

討25

制御冷却による強靱性変化とその応用法

住友金属工業(株) 中央技術研究所○橋本 保 大谷泰夫
 和歌山製鉄所 中川 洋 中村昌明
 鹿島製鉄所 別所 清 鈴木秀一

I. 緒言

最近、制御冷却法が鋼の強化法として注目されている。この場合、変態強化を活用すれば強化は比較的容易であることから、通常の制御圧延鋼と比較して靱性を劣化させることなくどこまで強化できるかが重要な課題となろう。制御冷却鋼では圧延条件（加熱温度、圧下配分、仕上温度）、水冷条件（開始温度、冷却速度、停止温度）に起因する相変態、析出強化、固溶強化、加工フェライトの回復度等の材質因子の変化により強靱性が決まると考えられるが、とりわけ圧延条件と水冷条件の関係は相変態挙動におよぼす影響が大である。本報ではこの点に着目し、主としてマイクロ組織と強靱性変化の関係を中心に、その他強靱性因子の検討結果および種々の圧延、水冷パターンでの実機試作結果を報告する。

II. 加熱圧延条件と制御冷却鋼の強靱性の関係

1. 加熱温度の影響

Fig. 1 は炭素鋼とNb鋼の加熱温度を変化させ800°C仕上にて8°C/Sの冷却速度で600°Cまで制御冷却した場合の強度・靱性を同一圧延の空冷材と比較した結果である。図示するように、1100°C加熱近傍においてT・Sの増加は最大の傾向を示した。加熱温度の上昇は加熱時のγ粒を粗大化し、制御冷却によるベイナイト・マルテンサイト等の変態強化を容易にするからと思われるが、1200°C加熱でのΔTSの低下は初期γ粒が粗大になりすぎてγ→α変態が低温側に移行すること、制御冷却中のポリゴナルフェライトの生成量が少なく、未変態γへの溶質元素濃縮度が低いために硬質な低温変態組織を生成しにくいこと等に起因するものと考えられる。靱性変化もほぼ強度変化と対応している。

2. 圧延仕上温度の影響

炭素鋼を1100°C加熱後、仕上温度を800~700°Cに変化して制御冷却による強靱性変化を求めた結果をFig. 2に示す。TS変化は水冷の停止温度によって二様の傾向を示す結果が得られた。

- ① 600°C（中心温度）以上で水冷を停止する場合は、仕上温度の低下とともにTS上昇は鈍くなる。これは明らかに焼入性の低下に基づくもので、700°C仕上圧延ではフェライト+パーライト組織である。
- ② 500°C以下で水冷を停止する場合、700°Cの低温仕上でもTSが大巾に上昇する。これは微細なフェライトとマルテンサイトの二相混合組織になるからである。

800°C仕上の場合はそれに対し、比較的に等方的な組織で、ポリゴ

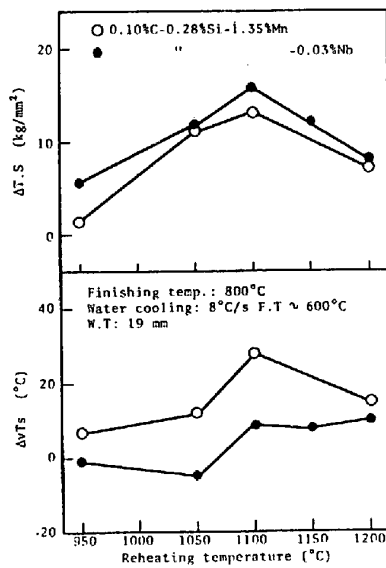


Fig. 1. Shift of strength and toughness by slab reheating temperature, compared with air cooled steel.

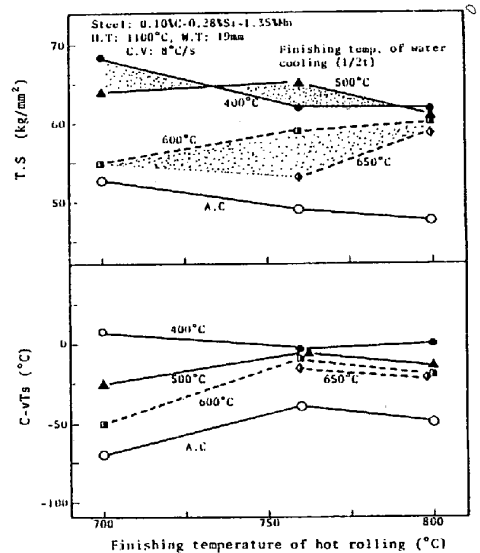


Fig. 2. Relation between finishing temperature of hot rolling and tensile strength or Charpy fracture appearance transition temperature.

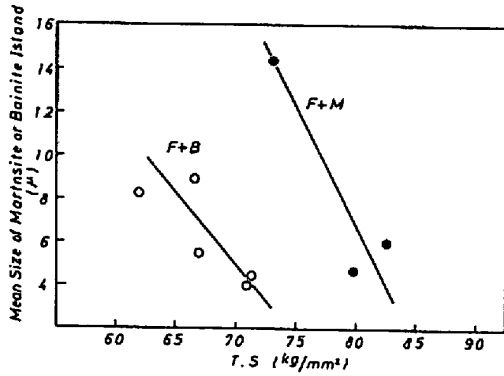


Fig. 3. Relation between tensile strength and mean size of martensite or bainite island in accelerated cooled steel.

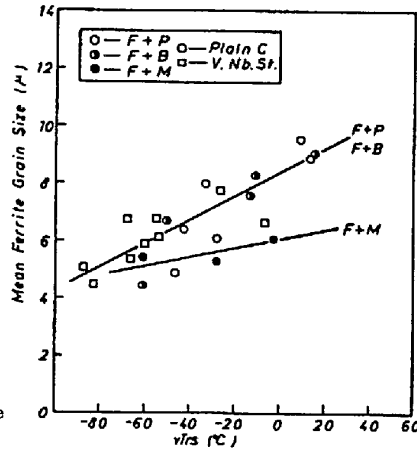


Fig. 4. Relation between Charpy transition temperature and mean ferrite grain size.

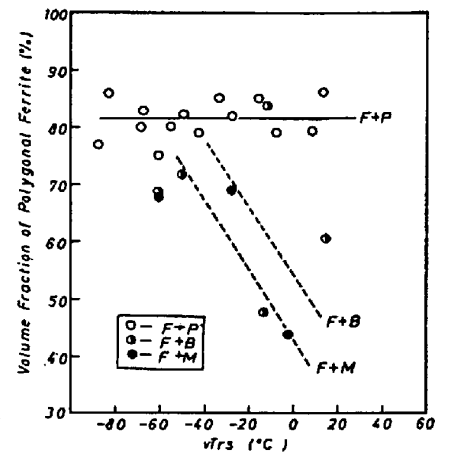


Fig. 5. Relation between Charpy transition temperature and volume fraction of polygonal ferrite.

ナルフェライト量も少なく、水冷停止温度の違いによる組織変化も小さい。靱性の変化もほぼ強度変化に対応し700°C仕上材では水冷停止温度の影響が強く示されている。

III. 制御冷却鋼の強靱性因子について

1. ミクロ組織からの検討

制御冷却鋼の強靱性変化はマクロ的には光学顕微鏡組織と良好な対応が得られる。Fig. 3~5にミクロ組織の定量結果と強靱性の関係を示すが以下の事がわかる。

① T・Sは低温変態組織の体積率もさることながら、その組織がベイニティックフェライトなのか、マルテンサイトなのかの違いと、同一組織であっても、その硬質組織の平均的な島の大きさが細かいほど高強度を示す傾向が得られた。(Fig. 3)

② 靱性(vTs)はフェライトとベイナイトまたはマルテンサイトの混合組織において、フェライト粒径の細かいほど(それとともに硬質部の粒径も小さくなるが)およびポリゴナルフェライトの体積率が高いほど良好な値を示す。(Fig. 4, 5)

以上の変化は圧延条件によるγ→α変態挙動と密接な関係があり、それが制御冷却による低温変態組織の生成と云う形で空冷材よりも強調されたものになっているからと考える。すなわち、

- ・細粒フェライトの生成の少ない圧延条件の場合(高温加熱, 低温域圧下率小, 高温仕上等):

ポリゴナルフェライトの生成は少なく、制御冷却時の未変態γ粒径も大であるため、γ部の溶質原子の濃縮度も低くなり、比較的粗いベイニティックフェライトを生成しやすい。

- ・細粒フェライトの生成の多い場合(低温加熱, 低温域圧下率大, 低温仕上等):

ポリゴナルフェライトの生成量が多いため、制御冷却時の未変態γ粒径が小となり、かつ溶質原子が濃縮され、フェライト⇔マルテンサイトの二相分離型の変態線図になりやすいところから、ベイナイト変態が抑制され、フェライト+マルテンサイトの微細混合組織を生成する。

極限化すると上記二態になり、これのいずれかあるいは中間的組織かは、実際の加熱圧延条件、冷却条件および化学組成によって定まるものと考え。例えば、Fig. 6に示す様に、同一鋼種であっても圧

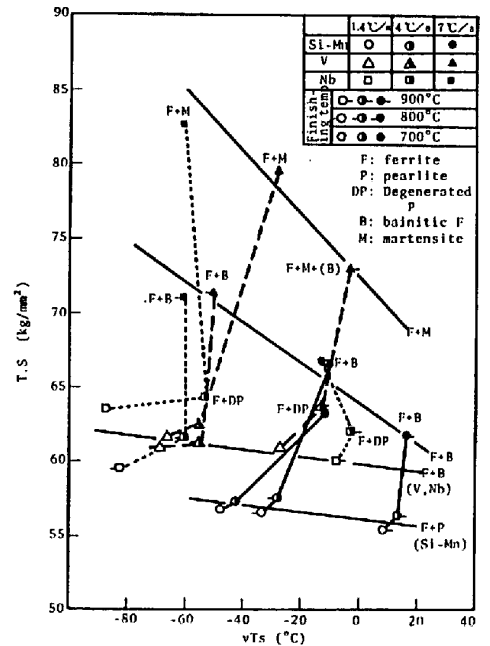


Fig. 6. Correlation of strength, toughness and microstructure in accelerated cooled steel.

延仕上温度の低下は細粒ポリゴナルフェライトの生成促進により靱性の改善を、かつ同一の低温変態組織であってもより高強度を、冷却速度の増加はフェライト→ベイニティックフェライト→マルテンサイトへと相変態を促進しより高強度へと改善させる傾向が伺える(福田, 橋本, 鉄と鋼 '73 S142)。

2. Cによる固溶強化の促進

制御冷却鋼の強化作用に対して森川ら(鉄と鋼, '81-S1335)も指摘しているようにCによる固溶強化の促進作用も無視できない様である。Fig. 7, 8 は炭素鋼, Nb鋼およびV鋼を1100°C加熱-800°C仕上圧延後, 水冷の開始・停止温度を変えた各鋼の常温でのポリゴナルフェライト粒のヴィッカーズ硬さを測定した結果である。Fig. 7より炭素鋼で水冷材の方がH_Vにて20~30ほどフェライト地が硬化すること, 水冷の開始温度が高いほど, 圧延仕上温度が高いほどその硬化が大きい傾向を示した。またFig. 8に示すように水冷の停止温度も600°C以下の方が硬さの増加度が大きい。

3. NbおよびVの作用について

制御冷却鋼でのNb, Vの析出強化作用の増大については大内ら(鉄と鋼, 67(1981)7 p969)によって示されているが, Fig. 7, 8のフェライト地の硬さ上昇を, Nb, V鋼にて空冷材と水冷材を比較すると, 後者の方が大きいことによっても推察される。Fig. 7にて800°Cと760°C仕上によってH_Vの増加傾向が後者の方が低いことはNb, Vの炭窒化物の析出が40°Cの圧延温度範囲の違いによっても変化していて, 仕上温度の低い方が圧延中, 圧延直後の析出が多いことを示しているであろう。

析出強化の他に制御冷却鋼の良好な靱性を維持するのにNbの優れた役割りがあるようである。Fig. 9は炭素鋼とNb鋼に対して種々の冷却条件を付与した場合の同一圧延条件での空冷材と

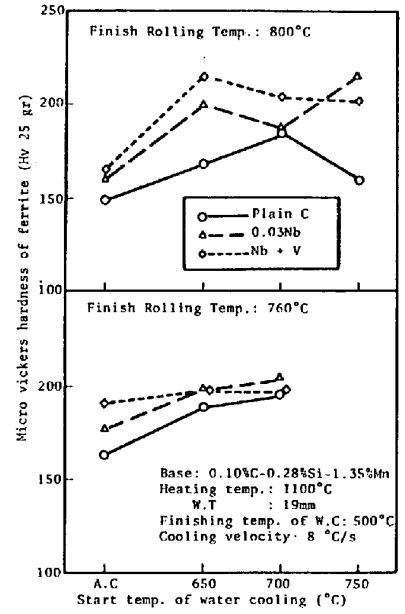


Fig. 7. Change of microvickers hardness of ferrite grain with starting temperature of water cooling in plain carbon, Nb or V steels.

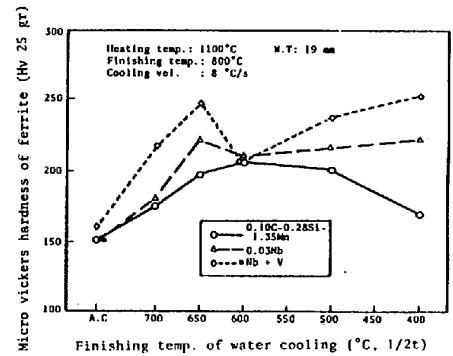


Fig. 8. Change of microvickers hardness of ferrite grain with finishing temperature of water cooling in plain carbon, Nb or V steels.

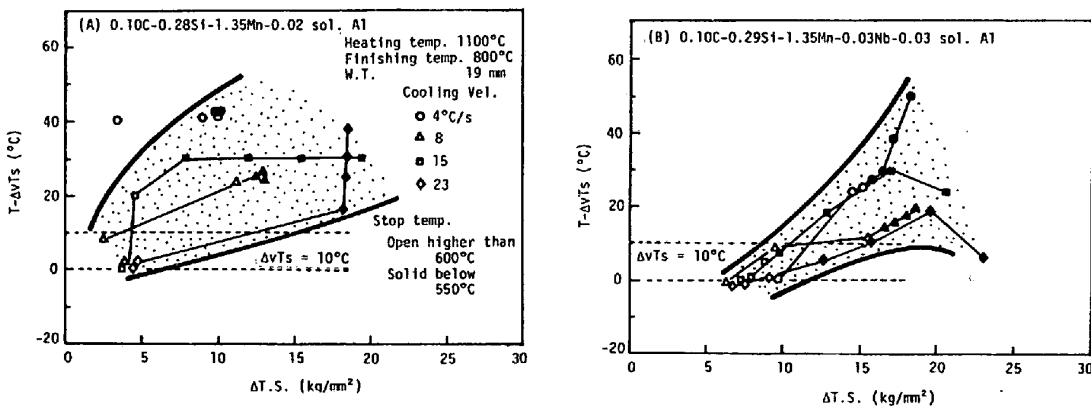


Fig. 9. Comparison of plain carbon steel and Nb steel for shift of tensile strength and Charpy transition temperature by accelerated cooling.

の強度、靱性変化を比較したものである。炭素鋼と比較してNb鋼の方が靱性バラツキが少なくかつ靱性の劣化を抑えて強化するのに適した鋼種であると云えよう。Nb鋼の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態温度が炭素鋼よりも相対的に低いことも考えたが、加工CCT図において両者の変態挙動に大差ないことから、Photo. 1 に比較するように、Nb鋼の方が歪促進による微細フェライトが均一に生成しやすく、組織的変動が小さいことに主因があるように思える。

IV. 制御冷却プロセス実用化への材質面からのアプローチ

以上の検討より制御冷却にて強度-靱性バランスに優れた鋼板を得るには、マイクロ組織的には次の二つの方法に大別される。

①マイクロ組織がフェライト+パーライト組織に留まる範囲内での加速冷却を活用し、主としてフェライト粒の細粒化を図る。

②ポリゴナルフェライトと15%前後のベイナイトまたはマルテンサイトの均一微細混合組織を生成し、大巾な強度上昇を図る。最後のマイクロ組織をこのどちらにするかによって、圧延条件、冷却条件、化学成分の組み合わせが決定されることになるだろう。

Table 1に γ 域仕上(No separation), $\gamma + \alpha$ 二相域仕上(Separation 有), 水冷の途中停止, 室温冷却等種々の条件での試作結果を示す。それぞれに対応して、例えば造船用の高張力鋼として低炭素当量で靱性の優れた鋼板の製造が可能であるとの実機試作結果を得た。

V. まとめ

1. 制御冷却鋼の強靱性はマクロ的にはマイクロ組織とよく対応しフェライトと低温変態組織の混合組織にて靱性はポリゴナルフェライト粒の細かいほど、かつその量が多いほど良好となる。
2. 強度は低温加熱, 低温圧延によりポリゴナルフェライトの生成が促進されるほど低温変態組織が硬質化し上昇しやすい。この他に固溶炭素による固溶強化の促進, 析出強化の促進も認められる。
3. 制御冷却鋼では加熱圧延条件, 水冷条件, 化学組成の組み合わせによりマイクロ組織は多様に变化するが、とりわけ加熱圧延条件の影響は大きいようである。

Table 1. Test results of various kinds of accelerated cooled steel for ship building

Type of Cooling	Chemical Composition (%)					Rolling Method	Thickness (mm)	Mechanical Properties					Example of Application
	C	Si	Mn	Nb	Ceq.			Y.S (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	vT_s (°C)	Charpy Energy (kg·m)	Separation	
Interrupted Cooling	0.16	0.22	0.95	—	0.33	C.R	25	39.5	50.8	<-80	-40°C 17.6	Yes	DH36
	0.15	0.30	1.37	—	0.40	C.R	25	37.9	53.3	-48	-40°C 17.8	No	"
	0.06	0.15	1.33	0.025	0.30	SHT	30	47.3	56.4	<-120	-60°C 25.0	Yes	EH36
	0.12	0.29	1.47	0.025	0.38	SHT	60	39.6	53.6	-64	-60°C 20.7	No	"
Cooling to Room Temp.	0.09	0.19	1.02	—	0.28	C.R	38	38.0	51.7	-74	-40°C >30.0	No	DH36
	0.08	0.08	0.83	—	0.33	C.R	18	35.8	49.8	-44	-40°C 14.4	No	DH32
	0.07	0.16	1.39	0.025	0.32	SHT	50	40.5	56.8	-79	-60°C 18.5	No	EH36

Rolling Method : C.R=Ordinary Controlled Rolling, SHT=Sumitomo High Toughness Process

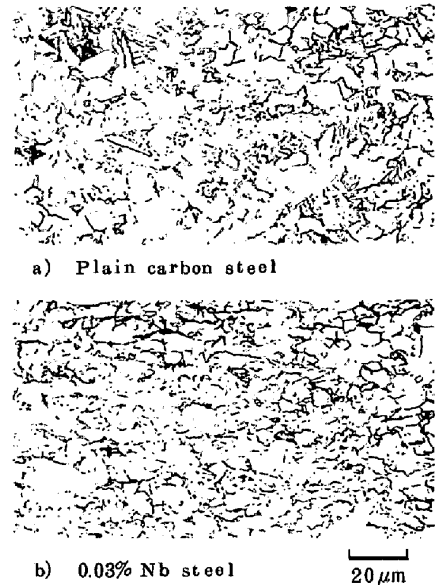


Photo. 1. Comparison of 0.10%C-0.28%Si-1.35%Mn steel and 0.03%Nb steel for microstructure after accelerated cooling to 650°C with cooling rate of 28°C/s. (W.T 19mm, H.T 1100°C, F.T 800°C)