

2次元検出器を利用した 残留応力測定原理と現場適応の事例紹介

建設技術のデジタル革新の活用に関する研究会
名古屋大学ナショナルコンソリドセンター
2023.11/14 パルステック工業㈱ 内山宗久



PULSTEC CONFIDENTIAL

会社概要

PULSTEC
Create New Value

設立	昭和44年11月1日
資本金	1,491百万円 (スタンダード)
代表者	代表取締役社長 鈴木 幸博
本社	静岡県浜松市北区
所在	細江町7000番地の35
従業員数	160名
営業所	東京営業所
子会社	Pulstec USA, Inc.



2

残留応力が主要因といわれている事例

PULSTEC
Create New Value

・リバティ船の脆性破壊 1942年3月米国オレゴン州

2708隻建造、1031件の事故の報告、うち200隻以上が沈む、
スケネクタデー号は冬季岸壁係留中夜明方、大音響と共に船体が真二つに折れた
事故発生溶接による残留応力が主原因とされている



・シルバーブリッジ崩落 1967年12月14日ウエストバージニア州

つり橋が崩落し、車両31台が巻き込まれ46人が死亡。シルバーブリッジは、ケーブルの代わりチェーンを使用。そのチェーンの腐食とクリスマスショッピングによる渋滞が原因で崩壊したとされている
製造工程にて不均等な冷却による残留応力が主要因とされている



・ハットフィールド脱線事故 2000年8月17日イギリス

レール発生していた疲労亀裂からレールが破断。事故現場から300個のレール破片が採取された
調査結果から、レール頭部から垂直方向に進展した疲労亀裂がレール破断の主要因とされている



PULSTEC CONFIDENTIAL

残留応力があると？ その1：寸法精度

PULSTEC
Create New Value

物が変形する！

一見、平らに見えるが・・・



内部的には、力がつり合い、形状を維持



このとき、片側が磨耗すると・・・



応力バランスが崩れ、**曲がる！**

PULSTEC CONFIDENTIAL

残留応力があると？ その2：疲労強度

物が割れやすくなる！割れにくくなる！

金属が疲労すると表面に微細な亀裂が発生します

このとき、表面に残留応力があると…

外力 上側は引張応力 下側は圧縮応力

引張応力があると… 亀裂が広がりやすい

*注意
き裂発生直前が、残留応力最大となる
→き裂発生した場合は解放状態となり
応力が抜けて見える

圧縮応力があると… 亀裂が広がり難い

PULSTEC CONFIDENTIAL

塑性加工による残留応力

鋼材に外力を加えると・・・

鋼材は曲がる (弾性変形内)

外力 上側は引張状態 下側は圧縮状態

外力を無くすと元に戻る (弾性変形内)

上側は無応力応力 下側は無応力応力

降伏点を越えて外力を無くす 誤解が多い (要注意)

降伏点を超えた表面結晶すべりと内部のスプリングバックの影響から 外側は圧縮応力 内側は引張応力

PULSTEC CONFIDENTIAL

溶接による残留応力

◆溶接

- 溶接金属を熱で溶かすことで母材と溶融し接合
- 溶融するときに膨張し、冷却しながら収縮する
- 止端部は、溶接時の焼き鈍しになり →引張応力が残ることがある

◆要因

- 冷却温度が大きい
- 炭素量が多い
- 周辺が拘束が強い

薄板中央部溶接
部分的な膨張と収縮で変形
板厚が厚くなると変形できない分
残留応力が大きくなる

PULSTEC CONFIDENTIAL

残留応力測定

残留応力測定の種類

破壊法	⇒切断法 (ひずみゲージ)、コンター法 (変位計+FEM)
準非破壊	⇒ホールドリル (穿孔法、リングコアD法、DHD法)
非破壊法	⇒放射光、中性子X線、X線法

残留応力の測定深さ

	0.001	0.01	0.1	1	10	100
破壊					切断法 (ひずみゲージ)	
					コンター法 (変位計+FEM)	
準非破壊					DHD (ひずみゲージ)	
					穿孔法(ひずみゲージ)	
非破壊				X-ray	放射光	中性子
				磁歪法	超音波	

ひずみゲージ

X線

PULSTEC CONFIDENTIAL

残留応力の活用

- ・輸送用機器関連（自動車、建機、造船、鉄道、航空宇宙）
- ・部品加工関連（溶接、熱処置、切削研削、ショットピーニング等）
- ・プラント、大型構造物（橋梁、建造物、電力）
→開発、設計、生産、維持管理力
- ・鉄鋼材料メーカー
- ・大学、研究開発機関

近年自動車関連は、激化する高燃費競争による部品の軽量化と、相反して安全性や性能向上のための高強度化、部品の寸法精度向上が急務

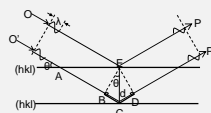
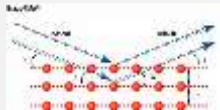
→残留応力の管理や把握、その制御が重要とされている

X線とは



X線の基礎 結晶からの回折現象について

- ・ Bragg (ブラッグ) の法則



ブラッグの法則（格子面によるX線の散乱による回折）

X線波長(λ)が結晶格子面間隔(d)に入射、散乱する際(d)により位相の干渉が発生。この回折現象をBraggの式(**Braggの法則**)となる(n)は自然数

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

λ はX線波長のため不変、そのため力加わり d が変わると θ が変わる

X線残留応力測定装置 μ -X360s

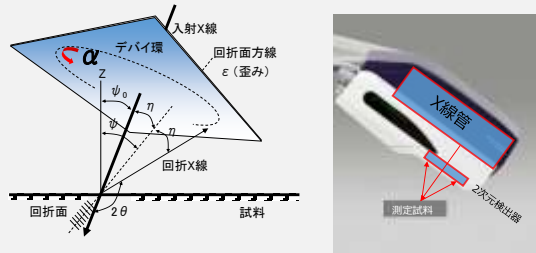


- ・ 概略仕様

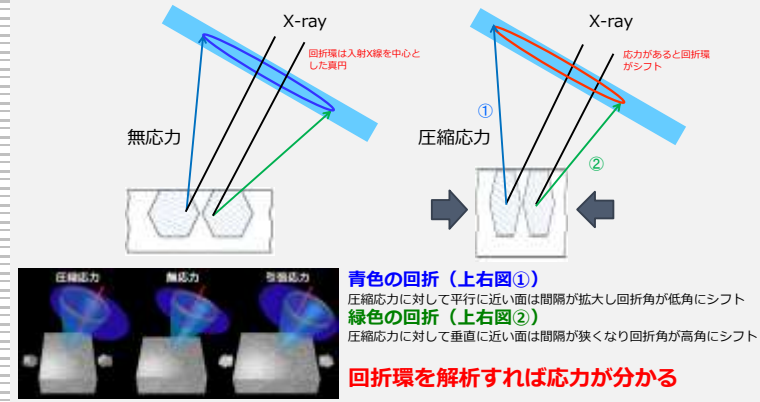
X線管球 : 標準Cr・30kV・1.5mA(低出力X線)
コリメータ径 : 標準 Φ 1.0mm(測定面積 約 Φ 2mm)

cos α 法の概要

デバイ環全体を取得し、無応力試料を基準に測定試料のデバイ環との差(歪θ)を求めることで、残留応力を算出
従来法にデバイ環の回転角αが計算に加わる



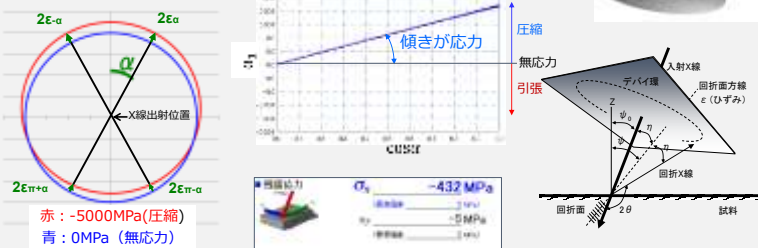
応力によるX線回折の変化



cos α 法

cos α 法の残留応力 (σ) 計算

単一入射にて回折環全周を取得、α方向におけるひずみを求め、応力を算出する方法



$$\varepsilon_{a1} = \frac{1}{2} \{ (\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi + \alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi - \alpha}) \}$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1 + \nu} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \left[\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right]$$

応力定数 傾き

μ-X360sによる応力測定

<https://www.youtube.com/watch?v=2UQzUID63Q8&t=7s>




アプリケーション：ホーム画面

① μ -X360は材料情報を元に**専用パラメータの選択**して計測
取得した回折X線から試料距離を算出
専用パラメータ： α Fe、 γ Fe、Al、Ni(pure)、Ni(alloy)


② 材料情報が不十分な場合、専用パラメータ『**未知試料**』
試料距離をカメラをみながら調整、回折角度を算出

③ **残留オーステナイト計測**
入射角度を変更して計測、 γ Fe(220)、 α Fe(211)にて計測、 γ Fe(311)K β カットフィルタでカット

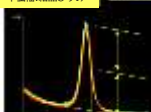


各種パラメータ30個

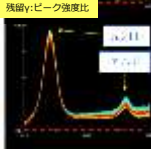
応用：ピークシフト



半価幅、結晶ひずみ



残留 γ ：ピーク強度比

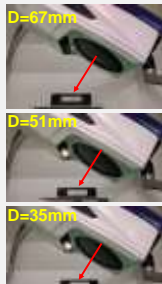


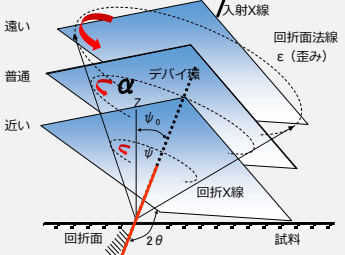
PULSTEC CONFIDENTIAL

2次元検出によるメリット：簡単設置

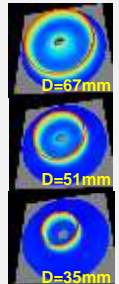
• $\cos \alpha$ 法はなぜ試料距離がラフなのか？

試料距離に応じてデバイ環のサイズが変化
2次元検出器にデバイ環が収めれば計測可能





フェライトのデバイ環 2θ (156.396deg)：測定可能資料距離35-67mm



PULSTEC CONFIDENTIAL

部品計測

ギア計測（熱処理、ピーニング）



クランクシャフト（熱処理）



ばね（コイル、板）



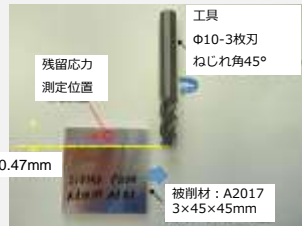
ガゼット隅肉溶接継手



PULSTEC CONFIDENTIAL

切削条件の違いによる残留応力の変化

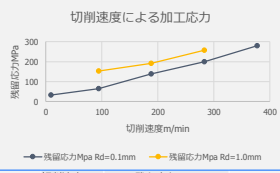
■ 切削条件による応力評価
被削材：A2017 3×45×45mm
切削工具：ノコト超硬合金エンドミルφ10 3枚刃ねじれ角45°
切削条件： $f=0.06\text{mm/tooth}$, $Ad=10.47\text{mm}$, MQL, 側面切削



10.47mm

被削材：A2017 3×45×45mm

残留応力 測定位置



切削速度 V_c (m/min)	残留応力 (Mpa) $Rd=0.1\text{mm}$	残留応力 (Mpa) $Rd=1.0\text{mm}$
9	32	153
94	65	136
188	136	192
283	199	257
377	280	

資料提供：徳山本金属製作所様

現場、現物で研削条件の最適化実施

PULSTEC CONFIDENTIAL

エリア測定：溶接

自動XYステージ：試料可動

□25mmを1mmStepで測定
26×26=676point

PULSTEC CONFIDENTIAL

積層造形品の計測

■積層造形 <https://www.pulstec.co.jp/websystem4/webroot/attach/documentjps/0/1595228216WvPE.pdf>

< サポート部 切断前 >

100% (FEMシミュレーション)

< サポート部 切断後 >

100% (FEMシミュレーション)

形状計測から品質管理へ

[X線評価]

- ・残留応力
- ・引張強度
- ・疲労強度
- ・結晶粒度
- ・配向性

< ライン測定 (上部中央部をLineビーム測定) >

断面に120MPa前後の引張応力あり

< マッピング測定 (上部中央部をマッピング測定) >

切断すると応力が解放され歪みが発生

・積層造形品の残留応力と変形の確認

PULSTEC CONFIDENTIAL

硬さ基準片による半幅測定

基準値	実測値
HRC (材質)	FWHM [deg.]
31.2 (SK85)	2.53
39.9 (SK85)	2.75
50.2 (SK85)	3.54
55 (SK85)	4.59
60.6 (SK53)	6.35
64 (SK53)	7.71
69.9 (SK120)	9.58

ログウェル (HRC)

X-ray FWHM (deg.)

硬さ基準片@山本科学工具研究社製

PULSTEC CONFIDENTIAL

熱処理部品

引張応力 (Tensile Stress)

圧縮応力 (Compressive Stress)

熱処理前 (Before Heat Treatment)


焼鈍後 (After Annealing)

- ① 残留応力が開放
Ave: 499.3 → 13.2 [MPa]
- ② 組織を軟化
Ave: 3.64 → 2.51 [deg.]

熱処理(焼鈍)前は、引張応力が強く割れやすい
⇒ 最適な熱処理を行い、割れにくい状態へ!

PULSTEC CONFIDENTIAL


ダイカスト金型寿命予測



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



現場現物計測



Create New Value

- ① 構造物測定
溶接部位の引張応力
ピーニング効果確認
沈下による応力集中
疲労き裂予測
- ② ケーソン鉄筋計測
高速道路/送電/地下鉄
- ③ 大型部品の品質検査
焼鈍効果確認
→コストダウン
- ④ 大型部品の出荷検査
応力/半価幅/残留
→品質保証








論文等 (土木関連)




Create New Value

実用化に向けた基礎研究等

目的	No.	論文タイトル	著者	論文集巻	発行年月
(1) 鋼材の鉄筋・鉄線の応力測定	1	RCセグメントの鉄筋応力計測へのX線回折法の適用に関する要素試験	東京電力パワーグリッド部、東電設計㈱	トンネル工学報告集 第27巻、E-5、2017-11	2017年11月
	2	X線を使用したセグメントの鉄筋応力測定に関する要素試験 (その1) ～セグメントの鉄筋の応力測定～	東京電力パワーグリッド部、東電設計㈱	土木学会第72回年次学術講演会 VI-921	2017年9月
	3	X線を使用したセグメントの鉄筋応力測定に関する要素試験 (その2) ～残留ひずみが存在する場合の応力測定～	東京電力パワーグリッド部、東電設計㈱	土木学会第72回年次学術講演会 VI-922	2017年9月
	4	X線回折法による鉄筋鋼線鉄線の応力測定に関する要素試験	東京電力パワーグリッド部、東電設計㈱	土木学会第72回年次学術講演会 VI-952	2018年8月
(2) グラウトの残留応力測定	5	X線を用いたグラウトアンカーの残留引張力測定	西日本高速道路エンジニアリング関西㈱、西日本高速道路㈱	土木学会第72回年次学術講演会 III-188	2017年9月
	6	評価用治具を活用したX線応力測定によるグラウトアンカー堅固力の評価の提案	大阪大学、積水化学㈱	平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会	2018年
	7	X線応力測定によるグラウトアンカー堅固力測定における電解研削の有効性に関する検討	大阪大学、積水化学㈱	2019年度土木学会関西支部年次学術講演会	2019年
	8	受圧後表面の応力分布に着目したグラウトアンカー堅固力の測定方法に関する研究	徳島建設㈱、大阪大学、積水化学㈱	土木学会論文集E2 Vol.75 No.2 95-105	2019年
(3) 既存構造物の鉄筋の応力測定	9	X線を用いた応力測定技術の既存構造物への適用	オリエンタルコンサルタンツ、東京工業大学	土木学会第71回年次学術講演会 V-570	2016年9月
	10	X線応力測定法のコンクリート構造物中の鉄筋への提供可能性に関する検討	東京工業大学	土木学会第73回年次学術講演会 IV-451	2018年8月
	11	X線回折法によるASR劣化したコンクリート構造物の鉄筋残留応力測定	琉球大学、沖縄建設技術、オリエンタルコンサルタンツ	沖縄総合事務局	2019年
(4) 疲労き裂検出	12	載荷状態にあるRC 構造物におけるX線を用いた鉄筋応力度の測定	東京電力ホールディングス㈱、東電設計㈱	2020年度土木学会年次学術講演会 VI-593	2020年
	13	X線回折法を用いた残留応力計測法による疲労き裂の検出	関西大学、麗上工業㈱	土木学会第71回年次学術講演会 I-373	2016年9月
(5) 疲労強度	14	残留応力計測による疲労き裂検出法に関する研究	関西大学、麗上工業㈱	鋼構造論文集 Vol.63A	2017年3月
	15	静的荷重作用下でFEM処理された面外ガット溶接接手の残留応力・疲労強度	名古屋大学	構造工学論文集 Vol.68A	2022年3月
(6) 高力鋼材の軸力計測 (7) ピーニング処理	16	X線回折法を用いた高力鋼材の軸力計測法に関する実験	麗上工業㈱、関西大学	土木学会第73回年次学術講演会 I-369	2018年8月
	17	各種ピーニング処理による鋼材残留応力計測	琉球大学、芝罘工業大学、関西大学	土木学会第73回年次学術講演会 I-143	2018年8月
	18	既設鋼橋溶接部を対象としたピーニングの品質管理手法の提案	琉球大学、ヤマダインフラテクノス㈱、東洋橋梁㈱	土木学会第73回年次学術講演会 I-144	2018年8月
	19	実物情報検査溶接部への改良型RC処理の適用性に関する検討	琉球大学、中日本エンジニアリング名古屋㈱	土木学会第73回年次学術講演会 I-145	2018年8月



4種類のサービス



Create New Value

装置販売

出張計測サービス

お預り計測サービス

レンタルサービス


- ・ 専用治具やシステム提案
- ・ 次世代装置開発

装置メーカーならではのサポート

数々の経験を生かした、計測サービス

お客様の測定物を当社技術者が計測

- ・ 装置一式を送付
- ・ 当社 (東京、浜松) に来社頂く
→ 自由にお使い頂く



ロボットシステム(3Dスキャナ & μ -X360)

<https://www.youtube.com/watch?v=H2gBXA1n3TI&t=1s>



ロボットによる
残留応力マッピングシステム



PULSTEC CONFIDENTIAL

PULSTEC
Create New Value

PULSTEC

Create New Value
新しい価値を創造する



PULSTEC CONFIDENTIAL