

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 10 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 ~ 2011

課題番号：21560081

研究課題名（和文） 結晶弾性異方性と微視的残留応力に関する研究

研究課題名（英文） Study on residual micro-stresses and elastic anisotropy

研究代表者

鈴木 賢治 (SUZUKI KENJI)

新潟大学・人文社会・教育科学系・教授

研究者番号：30154537

研究成果の概要(和文): 弾性異方性の大きい結晶としてオーステナイト系ステンレス鋼を対象にして, 弾塑性変形による残留応力の特性について調べた. 準静的塑性変形, 高ひずみ速度による塑性変形およびピーニングによる残留応力について研究した. 残留応力の弾性異方性を調べるために, SPring-8 の高エネルギー放射光を用いて各格子面による残留応力を評価した. 各格子面の残留応力には微視的残留応力の影響による回折面依存性があることがわかった. また本実験に際して, 2 次元検出器を利用した応力測定のための回転スリット手法による解析法として回折スポット追跡法を提案した.

研究成果の概要(英文): The used material was austenitic stainless steel, SUS316L, which has an elastic anisotropy. Residual stresses by quasi-static plastic deformation, high strain rate deformation and peening, were measured by hard synchrotron X-rays in SPring-8. The residual stress by each lattice plane was different from that by other lattice planes. The residual micro-stress is caused by elastic anisotropy. In addition, we proposed a diffraction spot trace method to measure the stress in materials with coarse grains using the area detector, PILATUS, and a new rotating slits system.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：X線，残留応力，弾性異方性，オーステナイト系ステンレス鋼，微視的応力，回折面依存性，塑性変形

## 1. 研究開始当初の背景

オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金は，弾性異方性が大きい結晶である．これらの材料は，単純な連続体力学に示されるような変形挙動をとるとは考えにくい．粗

大粒の弾性変形挙動をみると，個々の結晶粒はフックの法則に従わず，微視的影響がみられる，一方，平均的挙動はフックの法則に従い，巨視的性質を示す．

このような結晶弾性異方性は，塑性変形に

よる残留応力にどのように影響するかは、予測することがむずかしい。しかし、具体的な変形様式に対して、どのような残留応力が生じるかは明確にしなければならない。本研究では、機械的残留応力に加えて、格子面方位による残留応力を測定することで、微視的残留応力を知ることができる。

近年、高エネルギー放射光による応力・ひずみ評価が発達してきた。それにより、多数の回折面を利用して金属の残留応力を測定することができるようになった。その手法を応用して、これまで実証的な研究が困難であった弾性異方性の大きな材料の残留応力の回折面依存性について研究することが可能となってきた。

## 2. 研究の目的

本研究においては、原子炉用オーステナイト系ステンレス(SUS316L)を対象に、各回折面の残留応力を測定し、微視的残留応力の挙動を解明する。具体的には、

1. 微視的残留応力の弾塑性特性の解明
2. 微視的残留応力の引張塑性変形量依存性について研究する。
3. 微視的残留応力のひずみ速度依存性について研究する。
4. 機械的残留応力を得るのに適した回折面の選定法の確立
5. 多数の回折面の応力ひずみ関係から機械的残留応力に近い面を探す。
6. 機械的残留応力を与える回折面の組み合わせを選定する。

について研究を進める。これらを達成することで、オーステナイト系ステンレスの微視的応力と巨視的応力をつなぐ方法論が確立できる。

以上に加え、本研究を可能にする新しい二次元検出器法を開発することも研究目的である。

## 3. 研究の方法

本研究を遂行するために、実験材料としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた。塑性変形は、次のようにした。

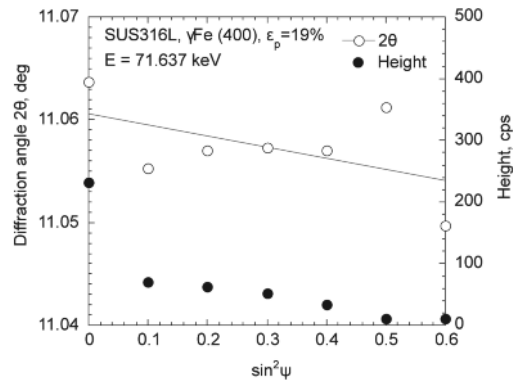
1. 平板試験片に速度 0.2mm/min (ひずみ速度  $3.64 \times 10^{-3}/\text{min}$ ) の準静的引張り試験を行った。それらの試験片の塑性ひずみは、それぞれ 0, 0.2, 1, 5, 9, 19 および 55% であった。
2. ひずみ速度を変えて塑性変形を与えた。ひずみ速度は、 $6.67 \times 10^{-5}$  から  $6.70 \times 10^{-2}/\text{s}$  (以上は万能試験機) および 500 および 670/s (ホプキンソン棒法) である。
3. 応力改善法として利用されているレーザーピーニングおよびウォータージェットピーニングによる塑性変形を表面に与えた。
4. 平板試験片を油圧で引張り変形を与えな

がら、IP にてその場測定した。

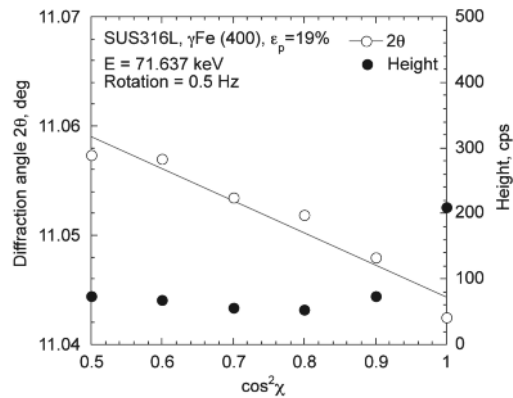
1 から 3 の実験においては、 $\gamma\text{-Fe}$  の 311 回折を Mn-K 特性 X 線による回折を利用して残留応力を測定した。311 回折は巨視的残留応力を評価するのに適した格子面である。また、大型放射光施設 SPring-8 の高エネルギー放射光 X 線を用いて多数の回折面による残留応力を測定した。応力評価で使用する回折弾性定数については、Kröner モデルを用いて理論計算した。そのために、単結晶のステイフネス  $c_{ij}$  から回折弾性定数を計算するサーバーを用意し、公開した([その他]に示したホームページを参照)。

## 4. 研究成果

(1) オーステナイト系ステンレス鋼の微視的残留応力は単結晶の弾塑性異方性に起因して発生するものと考えられる。本年度は、SUS316L の平板試験片に一軸引張り塑性変形による微視的残留応力を多数の回折面の組み合わせにより測定した。粗大粒の影響を考慮した  $2\text{-cos}^2$  法を開発し測定に利用したところ、図 1 に示すように  $2\text{-sin}^2$  法より優れていた。



(a)  $2\text{-sin}^2$  法



(b)  $2\text{-cos}^2$  法

図 1 粗大粒測定における  $\text{cos}^2$  法の効果

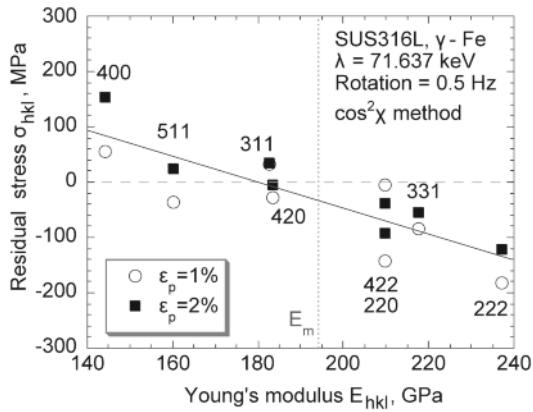


図 2 塑性変形による残留応力の回折面依存性

図 2 に示すように、微視的残留応力の結果は、回折面依存性を示し、結晶弾性異方性と密接に関係していることを示唆した。それを整理するために結晶の回折面のヤング率で整理すると、微視的残留応力の傾向とよく関係づけることができた。ヤング率の小さい回折面では引張りの残留応力が、ヤング率の高い回折面では圧縮の残留応力が生じる傾向がわかった。また、塑性変形が大きくなるに従い、微視的残留応力の差は小さくなる傾向がある。単純な弾塑性モデルでそのメカニズムを説明できる。

(2) 塑性変形により形成された微視的残留応力のひずみ速度依存性について実験と研究を進めた。具体的には、SUS316L の平板試験片を万能試験機により引張り速度を変化させた種々の試験片を製作した。また、衝撃試験機(split Hopkinson bar test)により高速のひずみ速度で塑性させた試験片も準備した。さらに、一軸引張り以外の塑性変形機構として、レーザーピーニング、ウォータジェットピーニングによる表面残留応力改質した SUS316L も用意した。

以上の各試験片について、ラボ X 線および高エネルギーシンクロトロン放射光により残留応力測定を行い、多数の回折面を利用して測定された残留応力と回折面の依存性について解析した。高エネルギー放射光の透過力を利用した  $\cos^2$  法を実施し、粗大粒組織の残留応力に対するその有効性を確認した。ピーニング材については、透過法が利用できないので、表面の残留応力勾配があることなどを考慮して、侵入深さ一定法を利用した。

図 3 に示すように、微視的残留応力と結晶弾性異方性の関係について準静的および動的の挙動を確認し、ひずみ速度が大きくなると微視的残留応力が小さい傾向が得られた。また、微視的残留応力における引張り塑性と

圧縮塑性のメカニズムについても解明した。微視的残留応力の回折面依存性からクレナーモデルによる回折弾性定数の大小が、角回折面の微視的残留応力の大小と関係した。また、圧縮塑性変形と引張り塑性変形では、微視的残留応力の傾向が逆になるメカニズムについてもモデルを提案し説明した。

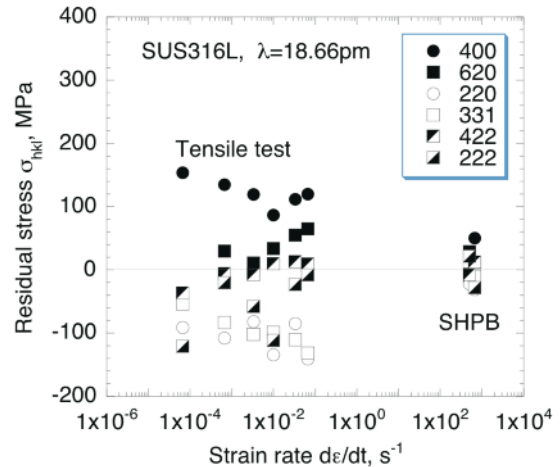


図 3 ひずみ速度と残留応力

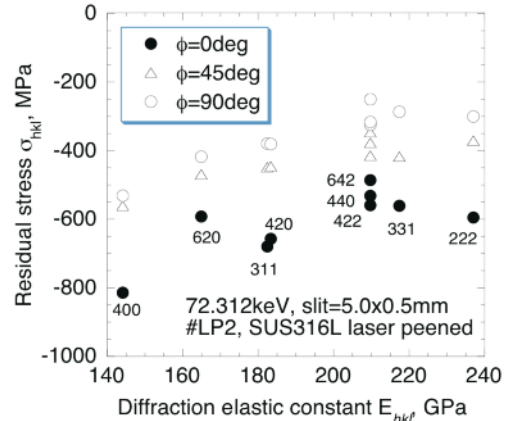


図 4 LP による残留応力

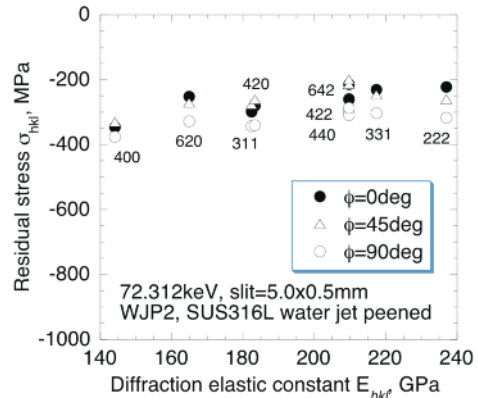


図 5 WJP による残留応力

図 4 と図 5 に示すようにレーザーピーニング (LP) およびウォータージェットピーニング (WJP) の残留応力について、回折面依存性が見られる。原子密度の小さい回折面ではピーニングによる圧縮残留応力が大きく、原子密度の大きな回折面は圧縮がやや小さく、かつ等二軸応力状態から外れていた。これらのことから、ピーニング残留応力においても微視的残留応力の影響がある。そのほか、立方晶、六方晶の Kröner モデルによる回折弾性定数を計算するシステムを公開した。

(3) 23 年度は、結晶弾性異方性の研究において重要な課題として、結晶弾性異方性を持つ粗大粒の応力評価を中心に研究を行った。粗大粒の応力評価においては、2 次元検出器が不可欠であり、それには二つの課題がある。

第一は、ゲージ体積を作るための光学技術の確立も課題である。2 次元検出器のあらゆる面が回折中心に焦点を結ぶ必要がある。それを実現するスリット技術が未確立であった。本研究ではそれを解決するために、相似形の二つの回転スリットを組み合わせることで焦点を作ることができ、そのスリットを開発し、さらに改良型を作製した(図 6)。

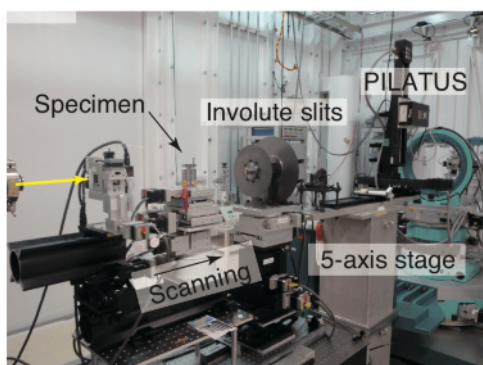


図 6 回転スリットと PILATUS による測定

第二は、回転スリットによるゲージ体積と粗大粒とが互いに影響すると、結晶粒の回折中心とゲージ体積の中心(回折計中心)が一致しない。そのため正確な応力測定が困難であった。これを解決するために、回転スリットと計数型 2 次元検出器 PILATUS を組み合わせ、各回折スポットの回折強度の変化を追跡しながら結晶粒の回折中心と、ゲージ体積の回折中心が一致する位置を特定する解析法を提案した、この方法を回折スポット追跡法 (DST 法) とした。

これらを組み合わせた技術を実証する実験も行い、その成果について、ハンプルクで開催された国際会議 MECASENS-VI にて招待講演を行った(学会発表参照)。

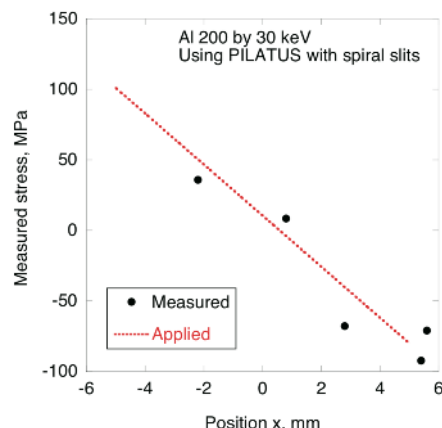


図 7 回折スポット追跡法による応力測定

謝辞 本研究に関係する放射光実験は、高輝度光科学研究センターによる課題

2007A1108

2007B1646

2008A1766

2009B1810

の援助を受けた。同様に、日本原子力研究開発機構施設共用研究課題

2008A-E12

2008B-E15

2009A-E06

2009B-E15

2010A-E04

2010B-E10

2011A-E15

による実験によるものである。以上、記して感謝の意を表します。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

1. 鈴木賢治, 田邊裕治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレス鋼の高ひずみ速度による微視的残留応力 (査読有), 保全学, Vol.10, No. 1, (2011), pp. 57-63.
2. K. Suzuki and T. Shobu, Residual stresses in austenitic stainless steel due to high strain rate (査読有), Materials Science Forum, Vol. 681, (2011), pp. 278-283.
3. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレス鋼の塑性変形による微視的残留応力 (査読有), 保全学, Vol. 9, No. 2, (2010), pp. 39-44.
4. K. Suzuki and T. Shobu, Residual

micro-stress of austenitic stainless steel due to tensile deformation (査読有), Materials Science Forum, Vol. 652, (2010), pp. 7-12.

[学会発表](計12件)

1. 山岸 葵, 鈴木賢治, 西川 聡, 異種材溶接継ぎ手の残留応力シミュレーション, 日本保全学会第8回学術講演会, 2011/10/21, 東京.
2. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 豊川秀訓, 2次元検出器による内部ひずみ評価法の研究, 日本保全学会第8回学術講演会, 2011/10/21, 東京.
3. K. Suzuki, T. Shobu, A. Shiro and H. Toyokawa, Evaluation of Internal Stresses using 2D-Detector, 6th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation "MECASSENS-VI", 2011/9/7-9, Hamburg, Germany.
4. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 豊川秀訓, 2次元検出器による内部応力評価法, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2011/7/16-18, 北九州市.
5. 鈴木 賢治, 菖蒲 敬久, 高ひずみ速度による微視的残留応力, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2010/10/9-11, 長岡市.
6. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレス鋼の高速塑性による微視的残留応力, 第44回X線材料強度に関するシンポジウム, 2010/7/8-9, 京都.
7. K. Suzuki and T. Shobu, Residual stresses in austenitic stainless steel due to high strain rate, The 8th European Conference on Residual Stresses "ECRS-8", 2010/6/26-28, Riva del Garda, Italy.
8. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレス鋼の高ひずみ速度による微視的残留応力, 日本保全学会第7回学術講演会, 2010/7/13-15, 静岡県御前崎市.
9. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレス鋼の高速塑性による微視的残留応力, 第44回X線材料強度に関するシンポジウム, 2010/7/8-9, 京都.
10. K. Suzuki and T. Shobu, Residual micro-stress of austenitic stainless steel due to tensile deformation, 5th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation "MECASSENS-V", 2009/11/10, Mito, Japan.
11. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレスの弾性異方性と微視的残留応力,

- 日本保全学会第6回学術講演会, 2009/8/3-5, 札幌市.
12. 鈴木賢治, 菖蒲敬久, オーステナイト系ステンレスの塑性変形による微視的残留応力, 日本材料学会第58期学術講演会, 2009/5/24, 松山市.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 粗大粒を有した材料の内部応力の測定方法

発明者: 鈴木賢治, 菖蒲敬久

権利者: 新潟大学, 日本原子力研究開発機構

種類: 特許

番号: 特願 2011-030434 (P0130SIN10)

出願年月日: 2011年2月日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

Kröner モデルによる立方晶の回折弾性定数計算サーバー

[http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner\\_model/kroner\\_c.html](http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner_model/kroner_c.html)

Kröner モデルによる六方晶の回折弾性定数計算サーバー

[http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner\\_model/kroner\\_h.html](http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner_model/kroner_h.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 賢治 (SUZUKI KENJI)

新潟大学・人文社会・教育科学系・教授

研究者番号: 30154537

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし