

技術論文

完全熱処理省略型ベイナイト非調質ボルト用線材(MF線材)の開発

Development of Bainitic Wire Rod (Multi Free Wire Rod) for Non-heat-treatment Bolt

志賀 聡*
Akira SHIGA

久保田 学
Manabu KUBOTA

富澤 秀世
Hideyo TOMIZAWA

遠藤 詩織
Shiori ENDOH

田中 康介
Kosuke TANAKA

小川 卓也
Takuya OGAWA

抄 録

ボルト製造工程におけるカーボンニュートラルを達成するためには、非調質ボルトに必要となるブルーイングを省略することが求められている。日本製鉄(株)はオンライン調整冷却で造り込んだベイナイト組織を活用した非調質ボルト用線材(MF線材: Multi Free)を開発した。MF線材を使用したボルトは強度区分8.8のボルト特性を満足し、ボルト製造工程における完全熱処理省略を達成した。

Abstract

In order to achieve carbon neutrality in the bolt manufacturing process, elimination of the bluing process is required for non-heat-treatment bolts. Newly developed steel for non-heat-treatment bolts (Multi Free (MF) wire rod) characterized bainitic microstructure by an online controlled cooling process. Non-heat-treatment bolts made from MF wire rod satisfied the properties of JIS 8.8 class. The complete elimination of heat treatment in the bolt manufacturing process was achieved by the MF wire rod.

1. 緒 言

鋼製ボルトは、自動車等の輸送機器をはじめとして、電気機器、造船、橋梁、住宅等のきわめて広い場面で使用される産業上の重要部品であり、LCAでのCO₂を含む温室効果ガス(以下、CO₂)の排出量削減が強く要請されている。日本製鉄(株)では“軽量化・LCAでのCO₂排出量削減”、“コスト削減”、“最適生産システム”という視点で様々な取り組みを行っている。取り組みのひとつであるエコプロダクツ®は、鋼材から部品を製造する段階、あるいは最終製品として使用される段階でのカーボンニュートラルに貢献する高機能鋼材である。一般的な自動車用ボルトの製造工程を図1に示す。熱間圧延によって製造された線材は、ワイヤメーカーにて伸線加工および球状化焼鈍(SA: Spheroidization Annealing)が施された後、ボルトメーカーにおいて冷間鍛造と転造によってボルト形状に成形される。その後、調質(焼入れ・焼戻し)、めっき、およびめっき時に侵入した水素を除去するためのベーキングを行うことによって製造される。焼鈍や焼入れ・焼戻しは、加熱時に多量のエネルギーを消費し、多量のCO₂を排出する。こ

のため、ボルトの製造工程におけるCO₂排出量を削減するため、非調質ボルト用線材が開発されてきた^{1,2)}。非調質ボルトは焼入れ・焼戻しの代わりに、伸線加工工程での加工硬化を活用して、ボルトの強度区分に対応した強度を付与する。非調質ボルト用線材を使用することで、冷間鍛造前の球状化焼鈍、および焼入れ・焼戻しを省略することが可能となる。長尺ボルトの焼入れ・焼戻し後の曲がり矯正工程の省略も可能となる。しかしながら、従来の非調質ボルト用線材には以下の課題があった。

(1) ブルーイング工程の付加

ボルトのJIS規格³⁾には降伏強度や永久伸びが規定されているが、従来の非調質ボルトは降伏強度が低く、永久伸びも大きい。最終工程においてブルーイングを付加する必要がある⁴⁾。このため、従来非調質ボルトでは、完全な熱処理省略には至っていなかった。

(2) 冷間鍛造性の低下

冷間鍛造前の伸線加工によってボルトに必要な強度を付与するため、冷間鍛造時の素材強度が高い。このため金型および鋼材への負荷が大きくなり、金型寿命の低下や、冷間鍛造時の鋼材の割れ発生が懸念される。

* 東日本技術研究部 鋼材研究室 線材研究課 主幹研究員 博士(工学) 千葉県君津市君津1 〒299-1141

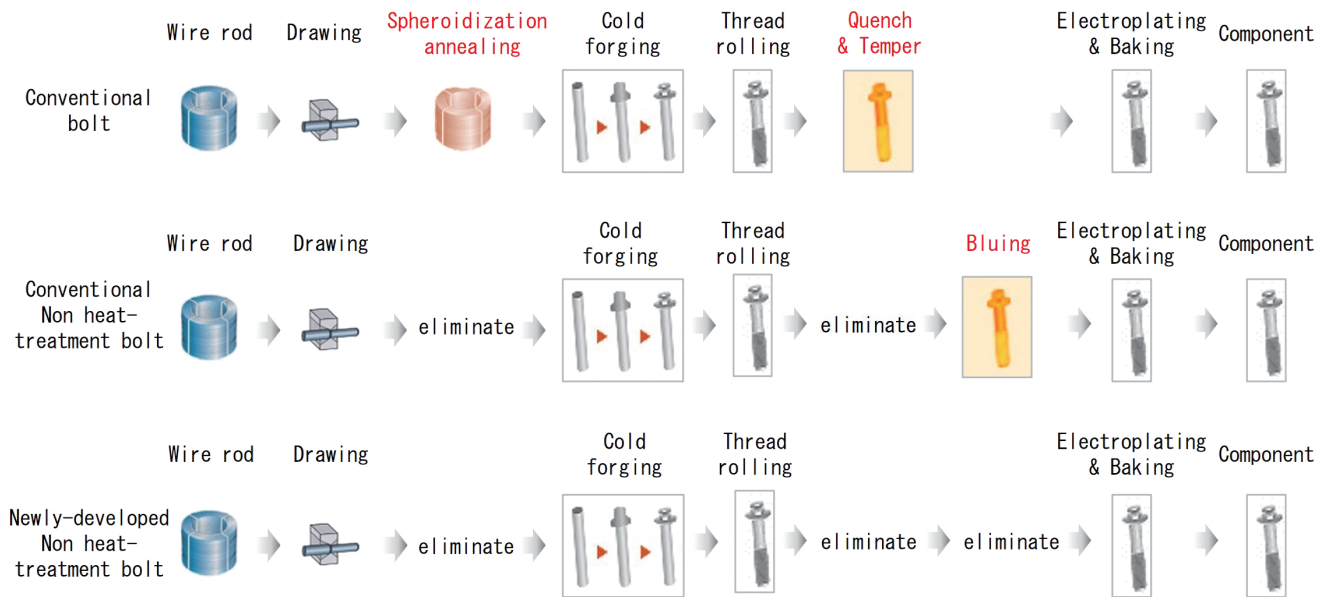


図1 自動車用ボルト製造工程
Manufacturing process of automotive bolts

(3) 首下延性低下・遅れ破壊の懸念

非調質ボルトは冷間鍛造後に焼入れ・焼戻しを行わずに最終製品となる。このため、ボルトの冷間鍛造によるひずみ分布を最終製品まで引き継ぐため、ボルトの内部に硬さ分布が存在する。特にボルトの首下は、ボルトのねじ部が強度区分 8.8 相当の強度であっても、ボルト形状によっては強度区分 12.9 相当の強度となる可能性があり、首下部の延性低下や使用時の遅れ破壊⁹⁾が懸念される。

以上の課題を克服するため、日本製鉄では、JIS 強度区分 8.8 のボルト製造工程の熱処理の完全省略を実現し、同時にボルトとして必要な特性を満足する、新しい非調質ボルト用線材 (MF 線材: Multi Free) を開発した。本報では、MF 線材のコンセプトおよび線材とボルトとしての特性を紹介する。本開発鋼を適用することで、ボルト製造工程で生じる CO₂ 排出量を、従来の焼入れ・焼戻しボルトの製造工程に対して、球状化焼鈍の省略分で 139kg-CO₂/ton-steel、焼入れ・焼戻しの省略分で 250kg-CO₂/ton-steel の削減が可能となる。

2. MF 線材の開発コンセプト

従来の非調質ボルトの課題を解決するため、ベイナイト組織を活用することとした。ベイナイト組織は微細な下部組織を持つため⁶⁾、高い降伏比 (降伏強度/引張強度) が期待できる。このため、従来型の非調質ボルトで付加されていたブルーイングを必要とせず、めっき後に実施されているベーキングのみでボルト特性を満足し、完全熱処理省略を達成することができると考えられる。

非調質ボルト用線材は、伸線加工による引張強度 800~900MPa の伸線材を冷間鍛造によりボルトを成形すること

から、優れた成形性が求められる。マイクロ組織を微細かつ均質とすることで、非調質ボルトに必要な成形性を満たすことができる。フェライトマトリクスに微細なセメンタイトが分散した均質組織であるベイナイト組織は、優れた強度と延性バランスを備えている⁷⁾。ベイナイト組織を活用することで、複雑な形状であるボルト頭部を冷間鍛造しても割れが生じにくい。さらに、ベイナイト組織はフェライト・パーライト組織よりも加工硬化率が低い⁸⁾ ことに加え、伸線加工での引張ひずみによるボルト冷間鍛造時の圧縮方向の変形を容易にするバウシinger 効果を活用^{2,9)} することでボルト鍛造時の変形抵抗を小さくできるため、金型寿命低下抑制が期待できる。

非調質ボルトのマイクロ組織は、伸線によって、長手方向に伸長する。応力が作用する方向に対して平行に伸長した組織は、耐遅れ破壊特性に優れることが知られている^{10,11)}。すなわち、均一なベイナイト組織を伸線加工で伸長組織に造り込むことで優れた耐遅れ破壊特性を示すことが期待できる。

均一なベイナイト組織を造り込むためには、オーステナイトを等温に保持して変態させる、恒温熱処理が必要である。恒温熱処理を行うためには、圧延後の線材に対してオフラインで鉛浴熱処理が施されることが多いが、新たに中間熱処理を追加することになるため、熱処理の完全省略を実現することができない。さらに、鉛浴使用による環境負荷や、生産性に課題がある。これに対して日本製鉄では、線材圧延ラインに直結したオンライン調整冷却設備を活用することで線材の段階で均一なベイナイト組織を造り込むことを可能としており、CO₂ 排出量の削減に加え、高い生産性も確保することが可能である^{12,13)}。

表 1 MF 線材の化学成分 (mass%)
Chemical composition of MF wire rod (mass%)

| | C | Si | Mn | P | S | B | SAE standard |
|----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------------|--------------|
| 10B21-MF | 0.18/0.23 | 0.15/0.35 | 0.60/0.90 | ≤0.0030 | ≤0.0030 | 0.0005/0.0030 | SAE 10B21 |
| 15B23-MF | 0.19/0.25 | 0.15/0.35 | 1.35/1.65 | ≤0.0030 | ≤0.0030 | 0.0005/0.0030 | SAE 15B23 |

3. MF 線材の特性

3.1 MF 線材の製造方法

MF 線材は、SAE (米国自動車技術者協会) 規格に適合したボロン鋼が使用されており、化学成分は表 1 に示すとおりである。熱間圧延を行った後、圧延ラインの後方に設けたオンライン調整冷却設備を使用して調整冷却を行い、均質なベイナイト組織を得る。しかし、ベイナイト組織は変態温度により大きく引張強さが変化する^{14,15)}、オンライン調整冷却設備での温度コントロールが MF 線材の特性を決めるうえで非常に重要であり、鋼材の変態特性と線材圧延後の温度制御を組み合わせることで均質なマイクロ組織の作り込みを達成している。

3.2 MF 線材のマイクロ組織と機械的特性

写真 1 に供試鋼のマイクロ組織を示す。調整冷却により、線材の表層から中心部までセメントライトが微細に分散した均質なベイナイト組織が得られる。図 2 に線径 $\phi 10$ の線材横断面内の表層から中心部までの硬さ測定結果を示す。表層から中心部まで、ほぼ一定の硬さが得られていることが分かる。

図 3 に 1 コイル (2ton 分) の全長の線材強度ばらつきを示す。調整冷却における温度制御により、コイル先端から末端まで、引張強さの変動がきわめて少ない線材が得られることが分かる。

3.3 MF 線材の冷間鍛造性

オンライン調整冷却設備を用いて製造された MF 線材に伸線加工を行い、得られた伸線材を用いて、ボルトの冷間鍛造性を評価した。ボルト頭部成形におけるひずみ量はおよそ相当ひずみで 1.5 であるので³⁾、相当ひずみ 1.5 (圧縮率約 78%) における変形抵抗を測定した¹⁶⁾。

図 4 に示すように、MF 線材の相当ひずみ 1.5 (圧縮率約 78%) での変形抵抗は、焼入れ・焼戻しボルトとして使用されている S45C の球状化焼鈍材 (図中 S45C-SA) と同等レベルである。すなわち、MF 線材は伸線材の引張強度が高いにも関わらず、優れた成形性を示すと言える。これは、ベイナイト組織は加工硬化率が低いこと、およびバウシinger 効果によるものと考えられる。

MF 線材の冷間鍛造時の割れ感受性は、伸線材から切欠き付き円柱試験片を作成し、冷間据込み試験¹⁷⁾を行ったときに割れが発生しない限界の圧縮率 (限界圧縮率) によ

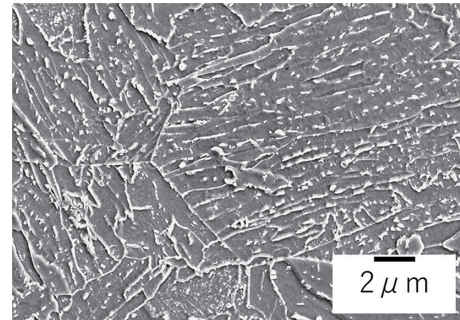


写真 1 MF 線材のマイクロ組織
Microstructure of MF wire rod

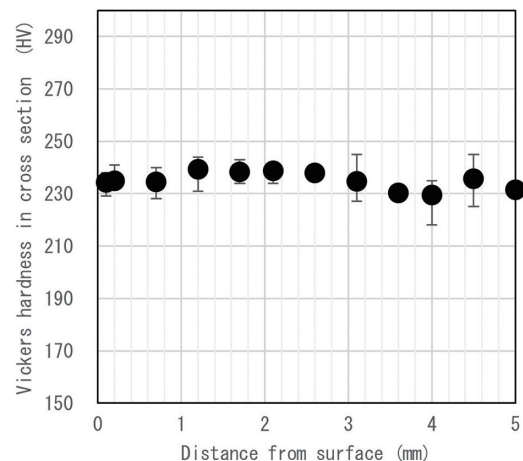


図 2 線材横断面内硬さ変動
Vickers Hardness in cross section

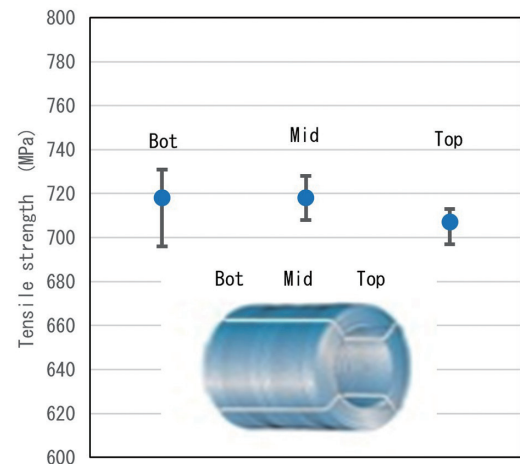


図 3 引張強度のコイル内変動
Tensile strength in coils

て評価した。図5に示すように、MF線材はS45C-SAよりも限界圧縮率が高く、割れ感受性が低いことが分かる。

実際のボルト製造に使用されるボルト鍛造機(多段フォーマ)を用いて図6に示す形状のJIS-M8フランジボルトを成形する実験を行った。図面通りの形状に成形でき、鍛造金型およびボルトに破損が観察されず、加工できていることを確認した。

さらにMF線材の加工性を把握するためにボルト成形時の押し込み量を調整することによって、フランジ部の加工限界を調査した。図7に示すように従来調質ボルトとして使用されるS45C-SA材でフランジ部において割れが発生する厳しい加工条件でも、MF線材では割れが発生しない。すなわちMF線材は複雑な形状や厳しい形状の部品にも適用できる。

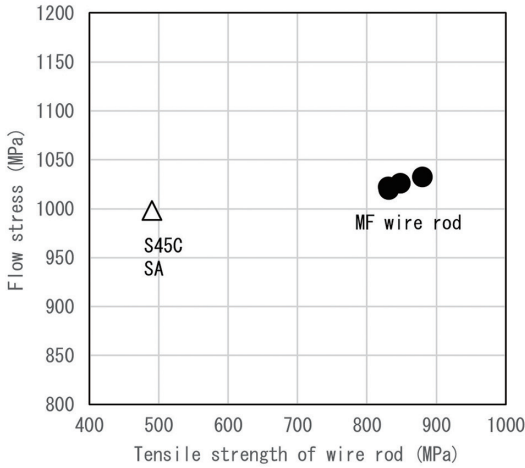


図4 変形抵抗

Relationship between tensile strength and flow stress

4. MF線材から作られたボルトの諸特性

4.1 ボルト特性評価方法

試作したM8フランジボルトを用いて、ボルトとして必要な特性をJIS B 1051:2014に準じて評価した。ボルト鍛造まま材、ベーキング材、ブルーイング材の特性を比較することによって、ブルーイング省略による完全熱処理省略の可能性を検証した。

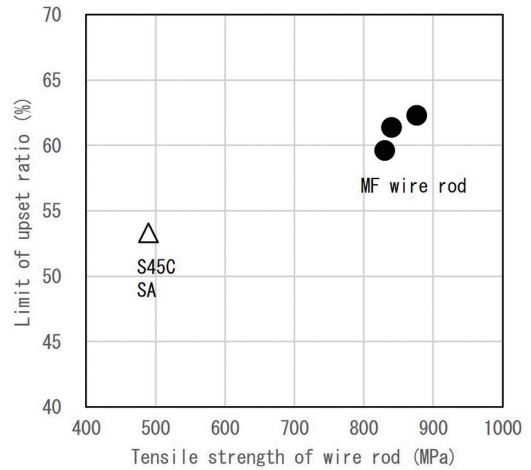


図5 限界圧縮率

Relationship between tensile strength and limit of upset ratio

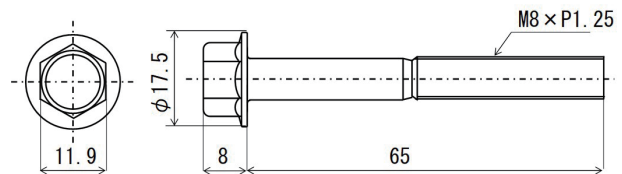


図6 製造性評価ボルト形状

Shape and dimensions in mm of bolts used in this study

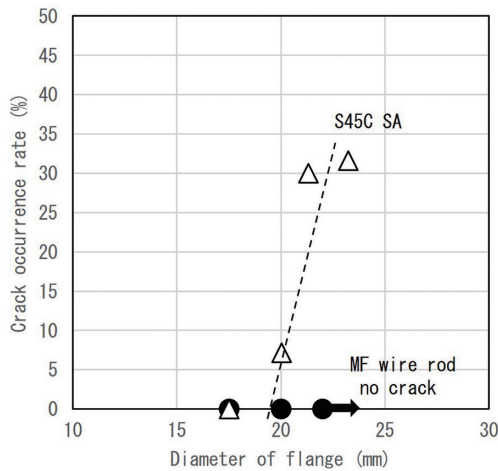


図7 フランジ部限界加工性
Limit of cold heading of flange in bolt

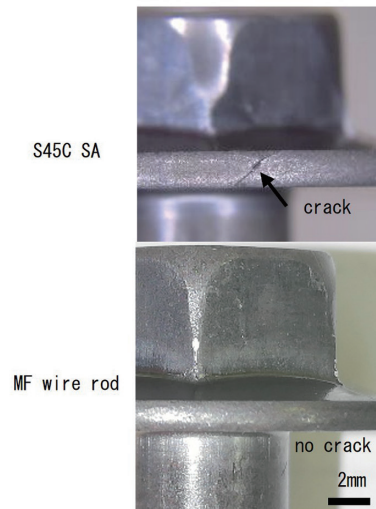


表 2 強度区分 8.8 非調質ボルトの機械的特性
Mechanical properties of 8.8 class non-heat-treated bolt

| | Aging conditions | TS (MPa) | 0.2%PS (MPa) | YP/TS | El/5d (%) | RA (%) | Hardness (HV) |
|------------------------|-------------------|----------|--------------|----------|-----------|---------|---------------|
| MF wire rod | None (As forged) | 837 | 697 | 0.83 | 16.0 | 73.1 | 253 |
| | Baking 200°C×2h | 896 | 847 | 0.94 | 14.0 | 70.0 | 271 |
| | Bluing 350°C×0.5h | 890 | 834 | 0.94 | 16.3 | 70.3 | 270 |
| JIS standard Grade 8.8 | | min. 800 | min. 640 | min. 0.8 | min. 12 | min. 48 | 250-320 |

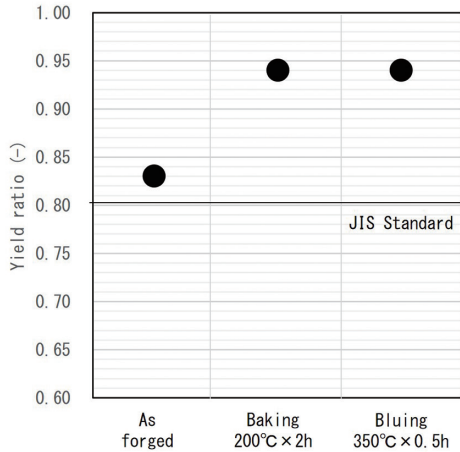


図 8 降伏比
Yield ratio of non-heat treatment bolt

4.2 ボルト機械的特性

ボルトから JIS14A 号試験片を切り出し、引張試験による機械的特性を調査した。引張試験結果を表 2 に示す。ベーキングおよびブルーイングを行ったボルトはいずれも強度区分 8.8 のボルトとしての規格を満足し、ベーキング処理品はブルーイング処理品と同等の特性を示す。図 8 に示すように MF 線材を用いたボルトの降伏比は鍛造ままでは降伏比 0.8 程度であるが、ベーキングまたはブルーイングを施すことで降伏比 0.9 以上を示す。

4.3 くさび引張試験

図 9 に示す条件で、くさび引張試験を行った。試験結果を図 10 に示す。鍛造まま、ベーキング材およびブルーイング材ともに首下部から破断せず、すべてねじ部から正常破断した。さらに引張強度はくさびを設けない 0°での結果と同じ強度を示した。すなわち、MF 線材から造られたボルトは、十分な首下延性を有していると言える。

4.4 保証荷重試験

保証荷重試験結果を図 11 に示す。保証荷重試験における永久伸びは測定誤差を含めて ±12.5 μm 以内である必要があるが、MF 線材を使用したボルトはベーキング材およびブルーイング材ともに永久伸びは生じなかった。

以上のことから、MF 線材を使用したボルトは、めっき後のベーキングのみで JIS で規定された強度区分 8.8 のボ

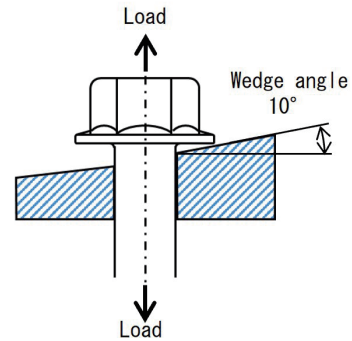


図 9 くさび引張試験の模式図
Schematic illustrations of wedge loading test

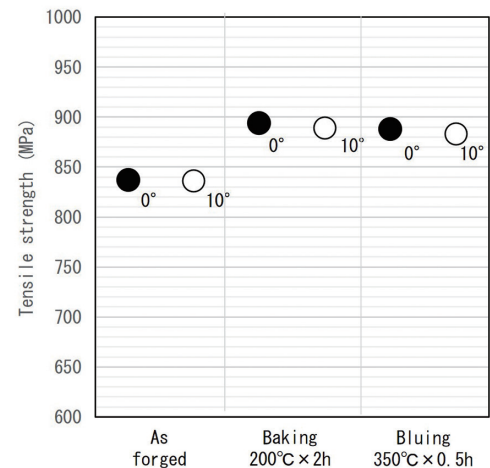


図 10 くさび引張試験結果
Tensile strength under wedge loading

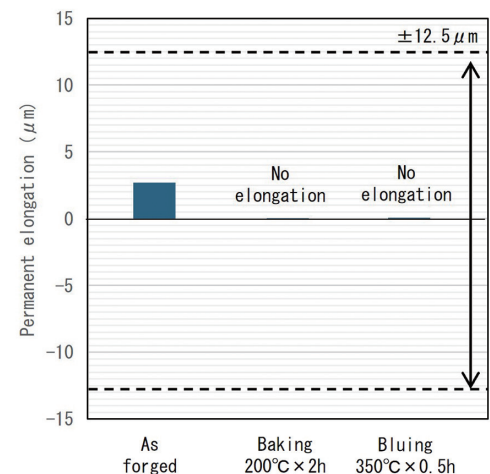


図 11 保証荷重試験結果
Results of proof load test

ルトの特性を満足し、従来の非調質ボルト製造工程で必要となるブルーイング工程を省略することができ、従来の非調質ボルト用線材では達成できなかった、熱処理の完全省略が可能である。

4.5 耐遅れ破壊特性評価

耐遅れ破壊特性を評価するため、実ボルトを用いた SSRT (Slow Strain Rate Tensile test: 低ひずみ速度引張試験) を行った。ボルトに陰極水素チャージを行い、試験中の水素放出を防ぐために Zn めっきを行った。ボルト断面内の水素濃度分布の均一化を目的として室温環境下で一定時間放置した後、SSRT に供した。表 3 に遅れ破壊試験結果、写真 2 に破面を示す。強度区分 8.8 の非調質ボルトは、首下部が最も高強度となる部位であるにも関わらず首下部から破断せず、ねじ部から破断し、かつ延性破面を呈していた。ボロン鋼 10B21 または低合金鋼 SCM435 の焼入れ・焼戻しボルトは、強度区分 12.9 に調整した焼入れ・焼戻しボルトのみ最大荷重到達前に破断し、破面は粒界破壊を呈していた。以上より、MF 線材を使用した非調質ボルトは、実用上十分な遅れ破壊特性を有していると言える。

5. 結 言

自動車部品製造における CO₂ 排出量削減に対応するため、ベイナイト組織を活用した完全熱処理省略型非調質ボルト用線材 (MF 線材: Multi Free) を開発した。本開発鋼は、オンライン調整冷却設備を活用することでボルト製造工程における複数の熱処理工程 (焼鈍, オフライン恒温

変態処理, 焼入れ・焼戻し, ブルーイング) を省略 (Free) することで CO₂ 排出量の削減および熱処理コストの削減が可能となる。また、焼入れ時に発生するボルトの曲がりがないことから、長尺ボルトの選別や矯正が不要 (Free) である。さらに、ボルトメーカーの熱処理設備の老朽更新やメンテナンスが不要となり、または外注熱処理コストの削減が可能である。

また優れた成形性を持つことでこれまで非調質ボルトで困難であった形状を造り込むことが可能であり、ボルトの設計自由度 (Free) を高められる可能性がある。このように複数の Free を達成できることから Multi Free 線材 (MF 線材) と名付けた。MF 線材は、自動車用ボルトをはじめ、家電および建築用途など、様々な分野で採用が広がっており、ボルト製造工程におけるカーボンニュートラル、コスト削減および生産システム最適化を達成することができる商品である。

さらに、ボルトの高強度化によって、例えば自動車の車体の軽量化が可能となるため、自動車の走行時に発生する CO₂ の削減にも貢献することが可能となる。このため日本製鉄では、ボルトの高強度化と冷間鍛造性および耐遅れ破壊特性を両立した高強度 MF 線材の開発を進めている。

参照文献

- 1) 芹川修道: 熱処理. 24, 25 (1984)
- 2) 蟹澤秀雄 ほか: 日本金属学会誌. 30 (6), 557 (1991)
- 3) JIS B 1051 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質. 2014

表 3 SSRT での耐遅れ破壊特性評価結果
Result of SSRT

| | Steel | Grade | Result | Break point | Fracture surface |
|----------------------------------|------------------------|-------|--------|-------------|------------------------|
| Non-heat-treatment bolt | MF wire rod | 8.8 | Good | Screw part | Ductile fracture |
| Conventional heat-treatment bolt | Boron steel 10B21 | 8.8 | Good | Screw part | Ductile fracture |
| | | 10.9 | Good | Screw part | Ductile fracture |
| | Low alloy steel SCM435 | 10.9 | Good | Screw part | Ductile fracture |
| | | 12.9 | Bad | Screw part | Intergranular fracture |

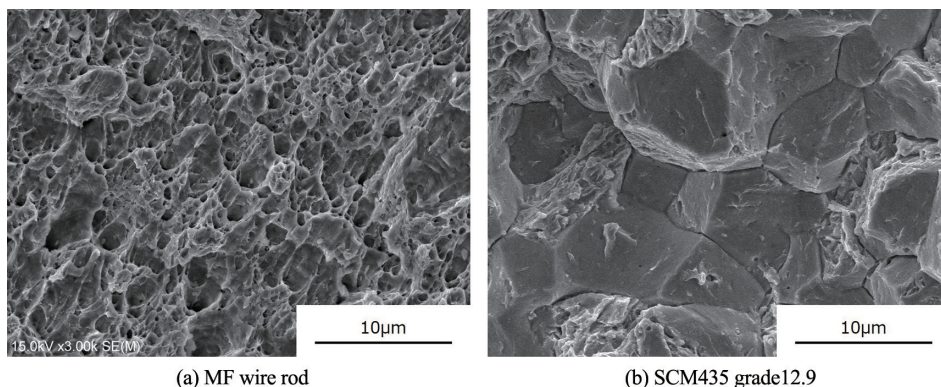


写真 2 SSRT 後の SEM 破面写真
SEM micrograph of fracture surface

- 4) 角南英八郎 ほか：日本鉄鋼協会第 104 回講演大会 講演概要集. 68 (12), S1282 (1982)
- 5) 松山晋作：遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 1989
- 6) Takayama, N. et al.: Acta. Mater. 60, 2387 (2012)
- 7) 落合征雄 ほか：鉄と鋼. 79, 1101 (1993)
- 8) 吉江淳彦 ほか：新日鉄技報. (370), 27 (1999)
- 9) 戸田正弘 ほか：塑性と加工. 29, 977 (1988)
- 10) 高井健一 ほか：鉄と鋼. 81, 1025 (1995)
- 11) 木村勇次 ほか：日本機械学会論文集. 84, 1 (2018)
- 12) 鳴海涼 ほか：熱処理. 61 (6), 309 (2021)
- 13) 舟山貴郎：新日鉄住金技報. (406), 43 (2016)
- 14) Leslie, W.C., 幸田成康監訳：レスリー鉄鋼材料学. 丸善, 1985, p.175
- 15) Irvine, K.J. et al.: J.Iron Steel Inst. 187, 292 (1957)
- 16) Osakada, K. et al.: CIRP. 30 (1), 135 (1981)
- 17) 冷間鍛造分科会材料研究班：塑性と加工. 22 (241), 139 (1981)



志賀 聡 Akira SHIGA
東日本技術研究部 鋼材研究室 線材研究課
主幹研究員 博士(工学)
千葉県君津市君津1 〒299-1141



久保田学 Manabu KUBOTA
東日本技術研究部 鋼材研究室長
博士(工学)



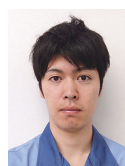
富澤秀世 Hideyo TOMIZAWA
東日本製鉄所 品質管理部 線材管理室長



遠藤詩織 Shiori ENDOH
東日本製鉄所 品質管理部 線材管理室
線材商品企画課 主査



田中康介 Kosuke TANAKA
北日本製鉄所 品質管理部 室蘭棒線管理室
棒線商品開発課 主査



小川卓也 Takuya OGAWA
北日本製鉄所 品質管理部 室蘭棒線管理室
棒線商品開発課 主査