

UDC 669.15'24'26'28-194 : 620.18 : 539.4 : 593.52 : 669.112.227.342 :
669.112.227.333

論 文

マルテンサイトとベイナイト二相混合組織をもつ
0.42%C-Ni-Cr-Mo鋼の強度と延性について*

富田 恵之**・宮本 啓太***・岡林 邦夫****

The Strength and Ductility of a 0.42%C-Ni-Cr-Mo Steel Having
Mixed Structure of Martensite and Bainite

Yoshiyuki TOMITA, Keita MIYAMOTO, and Kunio OKABAYASHI

Synopsis:

A study has been made of the strength and ductility of a 0.42%C-Ni-Cr-Mo steel having mixed structure of martensite and bainite.

It was found that lower bainite, which precipitated acicularly so as to partition prior austenite grains, had a desirable effect on the 0.2% proof stress regardless of tempering conditions, but had not necessarily on the elongation. Upper bainite, which precipitated massively so as to fill prior austenite grains, was found to have detrimental effects both on the 0.2% proof stress and elongation irrespective of tempering conditions.

The beneficial effect of lower bainite on the 0.2% proof stress is attributable to the fact that the 0.2% proof stress deviates better from the general law of mixture, it resulting from the improvement of the strength of martensite owing to the refinement of its substructure, besides an increase in the strength of the bainite being due to higher plastic restraining of the bainite by martensite. The detrimental effect of upper bainite on it is attributable to the fact that it deviates worse from the law of mixture being due to ununiform strain of two-phase.

1. 結 言

フェライト-パーライト鋼を初めとして、実用鋼の中には各相が結晶粒程度のオーダーの大きさの二相混合組織をもつ鋼が多いが¹⁾、これらの中で硬質母相中に軟質な第二相をもつ鋼の微視組織的因子と機械的性質の関係について行なわれた研究報告はこれまで比較的少なく、その考え方についても未だ不明な点が多い。

そこで著者らは、これらのことを検討するために、低合金構造用鋼を用いて、マルテンサイト基地中に軟質な第二相をもつ混合組織を作製し、その微視組織的因子と強度、延性および破壊挙動の関係について一連の検討を行なっており、先に第二相として残留フェライトを取り上げ、その静的引張性質ならびに静的および衝撃曲げ破壊におよぼす影響について検討し、その結果を報告した^{2)~4)}。

本研究は、これらの研究の一環として行なつたもので、第二相としてベイナイトを取り上げ検討を行なつた。従来、マルテンサイトとベイナイト二相混合組織は、いわゆる不完全焼入組織とみなされ、その機械的性質は、完全焼入したマルテンサイト組織に比較して劣化すると考えられてきたが⁵⁾、EDWARDS⁶⁾が、3%Ni-Cr-Mo鋼において、マルテンサイト中に下部ベイナイトが体積率50%で含有される場合、マルテンサイト単相組織のものより靱性が向上するという結果を報告して以来、とりわけ靱性について比較的多くの研究が行なわれ、靱性とベイナイトの生成温度あるいは体積率の間に特徴的な関係が見い出されてきた^{7)~13)}。これら特徴的な関係は、主としてベイナイトの存在形態と密接に関連するものと考えられるが、これまで、これら二相混合組織の強度、延性および破壊挙動について、ベイナイトの存在形態に着目して系統的に行なわれた研究報告は比較的少なく、そ

* 昭和 51 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 7 月 20 日受付 (Received July 20, 1977)

** 大阪府立大学工学部 (Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture, 4-804 Mozuume-machi Sakai 591)

*** 大阪府立大学大学院 (現: ダイハツ工業(株)) (Graduate School, University of Osaka Prefecture)

**** 大阪府立大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture)

Table 1. Chemical composition of steel used (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.42	0.16	0.63	0.011	0.008	1.91	0.83	0.17

の考え方についても未だ不明な点が少なくない。

そこで本報告では、ベイナイトの存在形態を比較的容易に変化させることができ、また、ベイナイト変態 100% 可能な 0.42%C-Ni-Cr-Mo 鋼を用いて、恒温変態熱処理によつて種々なるベイナイトのラス径および体積率をもつマルテンサイトとベイナイト二相混合組織を作製し、さらに焼もどし条件を変化させることによつて二相間の強度比 (差) を変えて、主としてベイナイトの存在形態に着目してその強度と延性について検討を行なった。

2. 実験方法

2.1 供試鋼および熱処理

供試鋼は、0.42%C-Ni-Cr-Mo 鋼で、その化学成分は Table 1 に示すとおりである。供試鋼は 90φ の熱間圧延棒材として入手し、13 mm の厚さに熱間鍛造後、5 t × 30 w × 100 l (mm) に研削し、860°C × 1 h 焼なましを行ない試料に供した。マルテンサイトとベイナイト二相混合組織は、860 および 1050°C でオーステナイト化後、320 および 400°C に保持した鉛-錫浴中に投入し、所定の時間保持した後、氷水中に焼入することによつて得た。マルテンサイトおよびベイナイト単相組織*を得るための熱処理を含めて、その熱処理の詳細を模式的に Fig. 1 に示した。焼入後、深冷処理 (液体窒素中) と焼もどし処理を繰返すことによつて残留オーステナイトを可能な限り減少させた¹⁴⁾。焼もどしは、それぞれ油浴、鉛-錫浴および鉛浴を用いて、200°C × 1 h、400°C × 15 h および 600°C × 20 h 行ない、焼もどし後は前者では空冷、後二者では水冷した。

2.2 静的引張試験

静的引張試験は、最大容量 25 t のインストロン式万能材料試験機を使用して、25 mm の標点間をオートストレーンパーサーを用いて、 3.35×10^{-4} / sec の一定ひずみ速度で、室温にて行なった。それらの試験片の形状および寸法は Fig. 2 に示すとおりであり、その最終仕上げは平面研磨あるいは放電加工により行なったが、前者では加工中昇温しないようにして ±1/100 mm の精度に

* 微量の残留オーステナイトが含有されている可能性があり、厳密な意味で単相組織とは言えないが、二相混合組織と区別する意味で使用した。

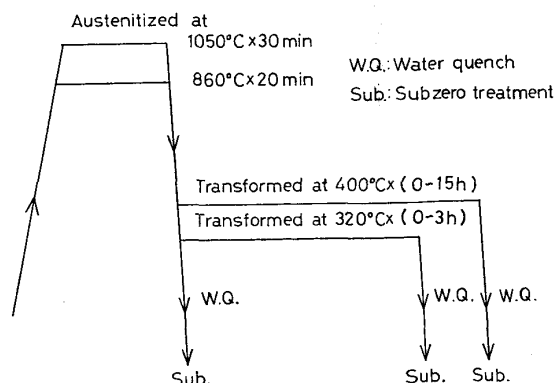


Fig. 1. Schematic diagram of heat treatment for obtaining fully martensite or bainite structures, and mixed structures of martensite and bainite.

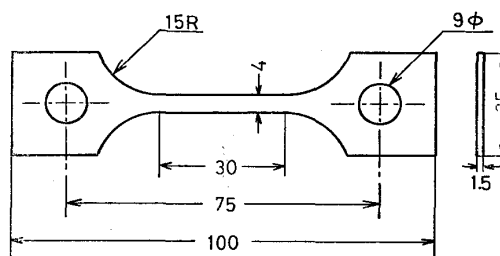


Fig. 2. Shape and dimensions of tensile specimens.

仕上げ、また、後者では仕上げ粗さが 10μ 以下になるように注意して加工した。

2.3 顕微鏡組織

顕微鏡組織は光学顕微鏡および 200 kV 透過電子顕微鏡を使用して観察した。透過電子顕微鏡による観察に用いた薄膜試片は、まず、0.1 mm の厚さの試料を切り出し、それをフッ化水素酸-過酸化水素水化学研磨液で化学研磨後、磷酸-クロム酸電解液で電解研磨して作製した。

2.4 残留オーステナイトの定量

残留オーステナイトの定量は X 線回折法¹⁵⁾¹⁶⁾で行ない、実験は $\text{CoK}\alpha$ 線を用い、 $\alpha(211)$ 、 $\gamma(220)$ および $\gamma(311)$ の回折面を使用して、ステップスキャンング法で行なった。

3. 実験結果

3.1 顕微鏡組織および微視組織的因子

Photo. 1 はそれぞれ 320°C × 3 h および 400°C × 15 h 恒温変態させて得られたベイナイト単相組織における下部組織を透過電子顕微鏡により観察した結果を示したものである。これらの結果から、320°C で恒温変態させた場合には、フェライト板状晶の内部にセメンタイトが

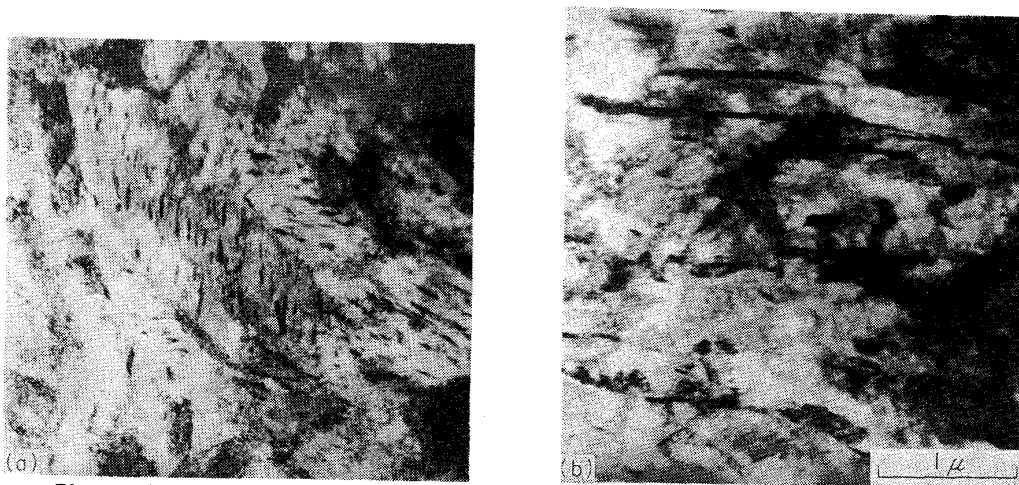


Photo. 1. Transmission electron micrographs of fully bainite structure.

Heat treatment:

(a) $860^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ min} \rightarrow 320^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ h} \rightarrow \text{W.Q.} \rightarrow \text{Sub.}$

(b) $860^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ min} \rightarrow 400^{\circ}\text{C} \times 15 \text{ h} \rightarrow \text{W.Q.} \rightarrow \text{Sub.}$

W. Q. = Water quench, Sub. = Subzero treatment.

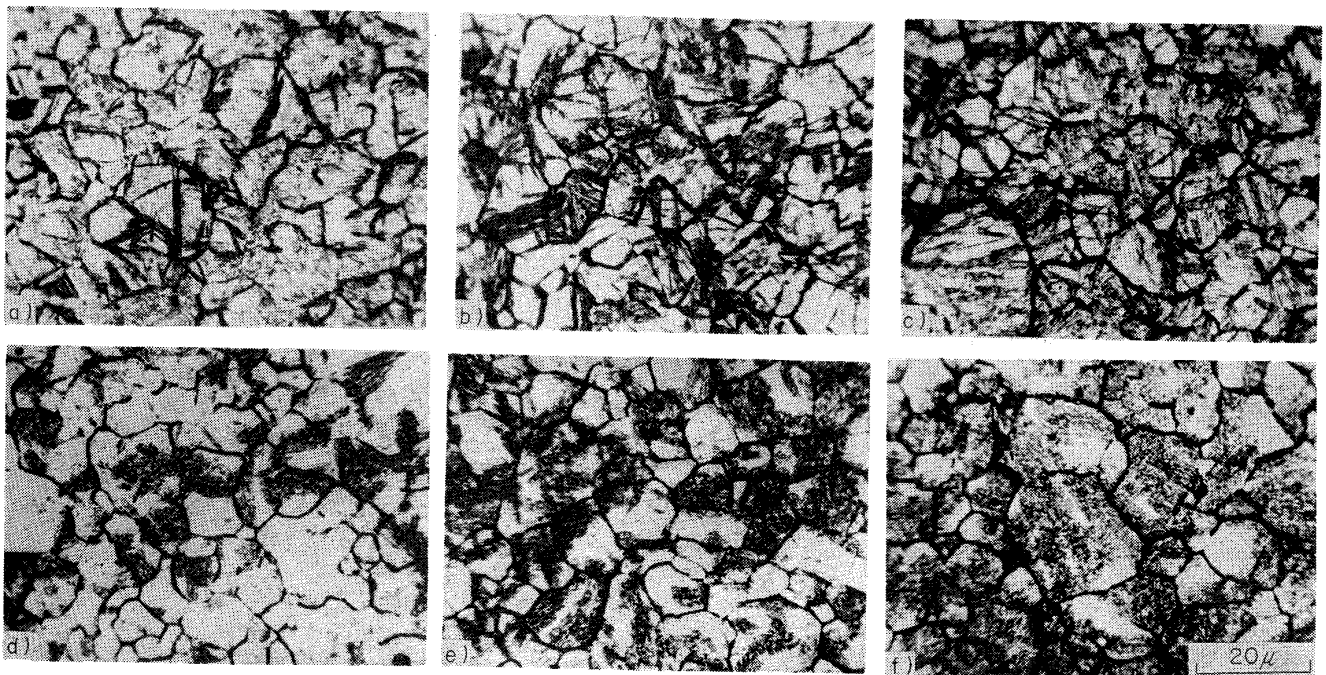


Photo. 2. Optical micrographs of mixed structure of martensite and bainite. (a), (b) and (c); containing lower bainite of 25, 50 and 75% in volume, respectively. (d), (e) and (f); containing upper bainite of 25, 50 and 75% in volume, respectively.

長さ方向に対して一定の角度(約 60°)をなして析出する傾向があり、一方、 400°C で恒温変態させた場合には、セメンタイトがフェライト板状晶の境界に沿って細長く棒状に析出する傾向が認められ、西山¹⁷⁾による記述から前者は下部ベイナイトで、後者では上部ベイナイトであることは明らかである。

一方、二相混合組織中でのこれらベイナイトの存在形態を調べるために、組織を光学顕微鏡により観察した。

Photo. 2 は $860^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ min}$ オーステナイト化して得られた二相混合組織の代表的な光学顕微鏡組織写真*を示

したものであり、Table 2 は点算法および線分析法¹⁸⁾により測定した二相混合組織の微視組織的因子を示したものである。なお、Table 2 において示したマルテンサイトあるいはベイナイトのラス径は、Fig. 3 に模式的に示すおのおのの長さの平均値である。これらの結果から次のことが明らかとなった。すなわち、下部ベイナイトでは、(1)その体積率にかかわらず針状に析出する(2)

* この場合、ベイナイトの存在形態と前オーステナイト結晶粒の関係を調べるために、組織を現出させる際に、表面活性剤(0.2%ライボソF)を添加したピクリン酸飽和水溶液¹⁹⁾で前オーステナイト結晶粒界を同時に現出させた。

Table 2. Microstructural parameters of mixed structure of martensite and bainite.

Volume fraction of bainite, f (%)	Austenitizing condition	Lower bainite			Upper bainite	
		Lath size of bainite (μ)		Lath size of martensite, M_S (μ)	Lath size of bainite, B_S (μ)	Lath size of martensite, M_S (μ)
		Width, B_W	Length, B_L			
10	860°C × 20 min	1.1	9.5	5.6	2.8	6.8
	1 050°C × 30 min	4.5	38.6	19.7	7.5	24.6
25	860°C × 20 min	1.1	9.5	4.4	3.6	5.1
	1 050°C × 30 min	4.6	39.5	10.4	9.8	20.6
50	860°C × 20 min	1.2	9.1	2.8	5.0	4.4
	1 050°C × 30 min	4.8	38.1	7.5	13.6	11.1
75	860°C × 20 min	1.8	9.2	2.3	7.0	3.6
	1 050°C × 30 min	5.2	38.3	5.6	20.3	8.3

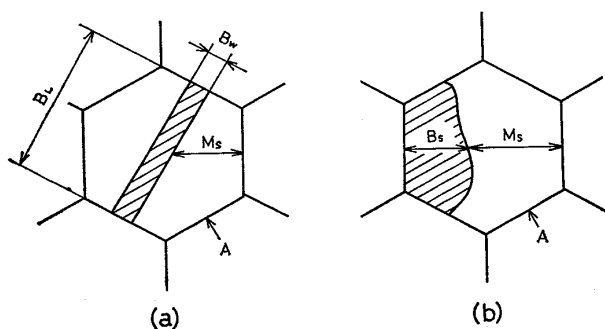


Fig. 3. Schematic diagrams of lath size of martensite or bainite as shown in Table 2. A indicates prior austenite grain boundary.
(a) Mixed structure of martensite and lower bainite.
(b) Mixed structure of martensite and upper bainite.

その体積率が増加するにつれて、前オーステナイト結晶粒を細かく分割するように析出する(3)オーステナイト化温度が上昇すると、そのラス径は大きくなるが、オーステナイト化条件が一定の場合には、それは体積率が変化してもあまり変わらない。一方、上部ベイナイトでは、(1)その体積率にかかわらず塊状に析出する(2)その体積率が増加するにつれて、前オーステナイト結晶粒を埋めるように析出する(3)オーステナイト化温度が上昇すると、そのラス径が大きくなる。

さらに、これら二相混合組織中のベイナイトおよびマルテンサイトの下部組織を透過電子顕微鏡により観察した結果、ベイナイトでは下部および上部ベイナイトともその体積率に関係なくベイナイト単相組織の下部組織とほぼ変わらないが、マルテンサイトではベイナイト体積率が増加するとともに、マルテンサイト単相組織に比較してラス幅が微細になる傾向が認められた (Photo. 3)。

他方、マルテンサイトおよびベイナイト単相組織なら

びに二相混合組織中²⁰⁾に含有される残留オーステナイトをX線回折により定量した結果、すべて1.5%以下であることが分かった。

3.2 静的引張試験

3.2.1 強度

Fig. 4 は 860°C × 20 min オーステナイト化し、焼も

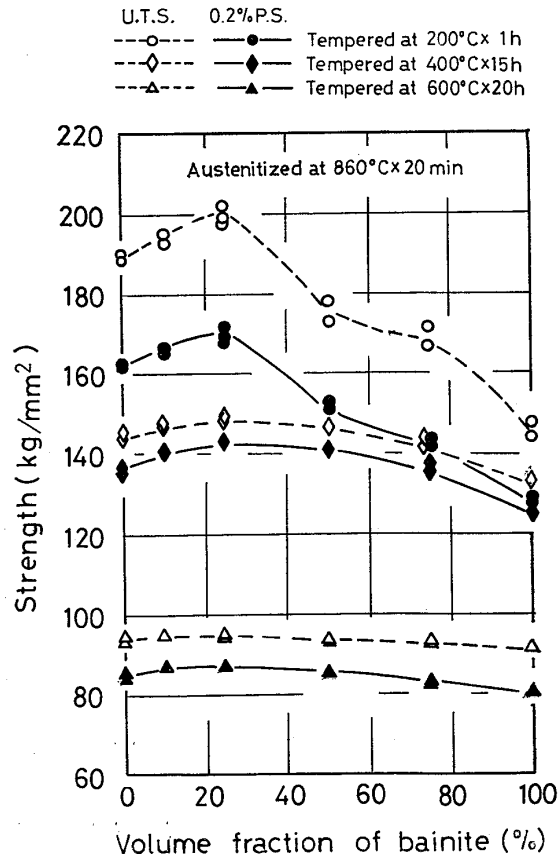


Fig. 4. Effect of volume fraction of lower bainite on the strength. U.T.S.=Ultimate tensile strength; 0.2% P.S.=0.2% proof stress.

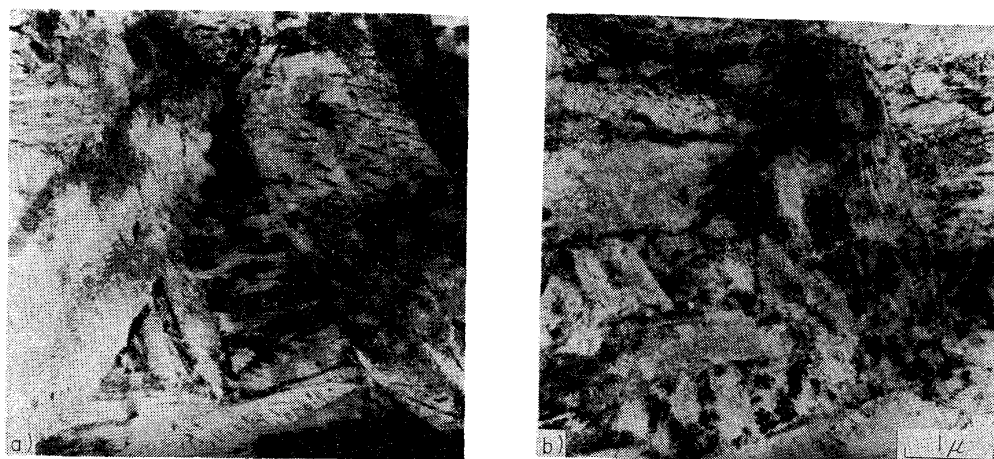


Photo. 3. Transmissn electron micrographs of mixed structure of martensite and bainite. (a); containing lower bainite of 25% in volume. Heat treatment: 860°C × 20 min → 320°C × 130 sec → W.Q. → Sub. (b); containing upper bainite of 25% in volume. Heat treatment: 860°C × 20 min → 400°C × 110 sec → W.Q. → Sub. W. Q.=water quench. Sub.=subzero treatment.

どし条件を種々変化させた場合の強度におよぼす下部ベイナイト体積率の影響を示したものである。この結果から、下部ベイナイトが含有される場合には、(1) 0.2% 耐力と引張強さはともにほぼ類似の傾向を示す(2) 二相間の強度比が大きい 200°C 焼もどしでは、体積率 25% で極大を示し、かつ体積率にかかわらず単純な混合則* より上方に偏倚する傾向がある(3) この傾向は焼もどし条件にかかわらず認められるが、焼もどし温度が上昇し二相間の強度比が次第に小さくなるにつれて、これら混合則に接近するようになることがそれぞれ分かった。

Fig. 5 は同じく 860°C × 20 min オーステナイト化し、焼もどし条件を種々変化させた場合の強度におよぼす上部ベイナイト体積率の影響を示したものである。この結果から、上部ベイナイトが含有される場合には、(1) 下部ベイナイトの場合と同様、0.2% 耐力と引張強さはともにほぼ類似の傾向を示す(2) 二相間の強度比が大きい 200°C 焼もどしでは、体積率が増加するとともにこれら混合則から著しく下方に偏倚する傾向がある(3) この傾向は焼もどし条件にかかわらず認められるが、焼もどし温度が上昇し二相間の強度比が小さくなるにつれて、次第にこれら混合則に接近するようになることがそれぞれ分かった。

さらに、オーステナイト化温度を上昇させて、これらベイナイトのラス径を大きくした場合の強度におよぼすベイナイト体積率の影響について検討した。Fig. 6 および 7 は 1050°C × 30 min オーステナイト化し、焼もどし条件を種々変化させた場合の強度におよぼす下部および上部ベイナイト体積率の影響を示したものである。こ

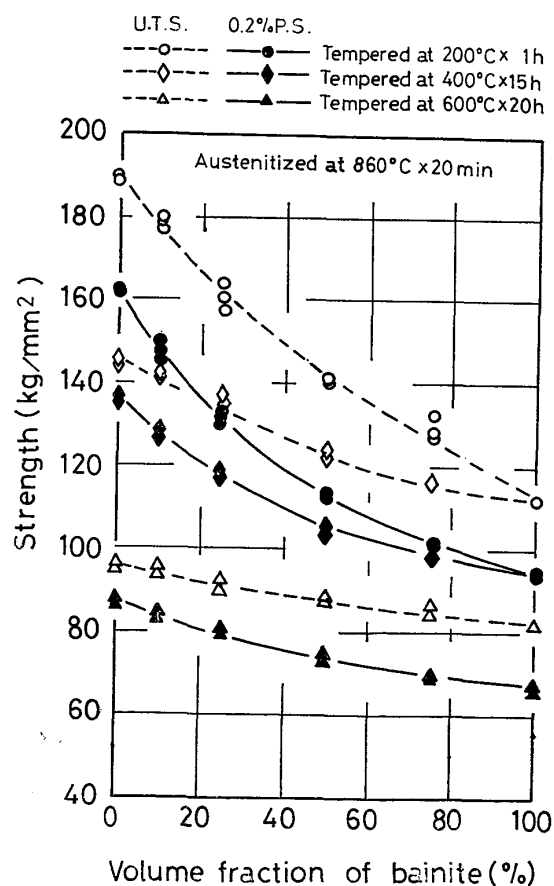


Fig. 5. Effect of volume fraction of upper bainite on the strength. U.T.S.=Ultimate tensile strength, 0.2% P.S.=0.2% proof stress.

これらの結果から、強度は、(1) 下部ベイナイトが含有される場合には、860°C オーステナイト化の場合に認められる顕著な極大現象は消滅するが、やはり、焼もどし条件にかかわらず単純な混合則より上方に偏倚する傾向がある(2) 一方、上部ベイナイトが含有される場合には、

* マルテンサイト単相組織とベイナイト単相組織を結ぶ直線で表わされる。

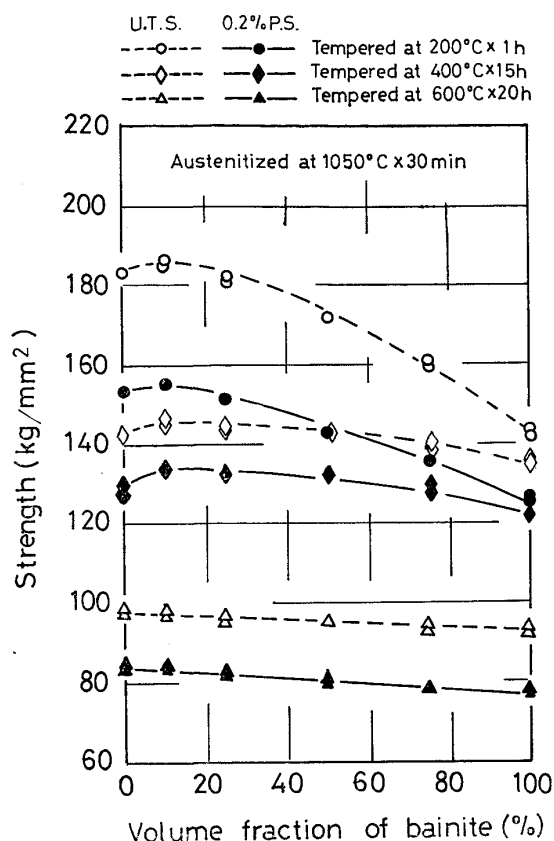


Fig. 6. Effect of volume fraction of lower bainite on the strength. U.T.S.=Ultimate tensile strength, 0.2% P.S.=0.2% proof stress.

860°C オーステナイト化の場合と同様、これら混合則より下方に偏倚するが、その偏倚度は 860°C オーステナイト化の場合とあまり差異は認められないことがそれぞれ分かった。

以上の結果から、これら二相混合組織の強度は二相間の強度比よりもむしろ、ベイナイトの存在形態と密接に関連し、針状に析出する下部ベイナイトでは強度に対して好影響を与えるが、一方、塊状に析出する上部ベイナイトでは強度に対して有害な影響を与えることが明らかとなった。

3.2.2 延 性

Fig. 8 および 9 は 860°C x 20 min オーステナイト化し、焼もどし条件を種々変化した場合の破断伸び (公称) におよぼす下部および上部ベイナイト体積率の影響を示したものである。これらの結果から、下部ベイナイトが含有される場合、二相間の強度比が大きい 200°C 焼もどしでは破断伸びは単純な混合則より上方に偏倚し破断伸びに対して有害な影響を与えないが、焼もどし温度が上昇し二相間の強度比が小さくなるにつれて体積率 25% 付近でこれら混合則より下方に偏倚する傾向が認められた。一方、上部ベイナイトが含有される場合には、

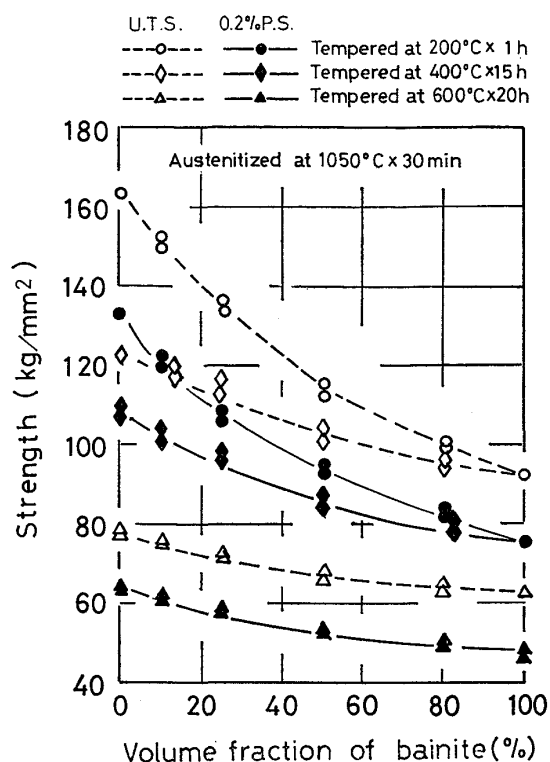


Fig. 7. Effect of volume fraction of upper bainite on the strength. U.T.S.=Ultimate tensile strength, 0.2% P.S.=0.2% proof stress.

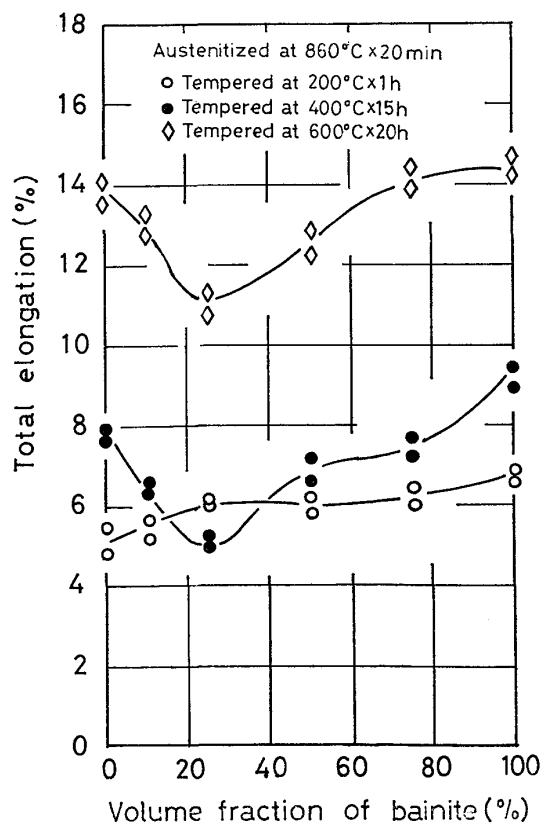


Fig. 8. Effect of volume fraction of lower bainite on the total elongation.

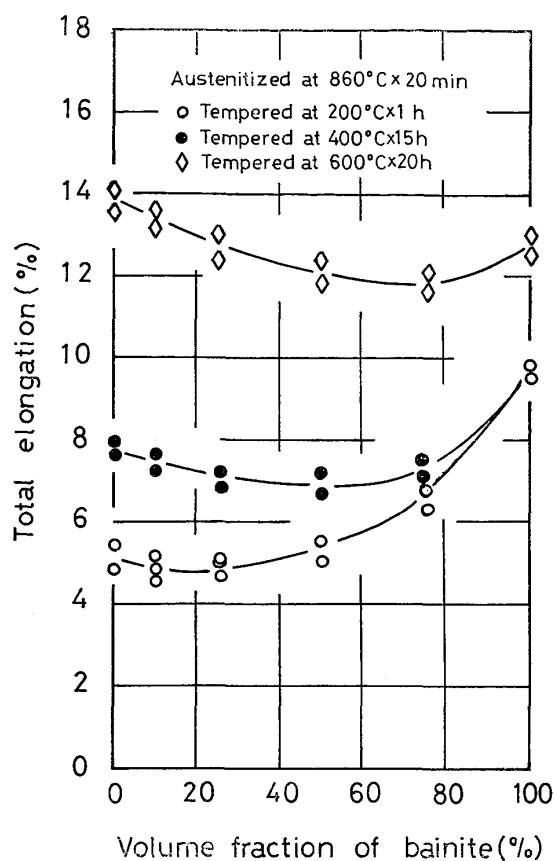


Fig. 9. Effect of volume fraction of upper bainite on the total elongation.

破断伸びは焼もどし条件にかかわらず、体積率の増加に伴いこれら混合則から下方に偏倚する傾向があり、焼もどし条件にかかわらず破断伸びに対して有害な影響を与えることが分かった。

さらに、オーステナイト化温度を上昇させた場合の破断伸びにおよぼすベイナイト体積率の影響について検討した結果、下部ベイナイトが含有される場合に認められる 400 および 600°C 焼もどしでの破断伸びの低下現象が、体積率 10% 付近に移動することを除いて、ほぼ上述の結果と同じ傾向が認められた。

4. 考 察

前述の実験結果から、マルテンサイトとベイナイト二相混合組織の強度と延性は、二相間の強度比よりもむしろベイナイトの存在形態によつて支配されることが明らかとなった。しかしながら、延性はこれら二相混合組織の破壊挙動と密接に関連すると考えられるので、それは次回に破壊挙動と関連させて詳細に考察するとして、ここではベイナイト体積率と強度の関係を、ベイナイトの存在形態に着目して若干の考察を行なつてみる。

3.2 項で述べたように、これら二相混合組織における

ベイナイト体積率と 0.2% 耐力および引張強さの関係は、ともにほぼ類似の傾向を示している。引張強さはひずみ硬化と試験片の幾何学的形状の変化による弱化とのつり合いの安定問題としての値であり、物理的意味に乏しいと言われている²¹⁾ので、ここでは 0.2% 耐力に着目して強度とベイナイト体積率の関係について考察する。

今、二相合金において、各相がすべて等しいひずみを受けると仮定し、各相の変形条件を σ_{eI}^I および σ_{eII}^H とすると、二相合金の応力 σ^{Mix} とひずみ e^{Mix} は、 f を第二相の体積率として次式で与えられる²²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{Mix} &= \sigma_{eI}^I \cdot (1-f) + \sigma_{eII}^H \cdot f \\ e^{Mix} &= e^I = e^{II} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

この関係は一般に混合則と呼ばれ、各相が結晶粒程度のオーダーの大きさをもつ二相混合組織^{21)~23)} あるいは繊維強化型複合材料²⁴⁾ の強度を評価する基準となつている。一方、各相が等しい応力を受けると仮定すると

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{Mix} &= \sigma^I = \sigma^{II} \\ \sigma^{Mix} &= e_{\sigma}^I \cdot (1-f) + e_{\sigma}^{II} \cdot f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

である。したがつて、二相合金における応力は、(1)式が上限となり、(2)式が下限となり、実用合金では特殊な場合を除いて、この中間にあるのが普通である²²⁾。ここでもマルテンサイトとベイナイト二相混合組織の 0.2% 耐力について、これら(1)および(2)式を基準に検討を行なつてみる。

今、(1)式における σ_{eI}^I および σ_{eII}^H をそれぞれマルテンサイトおよびベイナイト単相組織から得られる 0.2% 耐力とみると、3.2 項でも述べたように、下部ベイナイトが含有される場合には、混合則(1)式より上方に偏倚し、上述のことと矛盾する。そこで、(1)式を補正した(3)式を考えてみた。なお、(3)式を求めるに際しては、3.1 項で得られた結果をもとにして、次の 2 つの仮定をおいた。

(1) 二相混合組織中のベイナイトでは、とくに上部ベイナイトの場合、その体積率の変化に伴いラス径が変化するが、その生成温度が一定の場合にはその下部組織がベイナイト単相組織のそれとほぼ変わらないことからその 0.2% 耐力はベイナイト単相組織のそれを近似的に適用できる。

(2) 二相混合組織中のマルテンサイトでは、ベイナイト体積率の増加に伴いそのラス径が小さくなり、かつその下部組織も微細になる*ことから、その 0.2% 耐力についてはそのラス径の変化を考慮に入れる。そして、

* マルテンサイトやベイナイトなどオーステナイト変態生成物の場合、その 0.2% 耐力はその下部組織によつて支配されるという研究報告²⁵⁾が多いので、その考え方に従つた。

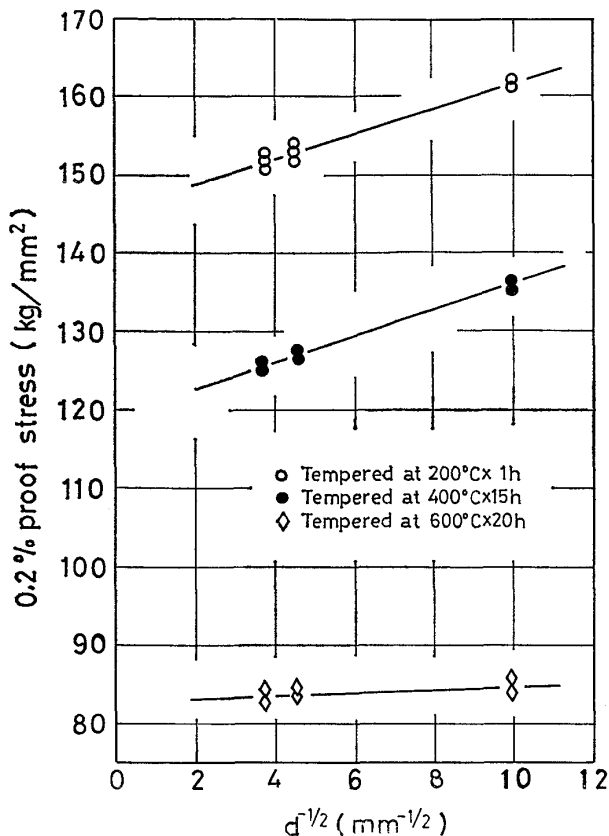


Fig. 10. Relationship between prior austenite grain size, d and 0.2% proof stress in martensite. Heat treatment: $860^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ min} \rightarrow \text{W.Q.} \rightarrow \text{Sub.}$, $1050^{\circ}\text{C} \times 30 \text{ min} \rightarrow \text{W.Q.} \rightarrow \text{Sub.}$, $1150^{\circ}\text{C} \times 30 \text{ min} \rightarrow \text{W.Q.} \rightarrow \text{Sub.}$. W.Q.=Water quench, Sub.=Subzero treatment.

そのラス径と 0.2% 耐力の関係は、熱処理を種々変化させることによって得られたマルテンサイト単相組織における前オーステナイト結晶粒径と 0.2% 耐力の関係式 (Fig. 10) で近似できる*。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0.2\%}^{\text{Mix}} &= \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle (1-f) + \sigma_{0.2\%}^{\text{B}} \cdot f \\ \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle &= A + B d^{-1/2} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、 $\sigma_{0.2\%}^{\text{Mix}}$ はマルテンサイトとベイナイト二相混合組織の 0.2% 耐力であり、 $\langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle$ はラス径を考慮に入れたマルテンサイトの 0.2% 耐力、 $\sigma_{0.2\%}^{\text{B}}$ はベイナイト単相組織の 0.2% 耐力で、 A および B は Fig. 10 に示した関係式 (一次式) における勾配と切片である。さらに、下部ベイナイトのごとき、針状に析出する場合

* マルテンサイトに先行して生成するベイナイトは、マルテンサイト変態に対する障壁となり⁷⁾、前オーステナイト結晶粒界とほぼ同じ働きを有すると考えた。しかしながら、これら粒径を熱処理によって変化させる場合、粒径の変化と同時に、他の微視組織的因子の影響が現われるものと考えられるが、本実験の場合、これら微視組織的因子の影響が小さいと考え、それを無視した。

マルテンサイトによる強い塑性拘束によりその 0.2% 耐力が上昇することが考えられるので^{26)~29)}、今、強い塑性拘束を受けることによって上昇したベイナイトの 0.2% 耐力を $(\sigma_{0.2\%}^{\text{B}})$ とすると、(3)式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0.2\%}^{\text{Mix}} &= \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle \cdot (1-f) + (\sigma_{0.2\%}^{\text{B}}) \cdot f \\ \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle &= A + B d^{-1/2} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

となる。そして、さらにマルテンサイトによる強い塑性拘束の結果、 $(\sigma_{0.2\%}^{\text{B}}) \rightarrow \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle$ となれば、(4)式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0.2\%}^{\text{Mix}} &= \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle \\ \langle \sigma_{0.2\%}^{\text{M}} \rangle &= A + B d^{-1/2} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

で表わすことができる。

Fig. 11 および 12 は 3.2 項で得られた。下部ベイナイトが含有される場合の二相混合組織の 0.2% 耐力と (3) および (5) 式の対比を示したものである。なお、(3) および (5) 式を用いる際の数値 d は Table 2 より求め、また、 A および B は Table 3 (Fig. 10 より求めた数値) より求めた。これらの結果から以下のことが明らかとなった。

(1) 860°C オーステナイト化の場合、 200°C 焼もどしでは体積率 25% まで (5) 式にほぼ従うが、体積率がそれ以上増加すると (3) 式にほぼ従うようになる。

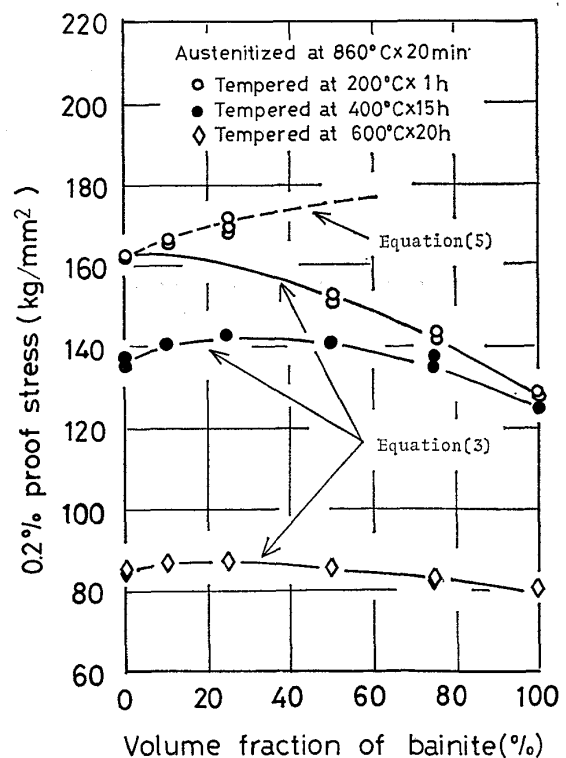


Fig. 11. Comparison of experimental values of 0.2% proof stress in mixed structure of martensite and lower bainite with the calculated law of mixture.

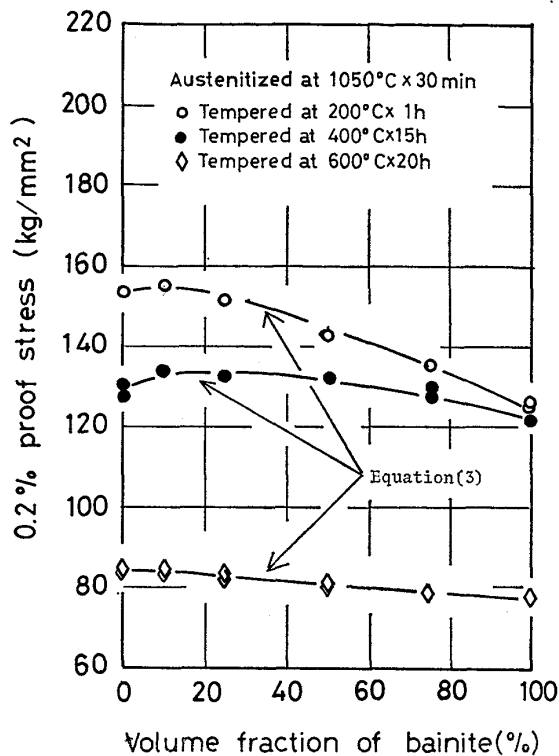


Fig. 12. Comparison of experimental values of 0.2 % proof stress in mixed structure of martensite and lower bainite with the calculated law of mixture.

Table 3. Numerical values for obtaining the 0.2 % proof stress of martensite in mixed structure of martensite and bainite.

Tempering condition	A^* (kg)	B^* (kg/mm ^{-1/2})
200°C × 1 h	151.2	1.81
400°C × 15 h	119.3	1.67
600°C × 20 h	82.8	0.17

$$* \langle \sigma_{0.2\%}^M \rangle = A + B d^{-1/2}$$

(2) そして、焼もどし温度が 400°C から 600°C へと上昇すると、体積率にかかわらず(3)式にほぼ従う傾向がある。

(3) オーステナイト化温度が 1050°C に上昇すると、体積率および焼もどし条件にかかわらず(3)式にほぼ従う傾向がある。

さらに、3・2 項で得られた、上部ベイナイトが含有される場合の二相混合組織の 0.2% 耐力について同様な検討を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

(1) Fig. 13 に示すように、860°C オーステナイト化の場合、焼もどし条件にかかわらず体積率の増加とともに(3)式から偏倚し、次第に(2)式に接近する傾向があり、その傾向は焼もどし温度が低い程著しい。

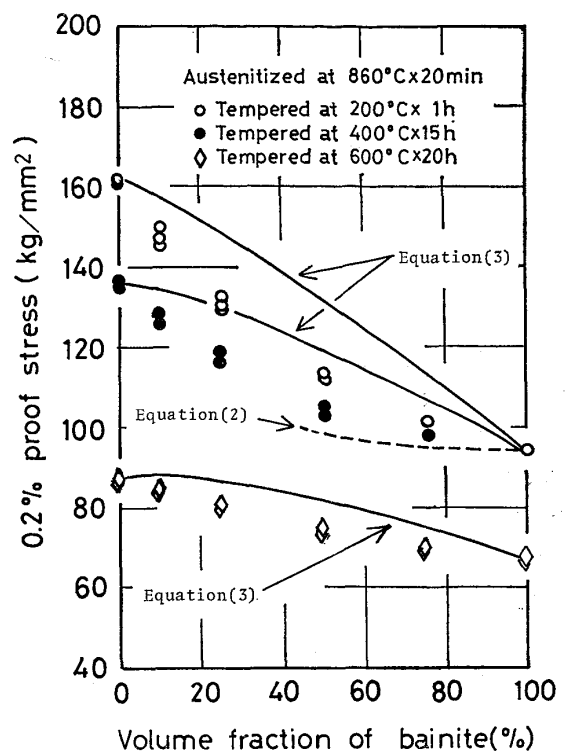


Fig. 13. Comparison of experimental values of 0.2% proof stress in mixed structure of martensite and upper bainite with the calculated law of mixture and stress equal model.

(2) オーステナイト化温度を 1050°C に上昇させた場合でも、ほぼ上述の結果と同様な傾向が認められる。

以上のことから、下部ベイナイトのごとき、ベイナイトがマルテンサイト中に針状に析出する場合、0.2% 耐力に対して好影響を与えるのは、共存するマルテンサイトの下部組織の微細化による強度上昇、さらにはこれらベイナイトがマルテンサイトによつて強い塑性拘束を受けることにより生ずるベイナイトの強度上昇も相まつて 0.2% 耐力が単純な混合則より上方に偏倚することに帰するが、上部ベイナイトのごとき、ベイナイトがマルテンサイト中に塊状に析出する場合には、二相が不均一変形する結果、0.2% 耐力がこれら混合則より下方に偏倚し、0.2% 耐力に対して有害な影響を与えることが推測された。

5. 結 論

マルテンサイトとベイナイト二相混合組織をもつ 0.42 % C-Ni-Cr-Mo 鋼の強度と延性について検討し、以下の結論を得た。

(1) 前オーステナイト結晶粒を分割するように針状に析出する下部ベイナイトは、焼もどし条件にかかわら

ず0.2% 耐力に対して好影響を与えるが、破断伸びに対しては必ずしも好ましい影響を与えなかった。

(2) 一方、前オーステナイト結晶粒を埋めるように塊状に析出する上部ベイナイトは、焼もどし条件にかかわらず0.2% 耐力と破断伸びの双方に対して有害な影響を与えた。

(3) 下部ベイナイトが含有される場合、0.2% 耐力に対して好影響を与えるのは、共存するマルテンサイトの下部組織の微細化による強度上昇、さらにはベイナイトがマルテンサイトによつて強い塑性拘束を受けることにより生ずるベイナイトの強度上昇も相まつて、0.2% 耐力が単純な混合則より上方に偏倚することに帰するが上部ベイナイトが含有される場合には、二相が不均一変形する結果、0.2% 耐力がこれら混合則より下方に偏倚し、0.2% 耐力に対して有害な影響を与えることが推測される。

終りにのぞみ、本実験における供試鋼をご提供下さった山陽特殊製鋼(株)の小柳明および森田剛太郎の両氏ならびに本実験にご協力下さった日本電子(株)の方々および大阪府立松原高等職業訓練校の機械科の諸先生方に対して深謝の意を表します。

文 献

- 1) たとえば、日本金属学会会報, “特集「混合組織をもつ合金の強度と靱性」” 14(1975)9 に解説されている。
- 2) 富田恵之, 沖 幸男, 岡林邦夫: 鉄と鋼, 63 (1977) 8, p. 1321
- 3) 富田恵之, 沖 幸男, 岡林邦夫: 鉄と鋼, 64 (1978) 1 p. 78
- 4) 富田恵之, 沖 幸男, 岡林邦夫: 鉄と鋼, 64 (1978) 3, p. 459
- 5) たとえば, 荒木 透編著: 鉄鋼材料学, (1970), p. 205[丸善]
- 6) D. P. EDWARDS: JISI, 207 (1969) 11, p. 1494
- 7) 邦武立郎, 寺崎富久長, 大森靖也, 大谷泰夫: “鋼の強靱性” Kyoto, (1971), p. 85

- 8) 榎並禎一: “鋼の強靱性” Kyoto, (1971), p. 346
- 9) 大谷泰夫, 寺崎富久長, 邦武立郎: 鉄と鋼, 58 (1972) 3, p. 434
- 10) 大森靖也, 大谷泰夫, 邦武立郎: 鉄と鋼, 58 (1972) 8, p. 1076
- 11) 中島宏興, 荒木 透: 鉄と鋼, 58(1972) 14, p. 1993
- 12) 菊田米男, 荒木孝雄: 鉄と鋼, 60(1974) No. 3 討論会 “鋼の破壊靱性” 講演概要, A51
- 13) 笠松 裕, 広松睦生, 児玉和士: 鉄と鋼, 60 (1974), S302
- 14) 荒木 透編: 鋼の熱処理技術, (1969), p. 60, [朝倉書店]
- 15) J. DURNIN and K. A. RIDAL: JISI, 206 (1968) 1, p. 60
- 16) 岡林邦夫, 富田恵之, 黒木郁夫: 鉄と鋼, 62 (1976) 6, p. 661
- 17) 西山善次著: マルテンサイト変態(応用編), (1974), p. 31 [丸善]
- 18) 佐久間健人, 西沢泰二: 日本金属学会会報, 10 (1971), 5, p. 279
- 19) 本間亮介, 田部博輔, 山下玉男, 工藤浩一: 鉄と鋼, 51(1965) 5, p. 1069
- 20) S. J. MATAS and R. F. HEHEMANN: Trans. AIME, 221(1961) 2, p. 179
- 21) 田村今男, 友田 陽, 山岡幸男, 金谷三郎, 小沢正俊, 赤尾 明: 鉄と鋼, 59 (1973)3, p. 454
- 22) 友田 陽, 田村今男: 日本金属学会会報, 14 (1975) 9, p. 657
- 23) 友田 陽, 黒木剛司郎, 田村今男: 鉄と鋼, 61 (1975) 1, p. 107
- 24) たとえば, 田中英八郎, 大山致和: 複合材料, (1969), p. 25
- 25) たとえば, M. J. ROBERTS: Met. Trans., 1 (1970) 12, p. 3287
- 26) N. BREDZS: Welding J., (1954) 12, p. 545-S
- 27) 佐藤邦彦, 土井 勉, 豊田政男: 溶接学会誌, 37 (1968) 11, p. 1214
- 28) 佐藤邦彦, 豊田政男: 溶接学会誌, 40(1971) 9, p. 885
- 29) 小川清六, 寺口彰俊, 河本明孝, 神藤克巳: 溶接学会全国大会講演概要集, 19(1976), p. 382