

論 文

UDC 669.15'26'28'74-194.591 : 669.112.227.333 : 539.41.5

中炭素低合金鋼のベイナイトの靱性に及ぼす合金元素の影響*

中 島 宏 興**・荒 木 透***

Effect of Alloying Elements on the Toughness of Bainite
in Medium Carbon Low Alloy Steels

Hiroomi NAKAJIMA and Toru ARAKI

Synopsis:

The effect of C(0.25~0.45%), Ni(0~2.6%), Mo(0~0.5%) and Cr(0~2.2%) contents on the toughness of the as formed and tempered bainite was investigated in 0.4%C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo steels, and factors which affect the toughness of bainite were discussed. Bainite was formed in the isothermal transformation. Increase of C, Ni and Cr contents and rise of transformation temperature raised the transition temperature of bainite. The results were attributed to the increase of both fracture facet size and carbide length and the latter was more deteriorate. In the increase of Cr content, another factor might be also necessary to be taken into account for the full interpretation of the results. Addition of molybdenum lowered the transition temperature of tempered bainite mainly by the relief of the temper embrittlement.

1. 緒 言

ベイナイトの性質に及ぼす合金元素の影響を検討する場合に、そのベイナイトの生成が連続冷却変態あるいは等温変態のいずれによるかを明確にする必要がある。連続冷却変態の場合には、ベイナイトの生成温度範囲が変化することによる影響が強く現われる。これに対して等温変態によつて生成したベイナイトにおいては、生成温度の変化の影響が分離され、同一温度で生成したベイナイトの性質に及ぼす合金元素の影響が求められる。邦武ら¹⁾は等温変態を用いて生成させた低炭素低合金鋼のベイナイトの機械的性質に及ぼす合金元素の影響について報告しているが、用いた鋼の焼入性が低いためにその結果には生成温度の影響が混合して現われている。

本研究では炭素量をやや増加させて焼入性を高めた低合金鋼を用いるとともに試験片の形状を考慮することによつて、生成温度の影響を分離した。そして一定温度において生成したベイナイトの主として靱性に及ぼす合金元素の影響についてさらには生成温度の影響について調査し、ベイナイトの靱性に影響を及ぼす要因について検

討を加えた。

2. 試料および実験方法

2.1 供 試 材

試料は市販の SC 材を大気高周波炉で再溶解し、組成を調整することによつて作製した。その化学組成を Table 1 に示す。C シリーズは 50 kg 鋼塊を、その他のシリーズは 20 kg 鋼塊を 16 mm 角の棒鋼に圧延して供試材とした。

2.2 熱 処 理

オーステナイト化温度は A_{c3} 温度およびオーステナイト結晶粒度を考慮して Table 2 のようにし、保持時間は昇温後 10 min とした。この熱処理条件におけるオーステナイト結晶粒度(瞬間酸化法による)は Table 2 に示すとおりである。そしてベイナイト組織をうるための等温保持温度および保持時間は、あらかじめ測定した等温変態曲線から Table 2 のように決定した。比較のためのマルテンサイト組織は油焼入れ後液体窒素中にサブゼロ処理して生成させた。強度を変化させるための焼もどしは $430^{\circ}\text{C}\times 1\text{hr}$, $600^{\circ}\text{C}\times 10\text{min}$, $650^{\circ}\text{C}\times 1\text{hr}$ と

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 50 年 3 月 29 日受付 (Received March 29, 1975)

** 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku Tokyo 153)

*** 東京大学工学部 工博 (現 金属材料技術研究所) (The University of Tokyo)

Table 1. Chemical composition of steels (wt %).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
C 1	0.25	0.23	0.73	0.010	0.009	0.06	1.09	0.26	0.08
C 2	0.35	0.20	0.71	0.010	0.009	0.06	1.03	0.26	0.08
C 3	0.44	0.32	0.80	0.010	0.010	0.06	1.05	0.27	0.08
Ni 1	0.37	0.15	0.72	0.019	0.011	0.03	1.17	0.26	0.07
Ni 2	0.38	0.17	0.76	0.021	0.011	1.09	1.24	0.26	0.08
Ni 3	0.37	0.24	0.87	0.022	0.010	2.59	1.22	0.26	0.08
Mo 1	0.41	0.27	0.91	0.020	0.011	0.02	1.11	0.02	0.07
Mo 2	0.42	0.32	0.95	0.020	0.011	0.02	1.12	0.25	0.07
Mo 3	0.42	0.32	0.90	0.021	0.012	0.02	1.12	0.50	0.07
Cr 1	0.37	0.31	0.93	0.022	0.012	<0.03	0.13	0.28	0.06
Cr 2	0.38	0.33	0.92	0.022	0.013	<0.03	1.03	0.27	0.07
Cr 3	0.38	0.35	0.91	0.022	0.013	<0.03	2.21	0.28	0.07
Mn 2	0.39	0.27	1.86	0.023	0.011	1.03	1.20	0.26	0.08

Table 2. Heat treatment for the formation of bainite.

Steel	Austenitizing temp. (°C)	Austenite grain size (No.)	Holding time for isothermal transformation (min)				
			300°C	310°C	350°C	400°C	450°C
C 1	910	9.1				10	10
C 2	870	8.2			10	10	20
C 3	870	8.6		50	30	30	5*
Ni 1	870	9.6			10	10	10
Ni 2	870	9.6			20	20	20*
Ni 3	870	9.7	90		180	180*	
Mo 1	900	9.7			10	10	10
Mo 2	900	10.3			10	10	10*
Mo 3	900	10.1			20	30	30*
Cr 1	900	9.3			5	5	5
Cr 2	900	9.7			10	10	10*
Cr 3	900	9.6			30	30*	
Mn 2	870	8.8	180		480*		

*: Untransformed austenite was retained.

した。これらの熱処理には塩浴を用いたが、C 1 鋼および Cr 1 鋼は焼入性が小さく、塩浴では目的の温度の均一なベイナイト組織をうることができなかったため、これら両鋼の等温変態には Pb 浴あるいは Pb-Sn 浴を用いた。等温変態および焼もどし後は油冷した。

2.3 衝撃試験

均一なベイナイト組織をうるために、衝撃試験片は幅を 5 mm とし、他の寸法は JIS 4 号試験片と同じにした試験片を用い、機械加工後に上記の熱処理を施した。衝撃試験には最大容量 10 kg m のシャルピー衝撃試験機を用い、遷移温度は 50% 破面遷移温度 (T_{rs}) とした。

2.4 炭化物の大きさの測定および破面観察

炭化物の大きさの測定には、二段レプリカ²⁾³⁾、抽出レ

プリカ⁴⁾⁵⁾、薄膜試料⁶⁾ による方法が用いられている。

予備実験においてこれら 3 種類の方法について試験した結果、二段レプリカ法が最も正確と思われたので、本実験ではこの方法を採用することにした。この方法では腐食の程度によって炭化物の現出状態が異なるので、腐食条件をできるだけ一定にするために、腐食は 10% 塩酸アルコール中で 10 mA/cm² の電流密度で 1 min の電解により行なった。そして二段レプリカによる電顕写真上において炭化物の長軸方向の長さを測定した。

衝撃試験後の破面の観察は走査型電顕によって行なった。へき開破面単位の大きさは、電顕写真上に引いた任意の線分が破面単位の境界によって切断される長さによって測定した。

3. 実験結果

3.1 ベイナイトおよびマルテンサイトの vT_{rs} に及ぼす合金元素の影響

0.8%Mn-1.0%Cr-0.25%Mo を基準にして C 量を 0.25% から 0.45% まで変化させた場合、各変態温度において生成したままおよび焼もどしたベイナイトの vT_{rs} とかたさの関係を図 1 に示す。変態のままのベイナイトは C 量が増加してもかたさはほぼ同一であるが vT_{rs} は著しく上昇する。そして焼もどした場合には、同一かたさ水準で比較すれば vT_{rs} はすべての生成温度におい

て C 量の増加とともに上昇する。一方、マルテンサイトにおいては C 量の変化の影響は小さく、ベイナイトの場合と全く対照的である。

0.37%C-0.8%Mn-1.2%Cr-0.25%Mo を基準にして Ni 量を 0~2.6% に変化させた場合の、変態のままおよび焼もどしたベイナイトの vT_{rs} とかたさの関係は Fig. 2 のようになる。350°C で生成したままのベイナイトにおいては、Ni 量の増加とともにかたさが低下しているにもかかわらずその vT_{rs} はほとんど変化していない。このことは Ni 量の増加はベイナイトの靱性に対して負の効果を及ぼすことを示している。そして焼もどしベ

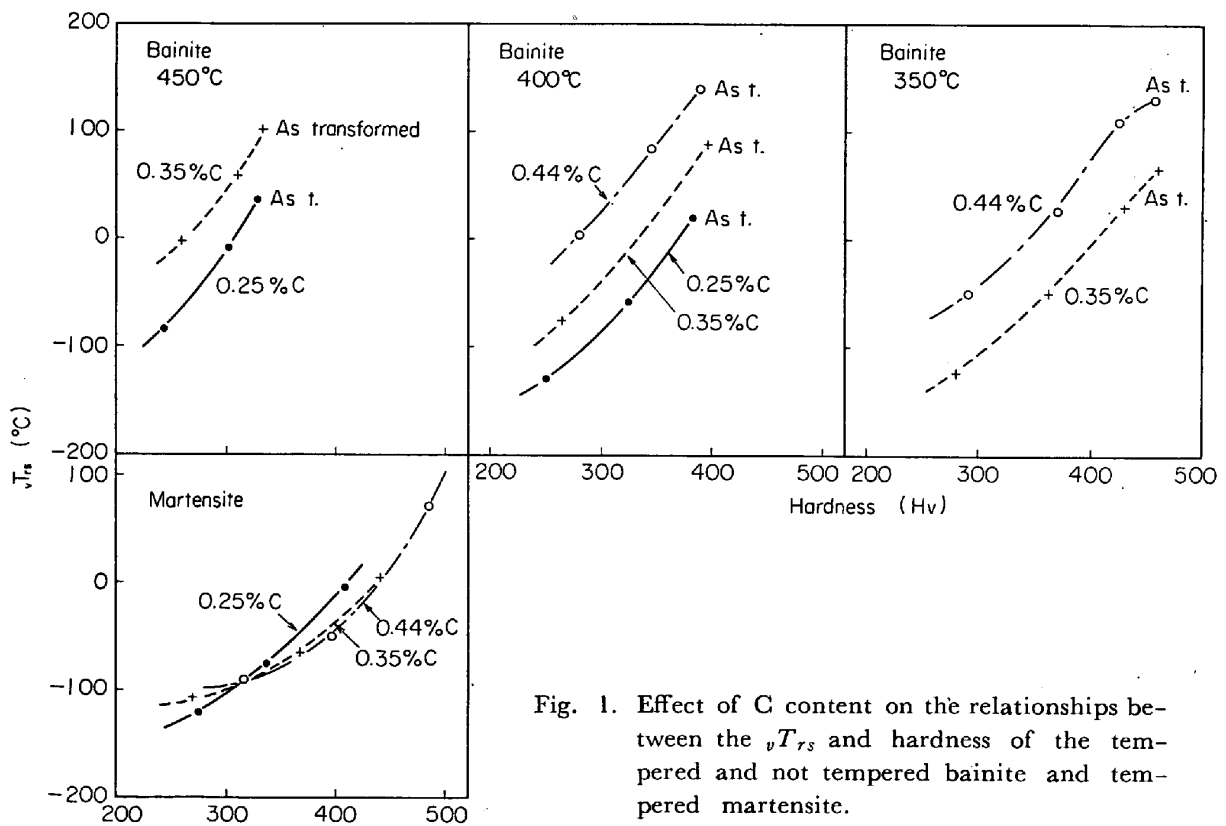


Fig. 1. Effect of C content on the relationships between the vT_{rs} and hardness of the tempered and not tempered bainite and tempered martensite.

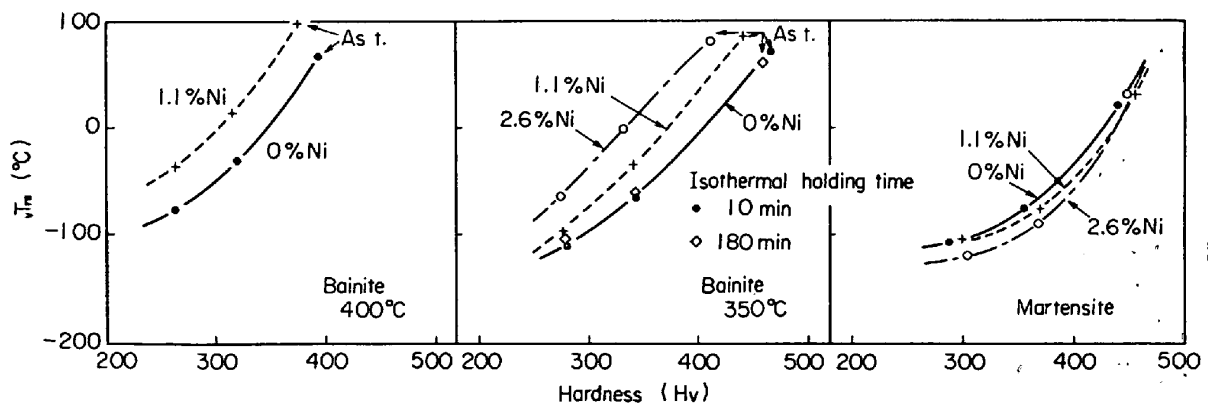


Fig. 2. Effect of Ni content on the relationships between the vT_{rs} and hardness of the tempered and not tempered bainite and tempered martensite.

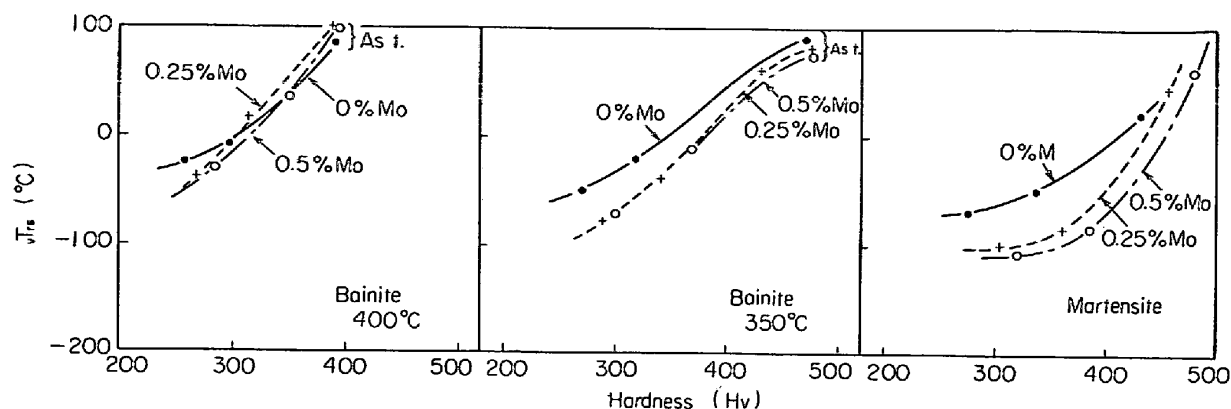


Fig. 3. Effect of Mo content on the relationships between the vT_{rs} and hardness of the tempered and not tempered bainite and tempered martensite.

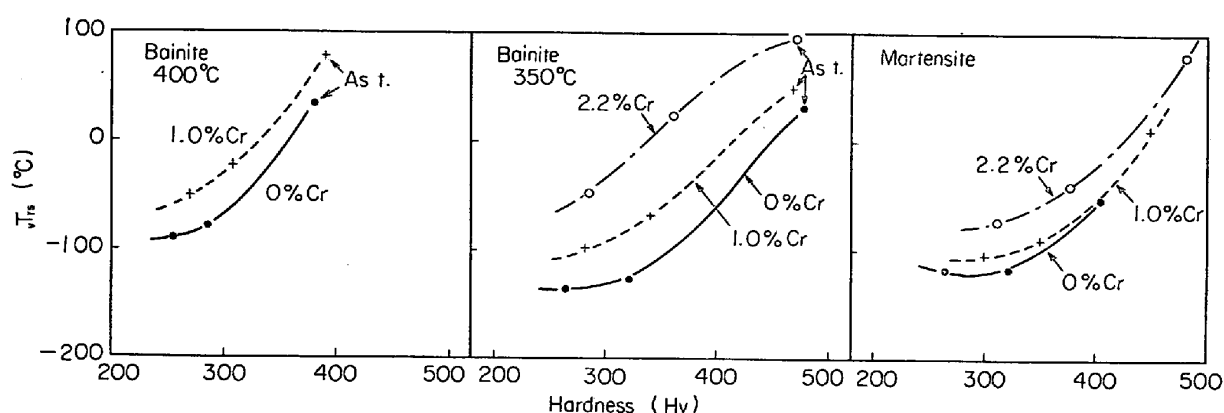


Fig. 4. Effect of Cr content on the relationships between the vT_{rs} and hardness of the tempered and not tempered bainite and tempered martensite.

ナイトでは、同一かたさ水準で比較した場合、 vT_{rs} は Ni 量の増加とともに上昇する。一方、焼もどしマルテンサイトの vT_{rs} は Fig. 2 に示すように Ni の添加によつて低下し、従来の報告⁷⁾⁸⁾と一致している。Ni は固溶効果によつて靱性を向上させる効果があると考えられるにもかかわらず、ベイナイトにおいてマルテンサイトと逆の結果がえられたことは、ベイナイトでは Ni 量の増加によつて vT_{rs} を上昇させる強力な要因が存在すると考えられる。

0.42%C-0.9%Mn-1.1%Cr を基準として Mo 量を 0~0.5% に変化させた場合の、変態のままおよび焼もどしたベイナイトの vT_{rs} とかたさの関係を Fig. 3 に示す。400°C のベイナイトにおいては Mo を 0.5% まで増加してもその靱性はほとんど変化しない。しかし、350°C のベイナイトについては 0.25%Mo の添加は、焼もどし状態においてその vT_{rs} をかなり低下させる。そしてさらに増加して 0.5% にしてもほとんど変化しない。マルテンサイトも Fig. 3 に示すように 350°C のベイナイトと似たような挙動を示し、最初の 0.25% の

添加による vT_{rs} の低下が大きい。

0.38%C-0.9%Mn-0.28%Mo を基準として Cr 量を 0~2.2% に変化させた場合の vT_{rs} とかたさの変化を Fig. 4 に示す。Cr 量の増加はベイナイトの vT_{rs} を著しく上昇させ、マルテンサイトについてもかなり上昇させる。

0.38%C-0.8%Mn-1.2%Cr-0.25%Mo-1.1%Ni 鋼の Mn 量を 1.9% に増加させたときのベイナイトの vT_{rs} に及ぼす Mn の影響を Fig. 5 に示す。この鋼では 350°C の等温変態においては完全なベイナイト組織がえられず 15% のマルテンサイトの混入が認められた。しかしこの混合組織の曲線および 300°C のベイナイトの曲線が 0.8% Mn 鋼の 350°C のベイナイトの曲線よりも高い vT_{rs} を示すことは、Mn 量の増加が有害であることを示している。マルテンサイトの vT_{rs} も Fig. 5 に示すように Mn 量の増加によつて上昇し、これは従来の報告⁷⁾⁸⁾と一致している。

以上のように、同一温度で生成したベイナイトの vT_{rs} に及ぼす合金元素の影響は、マルテンサイトに対する影

響とはかなり異なることが明らかになった。350°Cのベイナイトについて、変態のままおよび650°C×1hrの焼もどしにおける νT_{rs} に及ぼすC, Ni, Mo, Crの影響をまとめて示すとFig. 6のようになる。C量の増加は著しく、そしてNiおよびCr量の増加もかなり νT_{rs} を上昇させることがわかる。

3.2 ベイナイトの νT_{rs} に及ぼす生成温度の影響

ベイナイトの靱性は生成した温度によっても著しい影響を受ける。Fig. 1~4は、同一かたさ水準で比較した場合、ベイナイトの νT_{rs} が生成温度の上昇とともに著しく上昇することを示している。Fig. 7は一定かたさ(Hv 320)に焼もどした各鋼のベイナイトの νT_{rs} と生成温度の関係を示したもので、生成温度の上昇とともに νT_{rs} は著しく上昇する。

同一温度で生成したベイナイトについてみると (Fig. 7(a)), 本実験における範囲の化学組成の変化に対し

て νT_{rs} は100°C以上の変化を示している。しかし生成温度をMsからの温度差によつて整理すると、Fig. 7(b)に示すように、合金元素の影響は著しく減少される。ただしCr量の増加は明らかに νT_{rs} を上昇させる。さらにMo 1およびMn 2鋼はやや高い νT_{rs} を示すが、これは後述のように焼もどし脆化と関連している。また、Ms直上で生成し焼もどしたベイナイトは、同一かたさに焼もどしたマルテンサイトとほぼ同一の νT_{rs} を示し、前報⁹⁾の結果と一致する。

4. 結果の検討

以上の結果から、合金元素量の変化および生成温度の変化は、ベイナイトの νT_{rs} に影響を及ぼす因子に対して何らかの変化をもたらしたと考えられる。生成温度の上昇による νT_{rs} の上昇については従来から多くの報告^{1)9)~14)}があり、生成温度が高くなるにつれてへき開破面

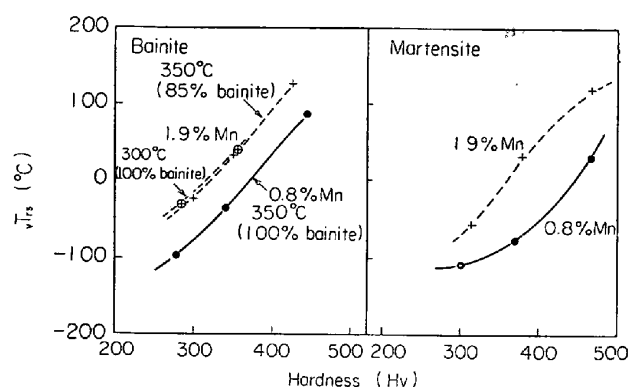


Fig. 5. Effect of Mn content on the relationships between the νT_{rs} and hardness of the tempered and not tempered bainite and tempered martensite.

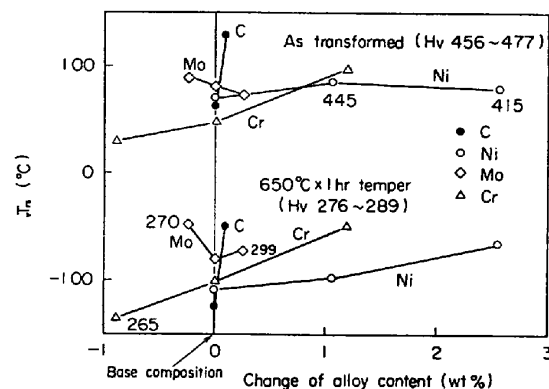


Fig. 6. Effect of alloying element on the transition temperature of the bainite formed at 350°C. Figures show the Vickers hardness number.

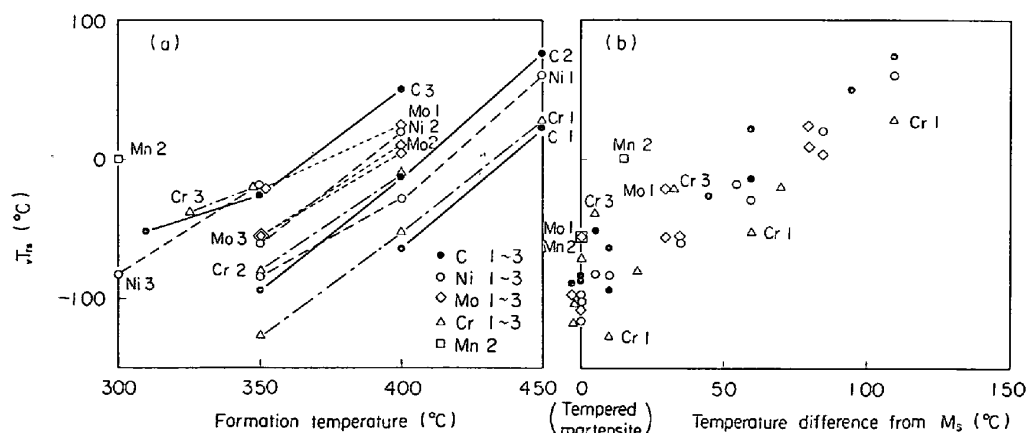


Fig. 7. Effect of the formation temperature on the νT_{rs} of the bainite tempered to the same hardness (Hv 320).

(a) Impact transition temperatures as a function of formation temperature of bainite and (b) those as a function of difference of bainitic formation temperature from Ms temperature.

単位が大きくなること^{1)9)11)~13)}および炭化物が粗大にしかも結晶粒界に生成しやすくなること¹¹⁾¹⁴⁾がその原因と考えられている。前者については松田ら¹²⁾や邦武ら¹⁾の研究があり、低炭素低合金鋼のベイナイトおよびマルテンサイトについて、へき開破面単位の大きさと vT_{rs} との間により相関関係が成立することが報告されている。そこで、これら両因子を中心にして、ベイナイトの vT_{rs} に及ぼす合金元素および生成温度の影響の内容を検討することにした。

4.1 破壊の様式

一般に vT_{rs} は粒内におけるせん断型／へき開型破壊の変化に対応するが、粒界が脆化すると粒界破壊によって vT_{rs} が現われることがある。そこでまず、破壊後の破面について破壊の様式を調べた。その結果、ほとんどの鋼では粒内破壊であったが、0% Mo の Mo 1 鋼では 350°C で生成したベイナイトおよびマルテンサイトの、そして 1.9% Mn の Mn 2 鋼ではベイナイトおよびマルテンサイトのそれぞれ焼もどし状態においてかなりの量の粒界破壊が観察された。さらに 2.2%Cr の Cr 3 鋼では、焼もどしマルテンサイトにおいてはかなりの焼もどしベイナイトでは少量の粒界破壊が観察された。この粒界破壊は高温の焼もどし脆化によるものと思われ、Fig. 3, 5, 7 などにおける Mo および Mn の影響は主としてこのためと考えられる。

4.2 へき開破面単位の大きさ

ベイナイトのへき開破面単位の大きさに及ぼす合金元素量および生成温度の影響を、650°C で焼もどした試料の破面について調べた結果を Fig. 8 に示す。Mo, Ni の影響は比較的小さいが、Cr, C 量の増加は破面単位の大きさをかなり増大させ、しかもその効果は合金元素の単位量当たりについてみると Cr よりも C の方がはるかに大きい。一方、生成温度の上昇も破面単位を増大させ、しかもその程度は合金元素量の影響よりもかなり大きい。

650°C で 1hr 焼もどしたベイナイトの vT_{rs} とへき開破面単位の大きさの $-1/2$ 乗との関係を求めると Fig. 9 のようになる。大部分のデータはかたさ Hv 276~289 の範囲内にあつたが、この範囲以外のものについては図に示すように、各シリーズごとに vT_{rs} を同一かたさにおける値に補正した。補正は Fig. 1~Fig. 4 の vT_{rs} -かたさ曲線を用いて同一かたさにおける vT_{rs} を求めることによって行なつた。すべての測定点はほぼ 1 本の直線によつて整理されるように見え、 vT_{rs} を支配する因子として破面単位のみを考えればよいようにみえる。しかし直線の勾配が問題である。破壊の様式を変化させる Mo

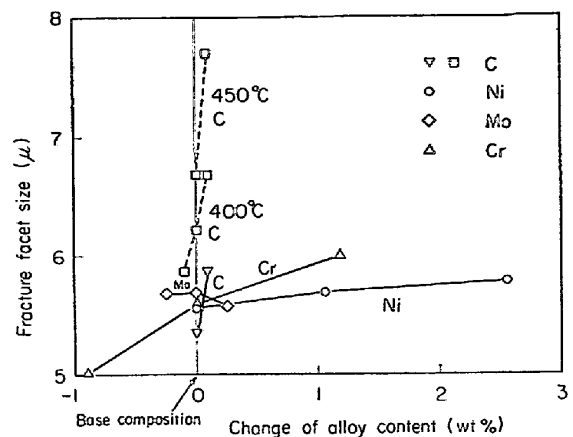


Fig. 8. Effect of alloying element and formation temperature on the fracture facet size of bainite. Square marks are related to the bainite formed at 400°C or 450°C and others to one formed at 350°C. Base composition is 0.35~0.42%C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo.

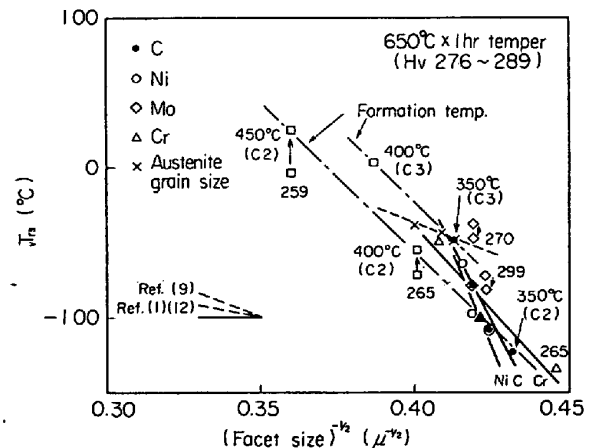


Fig. 9. Relationship between the vT_{rs} and the fracture facet size of bainite. Figures show the Vickers hardness number. Square marks show the measured values of the bainite formed at 400 or 450°C and others ones of the bainite formed at 350°C.

を除く各合金元素および生成温度の影響については、図に示すようにそれぞれの直線および一点鎖線を引くことができる。一方×印の破線は C 3 鋼のオーステナイト結晶粒度を粒度番号 8.6 から 5.5 まで変化させたときの関係を示している。この場合にはほかの因子の影響は少なく、ほぼ破面単位の影響のみが現われていると考えられる。実際に、炭化物の大きさについては差が認められなかつた。なお、この破線の勾配は、図に示すように、松田ら¹²⁾および邦武ら¹⁾による低炭素低合金鋼のベイナイトの vT_{rs} と破面単位の大きさの $-1/2$ 乗との関係直

線および著者ら⁹⁾による中炭素低合金鋼においてオーステナイト結晶粒度を変化させたときの関係直線の勾配とほぼ同じである。Fig. 9 における各直線の勾配が破線のそれよりも大きいのは、各直線の結果には破面単位の影響にほかの影響が重量されていることを示していると考えられる。

4.3 炭化物の大きさ

変態したままおよび 650°C で 1hr 焼もどしたベイナイトにおける炭化物の平均の大きさおよび数の変化を Fig. 10~12 に示す。Fig. 10 は C 量および生成温度の影響を、そして Fig. 11 および 12 は 350°C で生成したベイナイトにおける各合金元素の影響を示す。まず同一変態温度で生成したままのベイナイトについて比較すると、Cr, Ni, C の増加は炭化物の長さを増大させ、その効果は合金元素の単位量当たりについてみると $Cr < Ni < C$ になる。Mo もやや増大させるようであるが、添加量が少ないのでその程度は小さい。炭化物の数は、本実験の範囲で C 量が増加した場合にはほとんど変化しない。しかしほかの合金元素量の変化によつて炭化物の大きさが増加した場合には、その数は減少する。これは、この場合には C 量が一定だからである。生成温度の上昇は炭化物の大きさを増大させその数を減少させる。ベイナイトのかたさは、C 量の変化によつてほとんど影響を受けないが変態温度の変化によつては著しい影響を受けるのは (Fig. 1), 炭化物の数のこのような挙動が大きな原因になっていると考えられる。ベイナイトの炭化物の形状に及ぼす C, Ni, Cr 量および生成温度の影響を Photo. 1 に示す。

焼もどしの影響は一般に炭化物の数にはほとんど現われないが、その長さを減少させる。このことは、生成したままでは細長い形状をしていた炭化物が焼もどしによつて球状化したことを示している。ただし Mo 1 鋼および Cr 1 鋼の 650°C × 1hr の焼もどしにおいて炭化物の大きさが増加しその数は減少したことは、炭化物の凝集がおこったことを示している。

ベイナイトの vT_{rs} を炭化物の長さの関数としてプロットすると Fig. 13 (a) のようになる。まず変態したままのベイナイトについては、Ni が添加された場合を除いてはほぼ 1 本の直線によつて整理され、炭化物の長さの増大とともに vT_{rs} は上昇している。Ni が添加された場合に直線より低くはずれるのは、主としてかたさが低いためである。Ni の増加によつて炭化物の大きさが増大しかたさが低下した原因について、変態時間が長いために等温保持中にベイナイトの炭化物が凝集粗大化したのではないかという疑問が生じる。そこで Ni 1

鋼について Ni 3 鋼と同様に 350°C で 180 min 保持した場合の炭化物の大きさを測定したところ、10 min 保持の場合とほとんど同一であつた。さらに vT_{rs} およびかたさも Fig. 2 に◇印で示すように、10 min 保持の場合とほとんど変らなかつた。これらのことから、Ni を添

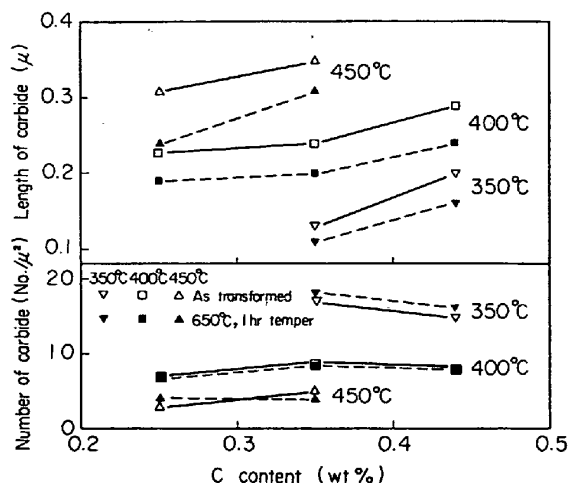


Fig. 10. Effect of the carbon content and formation temperature on the size and number of the carbide particles in the bainite.

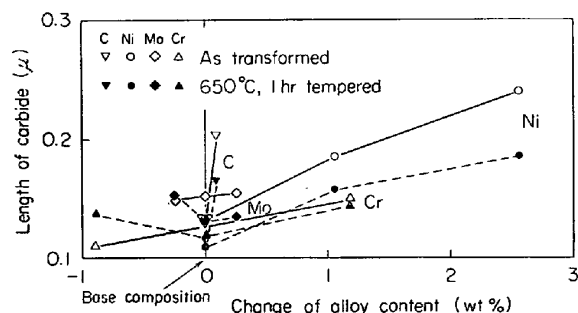


Fig. 11. Effect of alloying element on the particle size of carbide in the bainite formed at 350°C. Base composition is 0.35~0.42% C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo.

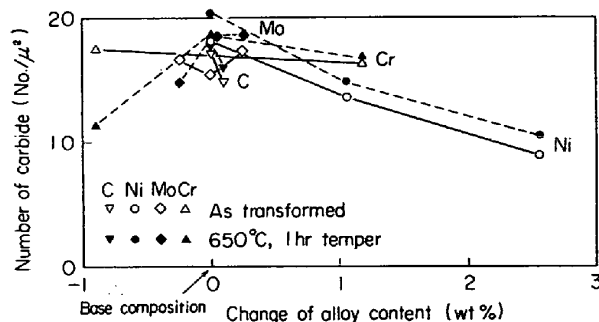
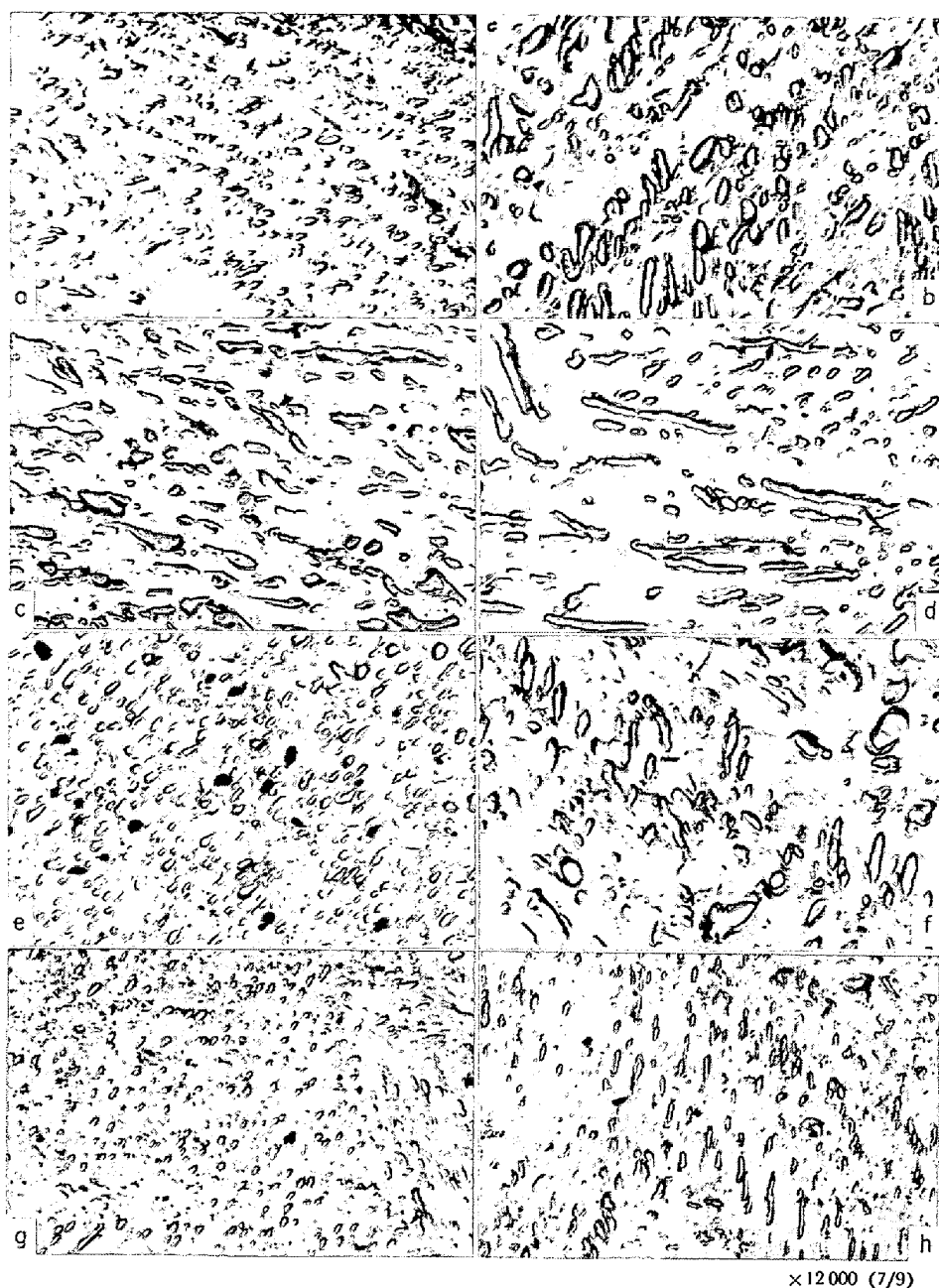


Fig. 12. Effect of alloying element on the number of carbide particles in the bainite formed at 350°C. Base composition is 0.35~0.42% C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo.



(a) C 2, 350°C (b) C 3, 350°C (c) C 2, 400°C (d) C 2, 450°C
(e) Ni 1, 350°C (f) Ni 3, 350°C (g) Cr 1, 350°C (h) Cr 3, 350°C

Photo. 1. Carbide in the as formed bainite.

加した場合の結果は Ni 自身の効果と考えられる。

650°C×1hr 焼もどしの場合には、かたさは Hv 276～289 でほぼ一定であるが、この範囲以外のものについては各シリーズごとに同一かたさにおける値に補正した。補正は、 σT_{rs} については既述の方法により、そして炭化物の長さについては焼もどしによる炭化物の長さとかたさの変化の関係を示す曲線上において同一かたさにおける炭化物長さを求めることによつて行なつた。ただし Mo 1 鋼と Cr 1 鋼については、上述の焼もどし条件において凝集によつて炭化物の数が減少しているの

で、上述の方法による補正ができなかつた。

Fig. 13(a) の結果にはへき開破面単位の変化による影響も重畳されていると考えられるので、Fig. 9 を用いて破面単位の影響をさし引くと Fig. 13(b) のようになる。C, Ni, Cr 量の増加および生成温度の上昇による炭化物の長さの増加は、ベイナイトの σT_{rs} を上昇させることを示している。C, Cr 量を増加した場合には Ni 量の増加および生成温度の上昇の場合よりも直線の勾配が大きい。C量の増加は炭化物の数にはほとんど変化をもたらさないでその大きさを増大させるのに対して

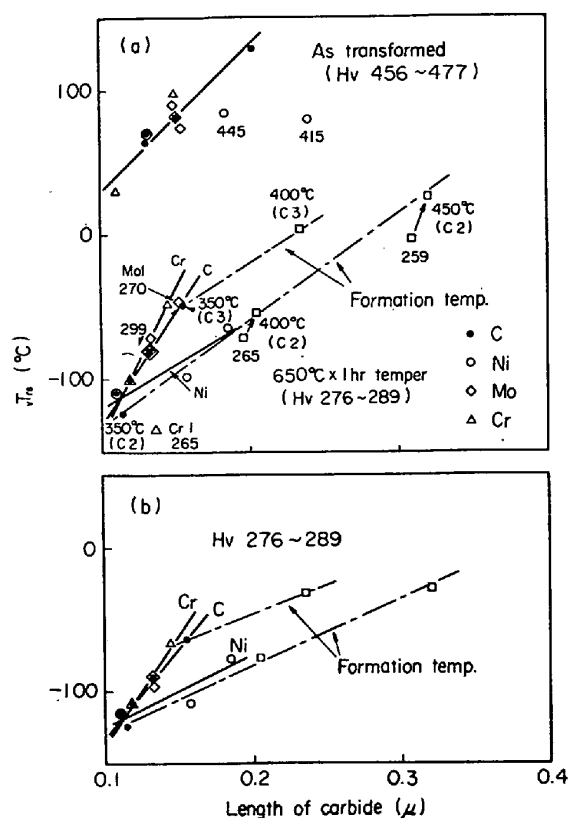


Fig. 13. Relation between vT_{rs} and length of carbide particles. In the results of Fig. (a) the effect of the fracture facet size has been included but taken away in those of Fig. (b). Figures show the Vickers hardness. Square marks show the measured values of the bainite formed at 400 or 450°C and others do ones of the bainite formed at 350°C.

Ni 量の増加および生成温度の上昇は炭化物の大きさを増大させるとともにその数を減少させる。したがって Ni には固溶による靱性向上の効果も含まれていると思われるが、炭化物の存在が vT_{rs} を上昇させる働きをもつとすれば、Ni 量の増加および生成温度の上昇の場合には炭化物の数が減少することによって vT_{rs} の上昇の程度を小さくしていると考えられる。しかし Cr 量の増加により炭化物の長さが増加した場合の直線の勾配の増大は、へき開破面単位および炭化物の大きさ以外の強い影響が存在することを示している。その1つは Cr 量の増加とともに粒界破壊が観察されるようになることであるが、ベイナイトにおいて観察される粒界破壊の量はマルテンサイトよりもかなり少ない。したがってこれのみで説明することは無理なようであり、今後の検討が必要と思われる。

生成温度の影響については、350°C で生成したベイナ

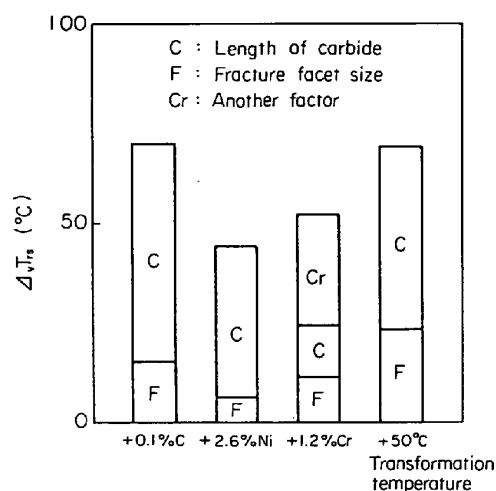


Fig. 14. Contribution of each factor to the change of vT_{rs} . Base composition is 0.35%C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo and base temperature is 350°C.

イトは大部分下部ベイナイトであり、炭化物はフェライト粒内に析出している。400, 450°C で生成したベイナイトにおいては、炭化物は粒内のみならず粒界にも多く析出している。粒界に不均一に析出した炭化物は粒内に均一に析出した炭化物に比べて靱性をより大きく低下させると考えられている¹⁵⁾。それにもかかわらず生成温度が上昇した場合の直線の勾配が小さいのは、粒界の炭化物は、比較的短かい間隔をおいて点列状に析出しているために連続したものとして測定されやすいことや粒内炭化物よりも腐食されやすいことなどのために、粒内の炭化物よりも大きく測定されやすくなり、生成温度の上昇による炭化物の長さの変化には、結果的に粒界における析出の効果が含まれてしまうためと考えられる。

vT_{rs} に及ぼす炭化物の働きとして、PICKERING¹¹⁾は下部ベイナイトでは上部ベイナイトに比べて炭化物の数が多くなり、クラックの伝播の抵抗が大きくなることによつて vT_{rs} が低下するとしている。しかしこの考えのみでは、C量が増加した場合に炭化物の数がほとんど変化しないにもかかわらず vT_{rs} が上昇することをうまく説明できない。炭化物の存在はすべり帯の移動を阻止して高い応力集中をもたらし、クラックの発生を容易にする働きをするとも考えられ¹⁵⁾、本実験においてはこの効果の方がより大きく現われたと考えられる。

350°C で生成したベイナイトを Hv 276~289 に焼もどした場合の vT_{rs} に及ぼす合金元素の影響および生成温度の影響は、へき開破面単位および炭化物の大きさの変化を主因子とすると Fig. 14 のように分離される。合金元素の影響では 0.35%C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25

%Mo を基準にし、生成温度の影響では 350°C を基準にした。C および Ni 量の増加による vT_{rs} の上昇にはへき開破面単位を増大よりも炭化物の長さの増加の方がより大きい影響を及ぼす。生成温度の上昇による vT_{rs} の上昇に対しては破面単位の影響もかなり大きい、やはり炭化物の影響がより大きいようである。Cr 量の増加の場合には、炭化物の大きさの影響を Ni の場合と同じとして計算すれば図に示すようになり、両因子以外の影響がかなり大きい。

5. 結 言

0.4%C-0.8%Mn-1.1%Cr-0.25%Mo 鋼を基準にして、等温変態によつて生成したベイナイトおよびこれをいろいろな強度に焼もどしたベイナイトの vT_{rs} に及ぼす C (0.25~0.45%), Ni (0~2.6%), Mo (0~0.5%), Cr (0~2.2%) の影響を調べ、さらにベイナイトの vT_{rs} に影響を及ぼす要因について検討した。えられたおもな結果は次のとおりである。

1. C 量の増加は、同一かたさ水準において、同一変態温度で生成したベイナイトの vT_{rs} を著しく上昇させる。そして Ni 量の増加もかなり上昇させる。 vT_{rs} の上昇の原因としてへき開破面単位および炭化物の大きさの増大が考えられるが、後者による効果がより大きいと考えられる。

2. 0.25% の Mo の添加は焼もどしベイナイトの vT_{rs} をかなり低下させるが、0.25% から 0.5% への増加はほとんど影響を及ぼさない。前者の結果は焼もどし脆化に基づく粒界破壊の阻止によるものであり、そして後者の結果は 0.5% までの Mo の添加がへき開破面単位および炭化物の大きさにほとんど影響を及ぼさないためと考えられる。

3. Cr 量の増加はベイナイトの vT_{rs} をかなり上昇させる。この場合にはへき開破面単位および炭化物の大きさの増加とともに、そのほかの原因が存在すると考えられる。

4. 生成温度の上昇はベイナイトの vT_{rs} を著しく上昇させるが、この場合にも破面単位を増大よりも炭化物の大きさの増加の効果がより大きいと考えられる。

終りに、本研究に有益な御助言をいただいた金属材料技術研究所 渡辺敏室長に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 邦武, 寺崎, 大森: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1877
- 2) T. KUNITAKE: Trans. ISI, 7(1967), p. 254
- 3) A. M. TURKALO and J. R. Low, Jr.: Trans. AIME, 212(1958), p. 750
- 4) D. W. SMITH and R. F. HEHEMANN: JISI, 209 (1971), p. 476
- 5) K. J. IRVINE and F. B. PICKERING: JISI, 188 (1958), p. 101
- 6) A. R. COX: JISI, 205(1967), p. 51
- 7) H. J. FRENCH: J. Metals, 8(1956), p. 770
- 8) C. VISHNEVSKY and E. A. STEIGERLAND: Trans. ASM, 62(1969), p. 305
- 9) 中島, 荒木: 鉄と鋼, 58(1972), p. 1993
- 10) K. J. IRVINE and F. B. PICKERING: JISI, 201 (1963), p. 518
- 11) F. B. PICKERING: Transformation and Hardenability in Steels, (1967), p. 109 [Climax Mo.]
- 12) 松田, 井上, 三村, 岡村: 鋼の強靱性, (1971), p. 45 [Climax Mo.]
- 13) A. M. TURKALO: Trans. AIME, 218(1960), p. 24
- 14) 腰塚, 鎌田, 船越: 鉄と鋼, 57(1971), S 721
- 15) A. S. TETELMAN and A. J. McEVILY, Jr.: Fracture of Structural Materials, (1967), p. 234 [John Wiley & Sons]