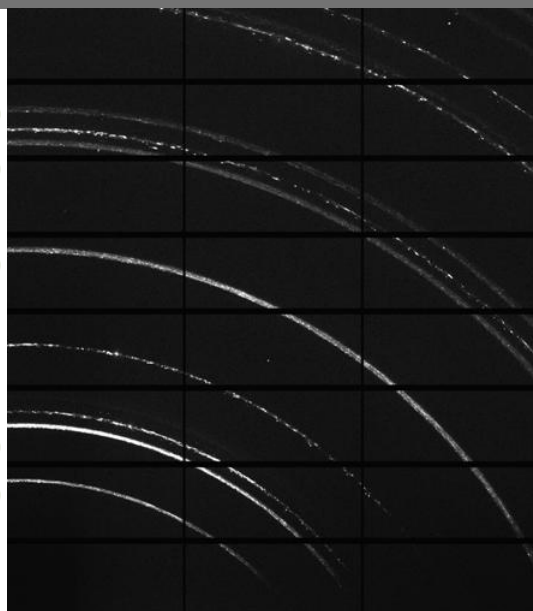
▪ FeO、Fe(γ)
の順で出現

FeO(222)
 $\gamma(220)$
FeO(311)

FeO(220)

$\gamma(200)$

$\gamma(111)$
FeO(200)
FeO(111)



熔融中

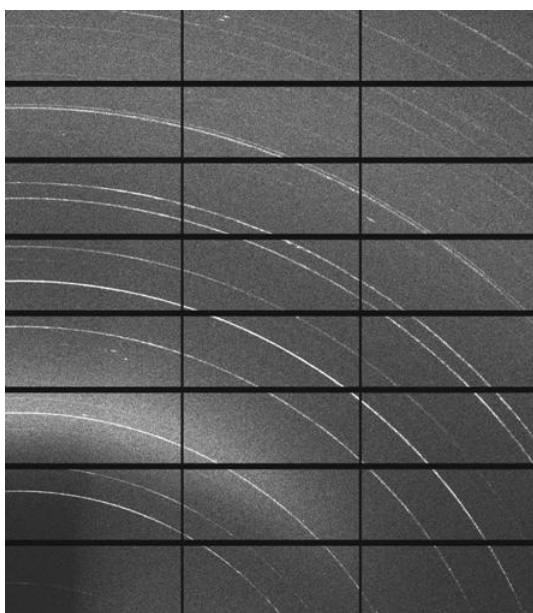
▪ FeC

FeC(203)

FeC(201)

FeC(010)

FeC(002)



凝固直後

▪ Fe(α)、Fe(γ)

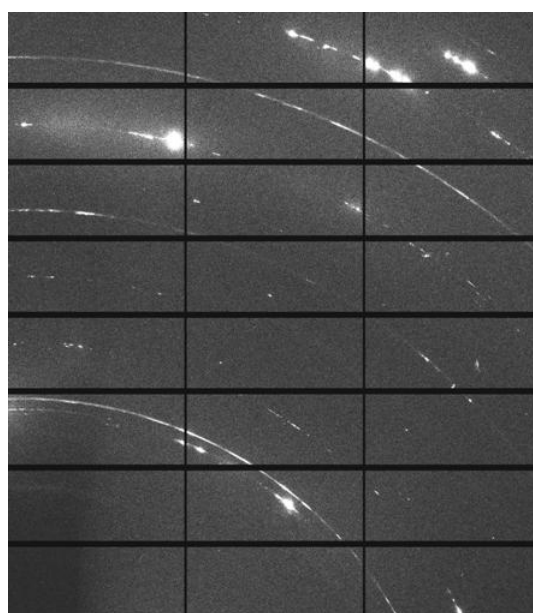
$\alpha(211)$

$\gamma(220)$

$\alpha(200)$

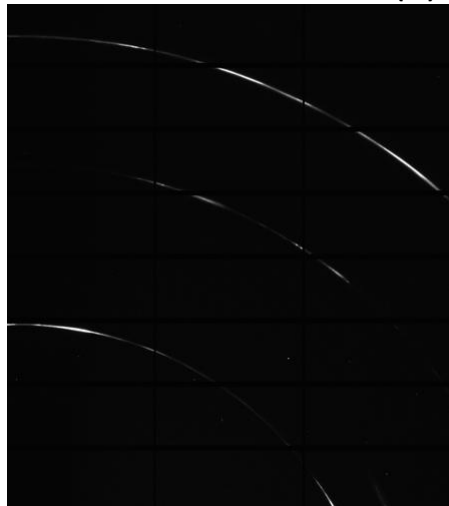
$\gamma(200)$

$\alpha(110)$
 $\gamma(111)$

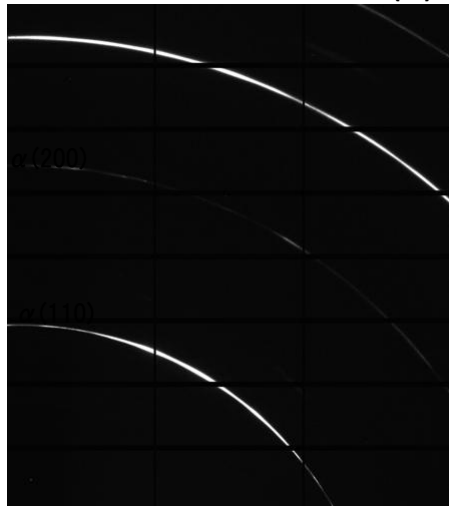


3-3 SS400:溶接近傍での溶接後(80秒後)

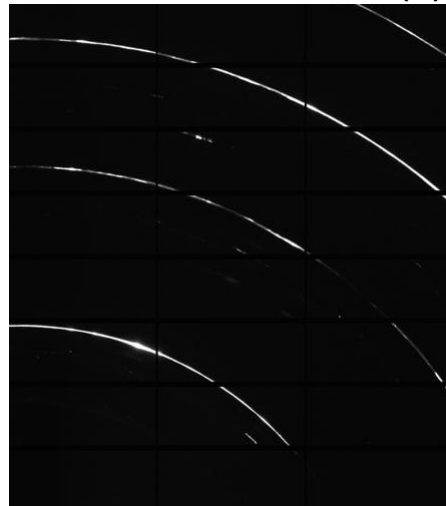
溶接中央から:0mm(Y)



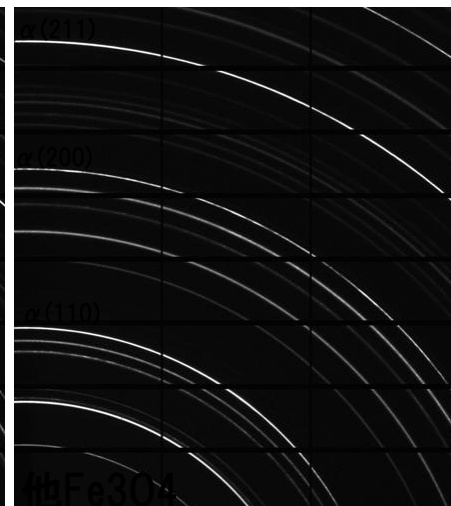
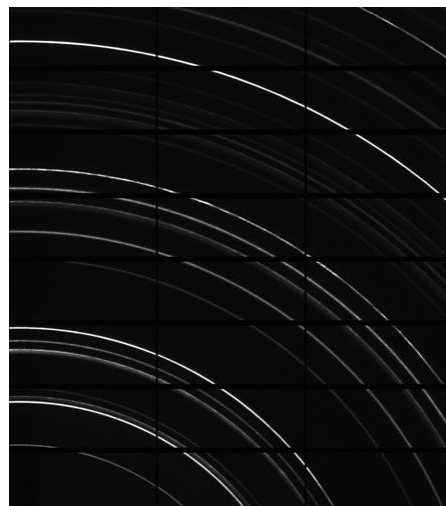
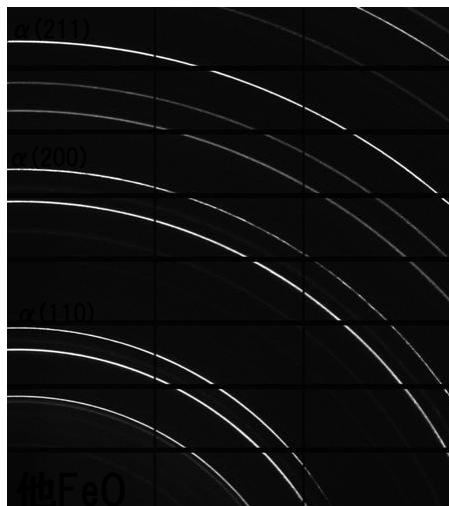
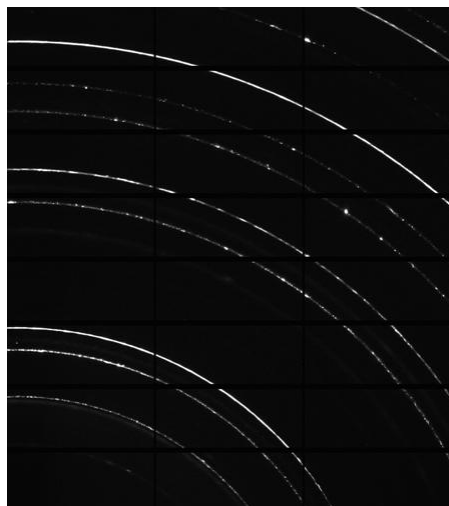
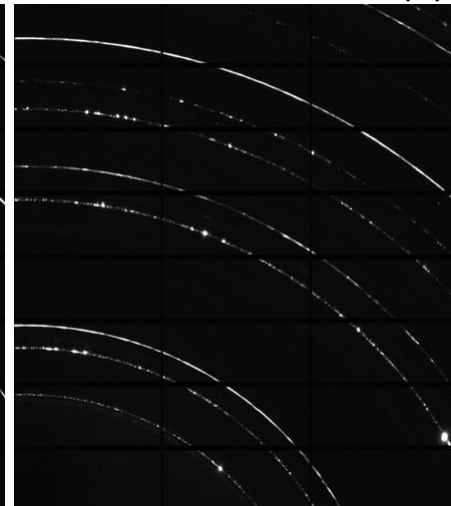
溶接中央から:2mm(Y)



溶接中央から:3mm(Y)



溶接中央から:4mm(Y)



溶接中央から:5mm(Y)

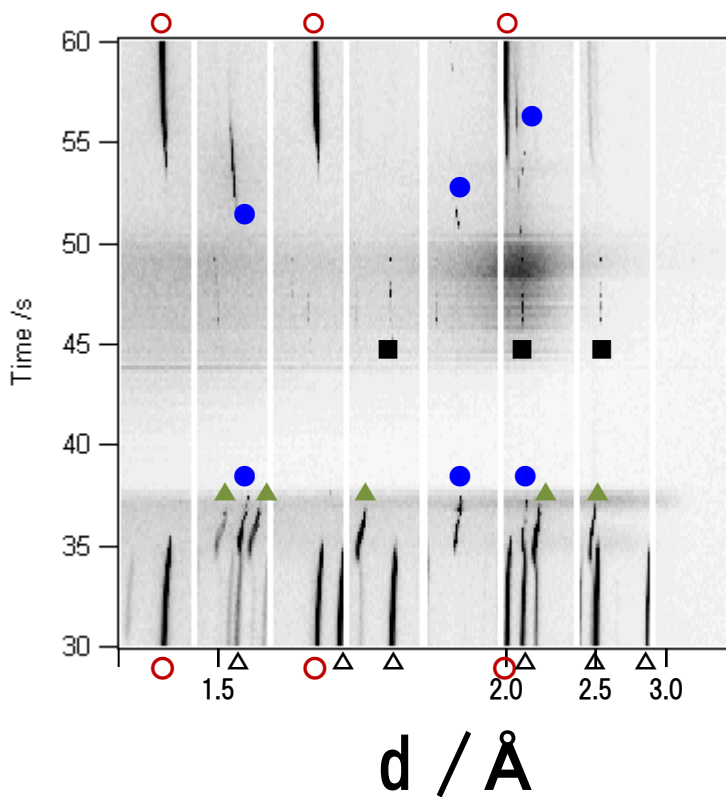
溶接中央から:6mm(Y)

溶接中央から:7mm(Y)

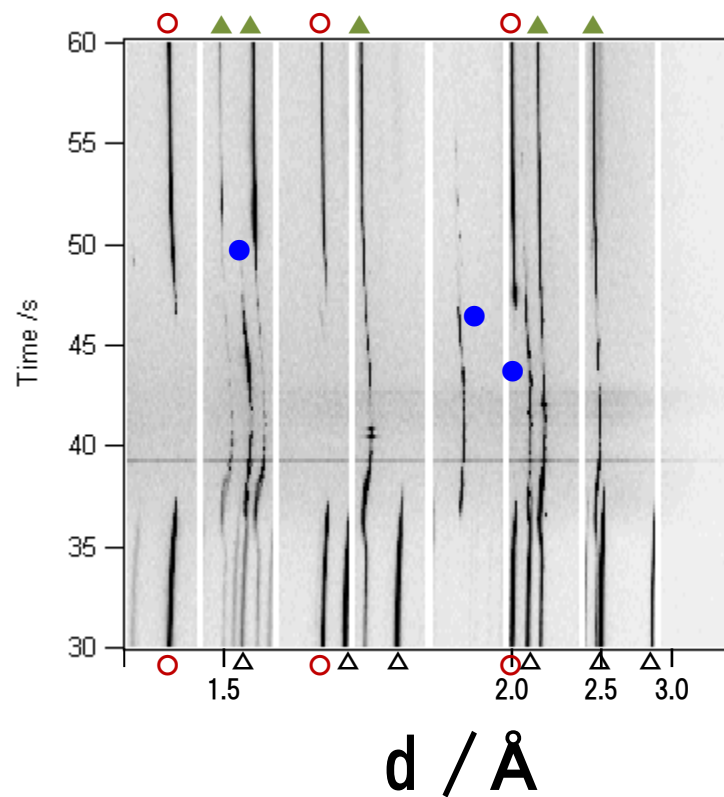
溶接中央から:8mm(Y)

3-4 溶接近傍の相変態(Y=0、4mm)

溶接中央から:0mm(Y)



溶接中央から:4mm(Y)

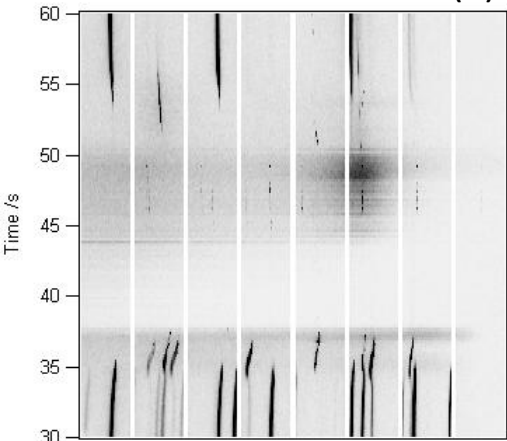


- : α相
- : γ相
- △: Fe₃O₄
- ▲: FeO
- : FeC

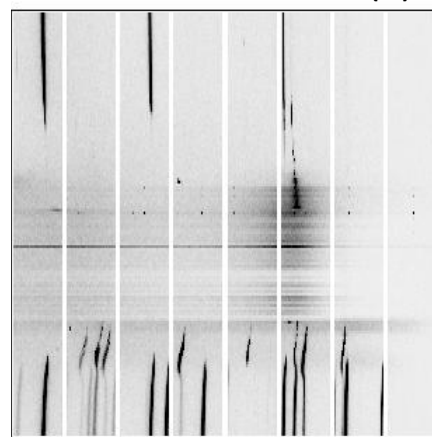
- 溶融部: α相 + Fe₃O₄ → γ相 + FeO → 溶融(FeC) → γ相 → α相
- HAZ部: α相 + Fe₃O₄ → γ相 + FeOで膨張と収縮 → α相 + FeO

3-6 SS400: 溶接近傍での相変態

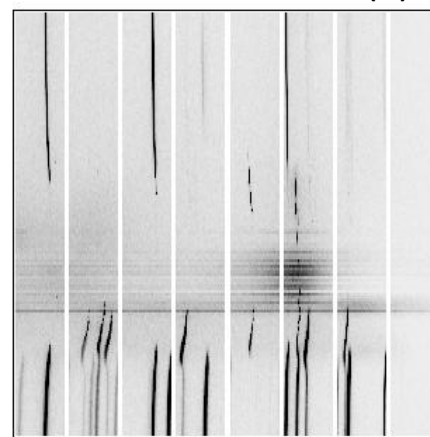
溶接中央から:0mm(Y)



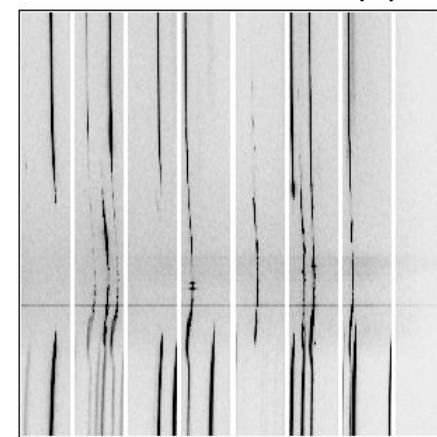
溶接中央から:2mm(Y)



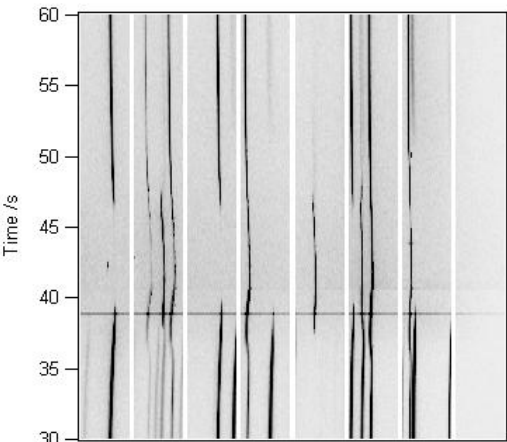
溶接中央から:3mm(Y)



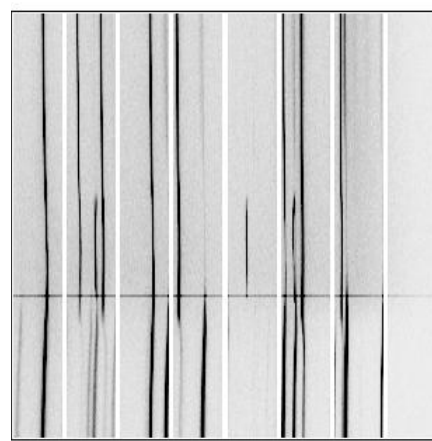
溶接中央から:4mm(Y)



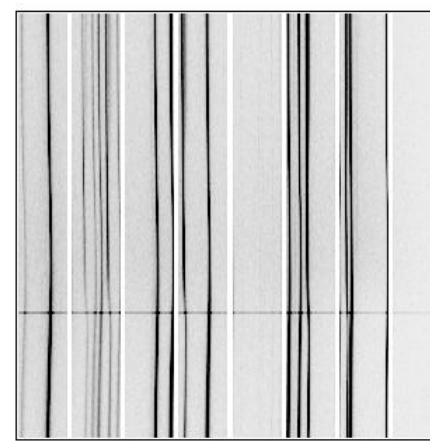
溶接中央から:5mm(Y)



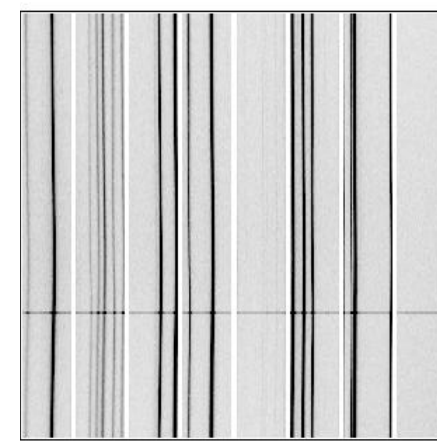
溶接中央から:6mm(Y)



溶接中央から:7mm(Y)

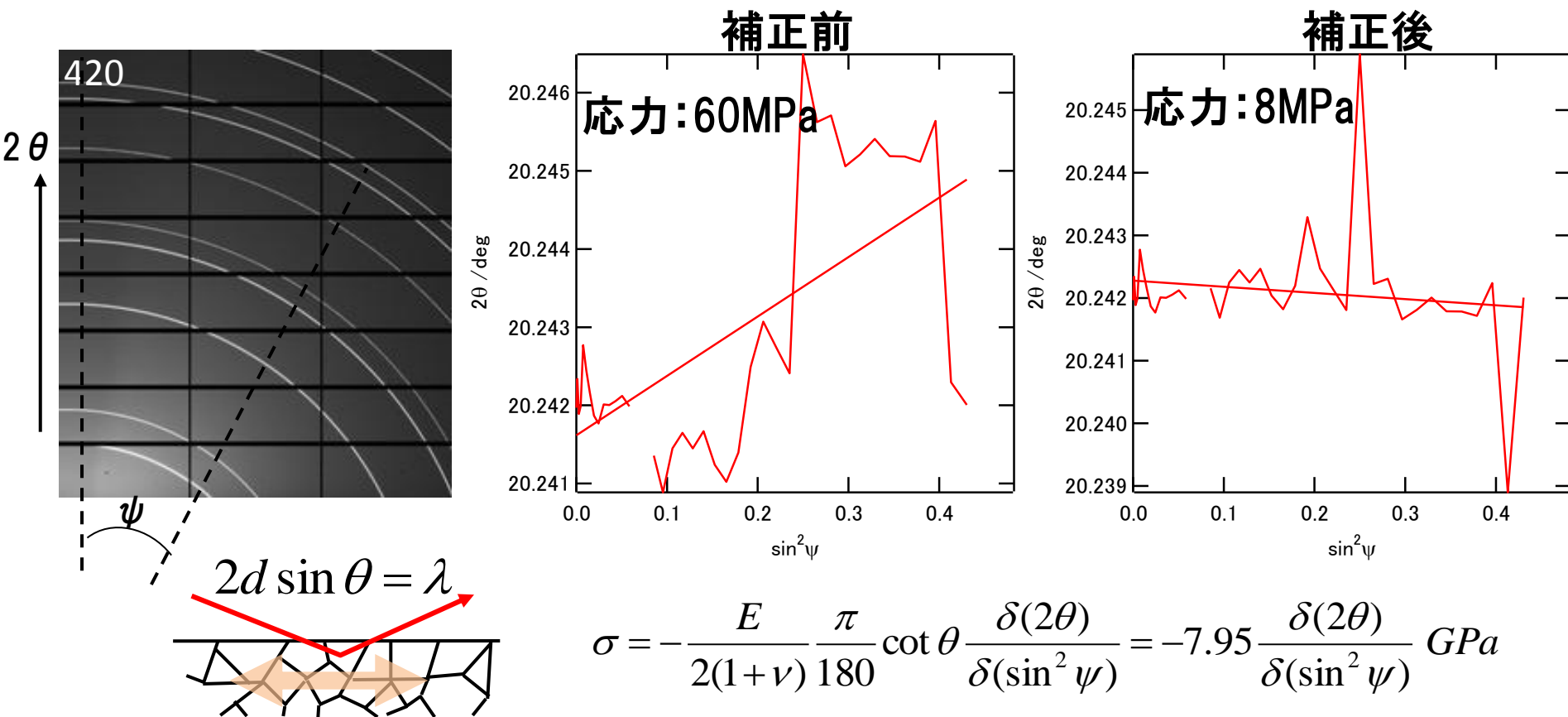


溶接中央から:8mm(Y)



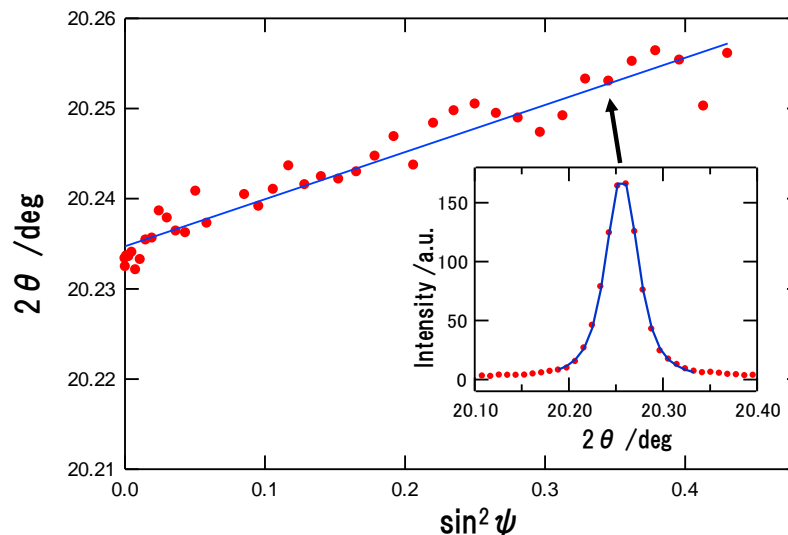
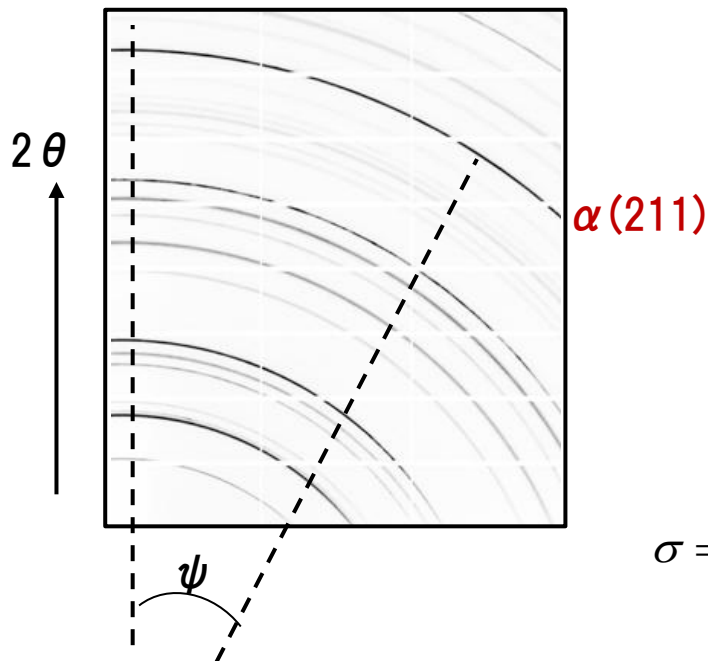
4-1 無歪CeO₂(420)による検出器の補正

- 回折X線に対する検出器のあおり角度の補正
- 24個の検出ブロック間の位置ズレ補正



■ 精度: 8MPa以内で応力解析が可能

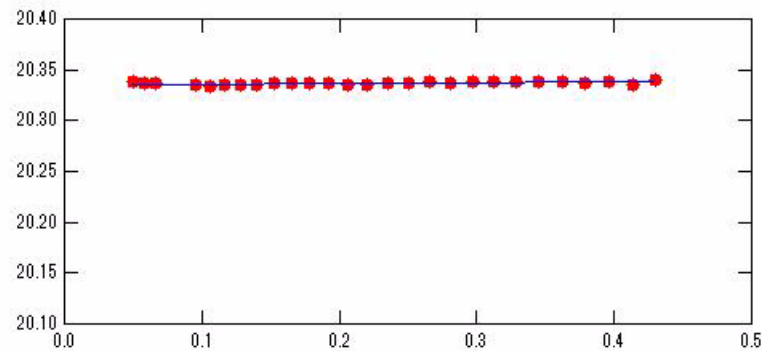
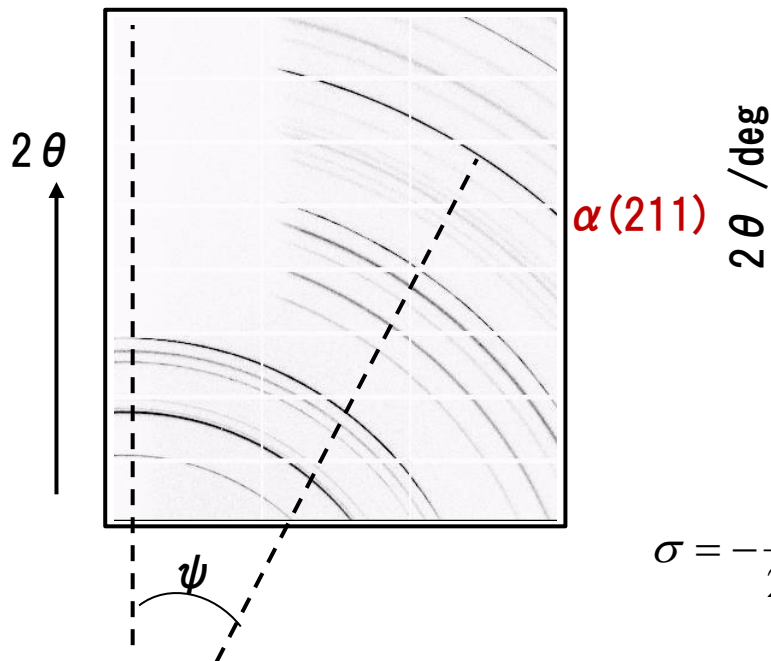
X線回折像



$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180} \cot \theta \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} = -7.95 \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} \text{ GPa}$$

- 平面応力を仮定した $\sin^2 \psi$ 法による応力解析
- 回折X線像 → $2\theta / \phi$ 像 → ピークフィッティング
- ヤング率: 211 GPa、ポワソン比: 0.29
- 格子定数から温度を算出
- 線膨張係数: $11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

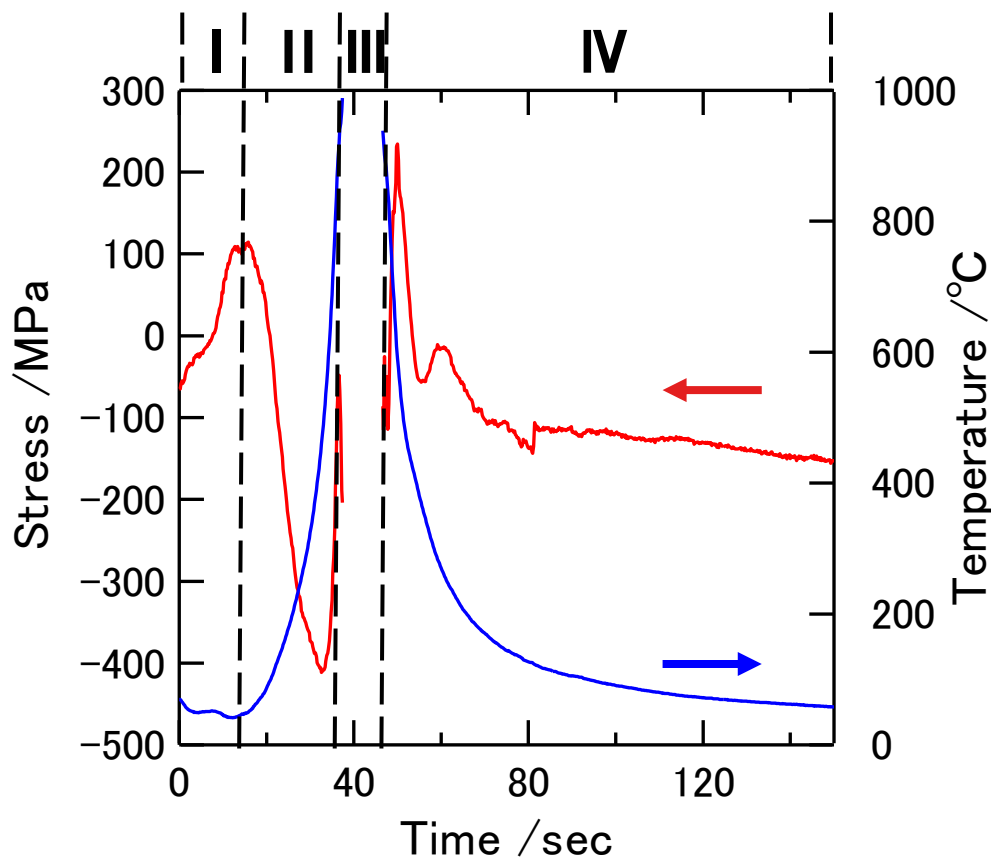
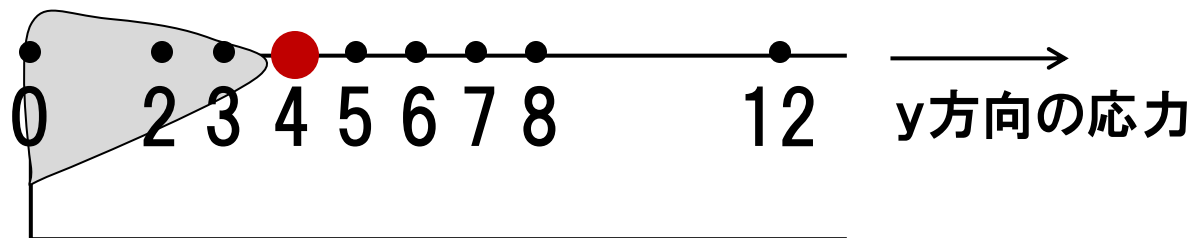
X線回折像



$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180} \cot \theta \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} = -7.95 \frac{\delta(2\theta)}{\delta(\sin^2 \psi)} \text{ GPa}$$

- 平面応力を仮定した $\sin^2 \psi$ 法による応力解析
- 回折X線像 → $2\theta / \phi$ 像 → ピークフィッティング
- ヤング率: 211 GPa、ポワソン比: 0.29
- 格子定数から温度を算出
- 線膨張係数: $11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

4-4 SS400: $\sin^2 \psi$ 法による応力解析($Y=4\text{mm}$)



領域 I : 引張応力増加
領域 II : 圧縮応力増加
領域 III : (γ のみ)
領域 IV : 引張から冷却
過程で圧縮応力残留

溶接シミュレーション解析による温度、応力の検証を目的に、SPring-8においてTIG溶接のその場X線回折によるHAZ領域の相変態、温度、応力の時間変化を評価した。

- SS400の相変態(HAZ): $\alpha + \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma + \text{FeO} \rightarrow \alpha + \text{FeO}$
→Fe-Oの状態図と一致
- 溶接シミュレーションを検証する基礎データの取得に成功
- SS400の応力(HAZ): 領域Ⅰ: 引張応力増加、領域Ⅱ: 圧縮応力増加、領域Ⅲ: γ のみ、領域Ⅳ: 引張から冷却過程で圧縮応力残留

本研究をご支援頂いた方々に、感謝申し上げます。

総合科学研究機構

張朔源

日本原子力研究開発機構

菖蒲敬久, 城鮎美

高輝度光科学研究センター

佐藤眞直

(株)日立製作所 研究開発グループ

高松 大郊、桑原孝介

本研究は、SPring-8の実験課題(2014A1569、2014B1941)で実施しました。

HITACHI
Inspire the Next