

# 熱間鍛造用非調質鋼の強度と靱性に 及ぼす合金組成の影響

千葉貴世\*・池下庄三\*・小林一博\*・佐藤紀男\*

Effects of Alloying Element on Strength and Toughness of Microalloyed Steels

Takayo Chiba, Shozo Ikeshita, Kazuhiro Kobayashi, Toshio Sato

**Synopsis :** Microalloyed steels have been widely used as substitutes for hardened and tempered carbon steels since they can remarkably reduce production costs of machine parts. Recently, this trend of microalloyed steels extends to the field of alloy steels. It is most important to minimize toughness drop over 1000MPa range of tensile strength for achieving higher strength comparable to alloy steels. In this paper, we examined and summarized the effect of every alloying element on strength-toughness and gave the guideline to develop high strength and toughness microalloyed steels.

**Key words :** microalloyed steel; mechanical property; microstructure; grain size; alloying element.

## 1. 緒言

非調質鋼は、調質せずに所要の機械的性質を得るものであり、熱処理コストの低減および製造工程のリードタイムの短縮ないし物流コストの低減等、大きなコストダウン効果が期待出来るため、従来より炭素鋼を主体として、調質鋼からの転換が進められてきた。特に最近では、経済情勢の変化に伴うコストダウン指向が一層強まる中で、更に合金鋼の非調質鋼化が進みつつあり、引張強さ1000MPa以上の高強度非調質鋼の開発が必要になっている。1000MPa以上の高強度域では、一般的に靱性が急激に低下する領域と言われている<sup>1)</sup>。非調質鋼の強度はV、Nb、Ti等の炭化物または窒化物の析出強化<sup>2)</sup>を主体に、熱間加工時の比較的粗いオーステナイトから生成するパーライトないしベイナイト組織による強化と合金の固溶強化等に基づくものであるため、基本的に靱性に問題があり、非調質鋼の靱性の改善は、高強度化における最重要課題である。従来より非調質鋼の靱性改善方法としては①直接切削用鋼に対する制御圧延の適用<sup>3)</sup>、熱間鍛造用鋼に対しては②TiNによる細粒化<sup>4)</sup>および③非金属介在物による粒内フェライト生成の促進<sup>5)</sup>等の組織制御技術がある。①の低温域を使う加工技術は熱鍛には不適であり、また②、③はフェライト・パーライト系鋼には有効であるが、1000MPa以上のベイナイト系鋼では効果が不明確である。一方、低炭素ベイナイト系鋼が高靱性であることは良く知られており<sup>6)</sup>、鋼組成上、強度-靱性バランスの適正値を見出せる可能性が示唆されている。当社もこの観点から、高強度高靱性非調質鋼の開発を意図

して、種々成分系の検討を行ってきたが、逐次積上げの個別評価であった。そこで、これまでの開発鋼の強度-靱性バランス上の位置づけおよび今後の高強度高靱性非調質鋼開発指針を明確にすることを目的として、広範囲な鋼組成の非調質鋼における、合金組成と強度-靱性の関係を総合的に検討した結果、一つのマクロ的指針が得られたと思われるので報告する。

## 2. 供試鋼および実験方法

供試鋼の化学成分をTable 1に示す。比較鋼としてSCおよびSMn調質鋼を溶製した。SC-V鋼は炭素鋼にVを添加したものであり、SMn-V鋼、SMn-Si-V鋼はさらにMnおよびSi量を高め、強度および靱性の向上を図ったものである。さらに、最近の自動車の省燃費化および高出力化による車両の軽量化の要求に応じたSMn(高)-Cr-V鋼は、より高強度および高靱性を有する鋼である。この一部には、熱間鍛造温度での結晶粒度改善を目的として、Ti添加、Al、N増量したものも含めた。以上の材料を100kg真空溶解炉により溶製し、これを1473Kで直径30mmの丸棒に鍛伸した。また一部の材料については、鍛造時の結晶粒度の影響を見るため1373~1523Kで加熱、放冷を行った。これらの材料の中心部からJIS 3号衝撃試験片およびJIS 4号引張試験片を加工して機械的性質の評価を行った。また、回転曲げ疲労試験は直径8mmの平滑試験片を用いて行った。さらに、被削性についてはドリル穿孔性試験により評価した。この場合ドリルは直径8mmのJIS標準ドリルSKH51

\* 研究開発本部技術研究所研究第二室

を使用し、ドリル刃先に一定の荷重686Nを負荷し、回転数925rpmで直径65mmの試験片を10mm穿孔したときの平均時間を比較した。

Table 1 Chemical composition. (mass%)

Steel	C	Si	Mn	Cr	V	Note
S35C~75C	0.35~0.75	0.25	0.75	0.05	—	Harden and temper
SMn35~60	0.35~0.60	0.25	1.25	0.05	—	
SC-V	0.35~0.55	0.25	0.75	0.05	0.10	Conventional
SMn-V	0.35~0.55	0.25	1.25	0.05	0.10	
SMn-Si-V	0.35~0.55	0.80	1.25	0.05	0.10	
SMn(high)-Cr-V	0.10~0.20	0.25	2.00~2.20	1.00	0.10~0.20	High strength and toughness
	0.28~0.40	0.25	1.50~2.00	0.50~0.75	0.10	

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 硬さに及ぼす合金組成の影響

Fig. 1 にC当量と硬さの関係を示す。この場合C当量は、よく使用されている<sup>7)</sup>以下の式を使用した。

$$C \text{ 当量 } (\%) = C + 1/7Si + 1/5Mn + 1/9Cr + 1/2V \quad (1)$$

フェライト・パーライト組織では、硬さは、上式のC当量と良い相関を示す。したがって、各合金元素は上式に示される係数に応じた寄与をしていると見られる。即ち、Cによるパーライト分率増による硬化が最大であり、次にVのフェライトへの析出硬化が大きく、以下Mn、Si、Crはフェライトへの固溶強化を示すと思われるが、Mn、Siが通常言われる<sup>8)</sup>強化の順位と異なっているのは、Mnのパーライト分率増加効果<sup>9)</sup>とが重複しているものと思われる。一方、ベイナイト組織となる合金組成では、上式のC当量と硬さの関係から、著しく高硬度側に偏倚する。これはパーライト組織よりベイナイト組織による強化が大きいことと合金元素の寄与の仕方が異なっているためであり、フェライト・パーライト組織における強化機構を前提とした(1)式を使用する意味がないと思われるので、あらためて重回帰により係数を求めると式(2)を得る。

$$C \text{ 当量 } (\%) = C + 1/6Si + 1/4Mn + 1/5Cr + 1/4V \quad (2)$$

Si、Mn、Crの係数は焼入性倍数に類似の序列を示し、Vの寄与率は相対的に低下しており、ベイナイト組織による強化の寄与率の高いことがわかる。Fig. 2 に式(2)によるC当量とベイナイト鋼の硬さの関係を示す。C当量に対する硬さの上昇率（直線の勾配）は、フェライト・パーライト組織のそれに比べて約2倍と高い。以上より、合金元素の硬さに及ぼす影響は、各元素の寄与の程度を係数として加算したパラメータ—C当量により、定量的評価が可能であり、所要の硬さを得るには対応するC当量とする合金組成を選定すればよい。但しフェライト・パーライト組織では、C当量を1.0まで上げて硬さ300HBが限界であり、それ以上の硬さを必要とする場合には、ベイナイト組織とする合金組成の選定が必要である。

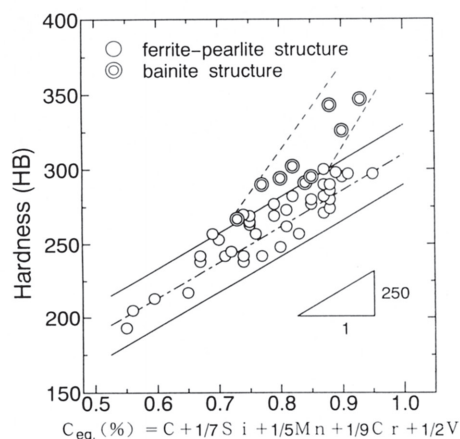


Fig.1 Relation between carbon equivalent and hardness.

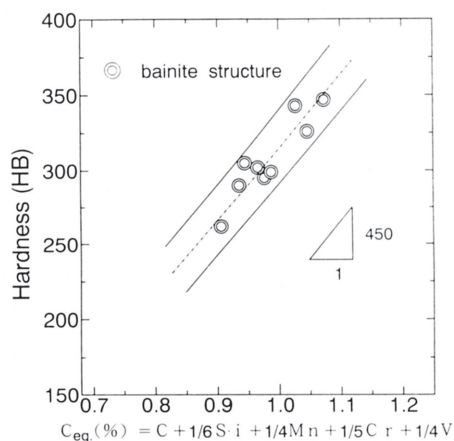


Fig.2 Relation between carbon equivalent and hardness.

#### 3・2 静的引張強度に及ぼす合金組成の影響

Fig. 3 に硬さと引張強さおよび0.2%耐力の関係における基本成分系の影響を示す。

##### (1) 引張強さ

調質鋼と非調質鋼の差異および非調質鋼における成分系の差異による特異性は全く認められず、引張強さは硬さのみによって決定されると言える。したがって3・1より硬さはC当量に置き換えることができるので、引張強さに対する合金組成の影響は硬さに対する影響と同一と見られる。3・1項で述べたように300HBに対応する引張強さ1000MPa以上とするには、ベイナイト組織に合金組成の選定が必要である。

##### (2) 0.2%耐力

調質鋼に比べて非調質鋼は、耐力比が低い非調質鋼の中では、SMn-Si-V系までのフェライト・パーライト系鋼では硬さの上昇による（それぞれの成分系でC量の増加に対応する）耐力の増加程度よりも、同一硬さで比較した成分系の差異（合金量の差異）による耐力増加程度の方が大である。特に高Si系では調質鋼に近い耐力を示している。硬さや引張強さは系の総合的、平均的特性であるのに対して、降伏応力は系の最弱点部に支配されると考えられ、フェライト・パーライト組織ではSi>Mn>Crの順でフェライト強化元素の添加量が増す程、降伏応力が増加している。この点では、今回の0.1%に固定しているがVの増加も同様の効果をもたらすと考えられる。

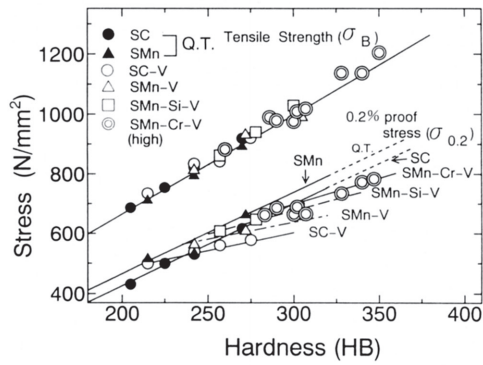


Fig.3 Relation between hardness and tensile properties.

### 3・3 疲労強度

Fig. 4 に平滑試験片での回転曲げ疲労限と引張強さの関係を示す。成分系によらず、調質鋼の平均的レベルである、疲労比0.5前後で引張り強さに応じた疲労限を示す。疲労強度に及ぼす鋼組成の影響は静的強度と同様と見られる。

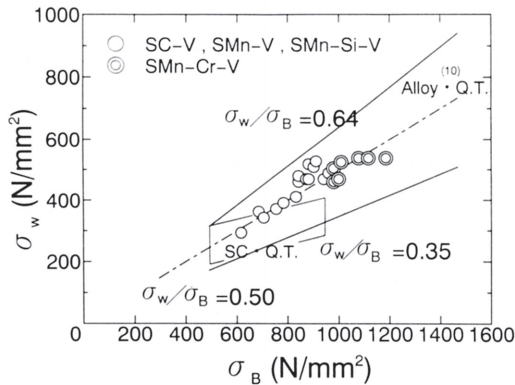


Fig.4 Relation between tensile strength and endurance limit.

### 3・4 衝撃値に及ぼす合金組成の影響

Fig. 5 に、硬さと衝撃値の関係に及ぼす合金組成の影響を示す。各成分系共、硬さが上昇する程衝撃値は低下する。非調質鋼間での成分系による比較では見掛け上、合金量の多い系ほど同一硬さにおける衝撃値は高い。3・1より硬さはC当量に対応しており、同一硬さ(=同一C当量)で合金量が多いことは、C量が低いことでもあるので、C量をパラメーターとして整理し直したものがFig. 6である。合金量を増すほど衝撃値が高くなると見るよりは、C%を低減する程、衝撃値が高いとみるのが妥当である。また、各C%範囲での硬さ-衝撃値の関係において、そのパラッキに対する成分系による偏りは特に認められず、C以外、特定の合金元素(Mn, Si, Crの中で)が特に衝撃値に影響を与えているという傾向は見られない。以上より、衝撃値は、ほぼC%と硬さ(または引張強さ)により決定されており、C以外の個々の合金元素の種類による影響は認められない。C当量を通して硬さに反映される加算的な効果と見ることが出来る。

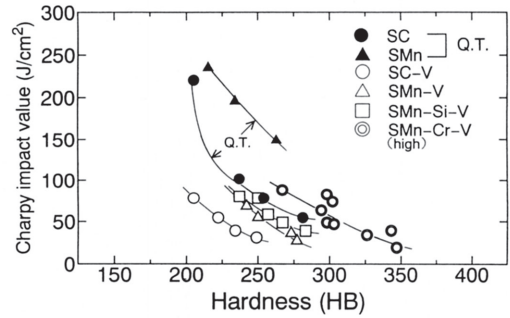


Fig.5 Relation between hardness and Charpy impact value.

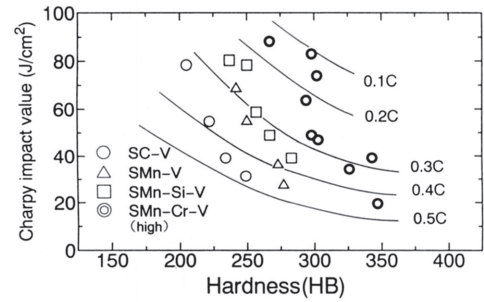


Fig.6 Effect of carbon content on hardness-impact balance.

### 3・5 ベイナイト系鋼の衝撃値に及ぼす結晶粒度の影響

非調質鋼の靱性改善については、上記の如く、特に高強度側では低炭素化が最も有効な手段であるが高周波焼入用鋼の場合には自からそれにも限界があり、別の方策が必要とされる。0.3%C、1000MPa級のベイナイト系鋼につき、微量TiおよびAl, Nの増量による、熱間鍛造組織における旧結晶粒度への影響およびその衝撃値に対する影響について調査した結果を示す。Fig. 7 に鍛造加熱温度と旧結晶粒度の関係を示す。鍛造加熱温度の低いほど旧結晶粒度は小さくなるが、Ti添加鋼はよりその程度が顕著であり、通常加熱温度で粒度は4.5から6.0へ細粒化される。また、Fig. 8 に旧結晶粒度と衝撃値の関係を示す。Ti添加鋼の細粒化により衝撃値は改善されるが、フェライト・パーライト系鋼での効果<sup>11)</sup>から期待されるほどの効果は見られない。

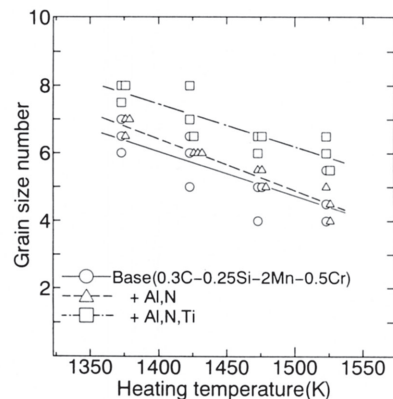


Fig.7 Relation between heating temperature and austenite grain size number.

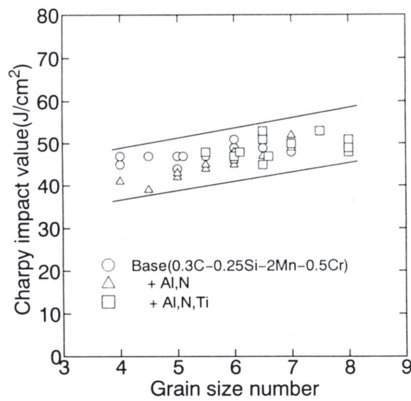


Fig.8 Relation between austenite grain size number and Charpy impact value.

### 3・6 ベイナイト系非調質鋼のドリル穿孔性

高強度化に伴ない、靱性低下以外に、被削性の低下も懸念される。Fig.9に調質鋼、フェライト・パーライト系非調質鋼およびベイナイト系非調質鋼のドリル穿孔性テスト結果を示す。何れも硬さの上昇に従い、一定深さの穿孔に要する時間 (Drillability Index) は長くなるが、硬さに対する依存性はフェライト・パーライト系鋼とベイナイト系鋼で差は認められず、特にベイナイト組織の悪影響は認められない。また、同一硬さでの比較では非調質鋼が調質鋼に被削性で劣ることはなさそうである。

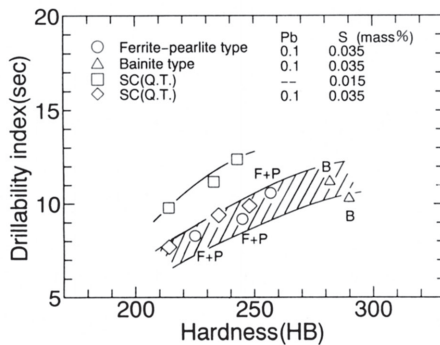


Fig.9 Relation between hardness and free machining additives on drillability.

## 4. 結論

これまで当社が開発してきた広範な組成の非調質鋼により、特に強度と靱性の関係に及ぼす合金組成の影響につき総合的に検討した結果以下の結論を得た。

(1)硬さに対する合金元素の影響は、それぞれの効果を加算したパラメーター (C当量) により評価出来る。個々の元素の寄与率は、以下の式における係数である。

①フェライト・パーライト組織に対しては次式によるC当量と硬さに良い相関がある。

$$C \text{ 当量 } (\%) = C + 1/7Si + 1/5Mn + 1/9Cr + 1/2V \quad (1)$$

②ベイナイト組織に対しては、上式では硬さと一次の関係が得られず、新たに係数を算出し以下の式を得た。

$$C \text{ 当量 } (\%) = C + 1/6Si + 1/4Mn + 1/5Cr + 1/4V \quad (2)$$

③フェライト・パーライト組織におけるC当量-硬さの

関係における勾配はベイナイト組織におけるその1/2であり、C当量増による硬さ増には限度があり、300HB以上とするには、ベイナイト組織にする必要のあることがわかった。

(2)静的引張強さは、硬さと完全に一次の関係にあり、合金組成の影響は硬さに対するのと同じであるが、0.2%耐力(または降伏応力)には、合金組成の影響があり、フェライト・パーライト系ではフェライト強化元素の多い程、降伏比が高くなる。

(3)疲労強度は、合金組成によらず疲労比がほぼ0.5前後であり、引張強さに応じた強度を示す。

(4)衝撃値は、ほぼC%と硬さ(または引張強さ)により決定され、C以外の個々の合金元素の種類 (Mn、Si、Cr) による影響は認められない。これらはC当量を通じ、加算的效果として硬さに反映される。

(5)以上より、C%をパラメーターにすれば、合金組成と強度-靱性の関係は極めて単純な図式化が可能であり、今回検討した組成範囲に対して、図10を得る。個々の鋼種特性の位置づけが明確になり、また強度、靱性ともに指定される場合の合金設計指針ないしその可否判断の目安となる。

(6)靱性向上に関しては、細粒化効果も検討した。Ti添加による細粒化効果は認められるが、それによる衝撃値改善効果は、フェライト・パーライト系鋼における程顕著ではなかった。

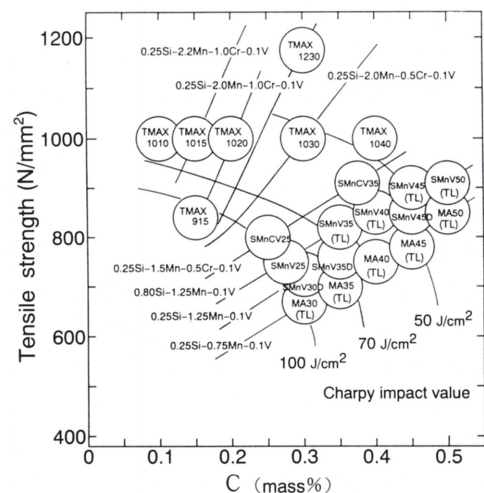


Fig.10 Steel selection standards.

## 文 献

- 1) G.Krauss and S.K.Banerji: Fundamentals of Microalloying Forging Steels (1986), The Metallurgical Society.
- 2) 勝亦正昭: 第104、105回西山記念講座 “マイクロアロイング技術の最近の動向” (昭和60年), p.173 (日本鉄鋼協会)
- 3) 小新井治朗, 今府基久, 澤田裕治, 中村守文: 神戸製鋼技報, 34 (1984), p.69
- 4) 子安善郎, 高田啓督, 高橋稔彦, 竹田秀俊, 石井伸幸: 製鉄研究, 337 (1990), p.41
- 5) 子安善郎, 蟹澤秀雄, 越智達朗, 柳瀬雅人, 高田啓督, 内藤賢一郎, 石川房男: 新日鉄技報, 343 (1992), p.30
- 6) 白神哲夫, 松本和明, 鈴木伸一, 石黒守幸, 城戸 弘, 阿部 隆: 日本鋼管技報, 122 (1988), p.153
- 7) 例えば脇門恵洋, 野村一衛: 自動車技術, 9 (1985), p.927
- 8) R.Jonck: Revue de Metallurgie, 9 (1962), p.41
- 9) 鉄鋼と合金元素 (上) (日本学術振興会製鋼第19委員会編) (1966), p.481 [誠文堂新光社]
- 10) 金材技研疲れデータシート資料1 (1981), [金属材料技術研究所]
- 11) 横溝良雄: 熱処理, 24 (1984), p.264