

(討12) Fe-Ni-Mn-C系オーステナイト鋼の変形による組織の変化と伸び, 靱性の関係

川崎製鉄(株) 技術研究所

○鈴木 重 治

工博 船 越 督 己

1. 緒言 9%Ni低温用鋼が良好な低温靱性を示す原因については従来数多くの研究が報告されているが大別すると, (1) 固溶Niが低温靱性におよぼす直接的効果, (2) Ni, 熱処理による組織の微細化による効果, (3) 焼もどし時に析出するオーステナイト相の効果の3項目に分類される。このうち3番目のオーステナイト相の効果に関する報告は多いがその結果は一致しておらず, Brophy ら¹⁾, Marshall ら²⁾ に代表される靱性を改善するという報告と Krön ら³⁾ のオーステナイト相は靱性改善には寄与していないという報告, さらに大岡ら⁴⁾ のオーステナイト相は析出のごく初期を除いて衝撃時にマルテンサイトに変態し, 低温靱性を悪化させるという報告が対立している。この異なった現象の原因としては実験材料, 実験条件の差異もあるが, 析出するオーステナイト相が非常に微細であること, またその量がたかだか10~20%程度にすぎず母相である焼もどしマルテンサイト相からその効果を分離して考察することが困難であることが挙げられる。

そこで今回は9%Ni鋼中に析出するオーステナイト相に近い化学成分を含有する鋼種を別個に溶製し, その機械的性質とマルテンサイト変態の関係を調査した。

2. 試料および実験方法 9%Ni鋼中の析出オーステナイト相の成分決定は瀬川ら⁵⁾ の方法に準じて電解分離により抽出した残査を化学分析することによりNi, Mn量を求めた。C量はX線測定により求めた格子定数からの決定を試みたが精度が十分でないと考えられたので含有量の範囲を広め, 表1

に示す鋼種を高周波真空溶解により溶製した。この試料を熱間鍛造により12mm厚にした板から試験片を加工し, オーステナイト化処理として真空中にて1100℃, 2時間加熱後水冷した。引張試験は厚さ1mm, 平行部長さ50mm, 巾25mmの板状試験片および平行部長さ30mm, 径4mmの丸棒試験片を用い, 板状試験片の場合はインストロンT-T-D-M型試験機により2mm/minの引張速度(ひずみ速度 6.7×10^{-4}

Alloy Number	Ni(wt pct)	Mn ^(wt pct)	C(wt pct)	Ms(°C)
3Mn-0.3C	18.13	2.94	0.32	-50
1Mn-0.6C	17.80	1.00	0.60	0
3Mn-0.6C	17.85	2.84	0.62	-150
1Mn-0.9C	18.02	1.00	0.86	-100
3Mn-0.9C	18.02	2.90	0.89	-196

P ≤ 0.003 S ≤ 0.008

表1 供試材の化学成分

/sec)で, 丸棒試験片については島津オートグラフDX-5000で1, 100, 1000mm/minの引張速度(ひずみ速度 5.5×10^{-4} /sec, 5.5×10^{-2} /sec, 5.5×10^{-1} /sec)で試験を行なった。

衝撃試験は7.5mmサブサイズのVノッチシャルピー試験を引張試験と同一の温度範囲で実施した。

試験後の試片については光学顕微鏡による組織観察を全試料について, また板状引張試験片についてはX線回折によるマルテンサイトの定量と薄膜による電顕観察を行なった。

3. 実験結果と考察 図1に例として3Mn-0.3C鋼の種々な温度における応力-ひずみ曲線を示す。典型的な変態誘起塑性が認められ, 変形中に徐々にマルテンサイトが生成する0℃において伸びが最大となりセレーションが観察される。試験温度と0.2%耐力, 引張強さの関係を図2に, また伸びとの関係を図3に示す。0.2%耐力はMs点附近から, また引張強さはMd点を越えた点より上昇を始め, Ms点, Md点の中間に伸びのピークが認められる。丸棒試験片でひずみ速度の影響をみると, ひずみ速度が大きくなるにつれ伸びのピーク値は減少するとともにピークを示す温度は低温側に移行する。この傾向は全試料について認められ, ひずみ速度が 5.5×10^{-2} /sec から 5.5×10^{-1} /sec になるとピーク温度は25~50℃低くなる。引張試験はすべて液相中で実施しており, ドライアイス-アルコール中で0℃における試験片表面部の引張による温度上昇を測定してみるとひずみ速度5.5

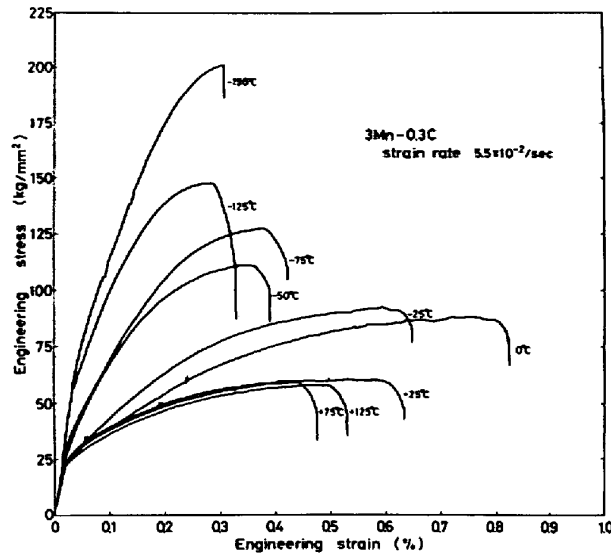


図1. 3Mn-0.3C鋼の応力-ひずみ曲線

$\times 10^{-2}/\text{sec}$ の場合試料表面で約 15°C , $5.5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ の際には 35°C の温度上昇がみられ試料の中心部ではこの差はさらに大きいと考えられる。したがって伸びにピーク値を示す温度がひずみ速度の増加にともない低温側にずれるのは引張時の温度上昇に起因すると考えてよいであろう。事実、破断後の試験片を光学顕微鏡で観察してみると、マルテンサイトの生成が見られなくなる上限温度 (Md点) は、ひずみ速度が $6.7 \times 10^{-4}/\text{sec}$, $5.5 \times 10^{-2}/\text{sec}$, $5.5 \times 10^0/\text{sec}$ と大きくなるにつれ 75°C から約 25°C ずつ低下する。なお板状試験片の場合は丸棒試験片にくらべMs点とMd点の間で明確な伸びのピークは認められない例が多かった。X線により破断後のマルテンサイト量を測定した結果では明らかに引張試験中に変態が進行しており、双晶の発生によると考えられる激しいセレーションが見られ、また変態したマルテンサイト中に数多くの亀裂が観察された。

以上の様な傾向は全試料に認められたが、1Mn-0.9C鋼にはこれに加えて特異な現象が観察された。図4に異なったひずみ速度での温度と伸びの関係を示す。上述の様にひずみ速度の大きい丸棒試験片の場合 25°C 近傍で変態誘起塑性による伸びの増加がみられるが、ひずみ速度が小さい場合、とくに板状試験片についてはその傾向が認められない。しかしながら 150°C の温度で非常に大きな伸びのピークがみられ、この場合は逆にひずみ速度の小さい場合に著しく、板状試験片は約 170% の伸びを示す。

図5は破断後の板状試験片について測定したマルテンサ

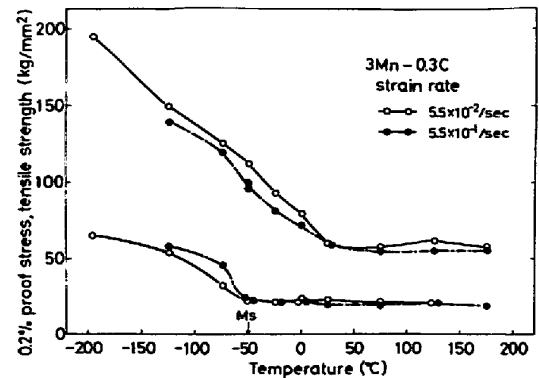


図2. 耐力, 引張強さと温度の関係

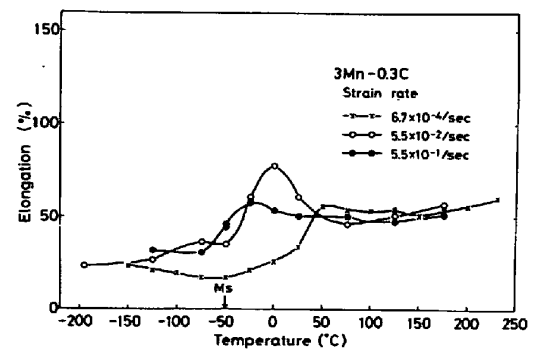


図3. 伸びと温度の関係

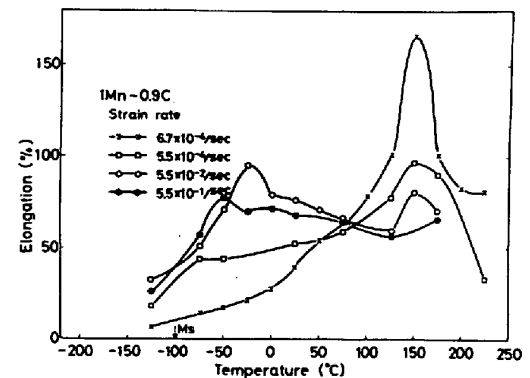


図4. 1Mn-0.9C鋼の伸びと温度の関係

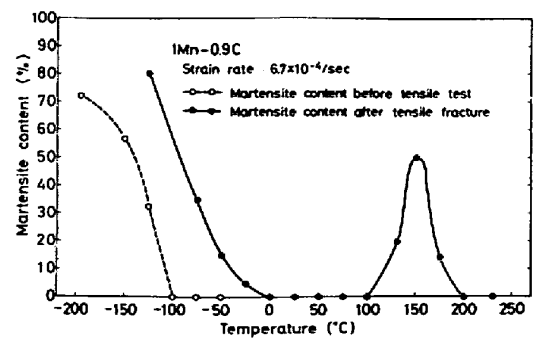


図5. マルテンサイト量と温度の関係

イト量を示したものであり、一度 0°C （光学顕微鏡では 25°C ）で引張変形によるマルテンサイトが生成しなくなったにもかかわらず、 125°C になると再度生成し始め伸びがピークとなる 150°C では50%にも達し、 200°C になると変態はおこらない。 150°C での伸びとマルテンサイト量の関係（図6）をみると、伸びが75%以上に達した後マルテンサイトへの変態が始まり、以後伸びの増加につれその量も増大することがわかる。しかしながらこの時の応力—ひずみ曲線を見ると 150°C ではマルテンサイトの生成により通常Ms点とMd点の間で観察されるような加工硬化が大きくなる現象は全く認められない。また破断時の光学顕微鏡組織はathermalなマルテンサイト、 -50°C での変形により誘起されたマルテンサイト組織に対比して写真1に示すように変形双晶と考えられる像が多く認められるのみで、マルテンサイトと判定出来る組織は観察出来ない。同じ試料について電顕組織を比較すると -50°C での変形により生成したマルテンサイトは双晶を含むPlate状のathermalなマルテンサイトと比較的類似な形状を有するのに対し、 150°C で生成するものは明らかに異なっている。これは最近 Maxwell ら⁶⁾の言う Strain-induced martensite に対応するものとも考えられるが、この点についてはさらに検討する必要がある。

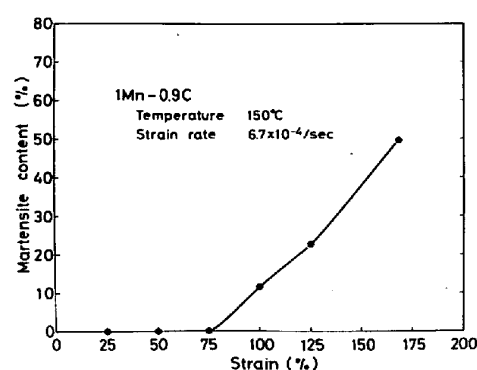


図6. マルテンサイト量と伸びの関係

a) athermal マルテンサイト (-125°C) b) 変形によるマルテンサイト (-50°C) c) 150°C で破断した組織

写真1. 1Mn-0.9C鋼の光学顕微鏡組織

a) athermal なマルテンサイト (-125°C) b) 変形により生成したマルテンサイト (-50°C) c) 150°C で破断した組織中のマルテンサイト

写真2. 1Mn-0.9C鋼の電子顕微鏡組織

—196°C～230°Cの温度範囲で衝撃試験を行なった結果を図7に示す。いずれの場合も試験温度の上昇とともに衝撃値は増加するが、ある温度でピークを示した後減少しその後ほぼ一定の値を示す。破面に垂直で亀裂の進行方向に平行な面を光学顕微鏡で観察しマルテンサイト変態組織との関係を見ると、全試料とも衝撃値が上昇し始める温度はほぼMs点附近である。衝撃を与える前に試料全部、またはその一部がすでに変態してマルテンサイトになっている場合は、強度の上昇ならびに変態したマルテンサイトが亀裂の発生を容易にした伝播の経路となることなどの理由により衝撃値が低いと考えられる。

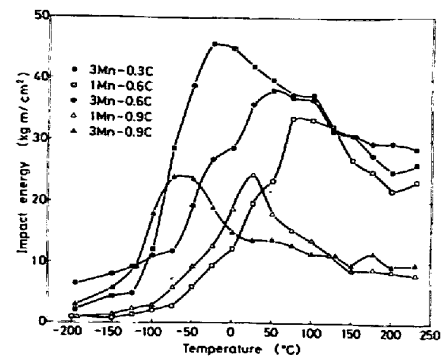


図7. 衝撃値と温度の関係

Ms点以上になると破面近傍の変形部にのみマルテンサイト組織が観察され、その量はMd点に近づくにつれ減少し、それとともに衝撃値も向上する。写真3にMs点とMd点の間で破断した1Mn-0.9C鋼の例を示すが破面の近くが変態してマルテンサイトになっているのがよくわかる。ピークを示す温度はほぼMd点に対応し、さらに高温になりマルテンサイト変態が観察できなくなると衝撃値は減少しほぼ一定値に達する。



写真3. 破面近傍がマルテンサイト変態したシャルピー試験片

なおMd点に近くなると変形部に双晶が観察されるようになり、Md点以上ではこの双晶のみが認められる組織となる。

図8は1Mn-0.9C鋼について各温度での衝撃値とその際の横膨張、耐力、引張強さの関係を示したものであり、これよりみると-25°C～75°Cの範囲で衝撃値がピークを示すのにもかかわらず、その温度範囲、さらにより高温での横膨張、強度はほぼ一定であり、変形量が横膨張で表わせるものと仮定すれば、この衝撃値のピークには何等かの形でマルテンサイト変態が関与しているのではないかと推定される。一例としてマルテンサイトに変態する際に吸収するエネルギーが直接ピークの原因となる、また応力集中部でマルテンサイト変態がおりクラックの発生、伝播が抑制される等が考えられるが現状ではまだ推察の域を出ず、この点については今後計装化シャルピー、破面の直接観察等を行なうことにより検討したいと考えている。

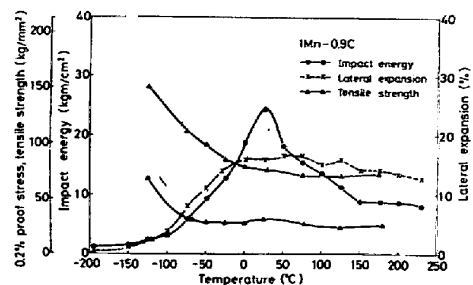


図8. 衝撃値と横膨張、耐力、引張強さの関係

4. 結言 9%Ni鋼の析出オーステナイトの成分に近いと考えられるオーステナイト鋼について変形時に生成するマルテンサイトと伸び、靱性の関係を調べた。引張試験においては典型的な変態誘起塑性の他に一部の試料において通常Md点とされている温度より高温でマルテンサイトの生成と伸びの増加がみられた。またシャルピー試験ではMd点附近でマルテンサイト変態が関与していると推定される衝撃値のピークが認められた。

〔参考文献〕 1) G.R.Brophy et al : Trans. A S M, 41 (1949), 1185 2) C.W.Marschall et al : Trans. A S M, 55 (1962), 135 3) M. Krön et al. Mém.Sci. Rev. Met., 58 (1961), 901 4) 大岡他：日本金属学会誌, 30 (1966), 442 5) 瀬川他：鉄と鋼, 49 (1969), 914 6) P.C.Maxwell et al : Met. Trans., 5 (1974), 1305