

浸炭焼入れ後、再加熱焼入れした肌焼鋼の機械的性質に及ぼす旧 γ 粒径の影響

Effect of Austenite Grain Size on Mechanical Properties of Carburized and repeatedly Quenched Case Hardening Steel

西川元裕*¹ 平岡和彦*²

Motohiro Nishikawa and Kazuhiko Hiraoka

Synopsis: We studied strengthening of carburizing steel by refining Austenite grain. To refine the Austenite grain, Ti-B-Modified carburizing steel was repeatedly quenched and tempered after carburizing. The effect of Austenite grain refinement was evaluated by Charpy impact test and static bending test. Austenite grain of Ti-B-Modified carburizing steel was refined as small as $2\mu\text{m}$ by the repeated quenching. Oxidized non-martensitic layer produced during carburizing was removed to exclude its effect. Charpy impact value and static bending strength were improved by refining Austenite grain. We think this is because fracture origins show fine intergranular surface with the unit size of Austenite grain.

Key words: Carburizing steel; Austenite grain size; Grain refinement; Charpy impact value; Bending strength; Repeated quenching; Carburizing; Martensite; Titanium; Boron

1. 緒言

自動車のギアやシャフト等の動力伝達部品には、耐摩耗性や疲労強度向上を目的に浸炭焼入れ・焼戻しを施して使用する肌焼き鋼が広く用いられている。近年、地球の温暖化が深刻な問題となっており、CO₂排出量削減のための燃費向上を目的に、自動車部品の高強度化による小型・軽量化ニーズが高まっており、肌焼鋼にも高強度化が強く求められている。肌焼鋼の高強度化には、一般に、Mo、Niを始めとした合金元素を添加する手法が用いられてきたが、合金元素の添加は、部品成形時の加工性の悪化、コストアップなどの問題があり、その添加量には制約がある。特に近年、合金価格の著しい高騰により、合金元素に頼らない高強度化が強く望まれている。

合金元素の添加に頼らず肌焼鋼を高強度化するための一手法として結晶粒の微細化が考えられるが、この手法は材料の延性や靱性を損なわずに高強度化が可能であり、どのような成分の材料にも適用できるという利点があり、有効な手法と言える。

肌焼鋼の微細粒の研究としては、加工熱処理を用いたもの¹⁾、高周波焼入れを利用したもの²⁾などが報告されている。田中ら¹⁾は、あらかじめ浸炭した鋼をオーステナイト(以下 γ)化温度まで加熱して冷却過程の773~1083Kで温間加工し、一旦パーライト変態終了まで冷却した後、短時間加熱焼入れすることにより、約 $3\mu\text{m}$ の旧 γ 粒を得て

いる。一方、村井ら²⁾は浸炭焼入れ後、高周波焼入れすることにより、約 $5\mu\text{m}$ の旧 γ 粒を得ている。また、それぞれの強度に及ぼす旧 γ 粒径の影響について、田中ら¹⁾は、静的曲げ強度は旧 γ 粒径が小さくなるほど向上するが、曲げ疲労強度は $10\mu\text{m}$ 程度で最大になり、 $5\mu\text{m}$ までの微細化ではやや低下するとしている。また、村井ら²⁾も旧 γ 粒径が小さいほど静的曲げ強度が向上するとしている。この様に、肌焼鋼において、旧 γ 粒の微細化により種々の強度は向上すると考えられるが、肌焼き鋼の超微細粒組織の実用化を考えた場合、前述の方法は、設備及び部品形状による制約を受けると考えられるので、より簡素な方法が望まれる。

そこで、本研究ではTi添加肌焼鋼を用いて、浸炭焼入れ後に再加熱焼入れを繰返すという比較的容易な方法で旧 γ 粒の微細化を試み、種々の旧 γ 粒径の試験片を作製し、衝撃特性、静的曲げ特性に及ぼす旧 γ 粒径の影響を調査し、旧 γ 粒微細化による肌焼鋼の高強度化について検討をおこなった。

2. 実験方法

2・1 供試材の化学成分

本実験に用いた供試材の化学成分をTable 1に示す。供試材はJIS SCr420に対し、Siを低減し、BとTiを添加した材料である。Tiは鋼中にTiCとして微細に分散析出し、加

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ

*2 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長

熱時の結晶粒粗大化防止効果が非常に高い元素である。再加熱焼入れを繰り返して結晶粒を微細化させる際に結晶粒の粗大化を防止するためにTiを約0.15%添加している。Bは10~20ppmの添加で鋼材の焼入性を著しく向上させ、鋼材の加工性を損なわず焼入性を上げ、鋼材の強度も向上させる元素であり、近年広く使用されている。本実験にお

いても結晶粒の微細化により通常鋼では焼入性が不足するところをBで補う効果がある。また、結晶粒の粗大化防止には鋼中に微細に分散析出したTiCがピンニング粒子として作用するが、Nを多く含有するとTiNの生成量が多くなり、TiCの量が減少するため、Nは50ppm以下としている。

Table 1 Chemical composition (mass%, N,B:ppm)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	N	B
0.22	0.11	0.80	0.014	0.016	1.20	0.030	0.150	38	14

2・2 試験片作製方法

供試材は100kg真空溶解炉で溶製し、溶解、凝固過程で析出したTiの炭化物、炭窒化物を固溶させ、その後の熱処理で微細析出させるために1523Kで18ks保持した後、40角に鍛伸した。その後、旧 γ 粒径の異なる6種類の試験片を作製するためにTable2の条件で各試験片の熱処理をおこなった。まず、浸炭焼入・焼戻し後の旧 γ 粒径を変化させるために3種類の前熱処理を施した。前熱処理後のミクロ組織は、Condition1は粗いフェライト+パーライト組織、Condition2は粗いフェライト+ベイナイト組織、

Condition3~6は細かいフェライト+パーライト組織であった。

その後、衝撃試験片、曲げ試験片の粗加工をおこなった後、Fig.1の浸炭焼入・焼戻し処理をおこなった。Condition4~6についてはさらにFig.2の条件で1~3回の再加熱焼入・焼戻し処理をおこなった。全ての熱処理終了後、強度に影響を及ぼすと考えられる浸炭異常層（深さ約10 μ m）などの表面欠陥を取り除くために、ノッチ部とノッチ面を0.1mm研削した。側面と背面は、2mm研削をおこない、浸炭層を完全に除去した。

Table 2 Heat-treatment condition

Condition	Previous heat-treatment	Carburizing and Tempering	Additional heat-treatment
1	1393K × 14.4ks、F.C.	Fig.1	—
2	1393K × 14.4ks、A.C.	〃	—
3	1173K × 3.6ks、A.C.	〃	—
4	〃	〃	Quenching & Tempering (Fig.2) × 1
5	〃	〃	Quenching & Tempering (Fig.2) × 2
6	〃	〃	Quenching & Tempering (Fig.2) × 3

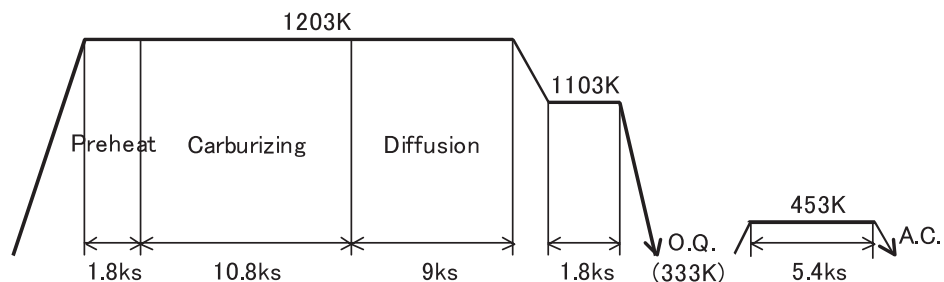


Fig.1 Carburizing and tempering condition.

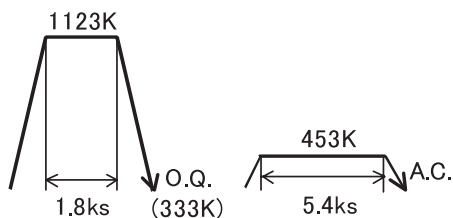


Fig.2 Quenching and tempering condition.

2・3 試験片確性調査

作製した試験片のミクロ組織は、ノッチ底断面を鏡面研磨後、ナイタール腐食し、光学顕微鏡にて観察した。また、旧 γ 粒径は、同断面において、ピクリン酸飽和水溶液と界面活性剤の混合液中に333~353Kで浸漬して旧 γ 粒界を現出し、切断法により平均旧 γ 粒径を測定した。また、試験片のノッチ底からの断面硬さ分布をマイクロピッカース硬度計にて測定した。

2・4 シャルピー衝撃試験

衝撃試験片形状はFig.3に示す様に10×10×55mmの10R 2mmCノッチとした。衝撃試験は、計装化シャルピー衝撃試験機を用い、き裂発生エネルギーとき裂伝ばエネルギーにて評価をおこなった。き裂発生から最大荷重までのエネルギーをき裂発生エネルギー、それ以後のエネルギーをき裂伝ばエネルギーとして評価をおこなった。試験は、各条件5本ずつ室温にておこなった。また試験後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用い、き裂発生起点部及びき裂伝ば部の破面観察をおこなった。

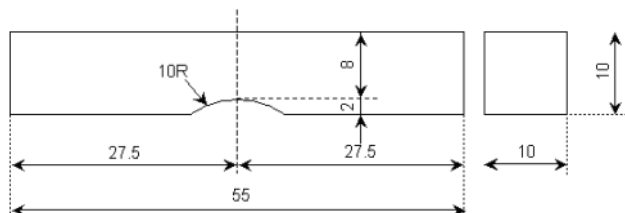


Fig.3 Charpy impact test specimen.

2・5 静的曲げ試験

曲げ試験片はFig.4に示す様に10×10×70mmの2mmVノッチとした。静的曲げ試験は、支点間距離50mmの3点曲げにておこない、圧下速度は2mm/minとした。表面層にき裂が生じた時点での荷重をき裂発生荷重とし、最終破断に至るまでの荷重の最大値を最大荷重として評価した。試験は、各条件5本ずつ室温にておこなった。また試験後、SEMを用い、き裂発生起点部及びき裂伝ば部の破面観察をおこなった。

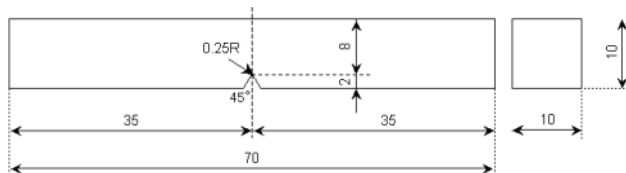


Fig.4 Bending test specimen.

3. 実験結果

3・1 試験片の調査結果

3・1・1 試験片のミクロ組織

Fig.5, 6に衝撃試験片のミクロ組織観察結果を示す。ミクロ組織は表層部も芯部もマルテンサイト相に残留オーステナイトを含んだ組織であり、組織的な異常は認められず、表面部に顕著な炭化物の析出も認められなかった。また、結晶粒が微細化すると焼入性が低下するが、いずれの条件でも不完全焼入組織は認められず良好な組織であった。曲げ試験片についても同様のミクロ組織であった。

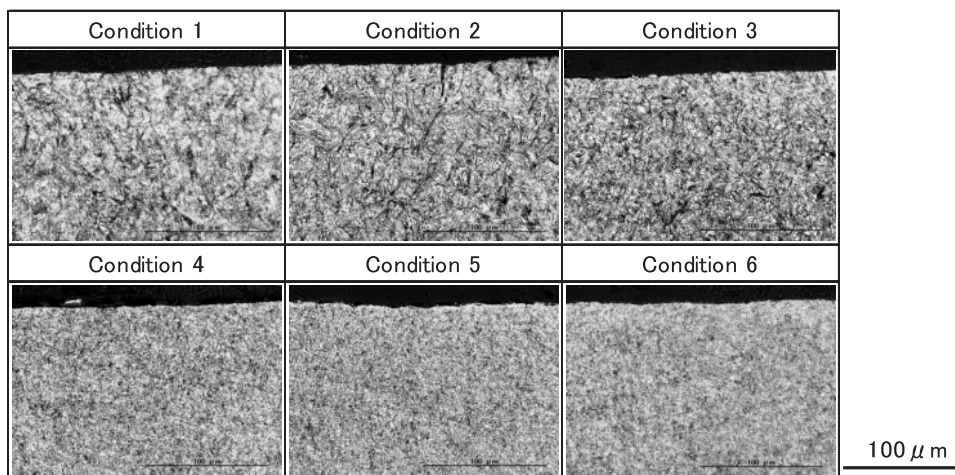


Fig.5 Microstructures of Charpy impact test specimens (surface).

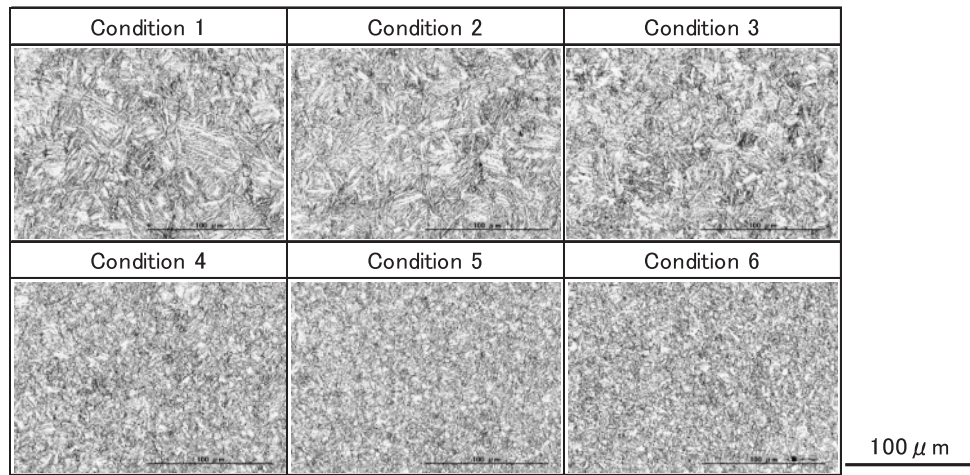


Fig.6 Microstructures of Charpy impact test specimens (core).

3・1・2 試験片の旧 γ 粒径

Fig.7, 8に、シャルピー衝撃試験片の旧 γ 粒観察結果を示す。また、それぞれの試験片の各処理条件における平均旧 γ 粒径測定結果をTable 3, 4に示す。いずれの試験片もCondition1が最も旧 γ 粒が大きく、Condition1からCondition6の順に旧 γ 粒は小さくなっている。Condition1～3は浸炭前組織の違いから浸炭後の旧 γ 粒径に差が生じたと考えられる。また、Condition4～6は再加

熱焼入・焼戻し回数を増すごとに旧 γ 粒径は小さくなり、Condition6では、浸炭層で平均粒径約 $2\mu\text{m}$ まで微細化した。浸炭層は芯部に比べ、旧 γ 粒がより微細化する傾向が見られるが、これは浸炭層のC量が高く、再加熱時の γ 再結晶粒生成の際に残留炭化物量が多くなり、 γ の核生成サイトが増えたことにより γ 初期粒がより微細になったためであると考えられる。

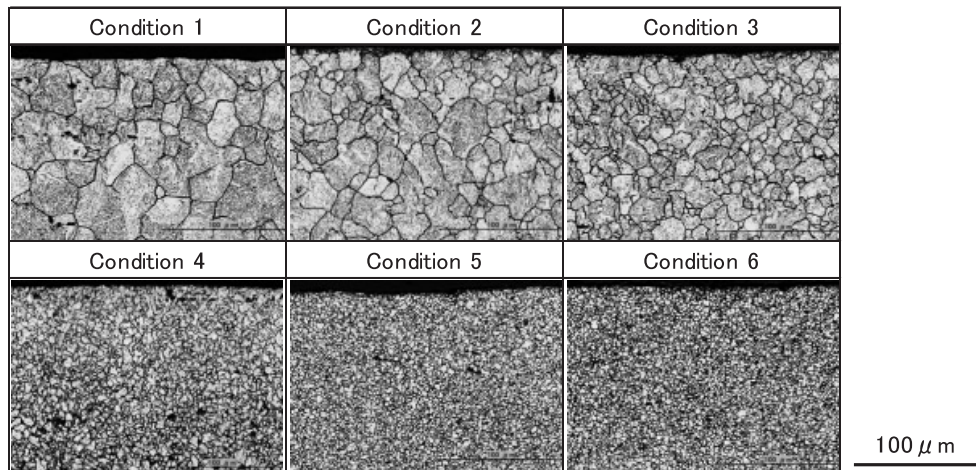


Fig.7 Austenite grain structure of Charpy impact test specimens (surface).

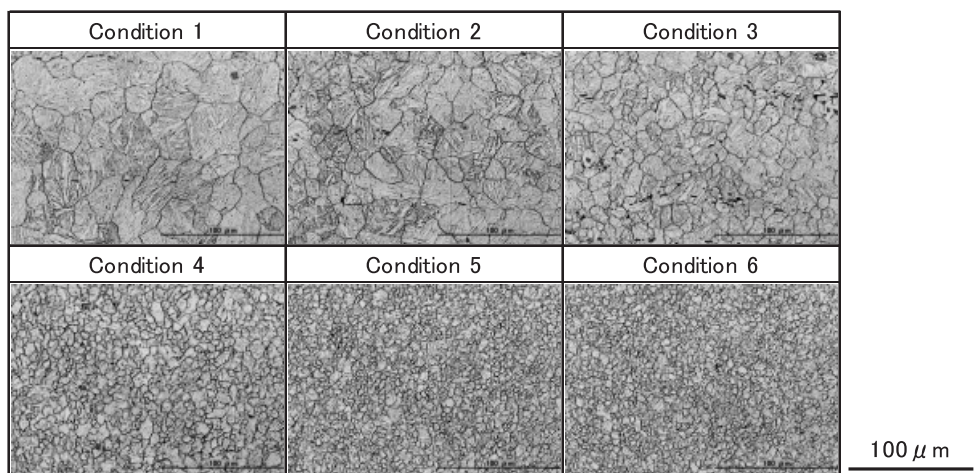


Fig.8 Austenite grain structure of bending test specimens (core).

Table 3 Austenite grain size of Charpy impact test specimens (Average μm)

	Condition1	Condition2	Condition3	Condition4	Condition5	Condition6
Surface	22.7	15.6	10.2	3.6	2.4	2.0
Core	25.0	16.1	8.0	4.6	3.9	3.6

Table 4 Austenite grain size of bending test specimens (Average μm)

	Condition1	Condition2	Condition3	Condition4	Condition5	Condition6
Surface	23.8	16.1	12.8	4.5	2.4	2.6
Core	22.7	15.2	11.1	5.7	4.4	4.6

3・1・3 試験片の硬さ分布

衝撃試験片、曲げ試験片のノッチ底からの断面硬さ分布測定結果をFig.9に示す。衝撃試験片で、硬化層深さにややバラツキが見られるが、表面硬さ、芯部硬さは試験片間

に大きな差はない。曲げ試験片では表面硬さにややバラツキがあるものの硬化層深さ、芯部硬さは全ての試験片で同等であった。

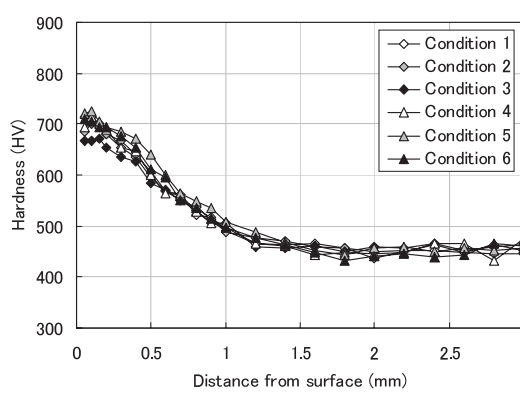
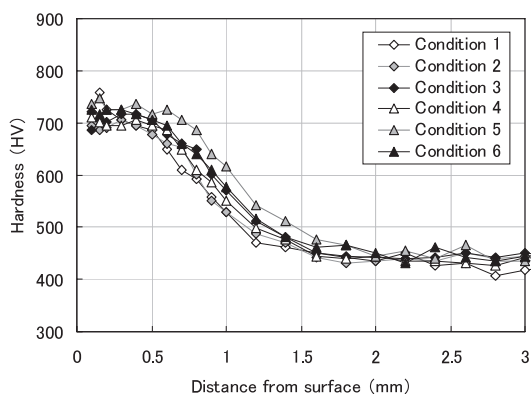


Fig.9 Hardness distribution of Charpy impact test specimens and bending test specimens.

3・2 試験結果

3・2・1 シャルピー衝撃試験結果

Fig.10に各試験片のシャルピー衝撃試験結果を示す。き裂発生エネルギーはCondition1が最も低く、

Condition6にいくに従って高くなっている。き裂伝ばエネルギーもCondition1~Condition6にいくに従ってやや高くなる傾向はあるが、き裂発生エネルギーほど顕著に高くなっていない。

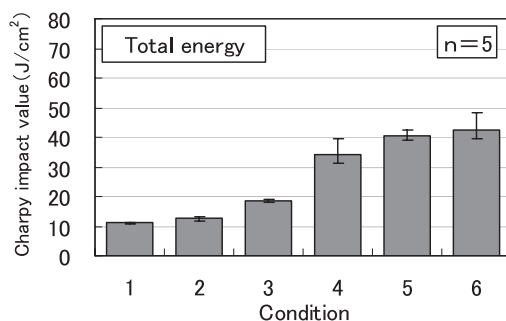
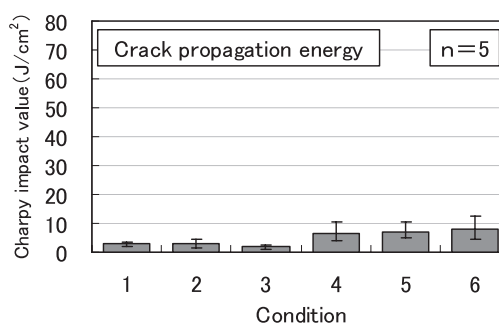
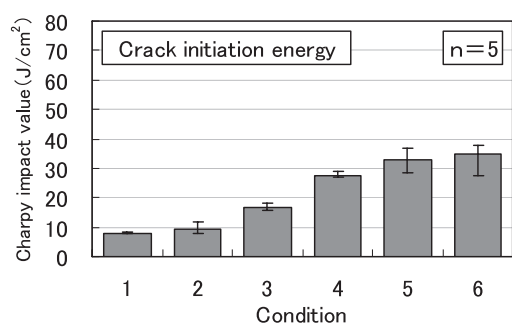


Fig.10 Result of Charpy impact test.

Fig. 11, 12に衝撃試験片の破面のSEM観察結果を示す。起点部は、ノッチ底表面であり、起点部の破面は粒界破面を呈している。旧 γ 粒径が小さくなる程破面単位は小さくなっており、粒界破面の面積も小さくなっている。き裂伝

ば部はへき開破面と延性破面(ディンプル破面)の混合破面になっており、旧 γ 粒径が小さい方がディンプル破面率がやや増加しているが、旧 γ 粒径の影響はほとんど見られない。

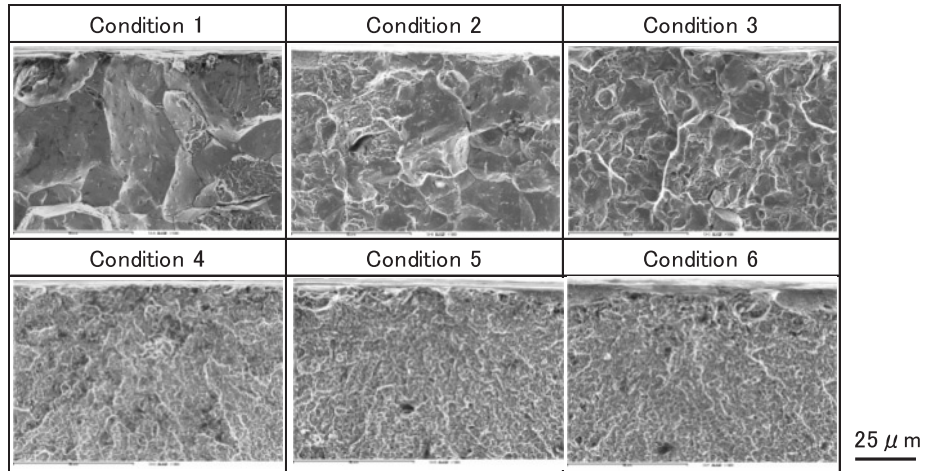


Fig. 11 SEM images of fractured surface after impact test (Crack initiation area)

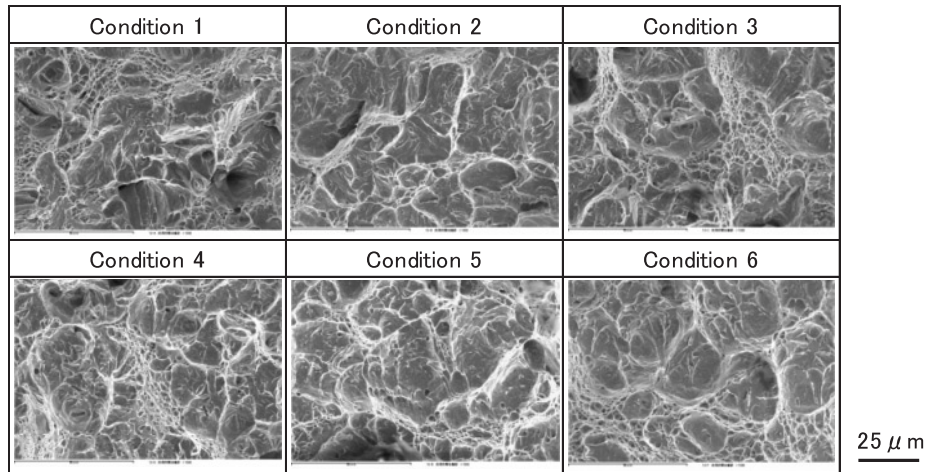


Fig. 12 SEM images of fractured surface after impact test (Crack propagation area)

3・2・2 静的曲げ試験結果

Fig. 13に各試験片の静的曲げ試験結果を示す。き裂発生荷重はCondition1が最も低く、Condition5にいくに従

って高くなっており、Condition6ではやや低下している。破断までの最大荷重はCondition1~6でほとんど差がない。

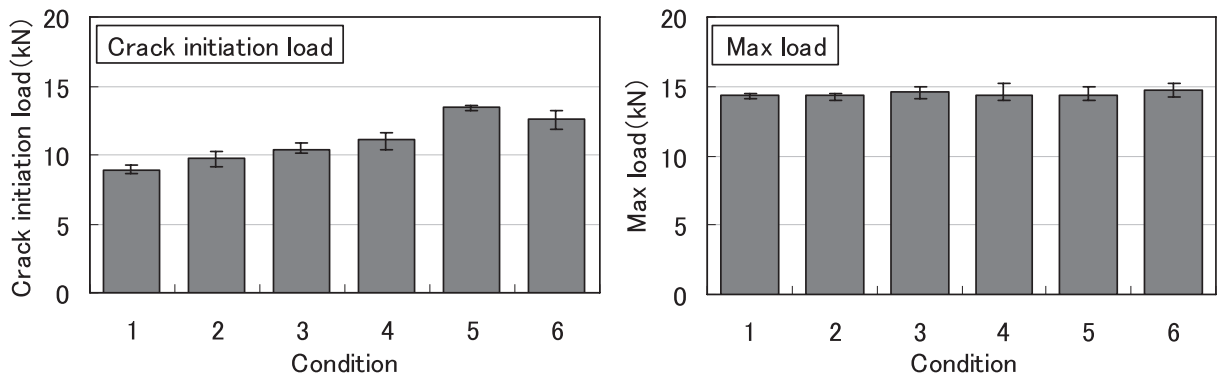


Fig. 13 Result of bending test

Fig. 14, 15に曲げ試験片のSEMによる破面観察結果を示す。起点部は、ノッチ底表面であり、起点部は粒界破面を呈している。旧 γ 粒径が小さくなる程破面単位は小さくなっている。伝ば部はへき開破面と延性破面(デンプル

破面)の混合破面になっており、旧 γ 粒径が小さい方がデンプル破面率が増えているが、旧 γ 粒径の影響はほとんど見られない。

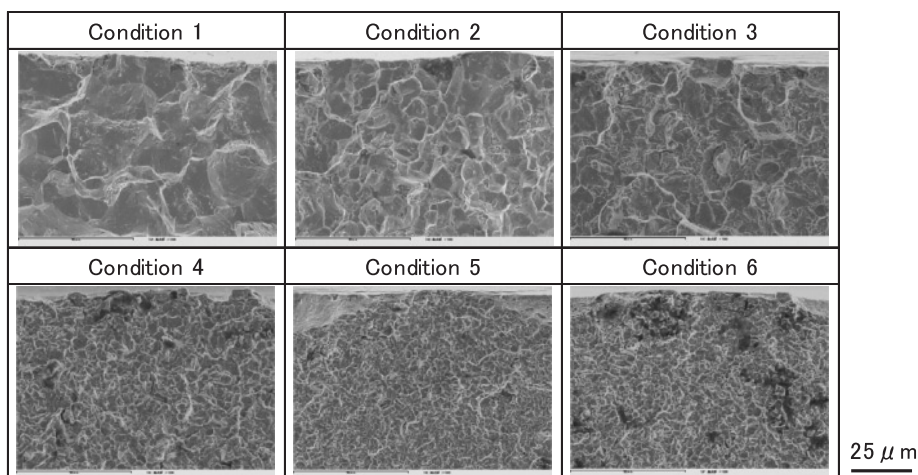


Fig. 14 SEM images of fractured surface after bending test (Crack initiation area)

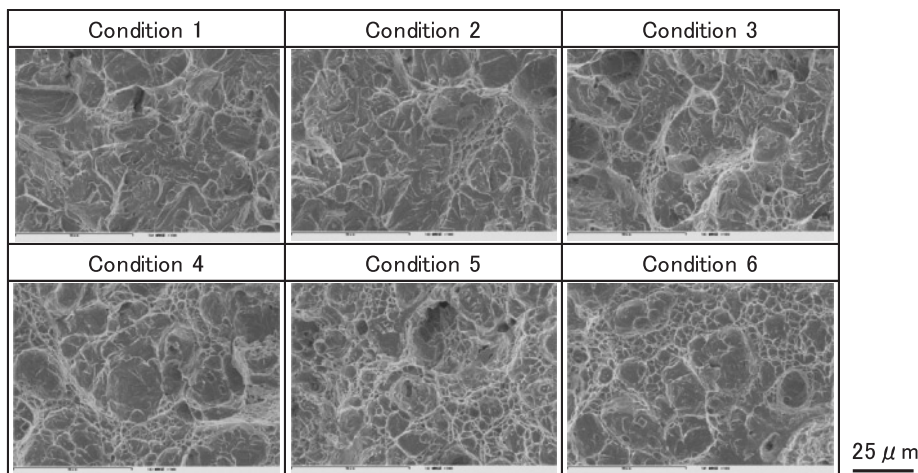


Fig. 15 SEM images of fractured surface after bending test (Crack propagation area)

4. 考察

Fig. 16に表面の平均旧 γ 粒径とシャルピー衝撃エネルギーの関係を示す。旧 γ 粒径が小さくなるほどき裂発生エネルギー、き裂伝ばエネルギーともに大きくなっている。しかし、き裂発生エネルギーは旧 γ 粒径が小さくなると大きく向上しているのに対し、き裂伝ばエネルギーはそれほど向上していない。これは、き裂の起点部が粒界破面を呈しており、その破面単位が旧 γ 粒径となっているのに対し、き裂伝ば部の破面は旧 γ 粒径が小さくなるとややデンプル

破面が増加するものの、その破面単位は旧 γ 粒径の影響をほとんど受けていないためであると考えられる。

また、Fig. 17に平均旧 γ 粒径と静的曲げ荷重の関係を示す。旧 γ 粒径が小さくなるほどき裂発生荷重は大きくなったが、最大荷重は旧 γ 粒径の影響を受けずほぼ一定であった。これも、シャルピー衝撃エネルギーと同様、起点部が粒界破面を呈しており、その破面単位が旧 γ 粒径となっているのに対し、伝ば部の破面単位は旧 γ 粒径の影響をほとんど受けていないためであると考えられる。

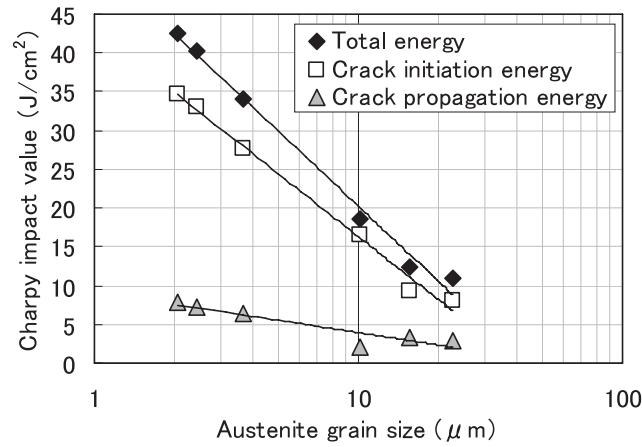


Fig.16 Relationship between Austenite grain size and Charpy impact value.

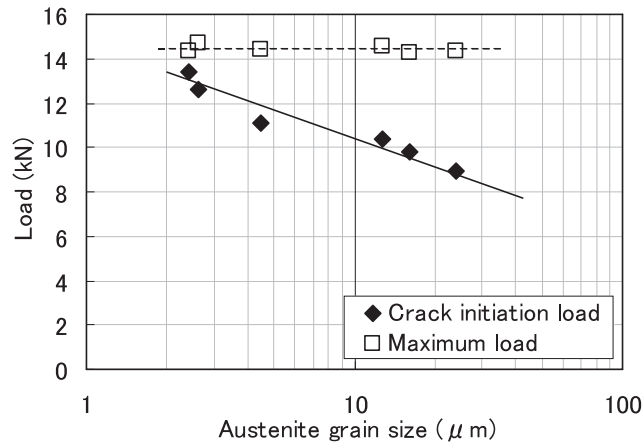


Fig.17 Relationship between grain size and bending strength.

これらの結果から、衝撃特性（き裂発生エネルギー）、静的曲げ特性（き裂発生荷重）ともに、 $2\mu\text{m}$ までは旧 γ 粒微細化により向上し続けていることから、さらに旧 γ 粒を微細化しても強度が向上する可能性が高いと考えられる。

5. 結論

Ti添加肌焼き鋼を用いて浸炭焼入・焼戻し後に再加熱焼入・焼戻しを繰り返すことにより、旧 γ 粒を超微細化し、衝撃特性と静的曲げ特性に及ぼす再加熱焼入れと旧 γ 粒径の影響を調査した結果以下の知見を得た。

- (1)Ti添加肌焼き鋼を浸炭焼入・焼戻し後に再加熱焼入れを繰り返すことにより約 $2\mu\text{m}$ まで旧 γ 粒の微細化が可能である。
- (2)肌焼き鋼において、浸炭焼入れ・焼戻し後に再加熱焼入れをおこなった後、浸炭異常層などの表面欠陥を除去した場合、本実験の旧 γ 粒径（ $2\sim 25\mu\text{m}$ ）の範囲において、衝撃特性（き裂発生エネルギー）、静的曲げ特性（き裂発生荷重）は旧 γ 粒径が小さくなるほど向上する。
- (3)通常の浸炭焼入・焼戻し材（Condition3）に対し、約

$2\mu\text{m}$ までの旧 γ 粒微細化により、衝撃試験でのき裂発生エネルギーは約2.3倍、曲げ試験でのき裂発生荷重は約29%向上しており、本報の方法での旧 γ 粒微細化による肌焼き鋼の高強度化が可能である。

- (4)衝撃試験でのき裂発生エネルギー、静的曲げ試験でのき裂発生荷重が旧 γ 粒径が小さいほど向上したのは起点部が粒界破面を呈しており、破面単位が旧 γ 粒径になっているためであると考えられる。

参考文献

- 1)田中利秋, 松井宗久, 団野敦: 塑性と加工, 41 (2000), 669.
- 2)村井暢宏, 高山透, 荒井正浩, 鎌田芳彦, 宇野光男, 織田和幸, 正木隆, 有見幸夫, 無田上章: 鉄と鋼, 83 (1997), 215.

■著者



西川 元裕



平岡 和彦