

# 高硬度工具鋼の引張性質

## Tensile Properties of High-hardness Tool Steel

浦野元一\*  
Motokazu Urano

芥川俊雄\*  
Toshio Akutagawa

### 要 旨

従来行なわれていなかった高硬度工具鋼の引張試験を試みた。適当な形状の試験片を用い、引張速度を遅くすることによって引張試験の可能なことがわかった。3種の冷間工具鋼について、焼もどし温度との関連において、その引張性質を明らかにした。

### 1. 緒 言

引張試験は、材料の性質を調べる試験としては、もっとも基本的であり、かつ重要な試験である。それは、引張試験のみが、ネッキング(くびれ)の現われる負荷までは試験片に作用する応力状態はほぼ純粋に単軸応力状態であり、かつ試験片の軸に垂直な断面全体にわたってほぼ等しい応力が作用していると考えられる。そのため、引張試験結果はその解釈が比較的容易であり、その応用性あるいは適用性が広い。

材料の機械試験としては、引張試験以外にもいくつか存在している。それらはそれぞれ利点を有しているが、また欠点をも有している。圧縮試験はただ単に引張試験とは負荷の方向が逆であると考えられがちであるが、実際は非常に大きな相違がある。それは試験片の両端に接触する金敷(Anvil)と試験片との摩擦を除去することが一般には非常に困難であるために、試験片内には3軸応力の状態となり(この状態を完全に解析することは困難)、外力と試験片のひずみとから測定される降伏点などは、その材料の真の降伏強さより高い値の得られるのが予想される。また曲げ試験、ねじり試験などは試験片の軸に垂直な断面にわたって一様な応力でないため(最外周部で最大値をとる)、その材料の弾性限内では通常の方法で材料力学的解釈が可能であるとしても、その一部が弾性限を越えるとたちまちその解釈が困難となる。

このように、引張試験が重要であるにもかかわらず、従来、とくに高硬度の工具鋼に関して皆無といってよいほどデータが得られていない。その理由は、高硬度の工具鋼が一般にじん性に乏しいため、引張試験を行なうと、“つかみ部分”や“R部分”で破断し、満足すべき試験結果を得ることができなかつたためと考えられる。

本報は、そのような引張試験の重要性を認識して、高硬度工具鋼でも試験片の形状、引張速度など考慮すれば試験が可能であることを示し、かついくつかの鋼種についてのデータからかなり興味深い情報も得られたので報告する。

### 2. 実 験 方 法

#### 2.1 引張試験片の形状

緒言で述べたように、高硬度工具鋼の引張試験で“つかみ部”や“R部”で破断してしまうのは、おもに切欠きの影響であると考えられる。そこで、試験片の形状を決定するに当たり、極端に切欠き効果を少なくするように考慮した。新しく設計した試験片の形状は図1に示すとおりである。この試験片の特長は(i)平行部が30mm存在し、約4Dに近い。(ii)“R部”の曲率半径をじゅうぶん大きくとった(200mm)。(iii)両端を除き、曲線および直線のつなぎは連続である(折れ曲りがない)。(iv)試験片の加工は困難でない。

試験片をつかむチャックは二つ割りのもので、試験片の形状に沿

\* 日立金属株式会社安来工場

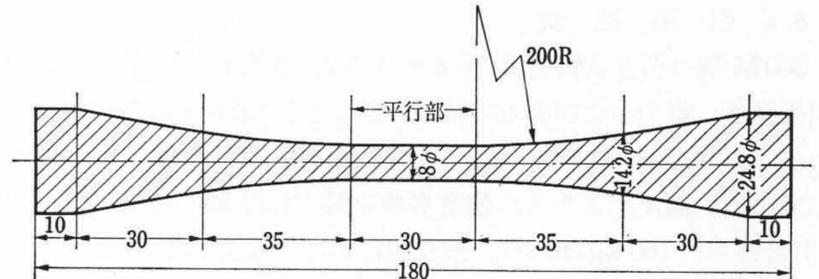


図1 試験片の形状

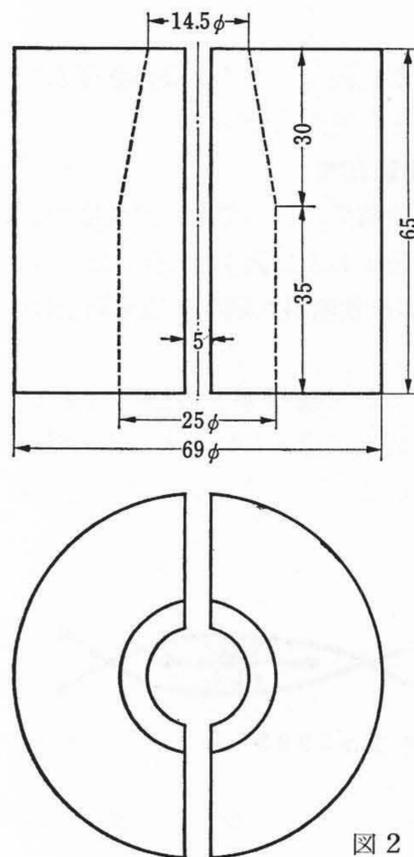


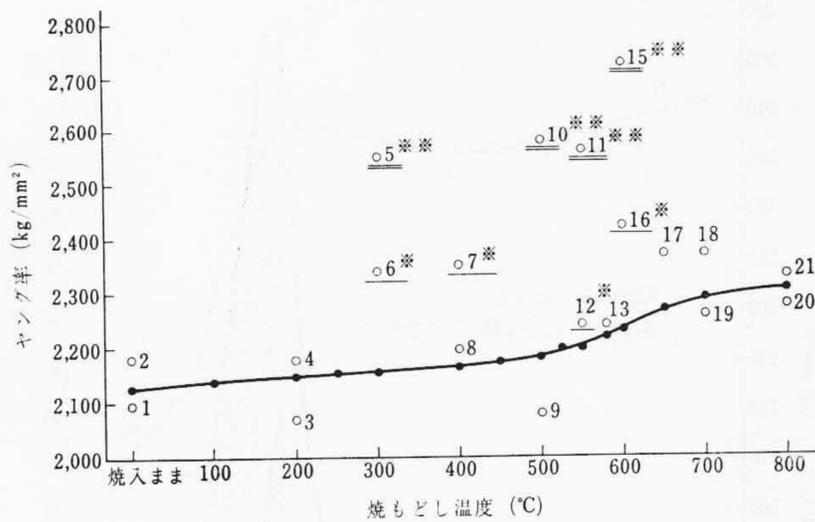
図2 チャック

ったものを製作した(図2参照)。試験中、試験片とチャックとの間での“すべり”による不連続を除去するため、試験片とチャックとの間に潤滑剤(グリース)を塗付して、最初のわずかな負荷重で、試験片がチャックにじゅうぶん食い込むようにした。

#### 2.2 ひずみ測定

微少なひずみを測定するために、電気抵抗線ひずみゲージを試験片平行部に背と腹に2枚はり付けて、荷重とひずみとを同時に読みとり、荷重・ひずみ曲線を描いた。その結果次のことが判明した。

- (i) ごく小さい塑性変形に対する耐力も多くの場合かなり明りょうにつかまえることができた。
- (ii) とくにひずみゲージ2枚を並列結線としたものは、その曲線が非常になめらかで、比例限内では完全に近い直線が得られる。
- (iii) 2枚のひずみゲージを別々に読みとったものは、2枚のひずみゲージの示すひずみが完全には必ずしも一致しない。しかも比例限内とみられる低荷重側でそれぞれ互に逆の方向に“ふくら



(注) ○印：引張試験による測定値，数字は T.P. No.  
 ●印：横振動法による動的測定値  
 ☆：平行部外で破断  
 ※※：ひずみゲージ不良

図3 YXM1のヤング率と焼もどし温度との関係

み”を示している。

これは平均化することによってほとんど直線になる。このような現象は、試験片にやや曲げが働いているためと解釈される。このためひずみゲージ1枚のみによるひずみ測定はやや不明りょうとなりやすい。

### 2.3 ヤング率とひずみの補正

図3は、高硬度鋼 YXM1 について、荷重とひずみとを同時に読みとってプロットした荷重・ひずみ曲線の低荷重側の直線こう配から求めたヤング率である。同図には同材の横振動法によって求めた動的測定値も併記されている。

引張試験から求めたヤング率は“ばらつき”が大きいが、横振動法による動的測定値は非常になめらかな曲線となり、ヤング率として信頼性のあるように思われる。

図3において、T.P. No. 5, 10, 11, 15はとくにヤング率が高く測定された。これはあとの調査で、これらの試験片に用いたひずみゲージが不良(ゲージ・ファクタが狂っていた)であったことが判明している。また T.P. No. 6, 7, 12, 16は平行部外で破断したもので、No. 12 以外はヤング率が高く測定されている。これらの試験片については引張速度がやや速かったようである。このため、測定機器の応答に問題があり(ひずみ測定器は静ひずみ計を使用)、ヤング率が高く測定されたとも考えられる。

このように、引張試験によるヤング率がばらつくのは、おもにひずみ測定に誤差のはいる可能性が多いためと考えた。そこで測定されたひずみを補正することを試みた。その補正の基準として、引張試験結果としてのヤング率を、動的測定のヤング率に一致させることにした。すなわち、引張試験結果としてのヤング率を  $E'$ 、動的測定のヤング率を  $E$  として、

$$n = E'/E$$

を求めて補正係数とし、測定されたひずみにこの補正係数  $n$  を乗じて補正ひずみとした。その補正ひずみから、応力・ひずみ曲線を作成し、後述の各種性質を求めることとした。

### 2.4 引張速度

引張試験機としては 30 t アムスラー万能試験機を使用した。前に述べたように(図3)、YXM1の T.P. No. 6, No. 7, No. 12, No. 16ではやや速く引張ったためか、平行部外で破断し、ヤング率が高く測定され、また破断時の荷重は低く測定された。これらの試験片の引張速度はあまり明らかでないが、0.05%/min または 1,000 kg/min 程度と思われる。ほかの平行部で破断した試験片に対するものは、荷重・伸び曲線が比較的急な部分では 0.01~0.015%/min また

表1 供試材 YXM1 の化学成分 (%)

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Mo	V	Cu
供試材 YXM1	0.86	0.25	0.30	0.017	0.003	0.03	3.96	6.17	4.95	1.84	0.10

は 200~300 kg/min で引張り、ゆるやかな部分にはいるとひずみ速度をやや増した(負荷重速度は遅くなっている)。

使用した引張試験機がアムスラー型であるので、一定のひずみ速度で実験することがむずかしいため、一定ひずみ速度とはなっていない。

このように、高硬度工具鋼の引張速度は、試験に要する時間は長くかかるが、じゅうぶん遅くすることが必要なようである。これに対するじゅうぶんな理解は不明である。

## 3. 実験結果

### 3.1 高速度鋼 YXM1 (SKH9 相当) について

供試材 YXM1 の化学成分は表1に示すとおりである。素材形状は 26 t x 70 W のものを用いた。

素材から試験片(素材長手方向と試験片の軸方向と一致)を加工し、熱処理後 600# までのエメリー・ペーパーで仕上げた。仕上げ代(しろ)は片肉約 2/100 mm である。また熱処理条件は次のとおりである。

1,200°C x 1.5 mm (ソルト) 油冷

→各焼もどし温度 x 1h 空冷 2回

これらの試験材のマイクロ組織の一部を示したのが図4である。

引張試験結果は、図5, 6に焼もどし温度と対応させて示した。ヤング率については、前に図3に示したとおりである。図7は破面の例である。

### 3.2 冷間ダイス鋼 CRD (SKD1 相当) について

供試材 CRD の化学成分は表2に示すとおりである。素材は 30φ 圧延材である。熱処理条件は 980°C x 75 mm 空冷 + 各焼もどし温度 x 1h 空冷 2回である。図8はその試験材のマイクロ組織の一例である。

試験結果は、図9, 10に示すとおりである。図9に併記したヤング率は、横振動法によって測定した結果で、図11は破面である。

### 3.3 冷間工具鋼 SGT (SKS3 相当) について

表3は供試材の化学成分を、図12, 13は引張試験結果を示したものである。

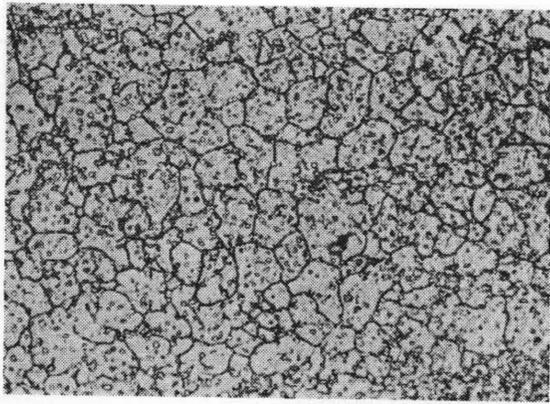
## 4. 考察

### 4.1 ヤング率

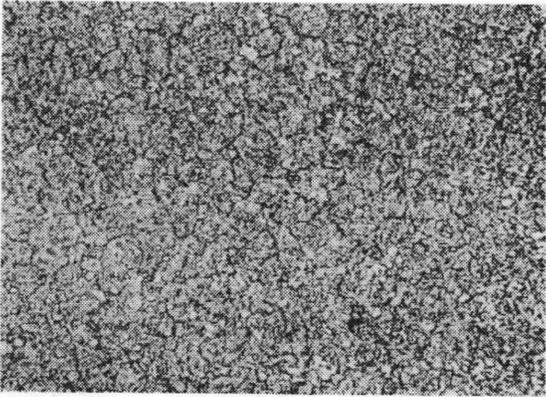
以上の結果をみるに、3鋼種とも、ヤング率は焼もどし温度を高くするに従って上昇する。CRDの 800°C 焼もどしでヤング率のいくらかの低下が認められるのは、不完全ながら焼入れされているためであろう(かたさは上昇している)。この挙動についてはじゅうぶんな理解ができていないが、焼もどしの進むにしたがって炭化物の析出が進むためであるかもしれない。ちなみに YXM1 が 21,300~23,050 kg/mm², CRD が 22,700~23,700 kg/mm², SGT が 20,300~21,200 kg/mm² なるヤング率を有することを考えると、炭化物の多いほうがヤング率が高いようである。

### 4.2 引張強さの意味

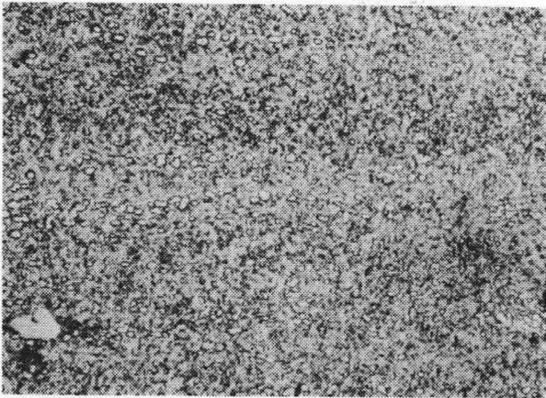
本報では、引張強さの定義として、通常行なわれているように、引張試験において達し得た最高荷重を試験片の最初の断面積で割った値とした。しかしながら、この定義に従う引張強さは、高硬度工具鋼の場合の多くは、通常の延性材の引張強さとは物理的意味を異にする。その様子の相違を示したのが図14である。図14(a)は通



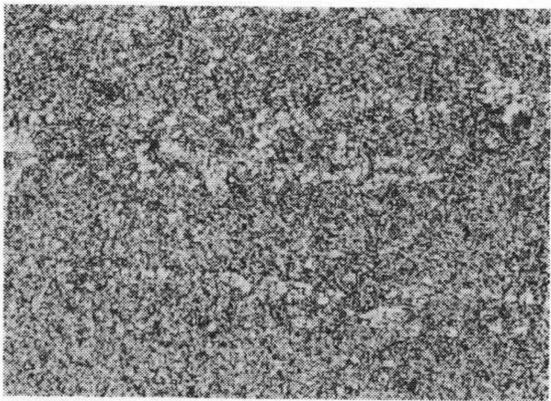
T. P. No. 2 (焼入まま)



T. P. No. 8 (400°C 焼もどし)



T. P. No. 11 (550°C 焼もどし)



T. P. No. 19 (700°C 焼もどし)

図4 供試材 YXM1 のマイクロ組織 (×400)

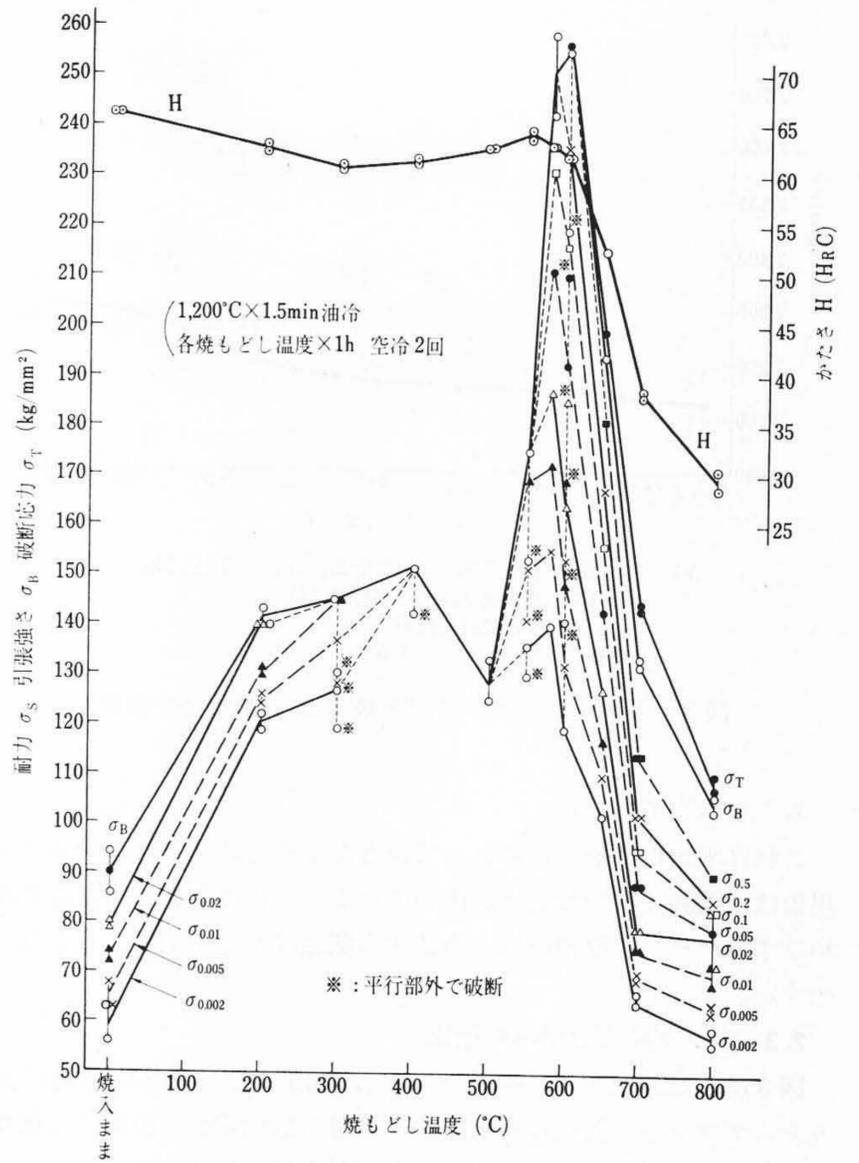


図5 YXM1 の引張試験結果 (I)

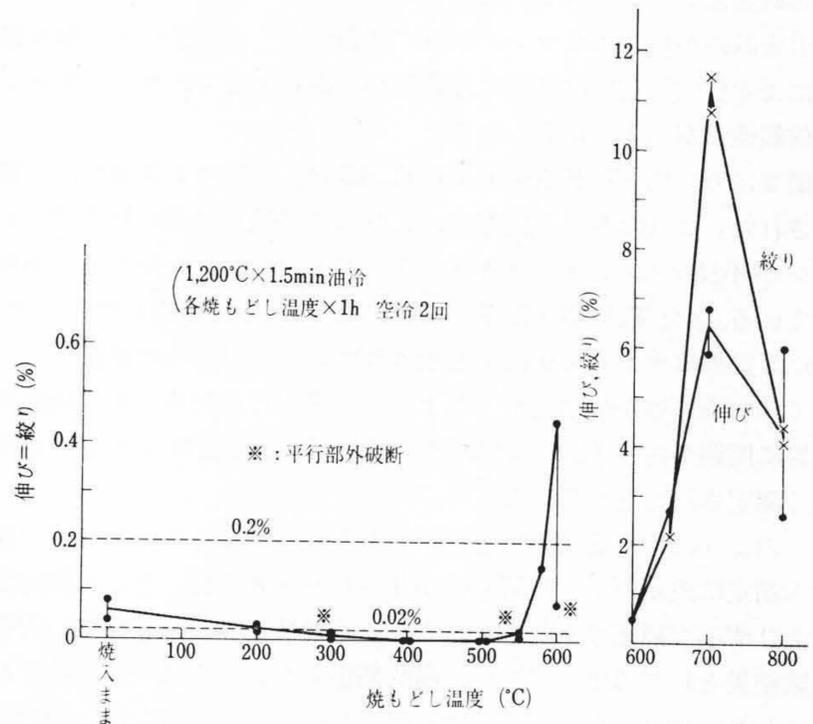
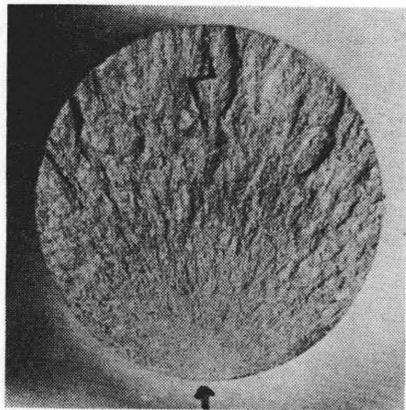
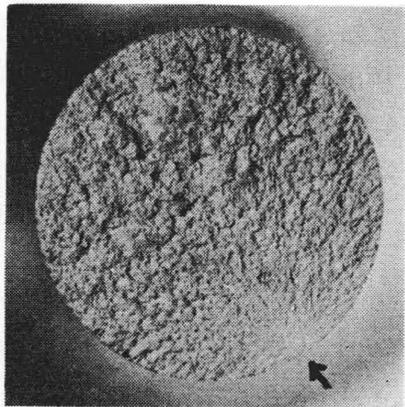


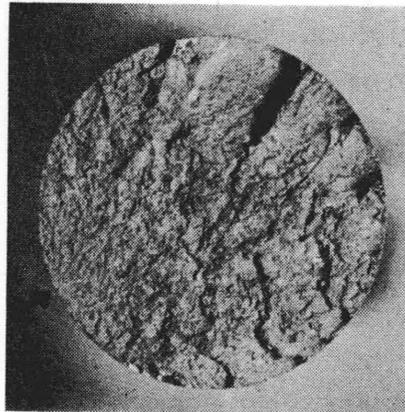
図6 YXM1 の引張試験結果 (II)



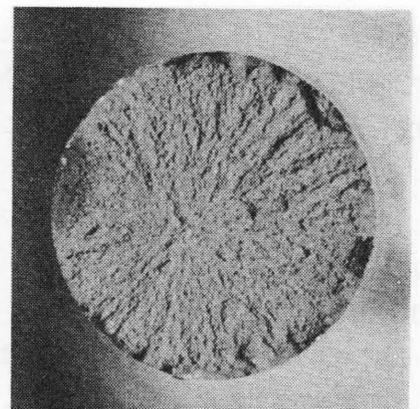
T. P. No. 2 (焼入まま)



T. P. No. 8 (400°C 焼もどし)



T. P. No. 13 (580°C 焼もどし)

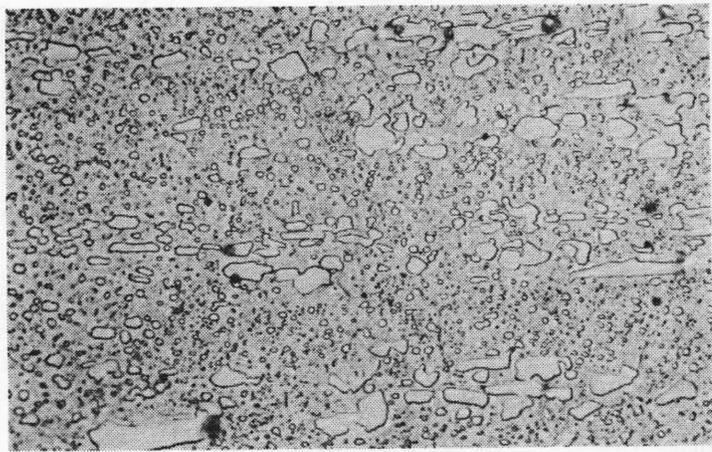


T. P. No. 18 (700°C 焼もどし)

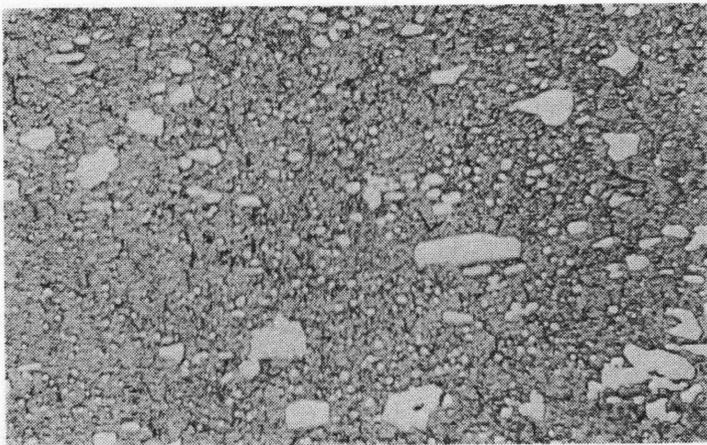
図7 YXM1 の引張試験による破面

表2 供試材 CRD の化学成分 (%)

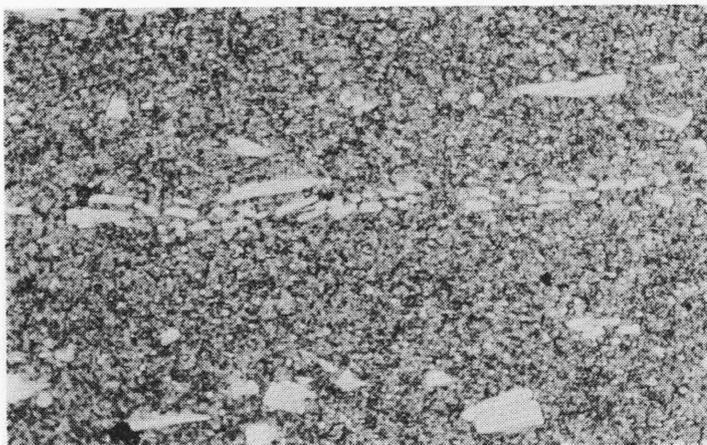
成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
供試材								
CRD	2.08	0.25	0.46	0.020	0.001	0.06	12.60	0.01



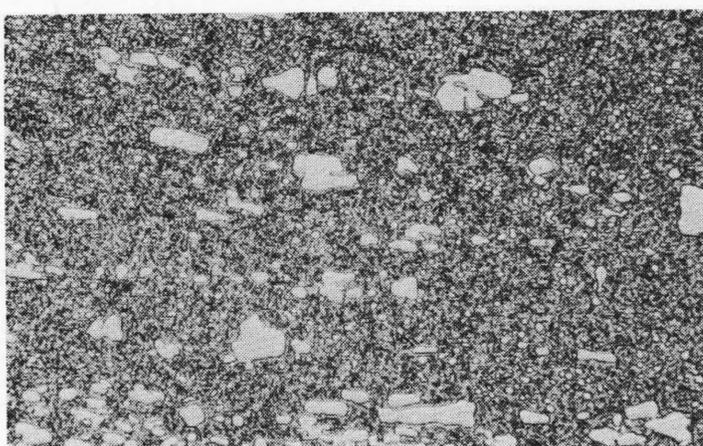
焼入のまま



300°C 焼もどし



500°C 焼もどし



700°C 焼もどし

図8 供試材 CRD のマイクロ組織 (×400)

常の延性材の荷重・伸び曲線であり、図14(b)は高硬度工具鋼の場合の多くのそれである。

本報で取り扱った工具鋼でも、比較的かたさの低い領域、すなわ

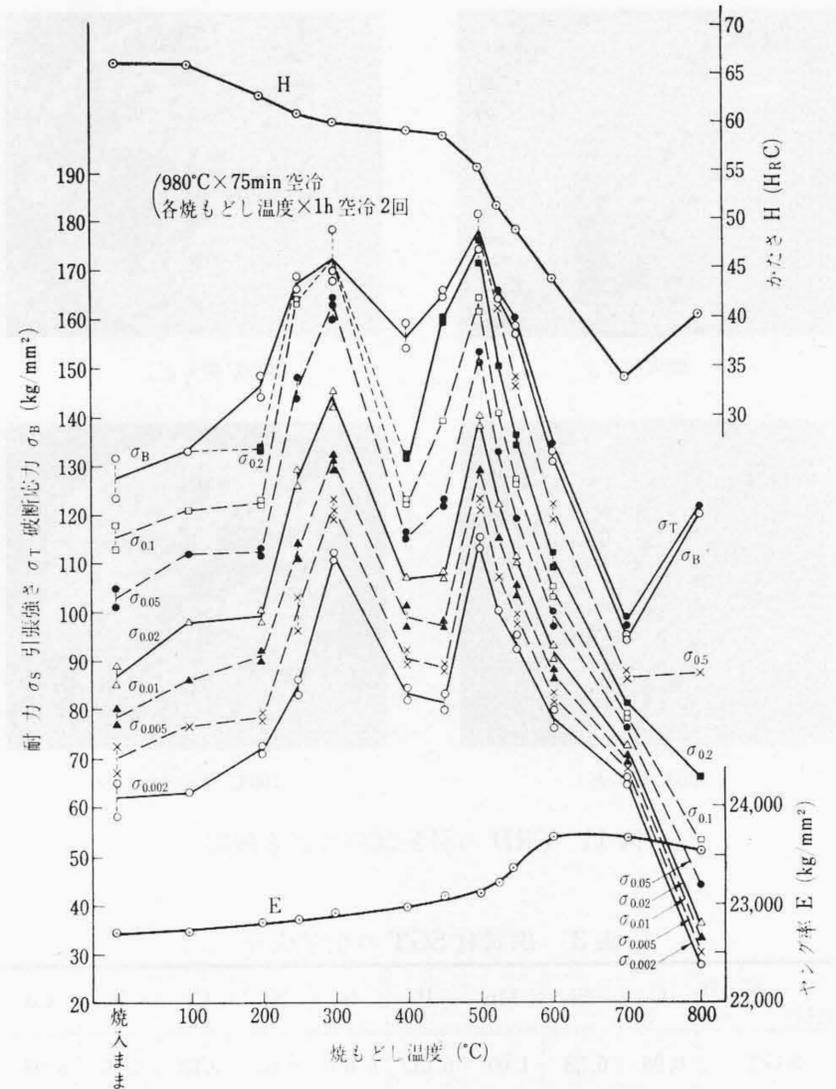


図9 CRD の引張試験結果 (I)

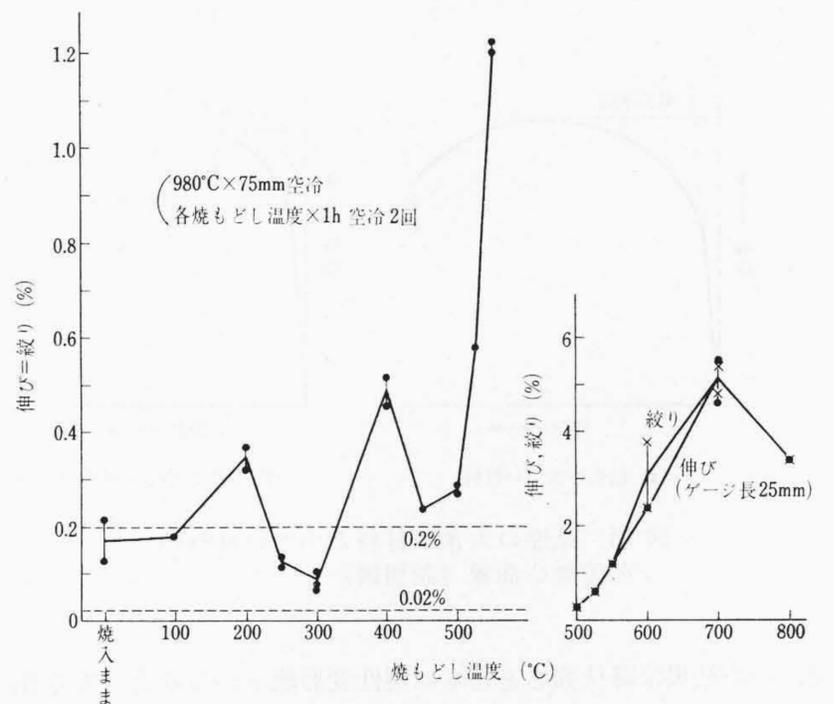


図10 CRD の引張試験結果 (II)

ち YXM1 は 700°C 焼もどし、CRD は 600~800°C 焼もどし、SGT では 500°C 焼もどしにおいては、図14(a)のように最高荷重より破断荷重が低く、局部的くびれが生じ、伸びおよび絞りも大きい。ほかの焼もどし温度においては、図14(b)のようであって、最高荷重と破断荷重は等しく、局部的くびれはなく、伸びおよび絞り(この場合は伸び=絞り)も小さい。

このように、図14(a)に示すような挙動をする延性に富む材料の引張強さは、局部的くびれの開始点における“降伏強さ”と解釈されるが、図14(b)のようなものでは、引張強さはむしろ“破断強さ”と解釈すべきものである。

#### 4.3 引張性質に及ぼす焼もどし温度の影響

引張強さは前述したように、破断強さの意味をもつものが多いの

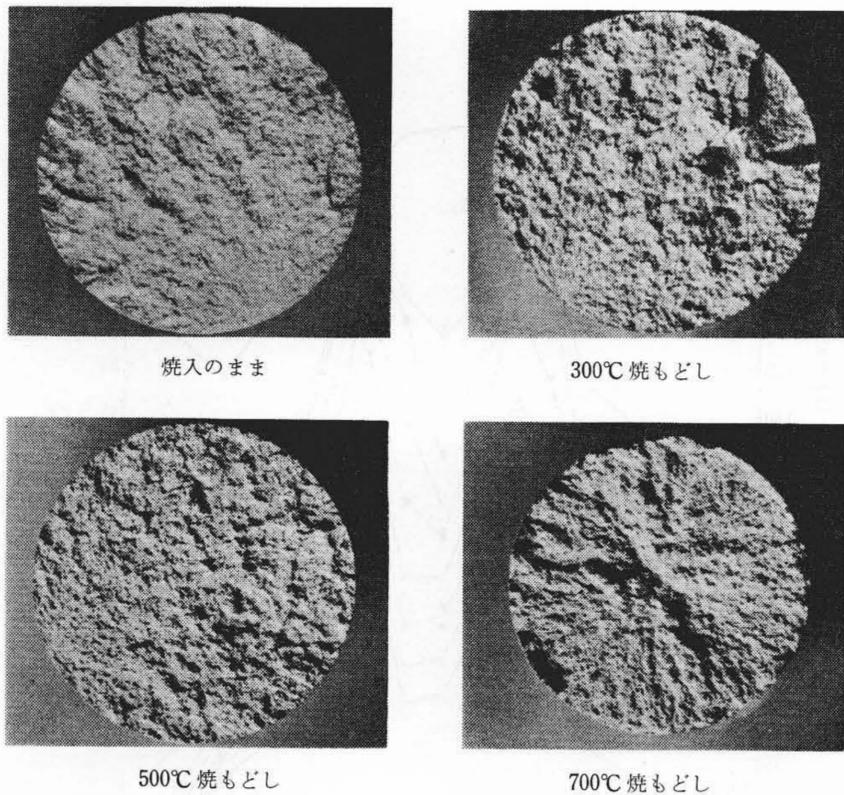


図11 CRDの引張試験による破面

表3 供試材SGTの化学成分

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Cu
供試材 SGT	0.96	0.28	1.00	0.017	0.010	0.04	0.63	0.69	0.08

素材：24φ  
熱処理：825°C×75min 油冷+各温度×1h 空冷2回

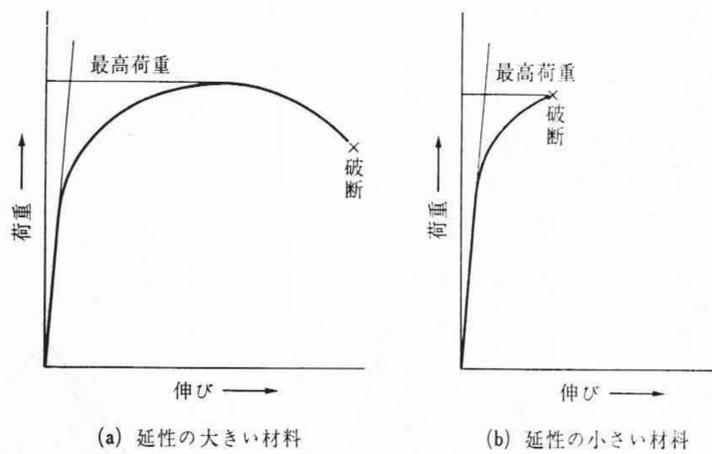


図14 延性の大きい材料と小さい材料の荷重伸び曲線(説明図)

で、その結果は降伏強さとともに塑性変形能がからみ合ってくる。おのおのの鋼種で最大の引張強さを示すのは、YXM1で580~600°C、CRDで300°Cおよび500°C、SGTで300°C焼もどしである。これらの焼もどし温度では、降伏強さも高く、CRDの300°C焼もどしを除いては、塑性変形能が急増し始める点にある(0.3~0.4%伸び)。これらの焼もどし温度以下の焼もどしでは延性は低い。

300°C以下の焼もどしでは、焼もどし温度が高くなるに従って、かたさは低下するにもかかわらず、引張強さ、耐力ともに高くなる。引張強さの焼もどし温度の上昇に伴う上昇は、焼もどしが進むに従ってマトリックスのマルテンサイト構造的に粘くなるためと思われる。CRDの250~300°C、SGTの250°C焼もどしで、伸びが小さいのは低温焼もどし脆(ぜい)性の現われであろう。

低温焼もどしにおいて、焼もどし温度の上昇とともに耐力が上昇するのは、すでに報告されており<sup>(1)</sup>、残留応力が焼もどし温度の上昇とともに小さくなるためとされている<sup>(1)</sup>。CRDで800°C焼もどしは一部焼入れされている。この場合には延性がかなりあるため、

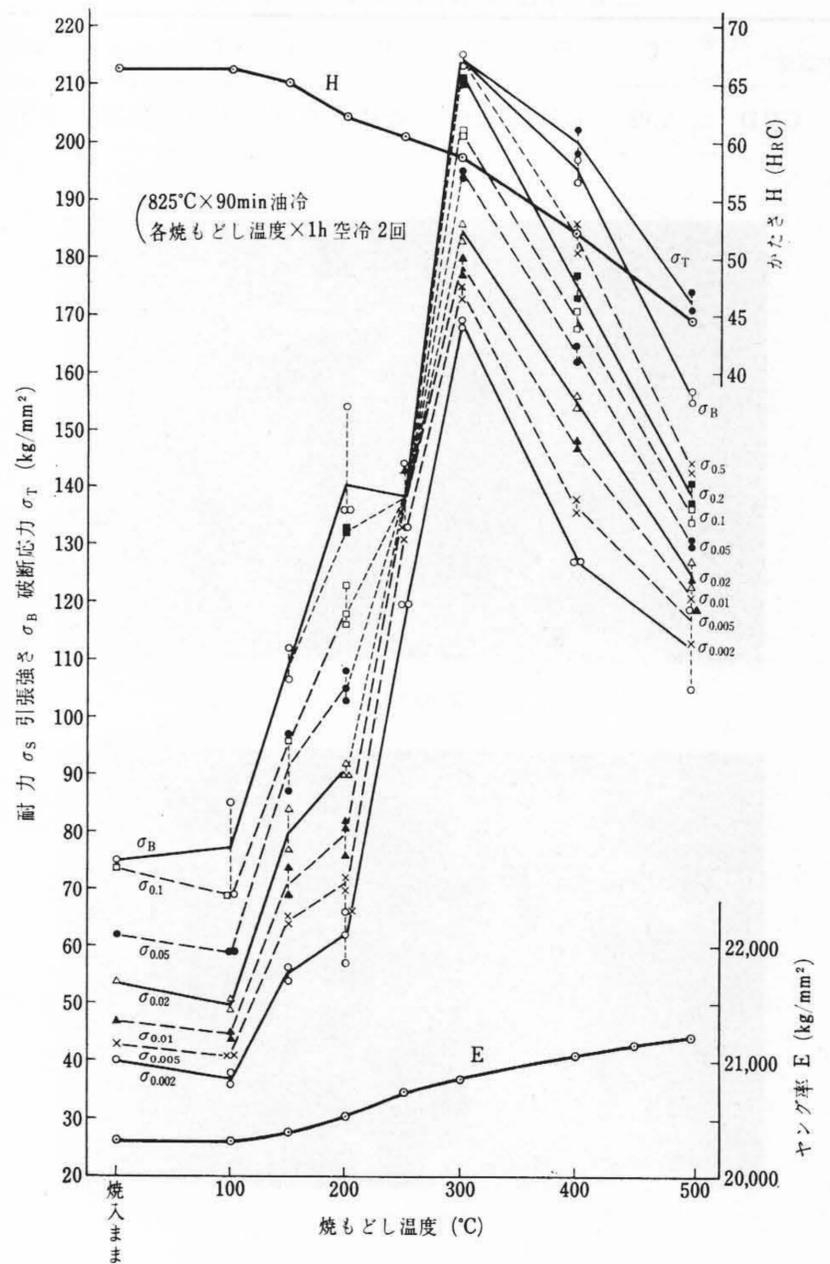


図12 SGTの引張試験結果(I)

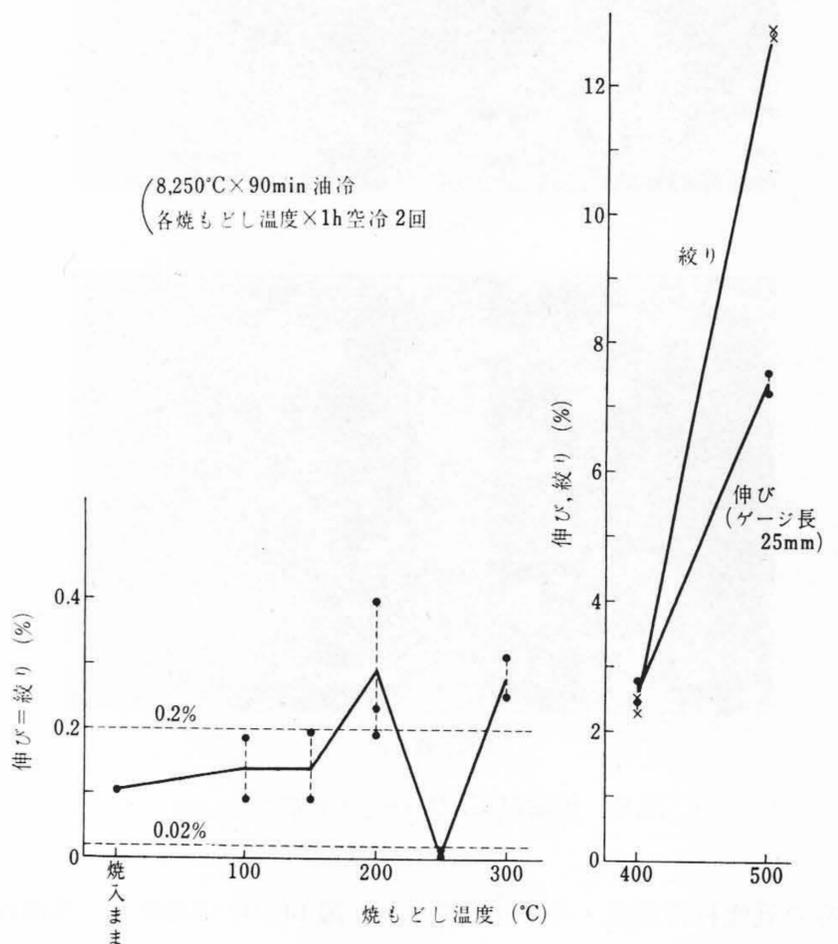


図13 SGTの引張試験結果(II)

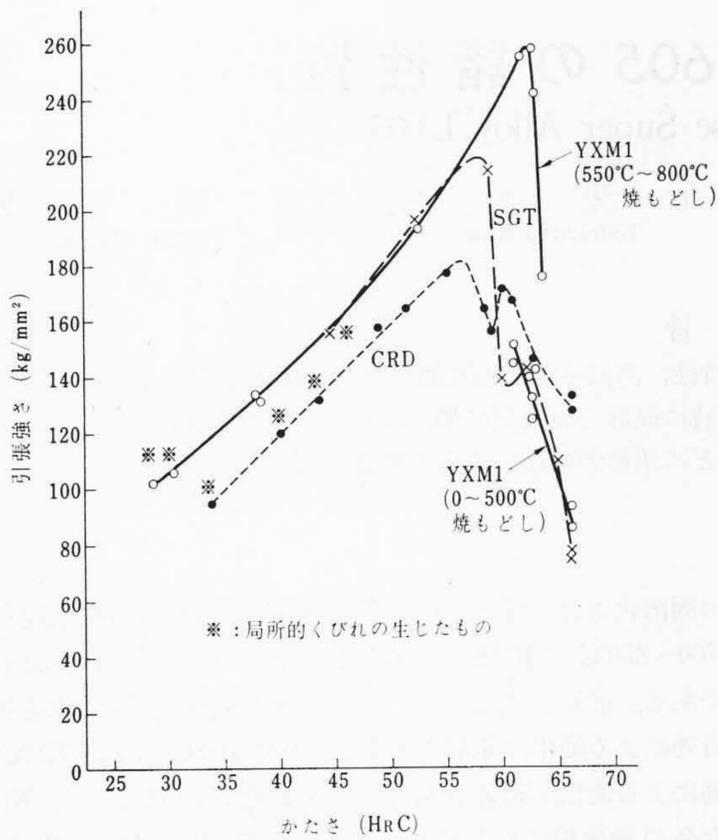


図 15 引張強さとかたさの関係

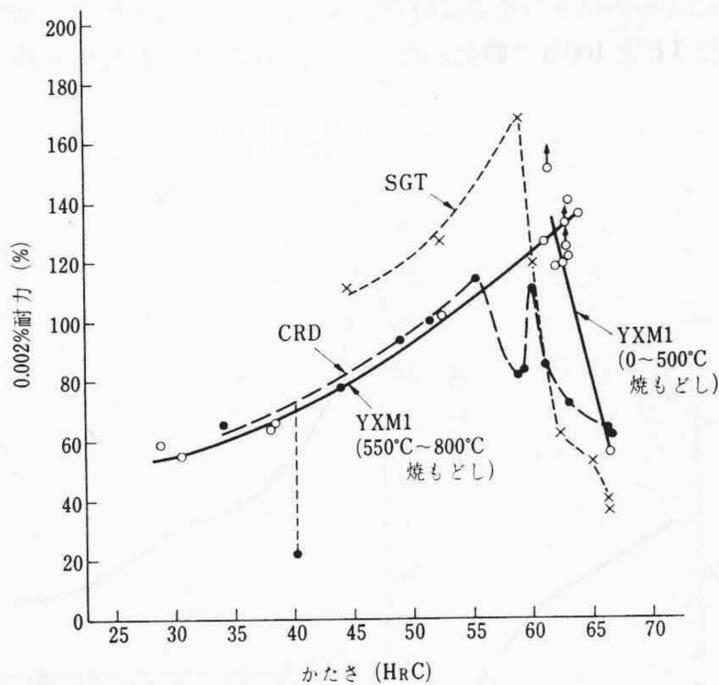


図 16 0.002% 耐力とかたさの関係

引張強さはかたさと類似した挙動を示すが、耐力、とくに小さい塑性変形に対する耐力は非常に低い。このように焼もどしをあまり受けていないマルテンサイトの存在は、そのマルテンサイトそのものの性質か、あるいはその存在のために誘発する残留応力のためか、耐力は低く測定される。

YXM1の580~600°C以上、CRDの500°C以上、SGTの300°C以上の焼もどしでは、炭化物の凝集に伴って、かたさ、引張強さ、耐

力ともに低下し、延性は増大する。

YXM1の300~580°CとCRDの300~500°C焼もどしの挙動は必ずしもじゅうぶんな理解はできていない。残留オーステナイトの分解、それに伴うマルテンサイトの発生、炭化物の析出・凝集などがからみ合っかなり複雑である。

#### 4.4 強さとかたさ

工具鋼では、その性質を検討するにかたさを基準とすることが多い。したがって、かたさとの関連をみておくことはむだではない。

図15には引張強さを、図16には0.002%耐力(比例限に近い)をかたさで整理した。

これらの関係のおよその傾向は、かたさの低い側ではかたさとともにそれらの強さは上昇し、かたさの非常に高いところでは、逆にかたさの上昇とともに強さの低下がみられる。それぞれの強さのピークを示すかたさが存在する。しかしながら、それらの関係は必ずしも単純なものではなく、それぞれの焼もどし温度に伴う特異性も現われている。

#### 4.5 破 面

引張試験後の試験片の破面観察によると、延性の非常に小さいものでは、破壊の起点は周辺に近い一点から生じている場合が多い。延性の大きなものでは中心部に起点があり、周辺にはシャリップが認められる。

### 5. 結 言

従来ほとんど行なわれていなかった高硬度工具鋼についての引張試験を試みた。その結果、次のことが判明した。

- (1) 非常に応力集中の少ない試験片を用い、引張速度を非常に遅くすることによって、引張試験は可能である。
- (2) ひずみ測定にひずみゲージを使用することによって、非常に小さい塑性変形に対する耐力もつかむことが可能である。
- (3) ヤング率は焼もどしが進むほど上昇し、また合金炭化物の多い鋼種ほど高い。
- (4) 引張性質は、焼もどし温度との関連において、塑性変形能が急増し始める点で、耐力、引張強さともにピークを生ずる。これはYXM1で580~600°C、CRDで500°C、SGTで300°C焼もどしである。またCRDでは300°C焼もどしでも耐力・引張強さは高い。
- (5) ほとんど焼もどしを受けていないマルテンサイトの存在は、とくに小さい塑性変形に対する耐力を低くする。
- (6) 引張性質とかたさとの関連において、引張強さ、耐力のピークを示すかたさが存在する。
- (7) 延性の非常に小さいものでは、周辺に近い一点から破断する場合が多い。

#### 参 考 文 献

- (1) H. Muir, B. L. Averbach and M. Cohen: Trans. A. S. M. 47, 380 (1955)