

高クロム鋳鉄の諸性質に及ぼすC%、Cr%および熱処理の影響

Influence of C%, Cr% and Heat Treatment on Mechanical Properties of High Chromium White Cast Iron

高田恒夫* 前殿裕章** 桜井市蔵*

Tsuneo Takada, Hiroaki Maedono, Ichizou Sakurai

この論文では高クロム鋳鉄の諸性質の中で、特に耐摩耗性に注目して考察を行った。一般に初期硬さと耐摩耗性は正比例関係にあるが、今回の実験結果でも同様の傾向にあった。しかし、焼入れのままの試料は、焼戻しをした試料に比べて摩耗試験中の加工硬化が著しく大きく、非常に優れた耐摩耗性を示した。

In this paper, we mainly discussed wear resistance in mechanical properties of high chromium white cast irons. Generally, the wear resistance of a material is in proportion to its hardness. The results of this experiments indicated the same tendency as well, but we could find phenomena as follows; As-quenched test pieces had remarkable ability of work hardening compared with test pieces quenched and tempered. So, these as-quenched test pieces revealed their excellent wear resistance.

1. 緒言

高クロム鋳鉄は、一般にCrを7%以上含むFe-Cr-C三元系白鋳鉄で、熱処理特性を高め、材質特性を向上させるために、Si、Mn、Ni、Cu、Moなどの合金元素が添加される。

本鋳鉄は硬いCr₇C₃型の炭化物を多量に含むため、アブレーション摩耗の発生する土木機械部品、破碎機械部品、製鉄機械部品などに多用されている。耐摩耗性は、材料中に含まれている炭化物の量に影響されるほか、基地組織にも影響され、基地組織が硬いほど優れているとされている¹⁾。この基地組織を硬くするために熱処理を行い、組織をマルテンサイトや二次炭化物に変化させる必要がある。また、機械的性質は化学成分や組織と密接な関係があり、一般に低Cより高Cの方が硬いが、これは主として炭化物の組成および量によるものと考えられる。

そこで本研究は、Cr量、C量を変えた高クロム鋳鉄を加熱し、オーステナイト領域に保持した後焼入れして、焼戻し温度を変えることによって硬さや耐摩耗性を中心とした各種性質にどのように影響を与えるかを調べた。

2. 実験方法

2.1 溶製

塩基性高周波炉にて高クロム鋳鉄を溶製した。目標のC mass%、Cr mass%の組み合わせを表1に示す（以下mass%を%と表記する）。最高溶解温度を1873K一定とし、C量に応じて casting temperature を1643Kから1763Kまで変化させた。図1に鋳造したt80テストブロック（6号相当のクロマイトサンドを肌砂とし、バックサンドを6号珪砂としたCO₂鋳型）の形状を示す。

表1 C%、Cr%の組み合わせ

Table 1 Combinations of C% and Cr%

チャージ No	1	2	3	4	5	6	7	8
C%	2.4	2.7	3.0	3.3	2.0	2.3	2.6	2.9
Cr%	20	20	20	20	25	25	25	25

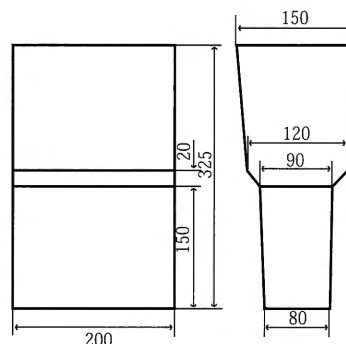


図1 t80テストブロックの形状

Fig. 1 Shape of t80 test block

2.2 熱処理

焼入れと焼戻しの熱処理条件を表2に示す。

表2 熱処理条件の組み合わせ

Table 2 Combinations of heat treatment

チャージNo	焼入保持時間 ks	焼入温度 K	焼戻保持時間 ks	焼戻温度 K
1	36	1223	18	室温、623、723、823
2	◇	◇	◇	◇
3	◇	◇	◇	◇
4	◇	◇	◇	◇
5	◇	1323	◇	◇
6	◇	◇	◇	◇
7	◇	◇	◇	◇
8	◇	◇	◇	◇

注) 1 焼入れの冷却方法は、扇風機による空冷を実施した。

2 焼戻しの冷却方法は、炉冷とした。

3 焼戻温度で室温というのは、焼入れのままで焼戻しをしなかったことを意味する。

* 研究開発センター 技術研究グループ

** 研究開発センター 技術統括グループ

2.3 特性評価

特性評価は以下の項目を実施した。

1) 耐摩耗性

石英斑岩中で周速14m/sで回転するアームに試料を取り付けた衝撃摩耗試験で20分摩耗試験を実施し、摩耗体積を測定した。基準材であるSS400の摩耗体積を試料の摩耗体積で除した値を、耐摩耗倍数として耐摩耗性を評価した。

2) 摩耗試験前の硬さ(HRC)

3) 摩耗試験後の硬さ(HRC)

4) 抗折応力

5) 抗折たわみ

6) シャルピー衝撃値(JIS Z 2202 4号試験片)

3. 実験結果

3.1 化学組成

表3に各チャージの化学分析結果を示す。

表3 各チャージの化学組成
Table 3 Chemical composition

チャージNo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	共晶度
1	2.40	0.73	0.81	0.033	0.015	20.1	1.16	1.76	-0.91
2	2.82	0.77	0.75	0.038	0.016	20.1	1.11	1.68	-0.49
3	3.04	0.62	0.76	0.044	0.015	20.1	1.12	1.71	-0.27
4	3.43	0.64	0.79	0.034	0.018	20.6	1.09	1.76	0.19
5	1.94	0.45	0.67	0.027	0.016	26.1	0.86	0.40	-1.06
6	2.27	0.44	0.57	0.028	0.015	25.0	0.84	0.37	-0.78
7	2.57	0.51	0.69	0.033	0.014	25.6	0.85	0.38	-0.45
8	2.90	0.49	0.68	0.036	0.014	25.0	0.86	0.38	-0.15

(注) Fe-Cr-C三元系における共晶C% $=440-0.054\times\text{Cr}\%$ で示されている。
共晶度=C%-共晶C%を定義すれば、共晶度がマイナスであれば亜共晶組成を意味し、共晶度=0でちょうど共晶を意味する。さらに、共晶度がプラスであれば過共晶組成を意味する。
今回の全チャージにおいて、No4チャージのみがやや過共晶を意味し、他はすべて亜共晶組成である。

3.2 各材質特性へのC%、Cr%および熱処理の影響

1) 耐摩耗性および硬さ (図2<20%Cr>、図3<25%Cr>)

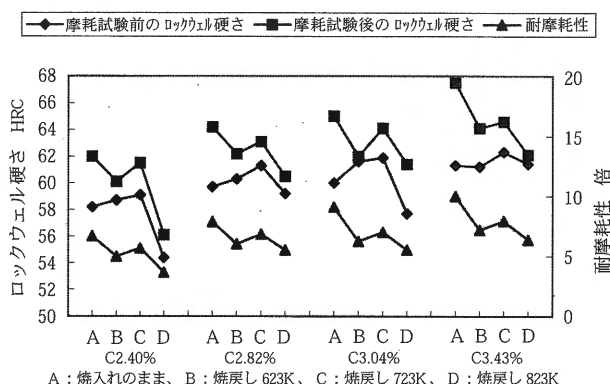


図2 20%Cr: 耐摩耗性と硬さへのC%と焼戻し温度の影響
Fig. 2 20%Cr: Influence of C% and tempering temperature on wear-resistance and hardness

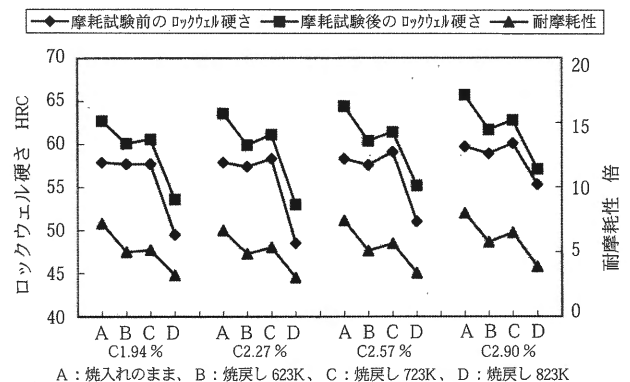


図3 25%Cr: 耐摩耗性と硬さへのC%と焼戻し温度の影響
Fig. 3 25%Cr: Influence of C% and tempering temperature on wear-resistance and hardness

- (1) 20%Crの硬さは、25%Crより高い傾向にある。
 - (2) 同じ熱処理条件であれば、C%と硬さはほぼ正比例している。硬さと耐摩耗性もほぼ正比例している。
 - (3) 摩耗試験前の硬さは723K焼戻しが最も高いが、摩耗試験後の硬さは焼入れのままだが最も高い。
 - (4) 耐摩耗性は摩耗試験後の硬さによく正比例している。
- 2) 強度と靱性 (図4<20%Cr>、図5<25%Cr>)

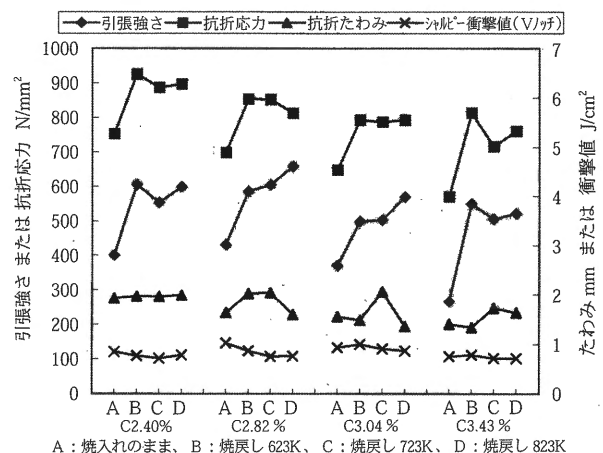


図4 20%Cr: 強度と靱性へのC%と焼戻し温度の影響
Fig. 4 20%Cr: Influence of C% and tempering temperature on strength and toughness

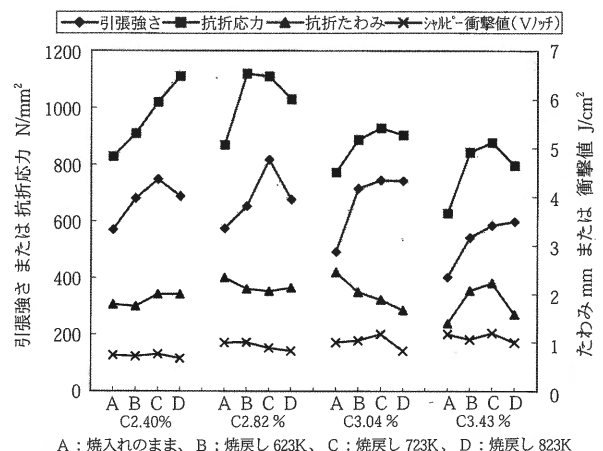


図5 25%Cr: 強度と靱性へのC%と焼戻し温度の影響
Fig. 5 25%Cr: Influence of C% and tempering temperature on strength and toughness

- (1) 25%Crの強度は、20%Crより高い傾向にある。
- (2) 焼戻したものの強度は、焼入れのままより高い傾向にある。
- (3) 同じ熱処理条件であれば、C%と強度はほぼ逆比例している。

3.3 顕微鏡組織

顕微鏡組織の代表として、図6（亜共晶組織）、図7（やや過共晶組織）を示す。

どちらも M_7C_3 の炭化物（共晶、初晶）と基地組織（ベイナイト、マルテンサイト、残留オーステナイトと $M_{23}C_6$ 焼入れ時に基地組織内に析出炭化物の混合組織）から構成されている。

特徴としては、図7の組織に示すように、初晶の塊状炭化物が観察される。また、基地組織を顕微鏡レベルで観察した結果からは区別できないが、焼戻し温度により残留オーステナイトの性状（加工硬化能）が変化している。このことは考察で詳細に検討する。

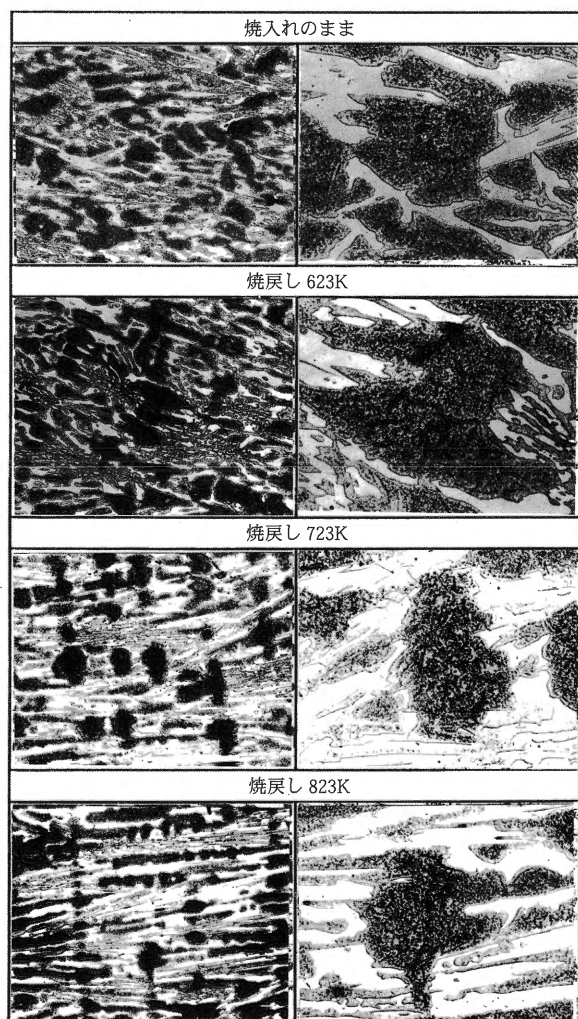


図6 20%Cr-3.04%C（亜共晶）における光学顕微鏡組織
Fig. 6 Optical micrographs of 20%Cr-3.04%C(hypoeutectic)

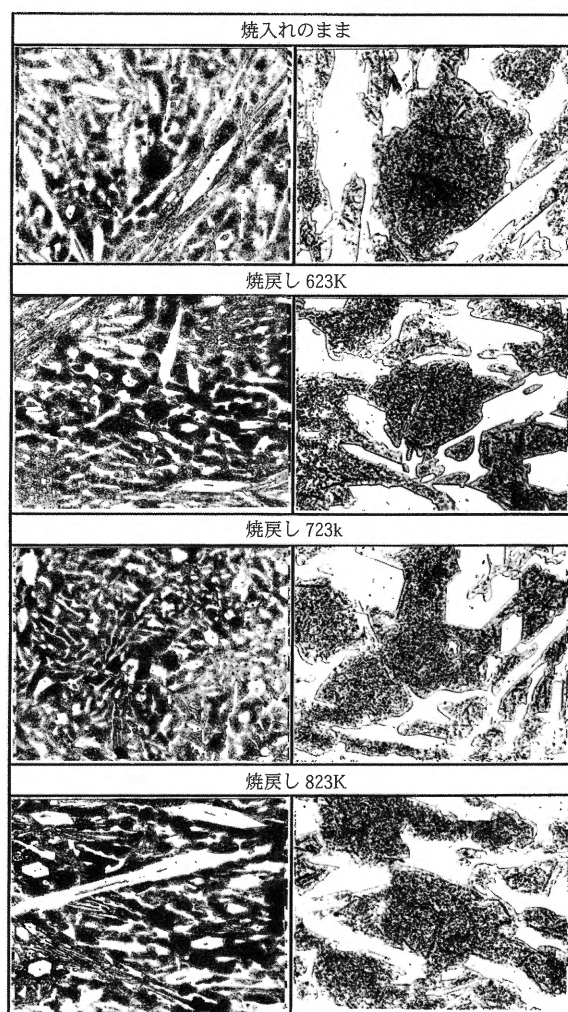


図7 20%Cr-3.43%C（過共晶）における光学顕微鏡組織
Fig. 7 Optical micrographs of 20%Cr-3.43%C(hypereutectic)

4. 考察

4.1 耐摩耗性と硬さの相関

一般に硬さと耐摩耗性は正の相関関係がある。この硬さを摩耗試験前と後の硬さに分けて検討した。

摩耗試験前の硬さと耐摩耗性の相関状況を図8に示した。焼入れのままの試料と「焼入れ+焼戻し」した試料は同じ回帰線の上に載ってこない。言い換えれば、焼入れのままの試料は、「焼入れ+焼戻し」した試料に比べて硬度レベルが同じでも耐摩耗性が優れている。

この原因を調べるために、摩耗試験後の硬さと耐摩耗性の相関関係を図9に示した。このように摩耗試験後の硬さで整理すると、焼入れのままの試料も「焼入れ+焼戻し」した試料も同じ回帰線の上に載っている。つまり硬さと耐摩耗性の相関において、摩耗試験後の硬さの方が摩耗試験前の硬さより、耐摩耗性に対してより本質的な相関のある特性値といえる。

図8（回帰線が2本）と図9（回帰線が1本）の違いの原因は、図2、図3よりわかるように、焼入れのままの試料の摩耗試験による加工硬化量が、「焼入れ+焼戻し」

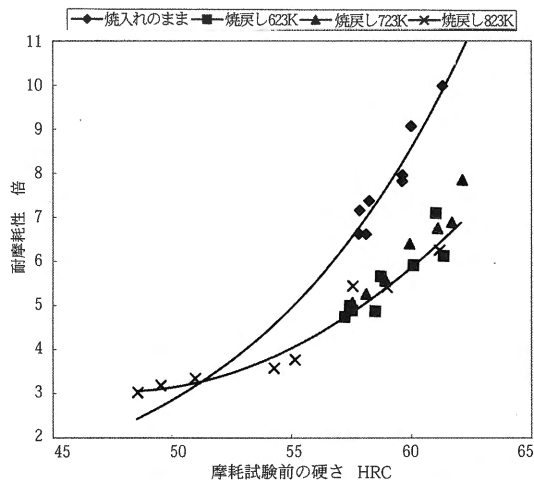


図8 摩耗試験前の硬さと耐摩耗性の相関関係
Fig. 8 Correlation between hardness of pre-wearing and wear resistance

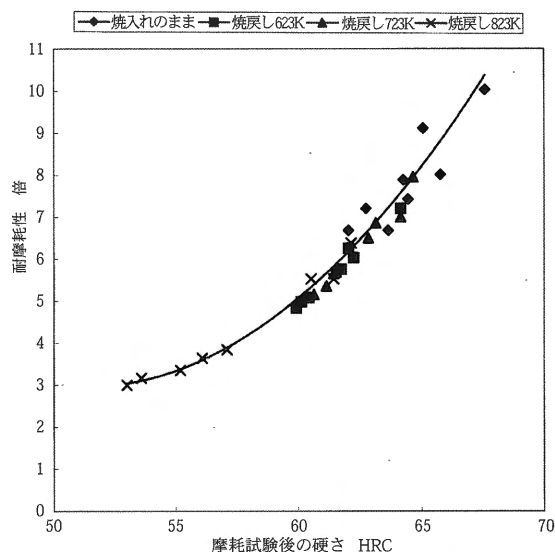


図9 摩耗試験後の硬さと耐摩耗性の相関関係
Fig. 9 Correlation between hardness of post-wearing and wear resistance

した試料より大きいことによると考えられる。

この加工硬化量の違いをより明らかにするために、図10に焼戻し温度と加工硬化量（摩耗試験前後の硬度差）の関係を示した。やはり、焼入れのままの試料の加工硬化量が「焼入れ+焼戻し」した試料よりも著しく大きいことが確認できた。ところで、823K焼戻しの試料にも加工硬化量の大きい試料があるが、摩耗試験前の硬さが低いので、加工硬化量が大きいかかわらず、耐摩耗性は優れていない。

4.2 加工硬化量の違いに関する検討

加工硬化するのは一次の炭化物ではなく基体組織である。基体組織は、残留オーステナイト+マルテンサイト+ベイナイト+微細二次炭化物 ($M_{23}C_6$) から構成されて

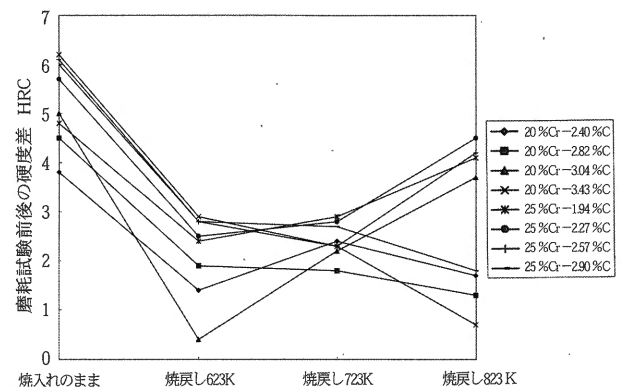


図10 焼戻し温度と加工硬化量の関係
Fig. 10 Relation between tempering temperature and amount of work hardening

いる。これら組織の中で加工硬化が大きい組織は、残留オーステナイトである。図11に焼戻し温度と残留オーステナイト量の関係を示した。残留オーステナイト量の違いが加工硬化量を決定しているのではないかと考えたが、図11より焼入れのままや823K焼戻しが必ずしも残留オーステナイト量が多いわけではないことがわかった。

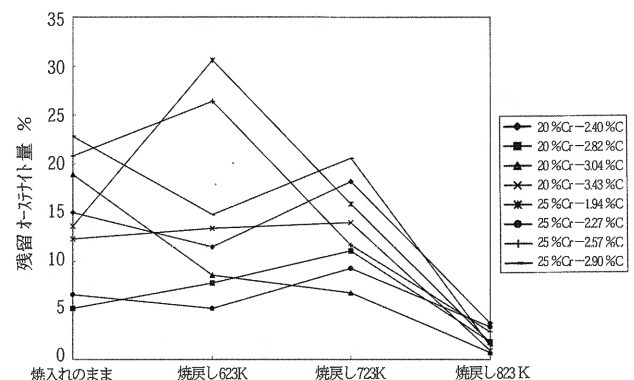


図11 焼戻し温度と残留オーステナイト量の関係
Fig. 11 Relation between tempering temperature and amount of retained austenite

次に考えられる加工硬化量の違いの原因は、残留オーステナイトの質の違いによると考えられる。すなわち、残留オーステナイトの組成により加工硬化能（加工誘起マルテンサイトへの変態量）が違ふと考えられる。

この内容については、今後詳細に研究すべき課題である。

4.3 引張強さと抗折応力の相関関係

図12に引張強さと抗折応力の相関関係を示した。当然のことであるが、きれいな正の相関関係がある。

5. 結言

高クロム鑄鉄の諸特性の中で、耐摩耗性を中心にして材質特性を評価、考察した。耐摩耗性に対するC%、Cr%および焼戻し温度の影響を以下に総括する。

1) 一般に言われているように、硬さと耐摩耗性は正比例の関係にある。しかし、摩耗試験前の硬さと耐摩耗性

論文・報告

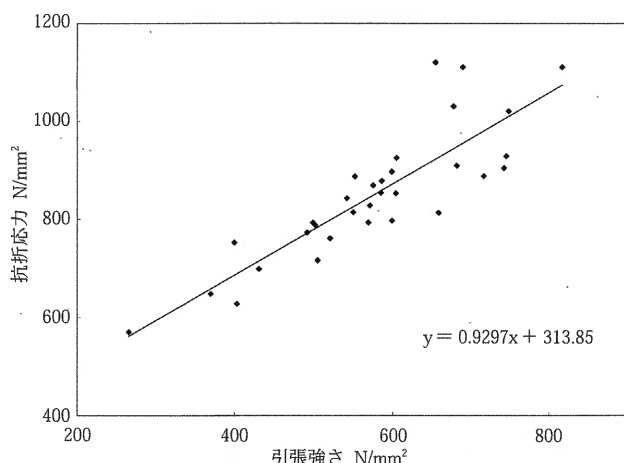


図12 引張強さと抗折応力の相関関係
Fig. 12 Correlation between tensile strength and bending strength

との相関を調べると、焼入れのままのグループと「焼入れ+焼戻し」のグループの2つの回帰線に分かれる。摩耗試験後の硬さと耐摩耗性の相関を調べると相関が強く、1本の回帰線にすべてのデータが乗ってくる。耐摩耗性との相関関係という観点からは、摩耗試験後の硬さがより本質的な特性値といえる。

2) 焼入れのまま試料において、摩耗試験前の硬さは723K焼戻し試料より低いが、加工硬化量が大きく、摩耗試験後の硬度は最も高い。その結果、最も優れた耐摩耗性を示す。上記傾向は今回実験したすべてのC%、Cr%の組合せにおいて同じである。

3) 上記2項目の内容から明らかなように、摩耗試験前の硬さが高いだけで、耐摩耗性が良いとはいえない。

4) 20%Crの摩耗試験前の硬さは、25%Crより高い傾向にある。

5) 25%Crの強度は、20%Crより高い傾向にある。

6) 「焼入れ+焼戻し」した試料の強度は焼入れのままの試料より高い傾向がある。

7) 同じ熱処理条件では、C%と強度は逆比例している。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導およびご支援をいただいた、近畿大学理工学部金属工学科鉄鋼材料研究室炭本治喜教授ならびに当時4回生の山口智博氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 丹羽良平：鑄物、50、2（1978）、p.79
- 2) 草川隆次、堤信久、松田公扶、宮下格之助、田村啓治：特殊鑄鉄鑄物、4（1971）、p.190、日刊工業

執筆者

高田恒夫

Tsuneo Takada

昭和56年入社

鑄物製造を経て、鑄造材料の研究開発に従事



前殿裕章

Hiroaki Maedono

昭和42年入社

鑄造材料の研究開発に従事



桜井市蔵

Ichizou Sakurai

昭和41年入社

鉄管生産技術、新素材研究開発を経て現在アルミ複合材の研究開発に従事



栗本トピックス

大型コンクリート・鋼合成管の受注

近時の推進工法には、長距離化と超急曲線に対応する施工が強く求められている。この時流にあって、長距離化では岐阜県笠松町において呼び径1100mmで推進延長1,009mの世界記録を達成して脚光を浴びたが、超急曲線施工の分野でもこの快挙に匹敵する成果をあげている。大阪府大東市の下水道工事において、呼び径1800mmで曲率半径R=15mを克服して多大なる評価を得たこともあって、この度、機動建設工業株式会社殿より神奈川県川崎市下水道局向け、大型コンクリート・鋼合成管（呼び径2600mm×管長400mm）86本を受注した。この管は曲率半径R=25mの超急曲線施工に挑戦するもので、その出番を待ちわびている。