

技術論文

燃料部品用高純フェライト系ステンレス棒線の開発と利用加工技術

Development of High Purity Ferritic Stainless Steel Bar Wire for Fuel Components and Processing Technology

山先祥太*
Shota YAMASAKI

東城雅之
Masayuki TOHJO

高野光司
Kohji TAKANO

森田博樹
Hiroki MORITA

吉澤明展
Akinori YOSHIZAWA

山根康嗣
Kohji YAMANE

日笠裕也
Yuya HIKASA

抄 録

ガソリンエンジンの高効率化を背景に直噴ガソリンエンジンの適用が広がり、当該部品を構成する高圧燃料ポンプやインジェクタに好適な高純フェライト系ステンレス太径棒線の品質・信頼性の重要性は高まると考えられる。本研究では高純フェライト系ステンレス鋼NSSC180太径棒線の品質向上と高機能化について検討した。粗大粒組織が超音波探傷性能を阻害するため、組織の細粒化が必要であり、傾斜圧延を用いた大ひずみ加工により再結晶を促進させ細粒化が認められ、超音波探傷性能と靱性が向上する。また、適切な鍛造温度での成形により、高強度化や磁気焼鈍省略での優れた軟磁性特性が得られる。これにより、燃料部品の高品質・信頼性向上が期待される。

Abstract

With the spread of direct injection gasoline engines against a background of higher efficiency, the importance of the quality and reliability of the high purity ferritic stainless steel thick bar, which is suitable for the high-pressure fuel pumps and injectors that make up these components, is expected to increase. In this study, the quality and functionality of NSSC180 thick bar wire made of high purity ferritic stainless steel were investigated. Coarse grain structure hinders ultrasonic testing performance, so it is necessary to reduce the grain size, and large-strain working using gradient rolling accelerates recrystallization and reduces grain size, improving ultrasonic testing performance and toughness. In addition, forming at appropriate forging temperatures results in high strength and excellent soft magnetic properties with the omission of magnetic annealing. This is expected to improve the high quality and reliability of fuel components.

1. 緒 言

近年、電気自動車などの市場導入が活発化しているが、今後も大半は内燃機関を搭載するものと予想され^{1,3)}、ガソリンエンジンの高効率化が検討されている³⁾。ガソリン自動車では環境規制や低燃費化を目的に燃焼効率化を狙い燃料の高圧化が図られ、直噴ガソリンエンジンが主流と考えられている⁴⁾。直噴ガソリンエンジンは高圧燃料ポンプやインジェクタなどの部品で構成され⁵⁾、ステンレス太径棒線が多く適用されている。高圧燃料ポンプやインジェクタは多数の部品の溶接によって構成され^{6,7)}、燃料の高圧化^{8,9)}に伴い材料への信頼性(耐食性や強度等)は高まるものと考えられる。また、インジェクタの磁路構成回路では、精

密な燃料噴射に対し電磁弁を用いた電子回路で制御しており、磁路構成部の材料には軟磁性であることが求められる¹⁰⁾。

高純フェライト系ステンレス鋼は優れた耐食性や耐熱性、耐酸化性等を示すため、厨房機器や自動車用排気系部品として幅広く用いられている¹¹⁻¹³⁾。また、高純フェライト系ステンレス鋼は溶接部の耐食性に優れ軟磁性等を有するため¹⁴⁾、前述の燃料系部品用途へ好適と考えられる。高純フェライト系ステンレス鋼のNSSC180は19Crをベースに加工性を向上させるために極低(C+N)化し、鋭敏化による耐粒界腐食性を確保するためNbを適切に添加した材料である。日本製鉄(株)はこれまで高純フェライト系ステンレス棒線の細径用途のネジやボルト、溶接材料、金網等の開発

* 山口技術研究部 ステンレス製鋼・鋼材研究室 厚板・棒線研究課長 山口県光市大字島田3434 〒743-8550

を行っている¹⁴⁾。

一方、自動車燃料部品等の品質厳格用途への高品質化には、材料の内質欠陥等を検出する超音波探傷試験での検出精度や靱性の向上が考えられる。後述の通り、高純フェライト系ステンレス太径棒線では、粗大粒組織に起因し、超音波探傷性能や靱性が課題になると考えられる。当該部品の製造には、棒線の鍛造や溶接、熱処理等が施され¹⁵⁾、高強度、耐食性や磁気特性等の機能を満たす適切な利用加工技術を選定する必要がある。また、環境負荷低減の観点からこれらの利用加工技術への工程省略も好ましいと考えられる。

本研究では、燃料部品用高純フェライト系ステンレス太径棒線の棒線製造から利用加工技術を含めた一貫製造工程での高品質化（超音波探傷性能の向上、高靱性）と高機能化（高強度、耐食性、磁気特性等）に関する取り組みを報告する。

2. 太径棒線の熱延組織制御による高品質化

2.1 高純フェライト系ステンレス太径棒線の品質性能とマイクロ組織

先述の通り鋼材の高品質化には、材料の内部欠陥等を検出する超音波探傷試験での検出精度や靱性の向上が考えられる。図1に棒状鋼材の欠陥模式図を示す。鋼材には表面欠陥に加え、キャビティや介在物等といった内部欠陥を含む場合があり^{16,17)}、内部欠陥について工業的には超音波探傷試験によって保証されている¹⁸⁻²⁰⁾。

図2に超音波探傷試験による内部欠陥検出の模式図を示す。棒状鋼材に探触子をあて鋼材内に超音波を入射し、内部欠陥などがあると、超音波が反射することで、内部欠陥信号(S)を得て、内部欠陥を特定できる。しかし、後述のように鋼材内部に粗大粒組織が存在すると内部欠陥起因でないノイズ信号(N)が発生し、超音波が減衰することで内部欠陥信号が低くなり、内部欠陥信号の検出が困難となるため、超音波探傷試験での精度向上にはS/N比を高める必要がある。

図3にNSSC180太径棒線のマイクロ組織を示す。高純フェライト系ステンレス太径棒線では未再結晶による粗大粒組織を示す場合があり、粗大粒組織に起因し超音波探傷性能を阻害することがある。

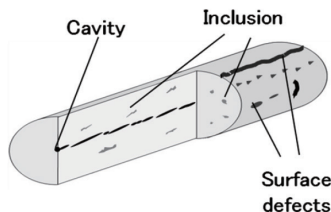


図1 棒状鋼材の欠陥模式図
Schematic diagram of defects in bar steel

表1にNSSC180の代表的な化学成分を示す。高純フェライト系ステンレス鋼ではフェライトフォーマーのCrが高く、安定化元素のNbにてオーステナイトフォーマーのC、Nを固定する。そのため、凝固から室温までフェライト単相組織でありフェライト(α) / オーステナイト(γ)間の変態がなく、凝固時の粗大粒が残留するものと考えられる。

超音波探傷試験による音圧 P_x は初期音圧 P_0 と任意場所 x と減衰係数 α から式(1)のように構成され、減衰係数が大きくなると任意位置 x での音圧が小さくなると考えられる^{21,22)}。減衰係数 α について超音波の波長 λ と結晶粒径 d の関係からいくつかの式が提案され^{21,22)}、式(2)、(3)のRayleigh散乱やStochastic散乱によると粗大粒は減衰係数を大きくすると考えられる。これは、入射超音波に対し、

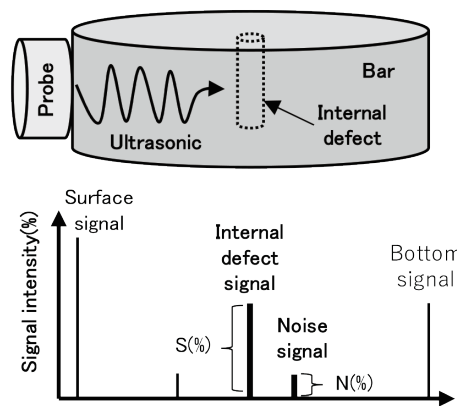


図2 超音波探傷試験による内部欠陥検出の模式図
Schematic diagram of internal defect detection by ultrasonic testing

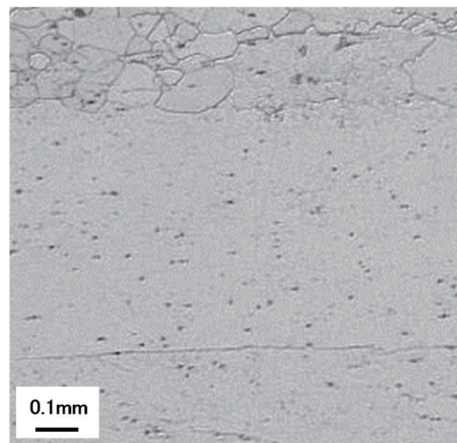


図3 高純フェライト系ステンレス太径棒線NSSC180の粗大粒組織
Coarse-grained microstructure of high purity ferritic stainless steel thick bar wire NSSC180

表1 NSSC180の代表的な化学成分
Typical chemical compositions of NSSC180

(mass%)						
C	Si	Mn	Cr	Cu	Nb	N
0.01	0.30	0.3	19.1	0.3	0.5	0.01

粗大粒の結晶粒界による超音波の散乱が生じ、超音波が減衰するものと考えられている。フェライト鋼およびオーステナイト鋼を用いた超音波探傷試験での減衰係数に及ぼす結晶粒径の影響によると²³⁾、結晶粒径の粗大化は減衰係数を大きくし、超音波探傷性能を阻害するものと実験的にも認められている。したがって、素材側の超音波探傷性能の向上アプローチとして結晶粒径の細粒化が考えられる。

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

$\lambda \gg d$ のとき、(Rayleigh 散乱)

$$\alpha = Ad^3 \cdot f^4 \quad (2)$$

$\lambda \approx d$ のとき、(Stochastic 散乱)

$$\alpha = Bd \cdot f^2 \quad (3)$$

太径棒線では二次加工での矯正²⁴⁾等の取り扱い時に衝撃が加わることが想定され、鋼材の靱性確保も課題になると考えられる。従来知見によると靱性に関する延性脆性遷移温度 (DBTT) は結晶粒径依存性を示し、粗大粒ほど DBTT を高め脆性的な挙動をするものと知られている²⁵⁾。これは脆性破壊応力が結晶粒径依存性をもち、粗大粒にて脆性破壊応力を小さくし、材料の降伏応力が当該脆性破壊応力を超えるためと考えられている。鋼材の高靱性化のアプローチも組織の細粒化が有効と考えられる。

2.2 組織細粒化に向けたアプローチ方法

前節の通り高純フェライト系ステンレス太径棒線の品質性能に関する超音波探傷性能および靱性の向上には組織細粒化が有効と考えられる。先述のように高純フェライト系ステンレス鋼は凝固から室温までフェライト単相組織で変態がないため、凝固時の粗大粒を熱間圧延時に再結晶で細粒化させることが考えられる。高純フェライト系ステンレス鋼の熱間再結晶に関する $t_{0.5}$ (再結晶率が 50% となる熱処理時間) は式 (4) にて示される²⁶⁾。

$$t_{0.5} = 8.4 \times 10^{-11} \cdot d_0^1 \cdot \varepsilon^{-1.5} \cdot \dot{\varepsilon}^{-0.4} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

ここで、 d_0 : 加工前の結晶粒径、 ε : ひずみ、 $\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度、 Q : 再結晶の活性化エネルギー、 R : 気体定数、 T :

温度である。再結晶を促進させるための考え方として、初期粒径の細粒化やひずみ、ひずみ速度の増加等が考えられる。 α/γ 変態を示す 17Cr 系フェライト系ステンレス鋼では、熱間圧延温度の高温側から回復、再結晶、変形組織を示し²⁷⁾、再結晶組織を得るためには適正な熱間圧延温度の把握も必要と考えられる。

図 4 に山口製鉄所ステンレス棒線工場の工程を示す²⁸⁾。通常、棒線圧延に用いるビレットは大断面で出鋼後、分塊圧延を経て製造されるが、光棒線工場では傾斜圧延機 (High Reduction Mill) と保熱炉 (Holding Furnace) によるインライン分塊プロセスを経て直圧で棒線圧延を行うことが特徴である。傾斜圧延では、圧縮変形に加えせん断変形も付与することが可能であり、せん断変形的作用によって鋼材に大ひずみ加工を施すことができる^{28, 29)}。傾斜圧延での大ひずみ加工を含む熱延条件を適正化することで高純フェライト系ステンレス棒線の再結晶促進が期待される。

高純フェライト系ステンレス棒線 NSSC180 の再結晶挙動に及ぼす熱加工履歴の影響を調査した。初期粒径が約 1mm となる等軸組織について、熱間加工フォーマスタを用いて図 5 のような熱加工履歴を基本条件とし、ひずみ、ひずみ速度、温度、焼鈍時間を変化させ、鋼材中心部の圧縮方向の平均粒径を測定した。

図 6 に高純フェライト系ステンレス棒線 NSSC180 の平均粒径に及ぼす熱加工履歴の影響を示す。平均粒径は試験温度に対し極小値を示し、極小値の高温・低温側で粗大粒傾向を示す。高温側では早期に再結晶が完了し粒成長するため粗粒化し、低温側では粗大未再結晶粒の存在によって粗粒化するためと考えられる。ひずみの増大によっていづれの試験温度域も細粒傾向となる。ひずみの増大にて試験片中心部のひずみ、ひずみ速度が高くなり、再結晶の駆動力となるひずみが蓄積するため、再結晶の核の増加によって細粒化するものと考えられる。小片の熱間加工フォーマスタの結果より、ひずみおよびひずみ速度の増加、適正な加工温度の選定は細粒化に有効と考えられる。

細粒化には適正加工温度での大ひずみ加工が有効であ

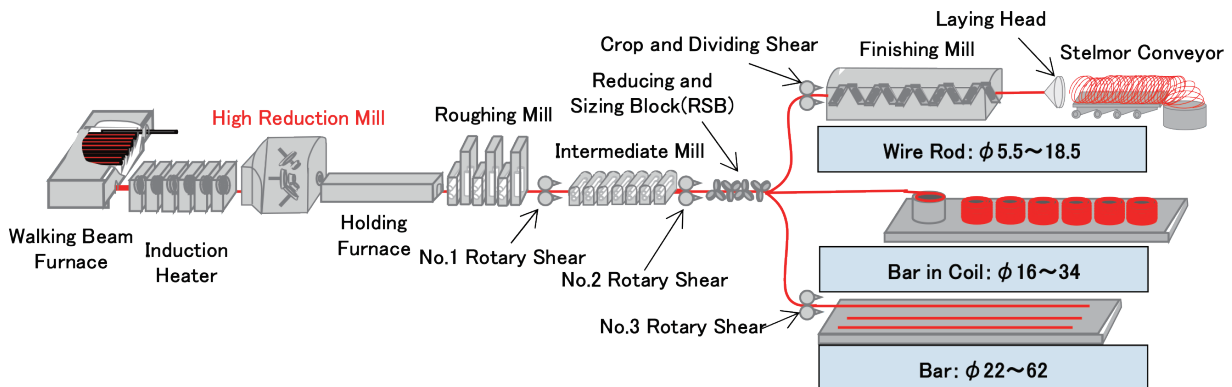


図 4 山口製鉄所ステンレス棒線工場の工程²⁸⁾
Processes at the stainless steel bar and wire rod plant at Yamaguchi Steel Works²⁸⁾

るため、3ロール式の傾斜圧延機^{30,31)}を用いてマイクロ組織に及ぼす傾斜圧延加工率の影響を調査した。初期粒径が約1mmとなる等軸組織を有すNSSC180丸棒試験片について、加熱・加工温度を固定し、傾斜圧延の加工率を2水準(低加工率, 高加工率)変化させ、3ロール式の傾斜圧延を行い、加工後に試験片を水冷した。試験片の縦断面中央を研磨、エッチングし組織観察を行った。

図7に高純フェライト系ステンレス棒線NSSC180の組織に及ぼす傾斜圧延加工率の影響を示す。傾斜圧延後の鋼材表層部では、再結晶組織を示し中心部に比べ細粒傾向にある。これは、傾斜圧延では、鋼材表層へ圧縮変形に加えせん断変形が付与され、大ひずみにより再結晶が促進されるためと考えられる。傾斜圧延加工率の増大に伴い、圧縮ならびにせん断変形的作用する領域が鋼材中心方向へ広がり、中心部でも再結晶が促進され細粒化する。傾斜圧延条件の適正化によって、粗圧延前に再結晶を促進させ、平均粒径を細粒化することで、粗圧延以降の再結晶を容易とし、太径棒線の細粒化が期待される。

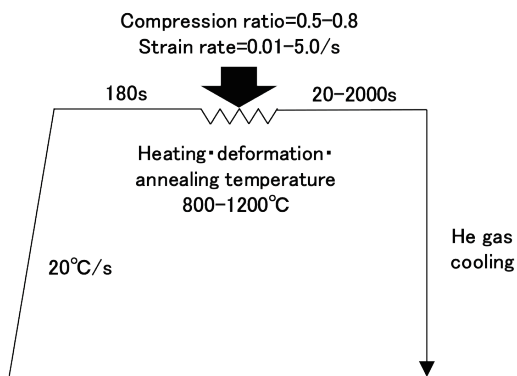


図5 熱加工履歴条件
Thermal processing history conditions

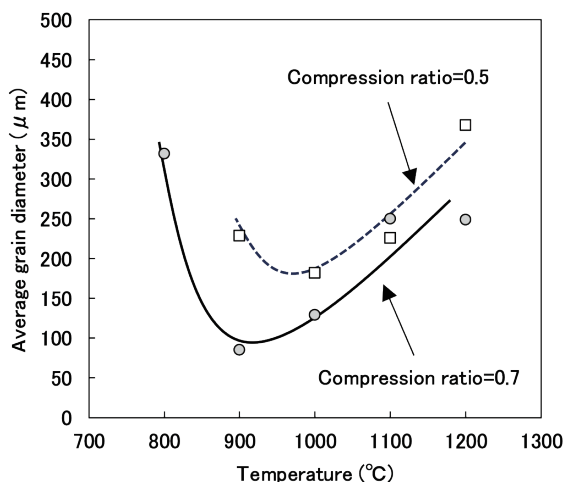


図6 高純フェライト系ステンレス棒線NSSC180の平均粒径に及ぼす熱加工履歴の影響
Effect of heat working history on the average grain size of NSSC180 high purity ferritic stainless steel bar wire

2.3 熱延組織制御材のマイクロ組織と品質性能

前述の知見をもとに適正熱延条件にて高純フェライト系ステンレス太径棒線を製造した。図8にNSSC180太径棒線の通常材および熱延組織制御材のマイクロ組織を示す。通常材では未再結晶組織に起因した粗大粒が認められるが、熱延組織制御材では再結晶組織を示し、組織の細粒化がみられる。

細粒化された熱延組織制御材の太径棒線について、高品質化の効果を確認するために、超音波探傷性能と靱性を評価した。超音波探傷性能について、太径棒線の半径方向中心部へ人工欠陥を圧延長手方向へドリル加工で導入し供試材を作製した。GE製ポータブルフェイズドアレイ超音波探傷機(5MHz, 直接接触, 垂直探傷)を用いて、供試材の人工欠陥の信号(S)とノイズ信号(N)のS/N比(dB)を調査し超音波探傷性能を評価した。図9にNSSC180太径棒線の通常材および熱延組織制御材の超音波探傷性能を示す。熱延組織制御材のS/N比は通常材の2倍以上(約

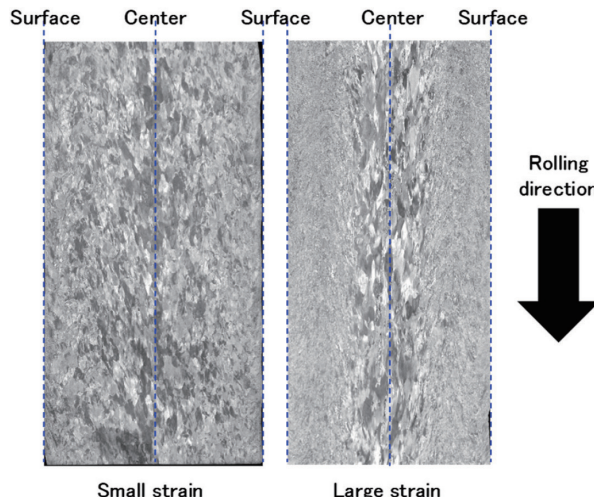


図7 高純フェライト系ステンレス棒線NSSC180の組織に及ぼす傾斜圧延加工率の影響
Effect of gradient rolling work rate on the microstructure of high purity ferritic stainless steel bar wire NSSC180

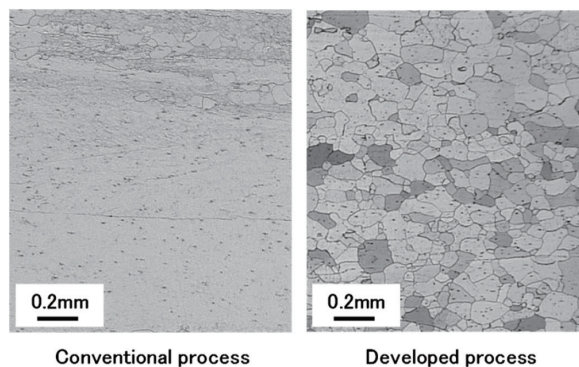


図8 NSSC180太径棒線の通常材および熱延組織制御材のマイクロ組織
Microstructure of normal and hot-rolled microstructure-controlled materials of NSSC180 thick bar wire

5dB 向上) であり、ノイズ信号の低減および人工欠陥信号の増加がみられ、人工欠陥の信号が明瞭であり、超音波探傷性能の向上が認められる。これは、熱延組織制御材の細粒化に起因し、超音波の散乱・減衰が抑制され、S/N 比の向上につながるものと考えられる。

靱性について、太径棒線よりシャルピー衝撃試験片(フルサイズ、Uノッチ)を採取し、衝撃値を測定した。鋼材半径方向とノッチ底方向が一致するように加工している。また、試験温度を通常材の遷移温度との差分温度 = 試験温度 - 通常材の延性脆性遷移温度で整理した。図 10 に NSSC180 太径棒線の通常材および熱延組織制御材の靱性を示す。熱延組織制御材の遷移温度は通常材に比べ 100℃ 低く、遷移温度付近の温度幅が小さく、靱性に優れる。熱延組織制御材の細粒化によって、脆性破壊応力が通常材に比べ大きくなり、塑性変形しやすいため、熱延組織制御材

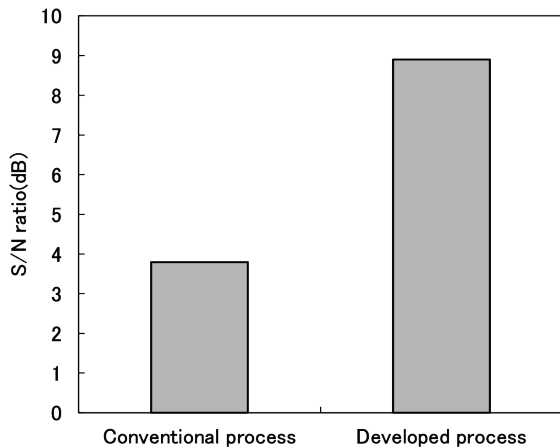


図 9 NSSC180 太径棒線の通常材および熱延組織制御材の超音波探傷性能

Ultrasonic flaw detection performance of normal and hot-rolled microstructure-controlled materials in NSSC180 thick bar wire

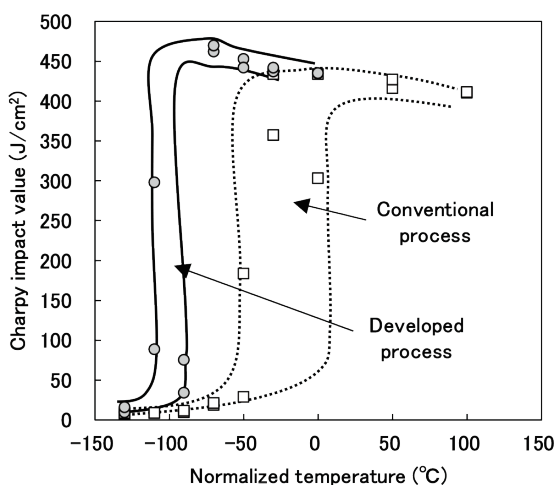


図 10 NSSC180 太径棒線の通常材および熱延組織制御材の靱性

Toughness of normal and hot-rolled microstructure-controlled materials of NSSC180 thick bar wire

の靱性は向上すると考えられる。

以上より高純フェライト系ステンレス太径棒線に熱延組織制御することで組織細粒化となり、超音波探傷性能および靱性が通常材に比べ向上し、太径棒線の高品質化が期待される。

3. 利用加工技術による高機能化

燃料部品の高圧燃料ポンプやインジェクタ等の製造には、棒線の鍛造や溶接、熱処理等が施され、各機能(高強度、耐食性や磁気特性等)に応じた適切な利用加工技術の選定が好ましい。本章では高純フェライト系ステンレス棒線の基礎特性、高強度用途と軟磁性用途の利用加工技術について述べる。

3.1 高純フェライト系ステンレス棒線の基礎特性

表 2 に各種ステンレス棒線の塩水噴霧試験評価結果を示す³²⁾。各種線材の #500 表面研磨仕上げでの塩水噴霧試験後の発錆状況を示し、NSSC180 棒線は Type430 に比べ大きく優れ、耐食性は Type304 に近い特性を示す。また、フェライト系ステンレス鋼は、Type304 等のオーステナイト系ステンレス鋼で問題となる耐応力腐食割れ性に対しても有利と考える³³⁾。

燃料部品では成形後に他部品との接合が必要になる。通常、接合は、ボルト締結、MIG・TIG 溶接、レーザー溶接等で行われる。自動車部品の場合、接合相手が高炭素系マルテンサイト系ステンレス鋼部品になるケースが多く、溶接の場合、フェライト系ステンレス鋼への炭素の流入による鋭敏化等の接合部の品質劣化が問題となることがあり、注意を要する。

0.6% C の高炭素系マルテンサイト系ステンレス鋼と NSSC180, Type430L (Ultra-lowC) をファイバーレーザー溶接したサンプルの改良ストラウス試験後の腐食状況を調査した。図 11 に Type430L および NSSC180 の耐食性に及ぼすレーザー溶接速度の影響を示す³²⁾。溶接速度が 4m/min と速い場合、いずれも接合部で粒界腐食は発生していないが、溶接速度が 2m/min, 1m/min と遅くなると Type430L では接合部で粒界腐食が認められる。一方、NSSC180 の接合部では粒界腐食は認められない。溶接速度が速い場合、

表 2 各種ステンレス棒線の塩水噴霧試験評価³²⁾
Salt spray test evaluation of various types of stainless steel bar wire³²⁾

	Superior ← Rust level → Inferior					
	A	B	C	D	E	F
NSSC180	■					
Type430			■	■	■	■
Type304	■					

Salt spray test: 5%NaCl, 35°C, 1000hr

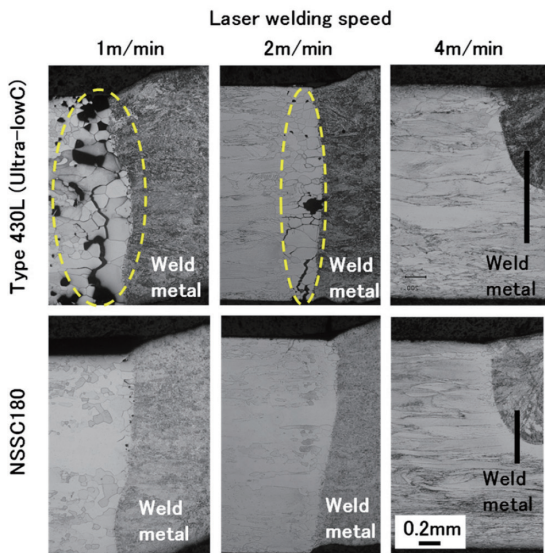


図 11 Type430L および NSSC180 の耐食性に及ぼすレーザー溶接速度の影響³²⁾

Effect of laser welding speed on the corrosion resistance of Type 430L and NSSC180³²⁾

溶接の入熱が低く、レーザー溶接部は急冷されるため鋭敏化が生じ難いが、溶接速度が遅くなると溶接の入熱が大きくなり、Nb 添加のない Type430L では鋭敏化が生じて粒界腐食が発生すると考える。NSSC180 は幅広いレーザー溶接速度で接合可能であり、レーザー溶接後の耐粒界腐食性にも優れると考えられ、部品全体の耐久性向上に有効と考える。

3.2 高強度用途および軟磁性用途の利用加工技術

燃料の高圧化において燃料部品の信頼性向上のために、溶接による部位を低減させた鍛造による部品一体化や高強度化が考えられる。鍛造加工は切削加工に比べ材料歩留まりに優れニアネット成形として有効である。一方、鍛造温度は金型寿命への負荷へ寄与する変形抵抗や材料の強度、寸法精度等を左右するため、適切な温度選定が必要とされる。そこで高純フェライト系ステンレス鋼 NSSC180 の圧縮変形抵抗に及ぼす圧縮温度の影響を調査した。NSSC180 棒線について、熱間加工フォーマスタを用いて RT~1100℃ に加熱の後、10/s での圧縮変形抵抗を測定し、圧縮試験後の鋼材中心部の HV 硬さを調査した。

図 12 に NSSC180 棒線の圧縮変形抵抗に及ぼす圧縮温度の影響を示す³²⁾。600℃ の温間圧縮で変形抵抗は常温の約半分になり、1000℃ の熱間圧縮で変形抵抗は常温の約 1/10 となり、温熱間鍛造にて複雑形状部品の成形性へ寄与するものと予想される。また、600℃ での温間圧縮後の HV 硬さは約 260 前後であり、固溶化熱処理材の HV 硬さ(約 160) に比べ高硬度化する。温間圧縮では回復が抑制され加工硬化が増大することで、転位密度が増加し、高硬度化するものと推定され、温間圧縮の適用による高強度化が期

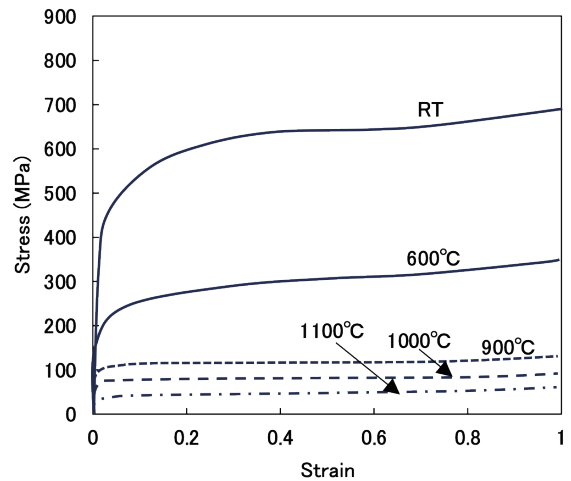


図 12 NSSC180 棒線の圧縮変形抵抗に及ぼす圧縮温度の影響³²⁾

Effect of compressive temperature on the compressive deformation resistance of NSSC180 bar wire³²⁾

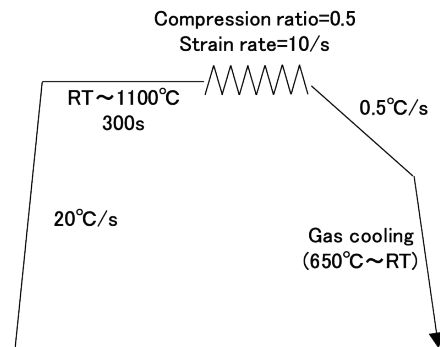


図 13 温熱間圧縮加工履歴
Warm compression process history

待される。

次いで、インジェクタの磁路構成回路域では、材料に軟磁性であることが求められ、磁気焼鈍を施された電磁ステンレス鋼が主に適用されている。磁気焼鈍は高温長時間の真空熱処理であり、鋼材のひずみの低減や結晶粒粗大化させることで軟磁性の特性を向上させる。インジェクタ部品では切削や冷間鍛造にて製造されることが多いが、熱間鍛造時の熱を活用しひずみ低減を行うことで、磁気焼鈍の工程省略が期待される。ここでは高純フェライト系ステンレス棒線 NSSC180 の軟磁性特性に及ぼす温熱間圧縮の影響を調査した。図 13 に温熱間圧縮加工履歴を示す。NSSC180 棒線から $\phi 12 \times 20$ mm の試験片を採取し、熱間加工フォーマスタを用いて、供試材を RT~1100℃ × 300s に加熱した後、ひずみ = 0.5、ひずみ速度 = 10/s にて圧縮した後、0.5°C/s で 650℃ まで放冷相当の冷却をした後、650℃ から RT までガス急冷を行った。圧縮された試験片から $\phi 13$ mm 外径で $\phi 8$ mm 内径 × 5 mm 高さのリング試験片を加工し、軟磁性の評価(磁束密度と保磁力)を行った。比較として、950℃ × 2hr にて磁気焼鈍された高純フェライト系ステンレス棒線

の評価も行った。

図 14, 15 に NSSC180 棒線の磁束密度と保磁力に及ぼす熱加工履歴の影響を示す。B₁₀ および B₁₀₀ はそれぞれ 10 (Oe) と 100 (Oe) における磁束密度 (T) であり、その値が大きいほど出力が大きく好ましい。保磁力は磁化された鋼材を磁化のない状態へ戻すために必要な反対向きの外部磁場であり、小さいほど応答性がよく軟磁性材料として好ましい。常温圧縮 (冷間圧縮) の B₁₀ および B₁₀₀ はそれぞれ約 0.3 と約 1.25 であり、磁気焼鈍材に比べ低位である。これは冷間でひずみが残留することに起因するものと考えられる。1100°C 近い温度にて熱間圧縮後に放冷すると、磁束密度は常温圧縮に比べ高くなり、B₁₀₀ は約 1.4 近くまで向上し、磁気焼鈍材に迫る。これは高温熱処理での粗粒化に加え、圧縮後の放冷中に圧縮起因のひずみが回復するためと考えられる。また、保磁力について、冷間圧縮では約 8 と高位であるが、1100°C 圧縮にて約 1 まで低減し、磁気

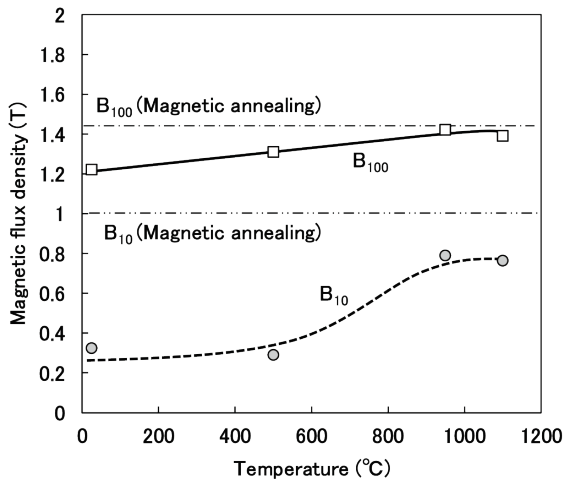


図 14 NSSC180 棒線の磁束密度に及ぼす熱加工履歴の影響
Effect of thermal processing history on the magnetic flux density of NSSC180 bar wire

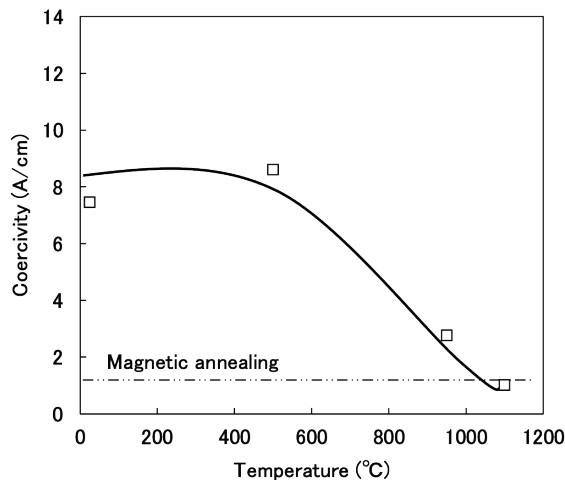


図 15 NSSC180 棒線の保磁力に及ぼす熱加工履歴の影響
Effect of thermal processing history on the coercive force of NSSC180 bar wire

焼鈍並みの軟磁性を示し、磁気焼鈍の工程省略が期待される。

以上より高純フェライト系ステンレス棒線 NSSC180 は溶接部の耐食性に優れ、適切な鍛造温度で成形することで高強度や優れた軟磁性を示し、燃料部品の高機能化に対応するものと考えられる。

4. 結 言

ガソリンエンジンの高効率化を背景に、直噴ガソリンエンジンの主要部品である高圧燃料ポンプやインジェクタに好適な高純フェライト系ステンレス鋼 NSSC180 の太径棒線の品質向上と高機能化について検討した。粗大粒組織が超音波探傷性能を阻害するため、傾斜圧延機を用いた大ひずみ加工により再結晶を促進し、組織の細粒化が認められる。その結果、超音波探傷試験にて熱延組織制御材の S/N 比が通常材の 2 倍以上となり、超音波探傷性能が向上し、靱性向上も認められ、高品質化への寄与が期待される。また、適切なレーザー溶接や鍛造温度等の利用加工技術により、耐食性に優れ高強度や磁気焼鈍省略での優れた軟磁性特性が得られ、燃料部品の高機能化や環境負荷低減が期待される。棒線製造から利用加工技術を含めた一貫製造工程で自動車部品の信頼性向上や高機能化、工程省略のニーズは今後も高まるものと考えられ、本研究の知見を基に鋼材および一貫製造工程の最適化の開発活動を継続する。

参考文献

- 1) Energy Technology Perspectives 2012, IEA, <https://www.iea.org>, ETP2012, 2012
- 2) 大聖泰弘：精密工学会誌. 84 (9), 755 (2018)
- 3) 人見光夫：内燃機関の将来展望. 第 21 回内燃機関シンポジウム基調講演資料. 2010, p.7
- 4) 斎藤昭則：R&D Review of Toyota CRDL. 36 (4), 1 (2001)
- 5) 日立評論. 102 (1), 77 (2020)
- 6) 森谷昌輝, 宮下純一, 猪又茂, 町田啓介：自動車技術会論文集. 46 (3), 597 (2015)
- 7) 上田信司, 森幸雄, 岩成英二, 小熊義智, 箕浦陽介：デンソーテクニカルレビュー. 5 (1), 75 (2000)
- 8) 山下幸宏：ENGINE REVIEW. 7 (4), 7 (2017)
- 9) 徳尾健一郎, 有富俊亮, 白井悟史：日本機械学会論文集 (B 編). 77 (779), 1542 (2011)
- 10) 松尾哲治, 沢田行雄, 富板幸生：デンソーテクニカルレビュー. 11 (1), 67 (2006)
- 11) Yamamoto, A., Ashiura, T., Kamisaka, H.: Proc. Stainless Steels' 84, Goteborg, 1984, 181p
- 12) Yamasamo, A., Ashiura, T., Inagaki, H.: Seitetsu Kenkyu. (316), 64 (1984)
- 13) 松橋透, 高橋明彦, 梶村治彦：新日鉄技報. (389), 20 (2009)
- 14) 高野光司, 森祐司, 天藤雅之, 多田好宣, 柘植信二：新日鉄

- 技報. (389), 56 (2009)
- 15) 黒田吉孝：デンソーテクニカルレビュー. 11 (2), 14 (2006)
- 16) 渡辺準平, 深井清治：日立評論. 別冊 (24), 28 (1958)
- 17) 山中章裕, 水上英夫：鉄と鋼. 100 (5), 18 (2014)
- 18) 松井晃一：特殊鋼. 71 (2), 23 (2022)
- 19) 山本和希, 谷口玲：Sanyo Technical Report. 18 (1), 55 (2011)
- 20) 小林敏郎：Sanyo Technical Report. 11 (1), 61 (2004)
- 21) 日本学術振興会製鋼第19委員会：超音波探傷. 日本工業新聞社, 1974, p.72-84
- 22) 横野泰和：溶接学会誌. 62 (7), 20 (1993)
- 23) 佐藤幸祐, 社団法人日本非破壊検査協会編集：溶接部の超音波探傷試験. 初版. 1979
- 24) 浅川基男：日本塑性加工学会会報誌. 4 (43), 41 (2021)
- 25) 牧正志：鉄鋼の組織制御. 内田老鶴圃
- 26) 木村謙, 高橋明彦：新日鉄技報. (389), 51 (2009)
- 27) 吉村博文, 石井満男：鉄と鋼. 69 (11), 74 (1983)
- 28) 森田博樹, 吉澤明展, 藤井孝樹, 高野光司：日本製鉄技報. (416), 146 (2020)
- 29) Nakasuji, K., Kuroda, K., Hayashi, C.: ISIJ International. 31 (6), 620-627 (1991)
- 30) 山根康嗣, 下田一宗, 黒田浩一, 梶川翔平, 久保木孝：日本塑性加工学会論文誌. 62 (720), 1 (2021)
- 31) Yamane, K., Shimoda, K., Kuroda, K., Kajikawa, S., Kuboki, T.: Journal of Materials Processing Tech. 291, (2021), Article 116989
- 32) Tojo, M., Takano, K., Tendo, M.: Development of Application to Parts with High Forging and Weld in High Purity Ferritic Stainless Steel, 9th European Stainless Steel Conference – Science & Market And 5th European Duplex Stainless Steel, BERGAMO ITALY, 2017
- 33) 細井祐三：Zairyo-to-Kankyo. 56, 439 (2007)



山先祥太 Shota YAMASAKI
山口技術研究部
ステンレス製鋼・鋼材研究室
厚板・棒線研究課長
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



吉澤明展 Akinori YOSHIZAWA
技術総括部 設備計画室 部長代理



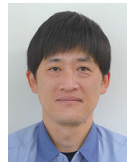
東城雅之 Masayuki TOHJO
名古屋支店 ステンレス自動車鋼板・棒線室
ステンレス棒線課 主幹



山根康嗣 Kohji YAMANE
プロセス研究所 圧延研究部
鋼管・形条圧延研究室 研究第一課
上席主幹研究員 工学博士



高野光司 Kohji TAKANO
ステンレス事業部 ステンレス技術部
ステンレス商品技術室
ステンレス棒線商品技術課長 工学博士



日笠裕也 Yuya HIKASA
山口製鉄所 品質管理部
ステンレス棒線管理室 主幹



森田博樹 Hiroki MORITA
山口製鉄所 ステンレス棒線工場
ステンレス棒線技術室 主幹