

特集記事・4

希少金属資源と省合金型鉄鋼材料開発の今

強靱鋼・非調質鋼の省合金化の取り組み

Alloy-Saving Development of High Strength and Tough Steels and Microalloyed Steels

愛知製鋼(株)
技術本部 技術開発部
チーム長水野浩行
Hiroyuki Mizuno愛知製鋼(株)
技術本部 技術開発部
担当員上西健之
Takeyuki Uenishi

1 はじめに

特殊鋼は、種々の合金元素が添加されており、熱処理などの製造プロセスとの組み合わせで様々な特性が得られるため、自動車を中心に機械構造部品に幅広く使用されている。また、自動車をはじめとする高出力化などの高機能化、燃費向上、CO₂排出低減などの環境対応、あるいは生産性向上・低コスト化など様々なニーズを受け、従来より材料開発が盛んに行われてきた^{1,2)}。その中には、低コスト化のため、合金元素を低減する開発も行われていたが、合金元素の新たな添加や増加により高強度化や切削性向上などの材料特性を向上させる開発も多く行われてきた^{1,2)}。

近年では、新興国の急激な経済成長に伴う金属資源の需要増加や金融商品的な位置付けによる合金価格の高騰・大幅な価格変動³⁾、資源産出国の偏在性⁴⁾および資源枯渇の懸念といった調達リスク、さらには激化するグローバル競争を勝ち抜くために高まる低コスト化要求等への対応のため、特殊鋼の省合金化に対するニーズが高くなっている。

本稿では特殊鋼の中で強靱鋼および非調質鋼について省合金化の取り組みについて述べる。尚、強靱鋼は特殊鋼の1つである機械構造用合金鋼において、Mn、Cr、Mo、Niなどの合金元素を適量添加し、焼入れ焼戻しを行うことで強度と靱性を得る鋼である。一方、非調質鋼は、Vなどの合金元素を適量添加し、焼入れ焼戻しを行わなくても所定の強度を確保可能な鋼であり、強靱鋼の熱処理省略、低コスト化を目的に開発された鋼である。

2 強靱鋼・非調質鋼の使用例

自動車を例に特殊鋼の使用例を図1に示す。このように特殊鋼は様々な部品に適用されており、部品の要求特性と部品製造性に適合した鋼種が使用されている。図1において、下線で示した部品が強靱鋼、あるいは非調質鋼が適用されている部品である。従来は、その多くに強靱鋼が使用されていたが、熱処理省略可能な非調質鋼の開発により、現在では低コスト化を目的として強靱鋼から非調質鋼への置き換えが進んでいる。

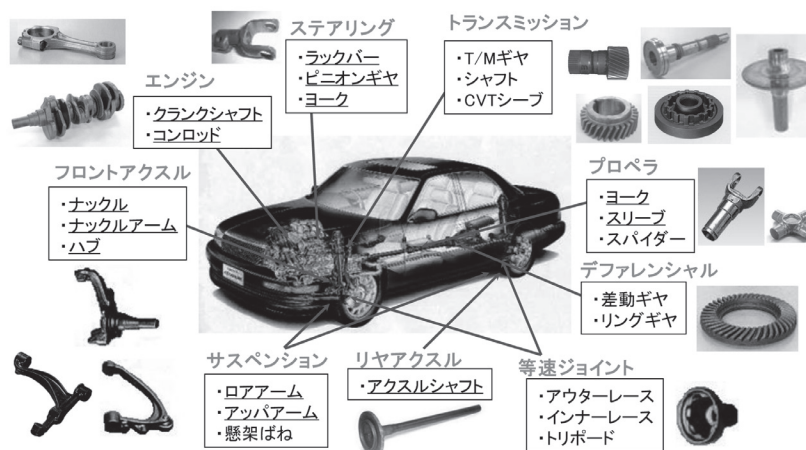


図1 自動車における特殊鋼の使用例(下線: 強靱鋼・非調質鋼の適用部品)

3 省合金化の考え方

特殊鋼に含有されている合金元素は、要求特性を満足させるために添加されているものである。したがって、合金元素を省略するためには、その合金元素によって得られる効果とメカニズムを明確にした上で、その特性を確保できる代替技術を検討することが重要である。その方策として、次の2つが考えられる。1つは同等の特性が確保できる安価ないし調達リスクの少ない合金元素に置き換える方法であり、もう1つは熱処理や加工などによって、合金元素添加と同等の特性が確保できる製造プロセスを適用する方法である。強靱鋼および非調質鋼についてもその考え方は同様である。

4 強靱鋼の省合金化の取り組み

強靱鋼は、これまで省合金化、低コスト化のため、Ni-Cr-Mo鋼 (JIS-SNCM440等) からCr-Mo鋼 (JIS-SCM440等)、Cr鋼 (JIS-SCr440等) へと推移してきた。しかし、これらは鋼種変更により特性の変化を伴うため、置き換えには限りがあった。そして、Mo価格の高騰から、広く使用されていたCr-Mo鋼の省Mo化のニーズが更に高まり、Cr-Mo鋼と同等の特性を有する省Mo鋼の取り組みが行われた。強靱鋼におけるMoの効果は主として焼入性の上昇と焼戻軟化抵抗の上昇、そして焼戻脆性の抑制である。このうち焼戻軟化抵抗は、焼戻温度の低下、また焼戻脆性の抑制は、焼戻後の急冷などで対応可能な場合が多いため、強靱鋼における省Mo化の取り組みは、焼入性の確保を主体として行われてきた。その取り組みは1960～1980年頃が中心であり、現在における取り組みは、多くはないと思われる。それは、熱処理を施すことなく所定の強度が得られる非調質鋼の実用化により、強靱鋼が使用されている部品の低コスト化は非調質鋼の適用が中心となったためと考えられる。以下に古い事例ではあるが、強靱鋼の省合金化の取り組みについて、材料開発および製造プロセスの取り組みについて述べる。

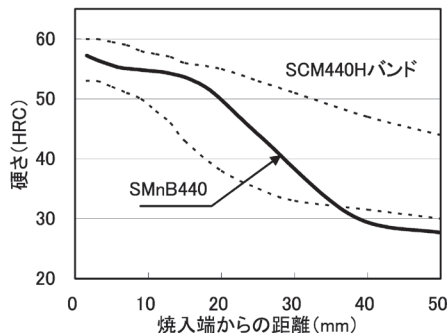


図2 Mn-B鋼 (SMnB440) のジョミニー曲線

4.1 省合金強靱鋼開発の取り組み

Cr-Mo鋼の省Mo化の取り組みは、その多くは微量の添加で焼入性向上効果の大きいBを活用したもの⁵⁻⁹⁾である。Bの焼入性に対する効果を安定的に得るには、焼入加熱時におけるB窒化物の生成を抑制し、オーステナイト中に固溶させる必要がある。そのため、Bを添加した鋼にはTiなどが添加されており、Tiなどの窒化物を生成させることにより、B窒化物の生成を抑制している⁸⁾。

Bを活用した省合金強靱鋼の一例として、Mn-B鋼⁹⁾ (SMnB440の例) について記述する。表1にSMnB440の化学成分を、図2にジョミニー曲線をJIS-SCM440HのHバンドと比較して示す。SMnB440は焼入端からの距離が近い場合にはSCM440のHバンドに対して、十分な硬さを確保可能であるが、焼入端から遠くなるに従い硬さが低くなる特徴がある。その理由は、Bによる焼入性の向上が冷却速度の速い場合に効果が出やすいためであり、SMnB440に限らず他のB添加の省合金鋼においても基本的には同様の傾向を示す。そのため、適用に際しては、部品質量を考慮する必要がある。

次にSMnB440の機械的性質を図3に示す。B添加による省Mo化においては、焼戻軟化抵抗が低下するため、同じ硬さを得るには焼戻温度の低下が必要になることが多い。SMnB440も同様であるが、Cr-Mo鋼と硬さを合わせる事により同等の機械的特性が得られる。

表1 Mn-B鋼 (SMnB440) の化学成分 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	B
SMnB440	0.40	0.25	1.50	0.20	—	0.02	0.0020

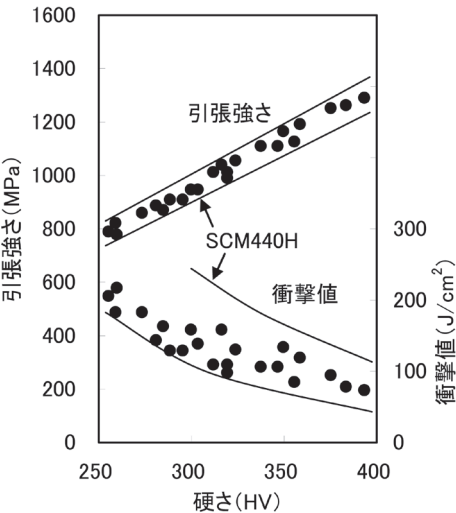


図3 Mn-B鋼 (SMnB440) の機械的性質

4.2 強靱鋼の製造プロセス技術の活用による省合金化

製造プロセスの取り組みとしては、鍛造焼入れがある。鍛造焼入れはオーステナイト域で熱間鍛造を行った後にその熱を利用し焼入れを行い、マルテンサイト変態させる方法であり、鍛造焼入れの狙いとして2つの考え方がある¹⁰⁾。1つは、熱間鍛造後にオーステナイトが再結晶を起こさないうちに焼入れを行い、加工硬化状態のオーステナイトからマルテンサイト変態させることで強度を向上させるという考え方である。もう1つは、熱間鍛造の温度が通常の焼入温度よりも高いことを利用し、熱間加工後に再結晶を進行させ、結晶粒の粗大化により焼入性を向上させるという考え方である。

強靱鋼における省合金化の取り組みとしては、後者の考え方を利用したものであり、鍛造焼入れの適用により、従来Cr-Mo鋼あるいはCr鋼が用いられていた部品において、炭素鋼への置き換えを可能とした¹¹⁾。また、鍛造焼入れは、鍛造の熱を利用して焼入れを行うため、従来の焼入れのための再加熱が不要となることから、省合金化に加えて省エネルギー化にも効果が大きい。

5 非調質鋼の省合金化の取り組み

非調質鋼は、前述したように自動車産業などを中心に、現在広く使用されている。従来の機械構造部品の多くは、強靱鋼を調質（焼入れ焼戻し）処理したものが使用されていたが、非調質鋼は熱間成形プロセスの制御により、調質処理を行わずに所定の強度が確保できるため、部品の熱処理費低減、工程簡略化による納期短縮、生産性向上など大きなコスト低減効果が期待でき、さらに省エネルギー、CO₂排出低減など環境面に対する貢献も大きいという特徴がある。

V添加中炭素鋼による機械構造部品の調質省略の可能性検討、および実用化の取り組みは、1972年頃西独にてはじめられた¹²⁾。日本においても1970年代後半から積極的に研究が

進められ、1980年前後に自動車用クランクシャフト^{13,14)}などにて実用化が開始された。これらの非調質鋼は0.40～0.55%Cの炭素鋼に適量のVが添加されたものであり、熱間成形後の冷却中にV炭窒化物がフェライト中に微細に析出することで、析出強化により強度が得られる鋼である。ただし、強度特性は強靱鋼と比較して十分ながらも韌性に劣るため、その適用部品は限られていた。しかしその後、図4¹⁵⁾に示すように組織制御技術により強度と韌性を両立する研究開発が行われ、フェライト・パーライト組織の微細化、低炭素ベイナイト組織の活用、マルテンサイト組織による強靱化により、韌性が要求される自動車用の足廻り部品にも適用されるようになった^{16,17)}。

非調質鋼は一般にVを含有し、韌性を高めたベイナイト鋼やマルテンサイト鋼などは更にCr、Mo、Bなどの合金元素を含有している。近年では非調質鋼においても省合金化のニーズは高く、様々な取り組みが進められている。

5.1 省合金非調質鋼開発の取り組み

非調質鋼における省合金化の材料開発の取り組みは、個別部品の必要強度に対して合金元素を最適化する取り組みが主体である。クランクシャフトにおいては、各部位の必要強度の詳細を明確化し、加工条件の見直しをすることで、Vを省略した非調質鋼が実用化されている¹⁸⁾。コンロッドにおいては、耐力比（耐力／引張強さ）に対するVの影響の見極めにより、座屈強度を損なわずにV添加量を従来の0.09%から0.05%に半減した非調質鋼が実用化されている¹⁹⁾。また近年ではコンロッドのロッド部とキャップ部を一体で鍛造した後に、破断分割させるクラッキングコンロッドの適用が広がっているが、破断分割性の確保のために衝撃値を低下させる必要があり、その方策として主にVやPの添加によりフェライトを強化し、脆化させることが検討されている^{20,21)}。クラッキングコンロッド用非調質鋼における省合金化の取り組みと

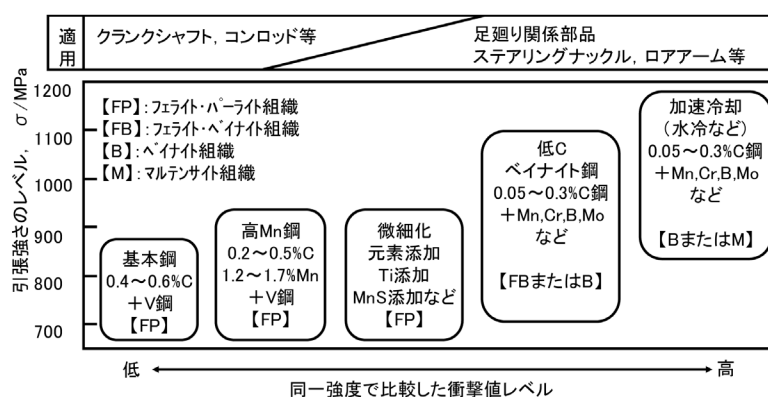
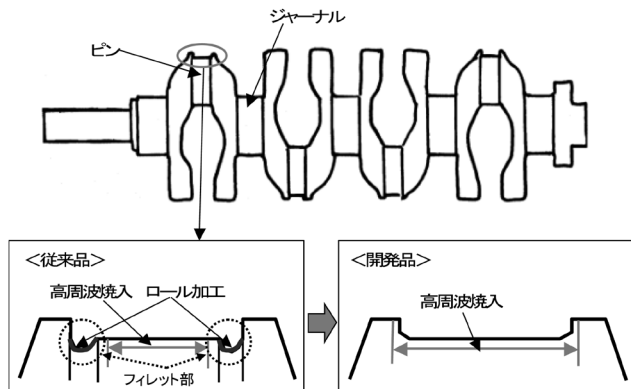


図4 熱間鍛造用非調質鋼における組織制御技術の推移と強靱性の位置付け¹⁵⁾

図5 クランクシャフトのフィレット強化法²³⁾

しては、Vを資源リスクの低いTiに代替した非調質鋼が開発されている²²⁾。Ti添加によるフェライト分率の低下、フェライトの析出強化により、破断分割性を確保することでV添加量の低減が実現された。

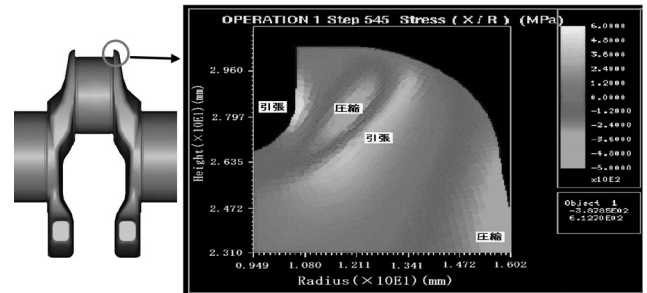
5.2 非調質鋼の製造プロセス技術の活用による省合金化

非調質鋼は、元来、熱間成形プロセスの制御、つまり加熱、熱間成形、冷却を制御し、組織を作りこむことで特性を確保する材料である。非調質鋼の製造プロセス技術を活用した省合金化の取り組みとしては、従来の非調質鋼の熱間成形プロセスのまま、部品の製造プロセスを最適化する場合と、熱間成形プロセスをより積極的に制御し、少ない合金量で強度を確保する場合がある。

まず、部品製造プロセスの最適化の取り組みについて述べる。クランクシャフトにおいては、その求められる機能として、ピン、ジャーナル摺動面における耐焼付性・耐摩耗性、そしてフィレット部の疲労強度が挙げられる。従来のクランクシャフトにおいては、ピン、ジャーナル摺動面には多くの場合高周波焼入れが施されており、高硬度化によって耐焼付性・耐摩耗性が確保されていたが、フィレット部については焼割れ、置割れが懸念されることから高周波焼入れは適用されず、図5²³⁾に示すように冷間ロール加工によって疲労強度が確保されていた。このロール加工による疲労強度向上は圧縮残留応力付与によるものであるが、V添加によって耐力が高くなるほど圧縮残留応力は増加することから、Vはロール加工による疲労強度向上に大きく影響する。したがって、省V化にあたってはフィレット部の疲労強度確保が課題であった。

そこで、図5に示すように摺動面に施す高周波焼入れの適用範囲をフィレット部まで拡大することで疲労強度を確保することによって省V化の検討が行われた。

フィレット部に高周波焼入れを適用するにあたっては、フィレット部周辺は形状起因により表面に引張残留応力が発

図6 クランクシャフトフィレット部周辺の高周波焼入れによる残留応力シミュレーション結果²³⁾

生するため、焼割れ、置割れが課題となる。そこで、材料面では従来のクランクシャフト用鋼に対してC量を低減した鋼種を適用するとともに、図6²³⁾に示すように熱処理シミュレーションを活用し熱処理後の組織と残留応力の分布状態を適正化させる条件の検討を行うことで、焼割れ、置割れの懸念を抑えたフィレット部への高周波焼入れが可能となり、V省略が実現された²³⁾。

コンロッドにおいては、鍛造条件変更によるフェライト・パーライト組織の最適化と熱間コイニング、およびショットピーニング工法の適用により、Vを省略した材料の適用を可能とした²⁴⁾。

次に、従来の非調質鋼の熱間成形プロセスをより積極的に制御する取り組み²⁵⁾について記述する。それらは必ずしも省合金化を目的にしたものではなく、高強度化、高靱性化などの高機能化を目的としたものも多いが、材料の特性をプロセスにより引き出すという意味合いにおいて、省合金化に繋がる技術である。

熱間鍛造においては、鍛造後の冷却を従来の連続冷却から、恒温変態により変態温度を低温に保つことで、微細な炭素化合物を析出させ高強度化を実現した例²⁶⁾や鍛造温度低減によるパーライト組織の微細化による高強度化、また、近年ではNEDO助成による国家プロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」において、部品特性の最適分布を実現する傾斜機能鍛造技術の開発がなされ、高強度と良好な機械加工性を両立させる新たな制御鍛造技術の確立への取り組みがなされてきた²⁷⁾。

また、非調質鋼には、クランクシャフトのような熱間鍛造用途の他に圧延材を直接切削する用途で使用される場合があるが、直接切削用途の省合金化として圧延設備に設置されたオンライン水冷装置を活用し、鋼材の表層のみを焼入れ—自己焼戻しすることで、強度と靱性を確保した省V鋼も開発されている²⁸⁾。

6 おわりに

今回、合金元素の価格高騰や枯渇、資源偏在性といった調達リスク、および低コスト化の観点から強靱鋼および非調質鋼における省合金化の取り組みを紹介した。合金元素の多くは採掘した鉱石中に含有される割合が非常に少ないため、精錬でのエネルギー消費や廃棄物処理といった環境負荷も課題となっている。特殊鋼の安定的な供給とともに環境負荷低減の観点からも省合金化技術への継続的な取り組みが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 加藤英久：まてりあ, 46 (2007) 3, 229.
- 2) 白神哲夫：第188・189回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (2006), 167.
- 3) 原田幸明：自動車技術, 63 (2009) 11, 4.
- 4) 経済産業省総合資源エネルギー調査会鉱業分科会 (第5回) 配布資料, (2008)
- 5) 山本俊郎：特殊鋼, 28 (1979) 11, 31.
- 6) 中沢喜与志：特殊鋼, 28 (1979) 11, 33.
- 7) 佐合修：特殊鋼, 28 (1979) 11, 38.
- 8) 上原紀興, 磯川憲二, 田中良治, 木村茂夫, 小島久義, 川道洋介：電気製鋼, 53 (1982) 1, 10.
- 9) 大木喬夫：愛鋼技報, 8 (1988) 1, 73.
- 10) 関口秀夫, 小島耕二, 鳥阪泰憲：材料, 38 (1989) 435, 1458.
- 11) 河部寿雄, 宮下春好, 朝日繁光, 中村守文：鍛造加工熱処理, 鍛造技術研究所, (1985), 14.
- 12) C.Frodl, A.Randak and K.Vetter : Härterei-Technisch Mitteilungen, 29 (1974) 3, 169.
- 13) 高橋政司, 酒井敏男, 大平直樹, 中瀬和夫：鉄と鋼, 66 (1980) 4, S522.
- 14) H.Hashimoto, Y.Serino, Y.Aoyama and K.Hashimoto : SAE Technical Paper Series, (1982), 820125.
- 15) 野村一衛：まてりあ, 34 (1995) 6, 705.
- 16) 前田干芳利, 安田茂, 石川秀雄：自動車技術, 43 (1989) 6, 79.
- 17) N. Iwama : SAE Technical Paper Series, (1995), 950211.
- 18) 岡田義夫：電気製鋼, 69 (1998) 1, 49.
- 19) 岡田義夫：第188・189回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (2006), 33.
- 20) 井上幸一郎, 中村貞行：電気製鋼, 71 (2000) 1, 81.
- 21) 上西健之：愛知製鋼技報, 32 (2015), 9.
- 22) 松ヶ迫亮廣：神戸製鋼技報, 61 (2011) 1, 75.
- 23) 杉本淳, 安達裕司, 水野浩行, 加茂聡：愛知製鋼技報, 29 (2012), 24.
- 24) 宮澤智則, 岡田義夫, 守屋悟, 山口雅史：自動車技術会学術講演会前刷集, 111-02 (2002), 9.
- 25) 吉田広明：第213・214回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (2013), 73.
- 26) 精密鑄造, 日本塑性加工学会・鑄造分科会編, 日刊工業新聞社, (2010), 288.
- 27) 梅本実：鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト 第2回シンポジウム, (2012), 93.
- 28) JFE技報, 23 (2009), 57.

(2015年9月7日受付)