

近藤 信行^{*2} 峰 公雄^{*3} 腰塚 典明^{*4} 山本 義治^{*5} 中尾 俊朗^{*6}

Properties of Microalloyed Medium Carbon Steel Bars

Nobuyuki Kondo, Kimio Mine, Noriaki Koshizuka, Yoshiji Yamamoto, Toshiro Nakao

要旨

機械部品用の非調質棒鋼を開発するため、中炭素鋼の強度とじん性におよぼす微量合金元素と熱間加工条件の影響について調査した。主な結果は次のとおりである。

- (1) 非調質棒鋼には析出硬化と結晶粒微細化をもたらす V, Nb または V+Nb の添加が有効である。
- (2) 強度、かたさおよびじん性は加熱温度と $Ar_3 \sim Ar_1$ 変態温度範囲の冷却速度で制御される。
- (3) 非調質棒鋼の化学成分設計は適用部品の製造工程と要求特性に基づいて行う必要がある。
- (4) 開発した非調質中炭素棒鋼はコネクティングロッド、クランクシャフト、ピンおよびシャフト類に適用可能である。

Synopsis:

To develop microalloyed carbon steel bars for machinery parts, the effects of microalloying elements and the hot working conditions on the strength and toughness of medium carbon steel were investigated.

The results obtained are as follows:

- (1) Because of the effect of V or Nb for precipitation hardening and crystal grain refinement, addition of V and/or Nb is effective for producing microalloyed carbon steel bars.
- (2) Strength, hardness and toughness are controlled by the heating temperature and the cooling rate from Ar_3 to Ar_1 .
- (3) The chemical component design should be based on the manufacturing conditions and required properties of each part.
- (4) This steel is suitable to the connecting rod, crank shaft, pin, shaft and so on.

1 結 言

機械構造用鋼を素材とする機械部品の製造工程において、一般には、部品として必要な強度およびじん性の付与、あるいは鋼材の加工性を確保するため、焼入れ焼もどし、焼ならしなどの熱処理が行われる。

しかし、近年のエネルギー価格の高騰を契機に省エネルギーの観点から、部品製造工程におけるこれら熱処理の省略可能な鋼材が要望されるようになり^{1,2)}、各種熱処理省略鋼が自動車をはじめ建設機械の部品に実用化され、適用範囲が広がりつつある。

ここでは、当社の熱処理省略鋼のなかから、非調質中炭素棒鋼について述べる。

2 非調質棒鋼の開発方針

機械部品の製造工程は(1)圧延材—焼入れ焼もどし—切削加工—部品、(2)圧延材—熱間鍛造—焼入れ焼もどし—切削加工—部品とに大別される。

通常の焼入れ焼もどしは高い強度およびじん性を得るために行われるが、引張強さ 80 kgf/mm² クラスの機械部品への適用が多い中炭素鋼では、焼入れ性が低いため、質量の小さい部品を除くと部材の中央部まで十分な焼入れ状態になりにくく、組織も微細パーライトになる。このような状況で実用されている部品に、熱処理省略の可能な非調質鋼は有効である。

中炭素鋼の焼入れ焼もどし処理に替わる強度増加の手段として、(1)析出硬化、(2)固溶硬化、(3)変態硬化を利用する方法が考えられる。(1)の方法は炭窒化物形成元素を添加し、熱間加工後の放冷時に微細析出物を析出させることによって、強度を上昇させるものである。(2)および(3)の方法は合金元素の多量添加を必要としコスト面から不利であり、新鋼種開発には(1)の方法を用いて、後述する中炭素鋼をベースにした基礎実験をもとに、実用鋼は V, Nb, または V+Nb を微量添加し、フェライト・パーライト組織での強度増加をはかっている。

一方、じん性向上の手段としては、フェライト・パーライト粒の微細化が最も有効である。フェライト粒の微細化には、変態前のオーステナイト粒を微細にする必要があり、熱間加工条件の制御が重要である³⁾とされている。

中炭素鋼の機械的性質におよぼす合金元素と加工条件の影響について、基本成分系 0.45% C-0.25% Si-0.75% Mn でみても次のとおりである。Fig. 1 に示す加工条件で 80 mm 厚素材を 13 mm 厚鋼板に熱間圧延し調査した。用いた圧下スケジュールは、(1) 1200°C 加熱圧延の場合、1パス当り圧下量 30% で5パス連続圧延した。また、(2) 1150°C 加熱圧延の場合には、圧延開始温度を 1050°C とし3パス圧延したのち 850°C まで空冷し、850°C 以下で2パス圧延した。圧延後の 800~400°C の平均冷却速度は(1)、(2)とも 38°C/min と 12°C/min の2種類とした。Fig. 2~4 に合金元素添加量と強度および衝撃値の関係を示す。これらより、V および Nb の微量添加で強度を増加させることが可能であり、V を含有した状態で Mn, Cr および N は強度を増加させるとともにじん

*1 昭和59年6月21日原稿受付

*2 技術研究所水島研究部第4研究室主任研究員(掛長)

*3 技術研究所水島研究部第4研究室主任研究員(課長)

*4 技術研究所水島研究部第2研究室主任研究員(課長)

*5 水島製鉄所管理部条鋼管理室主査(掛長)

*6 本社製鋼・鋼材技術部技術サービス室主査(課長)

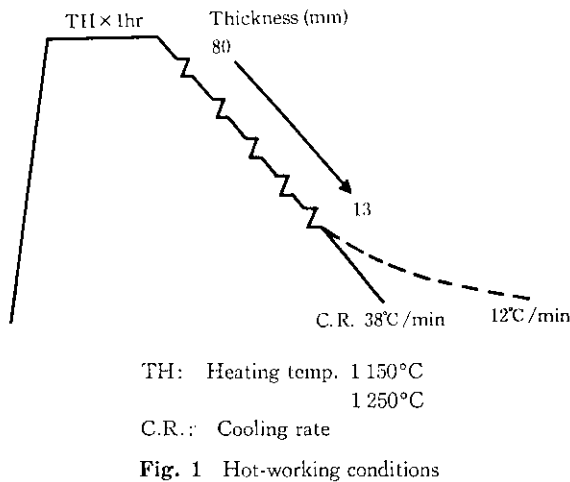


Fig. 1 Hot-working conditions

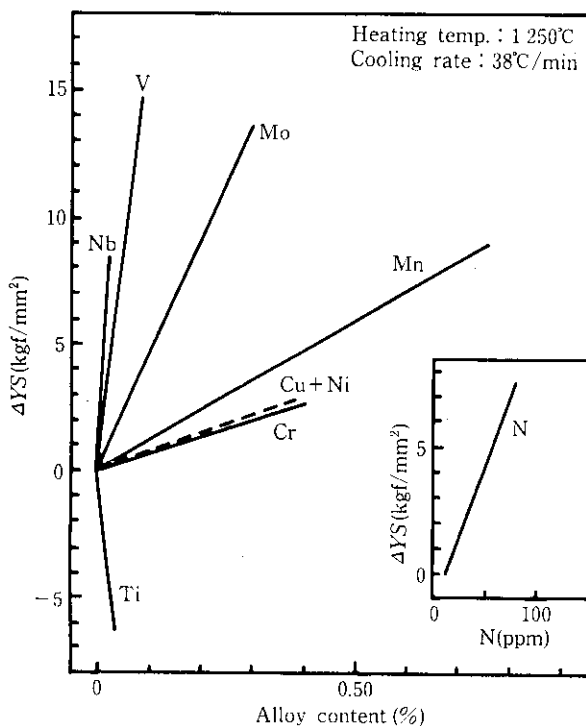


Fig. 2 Effect of alloy contents on yield strength

性を改善することがわかる。Fig. 5 は強度、じん性と冷却速度の関係を示す。S45C の焼入れ焼もどし材の特性と比較すると、YS および TS は十分に高く、 σE_{20} は冷却速度が早い場合はやや低いが、遅い場合はほぼ等しい。このことは、重量の大きな部品への非調質鋼の適用は焼入れ焼もどし材にくらべ、じん性面からも有利であることを示している。

以上のように、目標とする部品の大きさと必要な機械的性質から成分設計することが必要である。

3 非調質中炭素棒鋼の特性

切削加工して用いられる部品、あるいは熱間鍛造して用いられる部品への適用量が多い 0.45%C クラスの焼入れ焼もどし材との代替を目的として開発した化学成分系の例を Table 1 に示す。Mn+V 系の NH45MV と Cr+V 系の NH45CV で、両鋼種ともじん

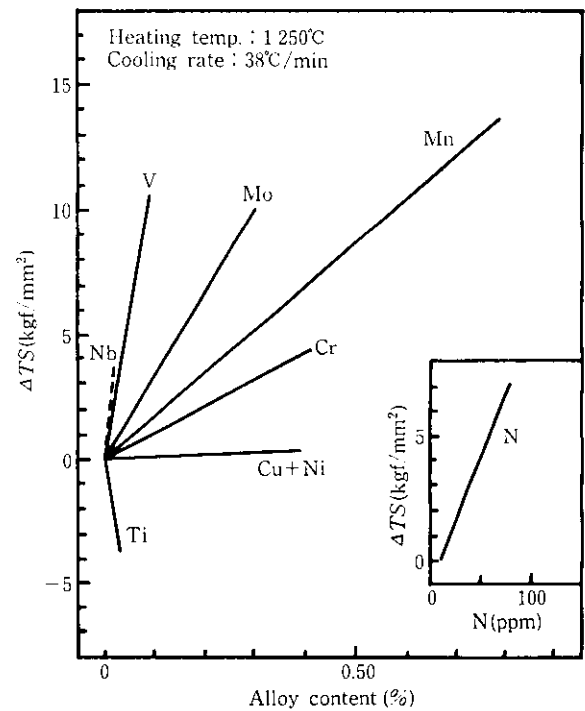


Fig. 3 Effect of alloy contents on tensile strength

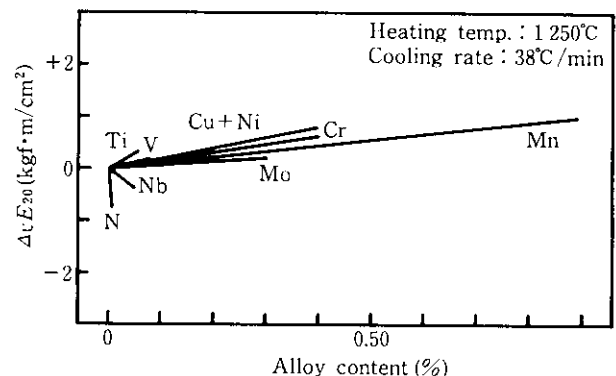


Fig. 4 Effect of alloy contents on charpy impact value

Table 1 Chemical composition (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	N
NH45MV	0.45	0.27	1.25	0.011	0.020	0.02	0.09	0.0071
NH45CV	0.45	0.25	0.96	0.010	0.020	0.20	0.09	0.0068

性を重視した成分系で、1 150°C に加熱後仕上温度を制御して、25 mmφ、50 mmφ、75 mmφ および 110 mmφ に圧延した。

非調質棒鋼を用いた部品すなわち圧延材を切削加工で使用する部品では、その材質は熱間圧延条件と冷却条件によって決定される。NH45MV、NH45CV 両鋼種の圧延ままの特性は次のとおりである。

3.1 圧延材の特性

3.1.1 組織

圧延材の組織は Photo 1 に示すようにフェライト・パーライト組織である。製品径が小さくなるにしたがって、加工量および冷却

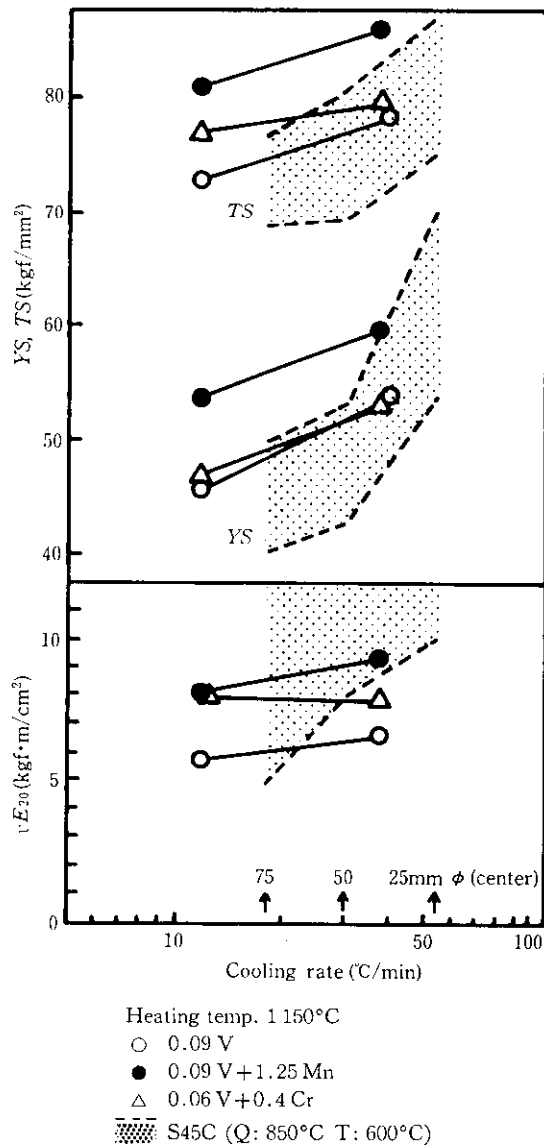


Fig. 5 Effect of cooling rate on strength and Charpy impact value

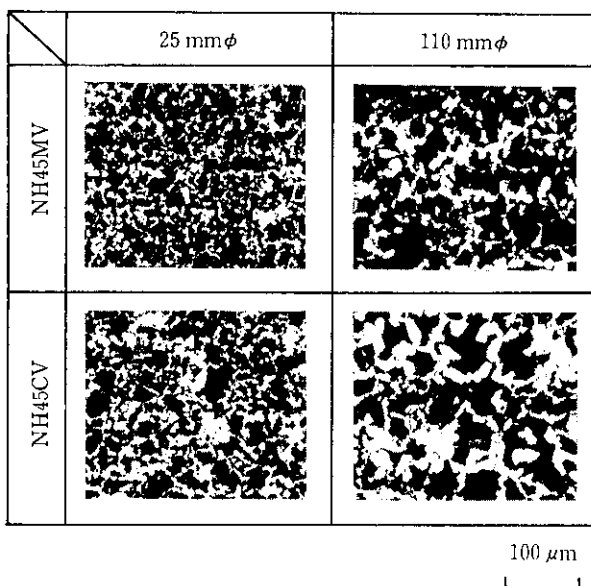


Photo 1 Microstructures of hot-rolled steel bar



Photo 2 Electron-micrograph of dispersed precipitate in the hot-rolled NH45MV 50 mm φ steel bar

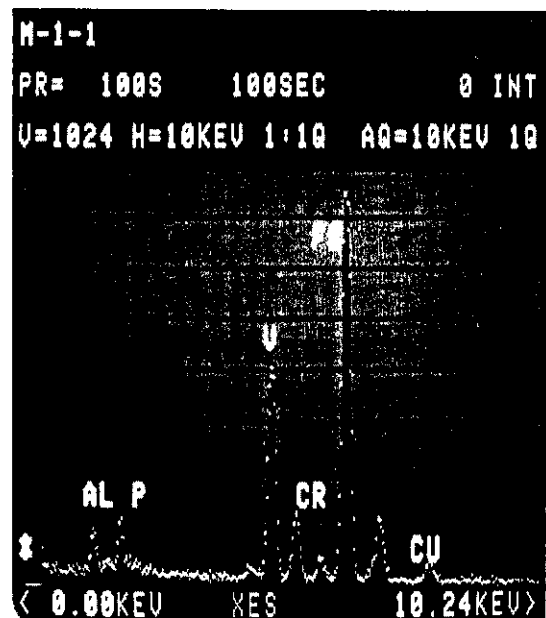


Photo 3 Result of EDX analysis of dispersed precipitate in the hot-rolled NH45MV 50 mm φ steel bar

速度の影響により、組織は微細化している。

Photo 2 は 50 mm φ 材の透過電子顕微鏡写真であり、マトリックス中に 100Å 前後の微細な析出物が数多く認められる。この析出物は EDX (エネルギー分散型 X 線分析装置) および EELS (電子線速度分析装置) によって解析した結果、Photo 3 および Fig. 6 に示すように V 炭化物が主体であった。

3.1.2 機械的性質

圧延材各サイズの機械的性質を Fig. 7 に示す。25 mm φ 材の特性は次に示すとおりである。

鋼種 NH45MV: YS 58 kgf/mm², TS 82 kgf/mm², El 26%, RA 58%, vE_{20} 10.0 kgf-m/cm²

鋼種 NH45CV: YS 55 kgf/mm², TS 81 kgf/mm², El 25%, RA 57%, vE_{20} 8.8 kgf-m/cm²

これらの値は S45C 焼入れ焼もどし後の JIS 参考値 (25 mm φ) YS

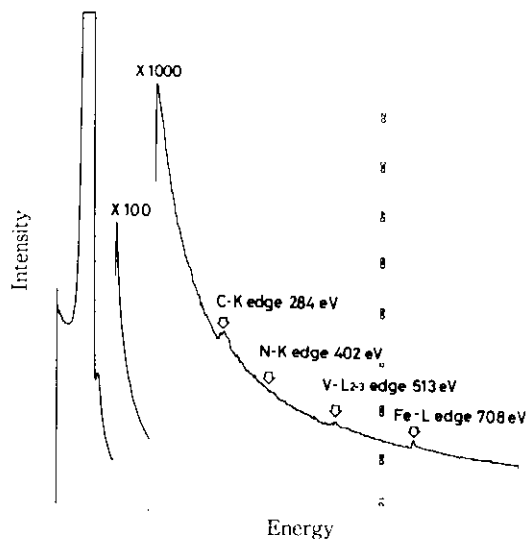


Fig. 6 Result of EELS analysis of dispersed precipitate in the hot-rolled NH45MV 50 mmφ steel bar

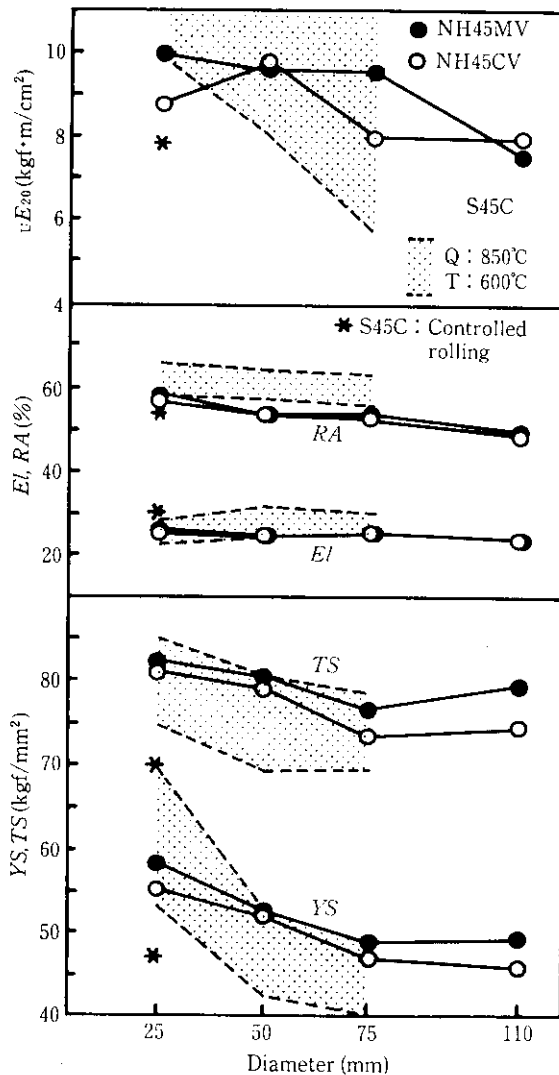


Fig. 7 Mechanical properties of hot-rolled steel bar

$\geq 50 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$, $\text{TS} \geq 70 \text{ kgf}/\text{mm}^2$, $\text{El} \geq 17\%$, $\text{RA} \geq 45\%$ および $uE_{20} \geq 8 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ を全て満足している。さらに、両鋼種とも直径が大きくなることによる強度およびじん性の低下は S45C 焼入れ焼もどし材の実績値と比較して小さい。

また、S45C の成分系で加熱および圧延温度を制御して、焼準材と同等の特性を付与した制御圧延材の機械的性質を Fig. 7 中に付記した。Fig. 7 より、Mn および Cr 量を調整し V を添加して、加熱および圧延温度を制御した非調質鋼は制御圧延材より強度およびじん性が改善されることがわかる。

3.1.3 断面かたさ

断面かたさ分布を Fig. 8 に示す。直径が大きくなるとともに、かたさは低下する傾向を示す。また、各サイズとも表面側が中心部より高いがその差はビッカースかたさで 20 以内と小さく、太径ほどかたさ分布はなだらかなり均質化される。

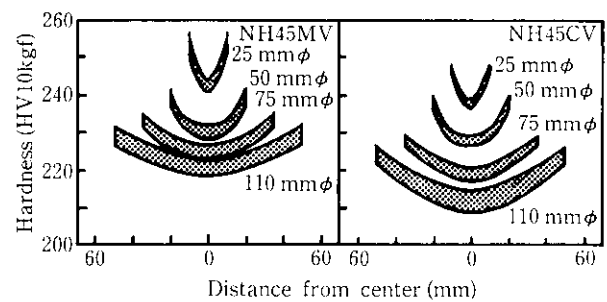


Fig. 8 Hardness distribution in diameter of hot-rolled steel bar

3.1.4 疲労特性

小野式回転曲げ疲労試験の結果を Fig. 9 に示す。NH45MV、NH45CV とも S45C 焼入れ焼もどし材とほぼ同等の疲れ強さを示す。

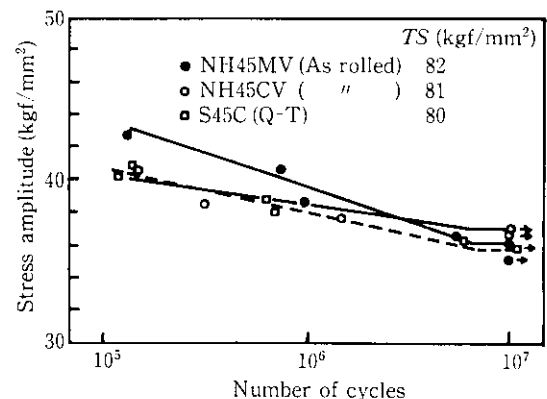
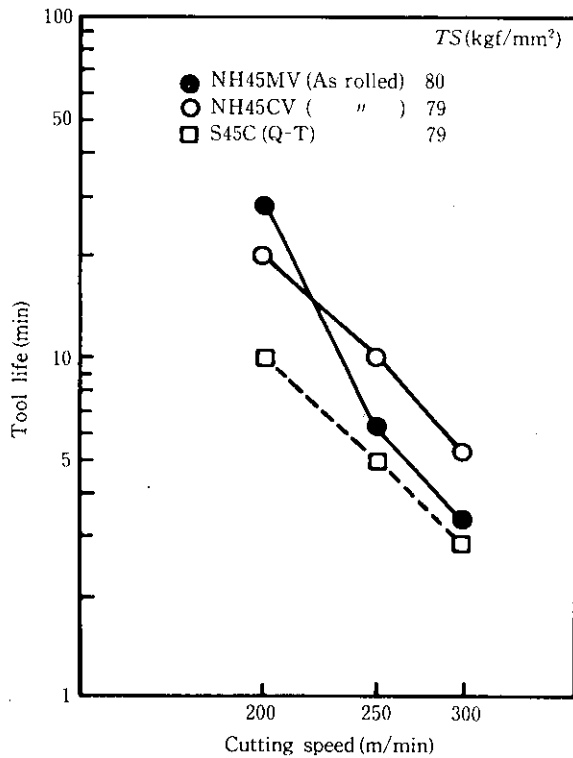


Fig. 9 Results of rotating bending fatigue test

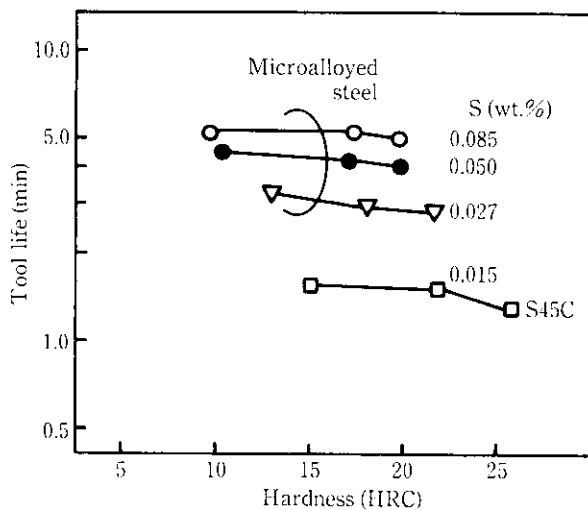
3.1.5 被削性

超硬工具を用いた切削試験の結果を Fig. 10 に示す。両鋼種ともフェライト・パーライト組織のため、S45C 焼入れ焼もどし材よりすぐれた被削性が得られる。さらに高い要求に対しては快削元素の添加によって、被削性を向上させることが可能であり、その一例として、S 添加鋼の特性を Fig. 11 に示す。



Tool : P10
 Feed : 0.24 mm/rev
 Depth of cut : 2.0 mm
 Cutting fluid : None
 Criterion of tool life : $V_n=0.2$ mm

Fig. 10 Results of machinability test



Tool : P10
 Feed : 0.24 mm/rev
 Depth of cut : 2.0 mm
 Cutting fluid : None
 Criterion of tool life : $V_n=0.2$ mm

Fig. 11 Effect of hardness and sulphur contents on machinability

3.2 機械的性質におよぼす熱間鍛造条件の影響

非調質棒鋼を用いた熱間鍛造加工部品の材質は、熱間鍛造条件と加工後の冷却条件によって決定される。この場合、変態前の γ 粒径と冷却速度が重要な制御要因になるので、熱間鍛造実験と熱間鍛造を想定した加熱・冷却実験を行い、機械的性質におよぼす影響を調査した。

3.2.1 熱間鍛造後の機械的性質

NH45MV と NH45CV の圧延材を用いて、Table 2 に示す条件で熱間鍛造後空冷して試験に供した。機械的性質を Fig. 12 に示す。両鋼種とも鍛造比に比例して、強度およびじん性は高くなる傾向を示す。同一鍛造比では加熱温度の高いほうが、強度は高くなり、じん性は低くなる。組織は Photo 4 に示すように、フェライト・パーライト組織であり、同一加熱温度では鍛造比の大きいほうが細かくなっている。

3.2.2 加熱温度の影響

Fig. 13 に加熱温度 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ で 15 分間保持し、約 $55^{\circ}\text{C}/$

Table 2 Hot forging conditions

Steel	Heat temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Initial dia. (mm ϕ)	Final dia. (mm ϕ)
NH45MV	1000~1300	50	15, 20, 25, 30
NH45CV			

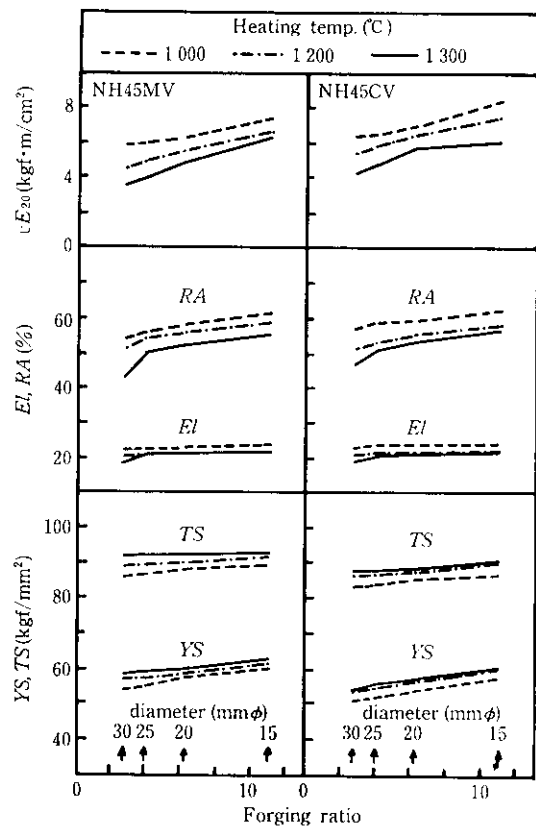


Fig. 12 Effect of hot-forging conditions on mechanical properties

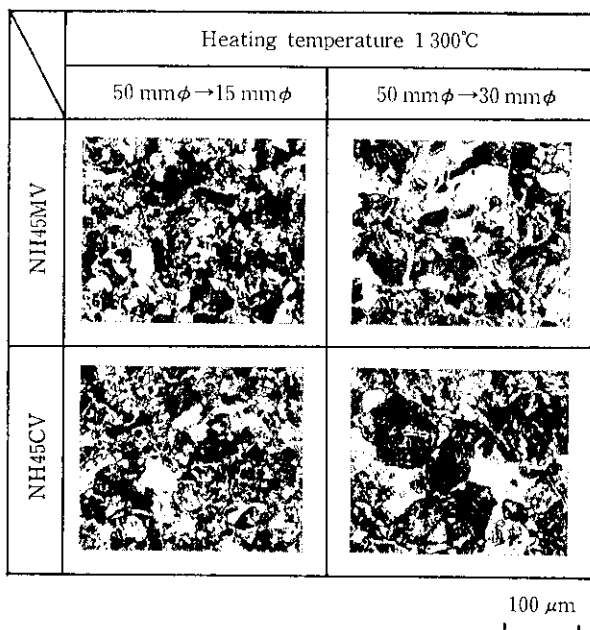


Photo 4 Microstructures of hot-forged steel bar

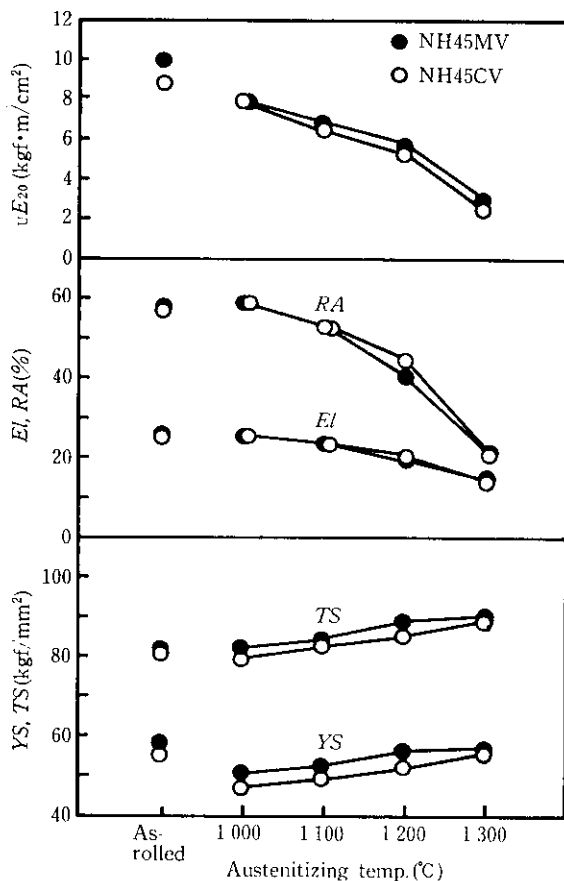


Fig. 13 Effect of austenitizing temperature on mechanical properties

min で冷却したときの機械的性質を示す。同一冷却条件では加熱温度が高くなるにつれて強度は上昇するが、延性およびじん性は低下する。これは、フェライト・パーライト組織のパーライト粒の粗大化とパーライト分率が増加するためである。

3.2.3 冷却条件の影響

Fig. 14 に加熱温度 1200°C で 15 分間保持後、約 1.5°C/min～

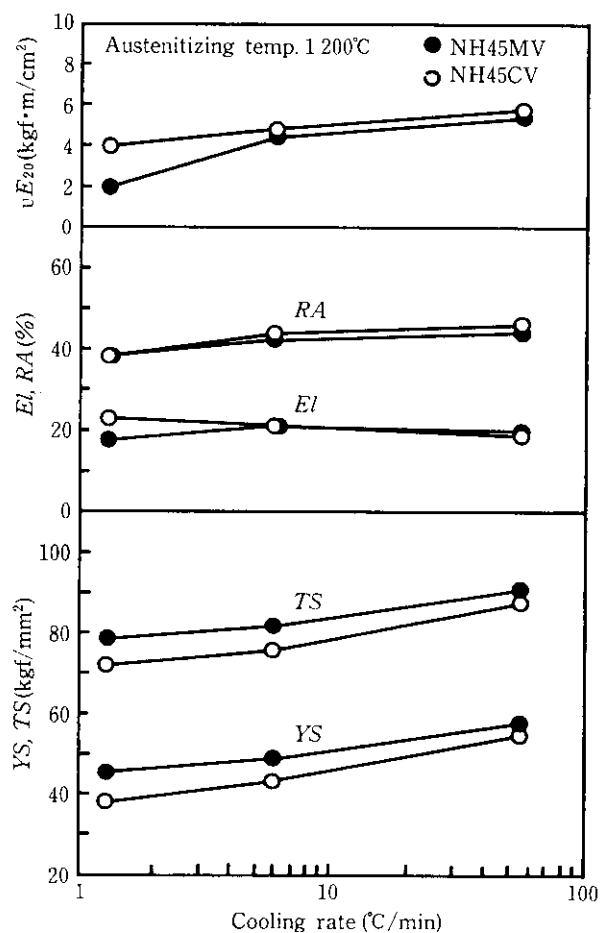


Fig. 14 Effect of cooling rate on mechanical properties

55°C/min の範囲で 800°C から 600°C まで冷却したときの機械的性質を示す。強度、延性およびじん性とも冷却速度の早いほうが高くなる。

Fig. 15 は機械的性質を支配する温度範囲をみるため、1200°C に加熱後約 1.5°C/min で徐冷し、所定の温度から約 50°C/min に冷却速度を増加したときの機械的性質を示す。YS および TS は NH45MV が 700°C 以下で、NH45CV が 800°C 以下で低下している。これは徐冷中に変態が始まるためである。また、1200°C 加熱後約 50°C/min で冷却し、途中の各温度から約 1.5°C/min で徐冷した試験で、Ar₃～Ar₁ 変態点通過速度が遅いとき、強度の低下が認められた。

Fig. 16 は NH45MV について、冷却途中で冷却速度を増加させた温度とかたさおよび組織因子の関係をまとめたものである。冷却速度変更温度と平均かたさ (HV10 kgf)、初析フェライトかたさ (HV 3 gf)、パーライトラメラ間隔 (S_0)、フェライト粒径 (d_a) およびフェライト面積率 (S_a) との関係を示している。これらの測定値は Ar₃～Ar₁ 変態が生じる 700°C～600°C 間で変化しており、700°C 以上では S_0 , d_a , S_a は小さく、フェライトのかたさは高い。

冷却条件は析出物の分布にも大きな影響をおよぼす。この成分系では初析フェライト中に微細な析出物が観察される。Ar₃ 点以上の温度から約 50°C/min で冷却した場合には、100Å 以下のサイズのものが主体であるのに対して、Ar₁ 点以下まで約 1.5°C/min で徐冷になった場合には、300Å 程度の大きなサイズのものになっている。

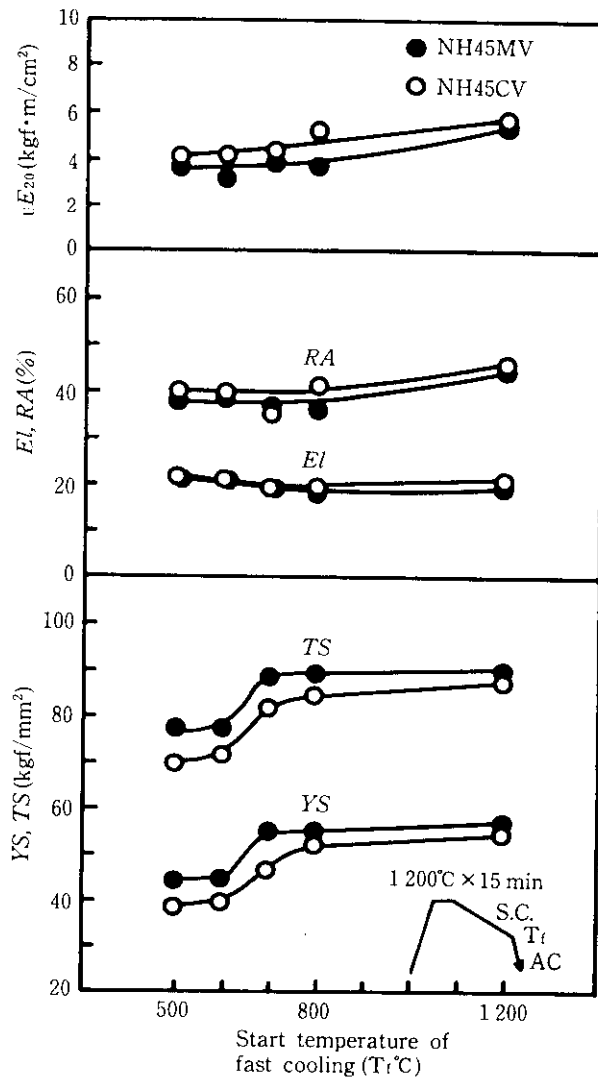


Fig. 15 Effect of start temperature of fast cooling on mechanical properties

析出物のフェライトかたさへの影響はそのサイズが $100\text{\AA}$ 以下でかたさを上昇させることが知られており、 A_{r3} 点以上の温度から冷却を早くすることは、フェライトのかたさを上げていると言える。

以上のように、熱間鍛造工程材の強度、じん性は成分調整のほかに、加熱温度および $A_{r3} \sim A_{r1}$ 変態点間の冷却速度の影響を受けるので、加熱条件と冷却条件は重要な管理項目になる。

4 実機部品への適用

NH45MV, NH45CV を用いて、自動車用コネクティングロッド

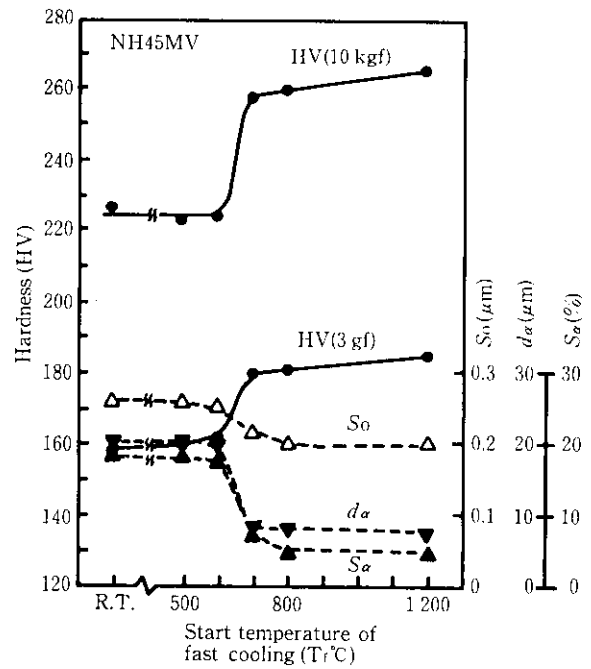


Fig. 16 Influence of start temperature of fast cooling on hardness and structure factors

およびクランクシャフトを熱間鍛造・放冷で製造し、その特性を調査した。鍛造後の部品単重はコネクティングロッドが 0.5 kg 、クランクシャフトが 9.5 kg である。コネクティングロッドの機械的性質を Table 3 に示す。強度および衝撃値とも S40C 焼入れ焼もどし品と比較して、同等またはそれ以上の特性を示している。クランクシャフトについても、Table 4 に示すように強度および衝撃値とも S45C 焼入れ焼もどし品とほぼ同等であることを確かめた。

建設機械用の重量部品（単重 12 kg ）に、Table 5 に化学成分を示す NH38V を用い、熱間鍛造・放冷で製造した。機械的性質は Table 6 に示すように S45C 熱間鍛造・熱処理品とくらべて、衝撃値が若干下回っているが、切削性、高周波焼入れ性、耐摩耗性を含め、実機テストでなんら問題のないことを確認している。

圧延材を切削加工して使用する部品については前述したように、調質材と同等の機械的性質を示し問題は生じない。そこで、引抜き加工を加える場合について検討した。NH45MV, NH45CV の冷間引抜きを施したときの機械的性質を Fig. 17 に示す。引抜き加工度が大きくなるにつれて強度は増加するのに対して、じん性は減少する。非調質鋼の欠点は降伏応力が引張強さの水準に対して低いことであるが、8% 程度の引抜き加工で降伏応力が大幅に増加する。このことは、非調質棒鋼に軽い引抜き加工を施して使用すると、高い降伏応力が得られることを示している。

Table 3 Mechanical properties of connecting rod

Steel	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EL*1 (%)	RA (%)	νE_{20} *2 (kgf·m/cm ²)	HV (10 kgf)		Note
						$\bar{x}$	σ	
NH45MV	66	93	16	56	8.2	265	3.3	As hot-forged
NH45CV	64	89	16	57	9.3	252	3.9	
S40C	53	77	17	63	8.3	253	1.5	Q-T

*1 JIS No.14A G.L. = $5.65 \sqrt{A} = 25\text{ mm}$

*2 JIS No.3 3.0 mmφ, 3.5 mmφ

Table 4 Mechanical properties of crank shaft

Steel	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El* ¹ (%)	RA (%)	$\bar{U}E_{20}$ * ² (kgf·m/cm ²)	HRC		Note
						$\bar{x}$	σ	
NH45MV	57	86	16	31	3.1	22.6	0.4	As hot-forged
NH45CV	52	85	16	29	3.1	21.2	0.7	
S45C	59	84	13	32	3.9	22.3	0.8	Q-T

*¹JIS No.14A G.L.= $5.65\sqrt{A}=25$ mm*²JIS No.3

Table 6 Mechanical properties of powershovel part

Steel	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El* ¹ (%)	RA (%)	$\bar{U}E_{20}$ * ² (kgf·m/cm ²)	HV (10 kgf)		Note
						$\bar{x}$	σ	
NH38V	45	74	25	51	5.8	221	6.7	As hot-forged
S45C	41	70	24	51	7.1	189	8.0	Heat-treatment

*¹JIS No.14A G.L.= $5.65\sqrt{A}=25$ mm*²JIS No.3

Table 5 Chemical composition (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	V	N
NH38V	0.38	0.26	0.96	0.010	0.013	0.09	0.0068

以上のように、V添加非調質棒鋼は優れた特性を有し、焼入れ焼もどし材に替って、圧延後放冷あるいは熱間鍛造後放冷ままで各種機械部品に適用することが可能である。

5 結 言

機械部品製造工程における熱処理省略が可能な非調質棒鋼を開発するため、中炭素鋼の強度とじん性におよぼす微量元素と熱間加工条件の影響について調査した。主な結果は次のとおりである。

- (1) 非調質棒鋼には析出硬化と結晶粒微細化をもたらす V, Nb または V+Nb を微量添加して、強度とじん性の向上をはかる方法が有効である。
- (2) 強度、かたさおよびじん性は加熱温度と熱間加工後の $Ar_3 \sim Ar_1$ 変態温度範囲の冷却速度で制御される。
- (3) 非調質棒鋼の性能を発揮するには、適用部品の製造工程と要求特性に基づく化学成分設計が必要である。
- (4) 非調質中炭素棒鋼の NH45MV および NH45CV 圧延材 (25 mm ϕ) の機械的性質は S45C Q-T 後の JIS 参考値を全て満足する。さらに直径が大きくなることによる強度、じん性の低下は小さい。両鋼種ともコネクティングロッド、クランクシャフト、ピンおよびシャフト類に適用可能である。

非調質棒鋼は省エネルギーによるコストダウンのみでなく、焼入れひずみ、焼われ、熱処理不均一による材質変動、脱炭等の熱処理による弊害の防止、矯正工程および搬送工程の省略、工期短縮等の工程合理化にも有効に働き、今後適用範囲は増加すると考えられる。

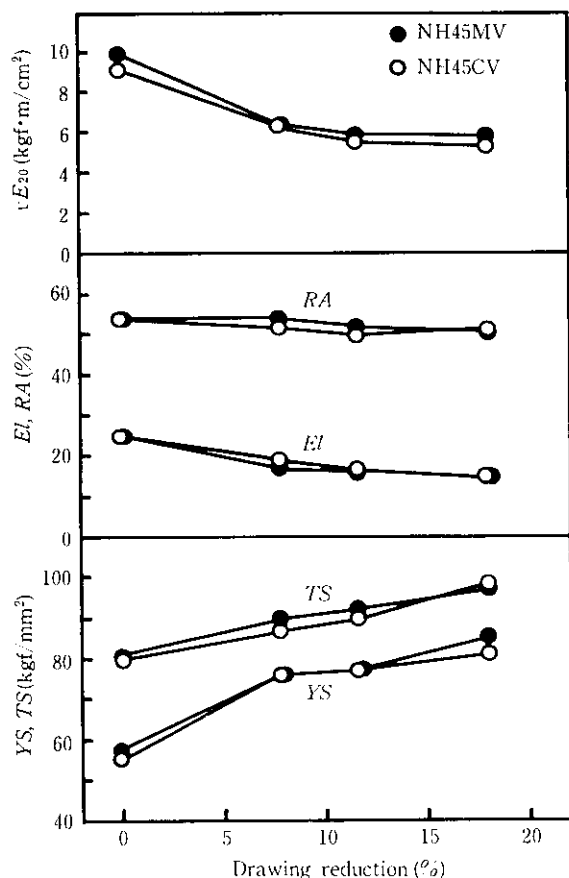


Fig. 17 Effect of drawing reduction on mechanical properties

参 考 文 献

- 1) 木村茂夫: 電気製鋼, **51** (1980) 1, 43-50
- 2) 大沢 惇: 自動車技術, **36** (1982) 8, 846-853
- 3) 田中智夫: 日本金属学会報, **17** (1978) 2, 104-110
- 4) 谷野 満, 西田卓彦, 大岡耕之, 吉川克業: 日本金属学会誌, **29** (1965) 7, 734-741