

# 応力負荷条件下における X 線応力計測値と 各種応力の関係

高久 泰弘<sup>\*1</sup>      三谷 幸寛<sup>\*1</sup>      鈴木 健次<sup>\*2</sup>  
*Takaku Yasuhiro*      *Mitani Yukinori*      *Suzuki Kenji*  
阿部 徹<sup>\*3</sup>      中代 雅士<sup>\*4</sup>  
*Abe Toru*      *Nakashiro Masashi*

材料の応力を計測する方法にはさまざまあり、その中でも X 線応力計測は、非破壊法では信頼性の高い計測方法である。本稿では、代表的な構造用部材である SM490 と SUS316 から平板引張試験片を作製し、平面応力負荷条件下における応力計測を行い、X 線応力計測値の妥当性を確認した。X 線応力計測値と引張試験機の荷重から計算した応力値、伸び計によるひずみ量から得られる真応力値との関係を求めた。その結果、X 線応力値は弾塑性域の両方で、真応力と相関関係を示した。

キーワード：残留応力、X 線回折、引張試験、弾性変形、塑性変形、公称応力、真応力

## 1. はじめに

残留応力は、材料やさまざまな構造部材の内部に封じこめられた応力であり、外部応力の影響だけでなく残留応力によっても部材の変形、割れが起こり、構造物の寿命低下や、最終的な破壊を起こす場合もある。残留応力には、溶接や熱処理などによる加熱-冷却過程や、研磨、切断などの塑性変形などの製造過程で生じるものや、構造部材の運用中に内部に封じ込められるものがあり、発生の要因はさまざまである。したがって、残留応力を知ることにより、部材の製造過程や運用過程を適切に管理できると考えられ、最終的に製品のトラブルを未然に防ぐことにつながる。近年で

は、解析技術の向上により、構造物の応力分布を高精度に評価できるようになったが、実際の計測によって解析結果を検証することや、構造物の溶接熱影響部など局所的な応力について経年的に計測を実施することにより、健全性を推測するといったニーズも依然として多い。

応力を計測する方法には、破壊法の切断法、準破壊法の穿孔法、DHD 法、非破壊法の X 線回折法、中性子回折法などがあり、材料特性や計測部位などにより、最適な計測方法が選定される。実際の構造部材では継続使用が求められることが多いため非破壊法が望ましく、その中でもハンドリングのしやすい X 線回折法による計測が最も多く行われてきた。

\*1：計測事業部 材料試験部 福浦グループ

\*2：計測事業部 材料試験部 福浦グループ 次長 博士（工学）

\*3：計測事業部 材料試験部 部長

\*4：フェロー 博士（工学） 技術士（金属部門・機械部門・総合技術監理部門） 環境計量士（騒音・振動関係） 一般計量士

X線回折法は、結晶格子面間距離の変化から、材料の極表面（約数10 $\mu\text{m}$ ）の残留応力を弾性力学的に求める方法である<sup>(1)</sup>。X線回折による残留応力計測結果の妥当性を確認する際、よく用いられる手法が4点曲げ試験による機械的負荷応力値との比較である。この方法は、X線弾性定数の計測法としても用いられているが<sup>(2)</sup>、表面ひずみの変化量から負荷応力を算出しているため、良好な直線関係が得られるのは弾性領域までである。残留応力が内在する材料に外力が作用するとき、材料に作用する応力は、残留応力と外部応力の和となる<sup>(3)</sup>。このとき結晶格子面間距離は材料に作用する応力の和で決まる。運用中の鉄鋼構造物などの実機部材においても残留応力と外力（拘束力）が負荷された状態であるため、外力はX線応力の計測値にも反映され、その計測値は素材の降伏値や0.2%耐力値を超え、塑性域の値となることがある。つまり、本手法で塑性変形を起こした材料の測定を行う際には、測定値の妥当性を注意深く評価する必要がある。

IICではこれまでに、弾塑性領域における負荷応力とX線応力計測値の関係を確認するため、降伏現象の区別が明瞭な溶接構造用圧延材SM490について、引張試験を行いながら降伏前後における材料表面の応力をX線回折によって計測した。それらの結果と負荷応力の関係から、X線回折による計測結果が変形域の違いによらずに実際の材料表面の応力状態を良好に表していることを報告した<sup>(4)</sup>。本稿では、その結果をさらに詳細に検証するとともに、降伏点がない材料のX線応力計測値と負荷応力の関係を確認するために、ステンレス鋼SUS316についても調べたので結果を報告する。

## 2. X線応力計測の原理

多結晶材料は、無数の結晶粒の集合体で、それぞれの結晶粒はランダムな方位を向いている。このような材料に応力が加わると、結晶格子がひずむため、格子面間隔が変化する。その変化がわかれば、応力を算出することができる。格子面間隔は、特定の波長のX線を結晶材料に照射して、ブラッグの法則を満足する結晶からの回折現象を利用して求める。ブラッグの方式を次式に示す。

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

$\lambda$ : 波長

$d$ : 格子面間隔

$\theta$ : 回折角

つまり、X線の波長 $\lambda$ とX線を照射して得られた回折角 $\theta$ から、格子面間隔 $d$ を求めることができる。無ひずみ状態の回折面間隔 $d_0$ とすると次式からひずみ $\epsilon_x$ が求められる。

$$\epsilon_x = (d - d_0) / d_0$$

ひずみ $\epsilon_x$ がもとまれば、弾性力学によりX線応力 $\sigma_x$ が求められる。

$$\sigma_x = E_x \cdot \epsilon_x$$

$E_x$ : X線の弾性定数

X線応力は回折に関与した結晶格子のひずみから応力を求めるため、機械的な計測方法で求められる応力とは本質的に異なる（ $E_x$ はX線的に求められるものであり機械的なものとは異なる）。ひずみゲージから求めるひずみは、弾性ひずみ（原子間距離の変化）と塑性ひずみ（原子と原子のずれ）の和であり、このときの応力は弾性ひずみにヤング率を乗じて算出されるものである。また引張試験における公称応力は、試験片の断面積減少を考慮していない応力であるのに対して、X線応力は断面積とは関係なく、ブラッグの法則を満足した結晶格子に作用している応力である。そのため、本稿では断面積の減少を考慮した真応力とX線応力を比較した。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材

供試材には、明瞭な降伏点が現れる一般溶接用圧延材 SM490 と、降伏点がないステンレス鋼材 SUS316 を用いた。試験片の形状を図 1 に示す。

一般的に素材から部材を加工する際には、切削や研磨などによって部材表面には残留応力が付与された状態になる。本研究では、引張試験機によって素材に正味付与される荷重と応力の計測結果の関係を評価するため、あらかじめ試験片の応力計測箇所（試験片中央部  $\phi 6$  mm の領域）を電解研磨し、加工など二次的に付与された応力を除去した。

#### 3.2 試験装置および実験方法

試験の状況を図 2 に示す。引張試験中の試験片の片面中央部で X 線回折による残留応力計測を行い、その対面にひずみゲージとクリップ式伸び計を設置してひずみを計測した。試験片の引張にはネジ式万能試験機（オートグラフ AG-IS、島津製作所、最大荷重 100 kN）を用いた。引張試験機で、所定の荷重および、ひずみ到達点で試験機を停止し、試験機変位を保持した状態で X 線応力計測をした。試験機変位を保持中、負荷した荷重が応力

緩和により低下するため、緩和が安定した時点で X 線応力の計測を開始した。

荷重の荷重方法は、図 3 に示す二通りである。連続荷重では、段階的に荷重を負荷させ、所定のひずみに到達したときにその都度 X 線応力を計測した。一方、繰り返し荷重では、弾塑性領域で所定のひずみに到達した後に除荷し、その後、再荷重によって X 線応力の変化を調べた。

試験片のひずみ計測は、弾性領域についてはひずみゲージ、弾塑性領域についてはクリップ式伸び計を用いた。評価する応力は引張方向の単軸応力とし、公称応力および真応力を次式で算出した。

$$\cdot \text{公称応力} \quad \sigma_n = \frac{P}{S_0}$$

$$\cdot \text{真応力} \quad \sigma_t = \sigma_n \cdot (1 + \varepsilon_n)$$

\* 真応力  $\sigma_t$  は引張強度  $\sigma_B$  まで有効

$P$  : 負荷荷重 (N)

$S_0$  : 試験片初期断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$\varepsilon_n$  : 公称ひずみ

X 線応力計測は  $\sin^2\psi$  法、回折線は側傾法で計測した。使用した装置は IIC が販売している Stresstech 製 X3000 である。計測条件を表 1 に示す。

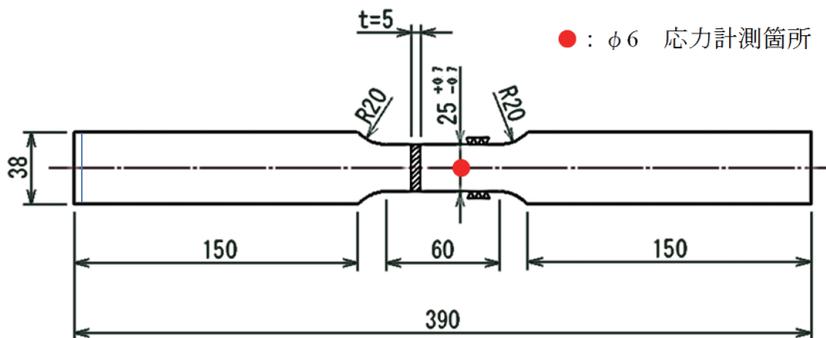


図 1 試験片形状



図2 引張試験中におけるX線応力計測状況

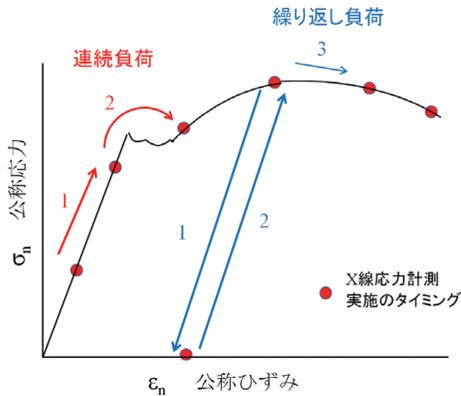


図3 荷重の負荷方法

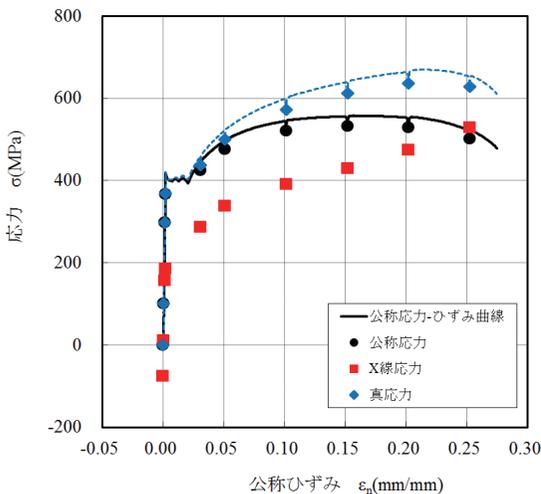
表1 X線計測条件

材質	SM490	SUS316
管球	Cr-Kα	Mn-Kα
回折面	211	311
回折角	156.4	152.3
管電圧 [kV]	30	
管電流 [mA]	6.7	
X線照射径	φ3.0 mm	

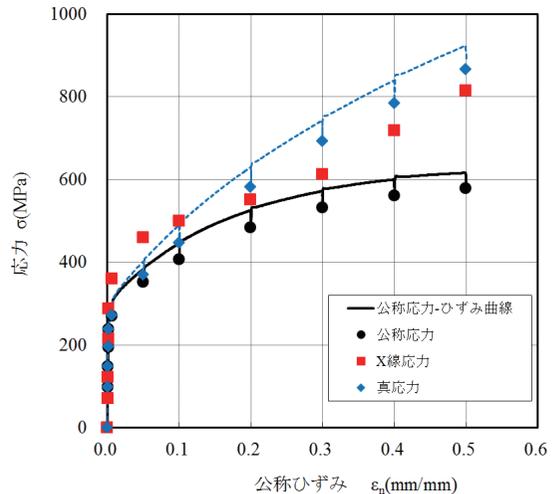
#### 4. 結果および考察

##### 4.1 連続負荷試験におけるX線応力計測

試験片に段階的に荷重を負荷し、X線応力計測した結果を図4に示す。試験機停止中の試験片に負荷した荷重は、応力緩和でわずかに低下するため、緩和が安定した時点で、X線応力を計測し、その時点での公称応力、真応力を求めX線応力と比較した。弾塑性領域ではSM490、SUS316ともにひずみが増加するにつれて断面積が減少し、公称応力はなだらかな曲線を描くのに対し、X線応力と真応力はひずみの増加に対して直線的に増加した。



(a) SM490



(b) SUS316

図4 連続負荷試験における応力とひずみの関係

#### 4.1.1 弾性域内の公称応力と X 線応力の関係

公称応力と X 線応力の関係を図 5 に示す。SM490 は降伏点 420 MPa 以下の応力を弾性域として、目標応力 0、100、300、370 MPa の公称応力と X 線応力で比較した。応力値 0 は試験片を試験機に取り付けた状態で計測した。X 線応力値は公称応力より低い値を示したが、両者の間には良好な直線関係が認められた。X 線応力値が公称応力よりも低い値を示したのは、荷重 0 点における初

期残留応力の影響と試験片にわずかな曲げ荷重が加算されたためと考えられる。図 6 に弾性域内でのひずみと公称応力の関係を示す。試験片片側（X 線応力計測側）と、対面のひずみには差異が認められ、試験片に曲げ荷重が負荷され、差異が負荷応力の増加に伴い拡大したと考えられる。

図 5 (b) に示す SUS316 については塑性変形量の小さい 150 MPa までは公称応力と X 線応力の間には直線関係が認められた。

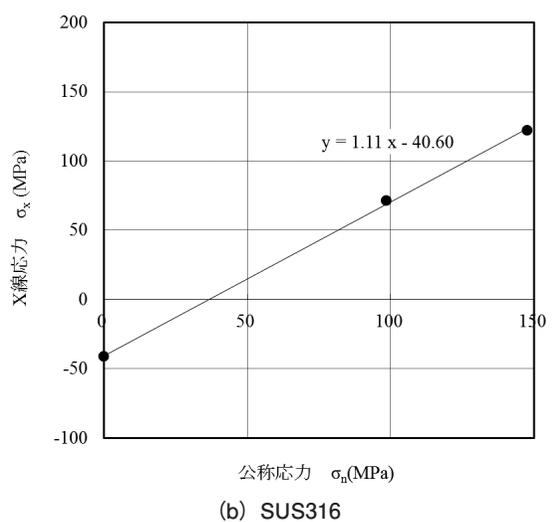
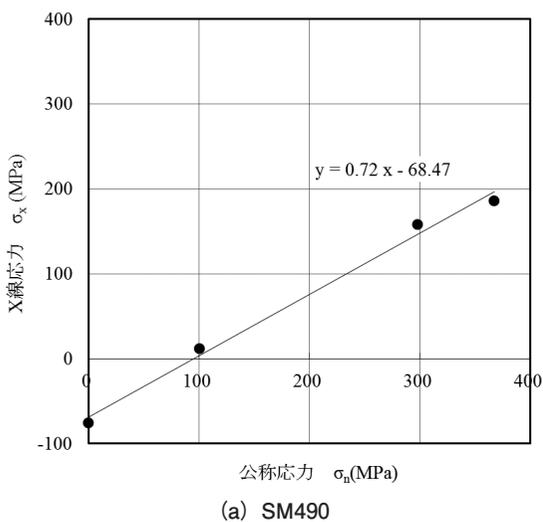


図 5 連続負荷試験における X 線応力と公称応力の関係

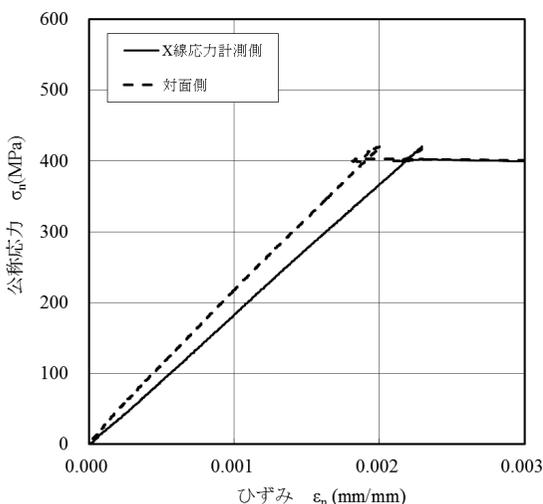
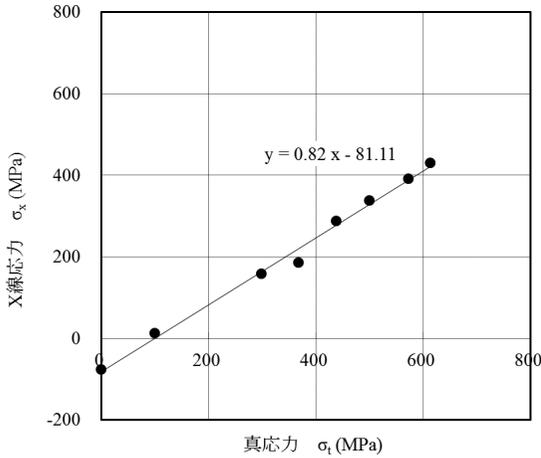


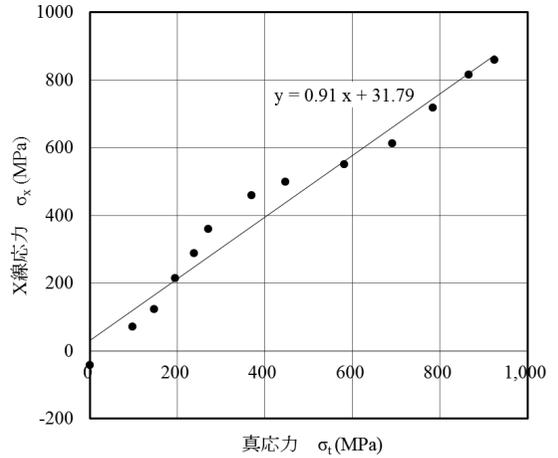
図 6 弾性領域内の公称応力-ひずみ線図

#### 4.1.2 弾塑性領域の真応力と X 線応力の関係

真応力と X 線応力値の関係を図 7 に示す。SM490 の X 線応力は真応力より低い値を示すも全応力レベルで、真応力と良好な直線関係が得られた。一方、SUS316 の X 線応力値は、200 ~ 500 MPa の間で真応力より高い値を示し、その区間以外では真応力と良い相関関係を示した。150 MPa 以上では、不連続降伏現象の開始直後に試験片に不均一な応力分布が発生したことにより、公称応力から求めた真応力と X 線応力に差異が出たと考えられる。



(a) SM490



(b) SUS316

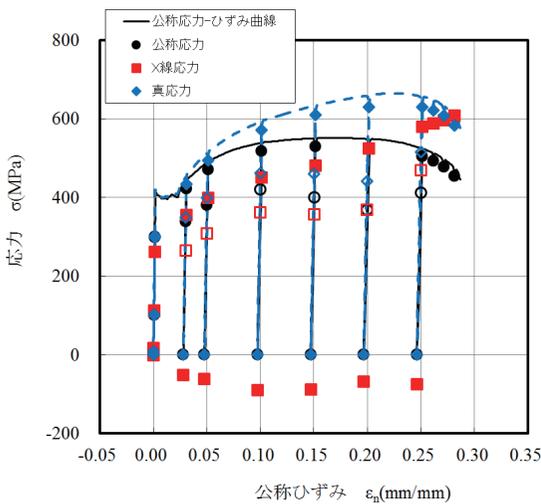
図7 連続負荷試験におけるX線応力と真応力の関係

#### 4.2 繰返負荷試験におけるX線応力

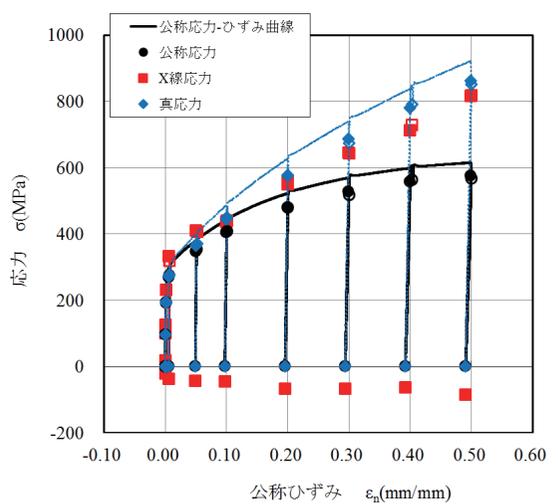
目標応力、ひずみ到達点で負荷中断、応力除荷、再応力負荷を繰り返し、各過程においてX線で応力計測した結果を図8に示す。中実のプロットは負荷後の値、白抜きのプロットは再負荷後の値を示す。SM490およびSUS316ともに、公称応力、真応力、X線応力の関係は連続負荷試験と同じ傾向を示した。0.02 mm/mm (2%) 以降のひずみ領

域では、荷重除荷後に永久ひずみが残りに、X線では圧縮の残留応力が計測された。

図9に真応力とX線応力の結果を示す。連続負荷試験と同様に、SM490の真応力とX線応力は良好な直線関係が認められた。SUS316についても連続負荷試験と同じ傾向であり、150 MPa以降の区間で真応力より高い値を示したものの、連続負荷と比べるとその差異は小さく、真応力と良い



(a) SM490



(b) SUS316

図8 繰返負荷試験における応力とひずみの関係

直線関係を示した。連続負荷試験より繰返負荷試験の方が良い相関関係を示したのは、繰り返し負荷により、試験片内部の応力が均一化されたためと考えられる。連続負荷試験では試験片平行部に一樣な引張荷重を負荷しているとはいえ、試験片の表面から中心部にかけて、多様な応力分布が生じている。また SM490 は生材を用いたので、試験片内部の応力は均一でない。そのため、試験片平行部内の平均真応力と試験片の表面の一部を計

測している X 線応力計測値に差が生じたと考えられる。そこで繰り返し負荷による試験片内部の応力が均一化したこと明らかにするため、**図 10** に繰返負荷試験における再負荷後の値のみを用いて真応力と X 線応力の関係を求めた。X 線応力は荷重除荷後、圧縮の残留応力が発生したので、圧縮残留応力をオフセットした値をプロットした。**図 10** に示すように SM490 および SUS316 とともに傾きが 1 を示し、良好な関係が得られた。

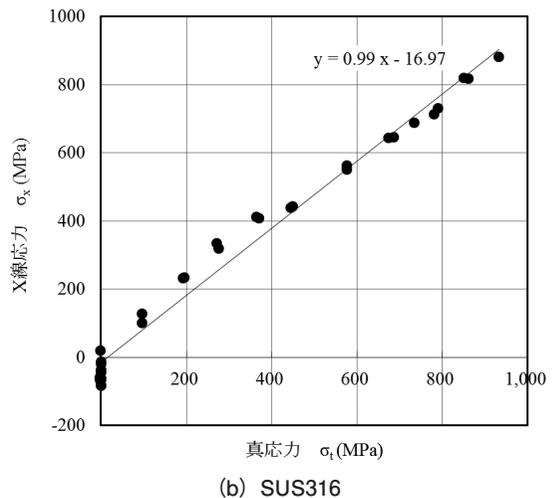
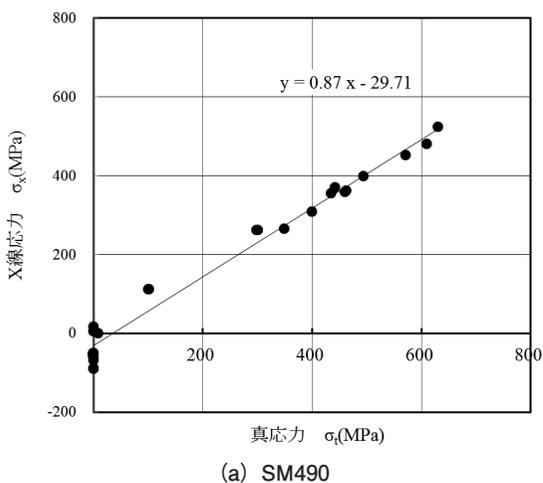


図 9 繰返負荷試験における X 線応力と真応力の関係

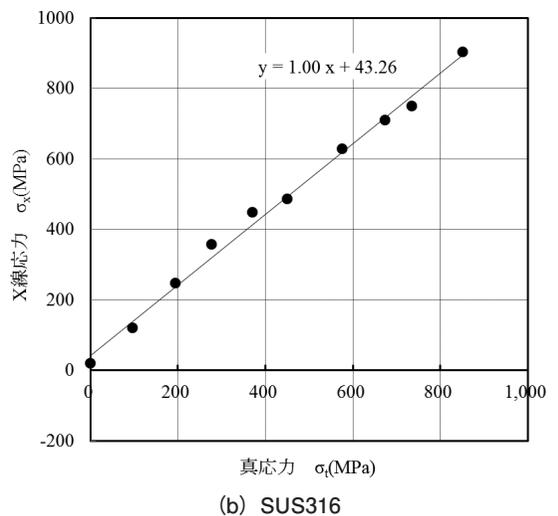
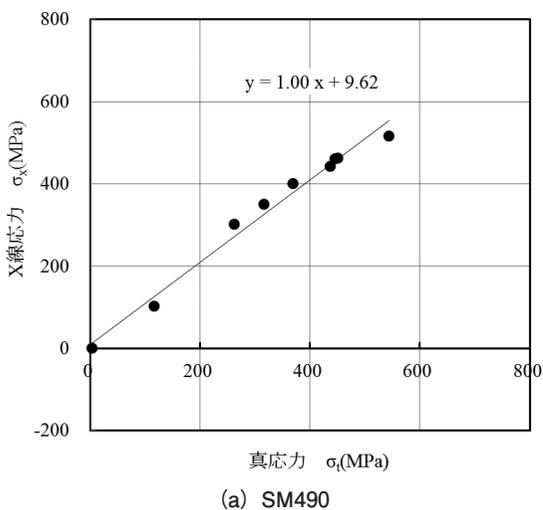


図 10 繰返負荷試験における再負荷後の真応力と X 線応力の関係

## 5. まとめ

X線応力計測装置による計測値は、負荷荷重に対する真応力とX線応力の変化量に関して良好な関係が得られた。そのためX線応力計測は、残留応力だけでなく、弾塑性領域で構造体に負荷された応力を精度良く評価、計測できていることが明らかになった。

## 参考文献

- (1) 日本材料学会：X線応力測定法、第2版、養賢堂、1990、pp.54-60
- (2) 田中啓介、鈴木賢治、秋庭義明：残留応力のX線評価－基礎と応力－、第1版、養賢堂、2006、pp.43
- (3) 日本材料学会：JSMS-SD-5-02 X線応力測定標準－鉄鋼編－
- (4) 中代雅士、三谷幸寛、阿部徹、鈴木健次：炭素鋼の負荷応力値とX線応力計測値の関係、IIC REVIEW、Vol.49、2013/04、pp.61-70



計測事業部  
材料試験部  
福浦グループ  
高久 泰弘

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



計測事業部  
材料試験部  
福浦グループ  
三谷 幸寛

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



計測事業部 材料試験部  
福浦グループ 次長  
博士(工学)  
鈴木 健次

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



フェロー 博士(工学) 技術士  
(金属部門・機械部門・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. 03-6404-6534  
FAX. 03-6404-6044