

論 文

UDC 669.14.018.29 : 539.537 : 669.112

高炭素鋼の組織変化と衝撃特性との関係*

佐 藤 輝 顕**・友 本 清 一**

Effects of the Structures to Impact Properties for High Carbon Steel

Teruaki SATO and Kiyokazu TOMOMOTO

Synopsis:

There is a large demand for high carbon steel as parts of equipments and for machine structural uses and it is generally used as tough structures by heat treatment.

In some cases, however, it is used in as-rolled pearlite structure (for instance, rails for railroads).

The author investigated the effects of structures to impact properties for high carbon steel, by changing the temperature of reheating from 600°C to 1 300°C for sorbite and pearlite prior structures.

The results are as follows. Sorbite is much superior to pearlite. Finer structure is better in case of the same structure after heat treatment is pearlite, sorbite is better for the structure before heat treatment. When the heating temperature is higher than 1 100°C, the impact properties becomes worse regardless of the prior microstructure.

1. 結 言

高炭素鋼は機械部品用、構造用として需要が多く、一般に熱処理して強靱な組織として使用するが、素材のままのパーライト組織で使用している例もある。高炭素鋼は炭素当量が高く、一般に溶接はできるだけ避けるが適用せざるを得ない場合も多い。一般鋼材や高張力鋼の溶接部については幾多の研究があり、例えば高張力鋼の溶接熱影響部粗粒域の靱性低下についてはオーステナイト結晶粒径との関係についての報告^{1)~5)}また破面遷移温度と破壊の伝播特性についての報告⁶⁾もある。著者らは高炭素鋼のパーライト組織とソルバイト組織の2種類の組織に対して 600~1 300°C 間に 100°C 間隔に 30min 保持後空冷したものの組織変化による衝撃特性への影響について研究した。1 100~1 300°C の高温熱処理を実験したのは溶接の高温熱影響部をも調べたいからである。その結果、衝撃特性は、再熱処理後ソルバイト組織のものがパーライト組織のものに比べて良好であるのはもちろんだが両組織に変態点以上の熱処理を施して、ともにパーライト組織としたものでも熱処理前の元の組織がソルバイトであつたものの方がパーライトであつたものより熱処理温度の低いほど良好であり、1 100°C 程度以上になると元の組織差は認められなく、1 200~1 300°C とさらに高温になるとともにオーステナイト結

晶粒が著しく粗大化して衝撃特性は劣化することがわかった。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材の化学成分を Table 1 に示す。供試材は鍛錬比が 25* の 20 mm 角材で組織はパーライト組織である。

2.2 熱処理試験材の作製

供試材に加えた熱処理条件とそれぞれの試験材記号を Table 2 に示す。Table 2 において、Aは素材を示し、このAに 820°C×30 min→空冷 (A. C.) の焼ならしをしたものをNとし、さらにAに 820°C×30 min→水冷 (W. Q.) 530°C×30 min→水冷 (W. C.) の焼入れ焼もどしを施したものを QT とした。次に QT 材に 600~1 300°C 間の 100°C 間隔にそれぞれ 30 min 加熱保持後空冷したものを QT+6~QT+13 とし、なお A に

Table 1. Chemical composition of test material (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.61	0.28	0.71	0.020	0.020	0.05	0.13

* 鍛錬前後の断面積をそれぞれ A_1 , A_2 とすれば、鍛錬比は A_0/A_1 で表す。

* 昭和 54 年 5 月 9 日受付 (Received May 9, 1979)

** 津山工業高等専門学校 (Tsuyama College of Technology, 624-1 Numa Tsuyama 708)

Table 2. Summary of heat treatment conditions.

Mark	Heat treatment condition
A	As received
N	Normalizing 820°C × 30 min → A.C
QT	Quench temper 820°C × 30 min → W.Q 530°C × 30 min → W.C
QT + 6	P + 600°C × 30 min → A.C
QT + 7	P + 700°C × 30 min → A.C
QT + 8	P + 800°C × 30 min → A.C
QT + 9	P + 900°C × 30 min → A.C
QT + 10	P + 1 000°C × 30 min → A.C
QT + 11	P + 1 100°C × 30 min → A.C
QT + 12	P + 1 200°C × 30 min → A.C
QT + 13	P + 1 300°C × 30 min → A.C

600~1 300°C 間の 100°C 間隔にそれぞれ 30 min 加熱保持後空冷したものを P+6~P+13 とした。

3. 実験結果および考察

3.1 機械的性質

素材 (パーライト組織) の A と焼入れ焼もどし材 QT (ソルバイト組織) の機械的性質を Table 3 に示す。QT は A に比べて当然ながら相当に良好な性質である。

3.2 熱処理条件とオーステナイト結晶粒度

熱処理条件とオーステナイト結晶粒度の関係を Fig. 1 に示す。この場合、オーステナイト結晶粒度は、各試験片をピクリン酸過飽和溶液+ラウリルベンゼンスルホン酸ソーダで腐食して JIS の結晶粒度測定法に準拠して測定した。

Fig. 1 に示すように結晶粒度 JIS 結晶粒度番号は、QT は QT+6, QT+7 と同様に 7.0~7.2 で、パーライト組織の N, QT+8 は QT とオーステナイト化が同じなので結晶粒度もほぼ同様の 6.7~6.8 である。QT+9~QT+13 は熱処理温度が高くなるに従って粒界にフェライトの析出が増したパーライト組織となり、Fig. 1 に示すように粗粒となる。つぎに A を熱処理したパーライト組織のうち変態点以下の P+6, P+7 は A とほぼ同様な粒度 No. 4 程度で、一方変態点以上の P+8 は N や QT+8 と粒度 No. はほぼ同じ 6.7 であるが、熱処理温度が高くなるにつれて P+9~P+13 と類似した粒度となる。一般に熱処理前の組織がソルバイトとパーライトの場合、変態点以下の熱処理温度では粒度に当然

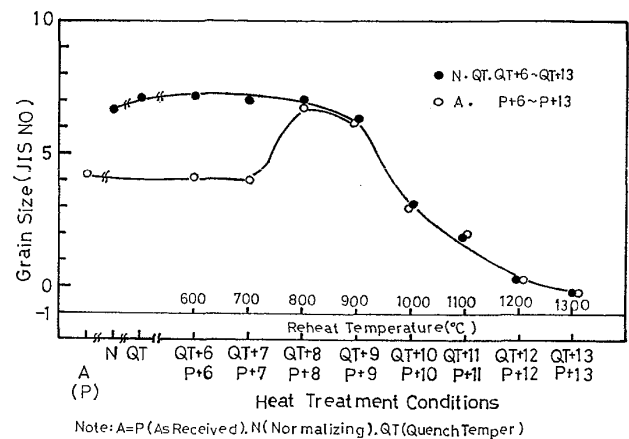


Fig. 1. Heat treatment conditions and grain size.

差があつても、変態点以上ではその差はなくなりほぼ同一となる。

3.3 顕微鏡組織

各熱処理試験材の光学顕微鏡組織を Photo. 1, Photo. 2 に示す。Photo. 1 に素材の A, 焼ならし材の N, QT 材, QT 材を再熱処理した各組織を示す。A は初析フェライトの析出したパーライト組織で、QT, QT+6, QT+7 はソルバイトの微細組織で変態点直下の QT+7 の変態組織はセメントタイトの球状化も最も進んでいるようである。QT+8~QT+13 はパーライト組織を呈するが再熱処理温度が高くなるに従い、結晶粒の粗大化につれてフェライトネットの大きさも順次粗大になつている。Photo. 2 に素材の熱処理後の組織を示す。A, P+6~P+13 のすべてが初析フェライトの析出したパーライト組織で、A, P+6 と P+7 はよく似た組織であるが、変態点以上の熱処理温度を受けた P+8 は細かい組織になり、P+9~P+13 と熱処理温度が高くなるに従いフェライトのネットは大きく析出し、結晶粒度は順次粗大となつて、P+12, P+13 は QT+12, QT+13 と同様にパーライトの粗大化が著しくなつている。

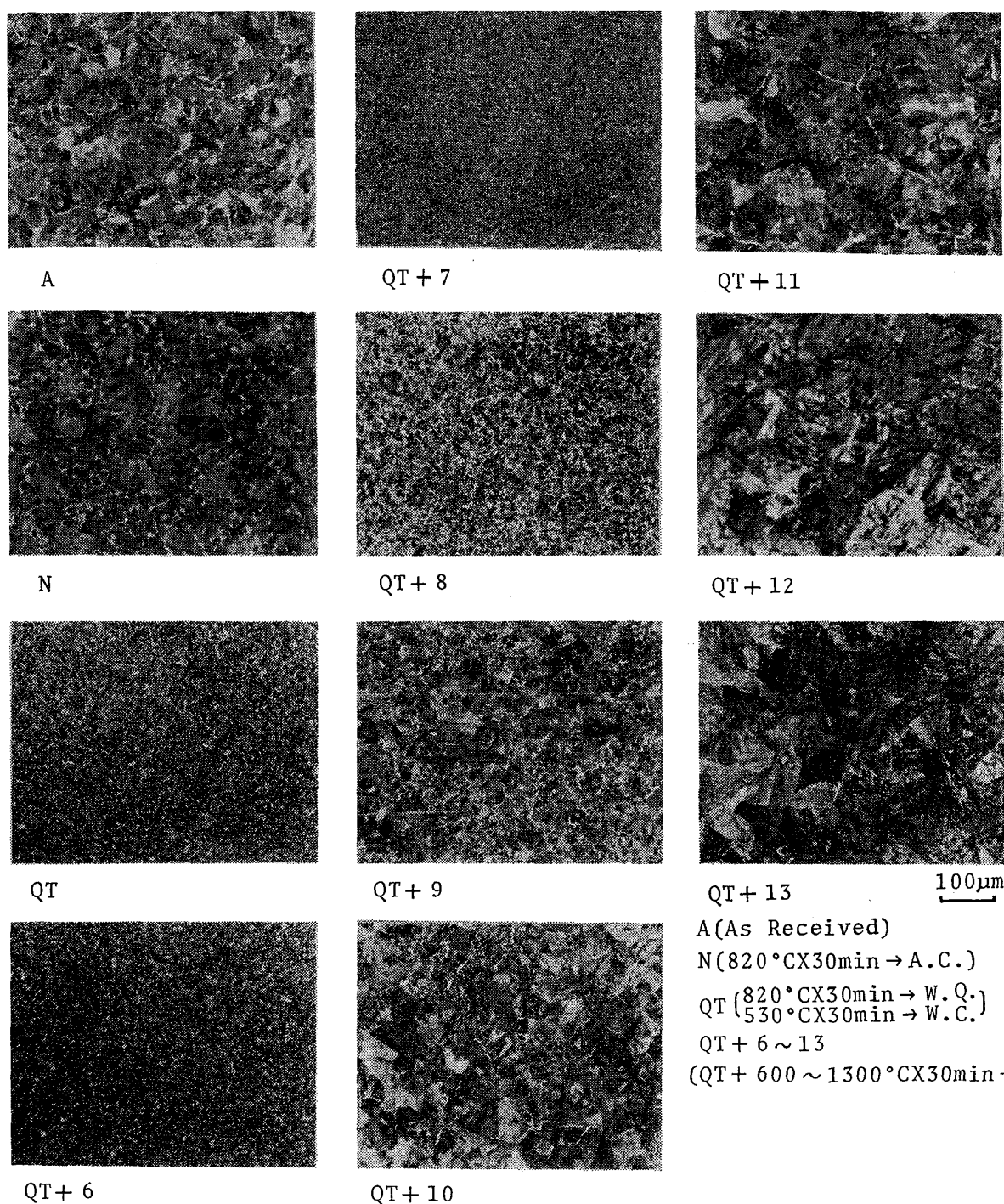
3.4 シャルピー衝撃試験

衝撃試験片には JIS 4 号, 2 mm V ノッチ付シャルピー衝撃試験片を用いた。衝撃試験温度は -30°C から 200°C の温度範囲とした。

3.4.1 QT 材の再熱処理後の衝撃試験結果

Table 3. Mechanical properties.

Mark	Heat treatment condition	Proof strength 0.2% (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness Hv
A	As received	44.1	87.9	14.8	26.6	246
QT	820°C × 30 min → W.Q. 530°C × 30 min → W.Q.	81.8	114.6	16.6	38.6	341

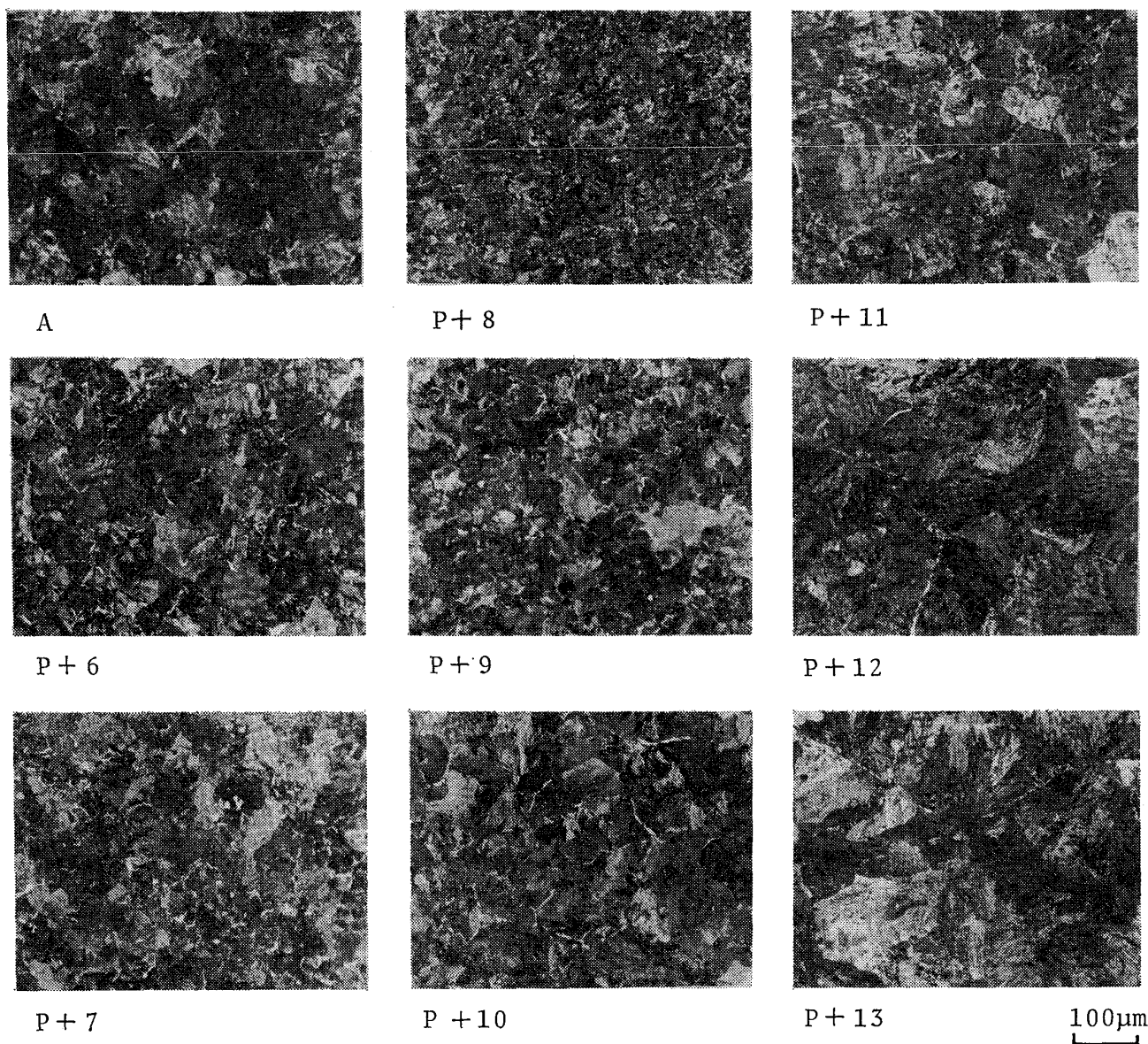


3 % Nital Etch

Photo. 1. Microstructure change due to heat treatment.

QT 材の再熱処理後の衝撃値とともに A, N の値を Fig. 2 に示す. 衝撃試験温度が -30°C の衝撃値はソルバイト組織の QT, QT+6, QT+7 の 3 試料は $2.2 \sim 3.5 \text{ kgf-m/cm}^2$ と高く, 特に QT+7 は 3.5 kgf-m/cm^2 と高い. パーライト組織の QT+8~QT+13, A, N の 8 試料は同じ -30°C で低く $0.6 \sim 1.0 \text{ kgf-m/cm}^2$ である. 衝撃試験温度が 20°C でシャルピー衝撃値 (kgf-m/

cm^2) は QT+7 が 9, QT+6 が 3.2, QT が 2.4, QT+8, QT+9 が 1.5 と上昇している. さらに衝撃試験温度が高くなるに従って衝撃値はしだいに上り最大の衝撃値を示す延性破壊の領域に到達していくのがみられる. QT+7 は A_1 変態点直下の温度域で変態を受けた微細組織にてセメンタイトの球状化が最も進み硬さの低下するところと考えられるので低温靱性の向上が顕著に



A (As Received)

P+6 ~ P+13 (P+600 ~ 1300°C X 30min A.C)

3 % Nital etch

Photo. 2. Microstructure change due to heat treatment.

認められる⁶⁾。また A_1 変態点以上の 800~900°C 熱処理のものと 1000~1300°C 再熱処理のものの遷移温度を比べると 800~900°C のものの方が良好である。衝撃値は変態組織の細かいソルバイトがパーライトより良好でパーライトでも組織の細かいほど良好である^{6)~8)}。

3.4.2 素材Aの熱処理後の衝撃試験結果

Fig. 3 に示す。衝撃試験温度が -30°C の衝撃値は、P+8 が 1.2 kgf-m/cm² で P+9 は 1.1 kgf-m/cm² で他の試料に比べて高く、すなわち P+8, P+9 は 1.2~1.1 kgf-m/cm² で P+7, P+6, P+10~P+13 は 0.8~0.6 kgf-m/cm² となつている。衝撃試験温度が 20°C で

は P+8, P+9, P+7 はほぼ 1.7 kgf-m/cm² で他の試料より高く、さらに試験温度が 20°C から 200°C へと上るにつれても同様な傾向である。衝撃値は試験温度が高くなるに従いしだいに増加して最大衝撃値を示す延性破壊の領域に到達していくのがみられる。遷移温度は P+8 が最も良好である。すなわち前項の QT を熱処理したのと同様に組織の細かいものほど衝撃値は良好である^{6)~8)}。

3.5 両組織熱処理材の衝撃値比較

ソルバイト材とパーライト材の熱処理後を比べてみると、-30~200°C のすべての衝撃試験温度において、

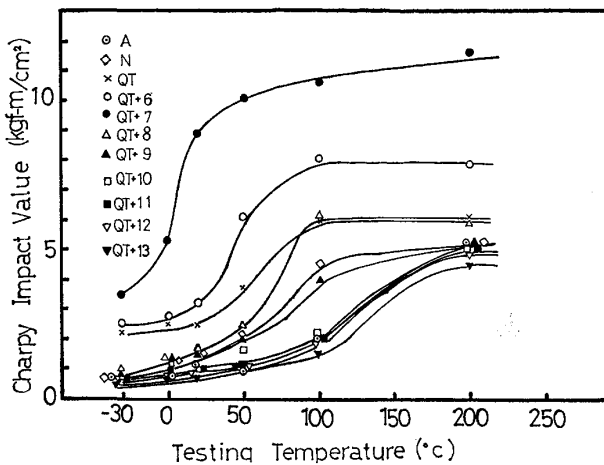


Fig. 2. Transition curves for Charpy impact test.

ソルバイトの QT, QT+6, QT+7 が格段に良好であり遷移温度も良好で低温側にある。なかでも QT+7 は組織が細かく硬さも低く、セメンタイトの球状化が一番進んでいるため特に良好である。Fig. 4 に両組織熱処理材のシャルピー値と熱処理条件の関係を衝撃試験温度ごとにそれぞれ示す。QT~QT+7 のソルバイトはパーライトの A, P+6, P+7 に比べて全衝撃試験温度で格段に高い値を示す。熱処理後パーライト組織になった同じ加熱温度の衝撃値を比較すれば、QT+8~QT+9 は P+8~P+9 に対して 20°C の試験温度以下ではほぼ同じであるが、50°C 以上の衝撃試験温度ではソルバイトを再熱処理した QT+8~QT+9 の方が衝撃

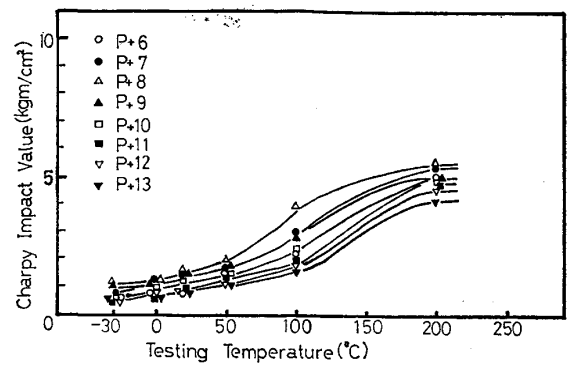


Fig. 3. Transition curves for Charpy impact test.

値は高くなっている。

しかし QT+10~QT+13 と P+10~P+13 を比較すれば、両者の衝撃値はほぼ同じで差は認められない。すなわち、900°C 以下の加熱温度では熱処理前の組織がソルバイトの方がパーライトより良好な衝撃値を示している。QT+7 は 3.4.1 項でも述べたがセメンタイトの球状化が最も進み硬さも低いので Fig. 4 にて格別に衝撃値が増加し、靱性の向上が認められる。また素材（パーライト組織）を熱処理したものは Photo. 2 に示すように熱処理条件により組織の細かい P+8, P+9, P+7 が比較的によく組織の粗い P+10~P+13 は低下する。

3.6 両組織の熱処理材の遷移温度の比較

熱処理条件とエネルギー遷移温度の関係を Fig. 5 に示す。QT 材の再熱処理材の方が素材 A を熱処理したもの

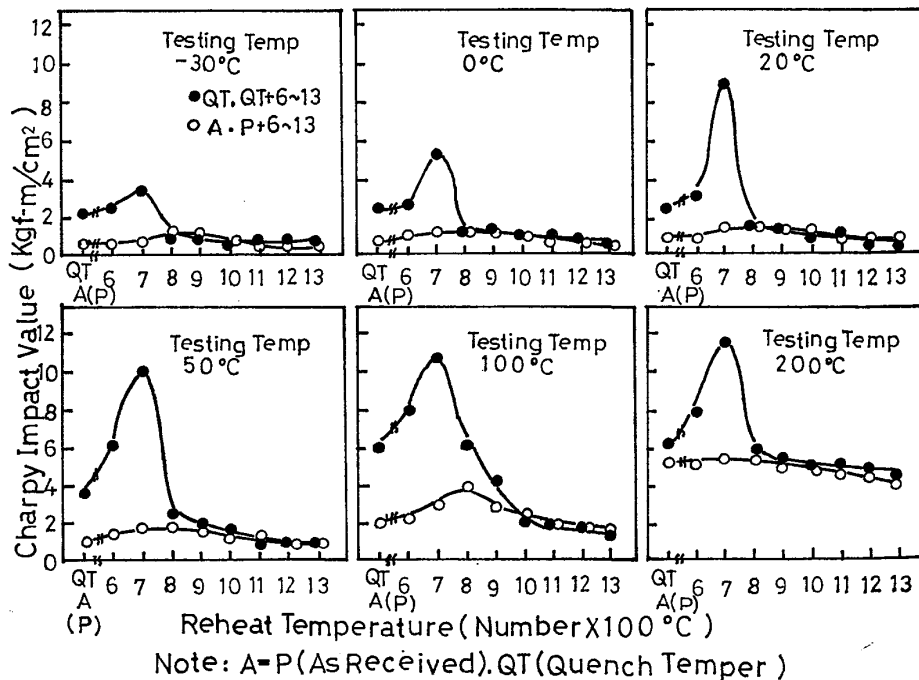


Fig. 4. Relation between Charpy impact value and heat treatment condition.

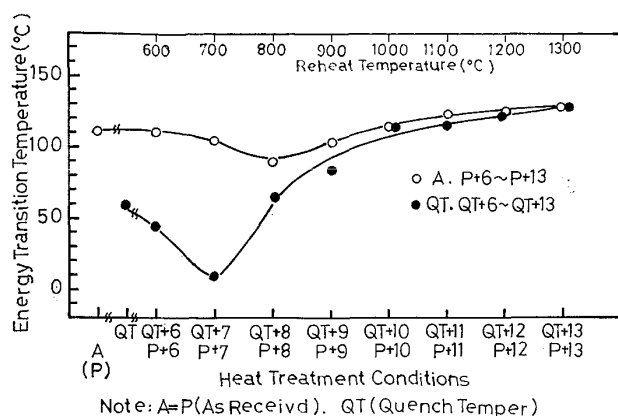


Fig. 5. Heat treatment condition and energy transition temperature.

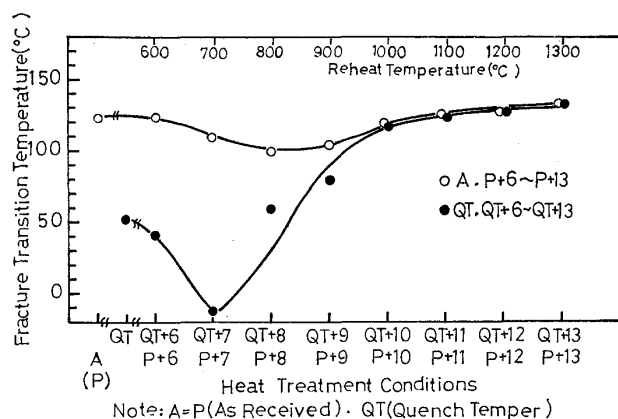


Fig. 6. Heat treatment condition and fracture transition temperature.

より低温側に遷移曲線が認められ、AとQT、P+6とQT+6、P+7とQT+7との各試料においては顕著に差が現れ、800～1300°Cと再熱処理温度が順次高くなるにつれて両前組織熱処理材の遷移温度の差が減少しているのが観察される。QT材を再熱処理したものと素材を熱処理したものの両破面遷移温度をFig. 6に示す。エネルギー遷移温度のFig. 5と類似の傾向を示している。Fig. 6にてソルバイト組織のQT～QT+7の破面遷移温度は他のパーライト組織のそれより格段に優れている。次にパーライト組織のQT+8、QT+9とP+8、P+9が他のパーライト組織のものより良好なのは一度オーステナイト化されていることと、さらに加熱温度がQT+10～QT+13、P+10～P+13の試料より低く、オーステナイト結晶粒が細かいからである。またQT+8、QT+9がP+8、P+9より良好なのは再加熱処理前の組織がソルバイトとパーライトと異なることによるとと思われる。

3.7 硬さと遷移温度の関係

硬さと遷移温度の関係をFig. 7に示す。QT、QT+6、QT+7のソルバイト組織では再熱処理温度600～

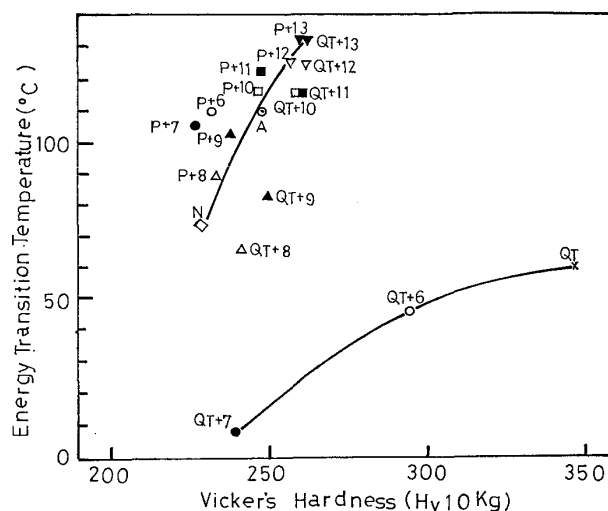


Fig. 7. Relation between Vicker's hardness and energy transition temperature.

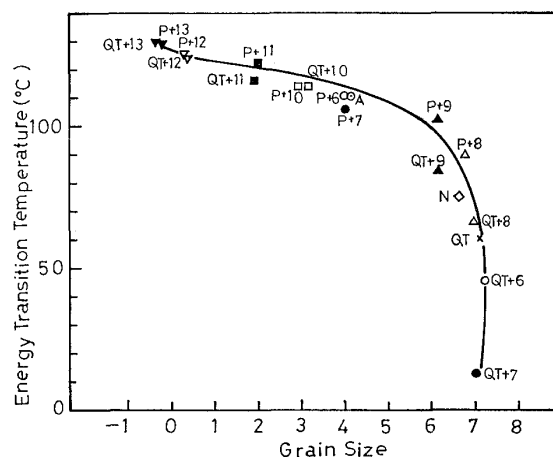
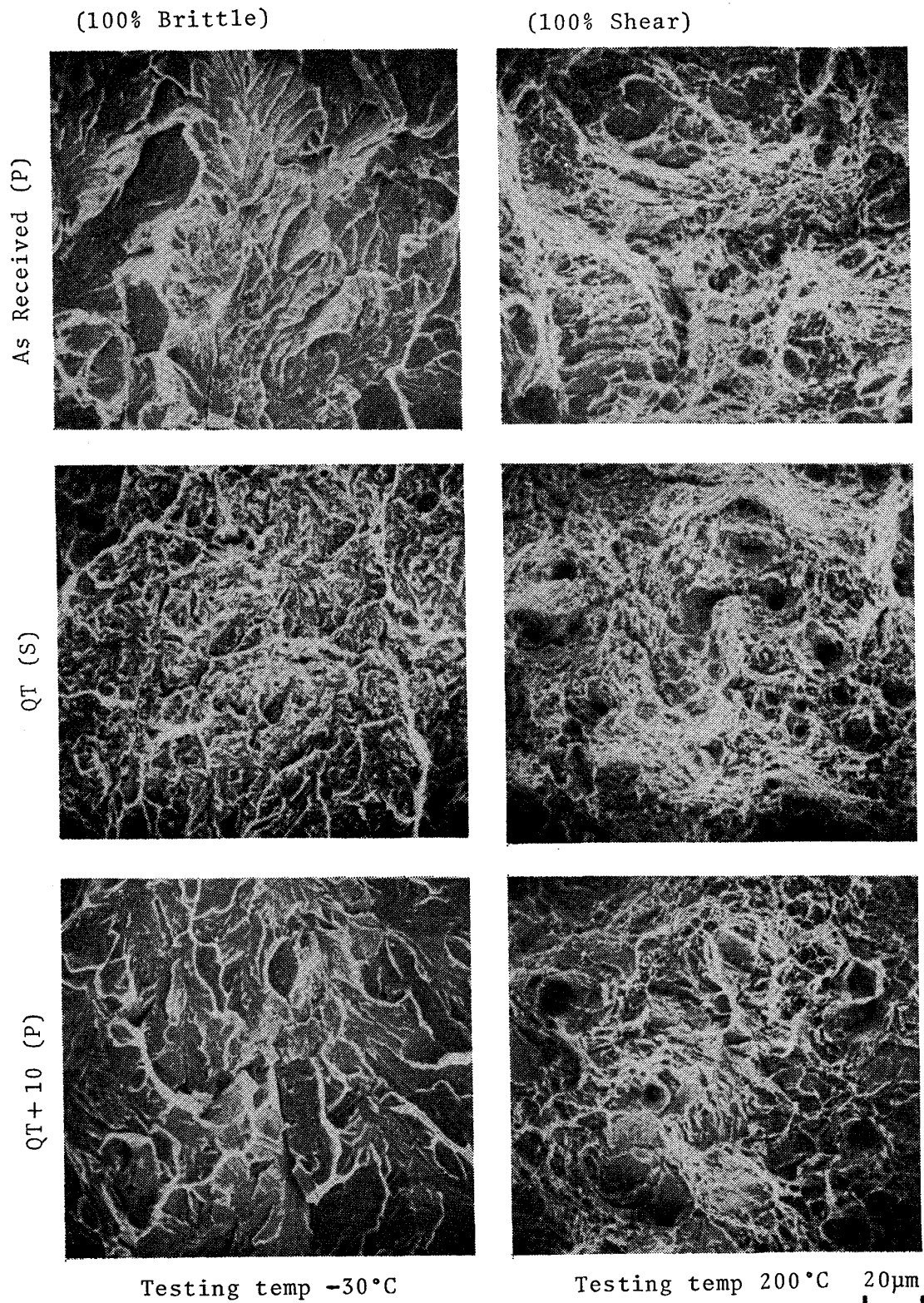


Fig. 8. Relation between grain size and energy transition temperature.

700°Cと高いものほど焼もどし効果を受けて、硬さは低くなり遷移温度も低温側にあるのが観察される。A、P+6、P+7の3者は硬さと遷移温度の関係において差は認められない。パーライト組織のN、QT+8、QT+9とP+8、P+9は硬さにあまり差が無く、一方遷移温度に多少の差が認められるのは、熱処理前の組織差と熱処理温度のわずかの差が影響すると思われる。また、QT+8～QT+13、P+8～P+13では、硬さの低いものほど靱性が優れ、遷移温度も低温側にあり熱処理温度の低いものほど良好な傾向である。

3.8 結晶粒度と遷移温度の関係

結晶粒の大きさと遷移温度との関係をFig. 8に示す。Fig. 8より同じ組織で同程度の結晶粒の大きさの場合には、硬さの低いものほど遷移温度は低温側にあるのが観察される。すなわちQT、QT+6、QT+7は同じソルバイト組織で、結晶粒の大きさも同様に7程度の



(P) Pearlite (S) Sorbite
Photo. 3. Fractography of Charpy impact specimen.

細粒であるが Fig. 7 に示すように硬さは QT, QT+6, QT+7 と再加熱温度が高くなるにつれて低くなっている。遷移温度もこの順に低温側に移る。Aと、P+

6, P+7 の3者は粒度、遷移温度ともに近似している。N, P+8, QT+8 のパーライト組織は一度オーステナイト化されており、粒度も細かく類似して遷移温度

も先のA, P+6, P+7 より低温側にあり, そのなかでも QT+8 が一番低温側にあるのは熱処理前の組織がソルバイトのためであろう. 一方, QT+10~QT+13, P+10~P+13と熱処理温度が高くなるに従い, 結晶粒の大きさは順次粗粒となつて, 遷移温度は高温側に移行する.

3.9 フラクトグラフィ

シャルピー衝撃試験後の破面をていねいに洗滌して, ぜい性 100% のものと延性 100% の2種類について破面状況を走査式電子顕微鏡を用いて観察した. この結果を Photo. 3 に示す. 代表写真として, 素材のままA (パーライト), QT (ソルバイト) QT+10 (パーライト) の3試料につき衝撃試験温度 -30°C のぜい性 100% と 200°C の延性 100% のものを示す. ぜい性100% は破面全体にわたってリバーパタンが観察されるが, QT のソルバイト組織はA, QT+10 のパーライト組織に比べてフェセットサイズが小さい. すなわち破断時の塑性変形抵抗部位がソルバイト組織の方が多いことを示しており, それだけ靱性値が高いことを裏づけている⁹⁾. 延性 100% は破面全体にディンプルが観察されるがソルバイトとパーライト地におけるディンプル形状の差はあまり認められない.

4. 結 言

パーライトとソルバイトの2種類の組織につき $600\sim 1300^{\circ}\text{C}$ の再加熱からなる熱処理による組織変化が衝撃特性におよぼす影響を研究した結果を要約するとつぎのとおりである.

(1) 衝撃特性は熱処理前にソルバイト組織であつたものの方がパーライト組織であつたものより, その後の同じ熱処理条件に対して良好である.

(2) (1) の熱処理前の組織差による衝撃特性の差は, その後の加熱温度が低い方が一般に大きく, 加熱温度が 1000°C 以上の高温になると漸次差が認められな

くなる.

(3) 衝撃特性は熱処理後, 同じソルバイト組織, または同じパーライト組織ではそれぞれ組織の細かい方が良好である.

(4) ソルバイト組織を変態点以下で焼もどしたソルバイトの QT+6, QT+7 のうち QT+7 はセメンタイトの球状化が最も進んで硬さが最も低くなるので, すべての試験材のなかで衝撃特性は最高に良好である.

(5) 一般的にいわれているように組織の微細なほど, 結晶粒度の細かいほど衝撃特性は優れており, また同じ組織では硬さの低いほど衝撃特性が優れているといわれていることを本実験では高炭素鋼に対して定量的に証明することができた.

終わりに, 本研究に関し御懇篤な御指導, 御鞭達を賜わつた大阪大学名誉教授工学博士岡田実先生に衷心より感謝致します. なお御援助をいただいた住友金属工業株式会社中央技術研究所次長邦武立郎博士に厚く謝意を表します.

文 献

- 1) 邦武立郎, 大谷泰夫: 住友金属, 22(1970), p. 11
- 2) 菊田米男, 荒木孝雄, 佐野精二郎, 柳生俊二, 石野良和: 溶接学会誌, 43(1974), p. 1047
- 3) 井川 博, 新 成夫, 大重広明, 馬久地裕: 溶接学会誌, 46(1977), p. 270
- 4) 井川 博, 大重広明: 溶接学会誌, 46(1977), p. 713
- 5) 三村 宏: 鉄と鋼, 58(1972), p. 1822
- 6) 邦武立郎, 寺崎富久長, 大森靖也, 大谷泰夫: 国際シンポジウム (鋼の強靱性) 京都, (1971), p. 85
- 7) 浅田千秋: 日本金属学会会報, 6(1967), p. 179
- 8) T. KIGAWA, R. ISOMURA, Y. TANAKA, and K. TOKIMASA: The Fifth International Wheel-set Congress, Tokyo, 1(1975), p. 11
- 9) 白岩俊男, 寺崎富久長: 住友金属, 22(1970), p. 68