

# 工具鋼の硬さと靱性に及ぼす焼入条件の影響

古田 明仁 \*1・辻井 信博 \*2

Effects of Quenching Conditions on Hardness and Toughness of Tool Steels  
Akihito Furuta and Nobuhiro Tsujii

**Synopsis:** To make clear the effects of heat treatment on mechanical properties is important to select the optimum quenching condition for tool steels. In this present work, effects of quenching temperature and holding time on hardness and toughness were investigated with two types of tool steels, 4%Cr-hot work tool steel and 8%Cr-cold work tool steel. The quenching temperature was more influential in hardness and toughness of both steels than the holding time. The toughness of both steels drastically fell down at 1090°C of quenching temperature because of coarse austenite grains. In order to obtain high hardness and hardenability with good toughness, the holding time at 1030°C required at least 10min for both steels. Finally, the optimum quenching conditions were shown for two types of the steels.

**Key words:** hot work tool steel; cold work tool steel; austenitizing temperature; holding time; quenching; retained austenite; Charpy impact test; grain size; Ms temperature.

## 1. 緒言

工具鋼の諸特性は、主要成分、不純物元素、非金属介在物清浄度、ミクロ偏析、鍛錬状況などに影響される他、金型製造において重要な工程である焼入焼戻履歴にも著しく影響される。したがって、工具鋼の性能を十分発揮させるためには、その特性に及ぼす熱処理条件の影響を明確にし、最適条件を選定することが重要である。JIS鋼である熱間工具鋼SKD61や冷間工具鋼SKD11については、その適正焼入温度と保持時間は、実験結果や経験からそれぞれ、1020～1030°C、20～30分と1020～1030°C、20～40分<sup>1,2)</sup>とされている。また、高速度工具鋼SKH51の焼入加熱条件は、加熱温度とその保持時間によって決定され、焼入パラメータ  $P = T(C + \log t)$  (T: 加熱温度, t: 保持時間, C: 構成される炭化物の種類と大きさによって異なる定数) で整理できることが報告<sup>3)</sup>されている。しかしながら、公表されている実験結果<sup>4-6)</sup>は少なく、これらJIS鋼の実験結果や経験が、新しく開発された鋼種にも適用可能かどうかは明確でないのが現状である。そこで本研究では、新成分系の熱間工具鋼と冷間工具鋼について、その適正焼入条件を求めることを目的に、熱処理硬さと靱性に及ぼす焼入温度と焼入保持時間の影響を検討した。

## 2. 実験方法

### 2・1 供試材および熱処理試験片

供試鋼は、Table 1 に示す化学成分を有する熱間工具鋼Aと冷間工具鋼Bで、素材は直径36mmの圧延丸棒である。A鋼は、汎用の5Cr系熱間工具鋼JIS-SKD61の高温強度を改善した4Cr系熱間工具鋼である。B鋼は、一般に広く使用されている13Cr系のJIS-SKD11の硬さと靱性を改良した8Cr系の冷間工具鋼である。ともに市販されている代表的合金工具鋼である。熱処理実験には、後述するように、電気炉と高周波加熱タイプの全自動変態測定装置を用い、熱処理用試験片は、それぞれ直径36mm、長さ60mmおよび直径3mm、長さ10mmとした。

Table 1. Chemical compositions of steels used.

Steel	(mass%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb
A	0.43	0.4	0.4	0.011	0.001	4.2	2.5	0.5	0.07
B	0.80	0.9	0.4	0.024	0.001	8.1	1.9	0.5	—

### 2・2 熱処理および実験方法



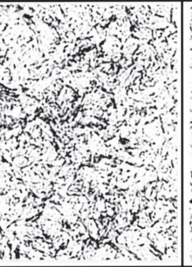
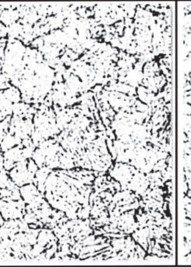
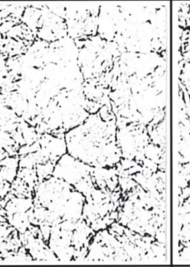
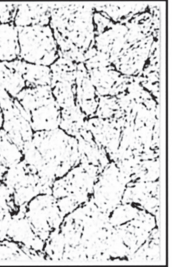

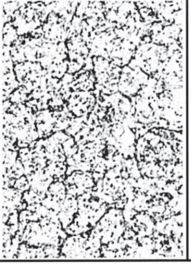
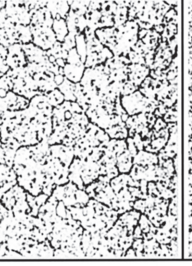
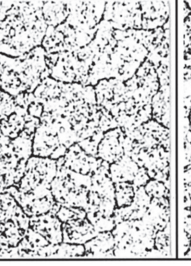
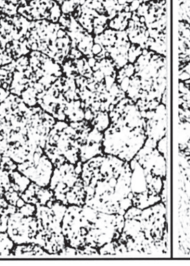
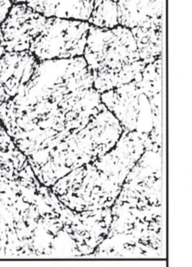


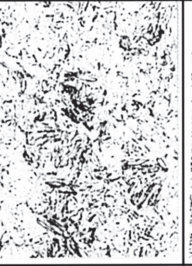
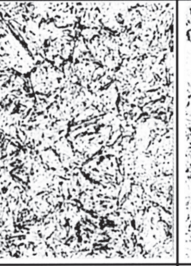
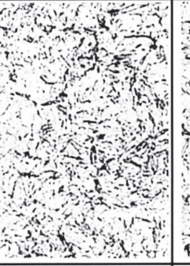
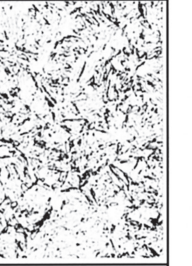

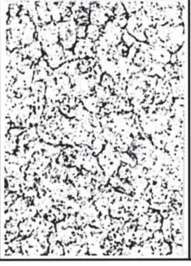
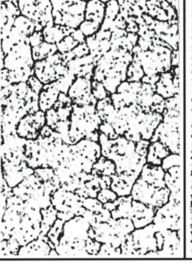
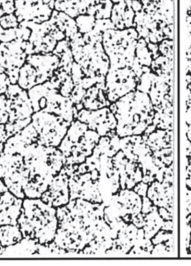
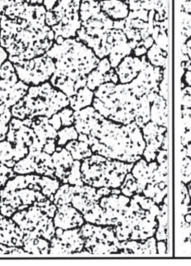
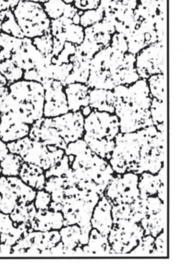
2種の加熱方法で熱処理実験を行った。まず、実際に金

\*1 技術研究所 高合金鋼研究グループ (現技術管理部)

\*2 技術研究所 高合金鋼研究グループ, 工博

型の熱処理に使用される電気炉を用いて、焼入温度の影響と保持時間の影響を検討した。本加熱作業では、試験片は予熱せずに、目的の焼入温度に設定された炉中に装入し、40分で昇温させた。この加熱時間は、本試験片の中心部が室温から1030℃に昇温するまでに要する実測時間であり、本試験では全ての実験条件で一定とした。焼入温度の影響については、焼入温度を990℃から1090℃まで20℃毎の6水準とし、保持時間を30分、一定として検討した。また、保持時間の影響については、焼入温度を1030℃一定とし、試験片を装入して40分後を基準に1, 10, 30, 60, 180および600分保持の6条件にて検討した。焼入冷却は全て空

冷とし、焼入状態あるいは焼戻状態でのマイクロ組織、硬さ、残留オーステナイト量およびシャルピー衝撃値を調査した。なおA鋼およびB鋼の焼戻温度は、それぞれ600℃と520℃とし60分保持後空冷の焼戻処理を2回繰返した。ピクラル液で腐食後、マイクロ組織観察を光学顕微鏡にて行った。焼入状態の試料については、その結晶粒度をJIS-G-0551にて測定した。X線法により残留オーステナイト量を測定し、シャルピー衝撃試験を焼入焼戻した鋼材中心部から圧延方向に採取した試験片を用いて、常温、大気中で行った。衝撃試験片のノッチ形状は、A鋼およびB鋼で、それぞれ1R-U形状と10R-C形状とした。

		Austenitizing temperature (30min, A.C.)					
		990℃	1010℃	1030℃	1050℃	1070℃	1090℃
A							
	B						
		Holding time at 1030℃, A.C.					
		1min	10min	30min	60min	180min	600min
A							
	B						

25μm

Fig.1. Optical micrographs of as quenched microstructures for steel A and B quenched from various austenitizing temperatures and holding times.

もう一つの熱処理実験を高周波加熱炉を装備した全自動変態記録測定装置を用いて行った。本実験の目的は、A<sub>1</sub>変態点から焼入温度までのオーステナイト域での昇温をできるだけ急速に行い、正味の焼入保持時間の影響を検討することである。具体的には、室温から800℃まで30秒で昇温後、800℃で5分間保持し、引続き目標の焼入温度である1030℃まで30秒で昇温させた。1030℃での保持時間は、0、0.5、1、3、10、60分の6水準とし、その後室温まで10℃/秒の速度で冷却した。焼入冷却中にMs点を測定し、焼入状態でのミクロ組織観察と硬さ測定を行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3・1 焼入温度の影響

##### 3・1・1 ミクロ組織と結晶粒度

Fig.1 は、A鋼およびB鋼について、焼入温度と保持時間を変化させた場合の焼入状態での光学顕微鏡組織写真である。両鋼とも、焼入温度がある温度以上になると結晶粒が明瞭に観察されるようになる。その焼入温度は、A鋼およびB鋼で、それぞれ1050℃および1010℃である。このように焼入温度の上昇により結晶粒が明瞭に観察される理由として次の3点が考えられる。まず粒内に存在する炭化物が焼入温度の上昇に従い減少すること、次に焼入温度が高いほど結晶粒界へPなどの不純物元素が濃縮されること<sup>7)</sup>、さらに高温から焼入れすることにより、冷却過程で炭化物が粒界に析出し易くなることが挙げられる。このような現象により、腐食処理で粒界が優先腐食された結果、粒界が明瞭化したものと考えられる。なおFig.1の焼入保持時間の影響については後述する。

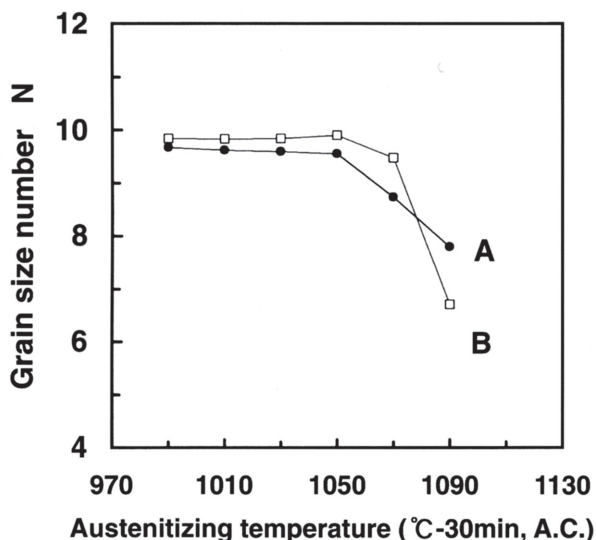


Fig.2. Effect of austenitizing temperature on the grain size of steel A and B.

これらのミクロ組織から結晶粒度を定量化した結果をFig.2に示す。両鋼の焼入状態での結晶粒度は、焼入温度が

990℃から1050℃まで一定であり、その粒度番号Nは、約9.7である。粒度番号Nと断面積1mm<sup>2</sup>あたりの結晶粒の数nとは、 $n = 2^{N-3}$ の関係式が成り立つことから、両鋼の平均結晶粒径は、約7 μmと計算できる。焼入温度が1050℃を超えるとA鋼、B鋼ともに結晶粒が粗大化する。特に1090℃においては、B鋼の粗大化が著しく、その平均結晶粒径は20 μm以上となった。

##### 3・1・2 焼入および焼戻硬さと残留オーステナイト量

Fig.3に、A鋼とB鋼の焼入硬さおよび残留オーステナイト量に及ぼす焼入温度の影響を示す。A鋼の場合、1030℃の焼入温度において硬さの最高値、59HRCが得られる。一方、B鋼では、1030~1050℃の範囲で焼入硬さは最高となり、その値は63.4HRCである。合金工具鋼の最高焼入硬さは、マトリックスに固溶したC量でほぼ決まり<sup>8)</sup>、本実験結果からA鋼およびB鋼の固溶C量は、それぞれ約0.35%、約0.6%と推定できる。従って、A鋼およびB鋼は、それぞれ全C量の約81%、75%が固溶した状態であることが、Table1の化学成分からわかる。焼入硬さは、上記ピーク値を示した後、焼入温度の上昇に従い低下する。これは、Fig.3に示すように軟らかい残留オーステナイトの増加によるものであり、A鋼およびB鋼の残留オーステナイト量は、1090℃においてそれぞれ約10%、30%となった。この焼入温度の上昇にともなう残留オーステナイト量の増加は、Cおよび合金元素の固溶量の増加にともないオーステナイトが安定化しMs点が低下したことに起因すると考えられる。

Fig.4にA鋼およびB鋼の焼戻硬さに及ぼす焼入温度の影響を示す。A鋼およびB鋼の焼戻温度は、それぞれ600℃、520℃一定とした。A鋼およびB鋼の二次硬化のピークは、それぞれ500℃付近、520℃付近であるが、本実験では、それぞれ熱間金型および冷間金型用途に主に実用化されている上記焼戻温度を採用した。Fig.4に示すように両鋼の焼戻硬さは、焼入温度の上昇に従い増加する。これは、焼入温度の上昇にともない合金元素の固溶が促進され、二次硬化に寄与するMo、VおよびNb炭化物の析出量が増大したためと考えられる。特に1070℃以上の高温焼入れでは、VCやNbCの析出量増加の寄与<sup>9、10)</sup>が大きいと考えられる。

##### 3・1・3 シャルピー衝撃値

Fig.5にA鋼およびB鋼の焼戻状態でのシャルピー衝撃試験結果を示す。まずA鋼の場合、衝撃値は990℃から1070℃まで焼入温度の上昇とともに緩やかに低下し、1090℃焼入れて急激に低下する。SKD61系熱間工具鋼の衝撃吸収エネルギーの大部分は、き裂発生エネルギーで占められており、降伏応力とき裂発生までの塑性変形量に影響される<sup>11、12)</sup>。したがって、1070℃までの衝撃値低下傾向は、Fig.4に示したように主に硬さの上昇、すなわち延性の低下に起因したものと考えられる。一方、1090℃での衝撃値の急激な低下は、Fig.2に示した結晶粒の粗大化による粒界強度の低下が原因と考えられる。次にB鋼の場合、

990℃から1050℃までは、焼戻硬さが増加しているにも拘らず衝撃値はほとんど変化しない。これは、B鋼には、冷間工具鋼として必要な耐摩耗性を付加する目的で、10数μmのCr炭化物が分散されており、マトリックスの特性よりもこれら炭化物がき裂の発生を決定づけてしまうため<sup>13)</sup>と考えられる。B鋼における1070℃以上での衝撃値の急激な低下は、A鋼の場合と同様に結晶粒の粗大化に起因していると考えられる。

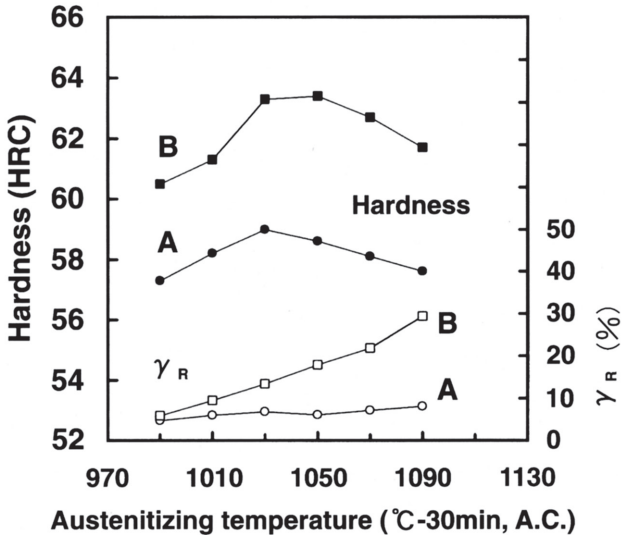


Fig.3. Effect of austenitizing temperature on hardness and volume fraction of retained austenite of quenched steels.

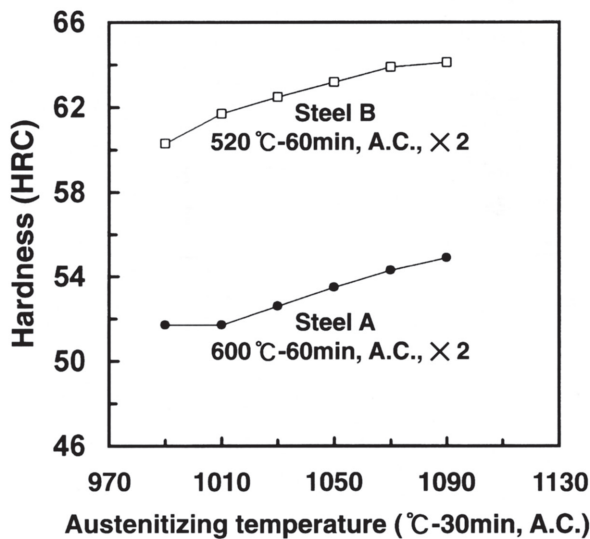


Fig.4. Effect of austenitizing temperature on hardness of tempered steels.

### 3・2 焼入保持時間の影響

#### 3・2・1 ミクロ組織と結晶粒度

Fig.1にA鋼およびB鋼について、焼入保持時間を変化させた場合の焼入状態での光学顕微鏡組織写真を示した。焼入温度は、1030℃一定である。A鋼の場合、焼入保持時間が600分まで増加してもミクロ組織に顕著な変化は生じな

い。一方、B鋼は、保持時間が30分以上になると結晶粒が明瞭に観察されるようになる。ただし、顕著な結晶粒の粗大化は1030℃の焼入温度では、600分保持でも生じない。B鋼の方が焼入温度および保持時間に対し結晶粒界の出現が敏感なのは、A鋼に比べより高C-高Cr鋼であることと不純物元素であるPが高いことが影響している可能性がある。

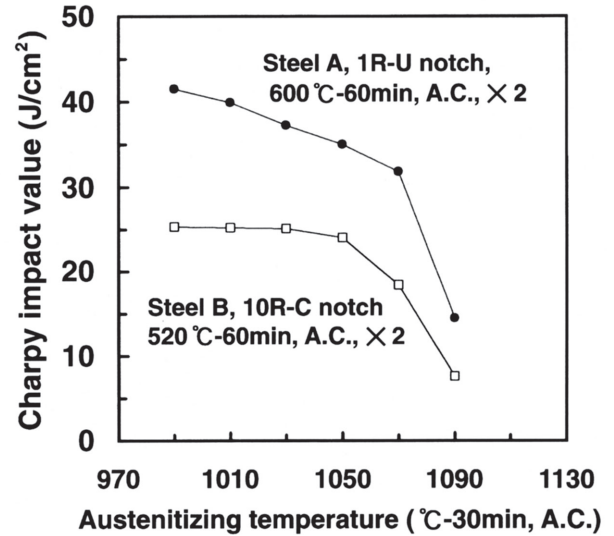


Fig.5. Effect of austenitizing temperature on Charpy impact value of tempered steels.

#### 3・2・2 焼入および焼戻硬さと残留オーステナイト量

焼入保持時間と焼入硬さ、残留オーステナイト量および焼戻硬さの関係をそれぞれFig.6およびFig.7に示す。A鋼、B鋼ともに焼入硬さは、保持時間の増加に従わずかに低下する。一方、焼戻硬さは、A鋼でほとんど変化しないのに対し、B鋼ではわずかな増加傾向にある。しかしながら、いずれも実用上問題のない範囲での変動であり、焼入焼戻硬さに及ぼす保持時間の影響は、前述の焼入温度程大きくないことが分かる。同様に残留オーステナイト量にも大き

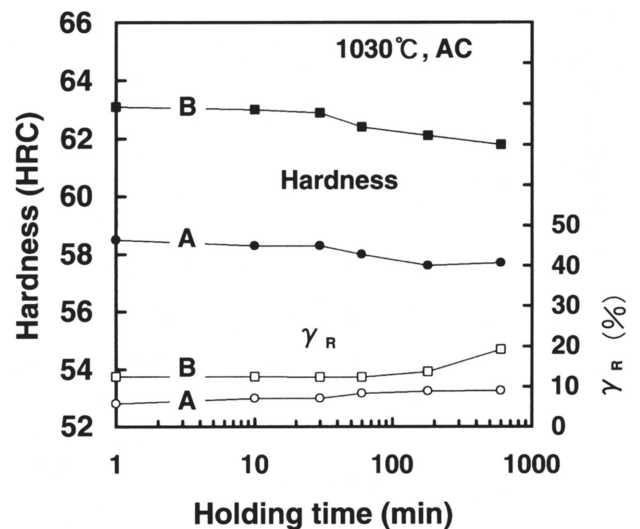


Fig.6. Effect of holding time at 1030℃ on hardness and volume fraction of retained austenite of quenched steels.

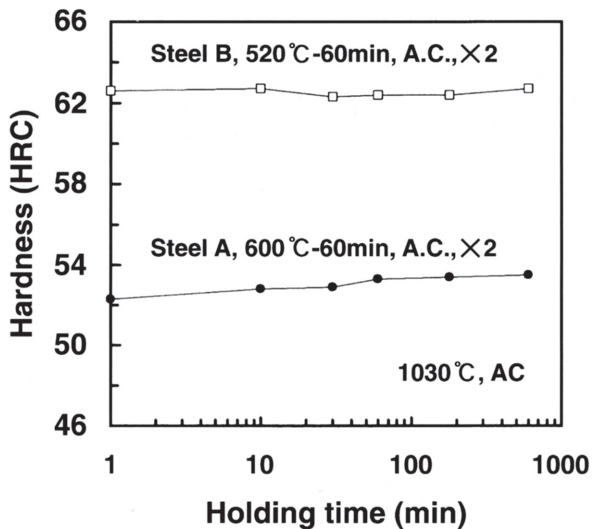


Fig.7. Effect of holding time at 1030°C on hardness of tempered steels.

な変化は認められないが、B鋼のみ600分保持した場合、残留オーステナイト量が20%まで増加しており、実用的には熱処理変寸や経年変形への影響が予想される。

### 3・2・3 シャルピー衝撃値

Fig.8にA鋼およびB鋼の焼戻状態でのシャルピー衝撃値に及ぼす焼入保持時間の影響を示す。A鋼の衝撃値には、保持時間の影響は認められない。一方、B鋼の場合、衝撃値は焼入保持時間の増加とともに緩やかに低下する。しかしながら1090°C焼入れて見られたような急激な低下ではなく、衝撃値に対する保持時間の影響は焼入温度ほど大きくないことが分かる。

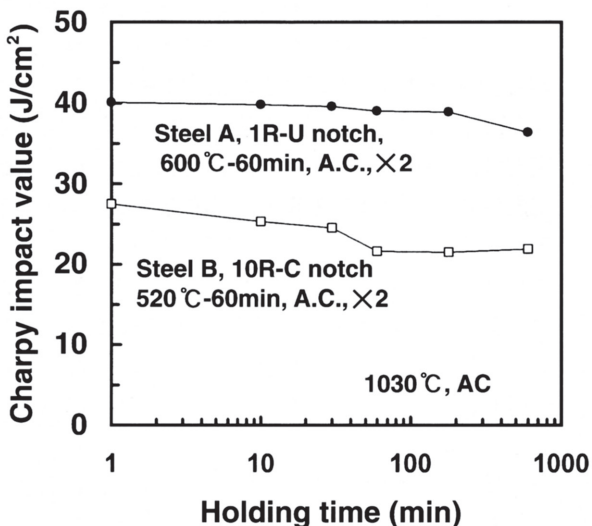


Fig.8. Effect of holding time at 1030°C on Charpy impact value of tempered steels.

### 3・2・4 焼入硬さとMs点

以上検討してきた保持時間の影響は、熱処理に電気炉を用いた実験結果である。実用的には有効な目安となるものの、加熱昇温途中でのCおよび合金元素のオーステナイ

ト相への固溶の影響も含んでいる。そこで、急速加熱が可能な高周波加熱を用いて焼入組織、硬さおよびMs点に及ぼす正味の保持時間の影響を検討した。Fig.9は、急速加熱後の焼入保持時間と焼入硬さおよびMs点の関係を示している。焼入硬さは、A鋼、B鋼ともに保持時間の増加にしたがい上昇し、10分以降で飽和する。また、Cおよび合金元素の固溶量に影響されるMs点は、両鋼とも保持時間の増加に従い低下し、10分で飽和する。Ms点の安定化は、硬さのみならず焼入性や機械的および物理的性質を決定する合金元素が十分固溶したことを示しており重要である。Fig.9の結果から、1030°Cにおいては、A鋼、B鋼ともCと合金元素を十分固溶させるためには、正味時間で10分以上必要であるといえる。一般に、焼入保持時間の不要な構造用鋼に対し、合金工具鋼は、品物が焼入温度になってから、炭化物を十分固溶させるために最低約10分が必要とされており<sup>14)</sup>、本実験結果からも裏付けられる。Fig.10に各保持時間での焼入組織を示す。A鋼、B鋼とも保持時間の増加にしたがい、残留炭化物量が減少し、基底がマルテンサイトになる。焼入硬さとMs点が安定する保持10分での組織を比較すると、A鋼では、残留炭化物がわずかに認められるに過ぎないのに対し、B鋼では数μmの微細炭化物が依然残留しているのが特徴的である。

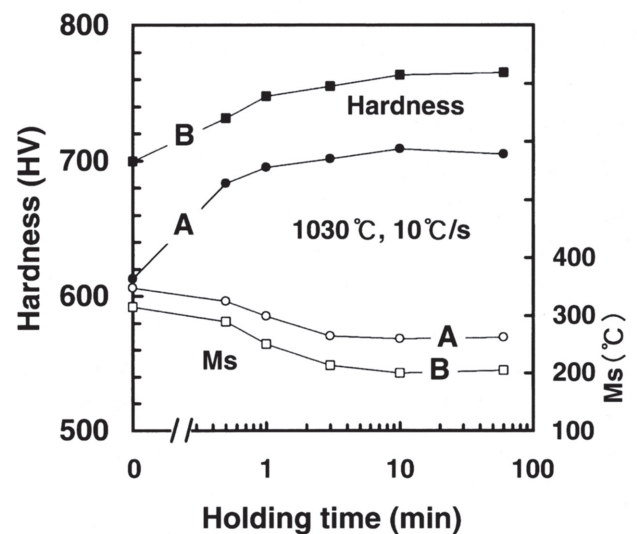


Fig.9. Effect of holding time at austenitizing temperature on the Ms temperature and hardness of quenched steels.

### 3・3 適正焼入条件

実際の熱処理作業においては、金型の大きさ、処理容量、配置、炉の能力などを考慮して、金型の内外の温度が焼入温度に達してから保持時間を取る必要がある。合金工具鋼の焼なまし組織は、フェライト基底に各種炭化物が析出した状態であり、焼入加熱によりオーステナイトが生成し、硬さ、靱性、焼入性、耐熱性など金型に必要な特性を引き出す各種元素が炭化物から基底に固溶する。したがって、焼入温度および保持時間は、炭化物が十分に固溶する条件

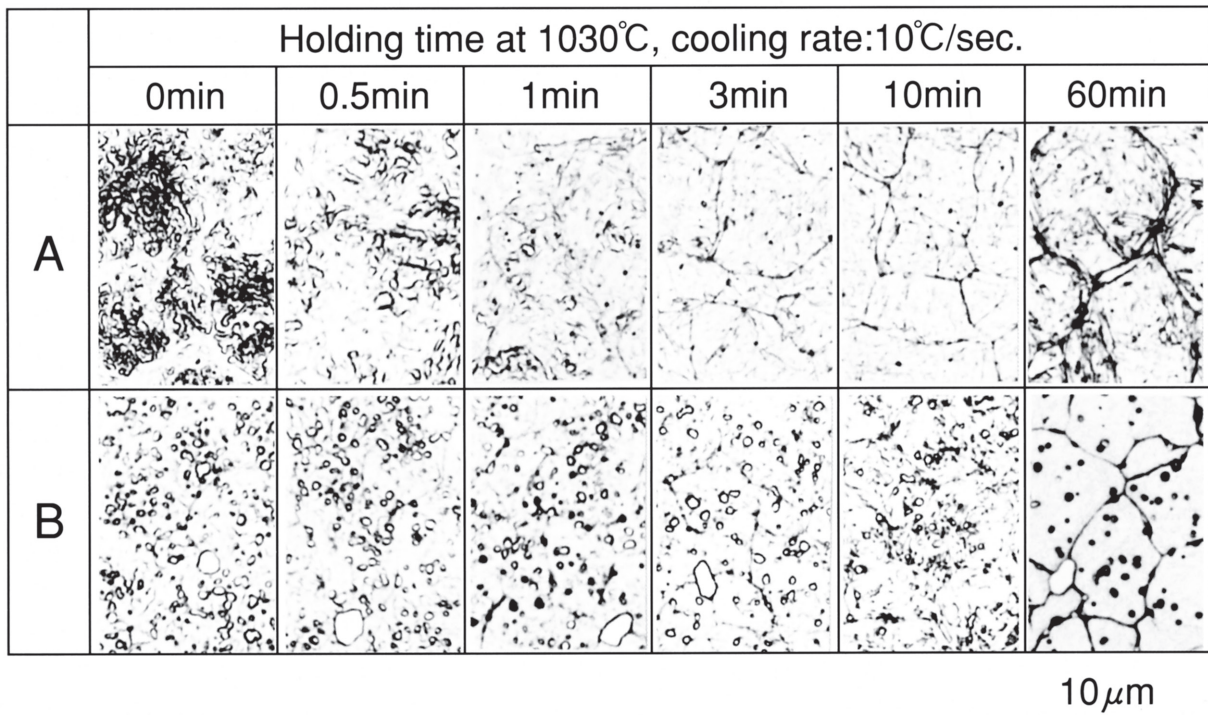


Fig.10. Optical micrographs of as quenched microstructures for steels with various holding times at austenitizing temperature.

とする必要がある。実際の焼入作業では、焼入温度は低温側、保持時間は長時間側が望まれており、諸特性は焼入温度に大きく影響し保持時間には鈍感であったという本実験結果と一致する。特に、焼入温度が高過ぎると結晶粒が粗大化し靱性が損なわれるので注意を要する。A鋼、B鋼とも焼入温度が1050°Cを超えると結晶粒が粗大化し始めそれにとまって衝撃値が急激に低下する。したがって、最高加熱温度は、ともに1050°Cとすべきである。また、焼入硬さのピークは、A鋼、B鋼でそれぞれ1030°C、1040°Cであることから、実用的な最低温度はそれぞれ1020°C、1030°Cと考えられる。保持時間の影響は、1030°Cの1水準でしか検討していないが、両鋼とも少なくとも10分は必要である。10分以上であれば、特性はあまり変化しないが、B鋼の場合焼入温度の感受性が高いためA鋼よりは、短時間であることが望ましい。以上のことから、A鋼およびB鋼の適正焼入温度と保持時間は、それぞれ1020~1050°C、10~60分および1030~1050°C、10~30分が目安であると考えられる。ただし、ここでの保持時間は、品物の芯部が設定焼入温度に達してからの時間を意味している。

#### 4. 結 言

4Cr系熱間工具鋼Aと8Cr系冷間工具鋼Bについて焼入焼戻硬さと靱性に及ぼす焼入温度と焼入保持時間の影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 焼入温度が上昇すると結晶粒が明瞭に観察されるようになる。その温度は、A鋼およびB鋼で、それぞれ1050°Cおよび1010°Cであり、B鋼の方が敏感である。
- (2) 両鋼の結晶粒度は、焼入温度が990°Cから1050°Cまで一定であり、1050°Cを超えると両鋼とも粗大化する。特に1090°Cにおいては、B鋼の粗大化が著しい。
- (3) 最高焼入硬さは、A鋼およびB鋼の場合、それぞれ1030°C、1030~1050°Cで得られた。それ以上の温度では、残留オーステナイトの増加により低下する。
- (4) 焼戻硬さは、両鋼とも焼入温度の上昇に従い上昇する。
- (5) 衝撃値は、A鋼の場合、990~1070°Cまで焼入温度の上昇とともに緩やかに低下し、1090°C焼入れて急激に低下する。B鋼の場合、990~1050°Cまでは、焼戻硬さが増加しているにも拘らず衝撃値はほとんど変化しない。
- (6) 焼入硬さ、残留オーステナイト量、焼戻硬さおよび衝撃値に及ぼす保持時間の影響は、両鋼とも焼入温度程大きくない。
- (7) 1030°C焼入れの場合、両鋼ともCと合金元素を十分固溶させるためには、正味10分以上の保持が必要と考えられる。
- (8) A鋼およびB鋼の適正焼入温度と保持時間は、それぞれ1020~1050°C、10~60分および1030~1050°C、10~30分が目安と考えられる。

## 文 献

- 1) 吉田勝彦：熱処理，3 (1963) 4, 242
- 2) 西村富隆：熱処理，14 (1974) 6, 334
- 3) 菅原一人：熱処理，11 (1971) 3, 162
- 4) 西村富隆：特殊鋼，36, (1987) 8, 43
- 5) 古沢浩一：電気製鋼，45 (1974), 4
- 6) 石井 玄，土井敏照：Report of Res. Inst. CHIBA. (1988), 33
- 7) 松田幸紀，須藤興一：電気製鋼，57 (1986), 181
- 8) 田村今男：鉄鋼材料 (1981), 98 [朝倉書店]
- 9) S.Karagöz and H.-O.Andrén : Z. Metallkd. 83 (1992) 6, 386
- 10) 辻井信博，横井大円，深浦健三，砂田久吉，阿部源隆：粉体および粉末冶金，42 (1995) 4, 485
- 11) 横井大円，辻井信博，深浦健三，砂田久吉：材料，46 (1997) 6, 587
- 12) N.Tsujii, D.Yokoi, K.Fukaura and H.Sunada：粉体および粉末冶金，42 (1995) 12, 1446
- 13) 砂田久吉，深浦健三，寺本克之，辻井信博，横井大円：日本材料学会第45期学術講演会予稿集 (1996.5.23)
- 14) 水野博司：塑性と加工，32 (1991), 944

