



特集記事・9

地球環境に貢献する鉄鋼製品

地球環境問題に貢献する線材棒鋼製品の研究開発例

—高強度ボルト用鋼と快削鋼—

Examples of R & D on Wire Rod and Bar Steels Contributing Global Environmental Concerns

—Steels for High Strength Bolts and Free-machining Steels—

家口 浩

(株)神戸製鋼所 材料研究所 専門部長

Hiroshi Yaguchi

1 緒言

地球環境問題に対する関心の高まりから、自動車用鉄鋼材料にもその要求を満足させる製品の開発が求められている。その一つの観点は、本特集号に重点的に取り上げられている、CO₂排出量削減要求からの自動車の燃費改善である。燃費改善には各部品の軽量化が重要な対策であり、鋼材の高強度化が求められている。その例として、ここでは、線材棒鋼製品の代表例として、本特集の他原稿とオーバーラップしないよう高強度ボルト用鋼を取り上げる。

さらに地球環境問題に関する別の重要な観点として、有害物質の除外がある。その例として、鉄鋼材料の被削性改善のために快削鋼に添加されている鉛(Pb)を無添加でも同等の被削性を得るPbフリー快削鋼の開発の試みについて紹介する。

2 高強度ボルト用鋼

2.1 高強度化の要求と規格

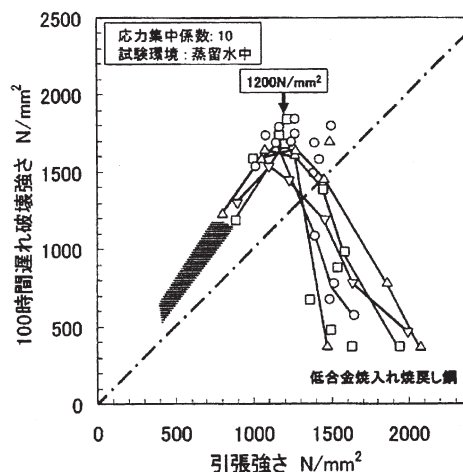
自動車の中には数多くのボルトが使用されているので、軽量化のためにボルトの高強度化が求められている。ボルトには、いくつかの強度レベルがJISで規格化されている。最高強度は、強度区分12.9の、最小引張強度が1220 MPaのクラスである。ボルトを強度区分10.9から12.9まで高強度化すると、ボルト自体でも約17%の軽量化ができるが、それに伴って部品自体も小型化できるので、メリットはそれ以上に大きい。

規格の最高強度である強度区分12.9クラスのボルトには、JISのSCM435やSCM440などのクロムモリブデン鋼が焼入焼戻しで使用されている。ボルトのさらなる高強度化で最も重要な課題は、耐遅れ破壊強度であるが、図1から明らかなように、引張強度(TS)が1200 MPaを超えると、遅れ破壊

の危険性がある¹⁻²⁾。そのため、ボルト使用時の締め付け方法や使用環境などの制約や、JISとして、浸りん(P)規制がある。浸りんとは、ボルト加工時に冷間加工性を高めるために用いられているりん酸亜鉛皮膜中のりん(P)が、焼入焼戻し中に鋼材表面から鋼中に侵入する現象であり、遅れ破壊を促進させる³⁾。

2.2 焼入焼戻しタイプ高強度ボルト用鋼

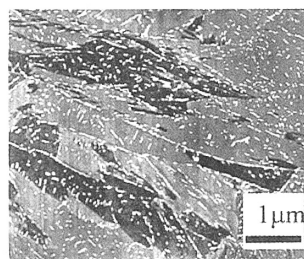
強度区分12.9を超えるボルトも、鋼材メーカー各社から、遅れ破壊対策を検討した結果として提案されている。焼入焼戻しタイプとしては、中型トラックのフライホイールボルトとして1300—1500 MPaのボルト⁴⁾、二輪車のコンロッドボルトとして14.9級ボルト⁵⁾が量産化されていると紹介されている。各鋼材メーカーの開発製品の成分は、それぞれ異なっているが、遅れ破壊の起点になりやすい旧オーステナイト粒界を強化するという観点での以下の共通点があるのが特徴である(例えば文献4～8))。①不純物のP, Sを極力減らすとともに、P, Sの粒界偏析を促すMnも減少させて粒界

図1 遅れ破壊強さに及ぼす引張強さの影響¹⁾

強化を図る。②Ti, Nb, Vなどの添加により結晶粒を微細化し、粒界強化を図るとともに、鋼材の延性を向上させる。③析出強化型の元素であるMo, V, Tiなどを添加し、高温焼戻し処理を行うことで、微細な炭窒化物を析出させる。微細な析出物は、水素をトラップし、有害な拡散性水素量を低減させる。さらに、高温焼戻しを行うことにより、旧オーステナイト粒界のフィルム状セメンタイトを球状化させて、粒界強度を向上させる。これらの組織制御指針をまとめた模式図を図2に示す。

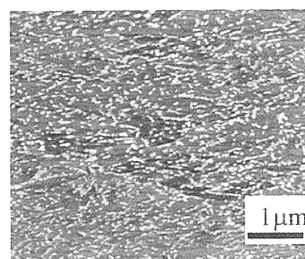
近年、加工熱処理の工夫によるマルテンサイト組織の改善による耐遅れ破壊特性の試みも報告されている⁹⁾。例えば、SCM440鋼を加工オーステナイト状態のまま焼入れる改良オースフォームと、高周波焼戻しを組み合わせることで、遅れ破壊特性が向上することが示されている。その理由は、改良オースフォームによって、粒界炭化物が減少・微細化するとともに、ブロックサイズが微細化されることと、急速加熱の高周波焼戻しによって、粒界・粒内の炭化物ともに微細化されるためであると提案されている。これより、遅れ破壊に強い理想的マルテンサイト組織として、①粒界炭化物などの第2相粒子無害化、②結晶粒均一微細化、③マトリックス強度向上、の三点が重要であると指摘されている。図3に典型的な組織写真の比較例を示すが、図2に示されている成分と焼戻し条件で得られた考え方と共通点が多いのが興味深い。

従来の焼入れ・焼戻し組織

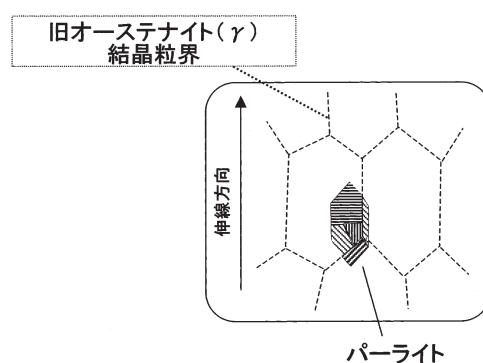


炭化物:数百nm

新マルテンサイト組織



炭化物:数十nm

図3 熱処理方法の改善によって得られた理想的マルテンサイト組織写真⁹⁾図4 伸線パーライト型組織の生成模式図
図2との比較により、旧オーステナイト粒界が消失することに着目

2.3 伸線パーライト型高強度ボルト用鋼

上記のような検討は行われているが、焼入れ焼戻し鋼の遅れ破壊特性向上には、限界があるのも明らかである。従って、最近、伸線された高炭素鋼線材を用いた強度1600 MPaの超高強度ボルトが開発され、使用され始めている^{10, 11)}。図4に模式図を示すように伸線パーライト組織にすることにより、遅れ破壊の起点になりやすい旧オーステナイト粒界を残存させていない。また、伸線パーライトでは、図5に示すようなフェライトとセメンタイト界面が、水素トラップサイトとなるが、大きな面積を有するために、有害拡散性水素量の低下にも効果があると報告されている¹²⁾。

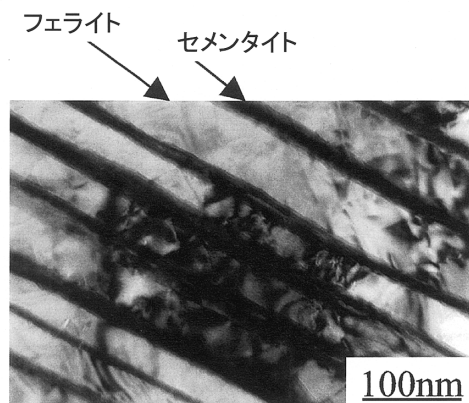


図5 ラメラ組織を示す伸線パーライト材の微細組織の一例

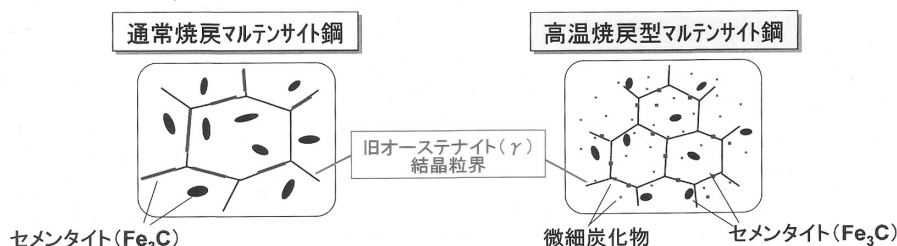


図2 耐遅れ破壊特性向上のための焼入れ焼戻し組織改善方法の模式図

3 快削鋼

3.1 快削鋼の重要性

自動車部品などに使用される機械構造用鋼は、何らかの切削加工を受けて使用されるのがほとんどである。部品製造コスト全体に占める切削加工費の割合は高く、図6のように熱間鍛造されるトラック部品の場合、製造コストの40～70%を切削が占めるという報告もある¹³⁾。従って、切削加工の生産性を向上させることが重要視されている。切削加工の生産性は多くの要因に影響を受けるシステム特性であるが、その中でも被削材の特性で生産性に影響を及ぼすものを被削性と表している。鉄鋼材料において被削性の向上が求められているときには、被削性を向上させた鋼種である快削鋼が広範囲で使用されている。向上手法としては、硫黄(S)、鉛(Pb)の単独、あるいはそれらの複合添加が一般的である。ただし、最近では、有害なPbの添加が無くても同様の被削性が得られる快削鋼の開発が求められている。

3.2 快削鋼の種類

被削性を向上させた快削鋼は、大きく分けて2種類に分類される。一つは機械的特性に重点を置いた機械構造用快削鋼である。自動車用部品を例とすると、クランクシャフトやコネクティングロッドであり、それ用の快削鋼が使用されている。機械構造用快削鋼は、あくまでも部品としての機械的特性(靱性・疲労など)を満足させ得る範囲内で被削性向上元素であるSやPbを添加している。S増量添加で低下する圧延方向と垂直方向の機械的特性の低下を抑制するために、硫化物形態制御が試みられているが、詳細は、後述する。

もうひとつの種類は、被削性に重点をおいた、低炭素硫黄及び硫黄複合快削鋼である。JISで規定されているSUM系快削鋼の大多数、米国の規定ではAISI 1215系快削鋼がこの範疇に入る。主に、ナット、口金などの多量に生産される小物部品として冷間引抜き後、自動盤で切削されることが多い。代表鋼種であるSUM 23 (AISI 1215) には、Sを約0.30%、

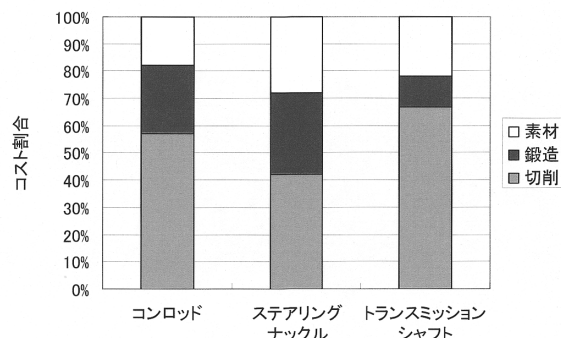


図6 典型的なトラック部品に占める切削費用の割合¹³⁾

燐(P)を約0.07%に増量添加して被削性向上が図られている。さらに、SUM 24L (AISI 12L14) では上記に追加してPbが0.20%以上添加され、優れた被削性が達成されている。

3.3 Pbフリー化の試み

3.3.1 機械構造用鋼の介在物組成・形態制御

Pbフリー化の試みとして最も一般的な方法は、Sの有効活用である。Sは鋼中では、一般的にMnS系硫化物として存在する。MnSの存在が被削性、特に工具寿命を向上させるメカニズムについては、大きく分けて2種類の説が提案されている。一つは、MnSとマトリックス界面に生じたクラックが切屑せん断域での応力(歪)集中を起こし、切削に必要な塑性変形を安定化し、切削エネルギーを減少させるという説(例えば文献14))。もうひとつは、工具・切屑界面に付着し、潤滑性を付与する、あるいは工具材質の切屑への拡散を抑制するというトライボケミカルを元にした説である(例えば文献15, 16))。切削温度によって、どちらのメカニズムが主になるかが変化し、低温領域では前者の機械的特性、高温領域では後者のトライボケミカル説が主になると考えられている。

トライボケミカル効果の例として、鋼中に含まれる酸化物を特殊な成分に調整すると、切削中に工具面に付着し、工具寿命を改善できることが知られている(例えば文献16))。Ca脱酸により酸化物をアノルサイト、ゲレナイト系酸化物にすると、酸化物の軟化点が低下し、工具に付着しやすくなる。ただし、付着するのは、工具がTiを含有するP種の超硬工具、あるいはTi含有の表面処理を施された場合に限定されるので、全ての切削条件に適用できるわけではない^{16, 17)}。

MnSは鋼材の熱間圧延、鍛造時に展伸されるので、圧延・鍛造方向と垂直方向の延靱性や疲労強度を低下させることが、S増量による被削性改善の問題となる。従って、Sを活用した機械構造用快削鋼には、被削性の具体的要求特性と機械的特性との要求に合わせてMnSの形態制御を行うことが求められている。垂直方向の機械的特性改善には、MnSの展伸を抑制し、球状化することが有効であることが以前より知られている。Ca, Mg, Zr, Te, Seは、MnS中に固溶しMnSを強化して展伸を抑制する。また、MnSの球状化は、主に低温領域で切削される工具寿命改善にも有効である。

最近、機械的特性改善にはMnSの分布も影響を及ぼし、均一分布ほど圧延方向と直角方向の延靱性は改善されることが判明した¹⁸⁾。MnSを均一分散させるためには、MnSの生成核を均一に分布させることが必要である。酸化物がMnSの生成核になるが、核としてのMnSの生成能、および微細に均一分散可能なことから、Mg添加の効果が大きいと報告されている。MnSの球状化とも合わせて、Mg+Caの複合

添加が検討されている^{17, 18)}。MnSを均一微細分散化させるMg+Ca複合添加と、よりクラスター化させるTi添加および従来鋼の場合を比較した例を図7に示す。

MnSの形態制御においては、切屑処理性改善には、機械的特性とは逆に、MnSを展伸させ、クラスター状に分布させることが有効であることが明確にされた。そのためには、MnSの生成核となる酸化物の生成を削減すると同時に、酸素量を低減することが有効となる。それにより、凝固時の最終凝固部からMnSが生成することでType II型MnSと呼ばれるクラスター状の発生となる¹⁸⁾。

従って、多くの切削様式が混在し、機械的特性も考慮する必要がある実部品ではSの増量、およびMnSの形態制御と合わせての検討が一般的である。CaやMgは、酸化物組成改良とMnS形態制御を同時に行うことができる有効な元素であり、広く提案されている^{18・21)}。

3.3.2 低炭素硫黄複合快削鋼

低炭素硫黄複合快削鋼は自動盤で多量に生産され、仕上面粗さが重要視されることが多い。比較的細径の素材において、ハイス製の総形バイトでの切削が多いことから、切削速度をあまり上げることが出来ないため、構成刃先が生成する比較的低温度領域の切削条件となることが多い。構成刃先とは被削材の一部が工具面上に付着し、あたかも工具の一部として振舞う現象である。従って、構成刃先のサイズの均一性や安定性が仕上面粗さに重要な影響を及ぼす。MnSは構成刃先の生成に機械的特性によって影響を及ぼすことが観察されており、図8のようにMnSを大型球状化させることが有効であることが報告されている^{22, 23)}。この考えを元に、Sを増量添加したうえで、MnSを大型球状化する試みが各社より報告されている。大型球状化手法としては、従来から知られている酸素量の制御が一般的であるが、Crを添加し、MnS晶出温度域を増加させてMnSを大型化させる試みも報告されている²⁴⁾。

4 まとめ

地球環境問題は、継続して改善させる必要がある課題なので、鋼材の高強度化のニーズも継続すると考えられている。現時点で残されているのは、難しい技術課題であることが多いので、その解決のためには、基礎知識からの積み上げが必要と思われる。例えば、ボルト用鋼の高強度化では遅れ破壊特性が重要であるが、評価方法によって、結果が異なることが課題になっている。従って、鋼中水素挙動などの現象の理解を深めながら、統一した評価方法の検討が不可欠である。

Pbフリー快削鋼も、各社から開発例がいくつか報告され

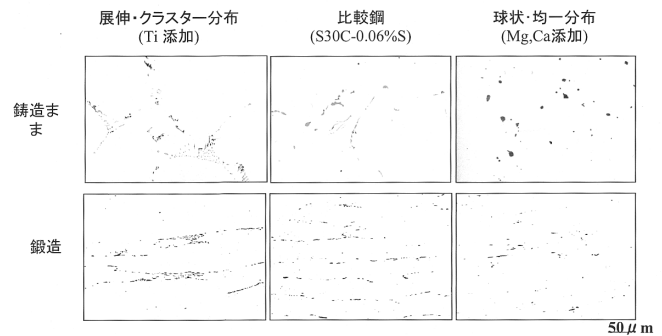


図7 特殊脱酸素元素添加がMnS介在物の分布に及ぼす影響
Mg+Ca添加は均一分布化させ、Ti添加はよりクラスター化させる¹⁸⁾

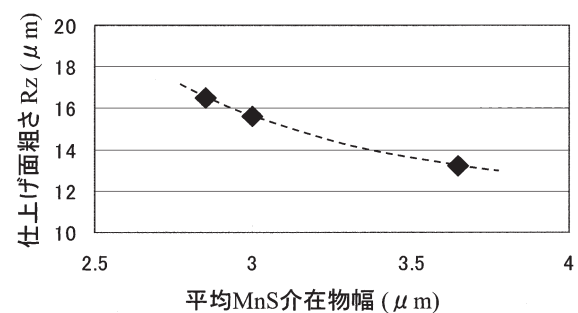


図8 低炭素硫黄快削鋼の切削仕上げ面粗さに及ぼすMnS介在物サイズの影響

ており、一部の実用化はされているが、十分には広がっていないとはいえない。その理由の一つに、被削性はシステム特性であり、切削条件によっても効果は異なることが挙げられる。従って、切削条件と合わせた検討が不可欠であり、ユーザーや工具メーカーと合わせた研究開発が求められる。また、切削現象の理解には、切削温度の把握が不可欠であるので、今後の報告の中に含まれることが望まれる。

参考文献

- 1) 山本俊二, 藤田 達: R & D 神戸製鋼技報, 18 (1968) 3, 93.
- 2) 松山晋作: 遅れ破壊, 日刊工業社, (1989)
- 3) 田中誠之助: 日本ねじ研究協会誌, 24 (1993) 4, 107.
- 4) 加納秀一ほか: 日野技報, (1991) 43, 2.
- 5) 萩原良俊ほか: HONDA R & D Tech. Rep., 4 (1992), 98.
- 6) 並村裕一ほか: R & D 神戸製鋼技報, 50 (2000) 1, 41.
- 7) 櫛田隆弘, 松本 斉, 倉富直行, 津村輝隆, 中里福和, 工藤赳夫: 鉄と鋼, 82 (1996) 4, 297.
- 8) 茨木信彦: 第188・189回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2006), 61.
- 9) 早川正夫, 寺崎 聡, 原 徹, 津崎兼彰, 松岡三郎: 日本

金属学会誌, 66 (2002) 7, 745.

- 10) M. Takashima et al : SAE Technical Review, 2003-01-1179.
- 11) 並村裕一ほか : R & D 神戸製鋼技報, 54 (2004) 3, 16.
- 12) 高井健一, 野末 章 : 日本金属学会誌, 65 (2000), 669.
- 13) H.K. Tonshoff and C. Stanske : High Productivity Machining, Materials and Processing, ASM, New Orleans, (1985), 207.
- 14) M.C. Shaw, E. Usui and P.A. Smith : Trans. ASME, B83 (1961), 181.
- 15) M.E. Merchant and N. Zlatin : Trans. ASM, 41 (1949), 647.
- 16) 大野 鐵 : 第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1984), 157.
- 17) Y. Yamane, H. Usuki, B. Yan and N. Narutaki : Wear, 139 (1990), 195.
- 18) 家口 浩, 土田武広, 新堂陽介, 坂本浩一, 染川雅実, 鹿磯正人 : R & D 神戸製鋼技報, 52 (2002), 62.
- 19) T. Koumoto, et al. : SAE Technical Review, (2004-01), 1527.
- 20) 狩野 隆, 羽生田智紀 : 電気製鋼, 75 (2004), 27.
- 21) K. Shiiki, et al. : SAE Technical Review, (2004-01), 1526.
- 22) H. Yaguchi : J. Applied Metalworking, 4 (1986), 214.
- 23) 家口 浩 : R & D 神戸製鋼技報, 54 (2004) 3, 11.
- 24) 村上俊之, 白神哲夫, 三瓶哲也, 及川勝成, 石田清仁 : まてりあ, 43 (2004), 136.

(2006年8月31日受付)