

熱処理に伴う炭素鋼の組織変化

羽 木 秀 樹*、吉 本 雅 俊**

Change of Structure in Carbon Steels by Heat Treatment

Hideki HAGI and Masatoshi YOSHIMOTO

We examined the change in metallurgical structure of cold-rolled carbon steels by heat-treatment. Specimens were three kinds of carbon steel of S10C, S25C and S50C. After repeating cold-rolling and heat-treatment at 700°C or 900°C in the atmosphere, the steel sheets were about 2mm in thickness. The oxide film on the surface was removed by mechanical abrasion, and the steel sheets were heat-treated at 700°C or 900°C in a vacuum. The steel sheets were cold-rolled to 0.5mm in thickness, and cut in size of 5mm×20mm. After the heat-treatment at 100-900°C in a vacuum, The chemical etched surface of the specimens was observed by using scanning electron microscope. And, we measured Vickers hardness and X-ray diffraction pattern for the heat-treated specimens. The change in metallurgical structure of the carbon steel specimens was discussed on the basis of the heat-treatment temperature dependence of the Vickers hardness and the half-value width of the Fe(311) X-ray diffraction peak obtained by analyzing the X-ray diffraction pattern.

Keywords : scanning electron microscope, ferrite-pearlite structure, spheroidized cementite structure, recrystallization, dislocation density, annealing

1. 緒 言

我々の身の回りには多くの金属製品、金属材料が存在しているが、工業的に最も多く利用されているのが鉄鋼材料である⁽¹⁾。机や椅子などの事務用品、冷蔵庫や洗濯機などの家電製品、自動車、橋梁や鉄塔などの鋼構造物、これらの他にも多くの鉄鋼材料が用いられている⁽²⁾。また、鉄鋼材料には耐食性に優れるステンレス鋼、高強度である高張力鋼など多くの種類があるが、最も多く用いられているのが炭素鋼である。炭素鋼は炭素濃度や熱処理によって強度や延性を比較的容易に制御できる⁽³⁾⁽⁴⁾とともに安価であるという大きな特徴を有する。

冷間加工によって転位密度が増加して硬さ、強度が増加する現象は“加工硬化”として、冷間加工後、高温で熱処理すると、転位密度が減少したり、結晶粒が粗大化する現象は“回復・再結晶”としてそれぞれ知られている⁽⁵⁾。しかしながら、炭素鋼における冷間加工と熱処理に伴うセメントイトの形状と硬さの変化については必ずしも明らかではない。我々のこれまでの経験からすれば、その原因は、これらが炭素濃度などによって複雑に変化するためと推測される。

そこで本研究では、炭素濃度の異なるいくつかの炭素鋼 (S10C、S25C、S50C) を試料として、冷間加工と熱処理に伴う組織と硬さの変化を調べることにした。冷間加工と熱処理条件の異なる炭素鋼試料を種々の温度で熱処理して、その試料におけるビッカース硬さの測定、転位密度に係するX線回折ピークの半価幅の測定、そして走査電子顕微鏡による組織観察を行った。

*機械工学科、**機械工学専攻大学院生

2. 実験方法

2. 1 試料

試料には市販の3種類の炭素鋼、S10C、S25C、S50C炭素鋼を用いた。入手した板厚約15mmの素材において次の冷間加工と熱処理を行い、組織の変化を調べた。大気中において、700℃（または900℃）での熱処理と冷間圧延を繰り返して行き、板厚約15mmから約2mmにまで圧延した。これを、大気中において700℃（または900℃）で1時間熱処理した後、表面の酸化皮膜を機械的に除去した。その後、厚さ0.5mmまで冷間圧延し、5mm×20mmの形状に切断した。熱処理温度が700℃のものを700℃素材、900℃のものを900℃素材と呼ぶことにする。これらを超高真空中において100～900℃で1時間熱処理、炉冷して試料とした。

2. 2 組織観察

組織観察には、日本電子製高分解能走査電子顕微鏡（SEM）を用いた。試料を樹脂埋めし、エメリー研磨、バフ研磨によって鏡面にした後、ナイタールでエッチングして、その表面を走査電子顕微鏡で観察した。

2. 3 硬さ試験

硬さ測定には、アカシ製超微小荷重マイクロビッカース硬さ試験機を用いた。負荷荷重を25g、荷重負荷時間を20sとした。各試料について10個所で硬さ測定し、それを平均化して硬さ値HVとした。

2. 4 X線回折

X線回折には、Cuターゲット管球を取り付けたフィリップス製試料水平型X線回折装置を用いて、管電圧40mV、管電流30mAとした。また、X線回折ピークを解析して、その半価幅を求める際には、装置に付属の解析ソフトを用いた。

3. 実験結果および考察

3. 1 S10C炭素鋼試料

3. 1. 1 組織観察結果

S10C炭素鋼の700℃素材を100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図1に示す。100～400℃で熱処理した試料の組織はよく似ており、白く見える粒状のセメンタイトが分散している。熱処理温度が500℃になると、粒界が明瞭に識別できるようになる。600℃、700℃になると、さらに粒界が明瞭になるとともに、粒径がやや大きくなる。これらのように、100～700℃で熱処理した場合には、球状化セメンタイトーフェライト組織（簡単のために、以後、球状化セメンタイト組織と呼ぶ）である。800℃以上になると、セメンタイトが板状になって、球状化セメンタイト組織からフェライトーパーライト組織（以後、パーライト組織と呼ぶ）へと変化する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの熱処理温度による組織の相違を表1に纏める。

S10C炭素鋼の900℃素材を100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図2に示す。100～400℃で熱処理した試料の組織はよく似ており、白く見えるパーライト相が大きく変形した組織になっている。熱処理温度が600℃と高温になると、粒界が明瞭に見えるようになり、変形

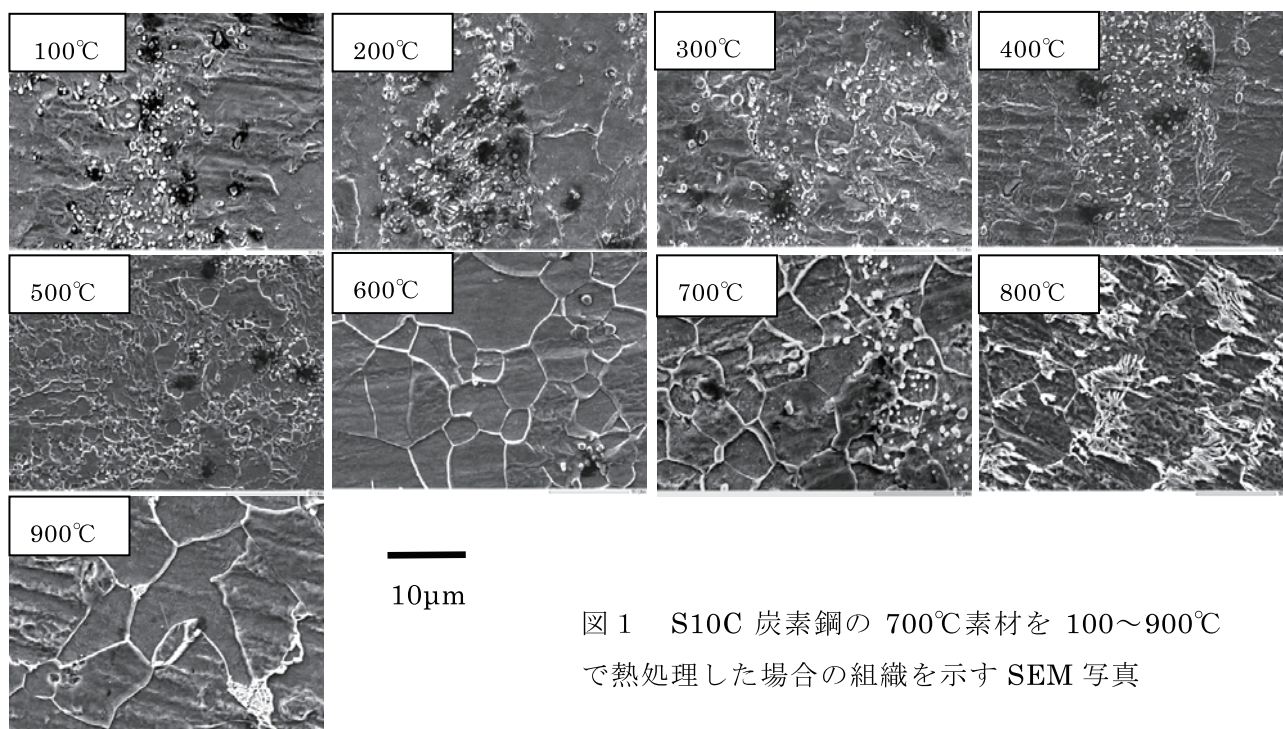


図1 S10C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃
で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表1 S10C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～700℃	球状化セメンタイト組織
800℃、900℃	パーライト組織

組織が消滅し始めているように見える。600℃、700℃になると、さらに粒界が明瞭になるとともに、変形組織が消滅し、セメンタイトが粒状に変化する。800℃以上になると、球状化セメンタイト組織からパーライト組織へと変化する。これらのように、100～500℃で熱処理した場合には、変形したパーライト組織、600℃、700℃で熱処理した場合には球状化セメンタイト組織、800℃、900℃で熱処理すると、焼鈍されたパーライト組織になる。これらの熱処理温度による組織の相違を表2に纏める。

3. 1. 2 ビッカース硬さとX線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性

S10C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材を 100～900℃で熱処理し、マイクロビッカース硬さ HV と X 線回折図形を測定した。X 線回折図形において、Fe(311)のピークに注目して、その半価幅を求めた。S10C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材で測定された HV と Fe(311) X 線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性を図3に示す。図3(a)に示す HV の熱処理温度依存性に注目すると、100～400℃の低温で熱処理した 700℃素材と 900℃素材では 900℃素材の方がやや大きな HV であるが、400℃以上で熱処理すると、ともに減少して、600℃以上の熱処理温度ではほぼ同じ値になる。次に、図3(b)に示した X 線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性に注目すると、700℃素材、900℃素材ともに、200～600℃では熱処理温度が高温になるとともに小さな半価幅となり、600～900℃では半価幅の変化は認められない。

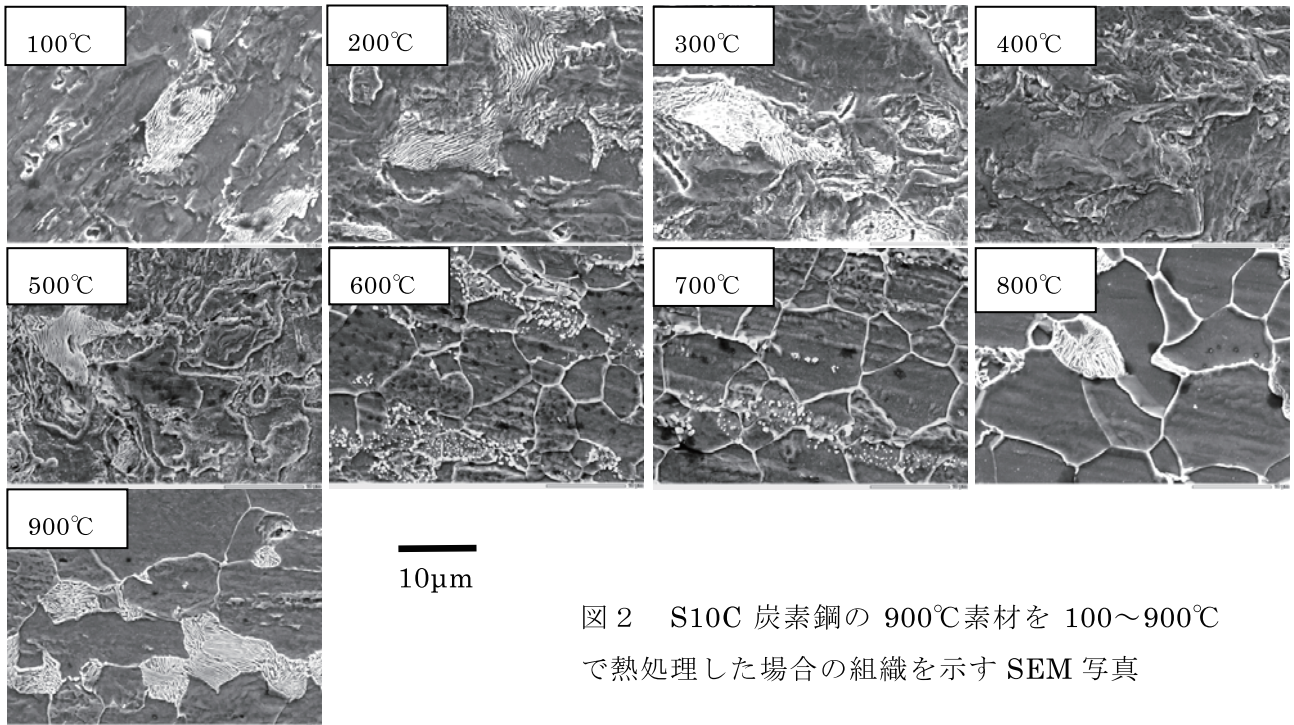


図2 S10C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表2 S10C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～500℃	パーライト組織
600℃、700℃	球状化セメンタイト組織
800℃、900℃	パーライト組織

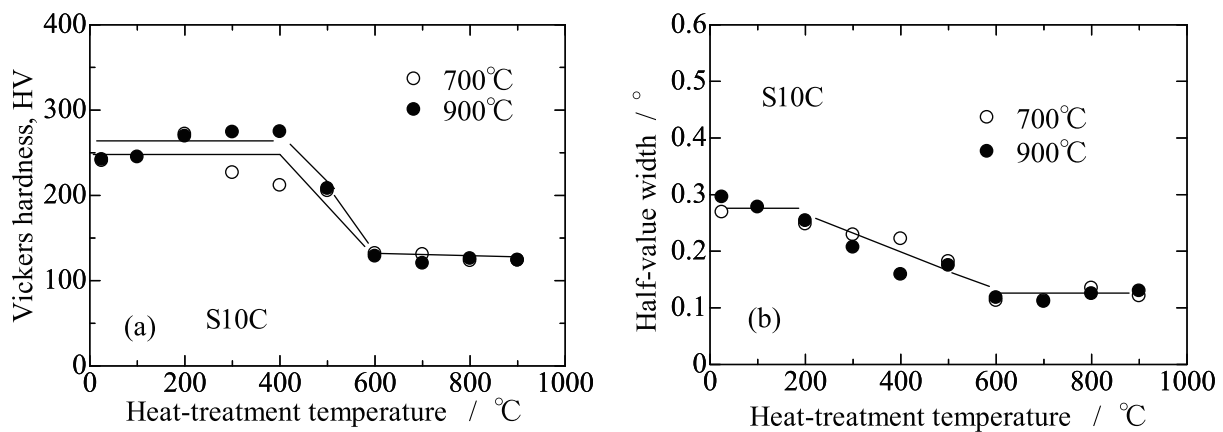


図3 S10C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材で測定されたビッカース硬さ HV(a)と Fe(311) X線回折ピークの半価幅(b)の熱処理温度依存性

図1、2、そして表1、2に示したように、100～500℃で熱処理した700℃素材と900℃素材の組織はそれぞれ球状化セメンタイト組織とパーライト組織で異なるが、HV およびX線回折ピークの半価幅には大きな相違は認められない。また、HV、X線回折ピークの半価幅ともに高温での熱処理によって小さくなるが、それらが変化する熱処理温度領域はやや異なる。硬さは転位

の移動度と転位密度に大きく影響され⁽⁸⁾⁽⁹⁾、X線回折ピークの半価幅は転位密度、結晶粒度、転位近傍の応力場に大きく影響される⁽¹⁰⁾ことが知られている。また、比較的低温であっても炭素などの侵入型不純物の拡散速度は大きいことも知られている^{(11)・(13)}。これらと、図1、図2の組織変化を考慮すると、HVとX線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性は次のように説明できる：100～200℃の熱処理温度では転位密度などの組織が変化しないので、HVとX線回折ピークの半価幅は変化しない。200～400℃では、転位芯に固着されていた侵入型不純物（炭素原子）の一部が拡散して、析出物（セメンタイト）になったり、転位の再配列が起こるために、転位近傍の応力場が僅かに緩和され、X線回折ピークの半価幅は小さくなるが、転位密度は変化しないのでHVはほぼ同じになる。400～600℃では転位密度が大きく減少する、つまり再結晶が起こるので、HV、X線回折ピークの半価幅ともに小さくなる。600～900℃では、組織、結晶粒度が変化することもあるが、転位密度があまり変化しないので、HV、X線回折ピークの半価幅ともに変化しない。

3. 2 S25C 炭素鋼試料

3. 2. 1 組織観察結果

S25C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図4に示す。100～700℃で熱処理した試料では、白く見える粒状のセメンタイトが分散している。熱処理温度が 500℃と高温になると、粒界が明瞭に見えるようになる。600℃、700℃になると、さらに粒界が明瞭になる。これらのように、100～700℃で熱処理した場合には、球状化セメンタイト組織である。800℃以上になると、球状化セメンタイト組織からパーライト組織へと変化する。これらの熱処理温度による組織の相違を表3に纏める。

S25C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図5に示す。

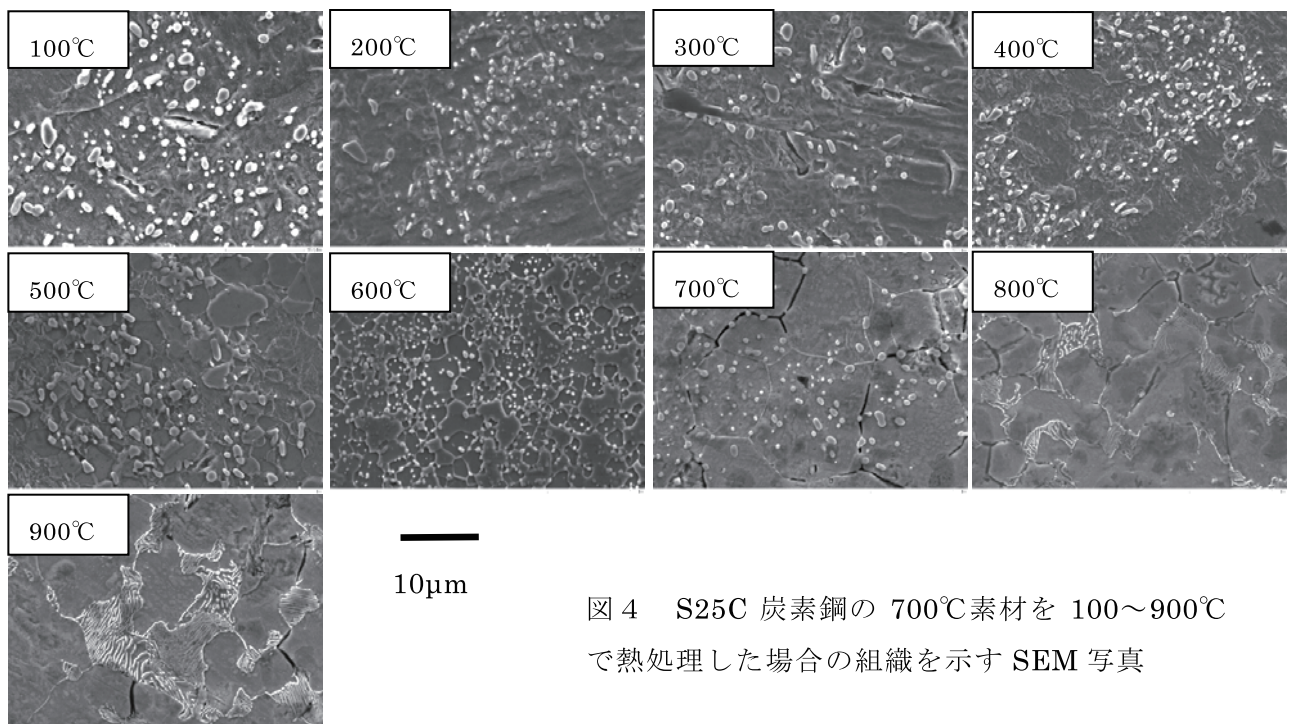


図4 S25C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表 3 S25C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～700℃	球状化セメンタイト組織
800℃、900℃	パーライト組織

100～400℃で熱処理した試料の組織は変形したパーライト組織であり、500℃で熱処理すると、その変形組織が僅かに回復しているように見える。熱処理温度が 600℃、700℃になると、変形組織が消滅し、粒界が明瞭に見えるようになるとともに、セメンタイトが粒状化して、球状化セメンタイト組織へと変化している。熱処理温度がさらに高温になって、800℃、900℃になると、再びパーライト組織へと変化している。これらの熱処理温度による組織の相違を表 4 に纏める。

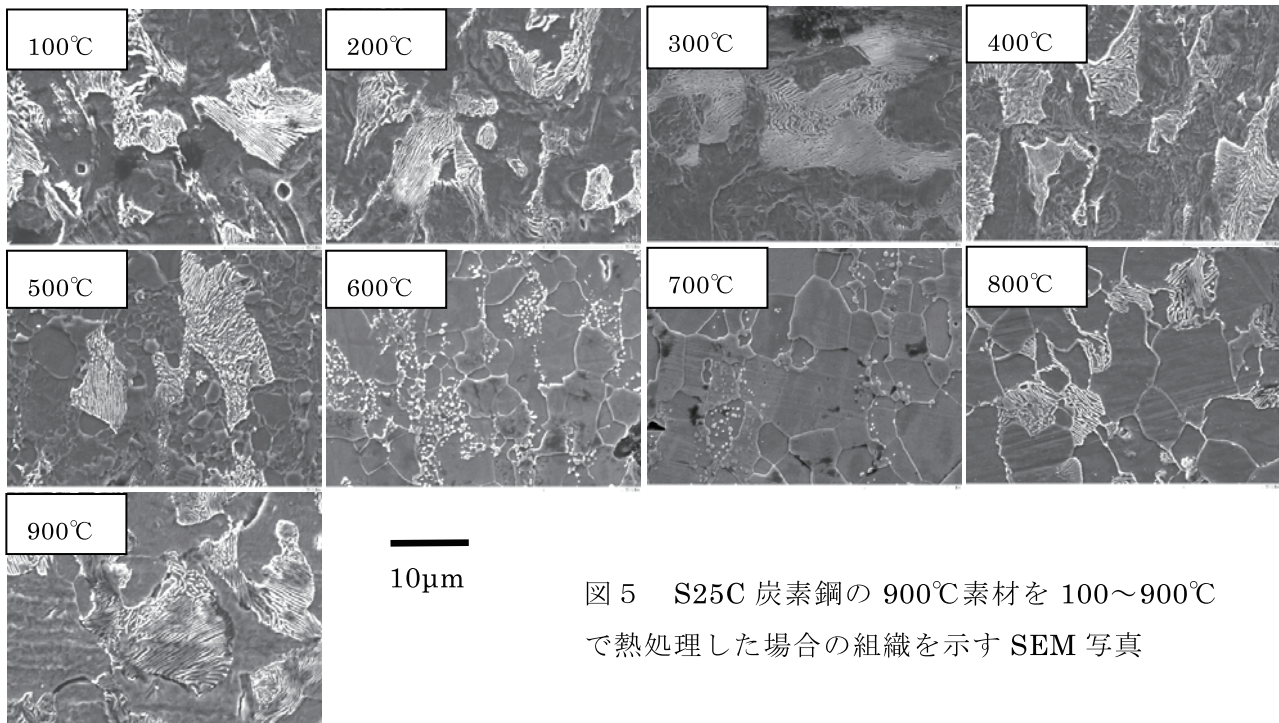


図 5 S25C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表 4 S25C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～500℃	パーライト組織
600℃、700℃	球状化セメンタイト組織
800℃、900℃	パーライト組織

3. 2. 2 ビッカース硬さと X 線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性

S25C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材を 100～900℃で熱処理し、HV と Fe(311) X 線回折ピークの半価幅を測定した。HV の熱処理温度依存性を図 6 (a) に示す。400℃以下で熱処理した場合には、700℃素材、900℃素材ともに、HV の変化は認められない。また、700℃素材に比べて 900℃素材の方がやや小さな HV になっている。400～600℃で熱処理すると熱処理温度が高温に

なるとともに HV は小さくなり、600℃以上ではほぼ一定となる。つまり、400℃以上で熱処理すると転位密度が大幅に減少し、400～600℃が再結晶温度である。

S25C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合 Fe(311) X線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性を図 6 (b)に示す。700℃素材、900℃素材ともに、熱処理温度が 200℃までの低温では、大きな半価幅の変化は認められないが、200℃以上で熱処理すると、熱処理温度が高温になるほど小さな半価幅となる。また、600℃以上で熱処理した場合には、ほぼ同じ半価幅の値となる。

図 4、5、そして表 3、4に示したように、100～500℃で熱処理した 700℃素材と 900℃素材の組織はそれぞれ球状化セメンタイト組織とパーライト組織で異なるが、HV および X線回折ピークの半価幅には大きな相違は認められない。また、前述の S10C 炭素鋼試料の場合と同様に考えると、熱処理に伴う組織の変化は次のようになる：100～200℃の熱処理温度では転位密度などの組織が変化しない。200～400℃では、転位芯に固着されていた炭素原子の一部が拡散して、セメンタイトになったり、転位の再配列が起こるために、転位近傍の応力場が僅かに緩和される。400～600℃では転位密度が大きく減少し、再結晶が起こる。600～900℃では、組織、結晶粒度が変化することもあるが、転位密度はあまり変化しない。

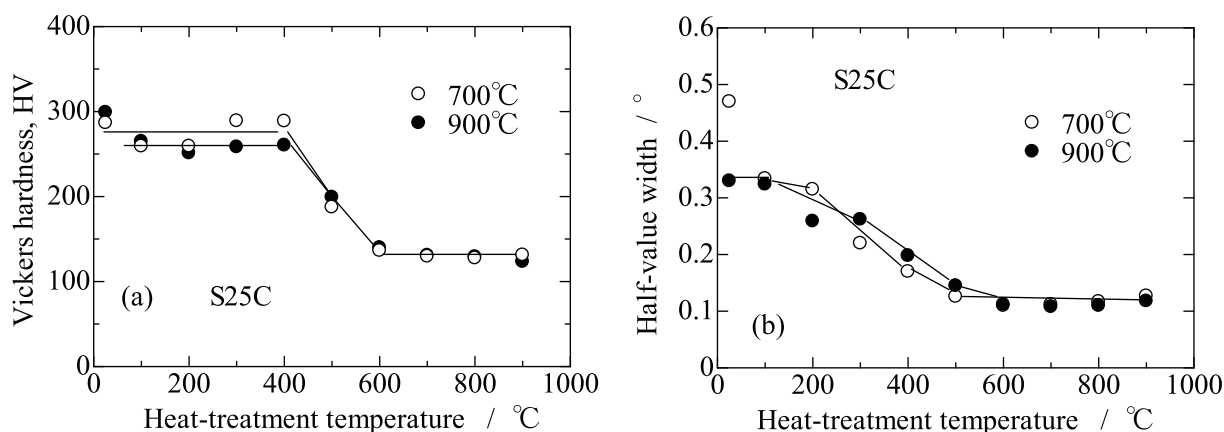


図 6 S25C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材で測定されたビッカース硬さ HV(a)と Fe(311)X線回折ピークの半価幅(b)の熱処理温度依存性

3. 3 S50C 炭素鋼試料

3. 3. 1 組織観察結果

S50C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図 7に示す。100～600℃で熱処理した試料では、白く見える粒状のセメンタイトが分散している。熱処理温度が 700℃になると粒界が明瞭になり、800℃になるとセメンタイトが集合するようになる。これらのように、100～800℃で熱処理した場合には、球状化セメンタイト組織である。900℃になると、球状化セメンタイト組織からパーライト組織へと変化する。これらの熱処理温度による組織の相違を表 5に纏める。

S50C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の試料組織観察結果を図 8に示す。100～500℃で熱処理した試料ではパーライト部で大きな塑性変形が認められる。熱処理温度が

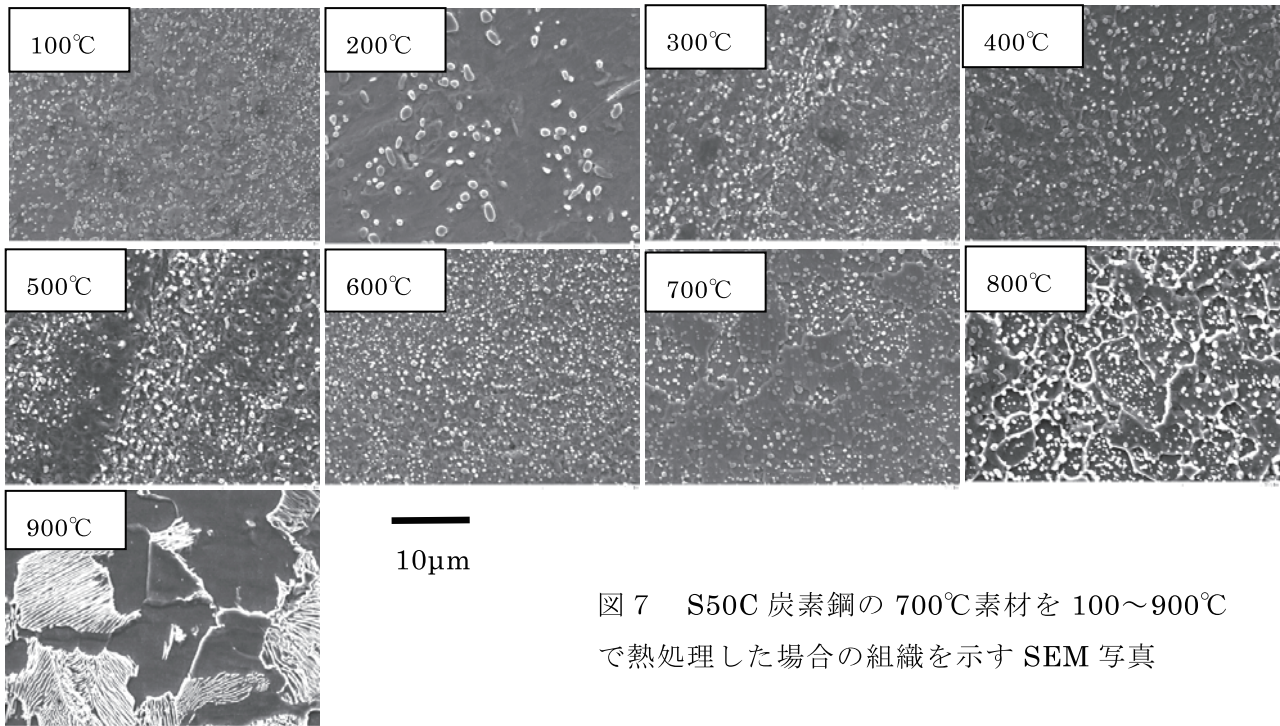


図7 S50C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃
で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表5 S50C 炭素鋼の 700℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～800℃	球状化セメンタイト組織
900℃	パーライト組織

600℃になると球状化セメンタイト組織へと変化し、700℃になると明瞭に結晶粒界が見えるようになる。800℃以上になると、再び球状化セメンタイト組織からパーライト組織へと変化する。これらのように、100～500℃で熱処理した場合には塑性変形したパーライト組織、600℃、700℃で熱処理した場合には球状化セメンタイト組織、800℃、900℃で熱処理すると、焼鈍されたパーライト組織になる。これらの熱処理温度による組織の相違を表6に纏める。

3. 3. 2 ビッカース硬さとX線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性

S50C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の HV の熱処理温度依存性を図9(a)に示す。低温で熱処理した場合には、900℃素材の方が大きな HV となっている。また、700℃素材の場合には 400～600℃で、900℃素材の場合には 400～700℃で HV の大きな減少が認められる。つまり、つまり、400℃以上で熱処理すると転位密度が大幅に減少し、再結晶温度は 900℃素材の方がやや高温である。

S50C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合 Fe(311) X線回折ピークの半価幅の熱処理温度依存性を図9(b)に示す。700℃素材、900℃素材ともに、熱処理温度が 200℃までの低温では、大きな半価幅の変化は認められないが、200℃以上で熱処理すると、熱処理温度が高温になるほど小さな半価幅となる。また、600℃以上で熱処理した場合には、ほぼ同じ半価幅の値となる。

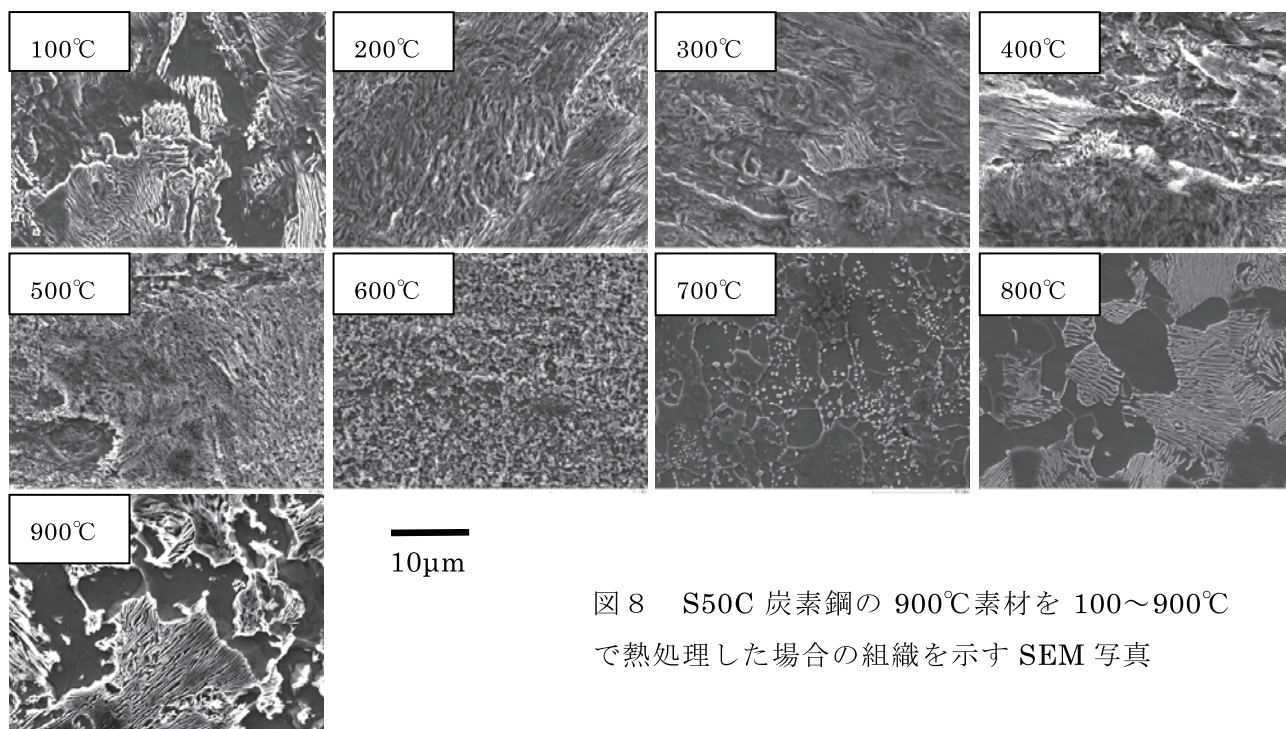


図8 S50C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織を示す SEM 写真

表6 S50C 炭素鋼の 900℃素材を 100～900℃で熱処理した場合の組織

熱処理温度	組 織
100～500℃	パーライト組織
600℃、700℃	球状化セメンタイト組織
800℃、900℃	パーライト組織

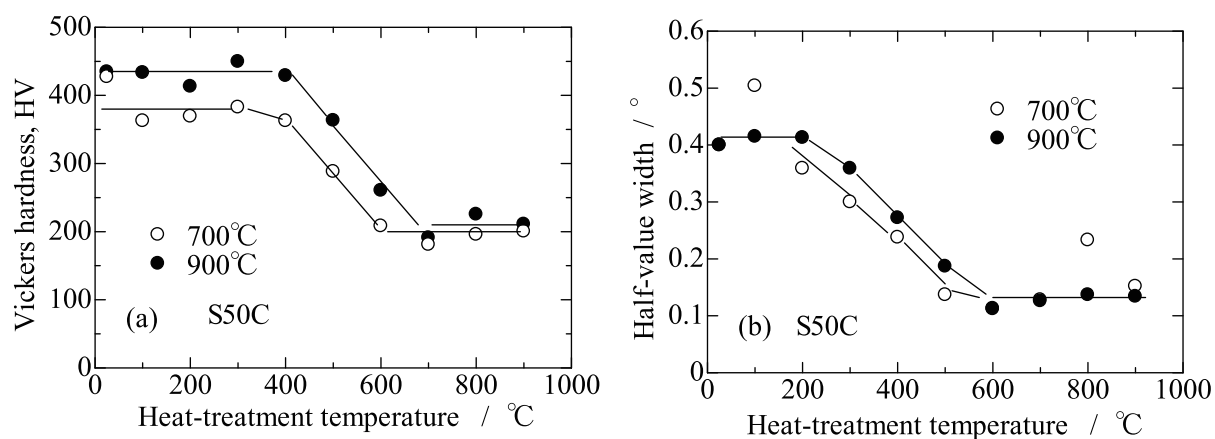


図9 S50C 炭素鋼の 700℃素材と 900℃素材で測定されたビッカース硬さ HV(a) と Fe(311) X線回折ピークの半価幅(b)の熱処理温度依存性

図7、8、そして表5、6に示したように、100～500℃で熱処理した 700℃素材と 900℃素材の組織はそれぞれ球状化セメンタイト組織とパーライト組織であり、パーライト組織の 900℃素材の方がやや大きな HV となる。また、半価幅が大きく変化する熱処理温度領域は、900℃素材の方がやや高温側にある。さらに、前述の S10C 炭素鋼試料と S25C 炭素鋼試料の場合と同様に

考えると、熱処理に伴う組織の変化は次のようになる：100～200℃の熱処理温度では転位密度などの組織はあまり変化しない。200～400℃では、転位芯に固着されていた炭素原子の一部が拡散したり、転位の再配列が起こるために、転位近傍の応力場が僅かに緩和される。400～600℃では転位密度が大きく減少し、再結晶が起こる。700～900℃では、組織、結晶粒度が変化することもあるが、転位密度はあまり変化しない。

4. 結 論

鉄鋼材料は機械構造用材料などとして多く用いられている。その中でも安価で、熱処理によって強度や伸びなどの機械的性質が大きく変化する炭素鋼が多く用いられている。しかしながら、炭素濃度の異なる種々の炭素鋼における熱処理に伴う組織変化の詳細についての報告はない。そこで本研究では、炭素濃度の異なる3種類の炭素鋼（S10C、S25C、S50C）を素材とし、冷間圧延、熱処理した試料の組織を調べた。大気中における700℃（または900℃）での熱処理と冷間圧延を繰り返して行い、板厚約2mmとした後、表面の酸化皮膜を機械研磨で除去し、真空中において700℃（または900℃）で熱処理した。これら700℃素材（または900℃素材）を板厚0.5mmにまで冷間圧延した後、100～900℃で熱処理し、組織変化を調べた。このために、エッチングした試料表面における走査電子顕微鏡での組織観察、HVの測定、X線回折ピークの半価幅の測定を行った。得られた結果を次に示す：

- （1） S10C と S25C 炭素鋼の 700℃素材では、100～700℃の熱処理で球状化セメンタイト組織、800℃以上の熱処理でパーライト組織となった。900℃素材では熱処理温度 100～500℃でパーライト組織、600～700℃で球状化セメンタイト組織、800℃以上でパーライト組織となった。S50C 炭素鋼の 700℃素材では、100～800℃の熱処理で球状化セメンタイト組織、900℃の熱処理でパーライト組織となった。900℃素材では熱処理温度 100～500℃でパーライト組織、600～700℃で球状化セメンタイト組織、800℃以上でパーライト組織となった。これらのように、S10C、S25C、S50C 炭素鋼ともに、500℃までは熱処理前の組織と同じであること、600～700℃では熱処理前の組織にかかわらず球状化セメンタイト組織であること、900℃ではパーライト組織であることが分かる。
- （2） S10C、S25C、S50C 炭素鋼、そして 700℃素材、900℃素材ともに、400～600℃で HV の大きな減少が認められた。つまり、この温度が再結晶温度であり、転位密度の大きな減少が起こることになる。
- （3） S10C と S50C 炭素鋼では、700℃素材よりも 900℃素材の方が大きな HV となる傾向があり、球状化セメンタイト組織よりもパーライト組織の方が硬いことになる。一方、S25C 炭素鋼では、700℃素材の方が大きく、球状化セメンタイト組織の方が硬いことになる。これらのように、組織と HV の間には明瞭な関係はない。
- （4） 3 種類の炭素鋼ともに、200～400℃では、HV の変化は認められないが、X線回折ピークの半価幅が小さくなった。この温度範囲では転位芯に固着されていた炭素原子の一部が拡散したり、転位の再配列が起こるために、転位近傍の応力場が僅かに緩和される。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（C））の支援を受けて行われたものであることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- (1) 桜井 弘：元素 111 の新知識、講談社、(2009), p.144.
- (2) 新日本製鐵(株)：鉄と鉄鋼がわかる本、日本実業出版社、(2005), p.28.
- (3) 門間改三：大学基礎 機械材料、実教出版、(1987), p.30.
- (4) 矢島悦次郎、市川理衛、古沢浩一：若い技術者のための機械・金属材料、丸善、(1994), p.93.
- (5) 宮川大海、吉葉正行：よくわかる材料学、森北出版、(1993), p.40.
- (6) 佐藤知雄：鉄鋼の顕微鏡写真と解説、丸善、(1985), p.22.
- (7) 駒井謙治郎（編集委員長）：機械材料学、日本材料学会、(2000), p.212.
- (8) 羽木秀樹、林 安德：日本金属学会誌、**51**(1987), 24.
- (9) Hagi, H., Hayashi, Y. : Trans. JIM, **28**(1987), 368.
- (10) カリティ ((訳)松村源太郎)：X線回折要論、アグネ、(1991), p.256.
- (11) Lord, A. E., Beshers, D. N. : Acta Metall., **14**(1966), 1659.
- (12) de Silva, J. R. G., McLellan, R. B. : Mater. Sci. Eng., **26**(1976), 83.
- (13) Pascheto, W., Johari, G. P. : Metall. Mater. Trans. A., **27**(1996), 2461.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)