

微細粒圧延鋼および溶接構造用圧延鋼 における有向性加工層の残留応力

生水 雅之¹・後藤 昌英²・広瀬 幸雄³

要旨：本研究においては、結晶粒微細化熱延鋼板およびその鋼材開発の際ベース材となった溶接構造用圧延鋼板の両材に着目し、有向性加工後の残留応力をX線応力測定法により測定した。特に表層の残留応力が、研削加工およびエメリー紙による研磨加工によってどのような変化を示すか、三軸応力解析に基づき調査検討を行った。その結果、研削加工およびエメリー紙による研磨加工のいずれにおいても、加工方向の直角方向には ϕ スプリットが見られなかったが、それ以外の方向では ϕ スプリットが見られ、有向性加工層の存在が確認できた。

キーワード：微細粒圧延鋼，有向性加工層，三軸応力解析，残留応力，X線応力測定法， ϕ スプリット

1. はじめに

結晶粒微細化熱延鋼板は、大圧下率圧延・強冷却を連続して行い、フェライト粒径を微細化することにより、これまでの熱延鋼板の高強度化および長寿命化を図った鉄鋼材料である¹⁾。この材料に関する研究開発国家プロジェクトは超鉄鋼として知られており、現在土木・建築分野で次世代の構造材としての実用化が検討されている。超鉄鋼の特徴は高い弾性強度にある。ヤング率は一般の鋼材と同じであるため、高い弾性強度を生かそうとすると材料に生じるひずみが大きくなり、構造物全体の撓みが大きくなるのが考えられる²⁾。構造材料においては外部負荷による作用応力や様々な加工によって生じる残留応力の評価は不可欠であり、X線等を用いた非破壊的応力測定法は重要である^{3)~6)}。

本研究においては、結晶粒微細化熱延鋼板およびその鋼材開発の際ベース材となった溶接構造用圧延鋼板の両材に着目し、有向性加工後の残留応力をX線応力測定法⁷⁾により測定し、表面および表層にどのような残留応力が形成され、加工条件によってどのような変化を示すか調査を行った。有向性加工の方法としては、研削加工およびエメリー紙による研磨加工を行った。すなわち、本研究で用いる二種類の鋼材の化学組成はほぼ同一であるが、結晶粒径の大きさが互いに異なることから、有向性加工に伴う加工層の微視的残留応力分布は異なることが予想される。そこでこのような加工層に対して、三軸応力解析を実施し、加工方法と被加工材結晶粒径の ϕ スプリット挙動^{8),9)}に及ぼす影響について、基礎的知

見を得ることを目的とした。

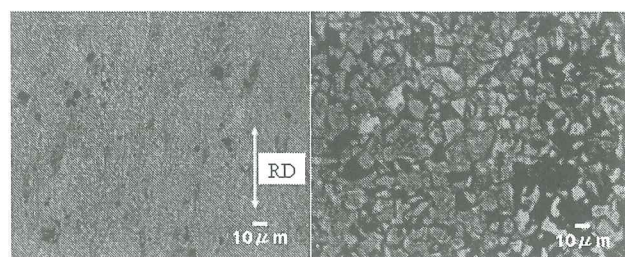
2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材には、市販の溶接構造用圧延鋼板(JIS: SM490A)およびSM490Aの結晶粒微細化相当材である微細粒熱延鋼板(NFG600W)を用いた。Fig.1(a)および(b)にNFG600WおよびSM490Aの組織写真を示す。NFG600Wにおいてフェライト粒径の微細化が見られる。なお、図中RDはNFG600Wの圧延方向を示している。供試材の化学組成および機械的性質をTable I, IIに示す。ここで、Table IIのR, Tはそれぞれ試験片採取が圧延方向、板幅方向であることを示している。試験片は両材とも入手材(300×300×12mm)より切断後、フライス加工および研削加工を行い、長さ60×幅10×厚さ5(mm)の形状に整えた。そして最後に初期残留応力を零とするため、電解研磨により試験片表層を0.1mm以上除去し、実験に供した。

2.2 研削加工およびエメリー研磨加工条件

有向性加工の方法として、両材とも研削加工およびエメリー紙による研磨加工を行った。その際、試験片の長手方向と圧延方向は一致させた。研削加工の模式図および条件をFig.2およびTable IIIに示す。研



(a) NFG600W

(b) SM490A

Fig.1 Microstructures of NFG600W and SM490A.

- 1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 教授
- 2 金沢大学ベンチャービジネスラボラトリ 准教授
- 3 金沢大学大学院自然科学研究科 特任教授

Table I Chemical compositions (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S
NFG600W	0.17	0.36	1.30	0.011	0.007
SM490A	0.16	0.25	1.60	0.018	0.005

Table II Mechanical properties.

	σ_Y (MPa)	σ_B (MPa)	ϵ_1 (%)	HV
NFG600W/R	422	555	26	183
NFG600W/T	406	550	28	193
SM490A	341	500	29	166

削加工は前節2.1の電解研磨材を平面研削盤に取付け、切込み量 $5\mu\text{m}$ で乾式・往復加工を施しスパークアウトさせた。一方エメリー研磨加工は、研削加工同様に電解研磨材を基準に#1000の研磨紙にて、Fig.3に示す $\phi=180^\circ$ の方向に50回、一方向乾式研磨を行った。

2.3 X線三軸応力測定

研削加工のような有向性加工を行った際、せん断応力に起因して ψ の正負によりひずみの分布が異なる ψ スプリットが生じる^{8),9)}。この際の応力解析法としてDölle-Hauk法¹⁰⁾を適用した。

Fig.3のように試料座標系および実験座標系を設定し、 ϕ, ψ を方向余弦とする。X線回折実験により測定される格子ひずみ(X線ひずみ)を $\epsilon_{\phi\psi}$ 、応力を σ_{ij} とすると両者はX線の弾性定数 $s_1, s_2/2$ を用いて次式

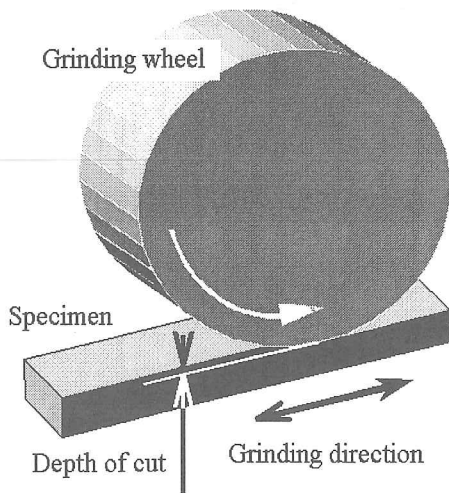


Fig.2 Schematic illustration of grinding.

Table III Grinding conditions.

Grinding wheel	180×13UW60KV58
Grinding width	13 mm/pass
Wheel revolution speed	3460 rpm
Table speed	170 mm/sec
Depth of cut	0 (spark-out)

で表すことができる。

$$e_{\phi\psi} = \frac{s_2}{2}(s_{11}\cos^2\phi + s_{12}\sin 2\phi + s_{22}\sin^2\phi)\sin^2\psi + \frac{s_2}{2}s_{33}\cos^2\psi + s_1(s_{11} + s_{22} + s_{33}) + \frac{s_2}{2}(s_{13}\cos\phi + s_{23}\sin\phi)\sin 2\psi \quad (1)$$

式(1)より応力を求めることになるが、本法ではX線ひずみから求められる次式の a_1, a_2 を用いる。

$$a_1 \equiv \frac{1}{2}(e_{\phi\psi>0} + e_{\phi\psi<0}), \quad a_2 \equiv \frac{1}{2}(e_{\phi\psi>0} - e_{\phi\psi<0}) \quad (2)$$

ここで、 $\psi > 0$ のときのX線ひずみを $\epsilon_{\phi\psi>0}$ 、また $\psi < 0$ のときのそれを $\epsilon_{\phi\psi<0}$ で表す。式(2)より次式が得られる。

$$a_1 = \frac{s_2}{2}(s_{11}\cos^2\phi + s_{12}\sin 2\phi + s_{22}\sin^2\phi - s_{33})\sin^2\psi + \frac{s_2}{2}s_{33} + s_1(s_{11} + s_{22} + s_{33}) \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{s_2}{2}(s_{13}\cos\phi + s_{23}\sin\phi)\sin 2\psi \quad (4)$$

式(3)より、 a_1 は $\sin^2\psi$ に対して直線関係を示すのでその傾きから応力が求められる。 $\phi=0^\circ$ のデータより $s_{11}-s_{33}$ 、 $\phi=90^\circ$ より $s_{22}-s_{33}$ が得られる。またこの結果と $\phi=45^\circ$ より s_{12} が得られる。個々の垂直成分を分離するには $a_1-\sin^2\psi$ 線図の切片より s_{33} を求めればよい。一方、 a_2 は式(4)より $\sin 2\psi$ に対して直線関係を示し、その傾きを用いると $\phi=0^\circ$ のとき s_{13} 、また $\phi=90^\circ$ のとき s_{23} がそれぞれ求められる。

2.4 X線応力測定

X線応力測定は、平行ビーム式のX線応力測定専用機(理学MSF-3M)を使用し、TableIVのX線回折条件で行った。X線応力測定の回折ピーク位置は半価幅中点法により決定した。また、三軸応力解析の際

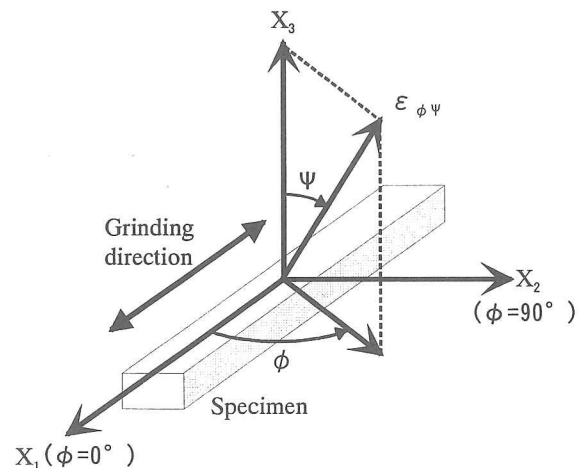


Fig.3 Relation between specimen and azimuth ϕ, ψ .

TableIV Conditions of X-ray diffraction

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	Fe 221
Filter	V foil
Tube voltage	30 kv
Tube current	10 mA
X-ray irradiated area	6×4mm ²
X-ray fixed time	3 sec
Peak determination	Half value breadth method
Scanning method	Side inclination method

に必要な無ひずみ時の回折角は、X線応力測定法標準⁽¹¹⁾の文献値を採用した。

3. 実験結果および考察

3.1 エメリー研磨加工表面の三軸応力解析

Fig.4, 5にSM490A材およびNFG600W材に対して、エメリー研磨による有向性加工を行った際の $2\theta - \sin^2\psi$ 線図を示す。両図とも(a) $\phi=0, 180^\circ$ および(b) $\phi=45, 225^\circ$ のそれぞれの間には、僅かに ϕ スプリットが認められる。しかし、エメリー研磨方向と直角方向 $\phi=90, 270^\circ$ においては、両図とも ϕ スプリットは見られず一致していることが認められる。また、両図を相互に比較するといずれも Fig.4 より Fig.5の方が若干湾曲していることがわかる。そこで、2.3節に述べた $a_1 - \sin^2\psi$ および $a_2 - \sin^2\psi$ 線図を求めそれらの直線の勾配から、各残留応力成分を算出し

た。SM490A材の三軸応力解析結果を式(5)に、同様にしてNFG600W材の結果を式(6)に示す。

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -275.9 & 15.5 & 9.6 \\ 15.5 & -290.7 & -0.7 \\ 9.6 & -0.7 & -17.4 \end{pmatrix} \text{MPa} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -295.2 & 21.5 & 8.7 \\ 21.5 & -316.5 & -0.1 \\ 8.7 & -0.1 & -54.5 \end{pmatrix} \text{MPa} \quad (6)$$

いずれの材料においても僅かな σ_{31} は存在するものの σ_{23} はほぼ零である。また σ_{11}, σ_{22} はともに表面では圧縮を示しており、表面下に急激な正の応力勾配を有する応力状態が形成されていることが考えられる。本結果で特徴的なことは、NFG600W材の σ_{33} はSM490材のそれと比較して約3倍の圧縮応力値を示していることである。

3.2 研削加工表面の三軸応力解析

Fig.6, 7にSM490A材およびNFG600W材に対して、研削(スパークアウト)による有向性加工を行った際の $2\theta - \sin^2\psi$ 線図を示す。両図とも(a) $\phi=0, 180^\circ$ および(b) $\phi=45, 225^\circ$ のそれぞれの間には、前節のエメリー研磨の結果と比較して明瞭な ϕ スプリットが認められ、その幅も大きくなっていることがわかる。しかし、研削方向と直角方向 $\phi=90, 270^\circ$ においては、両図とも僅かに上に凸の湾曲は見られるものの ϕ ス

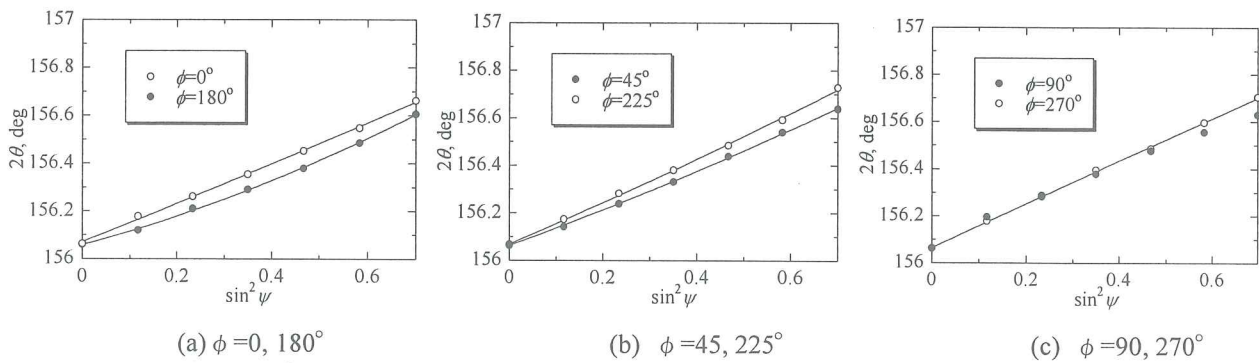


Fig.4 $2\theta - \sin^2\psi$ diagrams obtained from uni-directional emery polished surface of SM490A.

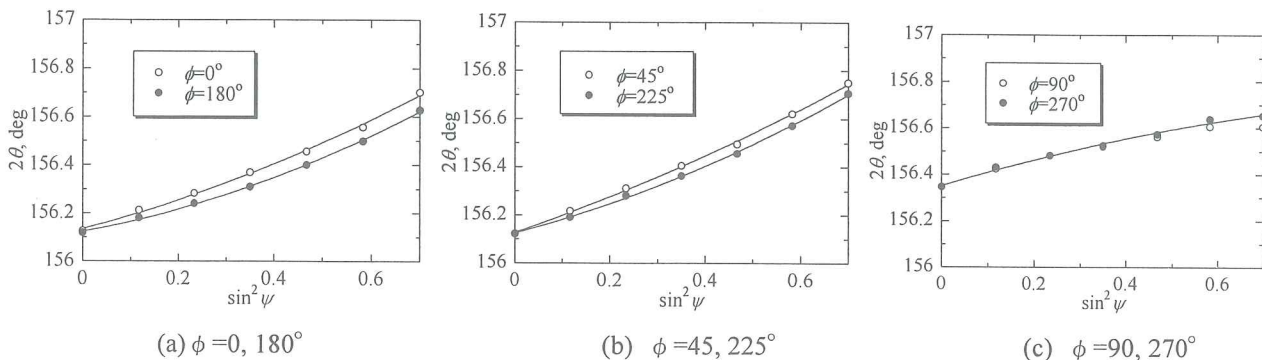


Fig.5 $2\theta - \sin^2\psi$ diagrams obtained from uni-directional emery polished surface of NFG600W.

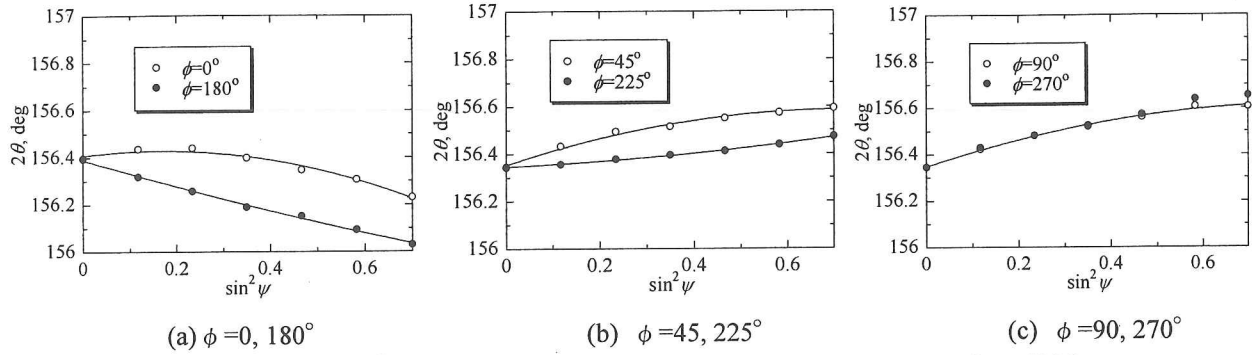


Fig.6 $2\theta - \sin^2\psi$ diagrams obtained from spark-out ground surface of SM490A.

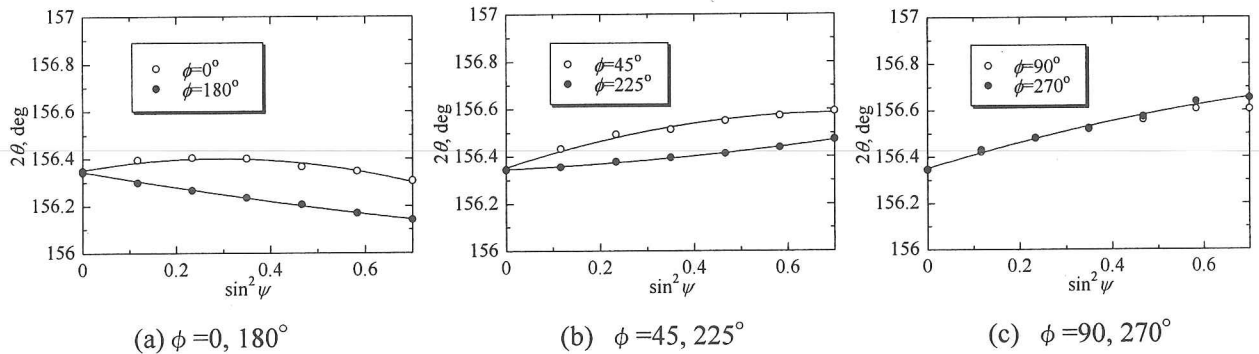


Fig.7 $2\theta - \sin^2\psi$ diagrams obtained from spark-out ground surface of NFG600W.

プリットは見られない。そこで、前節同様に $a_1 - \sin^2\psi$ および $a_2 - \sin 2\psi$ 線図を求め、それらの直線の勾配から各残留応力成分を算出した。SM490A 材の三軸応力解析結果を式(7)に、同様にして NFG600W 材の結果を式(8)に示す。

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 150.5 & 46.8 & -34.2 \\ 46.8 & -57.3 & 0.4 \\ -34.2 & 0.4 & 26.8 \end{pmatrix} \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 64.3 & 45.7 & -29.2 \\ 45.7 & -123.3 & -0.4 \\ -29.2 & -0.4 & 6.0 \end{pmatrix} \text{ MPa} \quad (8)$$

いずれの材料においても σ_{23} はほぼ零であるが、 σ_{31} は圧縮であり無視できない残留せん断応力が存在している。また σ_{11} , σ_{33} はともにエメリー研磨の結果と異なり、表面では引張を示しておりその大きさは SM490A 材より NFG600W 材で減少する傾向にある。しかし、 σ_{22} は σ_{11} , σ_{33} と異なり圧縮を示し、その大きさは SM490 材より NFG600W 材で増加する傾向にある。

4. 結言

本研究では、結晶粒微細化熱延鋼板および溶接構造用圧延鋼板の両材に着目し、エメリー紙による研磨加工および研削加工による有向性加工後の残留応

力を X 線応力測定法により測定し、三軸応力解析を行った。得られた結果は次のようにまとめられる。

- (1) エメリー研磨加工を施した場合、SM490A 材および NFG600W のいずれにおいても、 $\phi = 0, 180^\circ$ および $\phi = 45, 225^\circ$ の方向に僅かな ϕ スプリットが認められたが、加工と直角方向 $\phi = 90, 270^\circ$ には ϕ スプリットは認められなかった。また σ_{11} , σ_{22} はともに圧縮を示しており、表面下に急激な正の勾配を有する応力状態が考えられた。
- (2) 研削加工を施した場合、いずれの材料も $\phi = 0, 180^\circ$ および $\phi = 45, 225^\circ$ の方向に明瞭な ϕ スプリットが認められたが、加工と直角方向 $\phi = 90, 270^\circ$ には ϕ スプリットは認められなかった。また σ_{11} , σ_{33} はともに引張を示し、その大きさは SM490A 材より NFG600W 材で減少する傾向にあった。しかし、 σ_{22} は圧縮を示しその大きさは SM490A 材より NFG600W 材で増加する傾向にあった。

謝辞：本研究の一部は、平成 19 年度舞鶴工業高等専門学校機械工学科研究経費の配分を受けて行われたことを記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 長井寿, 松岡三郎: 材料, 48-7, pp.723-732, 1999.
- 2) 超鉄鋼材料を活用した新構造に関わる課題の抽出調査報告書, (社)日本鋼構造協会技術・標準委員会, 超鉄鋼利用技術検討小委員会, p11, p56, 2003.
- 3) 秋庭義明, 木村英彦, 田中啓介: 材料, 53-7, pp.752-757,

- 2004.
- 4) 廣瀬元, 佐々木敏彦: 材料, 48-7, pp.692-698, 1999.
- 5) 田中啓介, 峰典明, 鈴木賢治: 材料, 39-444, pp.1235-1246, 1990.
- 6) 榊原隆之, 佐藤嘉洋: 材料, 53-7, pp.746-751, 2004.
- 7) 日本材料学会編: X線応力測定法, p51, 養賢堂 1981.
- 8) 英崇夫, 藤原晴夫: 材料, 30-338, pp.1095-1101, 1981.
- 9) 英崇夫, 藤原晴夫: 材料, 31-342, pp.227-233, 1982.
- 10) H.Döller und V.Hauk: Härtereit-Tech. Mitt. 31, 165-168, 12, 489, 1979.
- 11) 日本材料学会 X線材料強度部門委員会: X線応力測定法標準一鉄鋼編一, p31, 日本材料学会, 2002.
- (2007. 11. 9 受付)

**RESIDUAL STRESS IN UNI-DIRECTIONALLY DEFORMED
SURFACE LAYER ON FINE GRAIN STEEL AT NEW HOT STRIP MILL
AND ROLLED STEEL FOR WELDED STRUCTURE**

Masayuki SHOZU, Masahide GOTOH and Yukio HIROSE

ABSTRACT : In this study, focusing on the fine-grain steel at new hot strip mills and rolled steel for welded structures, which is used as a base material in developing the former, the residual stress after unidirectional deformation was measured by X-ray stress measurement. In particular, changes in the residual stress at the surface layer, owing to grinding and polishing using emery paper, were examined based on a triaxial stress analysis. The results reveal that no ϕ -split can be found in the direction perpendicular to the processing direction in the specimens after grinding and polishing using emery paper, whereas a ϕ -split can be found in other directions, indicating the presence of a unidirectionally deformed surface layer.

Key Words : *Fine-grain steel, Uni-directionally deformed surface layer, Triaxial stress analysis, Residual stress, X-ray stress measurement, ϕ -split*