

炭素鋼の負荷応力値と X 線応力計測値の関係

中代 雅士^{*1} 三谷 幸寛^{*2} 阿部 徹^{*3} 鈴木 健次^{*4}
Nakashiro Masashi Mitani Yukinori Abe Toru Suzuki Kenji

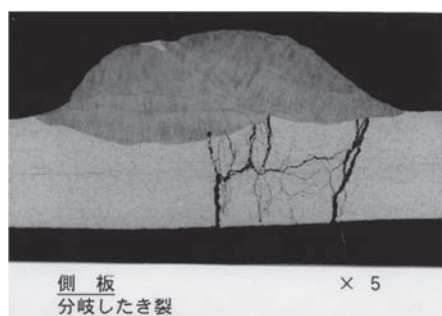
IIC では種々の方法で残留応力を計測しているが、その中で X 線応力計測法は、非破壊法として最も信頼性の高い計測方法である。今回、X 線応力計測値の特性を再確認するために、代表的な炭素鋼を用い、弾性変形内での 4 点曲げ試験、丸棒単軸引張試験、塑性変形域の計測目的で平板引張試験を実施し、負荷応力値と X 線応力計測値との相関関係を調べた。その結果、X 線応力計測値は、弾塑性変形に無関係に計測部位表面の応力状況を精度良く計測していることを明らかにした。

キーワード：残留応力、外部応力、内部応力、ひずみ、X 線応力計測、
 弾性変形、塑性変形、公称応力、真応力

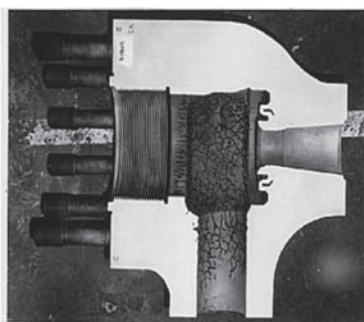
1. はじめに

一般に機械構造部材に負荷される応力は、外力による外部応力と製造時、運用時に発生する内部応力（残留応力）がある。材料力学的には、これら内外部応力を加算した応力値で評価される。この残留応力は、部材の変形、応力腐食割れ（SCC）、疲労破壊、遅れ破壊、クリーブ寿命低下など大き

な損傷要因となっているとともに、部材の表面にショットピーニング等の加工による圧縮残留応力を負荷すれば大幅に疲労強度を改善するなど、品質向上にも重要な役割を果たしている。図 1 は溶接施工時の残留応力で SCC が発生した事例と、火力発電設備で運用中に発生した熱応力によるクリーブ疲労損傷が発生した事例である⁽¹⁾。機械構造部材の残留応力を正確に評価することは、品質管理や



① 溶接時の残留応力で発生した応力腐食割れ(SCC)



② 運用中に発生した熱応力によるクリーブ疲労損傷事例

図 1 残留応力が原因となった損傷事例

*1：研究開発センター長 工学博士 技術士（金属部門・総合技術監理部門） 環境計量士（騒音・振動関係） 一般計量士
 *2：計測事業部 材料試験部
 *3：計測事業部 材料試験部 部長
 *4：計測事業部 材料試験部 課長 博士（工学）

寿命を評価する上で重要な課題である。近年、有限要素法（FEM）による構造解析技術が進歩しており、弾塑性解析による製造や使用中に発生する残留応力が精度良く解析されている⁽²⁾。しかし、解析結果の妥当性を評価するには、実体の応力計測による検証が必要である。

これらのことから、部材の残留応力を計測する要求は高まっており、図2に示すような種々の残留応力計測手法が採用されている。残留応力は局部的に分布しているので、図2に示すように、測定方法と計測箇所との関係を把握しておく必要がある。X線応力計測装置は、小型化されており、半導体検出器などによる自動計測で短時間計測が可能であり、適用範囲が広がっている。IICでは携帯型小型X線応力計測装置を用いて水車、橋梁、タンク、プラント配管など現地計測も実施している。

本稿では、X線応力計測法について紹介し、代表的な鋼材について従来の弾性領域だけでなく、塑性変形領域まで拡大して各負荷応力条件下でX線応力を計測し、両者の相関関係を示し、X線応力計測の有効性を検証した結果を紹介する。

2. X線応力計測手法の原理

X線法による計測原理は、特定の金属に電子線を当てると波長が決まったX線（特性X線）を含んだX線が発生する。この特性X線を試験体に当てれば、結晶格子間で回折現象（Braggの回折線）が生じる。図3に示すように、材質がわかっているならば、標準材の格子間距離が既知であり、測定値と標準材である無負荷の標準格子間距離との差異と弾性定数、ポアソン比で評価する⁽³⁾。特性X線は、X線管の管電圧に関係なく生じる波長であり、エネルギー的にも一定で試験体表面から20～50μm程度の深さからの回折で、平均応力を計測している。ただし、X線応力計測は全ての材料に適用できるわけではなく、下記のような制約条件がある。

- ①結晶粒が小さい多結晶体であること、
- ②粗大結晶粒や強い集合組織はないこと、
- ③複合組織ではないこと、
- ④測定部に急激な応力勾配がないこと、
- ⑤ヤング率、ポアソン比などの物性値が既知であること、
- ⑥表面が平坦であること

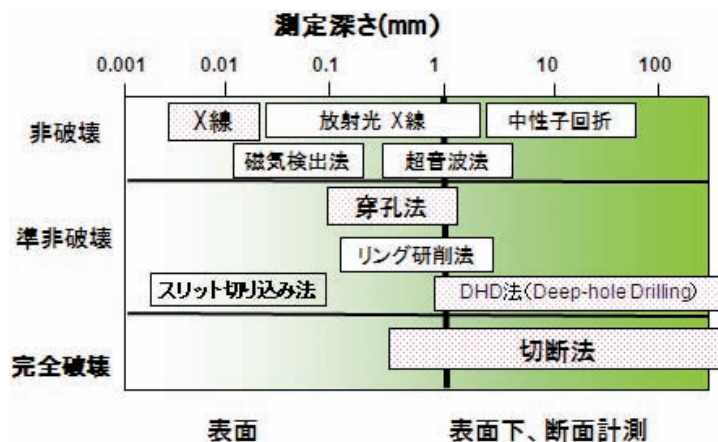


図2 種々の残留応力計測法による供試体計測位置範囲

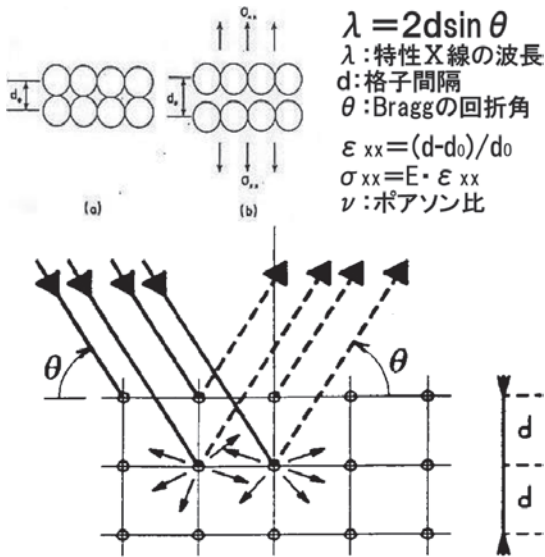


図3 BraggのX線回折によるX線応力計測法の原理

また、X線は極表面の計測であるが、同じ原理でX線の代わりに放射光、中性子線を使用すれば、かなり深い箇所までの計測が可能である。応力計測用X線装置は、図4に示すような携帯できるX線応力計測専用小型装置が開発され、IICが販売代理店として一般に販売している。本装置を用いて応力計測サービスの一環として現地計測サービスも実施している。本装置は、回折角度に半導体検出器を採用し、パソコン制御で簡単に計測できる。

今回炭素鋼のX線応力計測に採用したX線管球はCr管球、計測法は側傾法を用いた。評価する応力場は平面応力、単軸応力条件とし、種々の応力・ひずみ計算は次式を用いた。

- ・ 公称応力 $\sigma_n = P/S_0$
 P : 負荷荷重 (N)
 S_0 : 試験片初期断面積 (mm²)
- ・ 真応力 $\sigma_t = P/S$
 S : 試験片断面積
- ・ 初期面積と負荷時の断面積の関係:
 $S = S_0 / (1 + \epsilon)$ (体積一定則)
 $\sigma_t = \sigma_n \cdot (1 + \epsilon)$
 この式は引張強度 σ_B までのひずみに有効である。
- ・ X線応力計測値 σ_x
 X線応力測定装置による格子回折から求められる応力値
- ・ 計算に用いた物性値
 E : ヤング率 (縦弾性率、211GPa)
 ポアソン比 ν : $\nu = 0.3$
- ・ 公称ひずみ $\epsilon = (l - l_0) / l_0$
 l : ゲージ長さ (mm)
 l_0 : 標準長さ (初期値、mm)



図4 携帯型X線応力計測装置 (X3000)

3. SS400 薄板材の4点曲げ試験による負荷応力とX線応力計測値の関係

SS400 鋼について4点曲げ試験治具による曲げ応力を負荷し、ひずみゲージによる応力計測とX線応力計測値の関係を求めた。4点曲げ試験は、小型な装置でひずみゲージによる応力換算で評価できるので、X線応力計測装置の校正用として装置も市販されている。図5に4点曲げ治具とSS400材の曲げ試験結果とX線応力計測値の関係を示す。曲げ試験では、板厚方向に引張、圧縮の応力分布が存在するが、X線応力計測は引張側の表面を計測しているため、両者は良い相関性が得られた。

4. PC 鋼棒の引張負荷条件下におけるX線応力計測値との関係

PC 鋼棒は受け入れ状態で計測した。試験片形状とX線応力計測位置を図6に示す。X線応力計

測は試験片の両面(B1、B2)部を計測し、引張試験機の荷重計と試験片断面積から公称応力を算出した。X線応力計測の状況を図7に示す。無負荷状態では、約-330MPa程度の大きな圧縮応力が存在している。図8に公称応力とX線応力計測値の関係を示す。初期値の圧縮残留応力値を起点として、負荷応力に対するX線応力計測値の変化は直線関係を示す。また、初期値の圧縮応力レベルの影響は引張応力負荷過程でも維持され、初期値に負荷応力分を加算した値がX線応力計測値として計測される。本結果から、X線応力計測値は、弾性域内では初期値の状態から、外部による負荷応力を加算した応力値が計測値として得られる。従って、負荷応力変化を評価するには無負荷状態の計測が必要であり、負荷前後の応力計測値差異が、部材に負荷された応力に相当する。

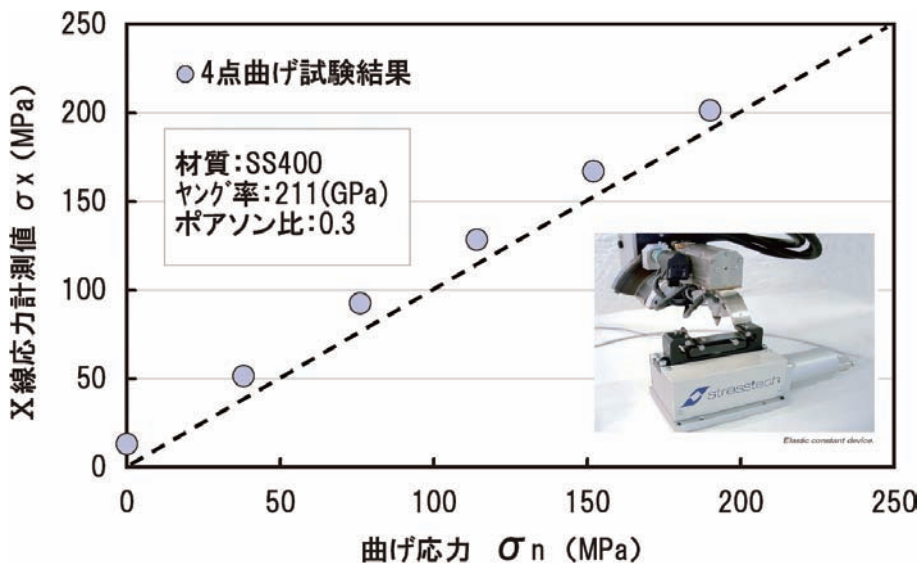


図5 4点曲げ試験治具による負荷曲げ応力とX線応力計測値の関係 (材質 SS400)

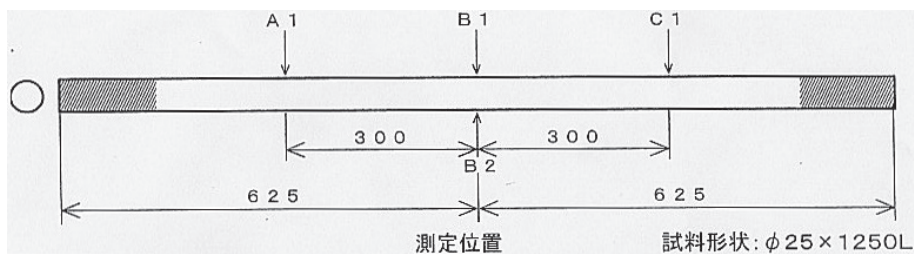


図6 PC鋼棒引張試験片形状とX線応力計測位置 (B1、B2)



図7 PC鋼棒引張試験での引張試験機とX線装置の応力計測状況

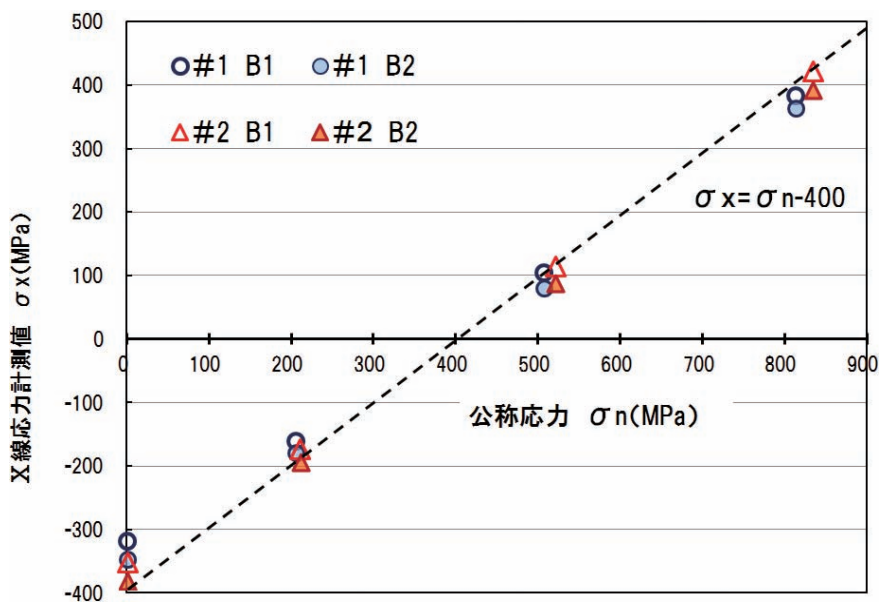


図8 PC鋼棒の引張試験における公称応力とX線応力計測値との関係

5. SM490 板材の引張試験による弾塑性域での計測結果

3項、4項はいずれも弾性域での計測結果であり、負荷応力値と X 線応力計測値の相関関係は 1 対 1 の直線関係が認められた。弾性域では X 線応力計測値は正確に応力負荷状況を示している。一方、溶接部材では溶接時に降伏点を超える高い熱応力が発生し、溶接部近傍では高い残留応力がしばしば計測される場合がある。そこで、一般溶接構造用圧延材 SM490、t 5mm 厚の板材を用いて、降伏点を越えた塑性域での X 線応力計測値と負荷荷重の関係を求めた。

① 試験方法

供試体の化学成分と試験片形状を図 9 に示す。試験片形状は板状として、負荷試験はインストロン型引張試験機（100kN）を用いた。所定の荷重・ひずみ到達点で、クロスヘッドを停止し、試験片を保持した状態で X 線応力計測を実施した。試験片のひずみ計測は、弾性域はひずみゲージ、塑性域はクリップゲージ式伸び計を用いて計測した。計測状況を図 10 に示す。

X 線応力測定部は、製造過程での表面状態の影響を除去するために、表面を電解研磨した。図 11 は試験片表面の深さと X 線応力値の関係を示す。図より 75 μ m 以上の深さになれば、ほぼ一定値に

なる。今回は約 200 μ m の深さに研磨後、供試材として計測した。

引張試験途中での X 線応力計測は、機械的にクロスヘッドの駆動を停止した中断状態で X 線応力計測を実施した。この中断時に試験片に負荷した荷重は、応力緩和でわずかに低下が認められた。この緩和量が安定した時点で負荷応力（公称応力）

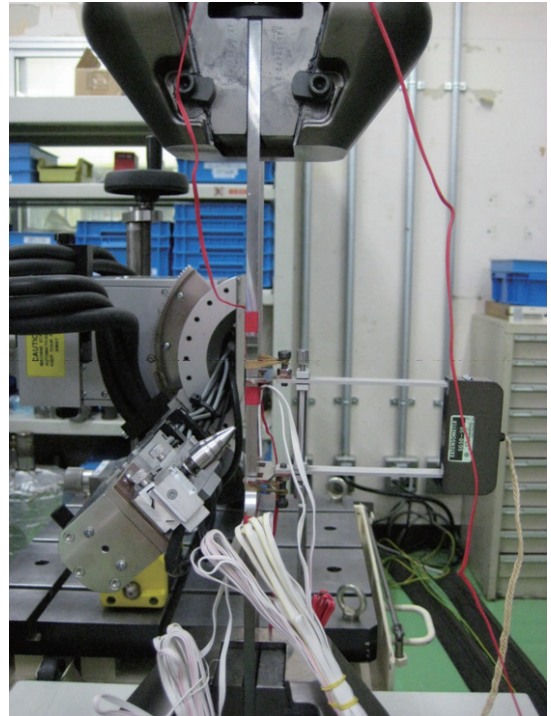


図 10 引張試験機に試験片と X 線応力計測装置取り付け状況

供試材のミルシート

JIS規格	化学成分(%)					機械的特性(MPa、%)		
	C	Si	Mn	P	S	降伏点	引張強度	伸び
SM490	0.17	0.32	1.33	0.013	0.02	409	552	25

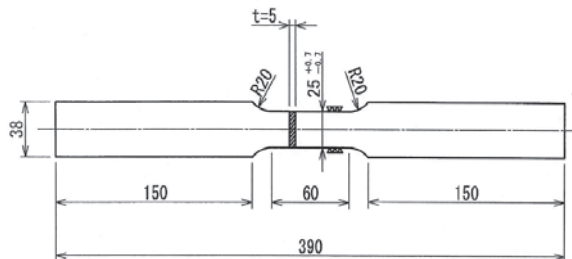


図 9 供試材の化学成分と引張試験片形状

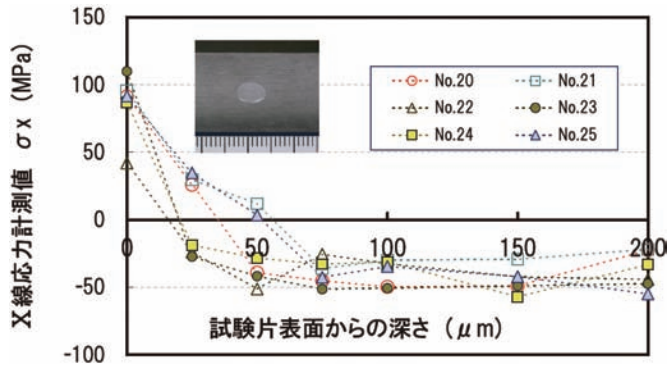


図 11 試験片表面からの深さ方向の X 線応力計測値変化

と X 線応力計測値を比較した。真応力は、ひずみ変形量から算出した。

② 弾性域内の計測結果

図 12 は引張試験での応力とひずみの関係を示す。試験体が板材であり、試験機にわずかな曲げ

応力が加算され、X 線計測面と反対側の裏面とでは、負荷応力に対してひずみによる差異が認められた。荷重が大きくなるに従って傾きの差による開きは直線的に大きくなる。降伏点 420MPa 以下の応力を弾性域として、目標応力 0、100、300、370MPa

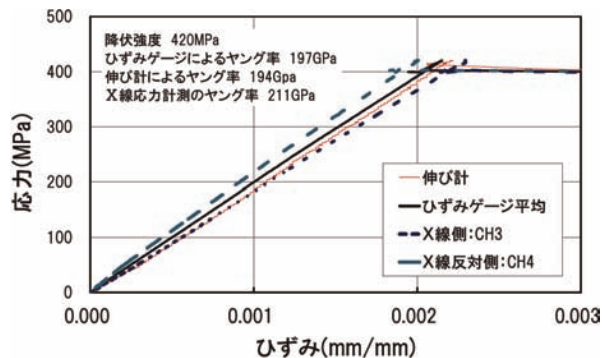


図 12 応力 (MPa) - ひずみ (mm/mm) 線図 (TP No.18)

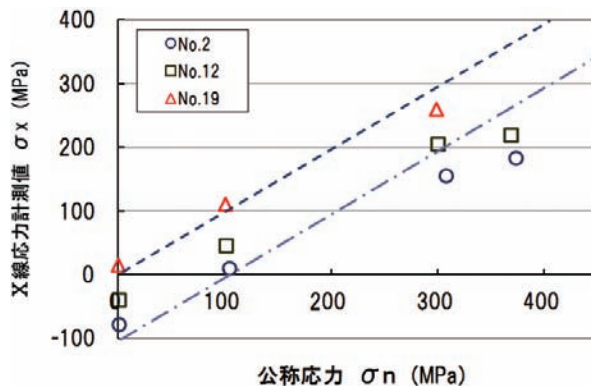


図 13 弾性変形領域における公称応力と X 線応力計測値の関係

の負荷時点で中断した時の X 線応力値との関係を
 図 13 に示す。応力 0 値は、試験片を試験機に取り
 付けた状態で計測した。X 線応力計測による絶対
 値は荷重 0 点での初期応力の影響を受けているが、
 変化量については負荷過重との相関関係で曲げの
 影響を受けながらほぼ直線関係が得られた。

③ 弾塑性領域内の計測結果

破断までの引張変形過程で、弾性域は 100、
 200、300、370MPa の各応力レベル、塑性域は 3、5、
 10、15、20、25% を目標値として試験機を中断さ
 せて計測した。図 14 に各計測点での公称応力と
 X 線応力計測値を示す。最大荷重点の引張強度以
 降では試験片の絞りによる断面積の減少で、公称
 応力は低下するのにに対し、X 線応力計測値は単調
 増加している。真応力と X 線応力計測値との関係
 を図 15 に示す。X 線応力計測値は、真応力値の

変化量と相関があることを示し、塑性域でも両者
 は良い相関関係を示している。X 線応力計測値は
 塑性域でも部材に負荷されている応力値を精度良
 く計測していることがわかる。

④ 塑性領域繰返負荷過程での計測結果

試験体の伸びが 3、5、10、15、20、25% の各ひ
 ずみ到達点で中断、荷重徐下、再負荷の繰返負荷
 試験で X 線応力計測した結果を図 16 に示す。X
 線応力計測値は、荷重徐下後には圧縮応力が計測
 された。これは平面応力状態といえども試験片の
 応力再配分や試験機の曲げの影響を受けていると
 考えられる。図 17 は各計測点での真応力と X 線
 応力計測値との関係を示すが、単調変形と同様に
 両者は相関関係があることを示している。X 線応
 力計測値は繰返変形を受けていても、常時試験体
 の応力状況を計測している。

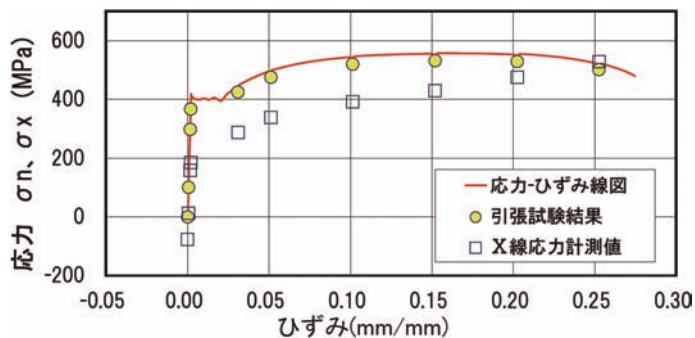


図 14 応力ひずみ線図と公称応力、X 線応力計測値の関係 (No.2)

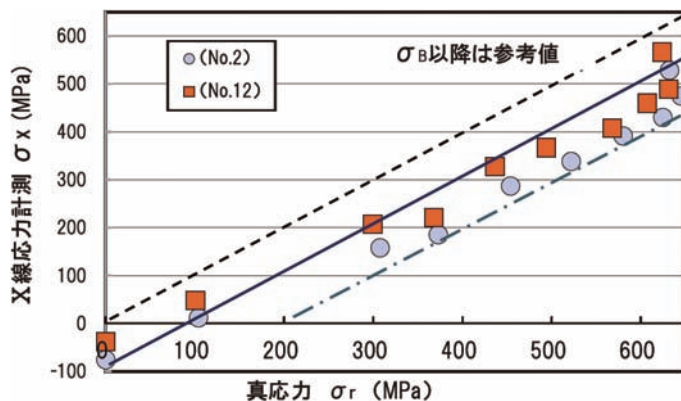


図 15 真応力値と X 線応力計測値との関係

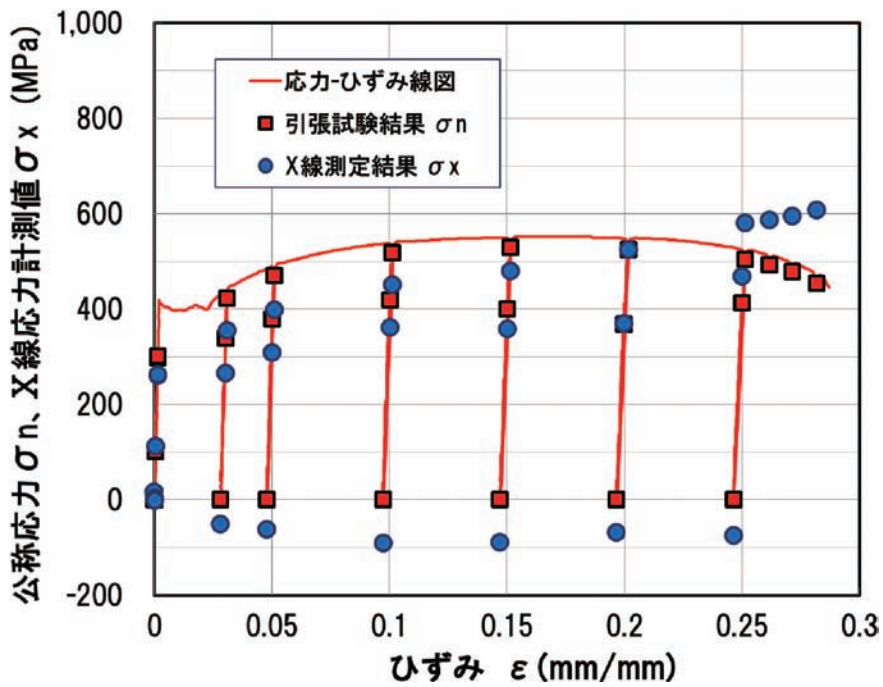


図 16 繰返負荷過重におけるひずみ ε と公称応力 σ_n 、X線応力計測値 σ_x の関係

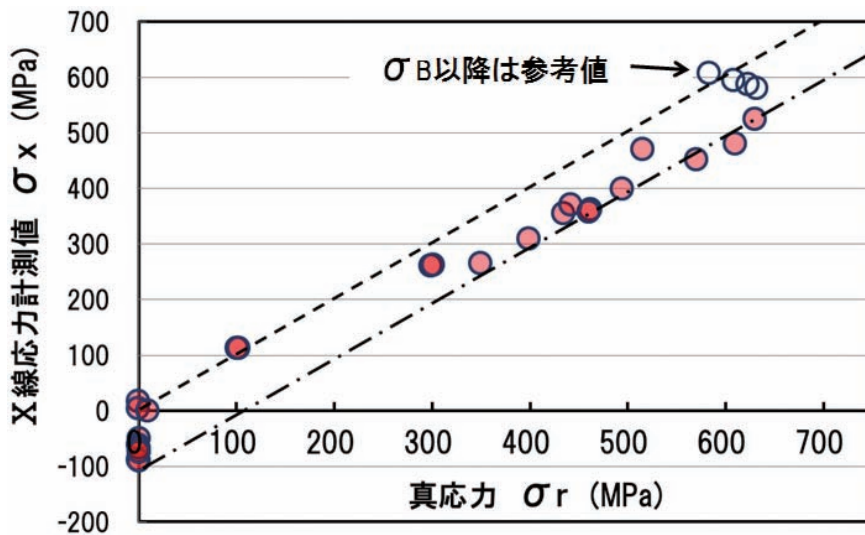


図 17 真応力 σ_r と X線応力計測値 σ_x との関係

6. 終わりに

代表的な鉄鋼材料について、外部負荷応力値とX線応力計測値の関係を計測した結果から、X線応力計測値は弾性変形だけでなく、塑性域の状態でも試験体に負荷されている絶対応力を計測していることがわかる。

材料に残留応力が存在している場合には、その残留応力と外部応力の加算結果を計測しているし、塑性領域でも部材に負荷されている応力値を計測している。X線応力計測法は材料の絶対応力評価として信頼性の高い手法と考える。しかし、X線応力計測は極表面が対象なので、表面状態の影響を受けやすく、曲げの影響、深さ方向の評価は検討が必要である。

参考文献

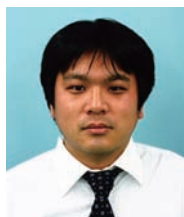
- (1) J. F. Delong, 石本礼二、梶ヶ谷一郎、中代雅士、吉川州彦、時政勝行、渡辺修、大友篤、本田聖、「超高温プラントにおけるタービン止め弁/制御弁の損傷解析及び材料評価」、火力原子力、Vol.35、No.11、pp.1249-1269 (1984-11)
- (2) K. Ogawa, L. O. Chidwic, E. J. Kingston, R. Dennis, D. Bray, N. Yanagida, “The Measurement and Modelling of Residual Stress in a Stainless Steel Pipe Girth Weld”: PVP 2008-61542 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 27-31, 2008, Chicago
- (3) 日本材料学会 JSMS-SD-5-02 X線応力測定法鉄鋼編



研究開発センター長
工学博士
技術士(金属部門・総合技術監理部門)
環境計量士(騒音・振動関係)
一般計量士

中代 雅士

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部
材料試験部
三谷 幸寛

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



計測事業部
材料試験部
部長

阿部 徹

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



計測事業部
材料試験部 課長
博士(工学)

鈴木 健次

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542