

(解説)

高強度非調質棒鋼

High Strength Microalloyed Steels



池田正一
Masakazu Ikeda



阿南吾郎
Gorou Anan

Microalloyed steels have been developed and put into practical use to simplify the manufacturing process of automobile parts and to reduce manufacturing costs. In particular, high strength microalloyed steels have been applied to reduce the automobile weight. In this paper, the characteristics of high strength microalloyed steels and high strength/high toughness micro-alloyed steels, as well as automobile part application examples are introduced.

まえばき = 自動車のエンジンや動力伝達部品、足回り部品の多くは、素材として特殊鋼が用いられ、鍛造や切削、熱処理などの工程を組合わせて製造されている。近年、デフレの進行による低価格指向や安価な輸入品への対抗、また環境意識の高まりに伴い、自動車部品に対しても低価格化や製造工程の合理化が求められている。

このような動きに対応し、焼入れ・焼戻し処理や球状化焼鈍処理などの熱処理が省略可能な非調質鋼が、日欧の鉄鋼メーカーにより開発されてきた。さらに近年は、自動車の小型軽量化に伴って非調質鋼の高強度化が求められている。当社では、炉外精錬や連続鋳造、制御圧延などの鋼材の製造技術を活用しながら、部品の性能や加工性を損なうことなく熱処理省略可能な非調質鋼の開発を進め、多くの自動車部品で実用化させてきた。以下、当社で開発した高強度非調質鋼と高強度・高靱性非調質鋼に関し、その特徴と自動車部品への適用例について紹介する。

1. 非調質鋼の分類

非調質鋼の適用により、焼入れ・焼戻し処理などの調質処理に必要な労務費やエネルギーが削減でき、生産のリードタイムも大幅に短縮することが可能である¹⁾。またクランクシャフトなど形状が複雑な部品では熱処理歪みが低減可能であることから、焼入れ・焼戻し処理後の矯正や歪み取り焼鈍も省略することができる²⁾。

このような非調質鋼は部品の成形法の違いによって下記の3種類に分類される。

- 熱間鍛造用鋼
- 冷間加工用鋼
- 直接切削用鋼

図1に各タイプの非調質鋼の特徴と部品の加工工程を示す³⁾。の熱間鍛造用との直接切削用の非調質鋼は、

棒鋼から部品に加工される場合が多い。の冷間加工用非調質鋼は鍛造型と圧造型に分類され、前者は棒鋼から、後者は主にボルト用として線材から部品に加工される。

さらに熱間鍛造用の非調質鋼は、図2に示すように強度と衝撃特性に応じて、基本型非調質鋼、高靱性非調質鋼、高強度非調質鋼と高強度・高靱性非調質鋼の4種に分類される³⁾。基本型非調質鋼は、引張強度700~800MPaを有する中炭素鋼に少量のVを添加した鋼である。焼入れ・焼戻し処理を省略するため、熱間鍛造後の冷却過程においてフェライト部にVの炭窒化物を析出させるので、鍛造後冷却のままでも高い強度が得られる。高靱性非調質鋼は、基本型非調質鋼の低い衝撃強度を補うためC量を低減し、さらにC量低減による強度低下を補うMn, Crを増量したフェライト・パーライト鋼を基本成分としている。さらにSの増量添加による粒内フェライトの生成によって、組織の微細化を図っている⁴⁾⁵⁾。

以下では、高強度非調質鋼及び高強度・高靱性非調質鋼の特徴と実部品への適用例を紹介する。

2. 高強度非調質鋼の特徴

2.1 成分設計の考え方

高強度非調質鋼は、基本型非調質鋼を用いて製造されている部品の小型・軽量化や、合金鋼を用いて焼入れ・焼戻し処理を行って製造されている部品への適用を狙って開発された鋼である。したがって、高強度非調質鋼では機械的特性のうち耐力を高める必要がある。また部品の疲労強度を高めるためにも、耐力の向上は有効である。しかし部品の製造コストに大きな影響を与える被削性の低下は抑えなければならず、そのためには引張強度(硬さ)の増加を極力抑制しなければならない。以上の観点から、高強度で被削性の良好な非調質鋼を得るためには降伏比(耐力/引張強度)を高める必要がある。

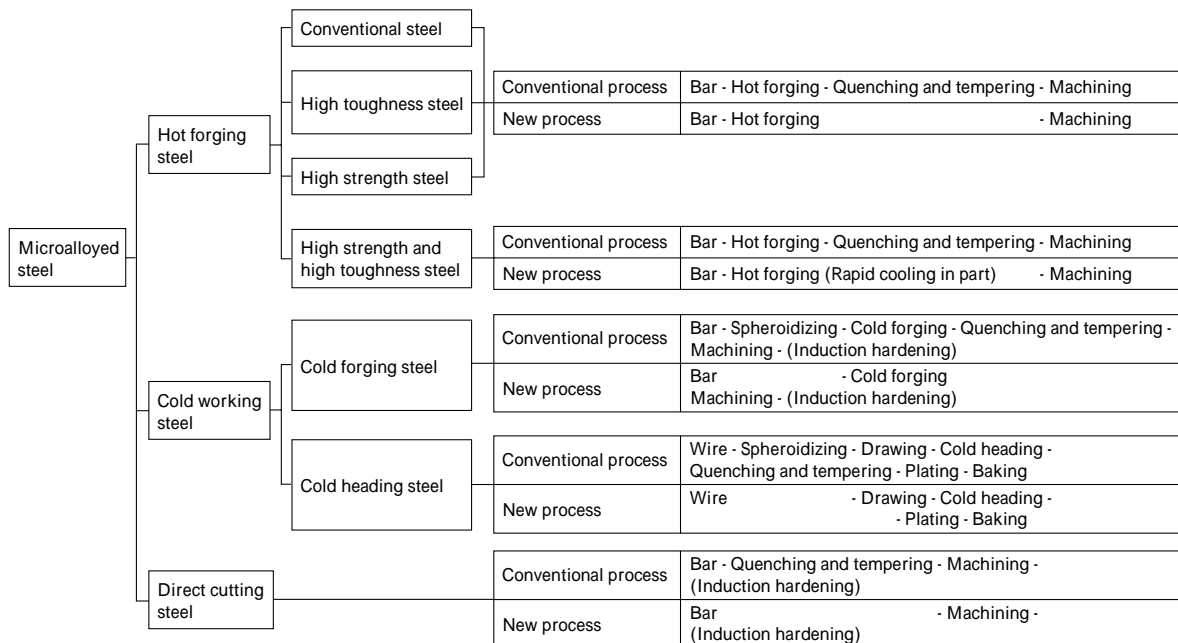


図1 非調質鋼の種類と特徴³⁾
Fig. 1 Classification of microalloyed steels

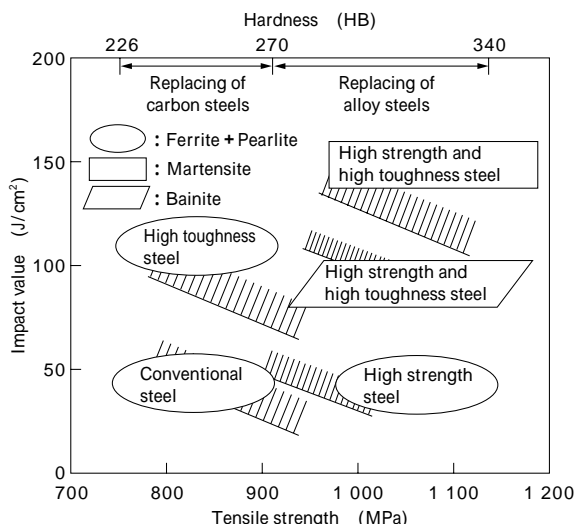


図2 各種熱間鍛造用非調質鋼の強度・靱性バランス³⁾
Fig. 2 Relationship between tensile strength and toughness in microalloyed steels

図3に、降伏比と疲れ限度比(疲労強度/引張強度)に及ぼすC, Si, P, V量の影響を示す⁶⁾。

(1) C量: C量を低減することによって、降伏比, 疲れ限度比をともに増大させることができる。

(2) Si量: Siを増量添加すると、降伏比, 疲れ限度比が増大する。

(3) P量: Pを増量添加すると、降伏比, 疲れ限度比が増大する。

(4) V量: Vは降伏比, 疲れ限度比を高める。ただし0.2%以上のVを添加しても効果は小さい。

以上より非調質鋼を高強度化するためには、C量の低減と、Si, P, Vの増量添加が有効である。しかしC量の低減は部品の耐力自体を低下させること、またSi, Pの増量添加によって被削性の低下が懸念されるため、V添加によって降伏比, 疲れ限度比を確保することとし、0.2%以上のVを添加することとした。

以上の知見をもとに成分設計した90キ口級高強度非調質鋼KNF33Mと100キ口級高強度非調質鋼KNF35Mを、表1に示す。

2.2 高強度非調質鋼の特性

2.2.1 機械的特性

表2に、当社開発の高強度非調質鋼KNF33Mの機械的特性を示す。基本型非調質鋼や焼入れ・焼戻し鋼と比較して耐力が大幅に向上している。

2.2.2 疲労強度

図4に平滑試験片での小野式回転曲げ疲労試験結果を示す。Pb添加によって快削性を付与した基本型非調質鋼

図3 降伏比, 疲れ限度比に及ぼすC, Si, P, Vの影響

Fig. 3 Effect of C, Si, P, V contents on yield ratio and fatigue limit ratio

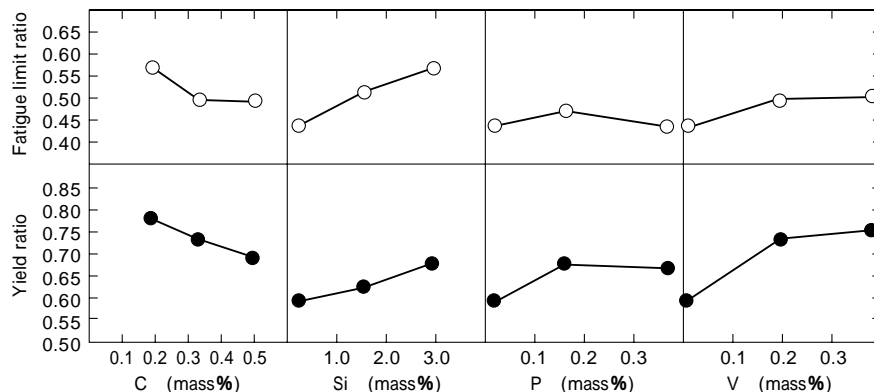


表1 高強度非調質鋼，高強度・高靱性非調質鋼の化学成分

Table 1 Chemical composition of high strength microalloyed steel and high strength and high toughness microalloyed steel

		C	Si	Mn	S	Cr	V	B
High strength microalloyed steel	KNF33M	0.30/0.36	0.15/0.35	1.35/1.65	0.040/0.070	0.20/0.60	0.08/0.20	-
	KNF35M	0.32/0.38						
High strength and high toughness microalloyed steel	KNF5MC	0.04/0.20	0.02/1.00	1.00/2.00	0.035	0.50/2.00	-	added
Conventional microalloyed steel	KNF43	0.40/0.46	0.15/0.35	0.70/1.00	0.035	0.20	0.04/0.12	-
JIS	S55C	0.52/0.58	0.15/0.35	0.60/0.90	0.035	0.20	-	-

Notes on Lead (Pb), Sulfur (S) content :
 ' S1 ' ; S2 ' ; L1 ' ; L2 ' may be present after the steel grade to indicate the presence of Lead (L1: 0.04-0.09, L2: 0.10-0.30) or Sulfur (S1: 0.040-0.070, S2: 0.080-0.120).

表2 高強度非調質鋼の機械的特性³⁾

Table 2 Mechanical properties of high strength microalloyed steel

	Hardness (HB)	Mechanical properties				Impact properties
		PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	RA (%)	$\sigma_{E_{20}}$ (J/cm ²)
High strength microalloyed steel (KNF33M)	280	676	911	22	50	50
Conventional microalloyed steel	258	554	847	19	38	38
JIS S55C	248	465	818	26	57	76

KNF43 と比較し，高強度非調質鋼 KNF33 と KNF35 は約 1.3 倍の疲労強度向上を達成している。

2.2.3 被削性

図5にドリル寿命試験結果を示す。高強度非調質鋼 KNF35 には，被削性を補うため S 増量，Pb 添加した。同じく Pb 添加によって被削性を補っている基本型非調質鋼 KNF43 と比較すると，高強度非調質鋼 KNF35 は引張強度が大幅に向上しているにもかかわらず，ドリル寿命は若干低下するにとどまっている。

2.3 実部品への適用例

以上のような特性を有する高強度非調質鋼は，高耐力，高疲労強度が要求される部品に適用されており，具体的にはコネクティングロッドやナックルスピンドルに適用されている。

3. 高強度・高靱性非調質鋼の特徴

3.1 成分設計の考え方

高強度・高靱性非調質鋼は引張強度が 900MPa 以上で

あり，優れた衝撃特性が要求される部品への適用を狙って開発された鋼である。図6に炭素量と強度，靱性との関係を模式的に示す⁷⁾。基本型非調質鋼ではマトリック

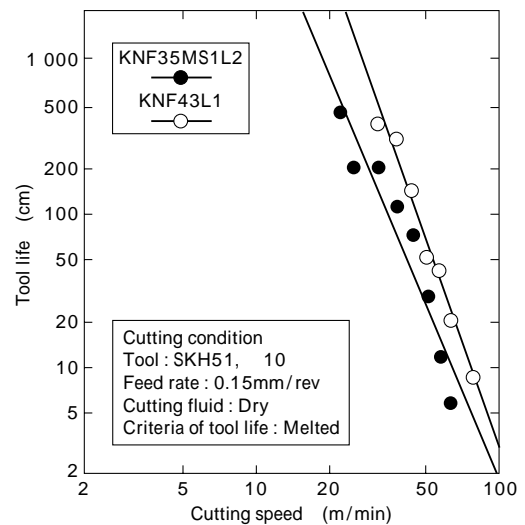


図5 ドリル寿命試験結果
Fig. 5 Results of tool life test in drilling

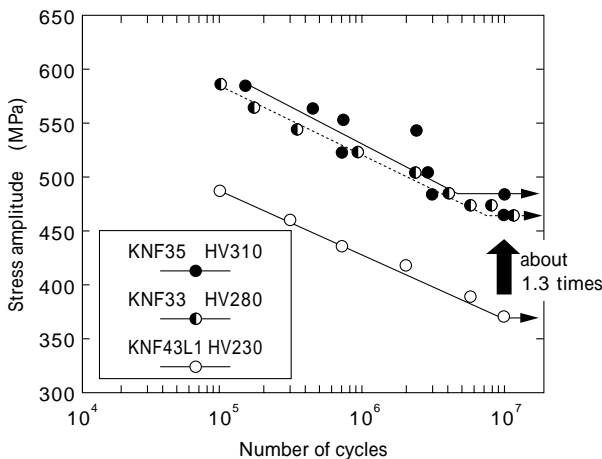


図4 回転曲げ疲労試験の結果
Fig. 4 Results of rotating bending fatigue test

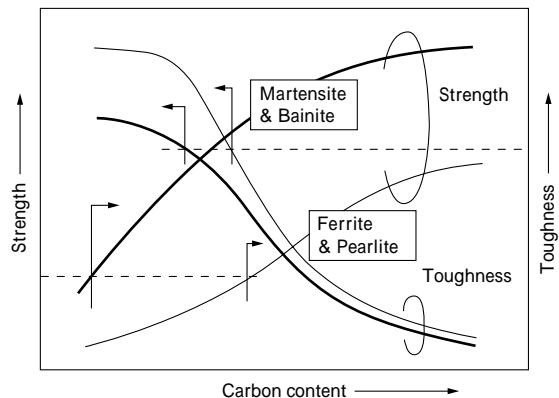


図6 炭素量と強度，靱性の関係模式図⁶⁾
Fig. 6 Schematic representation on relationship between strength and toughness and carbon content

スフェライト+パーライト組織とし、Vの炭窒化物による析出強化を利用しているが、パーライト量の増加による強化やVの炭窒化物による析出強化は靱性を低下させる。逆に炭素量を低減することによってパーライト量を低減させた場合には、高強度を確保することができない。したがって基本型非調質鋼のようにマトリックスをフェライト+パーライト組織とした場合には、強度と靱性の要求特性をともに満足する炭素量は存在しない。しかしマトリックスがベイナイトもしくはマルテンサイト組織である場合には、低炭素領域において強度、靱性の要求特性を満足する炭素量が存在する。したがって、高強度・高靱性非調質鋼では鋼材のC量を低減し、さらに熱間鍛造後の冷却時にベイナイト、もしくはマルテンサイト主体の組織となるように鋼材の化学成分を調整することによって、高強度と高靱性を達成している⁷⁾。

写真1に高強度・高靱性非調質鋼の組織写真を示す。写真1(a)の低炭素マルテンサイト型高強度・高靱性非調質鋼の場合、幅1 μm 以下の幅が狭い平行なラスから構成される部分(A部)と、内部に析出物を含む比較的幅の広い(1~2 μm)ラスから構成される部分(B部)の2種類から構成される組織が観察される。幅の狭いラスはベイニティック・フェライトであり、ラス界面には残留オーステナイトが存在している。それに対して、幅の広いラス状組織はオートテンパード・マルテンサイトである。すなわちラス状組織は、残留オーステナイトを含むベイニティック・フェライトとオートテンパード・マルテンサイトの混合した組織となっている。その結果、旧オーステナイト粒は多くの方位が異なるパケットに分割されているが、このパケット境界が擬へき開破壊のき裂伝播に対する抵抗となる。また残留オーステナイト以外のこれら構成組織自体も、炭素量が低いために高い靱性を有している。さらに炭素を多量に含有した残留オーステナイトは変形に対して安定であり、パケット内のき裂伝播の抵抗となる。以上の点が、低炭素マルテンサイト型高強度・高靱性非調質鋼の強度、靱性が高い理由である。

また写真1(b)のベイナイト型高強度・高靱性非調質鋼は、マトリックス中に比較的等軸の島状第二相を含む粒状組織となっている。マトリックスは低炭素のベイニティック・フェライトで靱性は高いが、マトリックス内に島状の第二相を含むのみで、擬へき開破壊のき裂伝播抵抗となる界面の数が少ない。しかし、本高強度・高靱

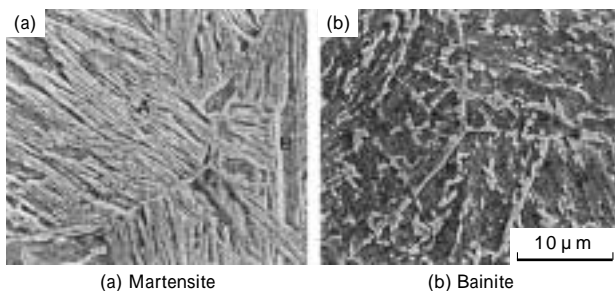


写真1 高強度・高靱性非調質鋼の組織
Photo 1 SEM micrographs of high strength and high toughness microalloyed steels

性非調質鋼の場合には、C量が低く、マトリックスの靱性が高いため、ベイナイト型高強度・高靱性非調質鋼の場合にも、その靱性は基本型非調質鋼と比べ同等かそれ以上になっていると考えられる。

以上より成分設計した高強度・高靱性非調質鋼 KNF5MCの成分を表1に示す。本鋼種成分の特徴として、低炭素鋼を用いた点、さらに低炭素化に伴う強度低下を組織制御で補った点が挙げられる。

3.2 高強度・高靱性非調質鋼の特性

3.2.1 強度と靱性の関係

図7に、当社高強度・高靱性非調質鋼 KNF5MCと従来鋼の強度と靱性の関係を示す。従来鋼としては、熱間鍛造用鋼としてよく用いられる調質タイプの中炭素鋼 S45C、中炭素低合金鋼 SCr440、及び非調質タイプの中炭素V添加鋼(0.48C-0.1V鋼)の結果を示した。これらの結果より、高強度・高靱性非調質鋼の水冷材は、中炭素低合金鋼であるJIS SCr440と同等以上の引張強度でも高い靱性を有している。また高強度・高靱性非調質鋼の空冷材は、中炭素鋼であるJIS S45Cや中炭素V添加鋼と同じ引張強度でも同等以上の靱性を有していることがわかる。

3.2.2 被削性

図8に高強度・高靱性非調質鋼 KNF5MCのドリル摩耗試験結果を示す。中炭素低合金鋼JIS SCr440と比較すると、高強度・高靱性非調質鋼 KNF5MCは同等の引張強度で高い靱性を有しているにもかかわらず、ドリル寿命はSCr440よりも改善されている。

3.3 実部品への適用例

以上の特性を有する高強度・高靱性非調質鋼は、ロアームやナックルスピンドルなどの足回り部品に適用されており、部品重量で10~15%の軽量化のほか、焼入れ・焼戻し処理の省略による5%程度のエネルギーコスト

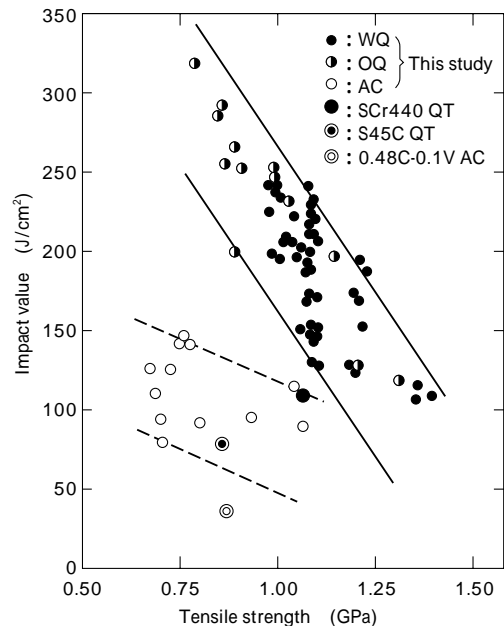


図7 高強度・高靱性非調質鋼と従来鋼の強度と靱性の関係⁶⁾
Fig. 7 Relationship between impact value and tensile strength in high strength and high toughness microalloyed steels and medium carbon steels

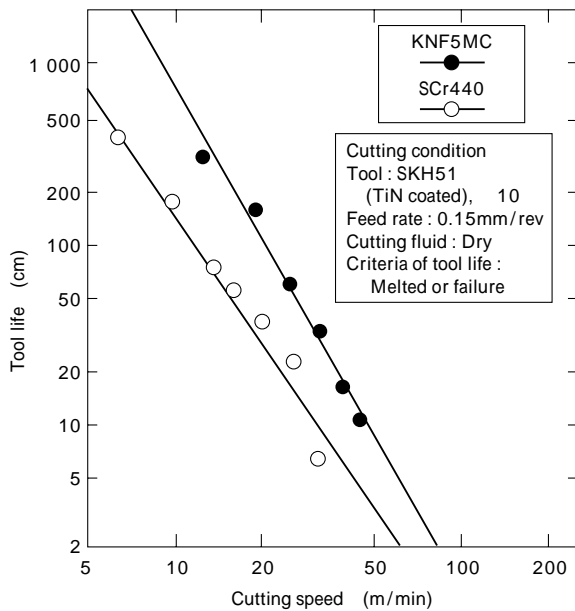


図8 ドリル寿命試験結果
Fig. 8 Results of tool life test in drilling

削減や生産リードタイムの短縮も可能となっている。

むすび= 当社の開発鋼種を中心に高強度非調質鋼，高強度・高靱性非調質鋼について紹介した。熱間鍛造後の焼入れ・焼戻し処理などが省略可能な非調質鋼は，自動車メーカーの低価格・低コスト指向に従って足回り部品をは

じめとする各種部品に採用されてきている。今後，燃費を改善するための車体軽量化の目的から，さらなる高強度・高靱性を有する非調質鋼が要求されるようになると考えられる。その際には，高強度化，高靱性化しつつも従来と同程度の被削性，鍛造性を確保しておく必要がある。今後，非調質鋼の採用を拡大していくためには，自動車メーカーや部品メーカーと鋼材メーカーが連携し，部品に対する最適な鋼種と加工条件の組合わせを定めていく必要がある。

参考文献

- 1) 前島敬一ほか：鍛造技報，Vol.53 (1993) p.4.
- 2) 門脇恵洋ほか：自動車技報，Vol.39, No.8 (1985) p.927.
- 3) 松島義武ほか：R & D神戸製鋼技報，Vol.47, No.2 (1997) p.46.
- 4) 子安善郎ほか：製鉄研究，Vol.337 (1990) p.42.
- 5) 中村守文ほか：鉄と鋼，Vol.73, No.13 (1987) p.77.
- 6) 松島義武ほか：材料とプロセス，Vol.5 (1992) p.781.
- 7) 勝亦正昭ほか：日本金属学会報，Vol.31, No.6 (1992) p.547.