

炭素鋼の熱処理に関する二三の研究

時 弘 義 雄*・福 井 昂*

Some Studies on the Heat Treatment of Carbon Steel

Yoshio TOKIHIRO and Takashi FUKUI

Abstract

The carbon steel is used for all industrial materials, but theory on the heat treatment of carbon steel contains various difficult factor.

In this paper, therefore, study on the wear loss of some quenched carbon steels and some spheroidized carbon steels.

Results obtained are as follows

1. It is plain enough that between wear loss and residual stress exist stress-abrasion limit.
2. Wear loss of spheroidized carbon steel is less than normal structure carbon steel.
3. Spheroidized pearlite remarkably appear at 680°C from 3 to 5 hour.

1. 緒 言

あらゆる機械、器具の基礎であり、近代文明の根幹をなす機械工業をはじめ、あらゆる工業には、すこぶる多種多様な金属材料が用いられているが、金属材料が、その本来有する性質の中には、熱や電気の伝導のごとくあまり改良できぬ性質のものもあるが、いろいろな手段でかなりかえられるものがある。その理由は、すでに多くの人々¹⁾によって明らかにされているように鉄鋼には変態点があり、これに基く状態変化を巧に利用し得るからである。

以上のような観点より、本実験では、第1に炭素鋼に焼入れを施し、その硬度試験と摩耗試験を行ない、

冷却液の種類および温度と硬度の関係、硬度と摩耗量の関係を検討した。第2に炭素含有量の異なる鋼に粒状化処理を施し、その硬度測定による粒状化発生最適温度の究明、さらに冷却法の相違が粒状化炭素鋼の硬度および摩耗量におよぼす影響について実験的に検討し、素材を経済的に選択する基礎資料を得るための研究を行なったので、これを報告する。

2. 試験片および実験方法

2.1 試験片

使用した材質は、熱間圧延された線材で、これを金切のこで所定の長さ切断した。その成分分析結果および大きさを示したのが、Table 1である。

Table 1. Chemical composition & size of test pieces.

Steel No.	Chemical composition (%)						Size	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	length	diam.
No. 1	0.18	0.20	0.45	0.016	—	0.10	25	9.5
No. 2	0.34	0.30	0.60	0.024	—	—	25	9.5
No. 3	0.41	0.23	0.50	0.010	—	—	25	9.5
No. 4	0.64	0.22	0.52	0.023	0.023	—	25	9.5
No. 5	0.77	0.23	0.47	0.015	0.024	—	25	16.0

実験に先立って試験片はその組織を標準化するため焼準を行なった。焼準温度²⁾・加熱時間³⁾および硬度を示したのが、Table 2である。

しかる後、すべての試験片について、グラインダーを用いて表面を荒仕上げして水平な面とした。組織検査は組織検査用試験片を5%ピクリン酸アルコール溶

* 工業短期大学部機械工学教室

Table 2. Normalizing temperature heating time & hardness (Hs).

Steel No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Normalizing temp. (°C)	890	850	840	830	800
Time (min)	30	30	30	30	45
Hardness (Hs)	21.5	24.9	23.2	25.9	28.0

液で腐食し、腐食面の酸化を防いで400倍または600倍に拡大して行なった。なお硬度測定には、ショア硬度計D型を用いた。測定にあたっては、誤差を少なくするため、端面をエメリー紙 600# で最終仕上げし、各試験片について20ヶ所を測定し、その平均値をもって硬度とした。

2.2 焼入れ実験

試験片の加熱には、電気マuffle炉（最高温度1000°C）を使用した。焼入れ温度⁴⁾・加熱時間⁴⁾については Table 3 のように定めた。

Table 3. Quenching temperature & heating time of test pieces.

Steel No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Quenching temp. (°C)	890	850	840	810	790
Time (min)	15	15	20	15	30

試験片は電気マuffle炉に1本ずつ入れ加熱した。また試験片は、火ばしを赤熱状態にしたもので取り出し、30分間各種焼入れ液に投入の後、とり出して空中放冷した。焼入れ液の温度は、水、油とも10°Cより10°C間隔で100°Cまでとした。焼入れ液量は、液温の恒温保持の必要性⁵⁾より4lを用いた。

2.3 粒状化実験

この実験に供した試験片は Table 1 の No. 1, No. 2, No. 3 および No. 4 である。炭素鋼を粒状化する方法としては、いくつかの方法が行なわれている⁶⁾。本実験では、そのうち Ac_1 点の上下で長時間加熱する方法を採用した。すなわち試験片を 740°C, 720°C, 700°C, 680°C および 660°C に加熱し、加熱時間として、1hr, 2hr, 3hr, 4hr および 5hr の5段階とした。冷却法としては、水中 (10°C) 冷却、石灰中 (20°C) 放冷および空中放冷とした。なお水および石灰の量は、その恒温保持の必要性より水は4l、石灰は3kgを使用した。

2.4 摩耗実験

この実験に供した試験片は Table 1 の No. 1 の油中

焼入れ材および No. 2, No. 5 の粒状化処理材を除いたすべてのものである。摩耗試験中のスケール・その他の被膜の脱離による誤差をなくするために、処理により生じたスケール・その他の被膜は研磨してのぞいた。

本実験に用いた摩耗試験機は金属試験片研摩機を改造したもので、その回転円盤には 280# のエメリー紙をとりつけた。その主構造を示したのが Fig. 1 である。また、試験機主軸回転数は 700rpm とした。Fig. 1 にしめすように試験片はある位置に固定される支持円筒の中に入れ、わずかに試験片の下部が支持円筒の外に出るように保持した。試験片にかかる荷重はスプリングの上にある重錘の重量を加減して行ない、試験片面に所要の荷重がかかるようにした。この荷重負荷装置の精度に関しては、試験片に加わる応力を抵抗線歪増幅器を用いて調べたが、試験中荷重の変動はほとんどなかった。本実験では、試験片にかかる荷重を 80g および 225g とした。支持円筒は、試験機主軸から 45mm および 65mm の2カ所に固定し、試験片と回転円盤との相対回転速度が 3.39m/s および 4.92m/s の2段階に変速できるようにした。

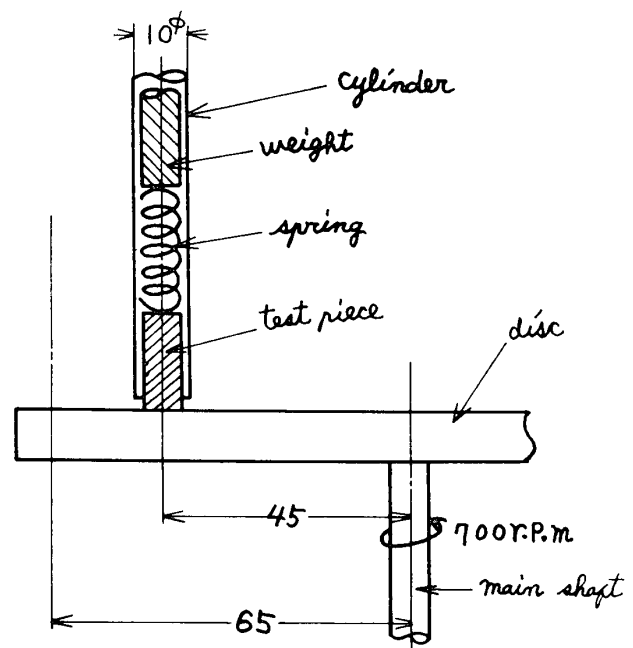


Fig. 1. Schematic diagram of abrasion tester.

摩耗実験の方法は、摩耗長3000m当りの摩耗量を感度1mgの精密分析天秤で秤量した。摩耗量は試験片ごとの全摩耗量を取り、mgで示した。

3. 実験結果

3.1 焼入れ実験

試験片を水中に焼入れしたときの硬度を示したのが

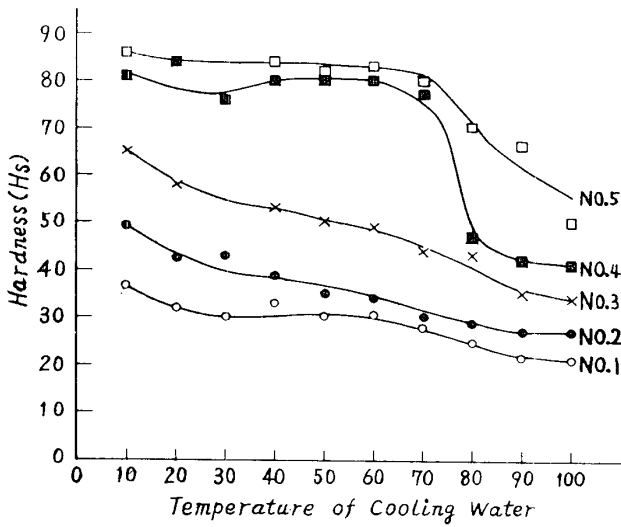


Fig. 2. Relation between hardness and temperature of cooling water.

Fig. 2 である。

この結果から、焼入れ硬度曲線では、冷却水温 30°C 付近に 1 つの谷が現われている。また冷却水温が 70°C から 80°C 以上になれば硬度は激減している。この傾向は炭素含有量が多くなるほど顕著に現われている。

試験片を種油中に焼入れたときの硬度を示したのが Fig. 3 である。

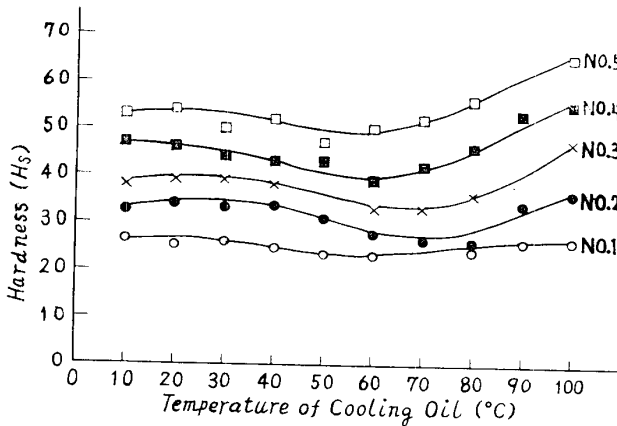


Fig. 3. Relation between hardness and temperature of cooling oil.

この結果から、焼入れ硬度曲線では、冷却油温 60°C 付近に 1 つの谷が現われ、それより油温が低くなくても、また高くなっても硬度は増加した。この傾向は炭素含有量の多くなるほど顕著に現われている。

3.2 粒状化実験

Table 1 の試験片 No. 1 および No. 2 について粒状化処理後の硬度を示したのが Fig. 4, 5 および 6 である。つぎに、粒状化処理後の試験片の顕微鏡組織を示

したのが Table 4 および Photo. 1 である。

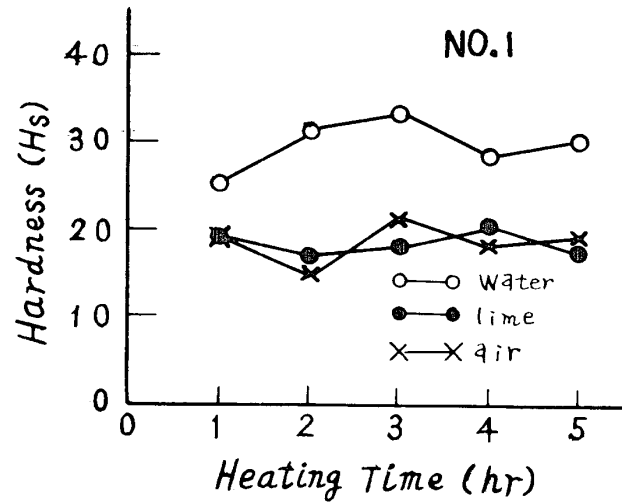


Fig. 4. Relation between hardness and spheroidization heating time at 700°C.

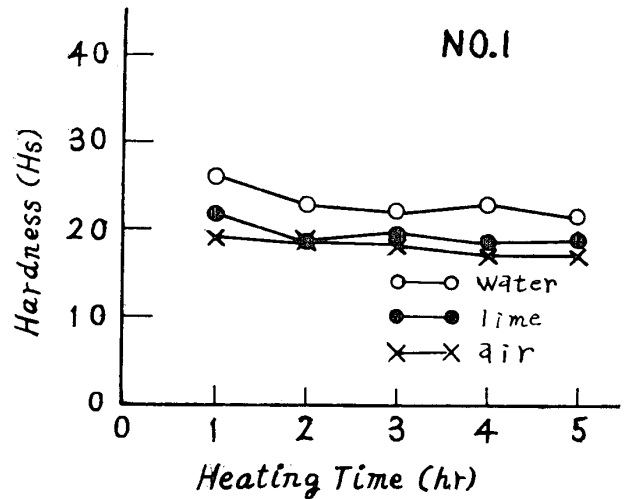


Fig. 5. Relation between hardness and spheroidization heating time at 680°C.

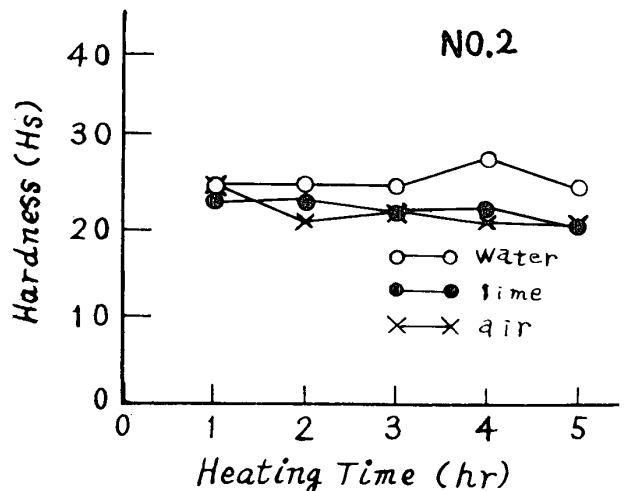


Fig. 6. Relation between hardness and spheroidization heating time at 680°C.

Table 4. Microscopic structures of spheroidized test pieces No. 1 & No. 2.

Heating temp. (°C)	Cooling method	Time (hr)					Steel No.	
		1h	2h	3h	4h	5h		
700	water	P+ (GP)	P	P+ (GP)	P+GP	P+GP	No. 1	
	lime	P+ (GP)	P	P	P+ (GP)	P+GP		
	air	P	P	P+ (GP)	P+ (GP)	P+GP		
680	water	P+ (GP)	P+ (GP)	P+GP	P+GP	P+ (GP)		
	lime	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP		
	air	P+GP	GP+ (P)	P+ (GP)	GP	GP		
680	water	P+ (GP)	P+ (GP)	P+GP	P+GP	P+ (GP)		No. 2
	lime	P+GP	P+GP	P+ (GP)	P+ (GP)	GP		
	air	P+GP	P+ (GP)	P+ (GP)	GP	GP		

P : pearlite GP : spheroidal pearlite
 () : the above statement show the lie-scattered of structure.

この結果から処理温度 680°C または 700°C とともに試験片は粒状パーライト組織になった。また硬度は焼準硬度に比べてやや低くなっている。

Table 1 の試験片 No. 3 について粒状化処理後の硬度を示したのが Fig. 7, 8, 9, 10 および 11 である。つぎに、粒状化処理後の試験片の顕微鏡組織を示したのが Table 5 および Photo. 2 である。

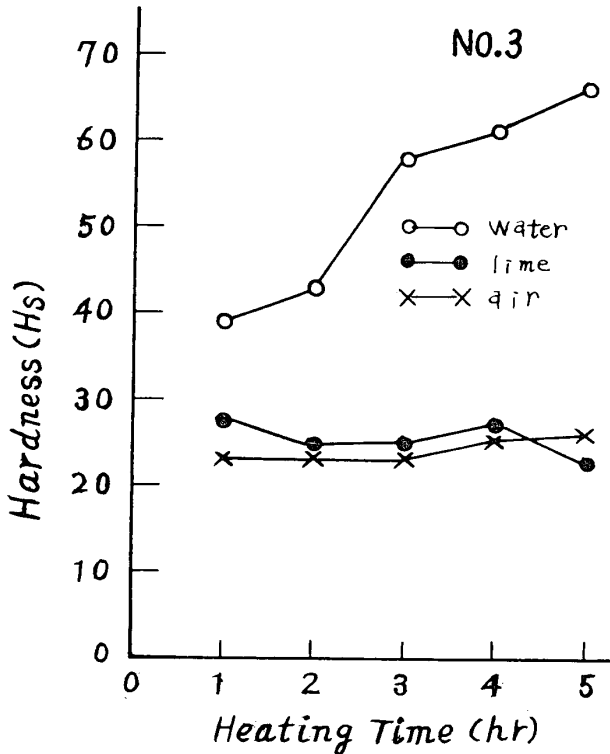


Fig. 7. Relation between hardness and spheroidization heating time at 740°C.

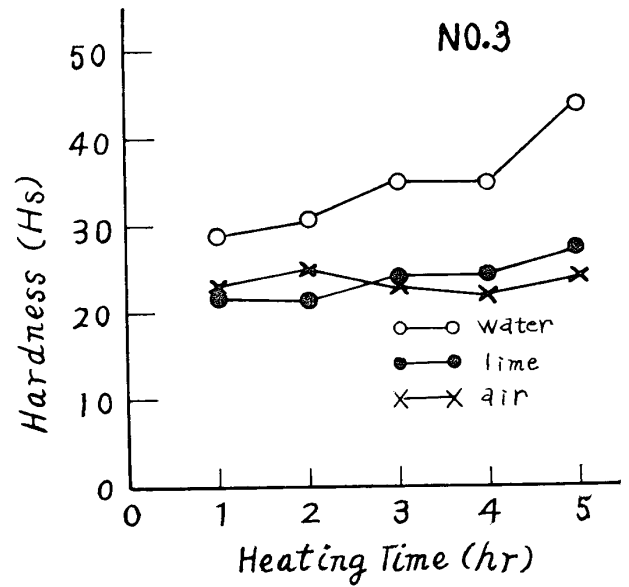


Fig. 8. Relation between hardness and spheroidization heating time at 720°C.

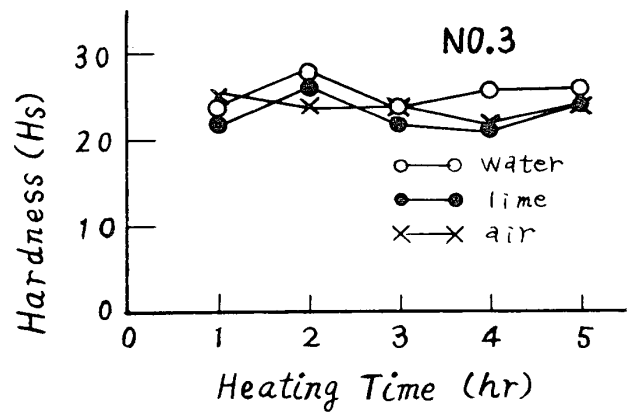


Fig. 9. Relation between hardness and spheroidization heating time at 700°C.

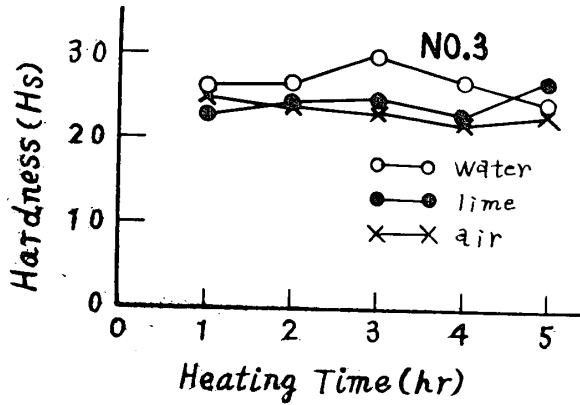


Fig. 10. Relation between hardness and spheroidization heating time at 680°C.

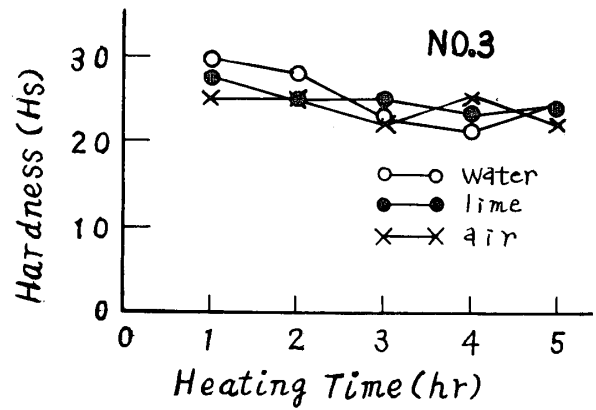


Fig. 11. Relation between hardness and spheroidization heating time at 660°C.

Table 5. Microscopic structures of spheroidized test pieces No. 3.

Heating temp. (°C)	Cooling method	Time (hr)				
		1h	2h	3h	4h	5h
740	water	P+(Q)	P+(Q)	P+(Q)	Q	Q
	lime	P	P+S	S+(P)	S	S
	air	P+(S)	P+S	P+S	S+(P)	S
720	water	P	P+(Q)	Q	Q	Q
	lime	P	P+(S)	P+(S)	P+S	S
	air	P	P+(S)	P+(S)	S	S
700	water	GP+(P)	GP+(P)	GP+(P)	GP	GP+P
	lime	GP+(P)	GP+(P)	GP	GP	GP+(P)
	air	GP+(P)	GP	GP	GP+P	GP+(P)
680	water	GP+(P)	GP	GP	GP	GP
	lime	GP+(P)	GP	GP	GP	GP
	air	GP+(P)	GP	GP	GP	GP
660	water	GP+(P)	GP+(P)	GP	GP+(P)	GP+(P)
	lime	GP+(P)	GP+(P)	P+(GP)	GP+P	GP+P
	air	GP+(P)	GP+(P)	P+GP	GP	GP+(P)

P : pearlite Q : quenching structure S : sorbite GP : spheroidal pearlite
 () : the above statement show the lie-scattered of structure.

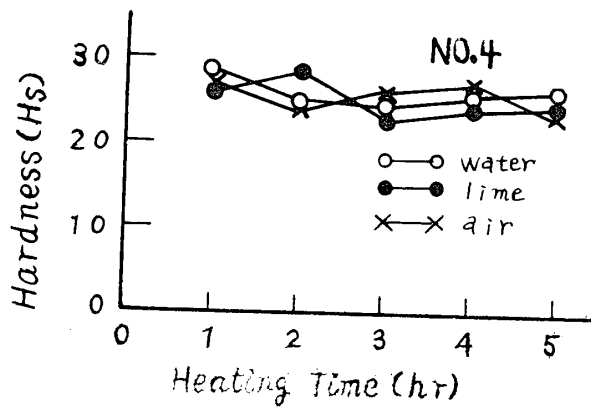


Fig. 12. Relation between hardness and spheroidization heating time at 680°C.

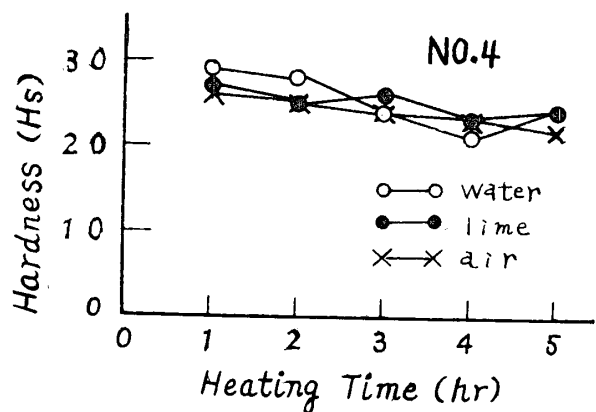


Fig. 13. Relation between hardness and spheroidization heating time at 660°C.

この結果から、試験片の組織が粒状パーライトになる加熱温度は 660°C から 700°C の範囲で、とくに 680°C で保持時間が 2 時間以上のときは、冷却法に関係なく最も粒状化し易いことがわかる。また、組織が粒状パーライト化したときの硬度は焼準硬度に比べて

やや低くなっている。

Table 1 の試験片 No. 4 について粒状化処理後の硬度を示したのが Fig. 12 および 13 である。つぎに、粒状化処理後の試験片の顕微鏡組織を示したのが Table 6 である。

Table 6. Microscopic structures of spheroidized test pieces No. 4.

Heating temp. (°C)	Cooling method	Time (hr)				
		1h	2h	3h	4h	5h
680	water	P	P+(GP)	P+(GP)	GP+P	GP
	lime	P+(GP)	P+(GP)	P+GP	GP+P	P+(GP)
	air	P+(GP)	P+(GP)	P+GP	GP+(P)	(P)+GP
660	water	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP
	lime	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP	P+GP
	air	P+GP	P+(GP)	P+(GP)	P+(GP)	P+(GP)

P : pearlite GP : spheroidal pearlite
() : the above statement show the lie-scattered of structure.

この結果から、加熱温度 660°C または 680°C とともに試験片は粒状パーライト組織になった。また硬度は焼準硬度に比べてやや低くなっている。なお加熱温度 660°C のときの硬度は、680°C の硬度よりやや低くなっている。本実験では加熱温度 660°C のものが粒状化はやや進んでいると思われる。

3.3 摩 耗 実 験

Table 1 の試験片 No. 1 および No. 2 の焼入れ材について、その結果を示したのが Fig. 14, 15 および 16

である。

この結果より、No. 1 の水焼入れでは、摩耗速度に関係なく水温の上昇とともに耐摩耗性を増していると思われるが、結果にバラツキがあるのでなお詳細な検討を要する。

No. 2 の水焼入れでは、摩耗速度が大きいときは冷却水温が低い程摩耗量は多く 50°C 付近で耐摩耗性が最もよくなり、それ以上の温度になると再び摩耗量は増大している。なお摩耗速度が小さくなると冷却温度

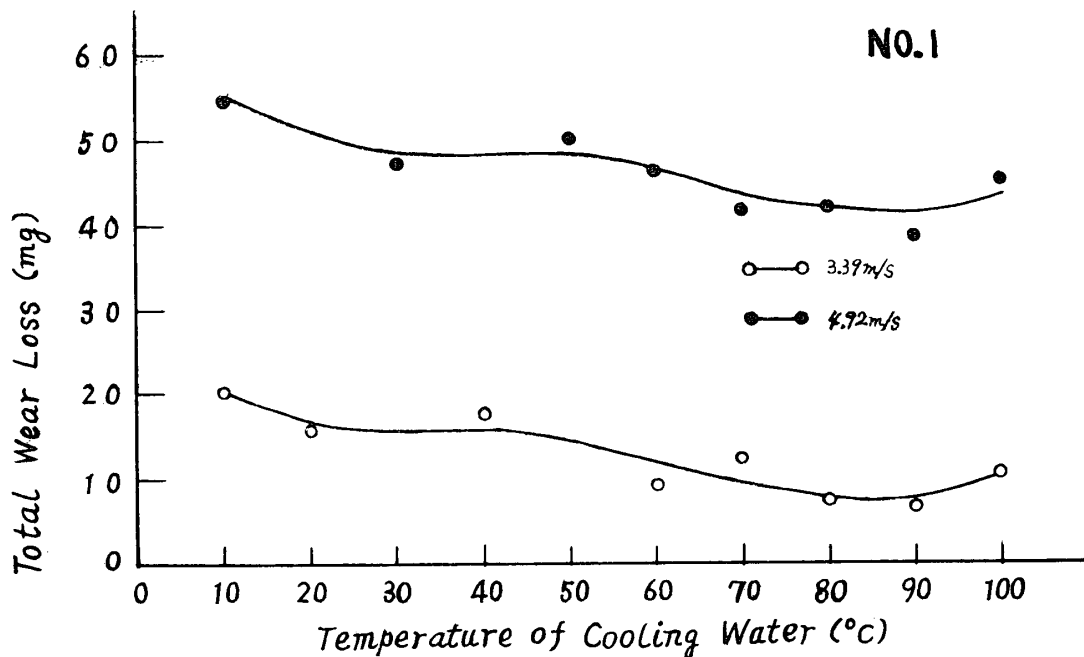


Fig. 14. Relation between total wear loss and temperature of cooling water.

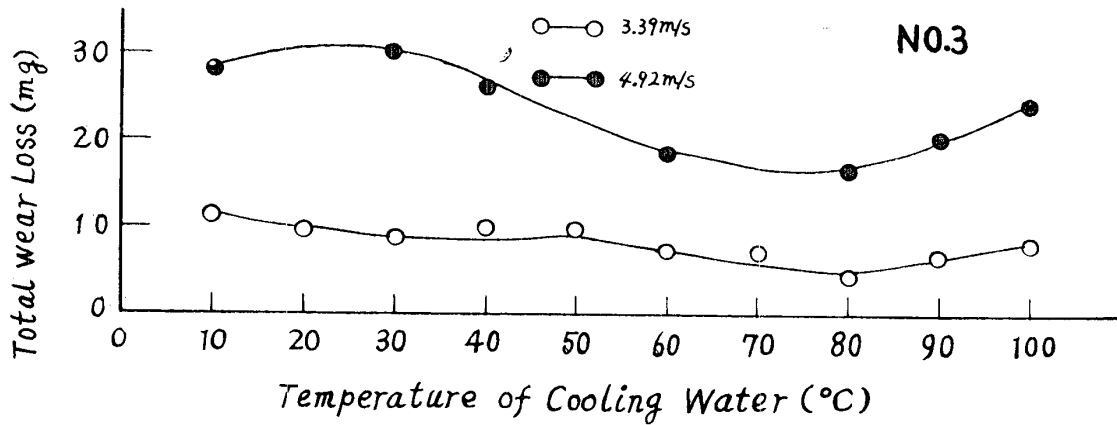


Fig. 15. Relation between total wear loss and temperature of cooling water.

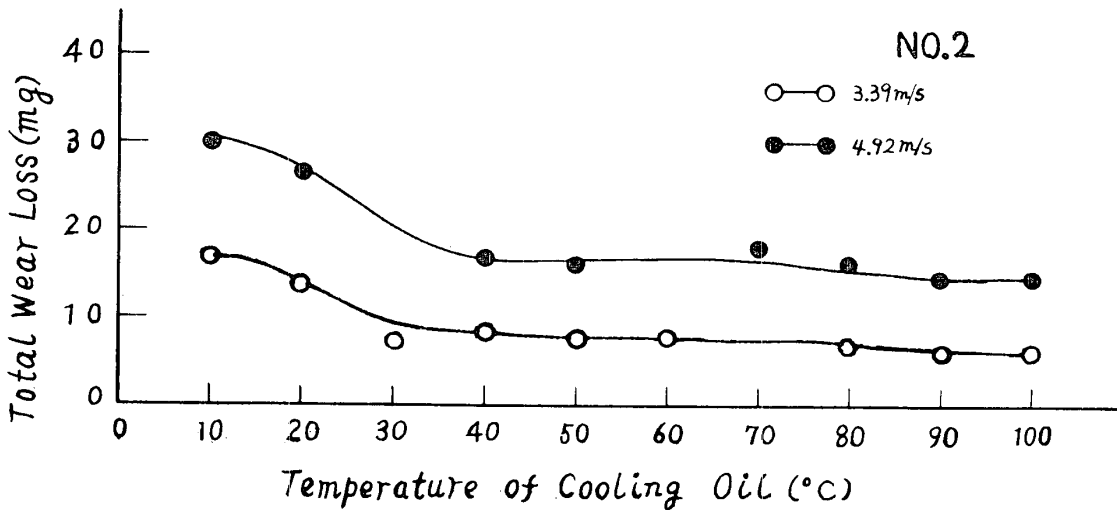


Fig. 16. Relation between total wear loss and temperature of cooling oil.

の相違は摩耗量にあまり影響をおよぼしていない。

つぎに No. 2 の油焼入れでは摩耗速度に関係なく冷却油温 30°C 以下で処理したものが、それ以上の油温で処理したものに比べて摩耗量は多く、30°C 以上では、摩耗量はほぼ一定となっている。

Table 1 の試験片 No. 3 の焼入れ材について、その結果を示したのが Fig. 17 および 18 である。

この結果から水焼入れでは、摩耗量は摩耗速度が小さい間は冷却温度にあまり影響されないが、速度が大きくなると、冷却水温が低い方が摩耗量が多くなり最低摩耗量は 80°C 付近に現われると思われるが結果に多少のバラツキがあるので、今後詳細な実験を行なって、検討を行なう予定である。

つぎに油焼入れでは、摩耗速度が大きいと冷却温度

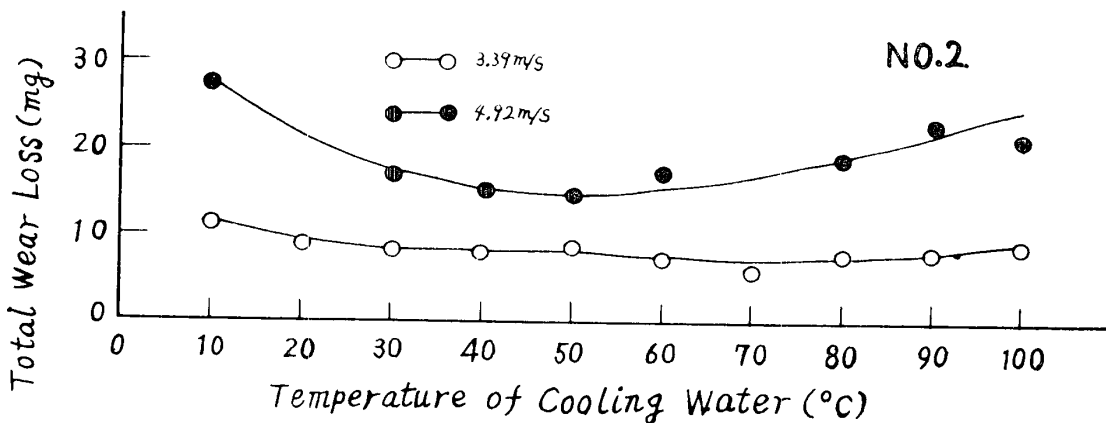


Fig. 17. Relation between total wear loss and temperature of cooling water.

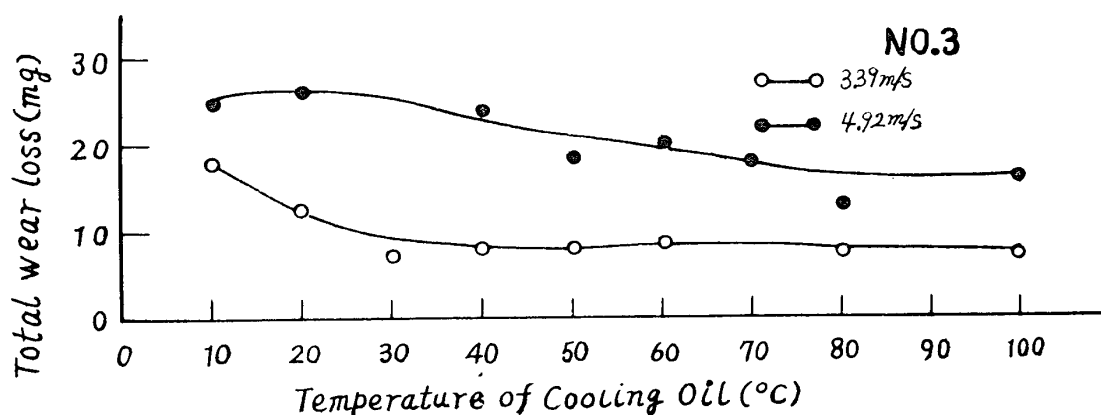


Fig. 18. Relation between total wear loss and temperature of cooling oil.

の上昇とともに徐々に摩耗量が減少しているが、速度が小さいと、冷却油温 30°C 以下で処理したものが、それ以上で処理したものに比べて摩耗量が多く、冷却油温 30°C 以上では摩耗量はほぼ一定になっている。

Table 1 の試験片 No. 4 の焼入れ材について、その結果を示したのが Fig. 19 および 20 である。

この結果から水焼れでは、摩耗速度に関係なく冷却水温 20°C において最大摩耗量を示す。また冷却水温 10°C および 80°C 付近のとき摩耗量は少ない。

つぎに油焼入れでは、摩耗速度が大きいときは温度の上昇とともに摩耗量は徐々に減少し、80°C 付近で最低となり、それよりまた上昇の傾向をとる。速度の小さいときは、30°C 付近で摩耗量最低である。

Table 1 の試験片 No. 5 の焼入れ材について、その結果を示したのが Fig. 21 および 22 である。

この結果から水焼入れでは、摩耗速度に関係なく冷却水温 40°C 付近を頂点とした 1 つの山型として現わされる。また冷却水温 70°C 以上のとき、摩耗量は少

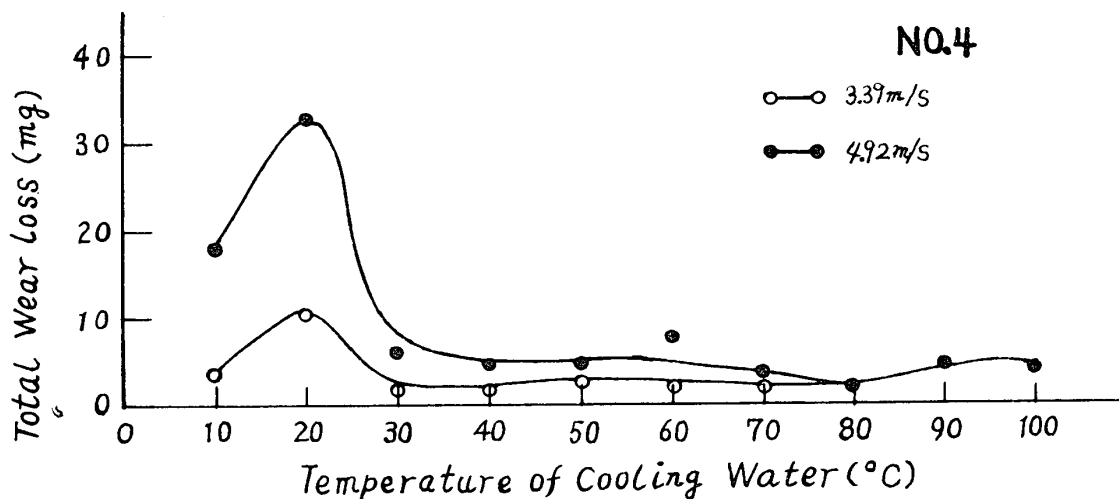


Fig. 19. Relation between total wear loss and temperature of cooling water.

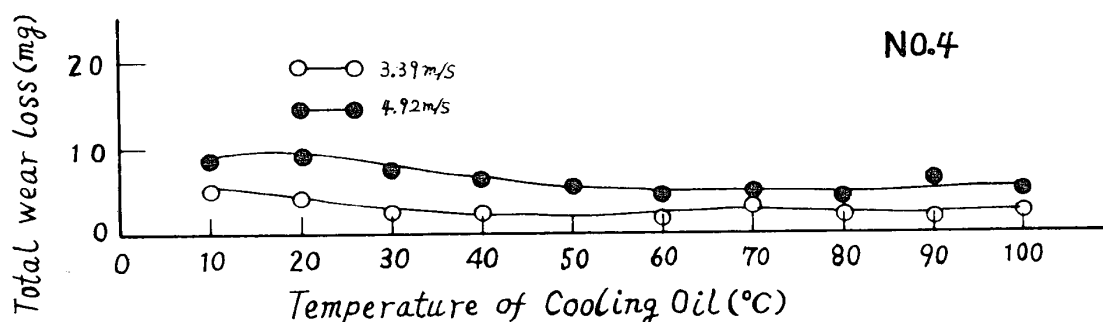


Fig. 20. Relation between total wear loss and temperature of cooling oil.

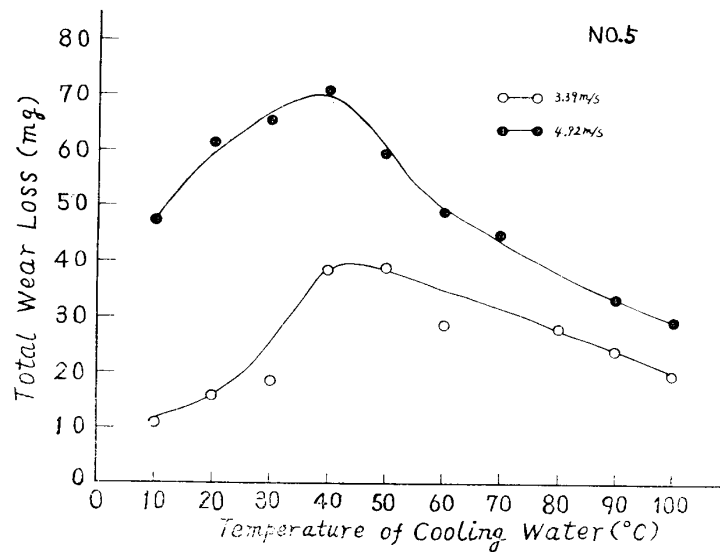


Fig. 21. Relation between total wear loss and temperature of cooling water.

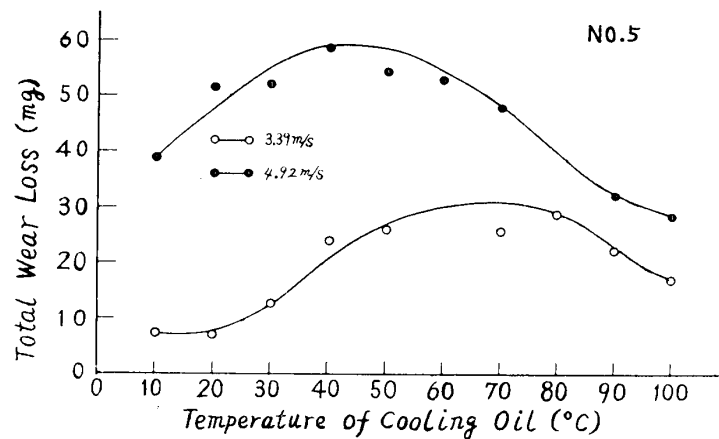


Fig. 22. Relation between total wear loss and temperature of cooling oil.

なくなっているが、結果に多少のバラツキがあるので今後詳細な実験を行なって検討する予定である。

つきに油焼入れでは、摩耗速度が大きいときは、摩耗量は 40°C 付近で最大となり、温度の上昇とともに徐々に減少している。速度の小さいときは、摩耗量は 60°C 付近で最大となり、温度上昇とともに徐々に減少している。なお摩耗速度に関係なく冷却油温 10°C および 100°C 付近で摩耗量は少なくなっている。

Table 1 の試験片 No. 3 の 680°C で粒状化処理したものについて、その結果を示したのが Fig. 23 である。

この結果から、粒状化処理したものは、焼準組織のものに比べて摩耗量は少なくなっているが、加熱時間を 4 時間以上にすると、冷却法に関係なく、摩耗量はややましている。

Table 1 の試験片 No. 4 の 680°C で粒状化処理したものについて、その結果を示したのが Fig. 24 である。

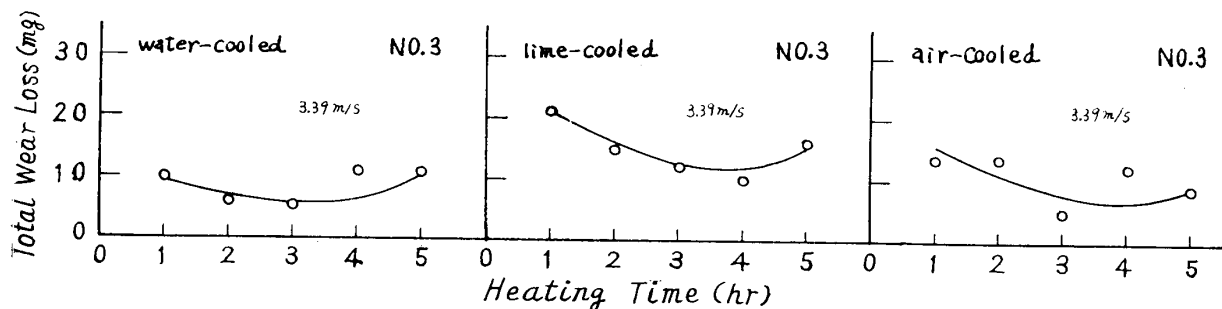


Fig. 23. Relation between total wear loss and spheroidization heating time at 680°C.

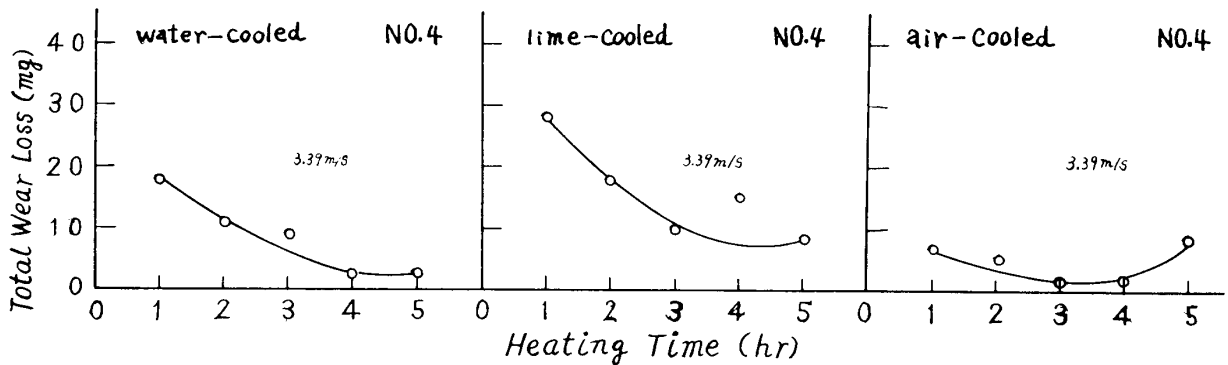


Fig. 24. Relation between total wear loss and spheroidization heating time at 680°C.

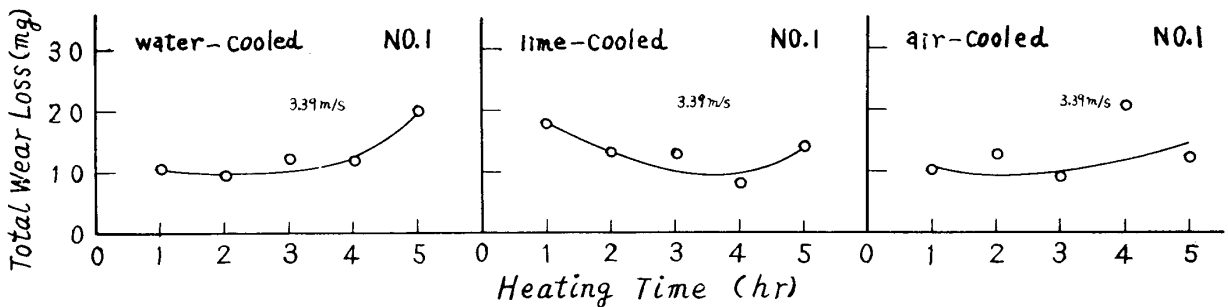


Fig. 25. Relation between total wear loss and spheroidization heating time at 680°C.

この結果から、水中冷却のときは、加熱時間が長くなるにともなって粒状化も進み摩耗量は少なくなっている。また石灰および空中放冷のときは、4時間以上経過すると摩耗量はややましている。

Table 1 の試験片 No. 1 の 680°C で粒状化したものについて、その結果を示したのが Fig. 25 である。

この結果から 前述の No. 3 の 680°C で粒状化処理したものと同様のことが云える。

4. 考 察

4.1 焼入れ実験

焼入れ理論については、すでに詳しく発表されており、本実験の結果も、その理論の合理性を証明するまでにとどまったが、Table 1 の試験片 No. 1 をのぞいては、ほとんど炭素含有量に関係なく 30°C の水中冷却において、硬度が激減しているが、これは、水自体の冷却能力の激減と試験片の表面に不伝熱性の蒸気層⁷⁾を生じることによるものである。その理由としては、冷却水をかくはんしたものについては、この硬度の激減をみなかったのである。

4.2 粒状化実験

佐藤・矢島の研究⁶⁾によれば、パーライトを粒状化させた試験片の硬度と炭素含有量の関係は、ほぼ直線的に比例している。またその硬度は焼準硬度よりも低く、ほぼ同じ値になっているが、本実験でも、ほぼこ

れと同じになった。炭化物の粒状化は亜共析鋼の場合、炭素量にほとんど関係なく、微細なパーライト組織をもっているときには、本実験より 680°C に 3 時間から 5 時間加熱し冷却することによって達成されやすいことを知った。

4.3 摩耗実験

水焼入れ摩耗曲線では、摩耗速度に関係なく 50°C または 80°C 付近に摩耗量の最低が現われている。また摩耗速度が小さいときは、冷却水温が 50°C 以上になれば、Table 1 の試験片 No. 2 および No. 3 を除けば、摩耗量は少なくなっている。とくに 80°C 以上では焼入硬度が激減しているにもかかわらず摩耗量は反対に少なくなっている。

これは、Metallurgical Staff of the Bureau of standards の研究結果⁸⁾のように、水の場合 200°C 付近の冷却能力は、水温 25°C 以上に上昇するほど増大し、約 75°C で最高に達し、18°C の水のそれを 1.00 としたとき 1.31 となっているためであり、このことより、竹内⁹⁾のいっているように、熱処理にともなう残留応力が、その材質に固有な限界以下である場合は摩耗にほとんど影響はないが、この限界よりも、より多く残留するときは急激に摩耗量の増加する傾向が現われ、両者の間には応力・摩耗限界の存在を認めているが、本実験の結果もこれによったものと思われる。

油焼入れ摩耗曲線では、摩耗速度に関係なく、油温

80°C 付近で摩耗量が少なくなっているが、これは種油の冷却能力が 60°C 以上で大きく、しかも 200°C 付近の冷却能力と 720°C から 550°C 付近の冷却能力が大差のないため、その組織が耐摩耗性にすぐれたマルテンパー化しているものと思われる。その写真を Photo. 3・4・5 および 6 に示す。

なお摩耗速度の差異により結果に多少の相違もあるように思われるが、これについては、今後詳細に実験し、検討する予定である。パーライトを粒状化させた試験片の摩耗量は焼準組織のものに比べて少ない。これは、本間のいっている¹⁰⁾ように素地が粒状パーライトのものが摩耗量が少ないということに原因しているのである。またパーライトを粒状化したときは、加熱時間が 4 時間以上になると、摩耗量は増加しているが、これは、金属の結晶格子の中に入りこむ原子の状態の変化によるものと思われるが、今後詳細な実験を行なって検討する予定である。

5. 結 言

焼入れ液の種類と温度を変えた実験およびパーライトの粒状化実験を行なった結果を要約してみると次のごとくである。

- (1) 水焼入れ硬度曲線は、80°C 以上では急に下降している。
- (2) 油焼入れ硬度曲線は、60°C 付近に最低が現われる。
- (3) 水焼入れ材の耐摩耗性は、摩耗速度に関係なく水温 50°C または 80°C 付近のとき良好である。
- (4) 油焼入れ材の耐摩耗性は、摩耗速度に関係なく

油温 80°C 付近のとき、とくに良好である。

(5) 一般に摩耗量と残留応力との間には、応力・摩耗限界が存在し、そのため水温 50°C 以上に適当にして焼入れすれば相当な耐摩耗性のものが得られる。

(6) 亜共析鋼の場合は、炭素量にほとんど関係なく、微細なパーライト組織のものは、加熱温度 680°C に 3 時間から 5 時間加熱し冷却するとき、最もパーライトは粒状化しやすい。

(7) パーライトが粒状化したものは、焼準組織のものに比べて相当な耐摩耗性がある。

最後に、本研究に終始御指導をいただいた山口大学教授杉博士に謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) たとえば 本多光太郎：鉄と鋼，17，303 (1931)；岩瀬慶三・竹内栄：日本金属学会誌，8，129～140，163～171 (1944)，9，1～8 (1945)；村上武次郎：日本金属学会誌，14，20～24 (1950)
- 2) 増田顕邦：金属熱処理技術便覧，日刊工業新聞社，497 (1961)
- 3) 増田顕邦：金属熱処理技術便覧，日刊工業新聞社，494 (1961)
- 4) 増田顕邦：金属熱処理技術便覧，日刊工業新聞社，500，535 (1961)
- 5) 岡本正三：鉄鋼材料，コロナ社，83 (1960)
- 6) たとえば 佐藤和雄・矢島悦次郎：鉄と鋼，37，22 (1951)；岩瀬慶三・本間正雄：日本金属学会誌，4，351 (1940)；Hanemann, Morawe: Stahl u. Eisen, 33, 350 (1913)；Portvin, Bernard: Stahl u. Eisen, 42, 268 (1922)；Whitely: Jour. Iron & Steel Inst., 97, 353 (1918), 105, 339 (1922)
- 7) 岡本正三：鉄鋼材料，コロナ社，84 (1960)
- 8) 小柴定雄：工具材料(上)，丸善，70 (1956)
- 9) 竹内栄一：金属材料，4，69 (1964)
- 10) 本間正雄：金属，32，63 (1962)

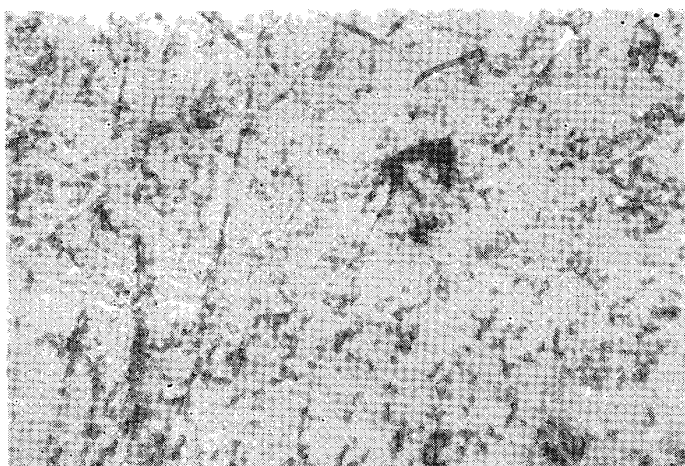


Photo. 1. Microstructure of steel No. 1 heated for 4hr at 680°C and cooled in air. ($\times 600$)

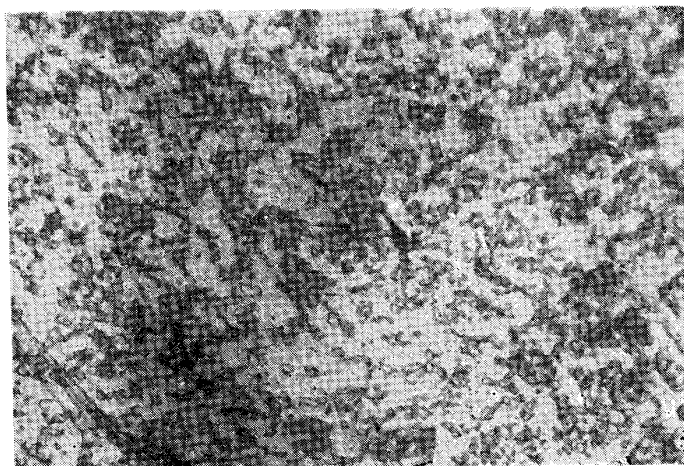


Photo 2. Microstructure of steel No. 3 heated for 3hr at 680°C and cooled in water. ($\times 600$)

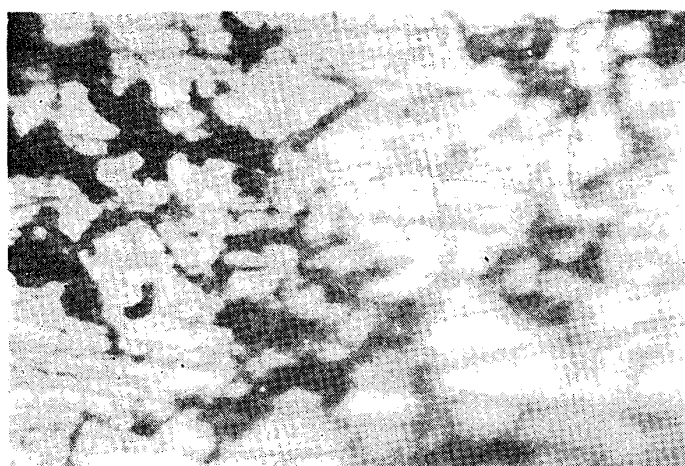


Photo. 3. Microstructure of steel No. 4 quenched in oil at 90°C. ($\times 600$)

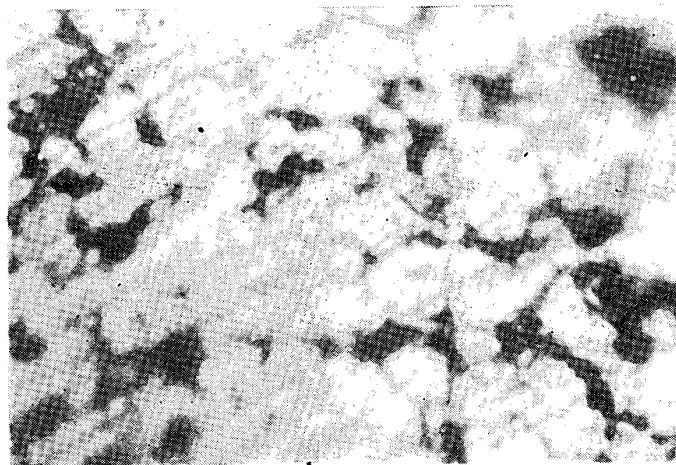


Photo. 4. Microstructure of steel No. 4 quenched in oil at 60°C. ($\times 600$)

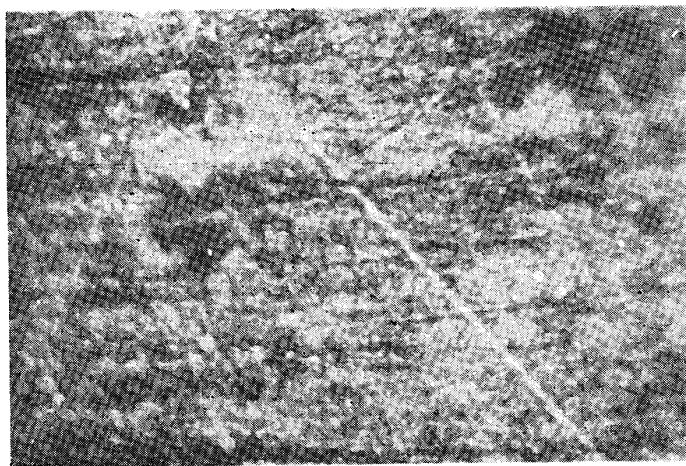


Photo. 5. Microstructure of steel No. 5 quenched in oil at 90°C. ($\times 600$)

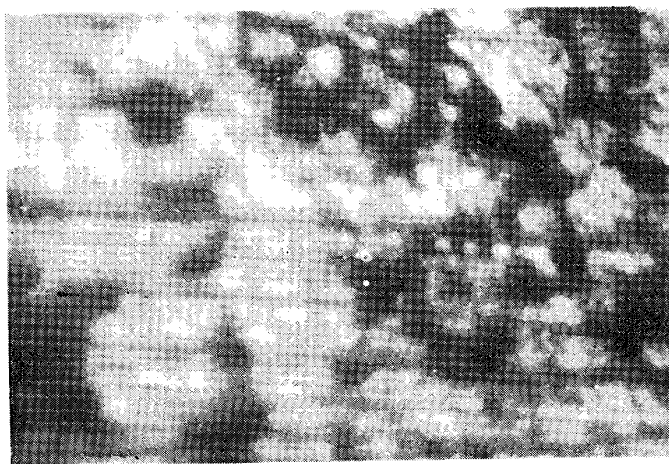


Photo. 6. Microstructure of steel No. 5 quenched in oil at 60°C. ($\times 600$)