金属材料の残留応力測定と評価

製造現場のトラブル解決に向けた金属材料の評価分析技術セミナー

坂城テクノセンター　大研修室

２０２４年6月１２日

PULSTEC

Create New Value

会社概要

PULSTEC
Create New Value

設立	1969年（昭和44年）11月1日
資本金	1,491百万円(ｽﾀﾝﾀﾞｰﾄﾞ市場)
代表者	代表取締役社長　青野　嘉幸
所在地	浜松市浜名区細江町 中川7000番地の35
社員数	１５６名(2024年4月1日現在)
営業所	東京営業所
子会社	Pulstec USA,Inc.

沿革

PULSTEC
Create New Value

- 1969　パルステック工業㈱を設立
- 1972　専用検査装置受託生産、実装プリント基板の量産
- 1975　量産部門を分社化し、北菱電機工業㈱を設立
- 1984　インサーキットテスタ開発 販売
- 1985　CD用ピックアップ評価装置開発
- 1988　光ディスクドライブ装置開発
- 1996　DVD評価用ディスクドライブ装置開発、株式店頭市場公開
- 1997　非接触三次元スキャナ開発
- 2000　東京証券取引所市場二部へ上場
- 2002　医療情報システムの販売およびサポート事業を開始
- 2002　Blu-ray評価用ディスクドライブ装置開発
- 2010　内視鏡手術ナビゲータ開発でモノづくり連携大賞受賞
- 2012　ポータブル型X線残留応力測定装置“μ-X360”開発
- 2013　高速リアルタイムPCR装置開発
- 2015　医療機器製造業許可証を取得、ISO13485を取得
- 2016　ポータブル型X線残留応力測定装置“μ-X360s”開発
- 2019　非接触硬さムラスキャナ“muraR”開発

製品セグメント

PULSTEC
Create New Value

新しい価値を創造する
CREATE NEW VALUE

自動車 機械	自動車	電気機器	検体検査 試薬・機器	精密機器
X線残留 応力測定	三次元 計測	光ﾃﾞｨｽｸ	ﾍﾙｽｹｱ	光応用

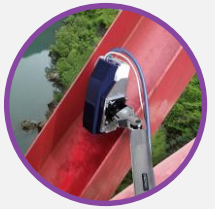
研究開発型モノづくり企業

X線残留応力測定装置/μ-X360s

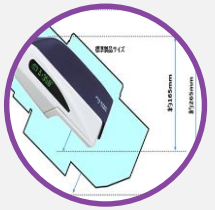
PULSTEC
Create New Value

- 金属表面に残留する応力を非破壊・非接触で測定

X線作業主任者資格不要

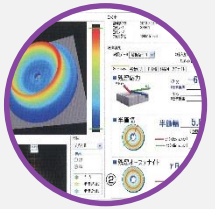


大型構造物を非破壊測定



世界最小・最軽量

管球交換可能



計測スピード60秒

X線による残留応力測定の特徴

PULSTEC
Create New Value

X線の回折を利用し、「非接触・非破壊」で残留応力を測定！

■ 測定対象物

・多結晶構造物（金属やセラミック等）

■ 測定範囲

・Φ2.0mm（標準X線スポットサイズ）
※Φ0.8～3.8mm　オプション対応

・試料表面から深さ10μm程度（問題の多い表面層を狙って測定）
※10μm以上の深い領域は電解研磨で表面を掘り下げながら測定

■ 測定項目

・残留応力（極性も分かる ⇒ ±で表示）
・半価幅（硬さと相関あり ⇒ 非接触で硬さ測定）
・残留オーステナイト（2次元検出器FULL 2Dで高精度）

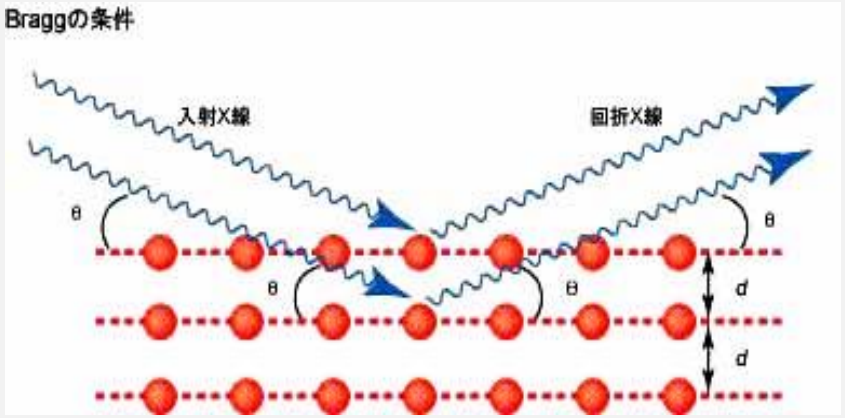
X線の回折原理　ブラッグ（Bragg）の法則とは？

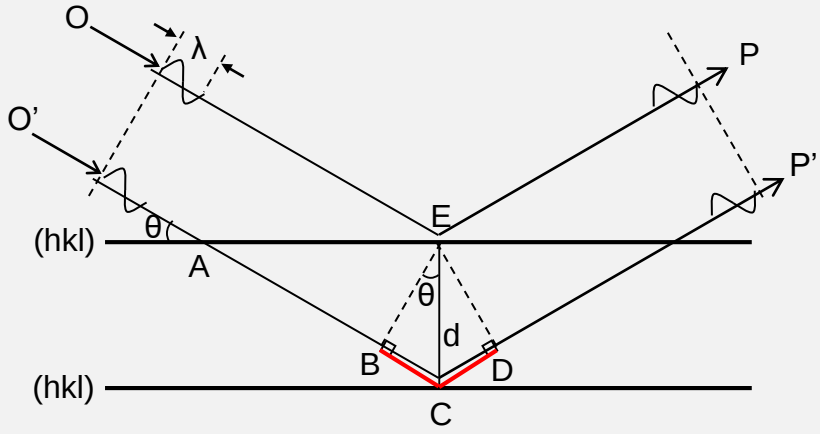
PULSTEC
Create New Value

原子間隔 d の結晶構造を持つ物質に、波長 λ のX線を入射すると
原子で散乱したX線が、入射X線と結晶面がなす角 θ で回折する現象を
『ブラッグの法則』といい、次式で表される。

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n)\text{は自然数}$$

応力による格子面間隔の変化が、 回折角の変化となり「ひずみ」が分かる。
「ひずみ」が分かれば、フックの法則で「応力」に変換できる。



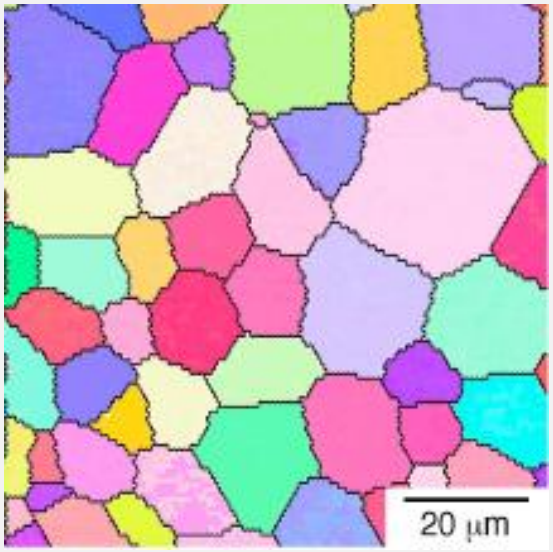


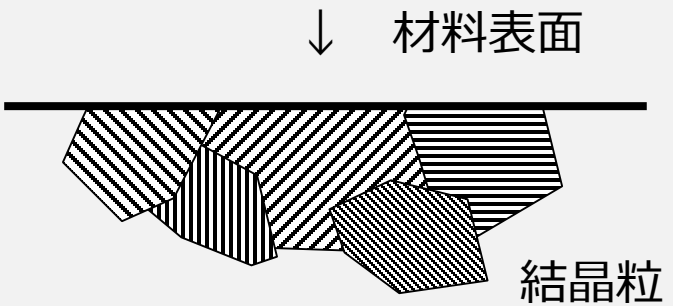
等方性多結晶構造とは？

PULSTEC
Create New Value

等方性多結晶構造とは、結晶軸の方向が定まっていない小さな結晶の集合体で、方向によって物理的性質が変わらないものをいう。一般的な金属材料はこの構造である。

・多結晶構造の様子

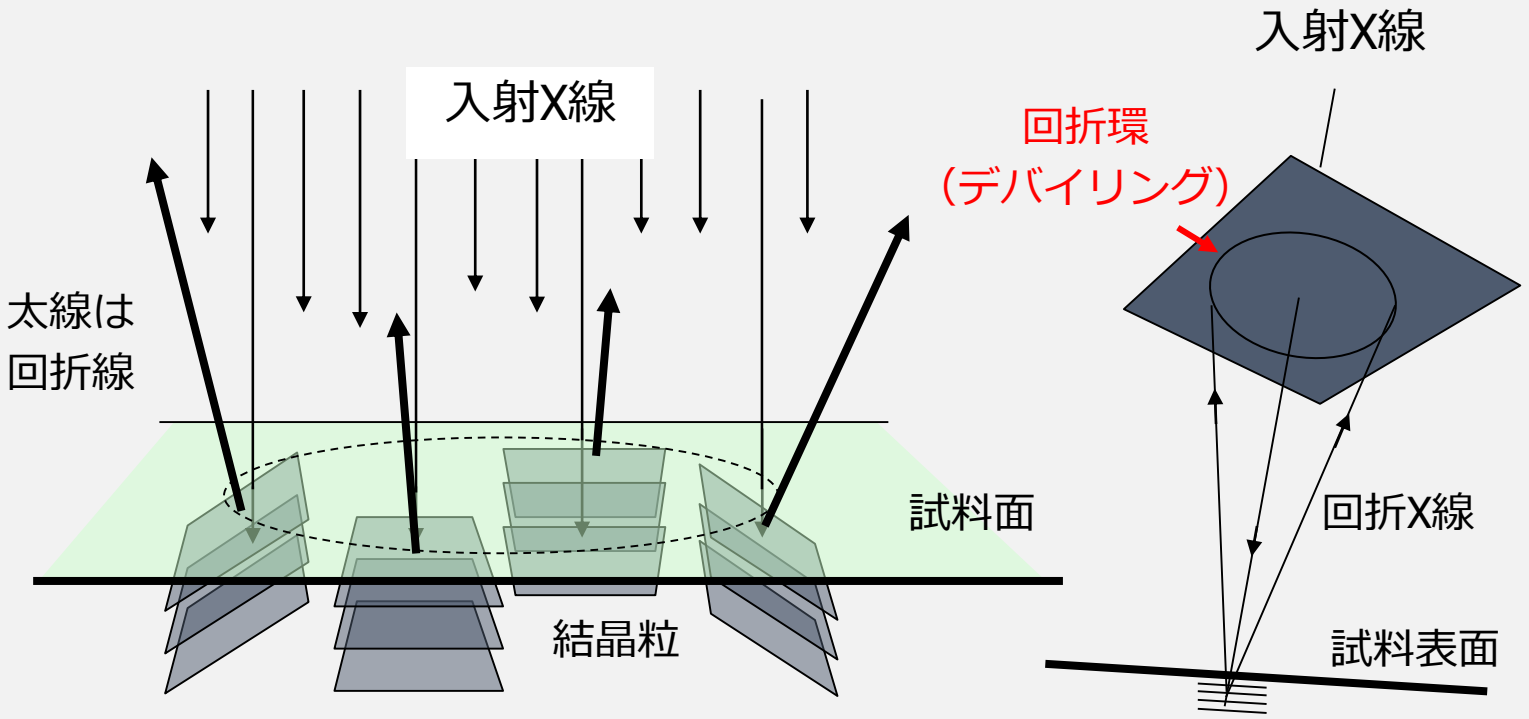




鉄（鋼）は等方性多結晶構造で、X線の照射径に比べ、結晶粒は十分に小さく、X線は様々な向きの結晶粒に照射される。

等方性多結晶にX線を照射したときの回折X線

PULSTEC
Create New Value

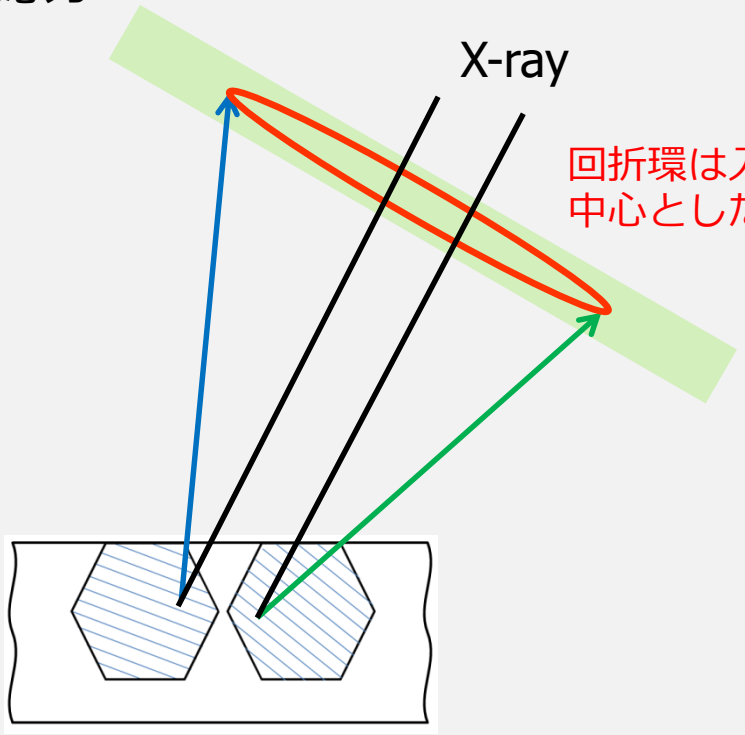


ブラッグの法則に従い、様々な向きの結晶粒によって回折したX線は、
入射X線の軸を中心に円錐状の回折環（デバイリング）となる。

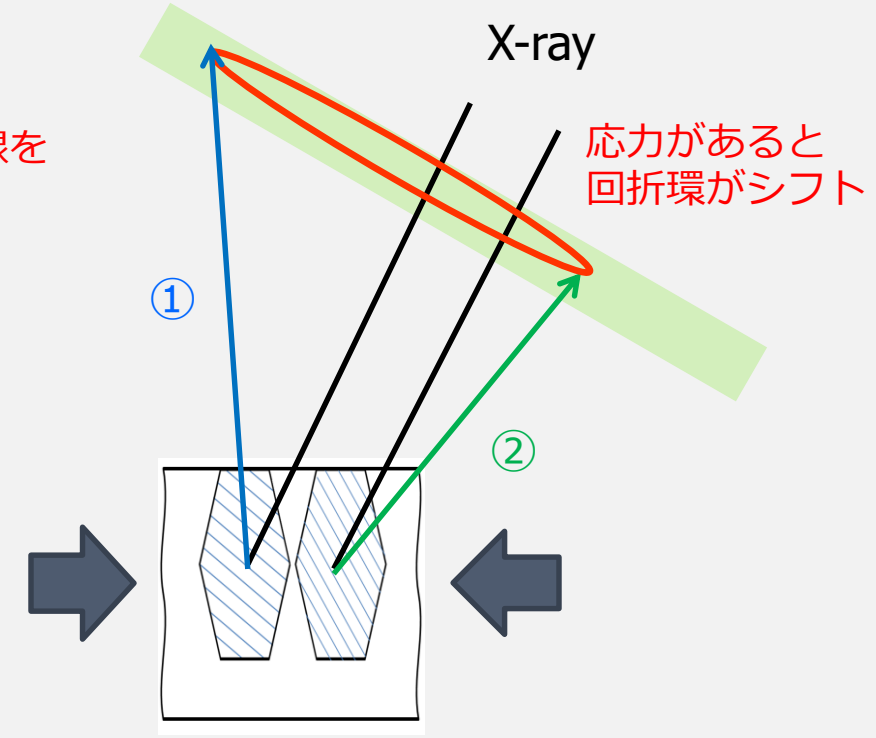
応力による回折環の変化

PULSTEC
Create New Value

無応力



圧縮応力



青色の回折（上右図①）

圧縮応力に対して平行に近い面は間隔が拡大し回折角が低角にシフト

緑色の回折（上右図②）

圧縮応力に対して垂直に近い面は間隔が狭くなり回折角が高角にシフト

回折環を解析すれば応力が分かる

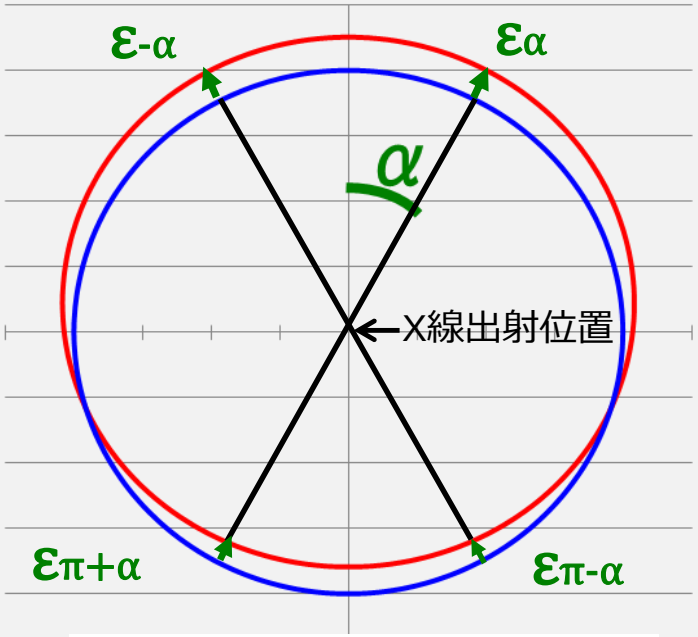
応力の測定方法（cosα法による解析）

PULSTEC
Create New Value

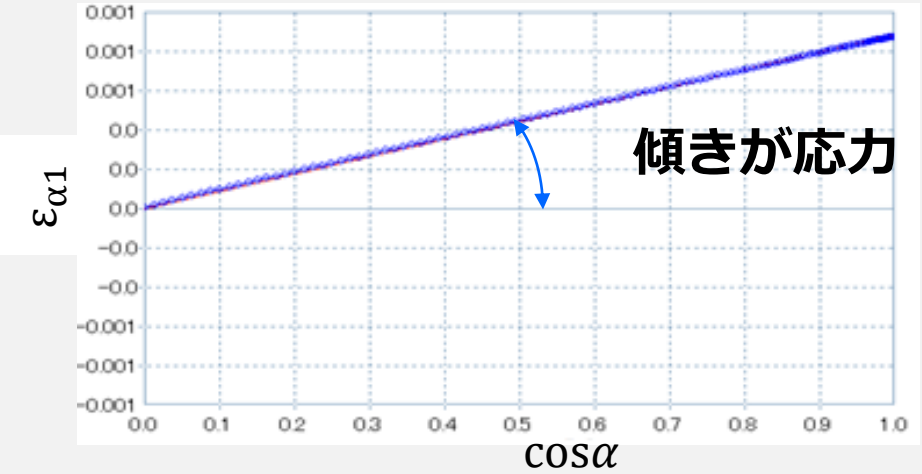
1回のX線照射で回折環全周を取得し、応力を算出する。

$$\varepsilon_\alpha = -\frac{1}{\tan\theta}\Delta\theta \quad (0 \le \alpha \le 2\pi)$$

$$\varepsilon_{\alpha 1} \equiv \frac{1}{2}\{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})\}$$



赤：-5000MPa(圧縮)
青：0MPa（無応力）



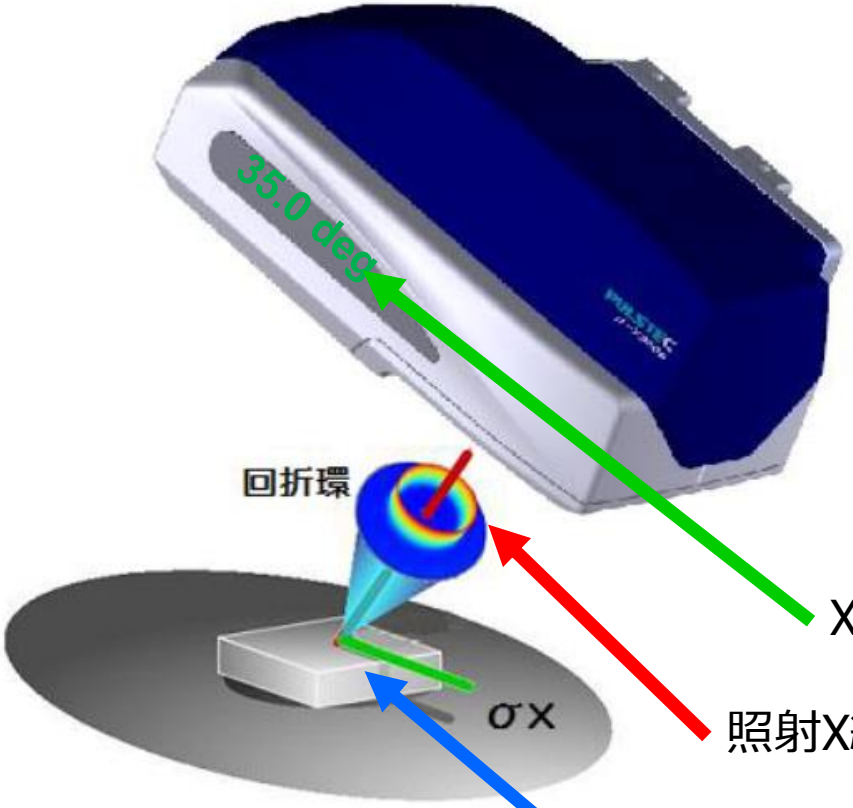
$$\sigma_x = -\underbrace{\frac{E}{1+\nu}\frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0}}_{\text{応力定数}}\underbrace{\left[\frac{\partial \varepsilon_{\alpha 1}}{\partial \cos\alpha}\right]}_{\text{傾き}}$$

回折環から応力を求めることができる！

μ-X360sのセンサ部

PULSTEC
Create New Value

2次元検出器(FULL 2D)を採用し、cosα法による測定装置を実用化



μ-X360sは、ユーザにてX線管の交換ができるので被測定材料の種類が多い。

μ-X360sで用意しているX線管
Cr：鉄鋼、ステンレス、アルミ　等
V ：チタン、タングステンカーバイト　等
Mn:ステンレス、ニッケル基合金　等
（ その他： Cu, Coなどを用意）

X線管の種類、装置の角度を表示

照射X線（測定対象試料に対し斜めから照射）

X線の浸入深さは10μm程度なので
問題の多い表面層の応力や硬さが測定できる。

μ-X360sのアプリケーション

PULSTEC
Create New Value

測定の流れ

試料セット
（内蔵カメラで撮影）

↓

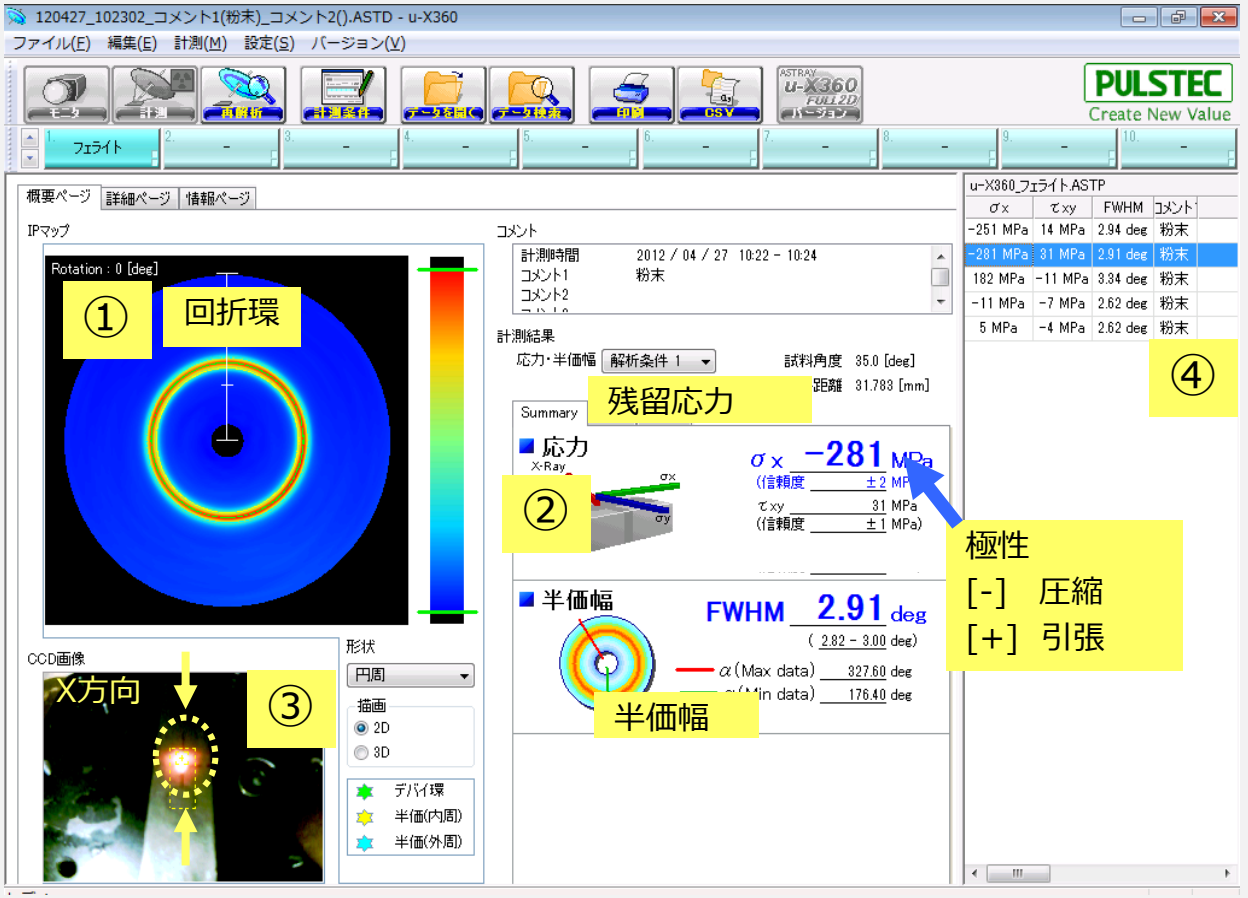
測定
(X線照射、読取)

↓

解析
（残留応力解析）

↓

結果表示

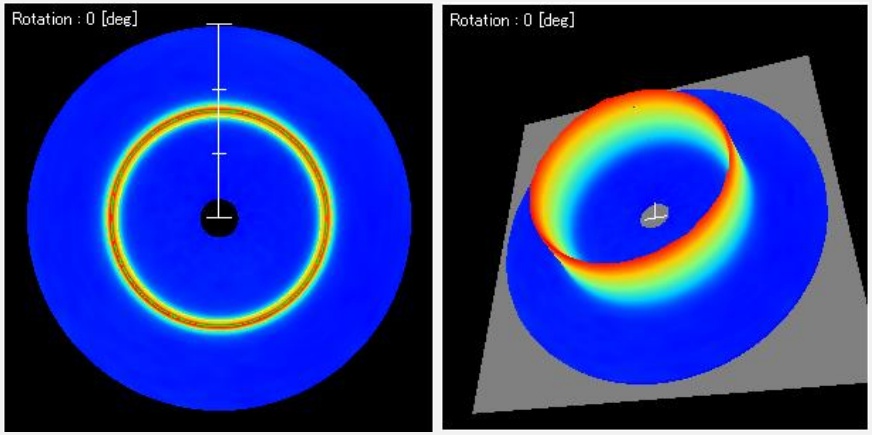


①回折環を100%表示（世界唯一）
②残留応力、半価幅（回折環を最大限利用し高精度）
③測定箇所を内蔵カメラで撮影（確認が簡単）
④測定履歴リスト表示 (測定データを簡単閲覧)

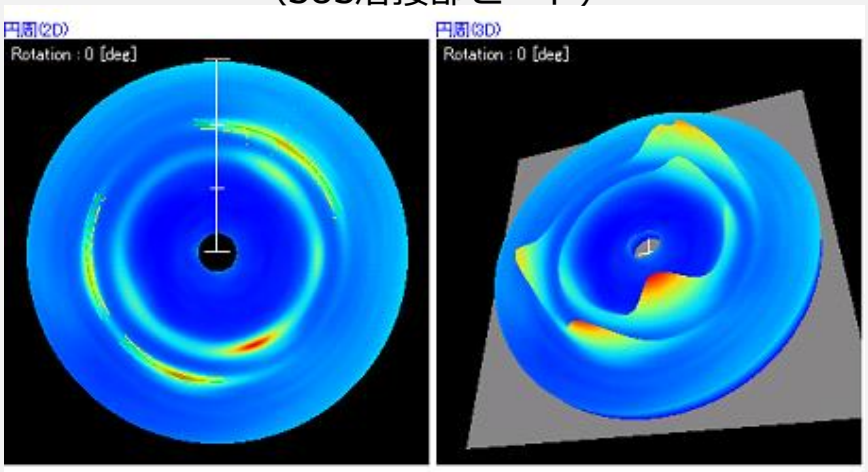
回折環（デバイリング）の可視化

PULSTEC
Create New Value

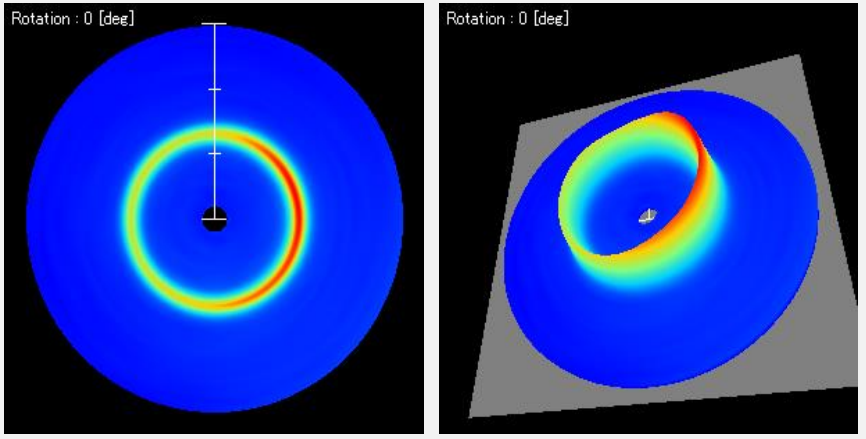
等方性多結晶の回折環



結晶が大きい試料の回折環
（SUS溶接部ビード）



配向のある試料の回折環
（圧延材など）



回折環を視覚的に確認
⇒　結晶粒の状態
⇒　配向の有無
↓
※測定値の信憑性を視覚的に判断

μ-X360s の特長とオンサイト測定

PULSTEC
Create New Value

1．非接触・非破壊測定	・製品を傷つけない非接触測定 ・可動部が無いので取扱いが容易
2．低出力で高感度 安全・安心設計	・低出力X線管（45W）で安全測定 ・装置から3m離れれば自然界の放射線以下 ・照射開始時ブザー鳴動、照射中は警告灯が点灯
3．小型・軽量・省電力	・世界最小・最軽量（総重量10kg未満） ・1人で楽々運搬（専用ケース1個） ・バッテリでも長時間測定（最大電力150W）
4．簡単操作で高速測定	・マーカとカメラにより位置合わせが簡単 ・グラフィカルなインターフェースで扱いやすい ・コピー＆ペースト機能で報告書を簡単作成 ・60秒で測定（フェライトの場合）
5．高精度・高信頼性	・回折環100%のデータを取得 ・非接触・非破壊で硬さ測定（事前に検定必要） ・配向や粗大結晶の様子も視覚的に判断

測定をサポートするオプション類

PULSTEC
Create New Value

	■フレキシブルアーム（微動ステージ付） ・マグネット式で、容易に固定 ・ステージは、X-Y軸共に微調整機能付
	■顕微鏡治具 ・ギアの歯底などの狭小部は、拡大表示して高精度に測定 ・顕微鏡で位置決めできたら、後は自動で測定
	■X-Y自動ステージ装置可動型 ・広い測定範囲：200mm（X-Yステージ共） ・ライン測定やマッピング測定に最適（専用ソフト付属） ・測定対象物の大きさに制限されない

※上記以外にも、揺動治具、コリメータ、粗大結晶用入射角揺動治具等
豊富な専用治具で測定をサポート

μ-X360s の対象ユーザとニーズ

PULSTEC
Create New Value

対象ユーザ

・輸送用機器関連（自動車、造船、鉄道、航空宇宙）
・機械部品製造
・金属加工（熱処理、表面改質）
・プラント保守/保全、橋梁等のインフラ（構造物）
・鉄鋼材料メーカ
・セラミックメーカ
・金型メーカ

ニーズ

・軽量化・高耐久化の確認、寸法精度向上、変形・割れの原因解析、工程改善、品質管理、余寿命予測、メンテナンスの最適化他

非接触・非破壊で、すばやく簡単測定　⇒　μ-X360s

これからは「残留応力」が切り札に！

自動車部品関連の測定対象物と導入目的

PULSTEC
Create New Value

自動車部品関連の測定対象物

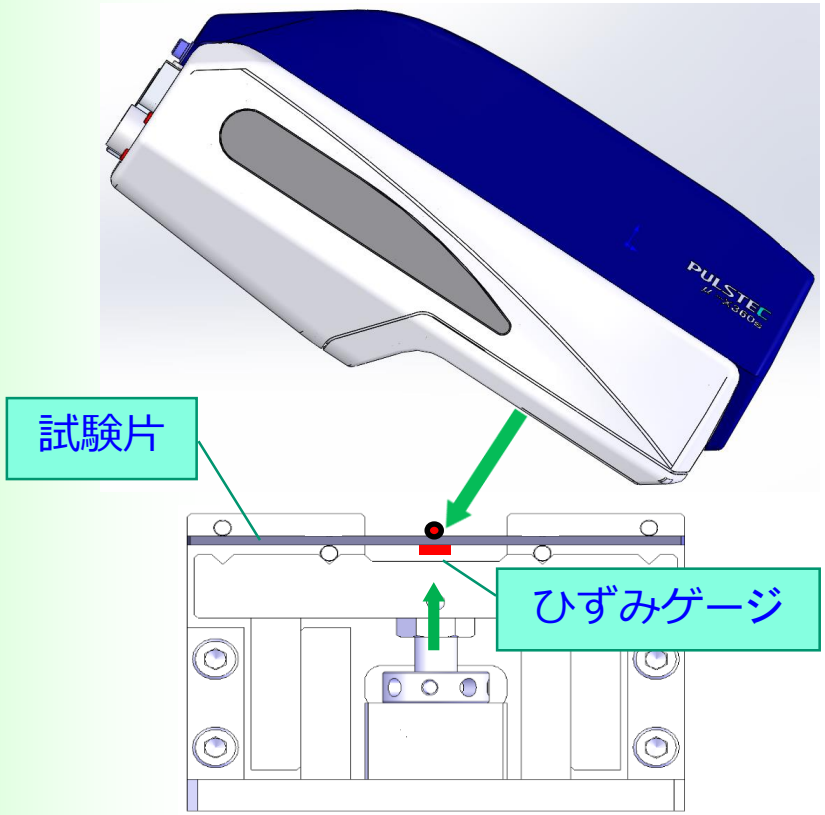
①ギア(ラックピニオン、ハイポイドギア)
②エキゾーストマニュホールド
③クランクシャフト
④サスペンション
⑤コンロッド
⑥ベアリング
⑦ドアパネル
⑧シャーシ
⑨ホイル
⑩ボールネジ
⑪マフラー
⑫シートレール
⑬タービンブレード

[熱を発する工程]
鍛造、鋳造、ダイカスト
切削、溶接、熱処理、表面改質

装置の導入目的

- **材料開発**
- **最適な工程設計**
- **工程管理・改善**
- **余寿命診断**
- **シミュレーション比較**
- **品質管理・保証**

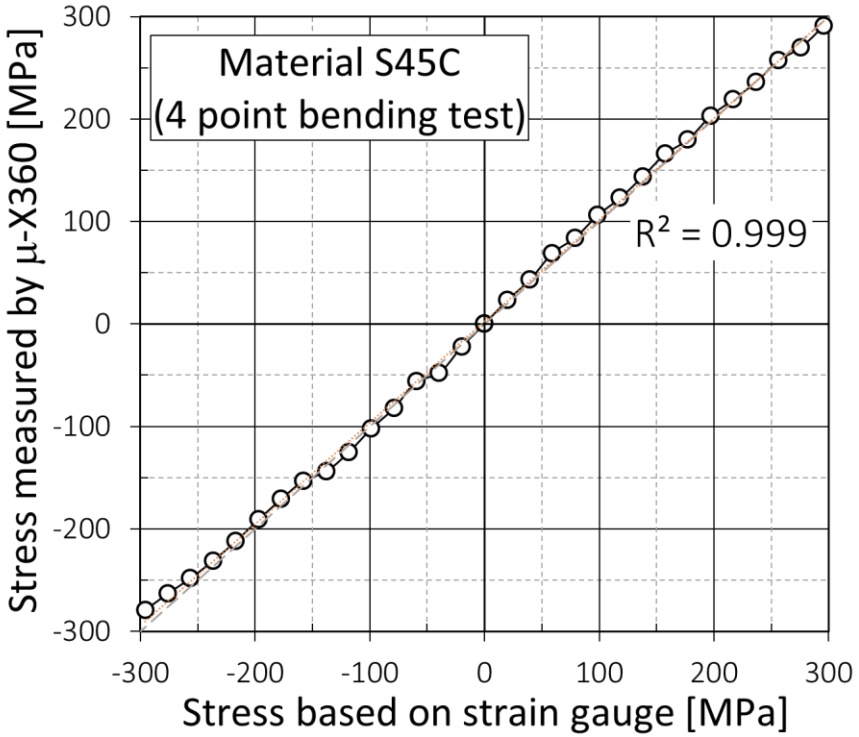
装置検証①　ひずみゲージとの比較【4点曲げ試験】



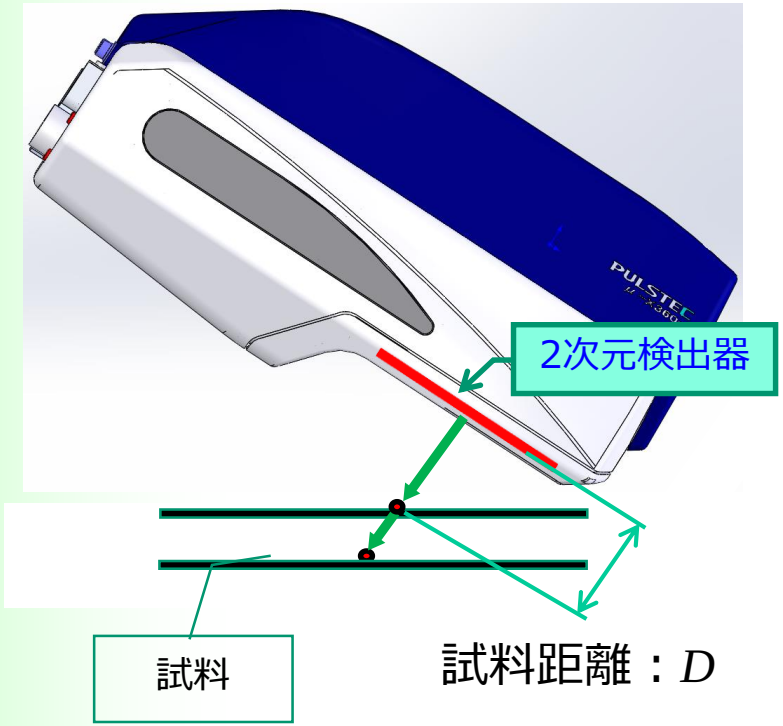
ひずみゲージ：1G120(KYOWA)

非常に高い相関性！

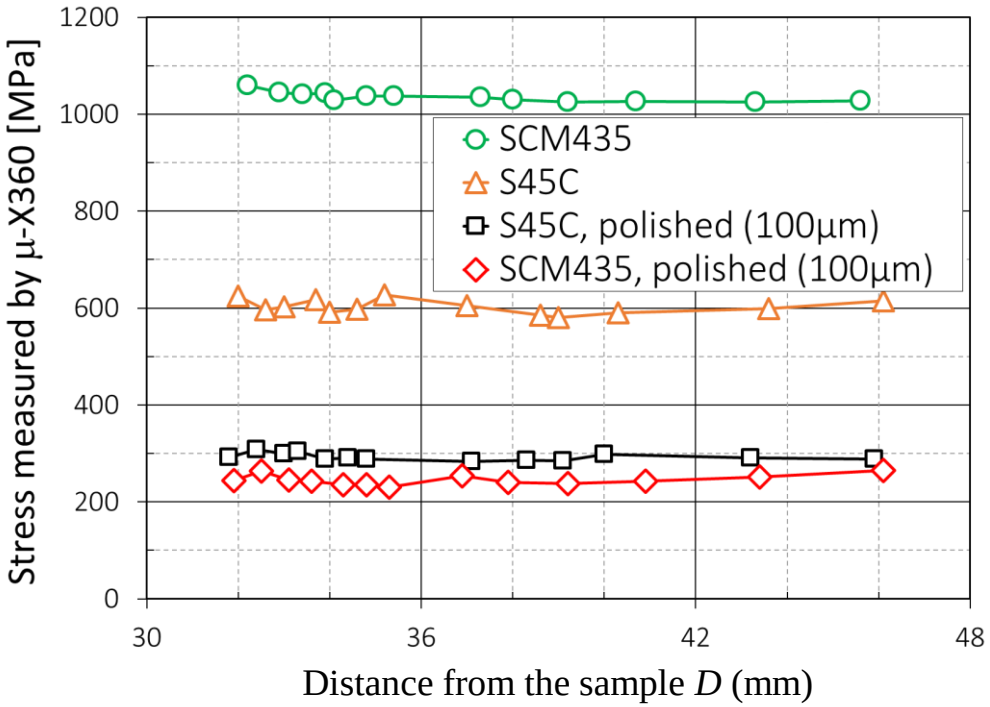
相関係数：0.999



装置検証②　試料距離の違いによる測定値のばらつき



試験片：S45C, SCM435



測定値のばらつきは30MPa未満

試料距離が変わっても測定値が変わらない。

↓

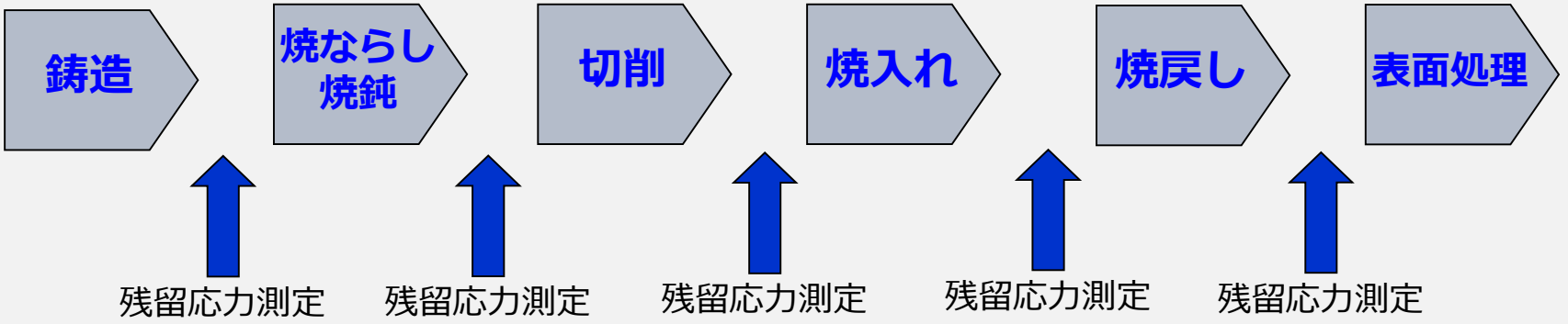
設置マージンが広いのでセットアップが簡単！

導入事例①　金属加工の工程改善や課題解決に！

PULSTEC
Create New Value

工程管理・不具合解析

金属加工工程（塑性加工・熱処理・接合・切断など）で残留応力を測定



残留応力値は、工程改善や課題解決の共通尺度！

・各工程の順序や制御・設定は良いか？コストダウンはできないか？
・製品品質は管理されているか？（異常は発生していないか？）
・不具合発生時、各工程間で何が起きているのか？　発生工程はどこか？

導入事例② ダイカスト金型の入れ子部品の管理コスト低減に！

（2014年 日本ダイカスト会議　現場改善事例発表）

PULSTEC Create New Value

ダイカスト金型の入れ子部品管理に残留応力解析手法を取り入れ、予防保全体制を構築、保全コストを2分の1に低減（A社様の事例）

① 故障によるロス時間の低減
所定のショット数毎にμ-X360で入れ子の残留応力を測定し、測定値が変化したところで、入れ子を交換　⇒　**入れ子の故障件数ゼロ**

② 交換部品の寿命向上
残留応力を測定し部品を適切に処理し、寿命向上　⇒　**保全コストの低減**

③ 溶接復元入れ子の長寿命化
残留応力を測定し溶接条件、工法の開発　⇒　**保全コストのさらなる低減**

予防保全体制の構築
交換基準の設定、予防・復元入れ子の長寿命化、問題解決の手法などを検討

ポイント：1. 残留応力値は、工程改善・コスト低減や工法開発の指標となる
2. 60秒測定・簡単操作で、データ収集の迅速化と課題解決に有効

導入事例③　大型部品や構造材をオンサイトで測定

PULSTEC
Create New Value

① 配 管

溶接＆熱処理部周辺
の残留応力の確認

② タンク

溶接状態、焼戻し効果の確認
現物を測定し工程改善

③ 建築現場

ケーソンの測定

④ 橋 梁

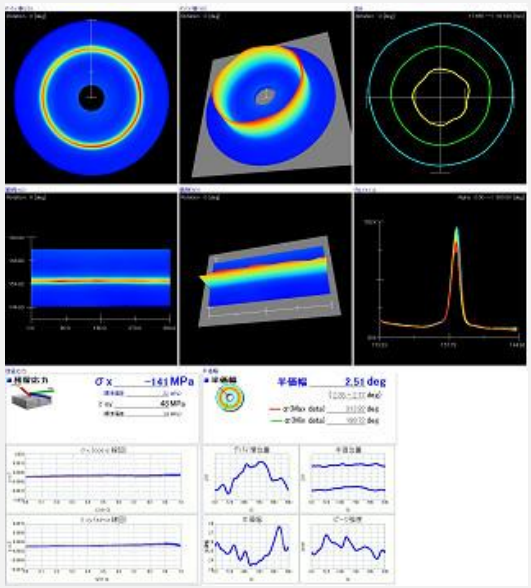
⑤ プラントメンテナンス

補修溶接後のピーニング処理部の測定
経年変化の確認

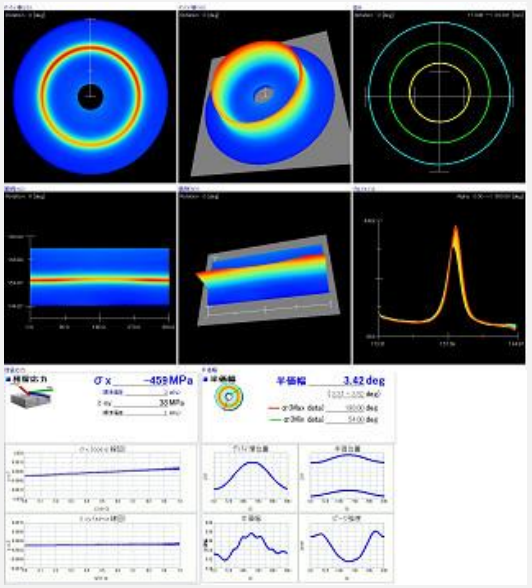
測定事例①　ショットピーニング品の応力測定

PULSTEC
Create New Value

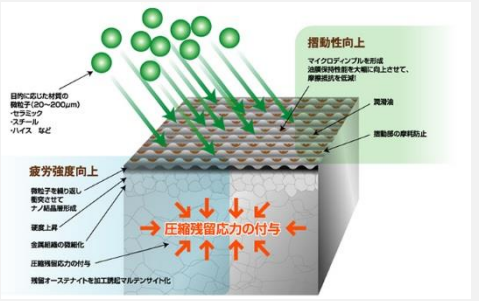
対象物に無数の投射材を衝突させることにより、表面を強くする技術（鍛錬）
表面の硬化、圧縮残留応力の付与、耐摩耗性の向上、耐応力腐食割れ特性の向上、
放熱性の向上、流体抵抗の減少等の効果がある。



ショットピーニング前
残留応力 -141MPa　半価幅 2.51 deg



ショットピーニング後
残留応力 -459MPa　半価幅 3.42 deg



※出典：オカノブラストHP

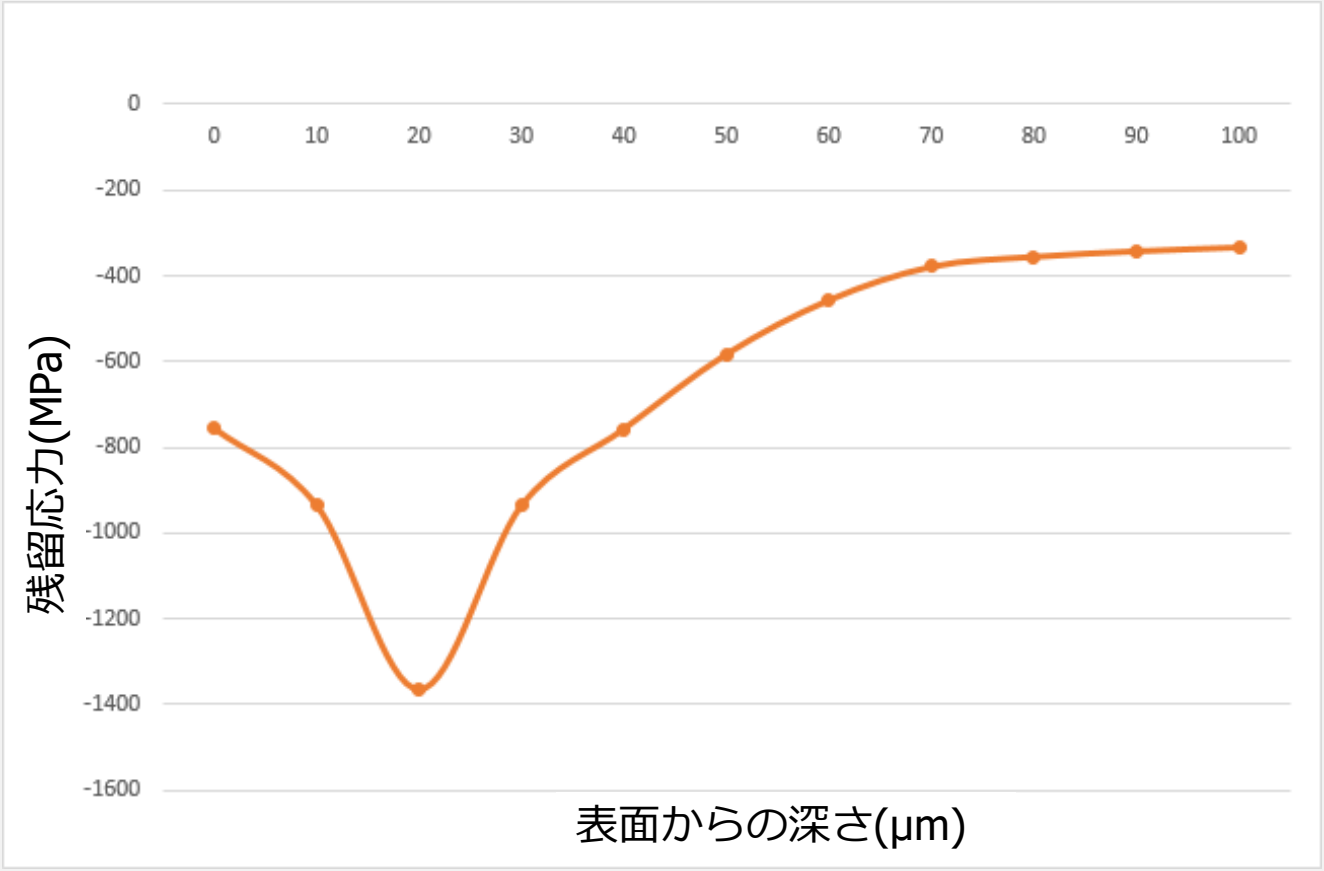
μ-X360による測定結果

**ショットピーニングを行うと圧縮残留応力（ー）が付与され、
半価幅（硬さと相関）から表面が硬化していることが分かる。**

測定事例②　ショットピーニング品の深さ方向の残留応力測定

PULSTEC
Create New Value

電解研磨装置（オプション）を使用することにより、深さ方向を測定

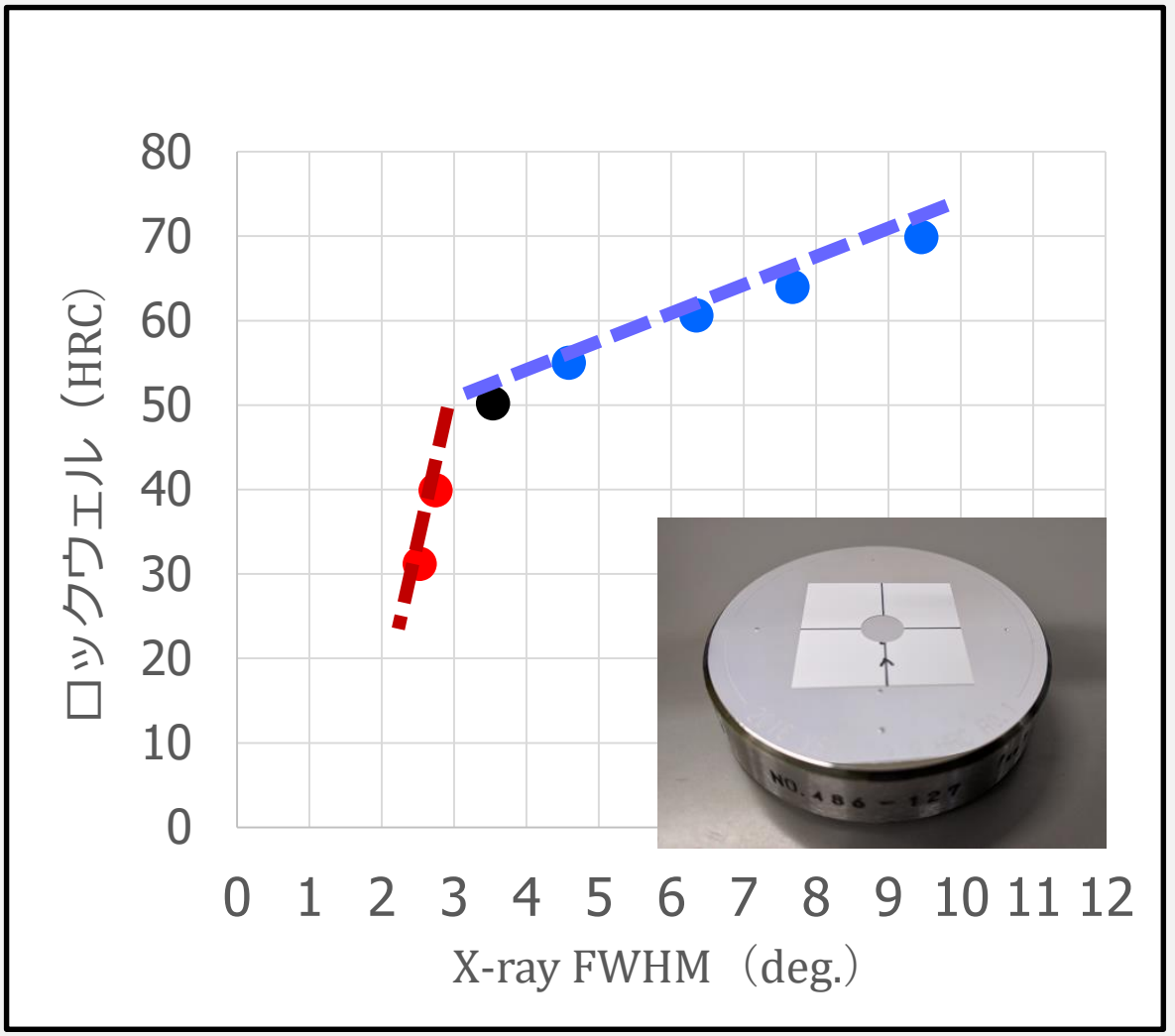


残留応力値から最適なピーニング条件を見つけることができます！

測定事例③　非破壊硬さ測定

PULSTEC
Create New Value

基準値	実測値
HRC (材質)	FWHM [deg.]
31.2 (SK85)	2.53
	2.53
	2.54
39.9 (SK85)	2.75
	2.75
	2.75
50.2 (SK85)	3.54
	3.55
	3.53
55 (SK85)	4.59
	4.59
	4.58
60.6 (SKS3)	6.35
	6.33
	6.32
64 (SKS3)	7.68
	7.71
	7.67
69.9 (SK120)	9.46
	9.58
	9.5

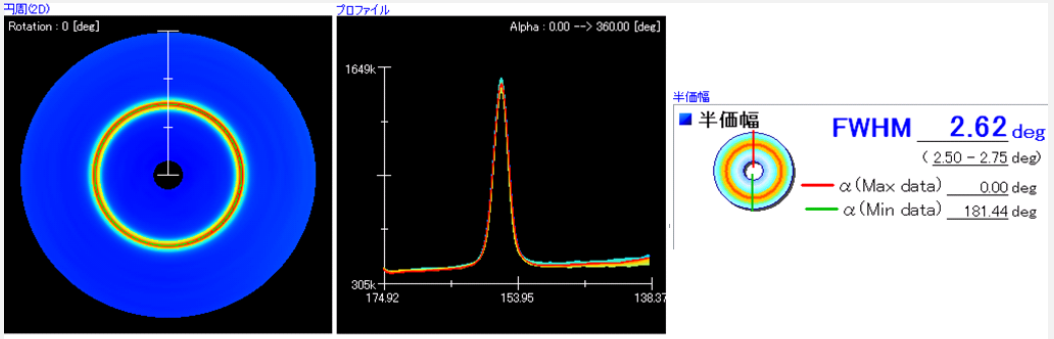


硬さ基準片@山本科学工具研究社製

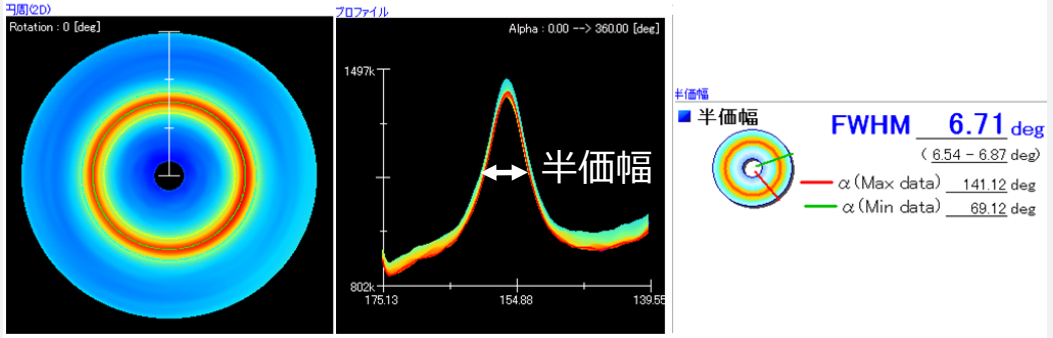
測定事例④　熱処理による半価幅の変化

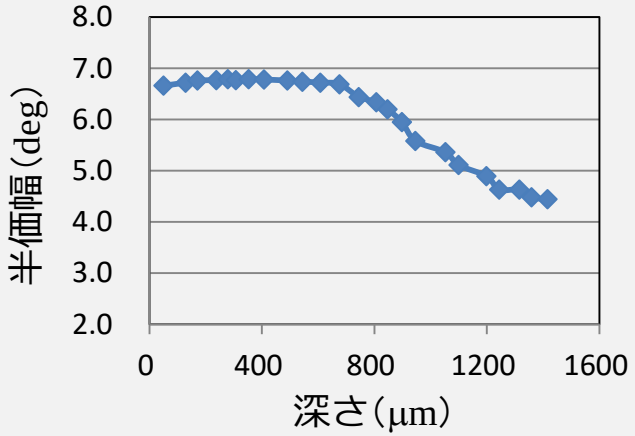
PULSTEC
Create New Value

熱処理前



熱処理後





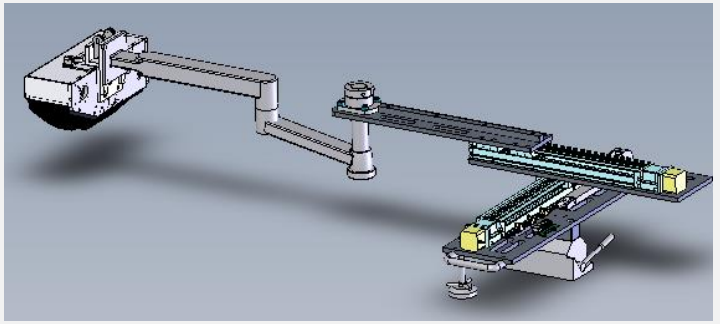
熱処理により硬くなる ⇒ 半価幅が増大

電解研磨をすれば、切断しなくても
深さ方向の焼入れ状態が確認できる。

測定事例⑤　溶接HAZ部のマッピング測定

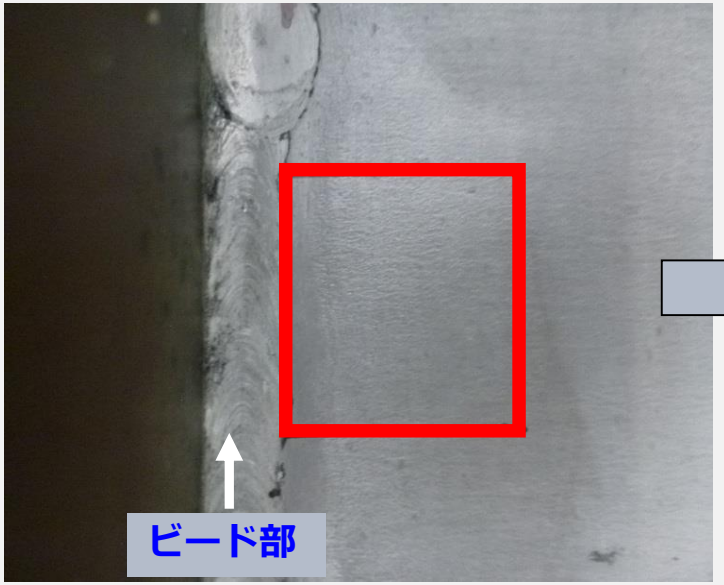
PULSTEC
Create New Value

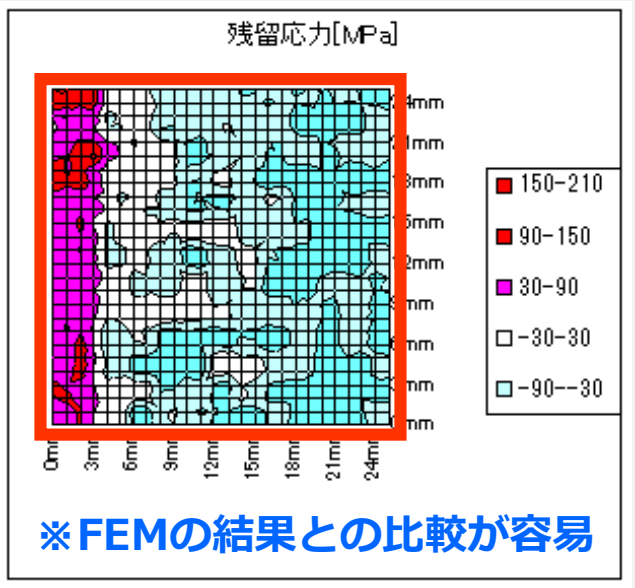
X-Y自動2軸ステージを活用することで残留応力の分布が分かる。



※測定事例
　25㎜×25mmを1mm Stepで測定
　26p×26p=676pointをマップ表示

溶接部近傍の残留応力の分布図

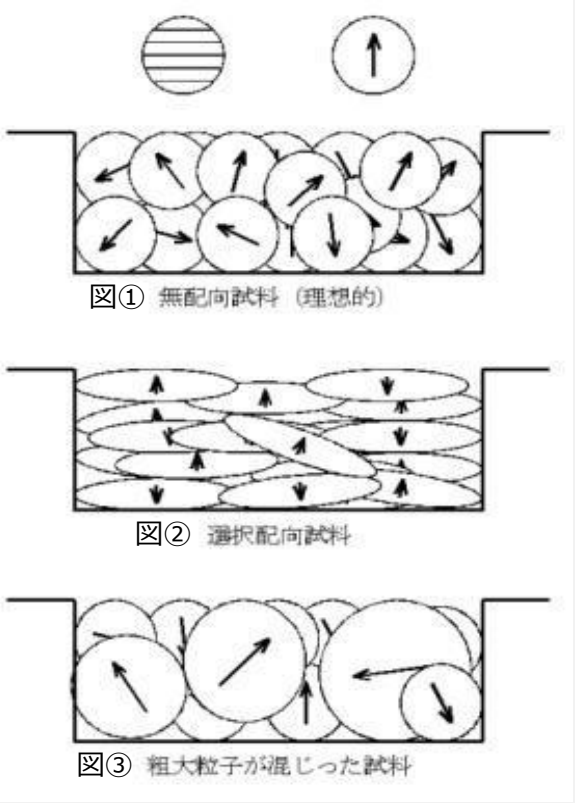




マッピング（残留応力の分布図）が自動で手軽にできる！

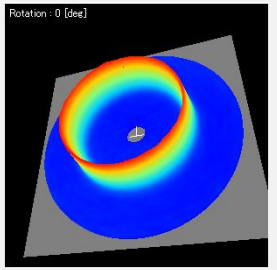
測定事例⑥　配向、粗大結晶

PULSTEC
Create New Value

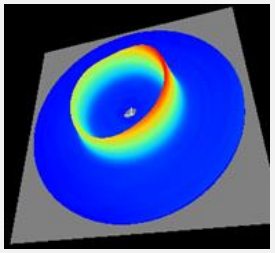


配向、粗大結晶模式図
出典：名工大・環境共生材料　中山GrのHP

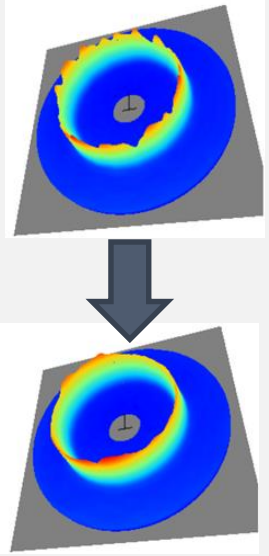
図①のような等方性（ランダム方位）で充分な数の粒にX線を照射すると理想的な回折環（デバイリング）が観測される。



図②のように圧延などで配向が生じた場合は粒が偏るため、偏った回折環が観測される。



図③のように粒径が大きい場合は
回折に寄与する結晶の数が不足し偏りが不連続で生じる。
強度の粗大結晶の場合、入射角揺動治具を用いることで測定精度を改善することができる。

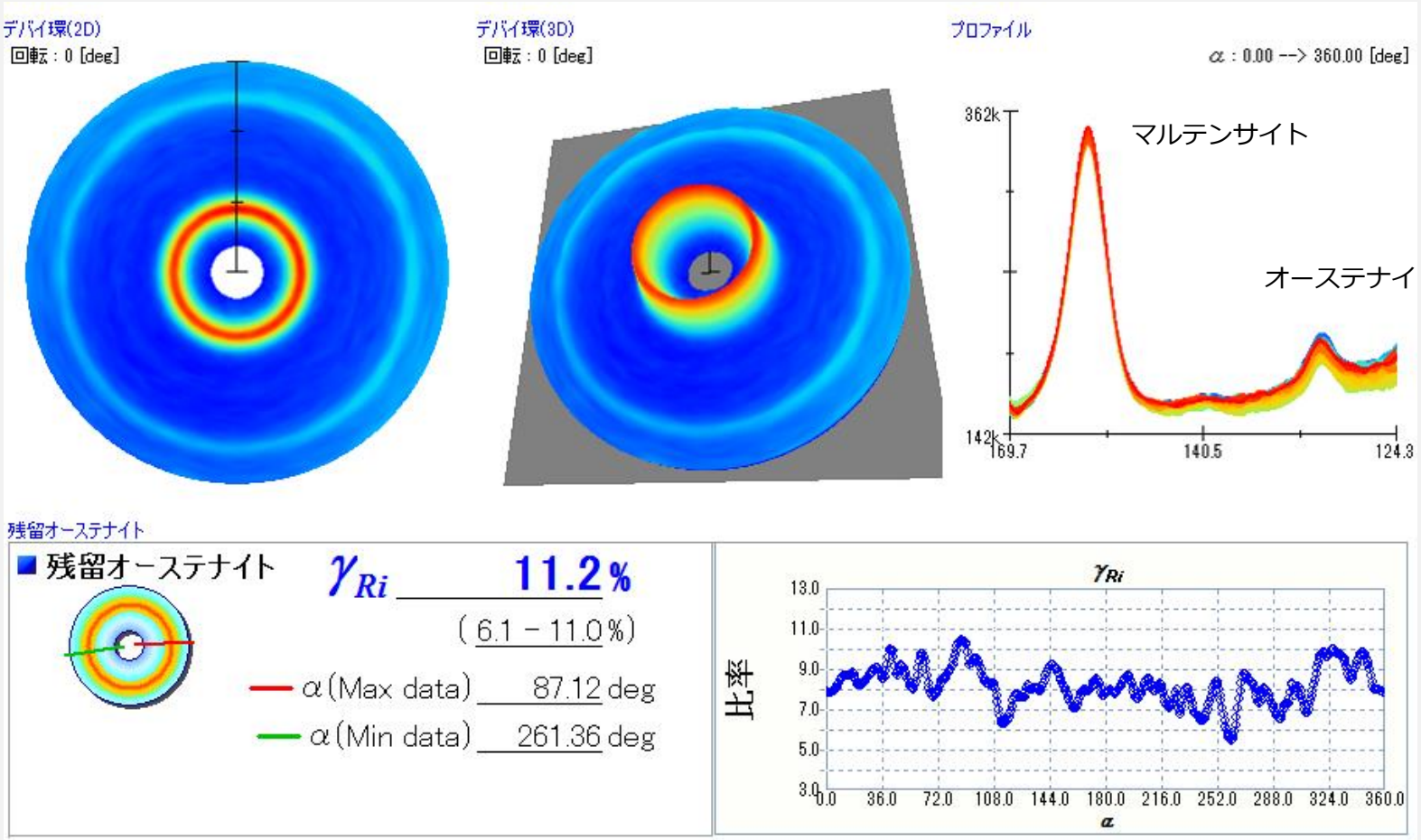


測定事例⑦　残留オーステナイト測定(オプション)

PULSTEC
Create New Value

鋼を焼入れする際に、完全にマルテンサイトにはならず一部未変態の
オーステナイトとして残ったものを比率で表示

- 回折環全周500点を測定し平均化することで高精度を実現
  一般的には任意の角度データのみ測定



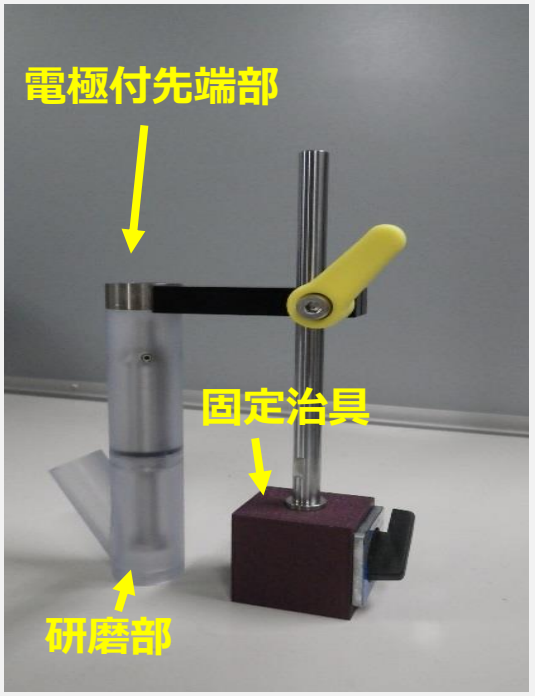
電解研磨機（オプション：深さ方向の測定をサポート）

PULSTEC
Create New Value

・加工応力を付加することなく金属を研磨できる
・電流制御とタイマにより、良質で正確な研磨ができる
・短時間で研磨できる
・液浸方式にも対応し深く研磨できる

先端部(研磨部)

深さ100μmを3分で研磨！



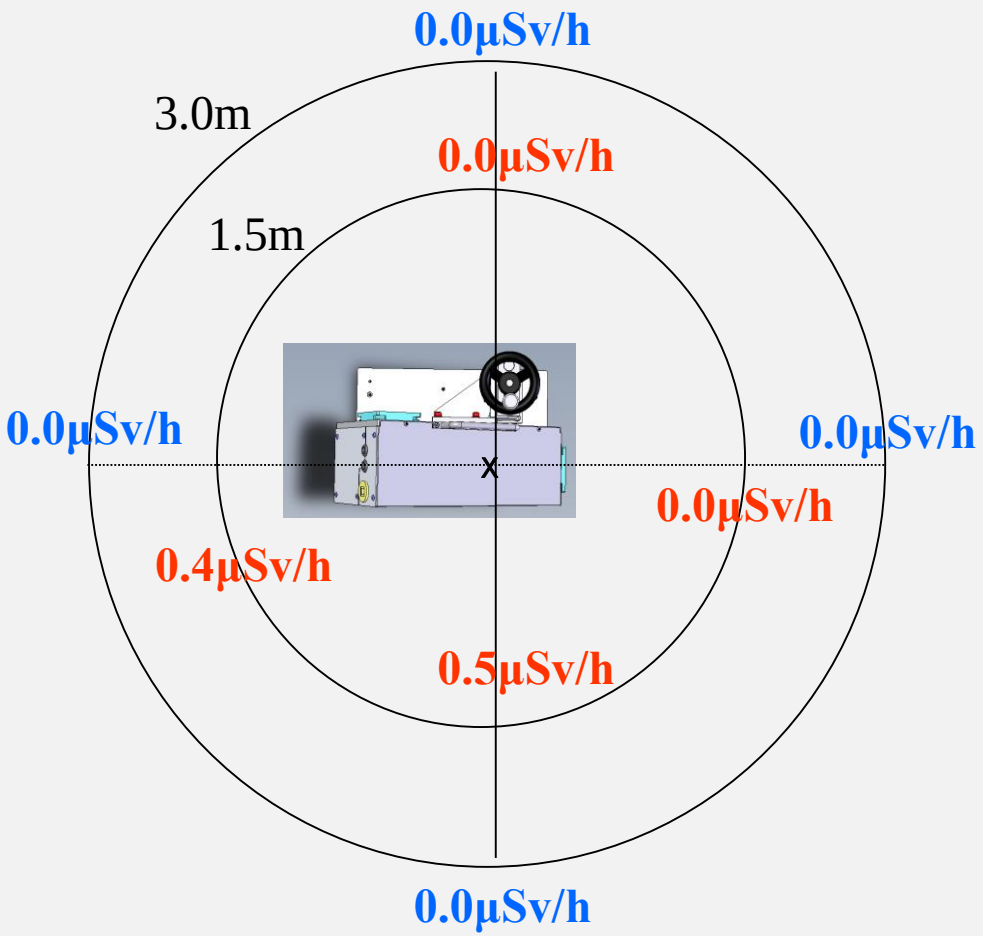
本体重量：約2.4kg

外形寸法：W190/H110/D250（mm）

消耗品

研磨液、マスクシール（Φ5mm又は8mm）
液ダレ防止ゲルマット、パテ

安全性（漏れ線量）



遮蔽物がない状態で測定
(オンサイト状態)

■漏れ線量
0.1μSv/h未満 (@3m)
(最小計測単位：**0.1μSv/h**)

■使用サーベイメータ
日立ALOKA社製 ICS-331BV1

■参考
管理区域対象となる漏れ線量
1.3mSv/3ヶ月を超える箇所

※装置から3m離れたところの漏れ線量は0.0μSv/hで安全性が高い！

使用環境

PULSTEC
Create New Value

遮蔽ボックス内で使用

オンサイトで使用

X線を気にせず安全に測定

- インターロック付で安全
- X線作業主任者は不要
- ドアが大きく出し入れしやすい

現地・現場で自由に測定

- 測定試料のサイズに制限なし
- 低線量なので管理区域を狭くできる
- 小型軽量で持ち運びが容易
- バッテリでも動作ができる

※いずれの場合も、労働基準監督署への『届け出』は必要です。

«MEMO»