

令和4年度 仙台市既存放射光施設活用事例創出事業
(トライアルユース)
成果報告

「レーザ洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

東成エレクトロビーム株式会社

目次

- (1) 会社概要・沿革
- (2) レーザ洗浄機「イレーザー®」について
- (3) 事業の取組み体制および実施メンバー
- (4) 取組みの概要
 - 背景
 - 事前検証結果
 - 仮説検討
 - 目的
 - ラボ分析とSpring-8の違い
- (5) 検証内容
 - 検証の流れ
 - 試料作製
 - ラボ分析
 - Spring-8での測定
 - 試料観察
- (6) 本事業の成果
- (7) 謝辞

(1) 会社概要・沿革

- 設立 : 1977年6月2日
- 資本金 : 8,500万円
- 従業員 : 53名
- 事業内容 : ①受託加工業 (電子ビーム溶接・レーザ加工)
 ②**レーザ洗浄機「イレーザー®」**の開発・製造・販売
 ③エンジニアリング事業
 ④受託検査業

1977年 : 東成エレクトロビーム(株)設立
 電子ビーム溶接業開始

1983年 : レーザ加工業開始

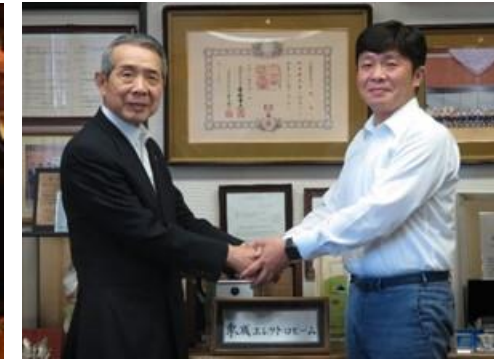
2005年 : イレーザー開発着手

2014年 : イレーザー販売開始

2020年 : X線CT装置受託撮像サービス開始



創業者:上野 保
 平成28年度
 秋の叙勲(旭日双光章)受章



左:上野 保
 右:上野 邦香(現社長)

40年以上にわたる電子ビーム溶接・レーザ加工の受託加工実績

(2) レーザ洗浄機「イレーザー®」について

【レーザー洗浄の原理】

① 蒸発

除去物がレーザー光の熱を吸収することで蒸発する

② 衝撃圧力

母材表面にプラズマが発生し、その衝撃から汚れが剥離する



イメージ図



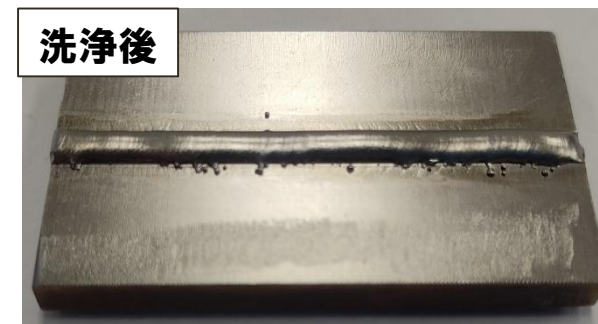
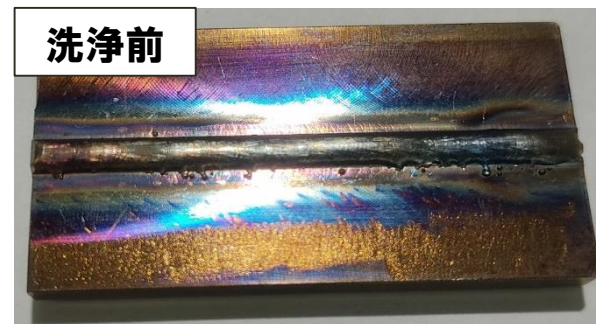
蒸発と衝撃圧力の2つの原理により
母材から対象物が除去される

【レーザー洗浄事例】

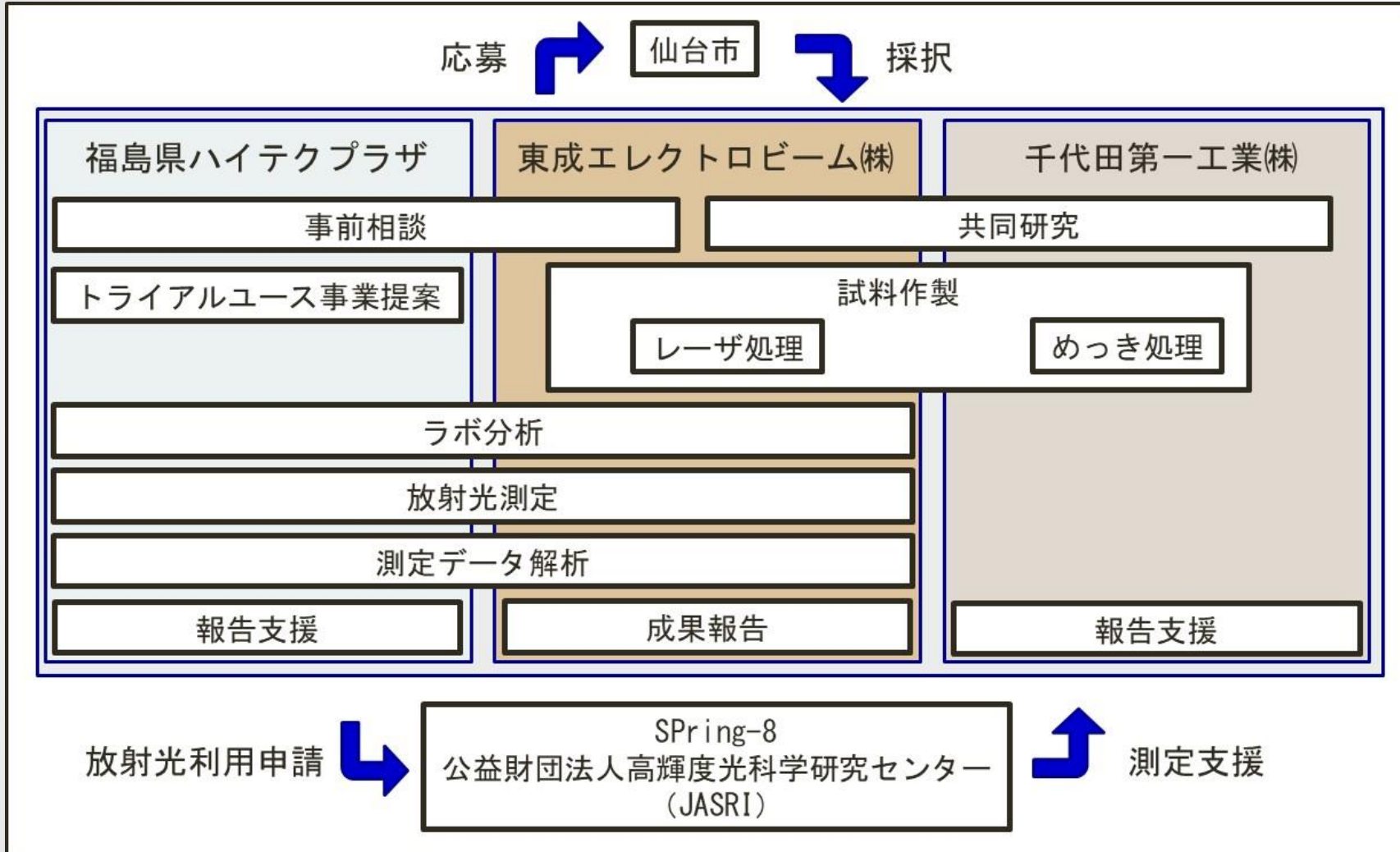
ボルトの赤錆除去



酸化被膜の除去



(3) 事業の取組み体制および実施メンバー



【実施メンバー】
福島県ハイテクプラザ

千代田第一工業(株)
鈴木 信夫

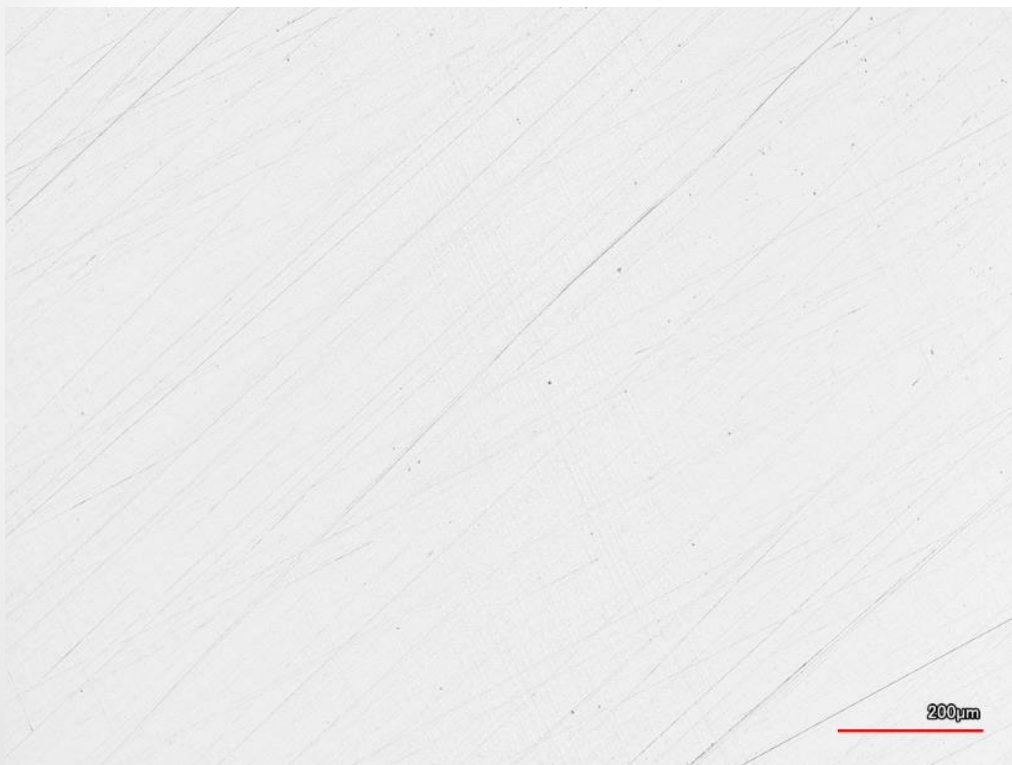
東成エレクトロビーム(株)
高島 康文
金沢 悠介
高橋 慧輔
西原 啓三

(4)「レーザー洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

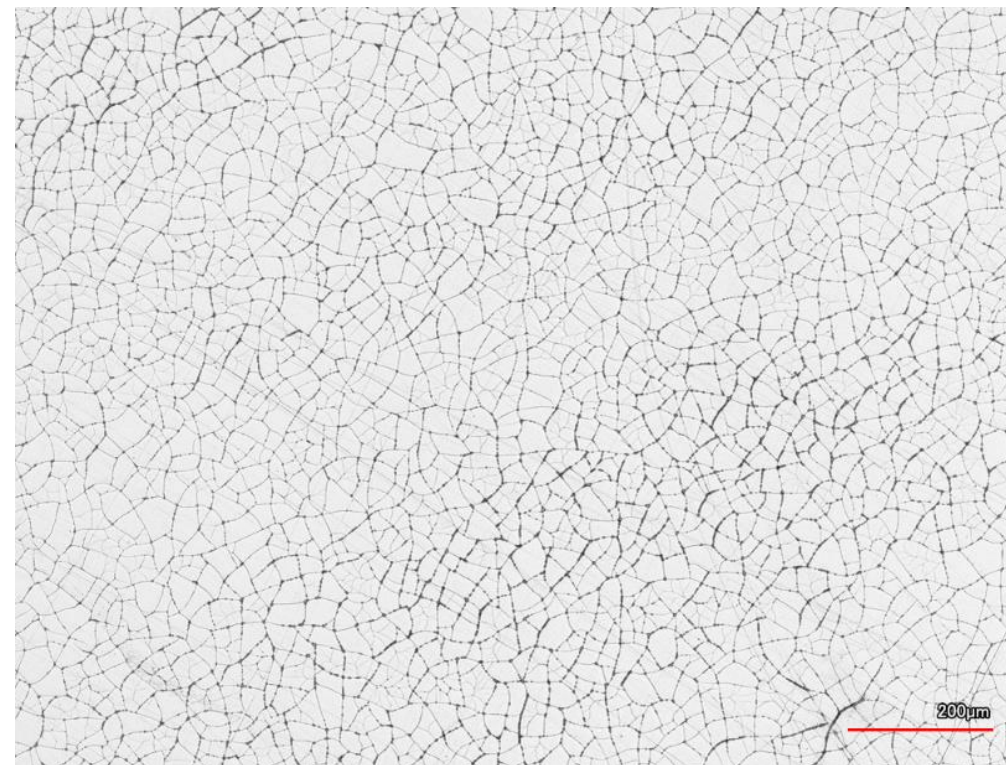
○背景

弊社が自社で開発・製造・販売しているレーザー洗浄機「イレーザー®」は、主に樹脂やゴムの成型金型のメンテナンス用として使用されており、材料の残渣・離型剤等の成形工程にて発生する汚れをレーザー照射によって除去可能であるが、めっき(特に硬質クロムめっき系)が施されたものに対しては表面に微細なクラックが発生することが確認されている。

この事象を解明するにあたり、初めに考慮すべきことを次項に述べる。



レーザー未照射 (バフ研磨済み)



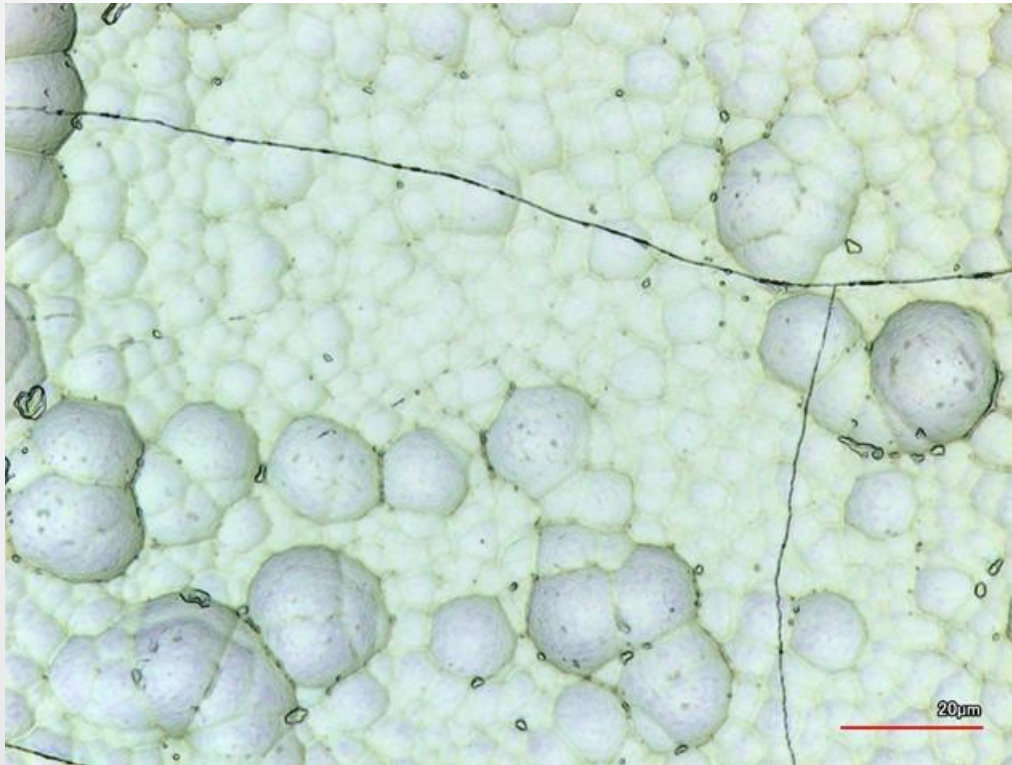
レーザー照射後

(4)「レーザー洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

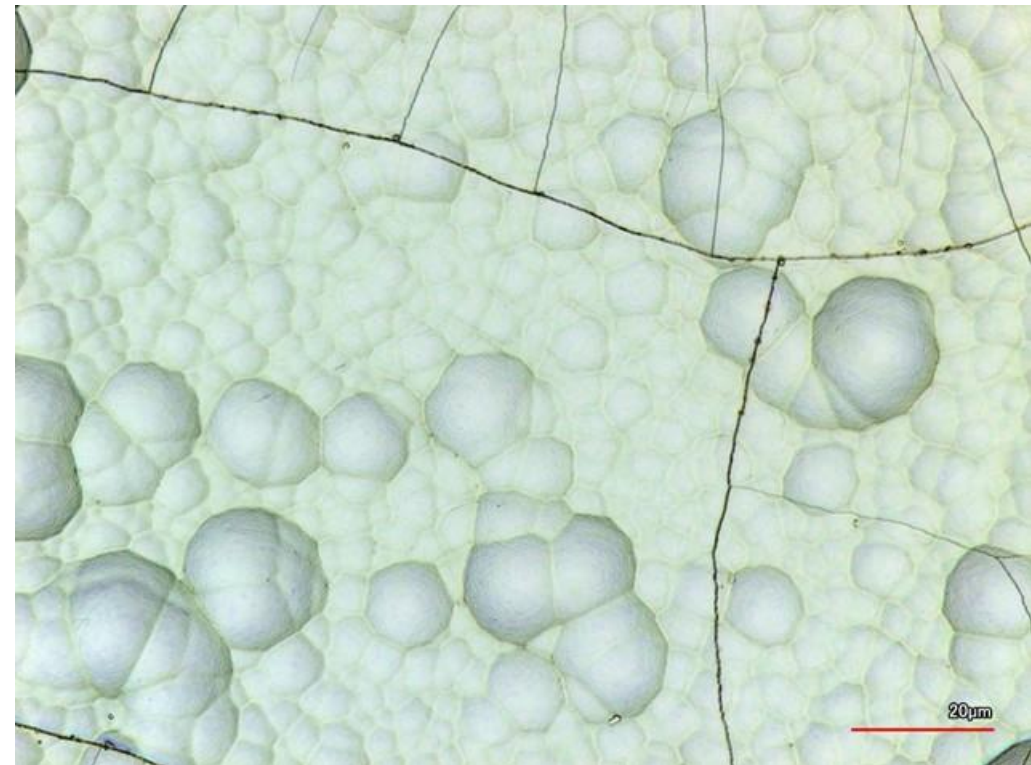
○事前検証結果

硬質クロム系めっきは生成過程において内在クラックを含んでいるが、バフ研磨工程で鏡面に仕上げられる。バフ研磨による状態変化を取り除くために未研磨の試料(下左図)にレーザー照射すると照射前に存在していたクラックとは別に新たなクラックを生じることが判明している。(下右図)

この新たに生じたクラックはレーザー照射によって材料が何らかの影響を受けているものと推測される。



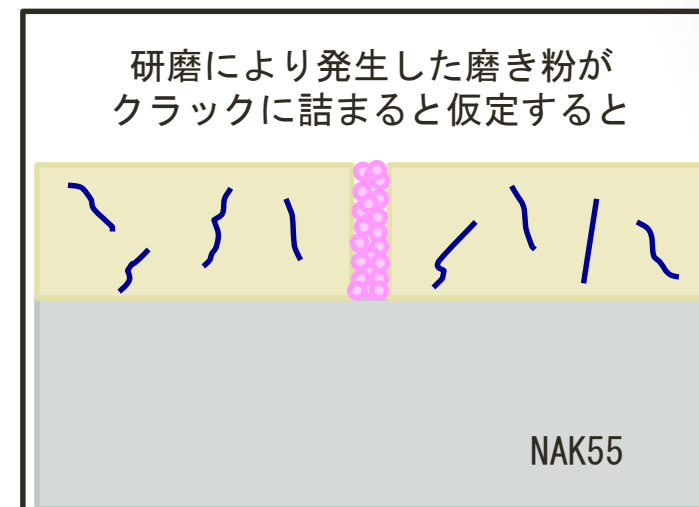
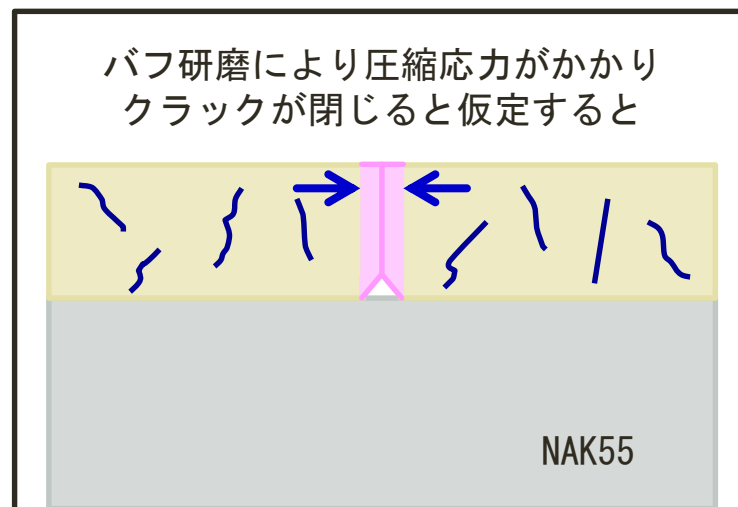
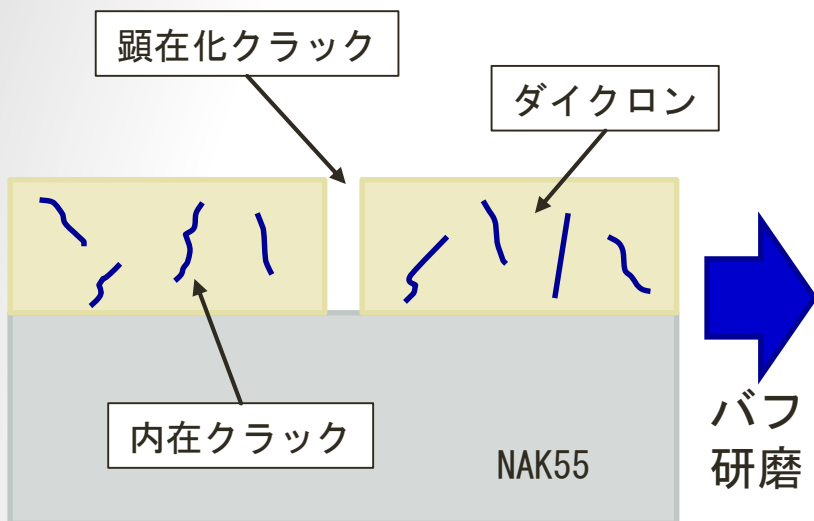
レーザー未照射 (バフ研磨なし)



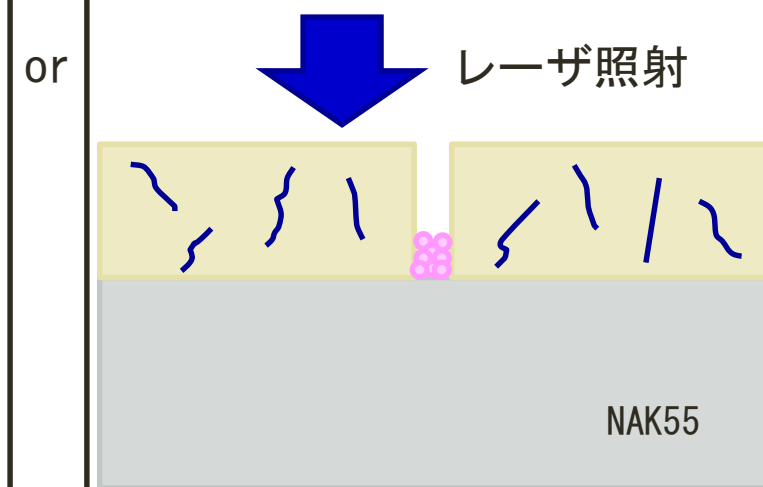
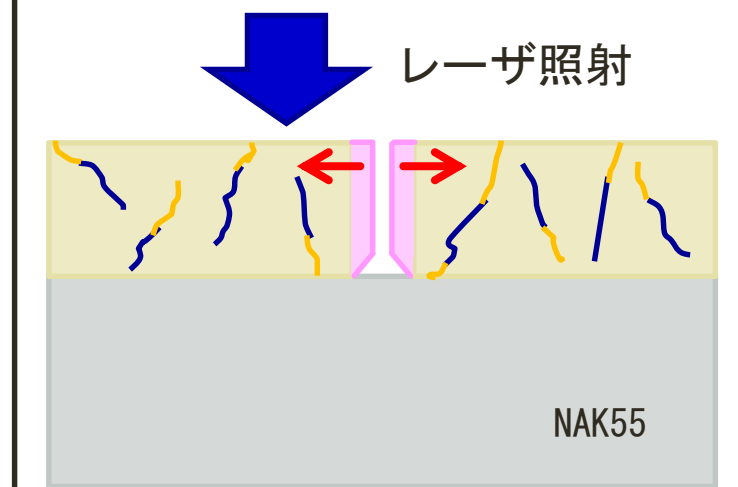
レーザー照射後

(4)「レーザー洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

○仮説検討：クラックに着目した状態変化モデル図（成膜→研磨→レーザー照射）



*ダイクロン（硬質炭化クロムめっき）
千代田第一工業 独自技術



引張応力が付与されていればクラックが開き かつ顕在化していない内在クラックが進展し、表面へ露出する

レーザー照射により表面の汚れが除去されるが、顕在化していない内部には直接影響を与えることはない

(4)「レーザ洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

○目的

前項での仮説においてレーザ照射によって引張応力が付与されると仮定すると実際の現象と結果が一致すると推測される。そのため、レーザ照射前後でめっきおよび母材の両部材に残留応力測定を実施し、そのメカニズムを解明する。

○レーザによる残留応力付与の事例とレーザ洗浄の比較

下表のように特殊な条件下においては、レーザピーニングと呼ばれる圧縮応力を付与することが知られている。また、レーザ局所加熱であれば通常は引張応力が付与されることも既知の事実である。

レーザ洗浄ではレーザピーニング条件に当てはまる項目もあるため、圧縮の残留応力を付与する可能性も否定出来ない。その場合、クラックの発生メカニズムを再度、仮説検討する。

	レーザピーニング		レーザ局所加熱	レーザ洗浄
主な目的	疲労特性の向上		溶接	汚れ除去
処理環境	大気	水中	大気	大気
レーザ照射	130fs	10ns	ms～連続照射	数十～数百ns
残留応力	圧縮応力	圧縮応力	引張応力	圧縮応力？ 引張応力？

(4)「レーザ洗浄における金属材料表面の残留応力変化」

○ラボ分析とSpring-8の違い

ラボ分析においては管球X線法を用いた測定であり、X線侵入深さは約 $5.6 \mu\text{m}$ である。めっきおよび母材の両部材の残留応力を測定する。

Spring-8においてはシンクロトン放射光源の特徴かつ多目的6軸 X線回折計を用いた侵入深さ一定法で測定・解析することでラボ分析では対応出来ない高精度・高分解能の測定が期待出来る。X線の侵入深さは侵入深さ一定法を採用するため約 $3.6 \mu\text{m}$ までとなるが、深さ方向に約 $0.5 \mu\text{m}$ ピッチで詳細な応力分布が測定可能となる。

めっきと母材それぞれの残留応力を切り分けて測定出来る可能性がある。



応力測定範囲のイメージ図

(5) 検証内容

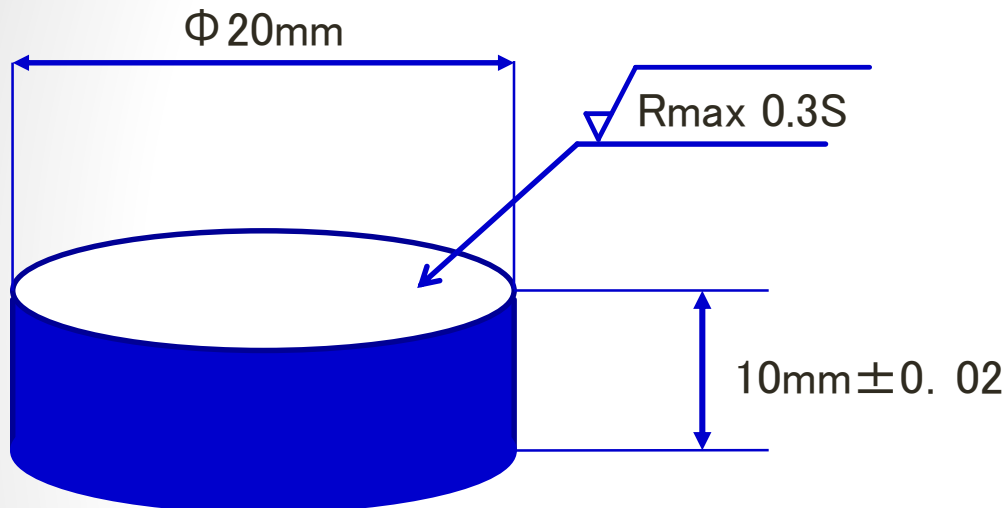
○検証の流れ

1. 試料作製
 - 母材(NAK55)に対してめっき未処理、及びめっき処理済み試料(ダイクロン)を用意
 - * 以降はめっき未処理＝めっき無、めっき処理済み＝めっき有と表記する
 - 過去の実績を基に、レーザー照射条件を選定し、試料作製
 - レーザー照射前後の試料表面状態を測定および観察
2. 福島県ハイテクプラザでの残留応力測定試験(ラボ分析)
 - 作成した試料に対しX線ひずみ測定を実施
 - 照射条件毎の傾向を確認
 - Spring-8にて測定する試料を決定
3. Spring-8での残留応力測定試験(本試験)
 - 2.で選定した試料に対してX線ひずみ測定を実施
 - 照射条件毎の残留応力の深さ方向分布を確認

(5) 検証内容

○試料作製

○形状仕様



電磁式膜厚計にて
厚さ測定

○母材仕様

材質: NAK55

- ・入熱による硬度変化・変形が少ない金型材料
- ・母材からの影響を最小限に抑える

○表面処理仕様

1. なし
2. ダイクロン(めっき厚さ: $3\mu\text{m}$)

○試料作成仕様

- ・各試料に対してレーザー条件を変え、レーザー照射実施
- ・表面観察し、各条件毎の差を確認
(面粗度、クラック有無、等)

* NAK55は高性能・精密プラスチック金型およびゴム金型用鋼
大同特殊鋼の登録商標

(5) 検証内容

○試料作製:レーザー照射条件

めっきにダメージが入る条件からダメージが入らない条件までを網羅する為、ダイクロンへ照射した過去の実績から下記の条件にてレーザー照射する。

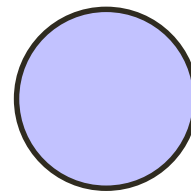
共通条件

照射パス数	1	[回]
洗浄定数	70	[-]

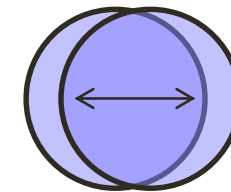
評価条件

No.	パルスエネルギー
[-]	[%]
1	30
2	50
3	70
4	90

※洗浄定数:レーザーの照射密度・除去サイズ等の要素をまとめて数値化したもの



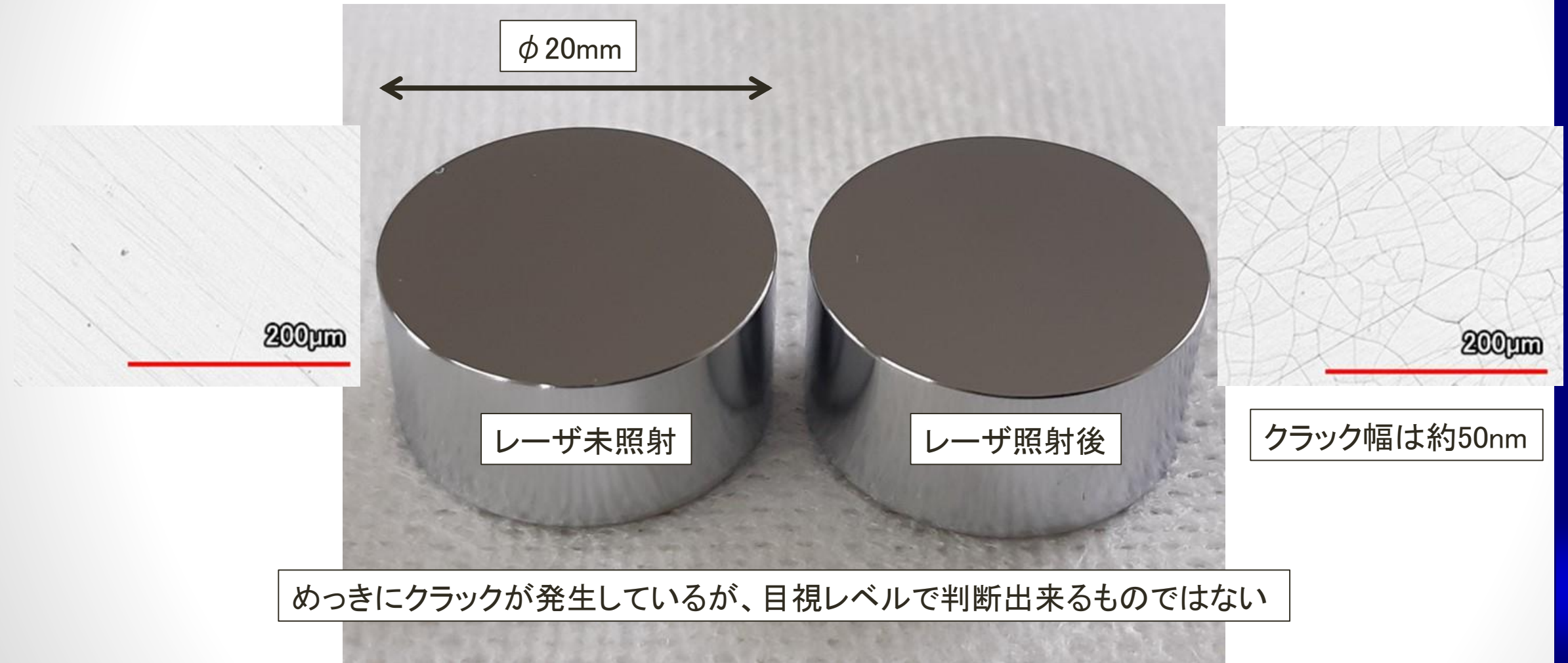
レーザー照射径(1パルス)



洗浄定数:
レーザー照射径の重なり率

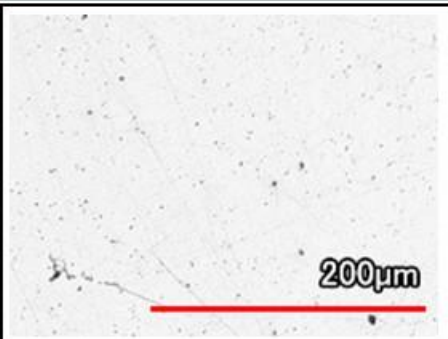
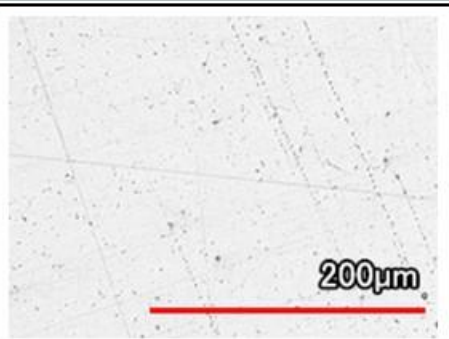
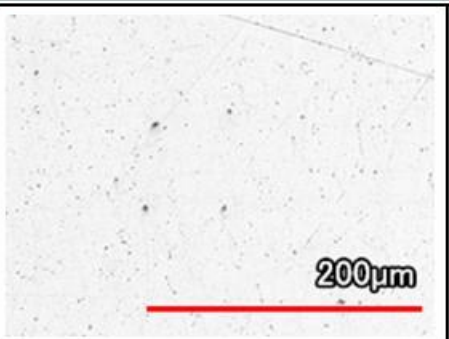

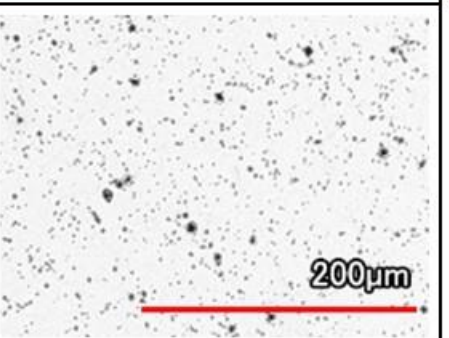
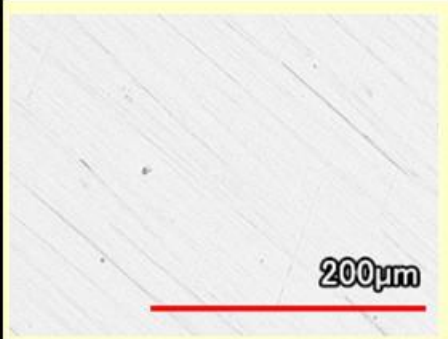



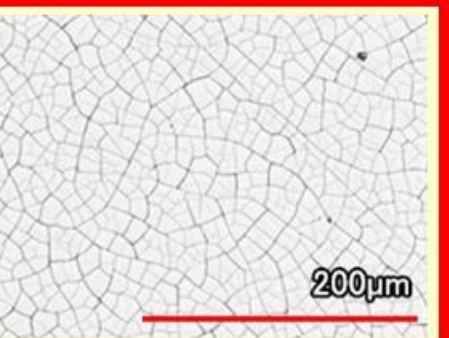
(5) 検証内容

○試料作製:外観確認



(5) 検証内容

○試料作製: 表面の拡大観察

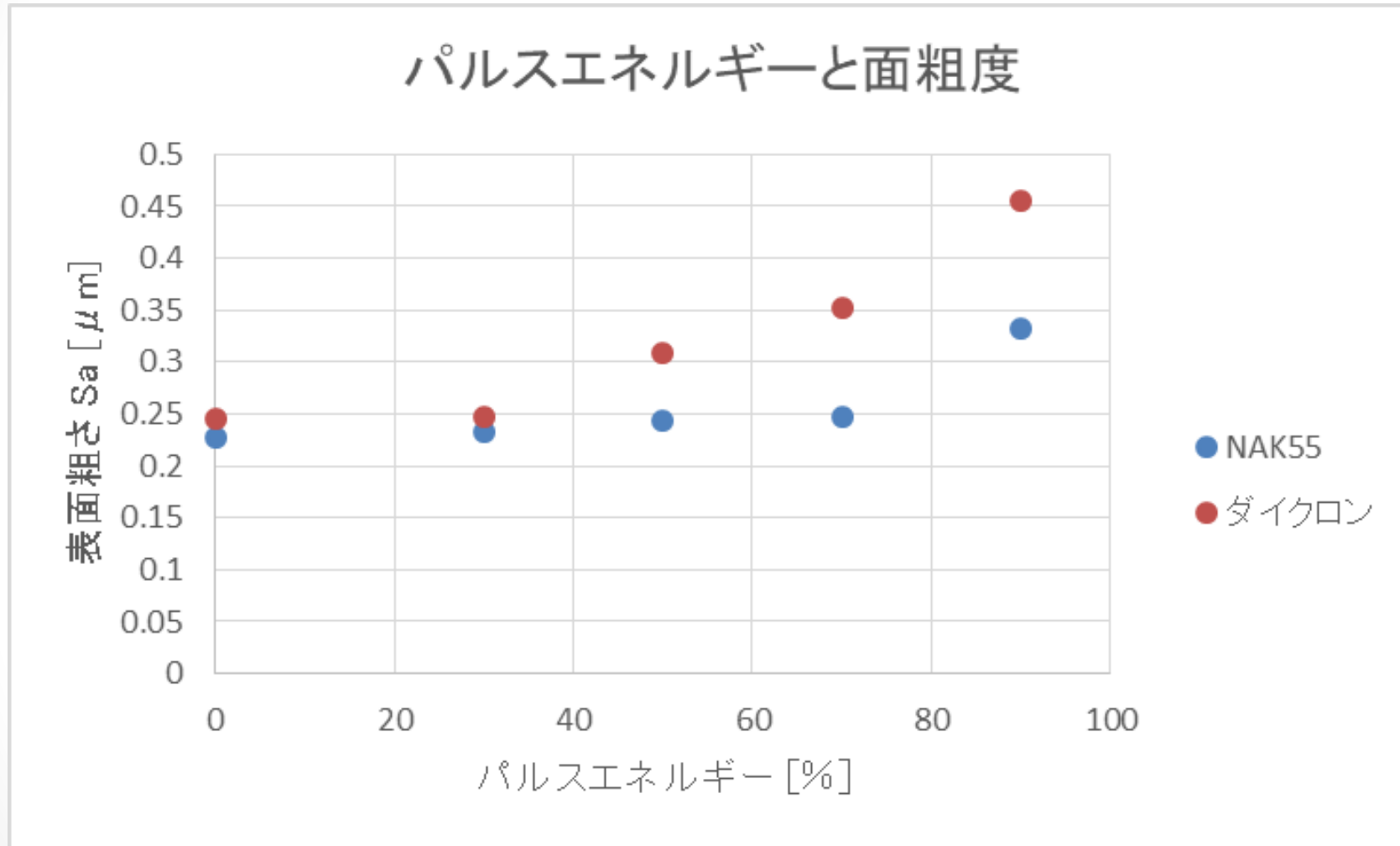
パルスエネルギー	0%(未照射)	30%	50%	70%	90%
めっき無					
めっき有					

クラックあり

形状解析レーザ顕微鏡 VK-X 100
(キーエンス製)にて測定

(5) 検証内容

○試料作製:面粗度測定



形状解析レーザ顕微鏡 VK-X 100
(キーエンス製)にて測定

(5) 検証内容

○試料作製:まとめ

めっき無及びめっき有材に対してレーザー照射した試料について結果をまとめると

パルスエネルギー	0%	30%	50%	70%	90%
めっき無	-	-	-	-	-
めっき有	-	-	クラック	クラック	クラック

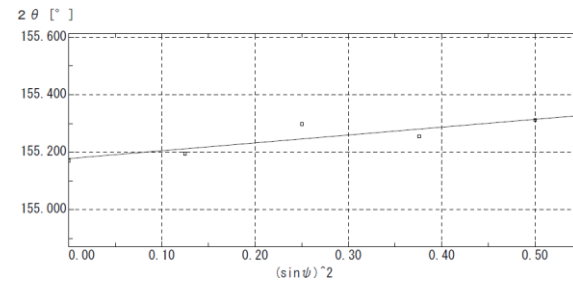
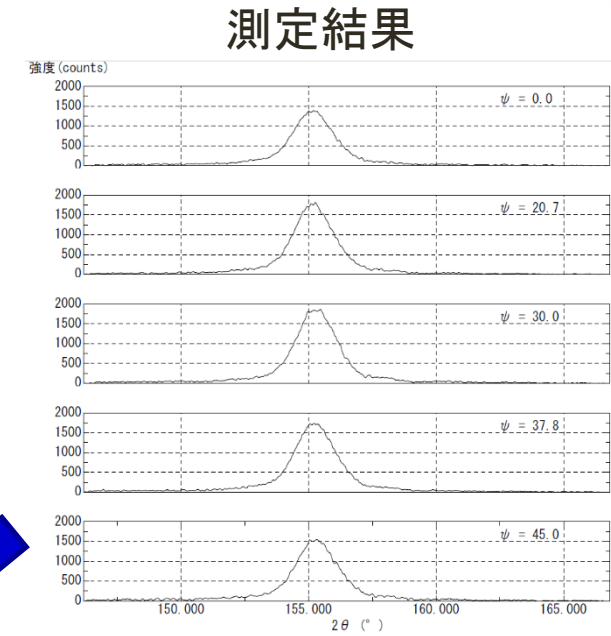
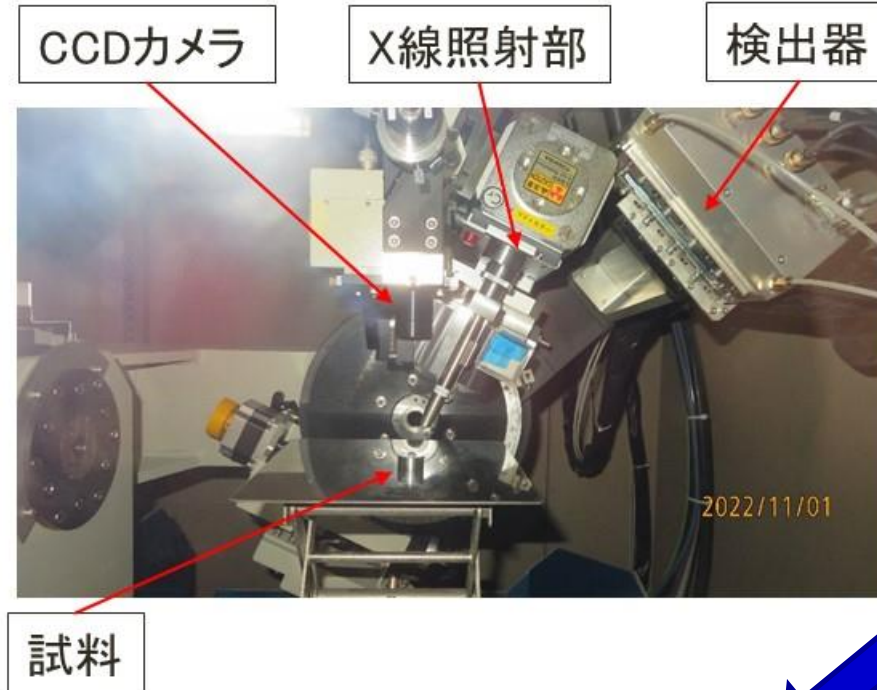
- めっき無 (NAK55) ではクラックは発生しなかった
- めっき有 (ダイクロン+NAK55) ではパルスエネルギー50%以上でめっきにクラックが発生
- 上記試料に対しX線による残留応力測定を実施し、クラック有無と残留応力値の相関を確認する

(5) 検証内容

○ラボ分析：福島県ハイテクプラザの試験設備および測定概要



X線歪測定装置
AutoMATE (Rigaku製)

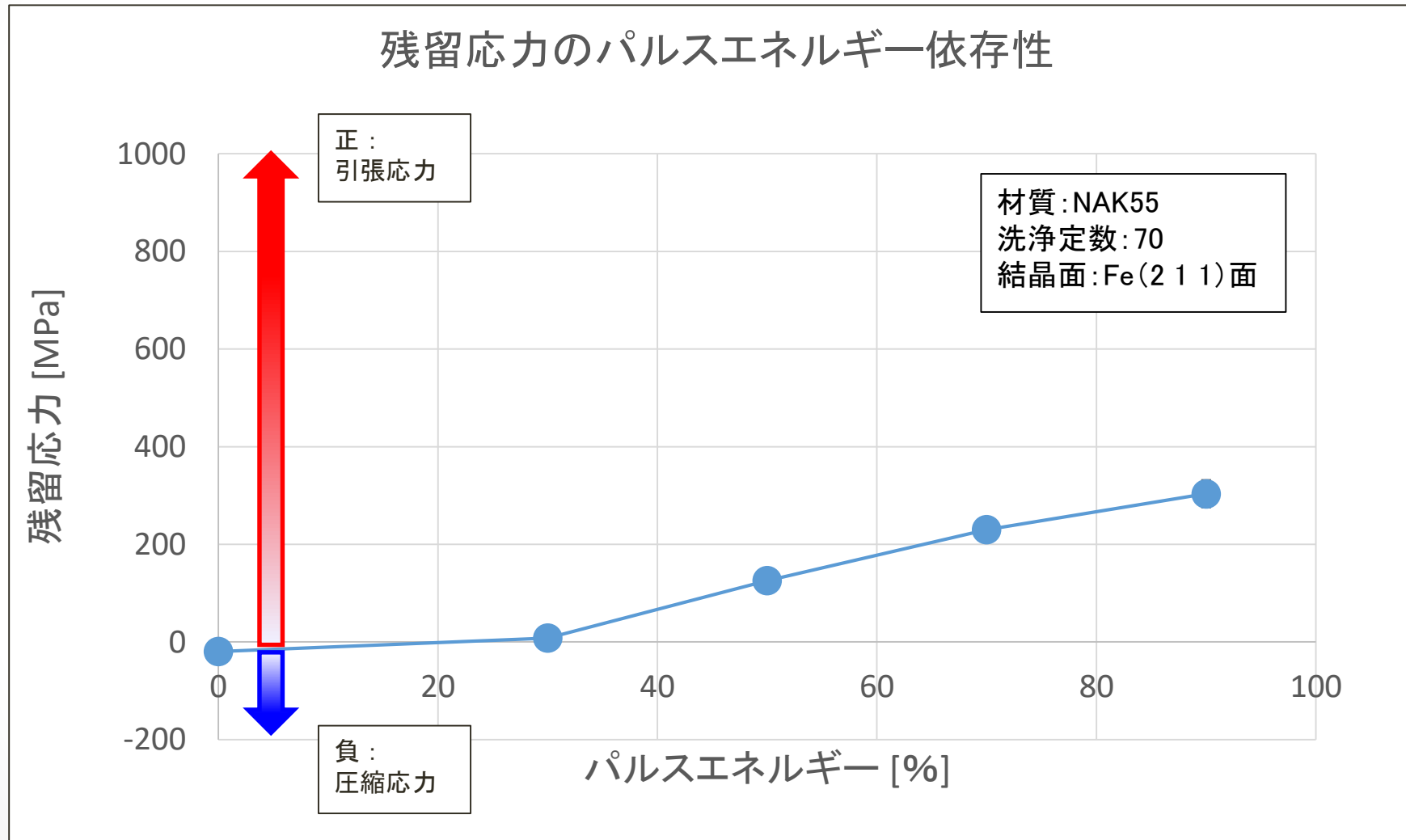


ピーク抽出し、 $\sin^2 \psi - 2\theta$ 線図を作成

応力に変換し、
試料別に比較

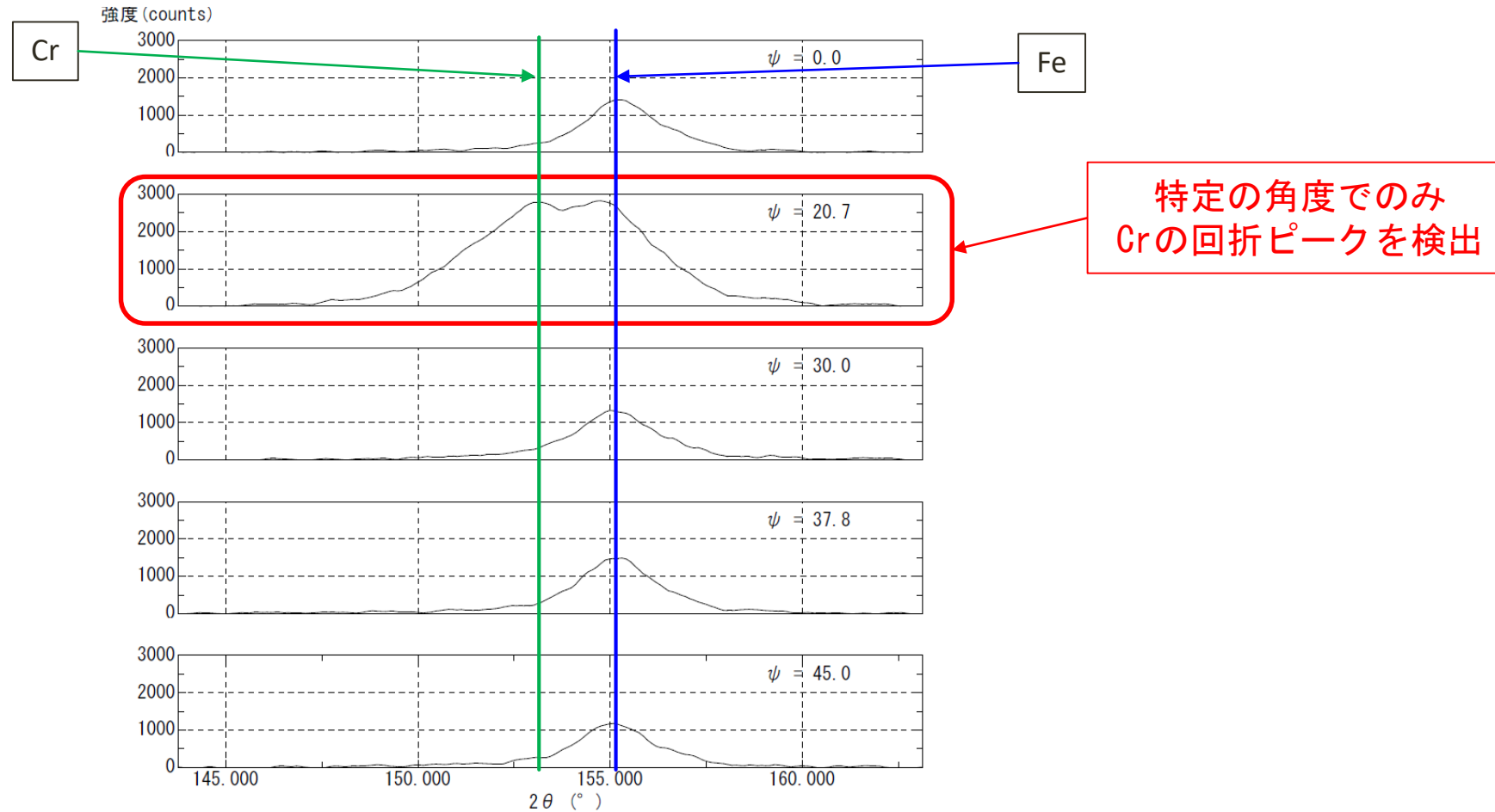
(5) 検証内容

○ラボ分析：めっき無(NAK55)の残留応力測定結果



(5) 検証内容

○ラボ分析：めっき有(ダイクロン+NAK55)の残留応力測定結果



- めっき部の応力解析に必要なデータが不十分であるため、応力値を算出することが出来なかった

(5) 検証内容

○ラボ分析：残留応力測定結果まとめ

○めっき無 (NAK55)

- レーザ未照射時は材料に圧縮応力が付与されており、レーザ照射により引張応力が付与
- パルスエネルギー(レーザ強度)を増加させると引張応力が増加

○めっき有 (ダイクロン+NAK55)

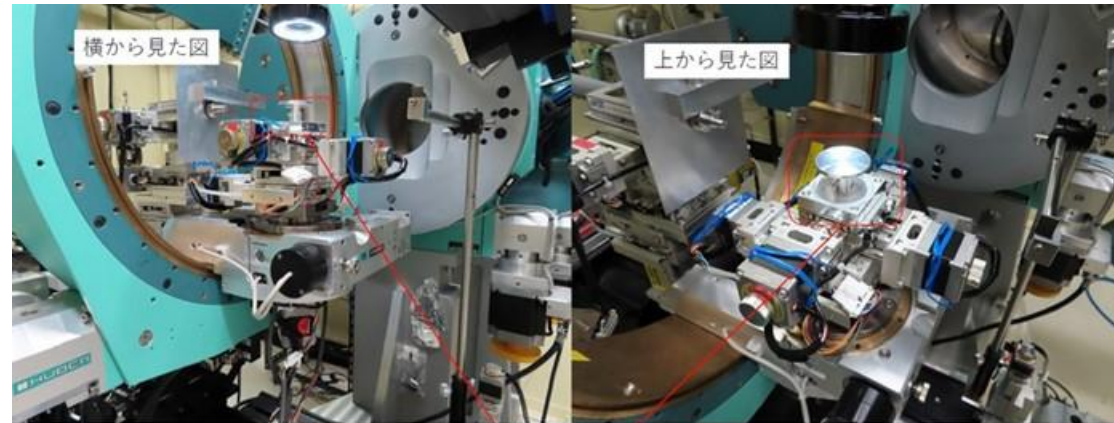
- クロムのピークが部分的にしか測定できず、解析に必要なデータを取得出来なかった

(5) 検証内容

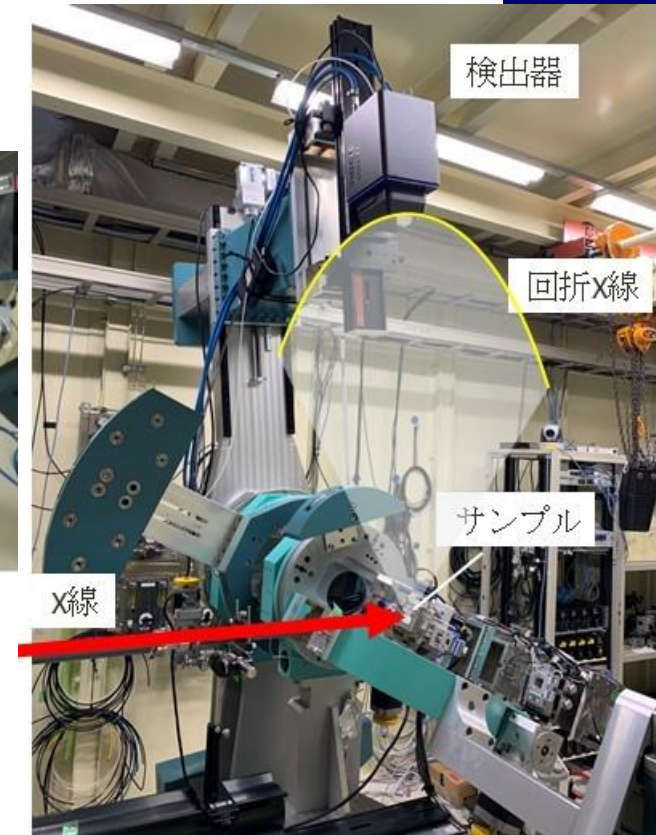
○Spring-8での測定：設備紹介 BL13XUおよび多目的6軸X線回折計



試験設備



試料ホルダー (試料保持部品)

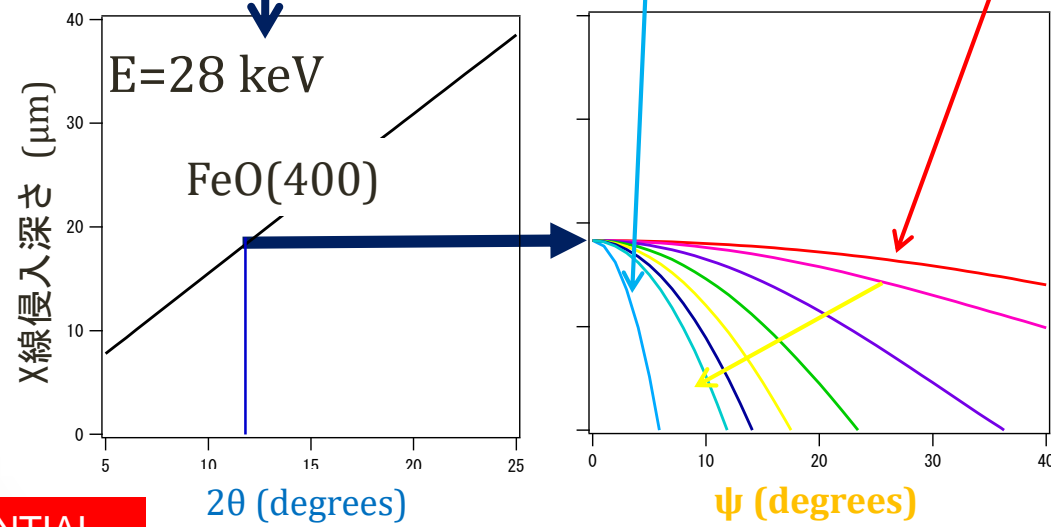
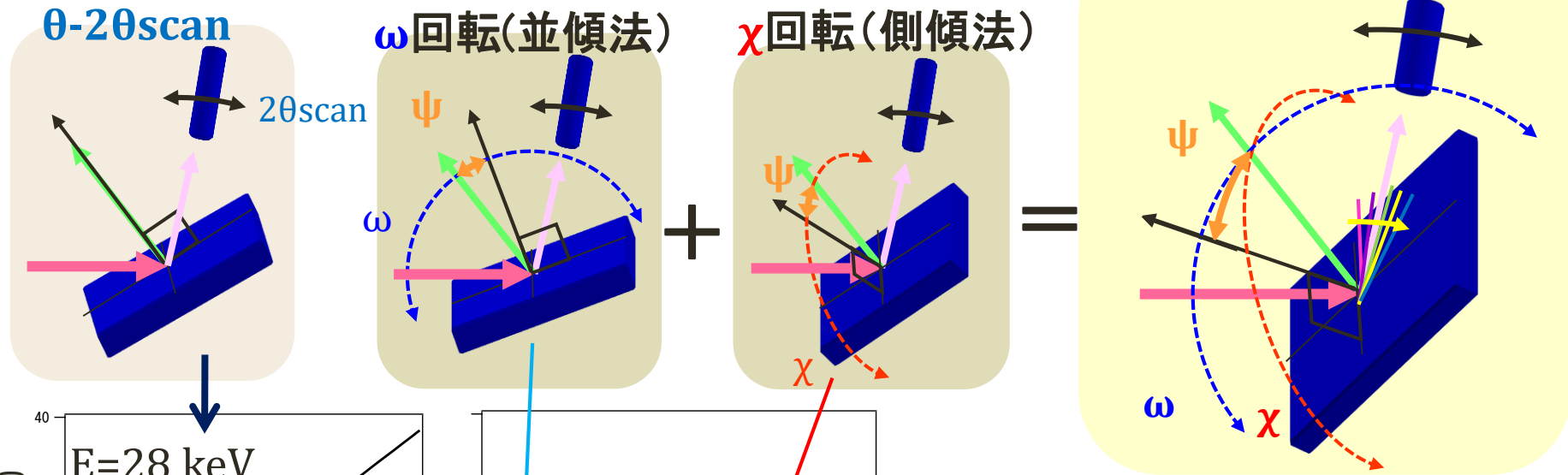


BL13XUの多目的6軸 X線回折計：X線の回折、散乱を用いた分析に対する多様なニーズに対応する為に整備。
ターゲットは薄膜、表面、界面の構造解析、残留応力解析やin-situ X線回折等。

(5) 検証内容

○Spring-8での測定：侵入深さ一定法について

ψ角を2軸で制御(並傾法と側傾法のコンビネーション)
ψ角の制御



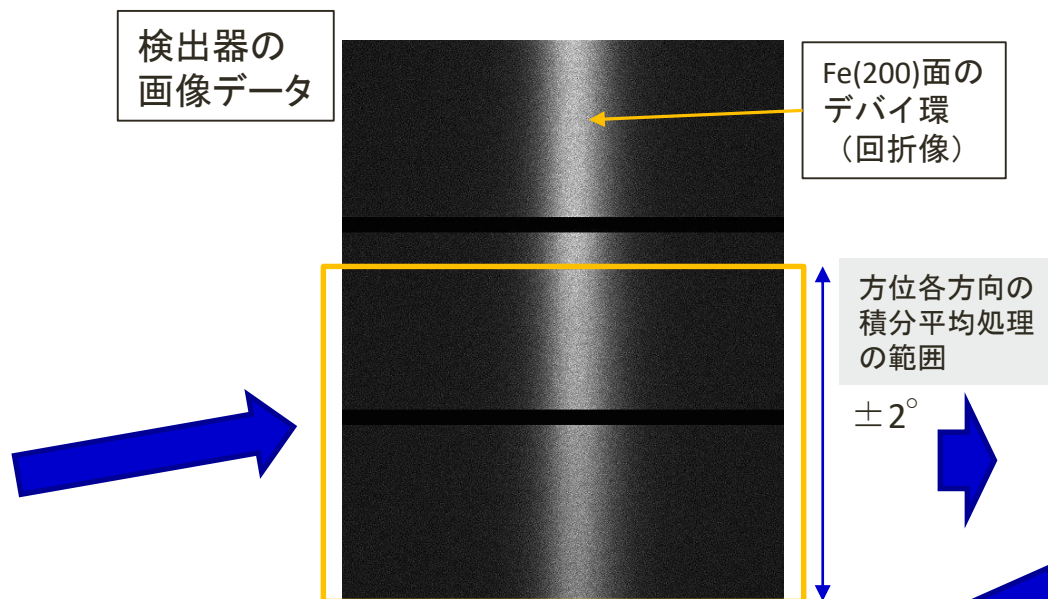
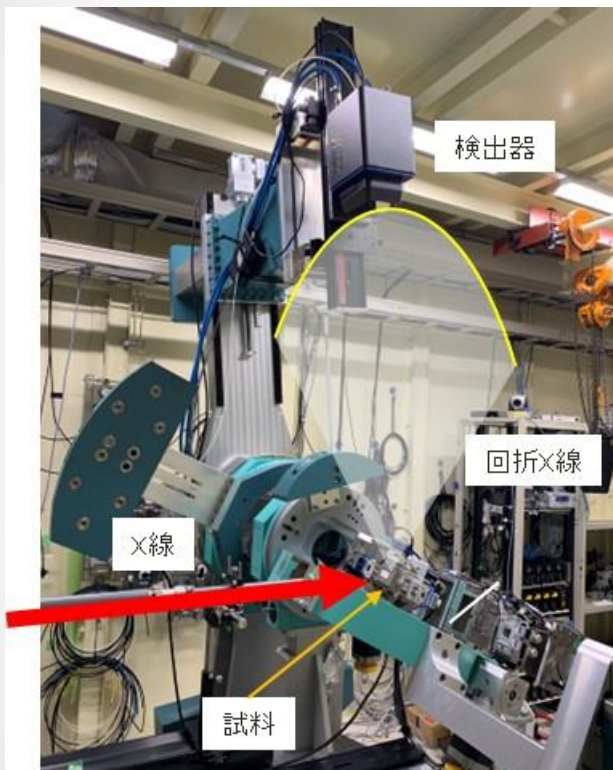
深さ、ψ角の同時制御可能

⇒材料の深さ方向に対して
残留応力が測定可能になる

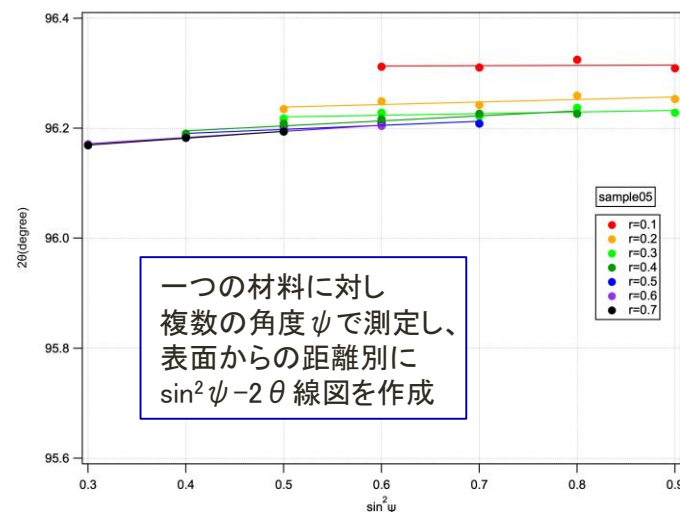
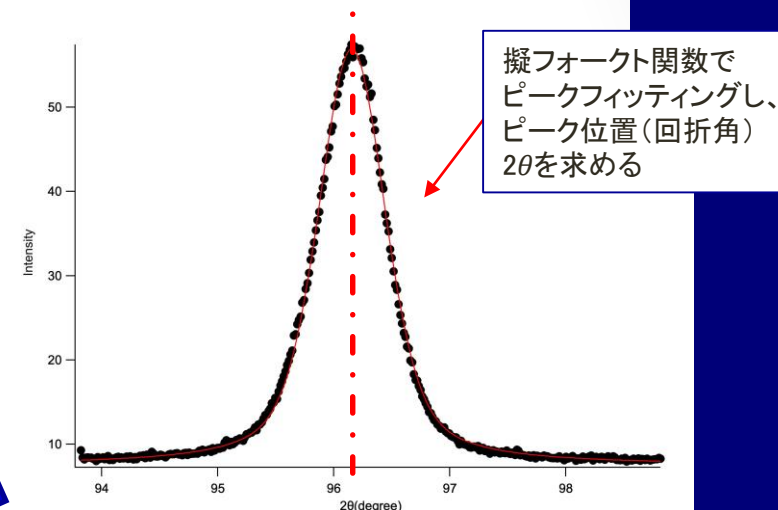
※装置の構成上、振れる角度領域が狭く、
福島県ハイテクプラザの設備での測定と
同じ結晶面では測定出来ないため
結晶面(2 1 1) → (2 0 0)とする

(5) 検証内容

○Spring-8での測定 (測定概要)



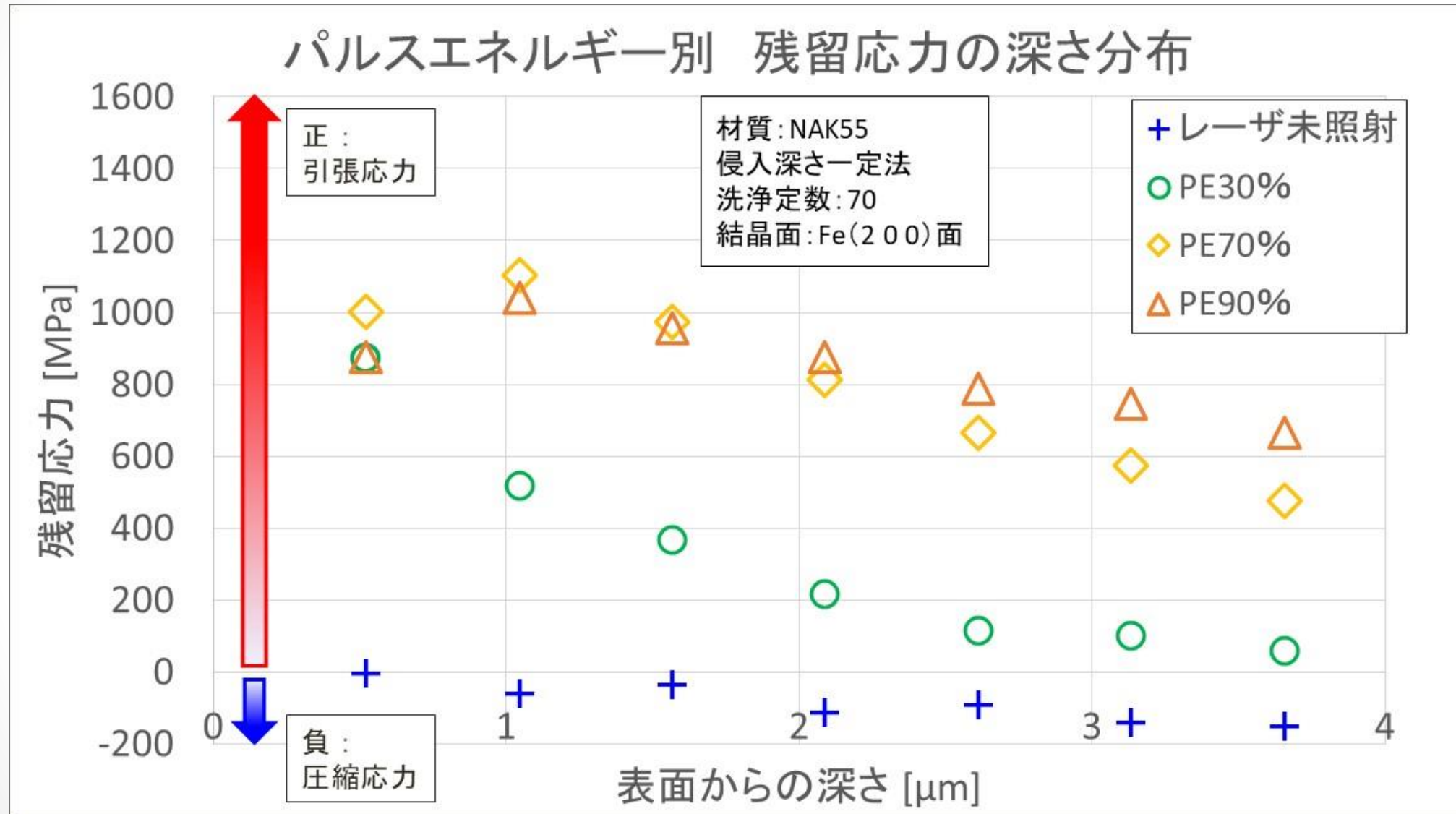
1次元データに変換



応力を算出し、
深さ方向分布を
試料別に比較

(5) 検証内容

○Spring-8での測定：めっき無(NAK55)の残留応力測定結果



(5) 検証内容

○Spring-8での測定：残留応力測定結果まとめ

○めっき無 (NAK55)

- レーザ未照射(バフ研磨)は圧縮応力が残留しており、極表層より材料内部の方が強い傾向がある
- レーザ照射により引張応力が付与
- パルスエネルギー(レーザー強度)を増加させると引張応力が増加
- 引張応力は表面が強く、材料内部の方が弱くなる傾向がある

○めっき有(ダイクロン+NAK55)

- めっきの応力測定はラボ分析と同様に、解析に必要なデータを取得することは出来なかった

(5) 検証内容

○試料観察

クラックの発生箇所について引張応力によってクラックが発生したとすると

- めっきと母材の界面
- めっきに内在するクラックの伸展

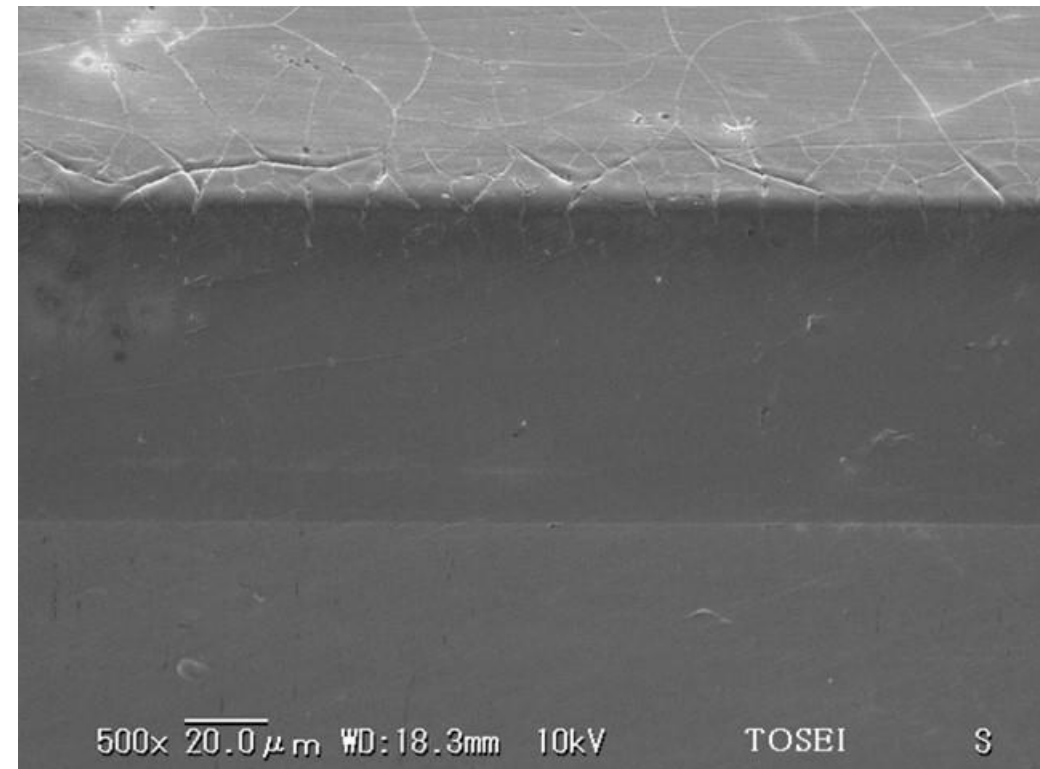
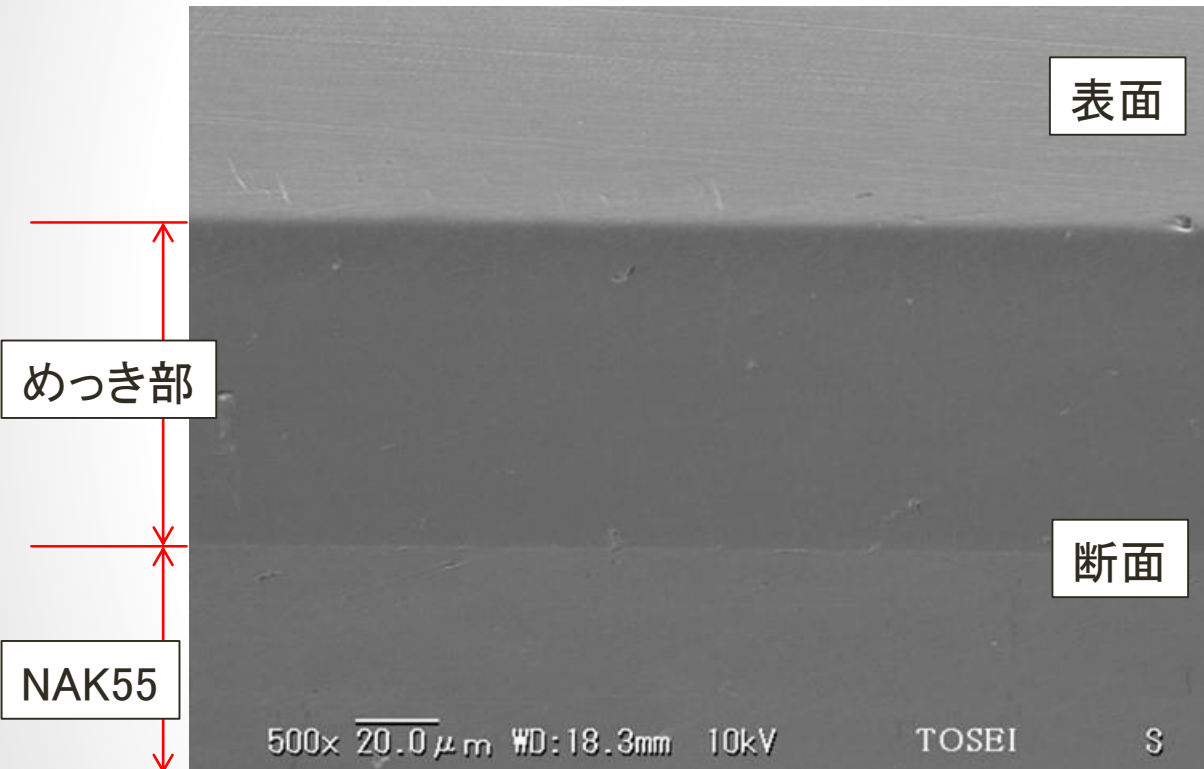
どちらも起点となっていると推察されるため、材料の表面および断面観察を実施した

(5) 検証内容

○試料観察：斜め45°より表面および断面を撮影

レーザー未照射

レーザー照射後



3Dリアルサーフェスビュー顕微鏡
VE-9800 (キーエンス製)にて測定

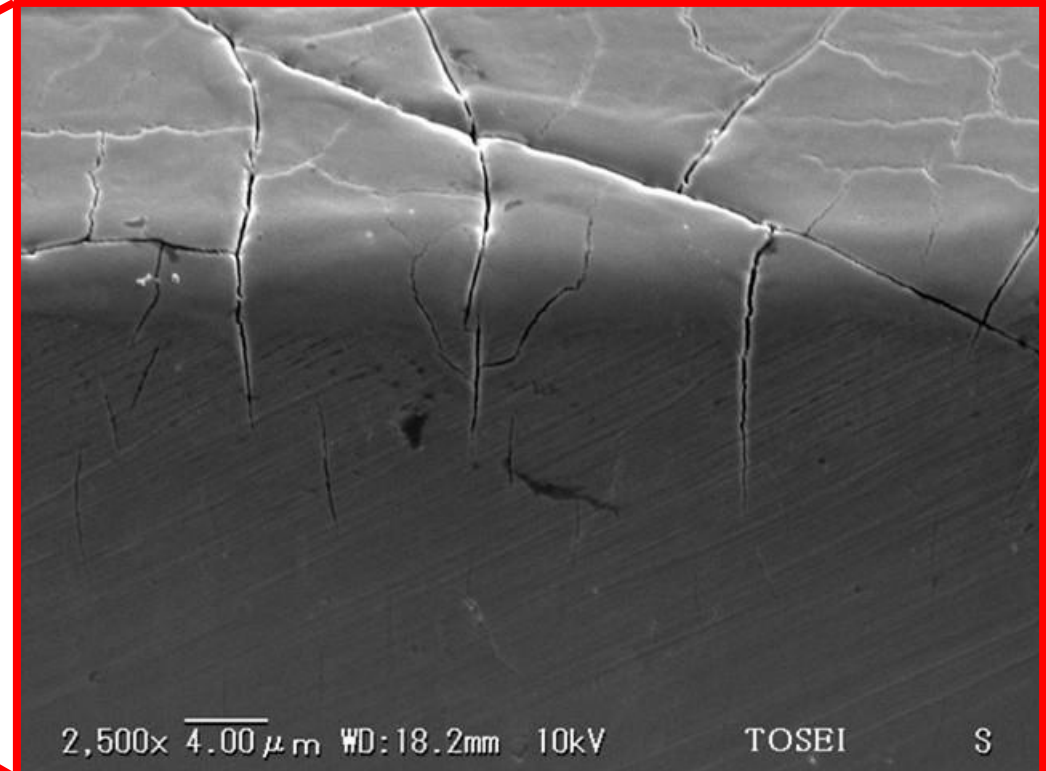
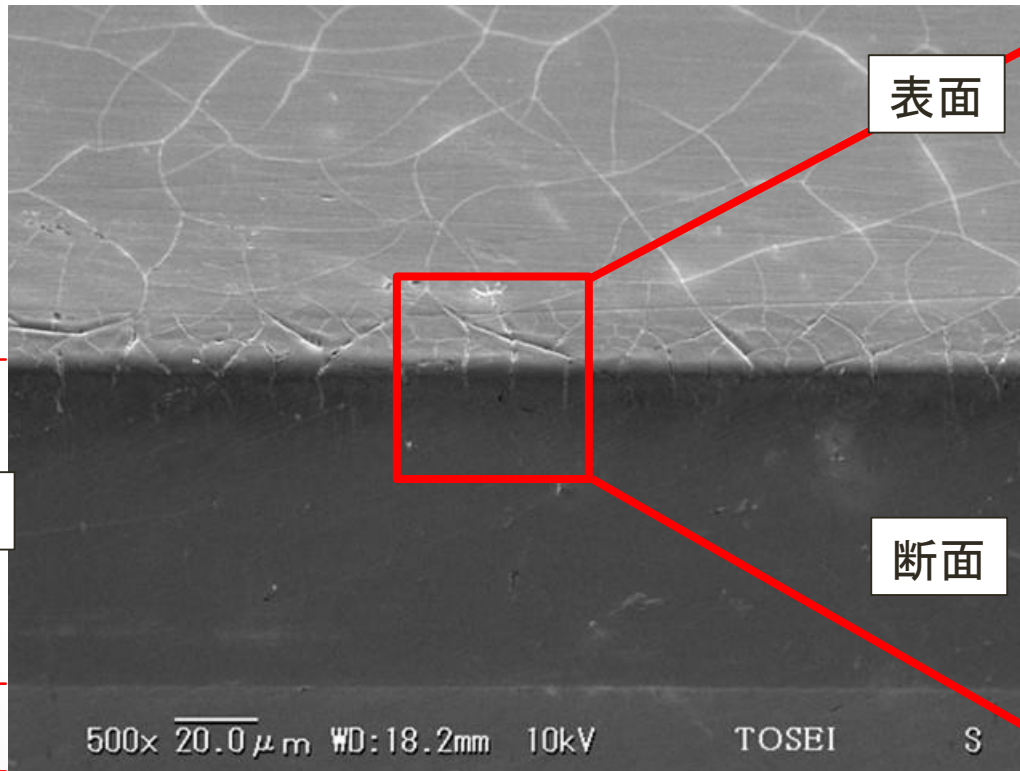
ダイクロンの厚み100 μm

(5) 検証内容

○試料観察：斜め45°より表面および断面を撮影

レーザー照射後

レーザー照射後(拡大)



めっき部

表面

断面

NAK55

3Dリアルサーフェスビュー顕微鏡
VE-9800 (キーエンス製)にて測定

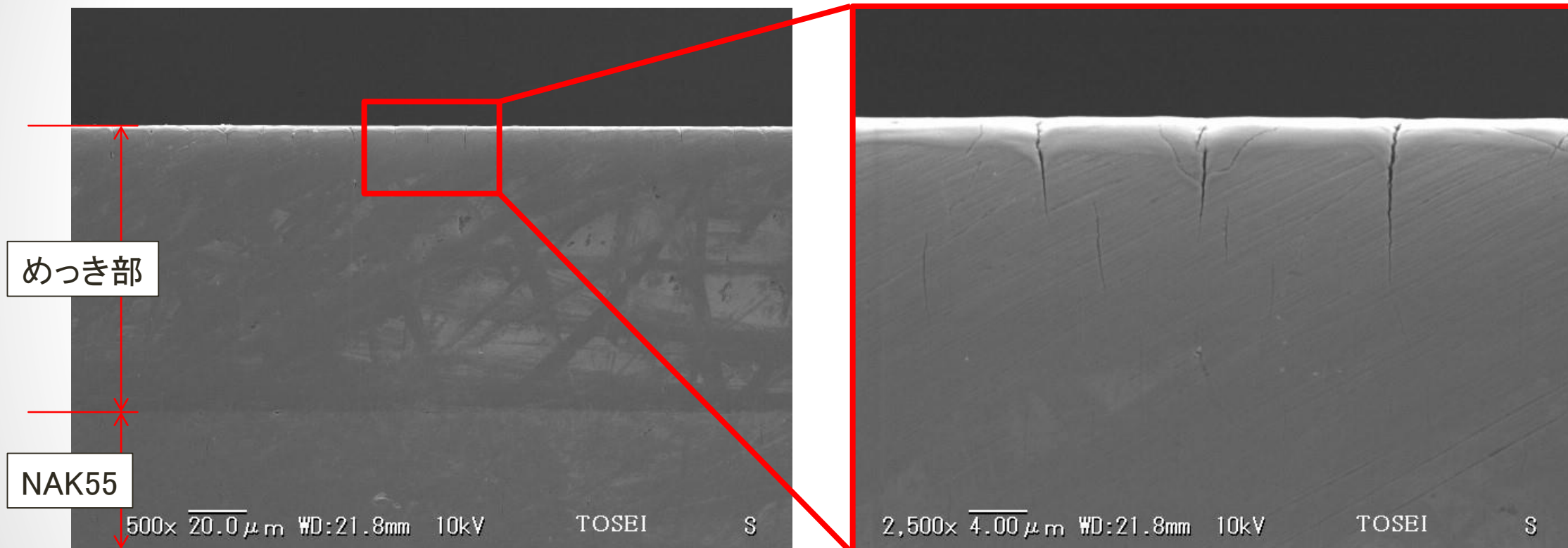
ダイクロンの厚み100 μm

(5) 検証内容

○試料観察：断面を撮影

レーザー照射後

レーザー照射後(拡大)



3Dリアルサーフェスビュー顕微鏡
VE-9800 (キーエンス製)にて測定

ダイクロンの厚み100 μ m

(6) 本事業の成果

○めっき無 (NAK55) については以下のことが確認出来た

- レーザ洗浄によって引張応力が付与される
- 侵入深さ一定法により材料内部の引張応力に分布がある
- 引張応力は表面が強く、材料内部の方が弱くなる傾向がある

○めっき有 (ダイクロン+NAK55) については以下のことが確認出来た

- SPring-8の計測でも詳細な(十分な)解析までには至らなかった
- これはめっきの結晶配向性が原因と考えられた
- めっきのクラックは表面近傍で発生している

(7) 謝辞

既存放射光施設を活用して、測定・解析することは当社では初めての取組みで書類申請や設備利用に至る初歩的かつ基本的な内容に対しても親身にアドバイスいただきました。また、検討段階、ラボ分析から得られた結果からの再検討、現地での測定、データ解析といった通常の業務とは次元の異なる技術的なアプローチについても丁寧に対応いただくことで大変貴重なデータを取得することが出来ました。

関係各位に厚く御礼申し上げます。

- 公益財団法人高輝度光科学研究センター
佐藤 眞直様、ロク シンガプリゲ ロシヤンタ クマーラ様
- 一般財団法人光科学イノベーションセンター
八木 直人様
- 東京都市大学
白木 尚人様
- 仙台市
金 翔平様、齋藤 理奈様