

技術資料



Technical Paper

Mo-V 添加低炭素鋼の時効硬化特性に及ぼす合金元素の影響

木村和良*, 高田勝典*, 保母 誠*

Effect of Alloying Element on Age-Hardening Characteristic of Mo-V Added Low Carbon Steel

Kazuyoshi Kimura, Katsunori Takada, and Makoto Hobo

Synopsis

The age-hardening type bainite microalloyed steel that has high strength was examined compared with conventional ferrite perlite type microalloyed steel.

The age-hardening characteristics of bainite when Mo, V, Nb and Ti was added individually to carbon steels was investigated, and the order of age-hardening amount was $Mo > V > Nb > Ti$. The amount of age-hardening was enhanced when V and/or Ti was added together with Mo.

The temperature, which showed highest age-hardening, was 898K.

The matrix structure of Mo-V co-added SCR415 (JIS standard) was varied in three types, which are martensite, bainite and ferrite perlite structure, by using different heat treatment.

The order of the hardness after age-hardened steels were martensite > bainite > ferrite perlite and it is the same order as the steels before the hardening treatment. However only the bainite steel was hardened greatly after aging.

The developed steel is highly useful in industrial application since it is comparably soft before heat treatment and can be made harder after aging treatment applied.

The developed steel obtains 900 MPa or more of tensile strength and the same amount of proof strength as thermal refining steels.

As for rotary bending fatigue limit, this steel showed 1.5 times as high as the conventional microalloyed steels.

1. 緒 言

熱間加工後に焼入・焼戻し（調質処理）を省略することができる非調質鋼は機械構造部品に広く利用されている¹⁾²⁾。従来の非調質鋼の多くは中炭素鋼に微量のバナジウムを添加したフェライト・パーライト型であり、その引張強度は 700 ～ 900 MPa 程度であった³⁾⁴⁾。

近年では、中炭素低合金鋼の調質材に匹敵する 900 MPa 以上の高強度非調質鋼の開発が強く要求されている。しかしながら、900 MPa 以上の強度を得るためには組織がほぼパーライト単相になるまで炭素量を高めなければ

ならず、靱性が著しく低下する問題がありフェライト・パーライト型非調質鋼の高強度化は困難と考えられてきた。そこで、フェライト・パーライト型非調質鋼に比べ強度および靱性に優れたベイナイト型非調質鋼の開発が進められている^{5)～10)}。

ベイナイト型非調質鋼は熱間鍛造後の空冷においてベイナイト組織となるように成分を調整された鋼であり、最近では靱性を改善するため C 含有量を低減し、Mn, Cr, V および B を添加した低炭素ベイナイト型非調質鋼の研究が行われている^{11),12)}。しかしながら調質鋼に比べ耐力の低いベイナイト型非調質鋼は、同一硬さにおける

疲労強度および座屈強度が低いことが問題視されている。耐力を向上させるため単純に硬さを上げれば被削性を劣化させ、工業的に利用されにくいものとなる。したがって、ベイナイト型非調質鋼は鋼板の分野では工業的に広く利用されているが、条鋼の分野ではナックルスピンドル、コンロッドおよび足回り部品として利用されている例^{13),14)}はあるが、鋼板に比べその実用化例は少ない。

耐力を上昇させるため合金元素の影響を調査したり、熱処理方法も含めた製造方法を検討するのは重要であろう。しかし、900 MPa以上の強度を得るためには硬さの上昇は避けられず、それに伴う被削性の劣化を解決しなければならない。

筆者らは以上の点をふまえて、高強度でかつ被削性に優れた時効硬化型ベイナイト非調質鋼の開発に取組、機械加工時には軟らかく、時効熱処理後に900 MPa以上の強度を得るための合金元素の影響について調査を行った。その結果、Mo-V複合添加低炭素鋼が強度・被削性バランスに優れていることが判明したため、以下にその特性について報告する。

2. 時効硬化処理の課題

2.1 析出強化機構の選定

ナノ析出物による時効析出強化としては、例えば熱間工具鋼のような炭化物の二次析出によるものやマルエージング鋼のように金属間化合物の析出によるものがある。また、フェライトやマルテンサイト組織においてCuを析出させる時効硬化鋼などもある^{15~17)}。しかし、マルエージング鋼は高合金でありコストや加工性の点で、Cu析出鋼は熱間加工性が有害であり機械構造用鋼には好ましくない。一方、フェライト・パーライト型非調質鋼に炭化物生成元素であるMo, V, Nb, Ti, Cr, Wなどを含有した二次析出強化は韌性に問題がある。本報で紹介する低炭素ベイナイト型非調質鋼は高韌性であると報告されているが¹⁸⁾、析出強化を伴ったものについての報告例は少なく、強度・韌性バランスに優れているか明確にする必

要がある。

2.2 時効硬化量の最大化

炭化物を用いて析出強化を図る場合、炭化物生成元素であるMo, V, Nb, Ti, Cr, Wなどを含有させる必要がある。一方、これら合金元素は鍛造後の硬さを高める元素でもあるため、多量の添加は被削性の低下を招く。したがって、時効硬化量が大きくかつ、熱間鍛造後の硬さを上昇させない元素の選定が必要となる。また、時効硬化量はその熱処理温度、時間に大きく影響を受けるため、合金元素とピーク時効の関係性を調査する必要がある。さらに、時効硬化量を最大化するための母相組織の影響についても明確にしておく必要がある。

3. 時効硬化量を最大化するための基礎評価

3.1 時効硬化特性に及ぼす合金元素の影響

JIS 鋼 SCR415H をベースにMo,V,Nb,Ti元素を種々単独、あるいは複合添加した供試材を用い、時効硬化量と合金元素の影響を調査した。Table 1にその化学成分を示す。Steel ①~④タイプはMo,V,Nb,Tiを単独添加、Steel ⑤~⑧タイプは複合添加した鋼である。また、母相組織をベイナイト単相にするためMn-Crで調整を行っている。供試材は熱間鍛造後、1273~1573 Kで1時間の固溶化熱処理を実施した44 B × 10 Lの板形状試験片を用いた。時効処理は873 Kで2時間加熱保持し、その後室温まで空冷した。

Fig.1に時効処理前の代表的なミクロ組織写真を示す。いずれの供試材においてもベイナイト単相であることを確認した。Fig.2に時効硬化前後の硬さに及ぼす合金元素の影響、Fig.3にSteel ①~④の合金添加量と時効硬化量の関係を示す。Moは添加量の増加に伴い時効硬化量も単調に増加する。Vは0.5 mass%までは増加するが、それ以上添加しても時効硬化量は△HRC 1.5程度で飽和、あるいは低下する。Nbは添加量によらず時効硬化は△HRC 1.0となった。Tiにおいては時効硬化を示さなかった。また複合添加鋼は単独添加鋼に対し時効硬化特性に

Table 1. Chemical compositions of specimens (mass%).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	Ti
① Mo	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.30	0.40 ~ 2.20	0.15 ~ 0.85	1.0 ~ 3.0	—	—	—
② V					—	0.15 ~ 1.0	—	—
③ Nb					—	—	0.04 ~ 0.10	—
④ Ti					—	—	—	0.10
⑤ Mo+V					1.6	0.2	—	—
⑥ Mo+Nb						—	0.08	—
⑦ Mo+Ti						—	—	0.07
⑧ Mo+V+Nb						0.2	0.08	—
⑨ Mo-V,Nb	0.20	0.25	0.40	0.60	1.2 ~ 3.0	0.2 ~ 0.6	0 ~ 0.08	—
⑩ Mo-V	0.15	0.25	0.65	0.70	1.5	0.2	—	—

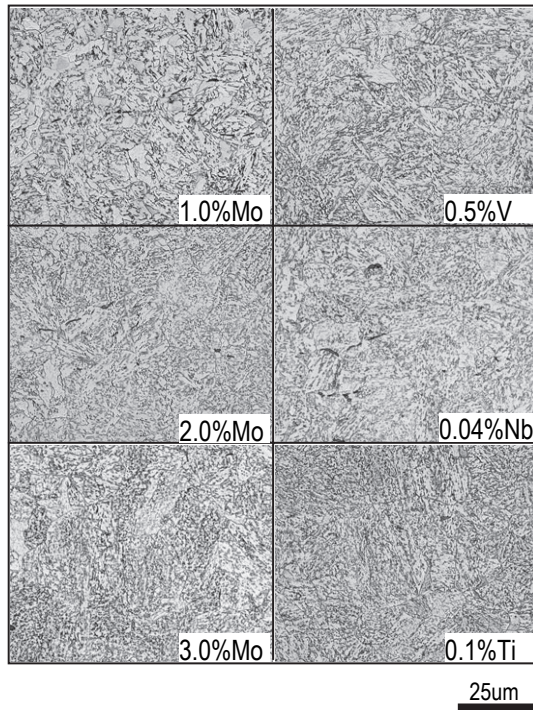


Fig.1. Optical microstructures of specimens.

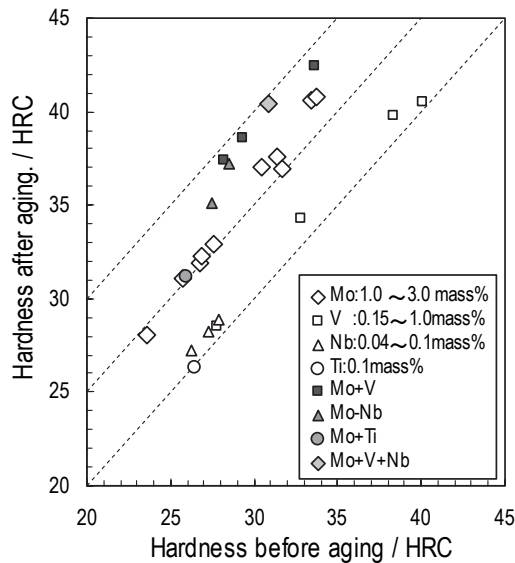


Fig.2. Hardness before and after aging treatment.

優れていそうである。そこで Mo に V,Nb,Ti を複合添加した鋼種の時効硬化量について Fig.4 に示す。Mo 単独添加では Δ HRC 5.4 に対し V,Nb,Ti および V+Nb を複合添加したものは、それぞれ Δ HRC 9.2, 7.7, 5.2, 9.6 と Ti 複合添加以外は時効硬化量が増加した。また、その増加量は Mo と V, Nb の単独の時効硬化量を足し合わせた和よりも大きくなっており、複合添加により時効硬化量が増加することが明らかとなった。

以上のように、時効硬化を最大化するには Mo と V,Nb を複合添加することが効果的であることが分かった。また、V,Nb 元素は多量に添加しても時効硬化特性は飽和す

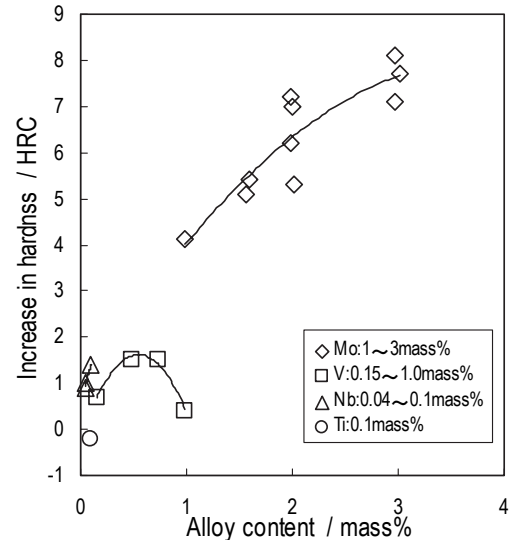


Fig.3. Influence of Mo,V,Nb and Ti contents on age-hardening.

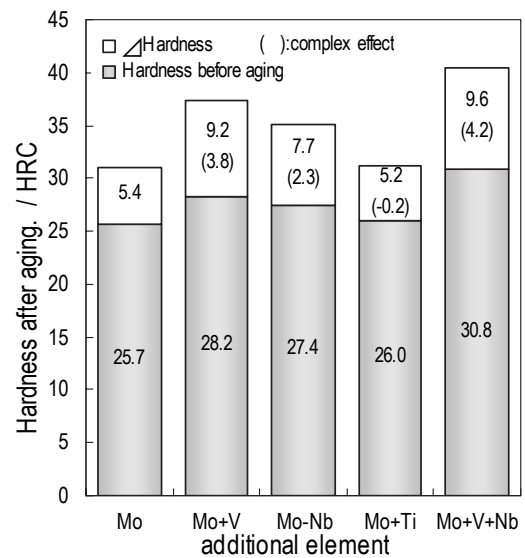


Fig.4. Relation between additional element and age-hardness.

るため、時効硬化量を高めるためには Mo の増量が必要となることも分かった。ただし、Mo,V,Nb は熱間鍛造後硬さを高める元素として知られており、Mo を多量に添加すると熱間鍛造後の硬さを高め被削性の劣化を招くことになる。さらに、Mo は熱間変形抵抗を高め熱間鍛造性を劣化させる。そこで、Mo を過度に添加することなく時効硬化量を最大化するための熱処理条件の最適化について検討を行った。

3. 2 時効硬化特性に及ぼす熱処理条件の影響

マルテンサイト調質鋼の焼戻し二次硬化は、一般的に 873 ~ 923 K といわれているが、ベイナイト非調質鋼の時効硬化においてもこの温度範囲であるのか明らかにするため温度の影響を調査した。供試材には Steel ④タイプを用いた。化学成分を Table 1 に示す。時効硬化処理は 773 ~ 973K で 2 時間保持し、その後室温まで空冷した。

Fig.5に開発鋼の時効硬化と時効温度の関係を示す。また、比較として調質鋼の焼戻し二次硬化特性を合わせて示す。Fig.6に時効硬化量に及ぼす時効温度と合金成分の影響を示す。

時効硬化現象は773 Kから現れ898 Kで最大となる。さらに温度が高くなると過時効となり硬さは低下した。

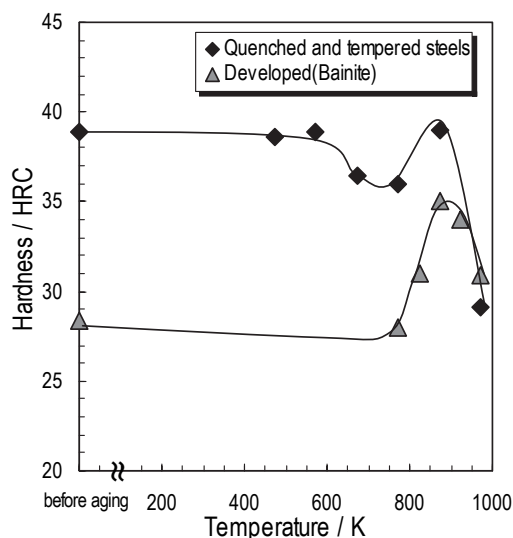


Fig.5. Hardness change in accordance with aging temperature.

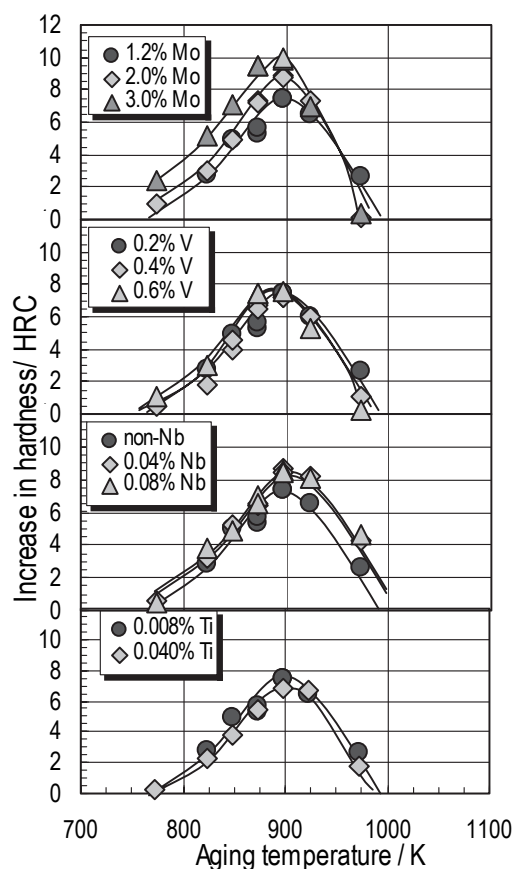


Fig.6. Relation between hardness increase and aging temperature.

これは調質鋼の焼戻し二次硬化特性と類似の結果となった。

次に時効温度を873Kに固定し処理時間変化させた場合の時効時間の影響について調査を行った。Fig.7に結果を示す。どの鋼種も5時間の時効処理で硬化量は飽和した。

さらに処理温度と処理時間の影響を調査した結果、最大時効硬化を得るためには873～898 Kの温度範囲で $t \geq -0.12 \times T + 110$ (t : 処理時間 (h), T : 処理温度 (K)) の条件を満たすように処理時間を選定すればよいことが分かった。

3. 3 時効硬化特性に及ぼす前組織の影響

ベイナイト型非調質鋼の時効硬化量は、他のフェライト・パーライト型非調質鋼、あるいは調質鋼（マルテンサイト）の焼戻し二次硬化特性と比べ優っているのか比較、検討を行った。供試材にはSteel ③を用いた。Table 1に化学成分を示す。マルテンサイト、ベイナイト、フェライト・パーライトの組織を得るために、熱間鍛造後に固溶化熱処理（1473 K × 1 h）を施し、冷却をそれぞれ油焼入れ、空冷、徐冷（-0.1 °C /sec）とした。また、時効

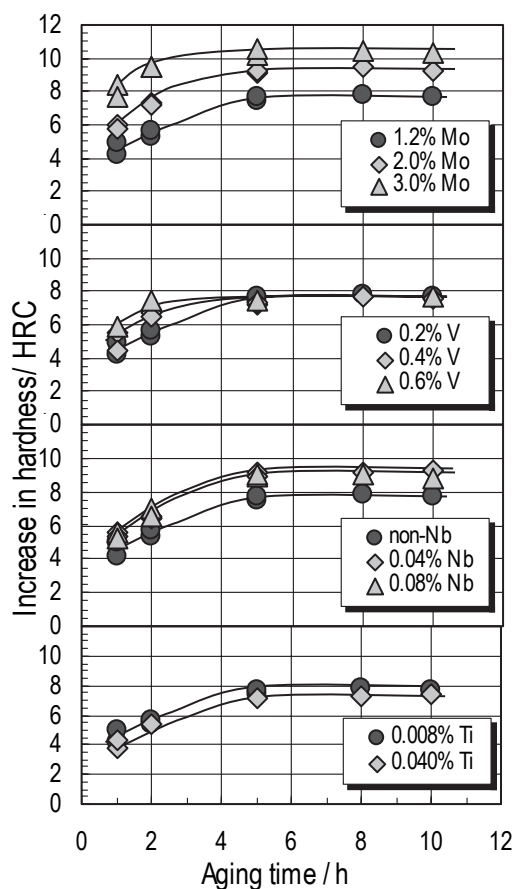


Fig.7. Relation between hardness increase and aging time.

析出処理は 873 K で 2 時間の加熱保持とした。

時効処理前後の硬さを Fig.8 に示す。時効処理前および処理後の材料硬さは共にマルテンサイト鋼＞ベイナイト鋼＞フェライト・パーライト鋼の順に硬かった。しかし、時効処理前後の硬さ増加量でみるとベイナイト鋼＞フェライト・パーライト鋼＝マルテンサイト鋼の順であり、ベイナイト鋼が時効硬化に優位であることが分かった。

マルテンサイト鋼は時効硬化後の硬さは高いが、処理前の硬さも高いので機械加工性が困難であることが推察される。ベイナイト鋼はマルテンサイト鋼対比、処理前は軟らかく時効硬化処理後にマルテンサイトの硬さには及ばないものの硬さが高くなることから、工業的に利用しやすい材料といえる。

また、フェライト・パーライト鋼はほとんど時効硬化しなかったことから、熱間鍛造後の組織がベイナイト＋フェライトの複合組織となると時効硬化特性が劣化することが推察される。Fig.9 にベイナイト＋フェライト複合組織の時効硬化前後の各組織の硬さ増加を示す。ベイナイト相、フェライト相の時効硬化量はそれぞれ $\Delta 70$ HV、 $\Delta 15$ HV とフェライト相の時効硬化量がベイナイト相対比極めて少ない。これは、フェライト相の固溶 C 量が少なく時効析出に必要な炭化物が生成しないためと推察される。

以上、時効硬化量最大化のため種々検討した結果 Mo-V, Nb 複合添加型のベイナイト非調質鋼が有効で、時効温度および時間は 873 ～ 923 K、 $t \geq -0.12 \times T + 110$ (t : 処理時間 (h), T : 処理温度 (K)) であることがわかった。次に開発鋼の機械特性について報告する。

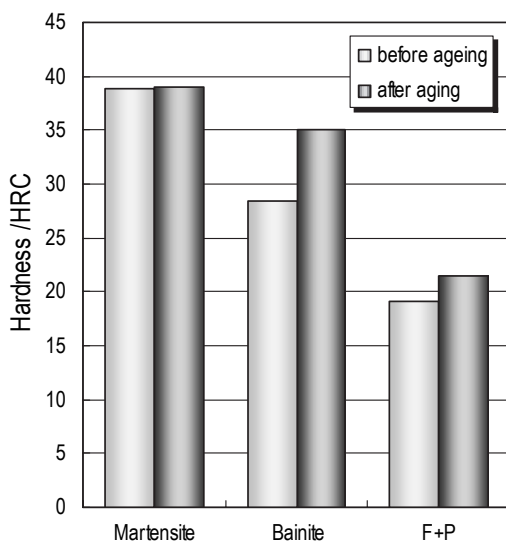


Fig.8. Steel structures and hardness of specimens.

4. 開発鋼の機械的性質

4. 1 引張強度

JIS14A 号引張試験片 (平行部径 6 ϕ) を用い引張試験を行った。供試材には Table 1 の Steel ①～⑧を使用した。また、試験は時効処理 (873 K \times 2 h) を施したものと、そうでないものの 2 種類で行った。

Fig.10 に 0.2 % 耐力、引張強さと硬さの関係、Fig.11 に 0.2 % 耐力と引張強さの関係を示す。また、図中には比較として調質鋼と従来の非調質鋼の引張試験の結果を合わせて示す。

一般に 0.2 % 耐力、引張強さとも硬さと強い関係があるといわれており、開発鋼においてもその傾向と一致し

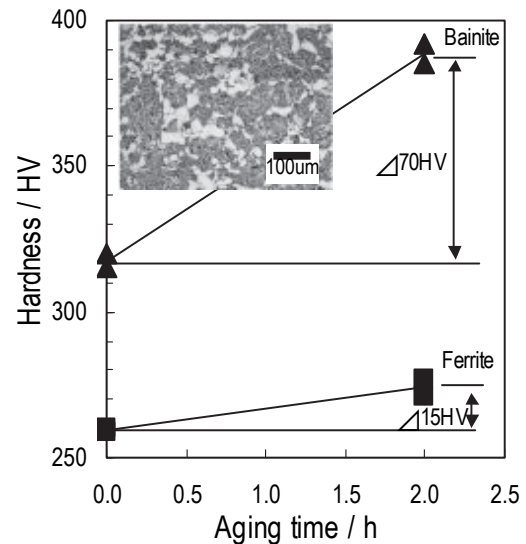


Fig.9. Age-hardening amount of ferrite and bainite.

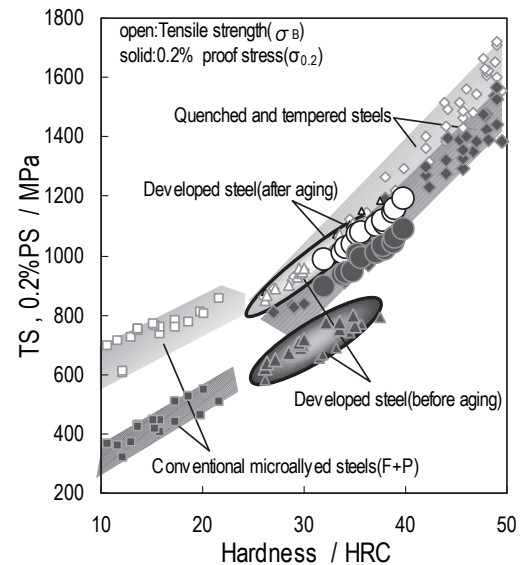


Fig.10. Tensile strength and 0.2 % proof stress of developed steel.

た。時効処理を施した開発鋼の引張強さは900 MPa以上と近年要求されている強度を上回るものとなった。

また、耐力比（0.2%耐力/引張強さ）においてはマルテンサイト鋼に比べ、従来非調質鋼、ベイナイト鋼とも低いといわれており、時効処理を施さない開発鋼はその傾向と一致した。しかし、時効硬化処理を施した開発鋼の耐力比は調質鋼対比同等の $\sigma_{0.2}/\sigma_B=0.9$ となった。

4.2 シャルピー衝撃試験

時効硬化型ベイナイト非調質鋼の靱性を評価するため、シャルピー衝撃試験（2mmUノッチ）を行った。Fig.12に結果を示す。比較としてフェライト・パーライト型非調質鋼と調質鋼（マルテンサイト組織）のデータを記載した。

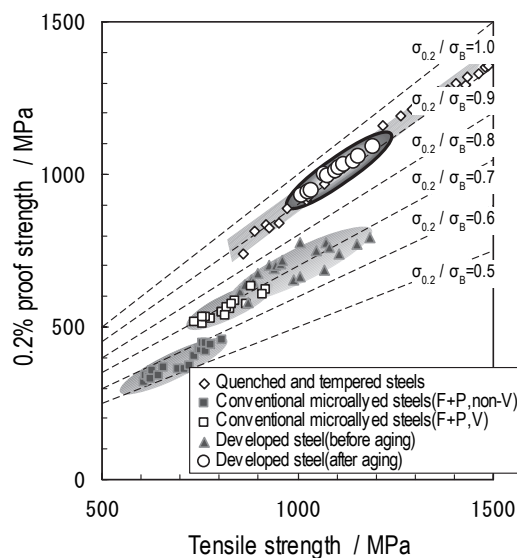


Fig.11. $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ of developed steel.

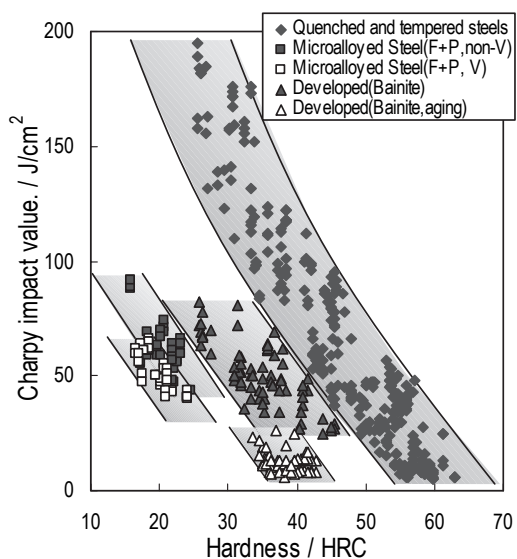


Fig.12. Relationship between hardness and Charpy impact value of developed steel.

いずれにおいても硬さが上昇する程衝撃値は低下する。また、同一硬さにおける衝撃値は、調質鋼>ベイナイト鋼>フェライト・パーライト鋼の順に高い。また、析出強化されたベイナイト鋼、フェライト・パーライト鋼はそうでないものと対比して、衝撃値が低いことが分かった。従来の高強度非調質鋼（フェライト・パーライト組織）はVを添加した析出強化型であり、この衝撃値の低下が問題であった。一方、かち割りコンロッドのようにこの衝撃値が低いことを利用した部品も開発されている。本開発鋼においても、高耐力でかつ低靱性であることから、かち割りコンロッド部品への応用が期待できる。

4.3 回転曲げ疲労試験

Fig.13に開発鋼の硬さと疲れ限度（小野式回転曲げ試験：JIS1号）の関係を示す。また、図中には調質鋼と従来の非調質鋼の硬さと疲れ限度の関係もあわせて示す。

一般に疲れ限度は硬さと関係があり、開発鋼においてもその傾向は同じである。従来の高強度非調質鋼（S35VC）の疲れ限度は400 MPa前後であるのに対し、開発鋼（0.16C-0.2Si-0.4Mn-0.6Cr-1.2Mo-0.2V）は580 MPaと従来の1.5倍ほどの高強度化が達成できた。また、時効処理前の硬さにおいても従来の非調質鋼の硬さ上限レベルであり、強度、加工性のバランスが取れた材料であることが確認された。

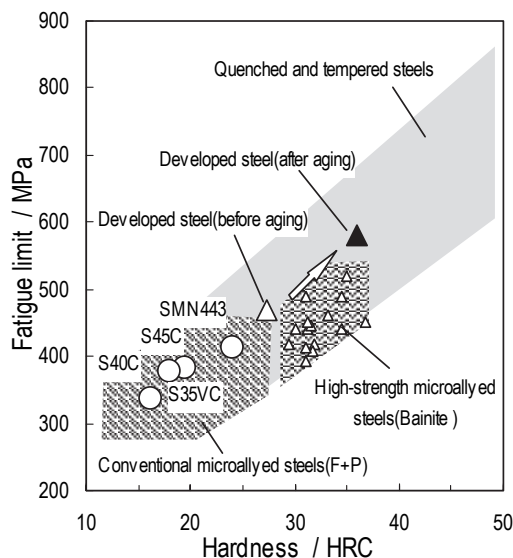


Fig.13. Relationship between hardness and fatigue limit of developed steel.

5. まとめ

以上のように、従来のフェライト・パーライト型非調質鋼に比べ引張強度、疲労強度の向上を図った時効硬化型ベイナイト非調質鋼の基礎評価を行い、時効硬化量を

最大化するための技術と、その機械的性質について以下の結果を得た。

①炭化物生成元素である Mo と V,Nb を複合添加することにより、時効硬化量を高めることができた。また、時効硬化量に及ぼす合金添加量の関係を見ると、Mo は添加に対し時効硬化量は単調に増加するが、V は 0.5 mass% で時効硬化量は飽和し、Nb は添加量によらず時効硬化量は一定の値を示す。

②時効硬化特性を効果的に得るためには 873 ～ 898 K の温度範囲で $t \geq -0.12 \times T + 110$ (t : 処理時間 (h), T : 処理温度 (K)) の条件を満たすように処理時間を選定すればよく、母相組織をベイナイト単相とすればよいことが分かった。

③開発鋼は 900 MPa 以上の引張強さが得られ、また、調質鋼と同等の耐力比が得られた。

④時効硬化処理により析出強化されたベイナイト鋼は靱性が低下した。

⑤開発鋼の疲労強度は 580 MPa で、従来の高強度非調質鋼 (S35VC) に対比 1.5 倍の強度が得られた。

(文 献)

- 1) J.M.Gray et al : HSLA Steels Technology & Application, ASM, (1984), 967.
- 2) 例えば小島久義 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 772.
- 3) G.Krauss and S.K.Banerji : Fundamental of Microalloying Forging Steels,TMS AIME, (1987), 39.
- 4) 柿崎哲, 鎌田芳彦, 西田和彦, 栗田真人 : 材料とプロセス, 7 (1994), 774.
- 5) 臼木秀樹, 並木邦夫, 飯久保知人 : 電気製鋼, 59 (1988), 15.
- 6) 藤井利光, 中村貞行 : 電気製鋼, 63 (1992), 15.
- 7) 井上幸一郎, 中村貞行 : 電気製鋼, 65 (1994), 22.
- 8) Y.Ohmodori, H.Iwanaga, Y.Kawaguchi and F.Terasaki : Trans. ISIJ, 16 (1976), 388.
- 9) 子安善郎, 鈴木信一, 篠崎 浩, 坂口聡, : 鉄と鋼, 71 (1985), 1527.
- 10) 森 元秀, 鈴木正実, 岩間直樹, 野村一衛 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 941 (1994), 11.
- 11) 福住達夫 : 三菱製鋼技法, 19 (1985), 33.
- 12) 渡辺幹, 蓑口光樹, 上野英生, 福住達夫 : 三菱製鋼技法, 33 (1999), 1.
- 13) 村上陽一, 臼木秀樹, 岡田義夫, 熊本隆, 上野宏 : 自動車技術会学術講演会前刷, 912 (1991), 10.
- 14) 野村一衛, 岩間直樹, 花井義泰, 森元秀, 鈴木正実, 水野邦明 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 773.
- 15) E.Hornbogen, R.C.Glenn : Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 218 (1960), 1064.
- 16) 岡本正三, 田中良平, 伊藤六郎 : 鉄と鋼, 46 (1960), 961.
- 17) 添野 浩 : 日本金属学会誌, 31 (1967), 1309.
- 18) 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), 153.