

技術報告

高硬度鋼の強度, 靱性評価*

森 本 忠 興**

Strength and Toughness Evaluation of a High Hardness Steel

Tadaoki MORIMOTO

Synopsis:

The strength and toughness of a low alloy steel (0.8% carbon), quenched from 850°C and tempered at various temperatures below 600°C, have been investigated by static and dynamic bend tests and static torsion tests. The effect of notch radius on bend properties has also been studied. The results obtained in this study are summarized as follows: (1) The plastic deflection in the static bend test or the impact value decreases exponentially with increasing the stress-concentration factor "α" at the notch root. (2) The appearance of low temperature temper brittleness is markedly affected by test methods, that is, it appears at relatively low tempering temperatures and the embrittlement is more clearly observed in unnotched dynamic bend or static torsion tests than in static notched and unnotched bend tests. (3) An optimum hardness is observed on the fracture strength versus hardness curve in both bend and torsion tests.

(Received May 26, 1970)

1. 結 言

炭素工具鋼, 合金工具鋼, 高炭素低合金鋼など高硬度で脆弱な鋼の強度, 靱性は通常静的には曲げ, 振り試験を, 動的には衝撃曲げ, 衝撃振り試験を用いて調べられている。特に曲げ試験は試験片の加工や試験の実施が比較的簡単なため, 試験片の断面形状や切欠きの有無, 荷重負荷方式などの試験条件について種々の工夫がなされている。一方これらの試験から得られる強度特性はしばしば硬さによつて整理される。これは同一の合金系においてはほかの因子が若干変動してもこのような整理を行なうことによつて強度特性がほぼ一定のバンドに収まることに基づく実用的ないし便宜的手段であると考えられるが, この硬さ-強度曲線において多くの場合一定硬さ以上で強度が急激に低下する現象(以下最適硬さ現象と称す)が認められている。MORROW らはおもに破壊強度にみられるこの現象は試験片内の応力状態, 破壊様式およびこれらと関連する材料の強度などの相互関係に依存するという指摘を行なっている²⁾。このことは一定の試験法に属する諸強度特性には本来問題にすべき材料強度のほか試験法に依存する力学的要素が含まれているということである。

本研究では本質的に焼もどしマルテンサイト基地より

成る高炭素低合金鋼について静的ならびに衝撃曲げ試験, 静的振り試験を行ない, それらから得られる諸強度特性を比較検討するとともに, 高硬度鋼の強度, 靱性の評価法について考察する。また曲げ試験片(静的, 衝撃)に切欠きを設ける意義, 静的振り特性におよぼすひずみ速度の影響についても検討した。

2. 試料の調整

Table 1 は供試鋼の化学組成を示す。塩基性電弧炉で大気中溶製された 5 t 鋼塊の一部を 150 φ に鍛伸し, A_{cl} 点直上に 10 hr 保持後徐冷して球状化焼なましを行なつた。この素材からそれぞれの実験目的に沿つて Table 2 に示す所定の試験片に加工し, 850°C × 2hr 管状電気炉 Ar 気中でオーステナイト化したのち 30°C の油に焼入れ, 焼もどしはおおむね 50°C 間隔で 600°C 以下の温度に 2 hr 油またはソルト中で加熱後空冷した。切欠き溝は熱処理後組織変化を起こさないよう十分注意して研削加工し, 平滑試験片については切欠き試験片の最小断面と等しくなるようにその 1 面を研削仕上げした。また振り試験片についても熱処理後直径で 0.3 mm

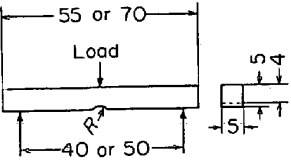
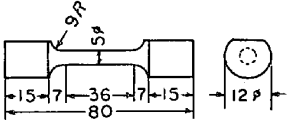
* 昭和45年4月本会講演大会にて発表
昭和45年5月26日 受付

** (株)日立製作所 日立研究所

Table 1. Chemical compositions of steel used (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.84	0.54	0.33	0.007	0.007	0.03	0.08	2.20	0.23	0.05

Table 2. Specimen.

Test	Specimen (mm)	Notch radius (mm)	Purpose
Static bending		$R=0.25, 1, 2, 5, 10$ and unnotched	To investigate the effects of notch radius on bend properties
		$R=0.25$ and unnotched	To investigate the changes in static and dynamic bend properties with tempering
Dynamic bending	JIS No 1 & No 3 impact specimens were used and notch radius was only varied	unnotched	To investigate the effects of notch radius on the impact values 17 kgm Izod and 30 kgm Charpy tests
		$R=0.25, 1, 2, 10$	
Static torsion		unnotched	To investigate the changes in torsion properties with tempering

研削仕上げし，所定の寸法とした。

3. 実験方法

静的曲げ試験は Table 2 に示した要領で試験片に 3 点支持曲げ変形を与えた。各支点には半径 2 mm の曲率をもたせてある。負荷速度は弾性限内ではほぼ 10 kg/sec とした。たわみにはクロスヘッド移動距離をとり，レコーダーに記録された荷重—たわみ曲線（たわみ倍率：65 倍）から曲げ強度（破断または最大荷重），降伏強度（塑性たわみ 0.1 mm に対応する荷重），破断たわみ，吸収エネルギーなどを求めた。たわみについては必要に応じてその弾，塑性変形部分および全たわみなどを区別して示した。同一条件で 4 本を試験し平均値と標準偏差を求めた。破断後，個々の試験片につきロックウェル硬さを測定した。

衝撃曲げ試験は 17 kgm アイゾット，30 kgm および 5 kgm シャルピー試験機を用い，JIS に準じて試験した。ただし 5 kgm シャルピー試験には静的曲げ特性との比較を容易にするため Table 2 に示したように縮小型平滑試験片を用いた。試験片数などは静的曲げと同様である。

静的振り試験には島津製低速振り試験機を用いた。本機は定ひずみ速度が得られるよう回転速度制御機構をも

ち，試験片段階で 0~0.8 rpm の調節が可能である。ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) は回転速度もしくは試験片の d/l (d : 直径， l : 標点距離) により変えられるが，本実験では前者の方法に従い $\dot{\gamma}=7.5 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ (0.01 rpm)， $7.5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ (0.1 rpm)， $6.0 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ (0.8 rpm) で試験し，振り特性におよぼすひずみ速度の影響を検討した。X-Yレコーダーに記録されたトルク—振り角曲線から諸強度特性を求めた。降伏強度には 0.4% 塑性ひずみ (3.6° 塑性振り角) に対応するトルクをとった。同一条件で 5~6 本を試験し，その平均値と標準偏差を求めた。ひずみ速度の影響の有無についてはシュメントの t 分布により信頼限界 95% で統計的検定を行なった^{3),4)}。破断後試験片のつかみ部で硬さを測定し，さらに破面の観察から個々の試験片につきその破壊様式を分類した。

なおいずれの試験も室温で実施した。

4. 実験結果ならびに検討

4.1 静的曲げ特性，衝撃値と切欠き半径の関係

Fig. 1 はそれぞれの切欠き半径について曲げ強度および全たわみと硬さとの関係を示す。硬さの上昇に伴い強度は増大し，一定の硬さで最大値を示したのち減少しはじめいわゆる最適硬さ現象が認められるが，切欠きが鋭い場合には最適硬さは低硬度側に移行する。後述するよ

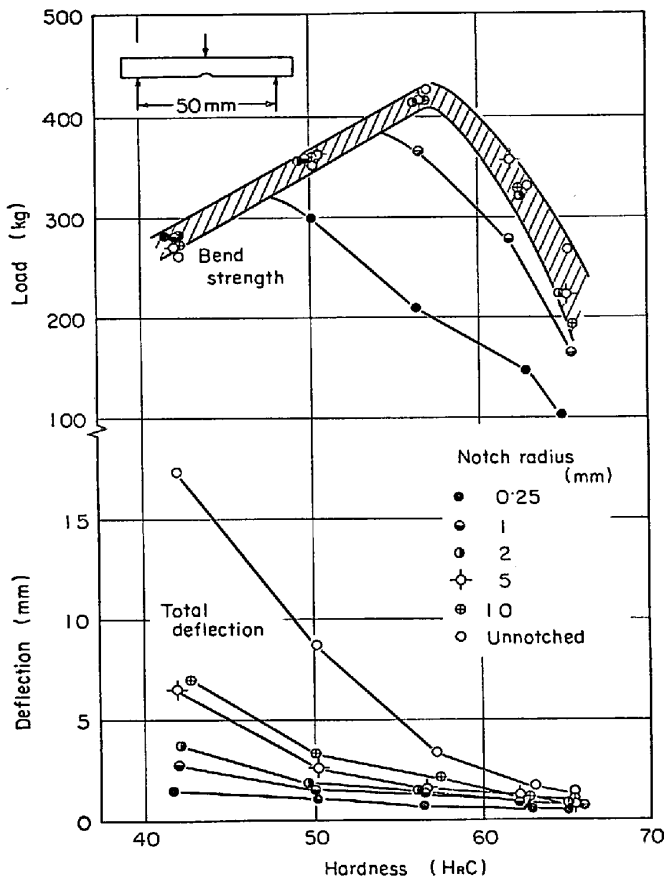


Fig. 1. Bend properties versus hardness for various notch radii.

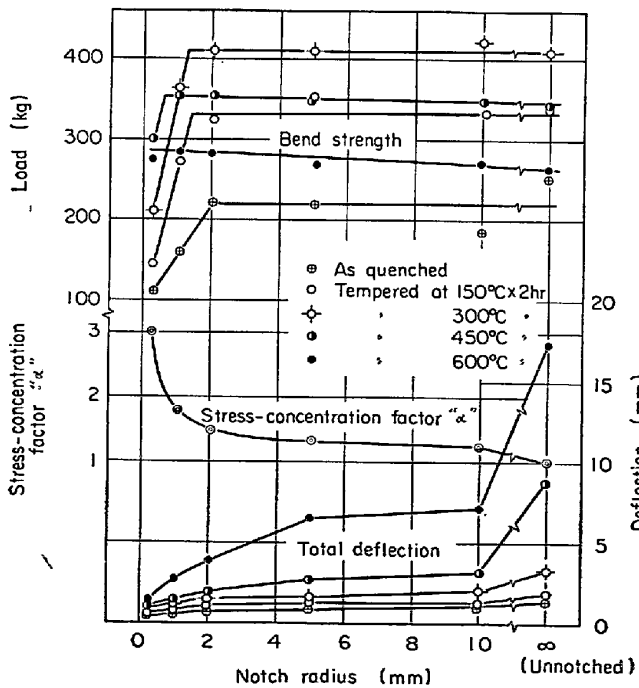


Fig. 2. Effect of notch radius on bend properties and stress-concentration factor "α".

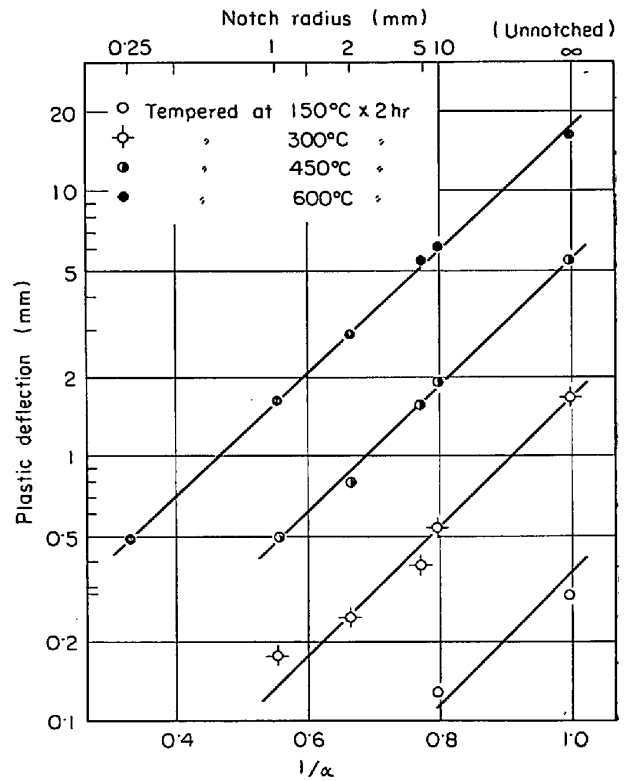


Fig. 3. Relationships between plastic deflection in static bend and reciprocal of stress-concentration factor "α".

うに最適硬さより低硬度側では材料のせん断破壊強度を、また高硬度側ではへき開破壊強度を示しているものとするれば、本図は切欠きを設けたことによつて一定硬さでのへき開強度が低下しせん断破壊強度はそれほど影響を受けないことを示している。一方たわみは硬さとともに一様に減少するが、切欠きの鋭い場合のその変化は非常に小さい。Fig. 2は切欠き半径 (R) について整理した結果でそれぞれの応力集中係数 (α) の値もプロットした。強度と R との関係は硬さあるいは焼もどし状態によつて一様ではなく、低温焼もどしの場合には R の変化に伴う強度の変化は R が小さい範囲で急上昇するが $R > 2$ mm ではほぼ一定値を示すようになる。このような変化は α の変化と逆方向によく対応している。焼もどし温度が高い場合は R にはほとんど無関係となり、むしろ切欠き強化の傾向が認められる。またたわみは R の増大に伴い漸次増大の傾向を示している。今 $1/\alpha$ に対して塑性たわみ δ を対数目盛でプロットすると Fig. 3 に示すように硬さや焼もどし状態には無関係に両者間にはよい直線関係が認められ、この関係は $\delta = A \exp(B/\alpha)$ で表わされる。ここに A は材料の硬さあるいは組織状態に依存する定数であるが、 B はそれらの影響の少ない定数である。

つぎに Fig. 4 に 30 kgm シャルピー試験機によつて得られた衝撃値と硬さの関係を示す。17 kgm アイゾット試験機による結果は本図とほぼ同様なので省略した。図から明らかなように衝撃値は静的曲げの全たわみ

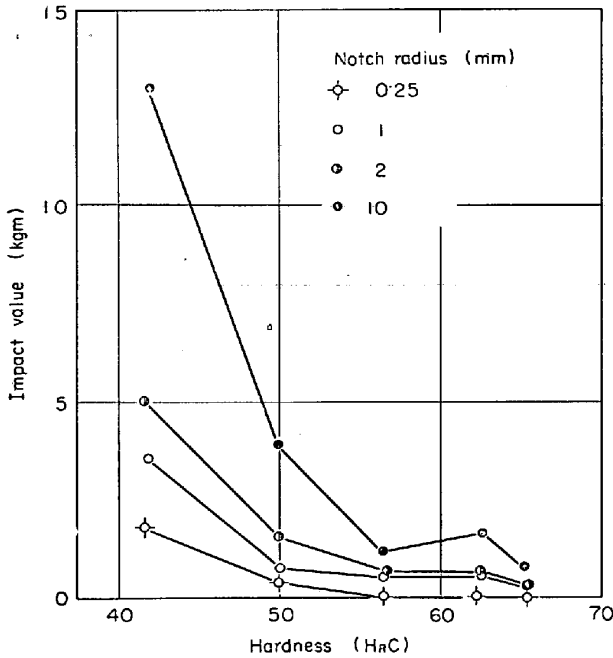


Fig. 4. 30 kgm Charpy impact value versus hardness for various notch radii.

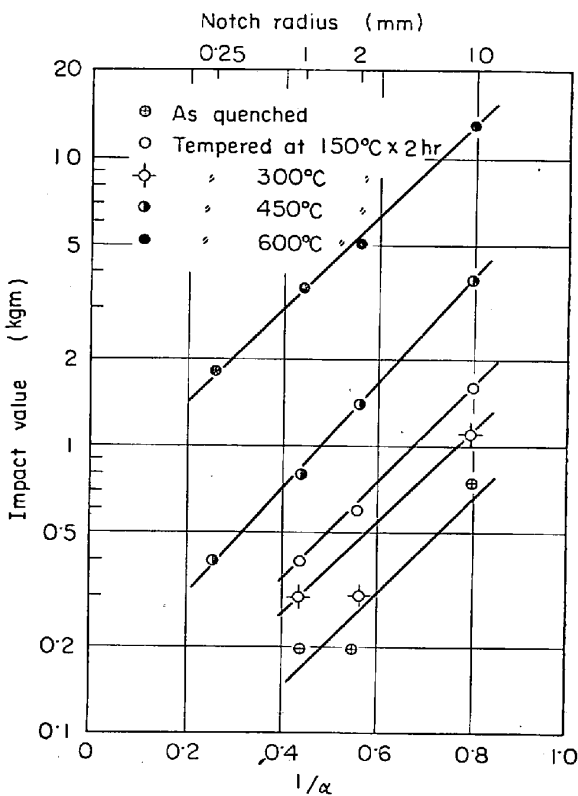


Fig. 5. Relationships between 30 kgm charpy impact value and reciprocal of stress-concentration factor "α".

(Fig. 1) と同様の傾向を示している。Fig. 5 は衝撃値を対数目盛で $1/\alpha$ に対してプロットした結果であるが、Fig. 3 と同様に両者間にはよい直線関係が認められる。

4.2 焼もどしに伴う諸強度特性の変化

4.2.1 静的曲げ特性ならびに衝撃値

平滑試験片による焼もどし温度と静的曲げ特性ならびに衝撃値との関係を Fig. 6 に示す。測定値のばらつきを目安として標準偏差を示してあるが、弾、塑性たわみについては図の複雑化を避けるために省いた。本図の結果はつぎのように要約される。

- (1) 曲げ強度は 200°C 以下の低温焼もどし範囲で変化が大きく、100°C、250°C で脆化が認められ、350°C 以上ではほぼ直線的に低下し、ばらつきも小さい。
- (2) 100°C 以下では降伏以前に破断する。250°C で降伏強度の不連続な上昇がみられるほかは全く連続的な変化である。350°C 以上で降伏比は一定値 0.80 ± 0.01 を示す。
- (3) 全たわみに占める弾性たわみの割合は小さく、したがって全たわみと塑性たわみとは同様の变化を示し、焼もどし温度とともに漸次増大するが 250°C、500°C において不連続な低下がみられる。

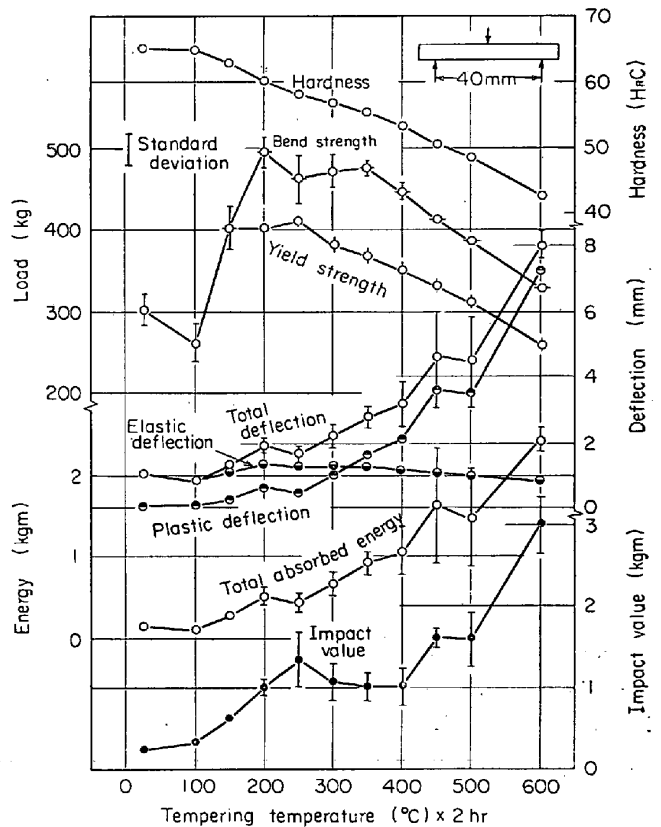


Fig. 6. Static bend properties, 5 kgm charpy impact value and hardness versus tempering temperature (unnotched specimen).

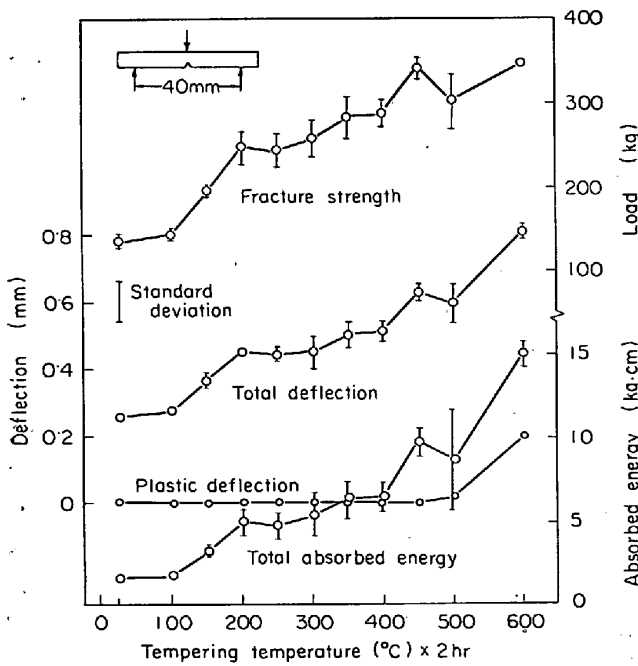


Fig. 7. Bend properties versus tempering temperature (0.25R notched specimen).

(4) 全吸収エネルギーは全たわみ量と対応した変化をし、このことは吸収エネルギーへの強度の寄与がたわみのそれに比較し相対的に小さいことを示している。

(5) 衝撃値 (5 kg m シャルピー試験機による) は 250°C で極大値を示したのち 300°~400°C で大きな低下がみられる。400°C 以上で衝撃値は急増するが 500°C に若干の脆化がみられる。

つぎに 0.25R 切欠き試験片による焼もどし温度と静的曲げ特性との関係を Fig. 7 に示す。すべての曲げ特性が焼もどしの進行に伴い相似的に変化しているが、これは塑性たわみが 500°C 焼もどしにいたるまで 0 であることからわかるように荷重-たわみ曲線が比較的高温焼もどしの場合でも直線であること、すなわち試験片が破断にいたるまでマクロ的に弾性変形し、たわみや吸収エネルギーが強度と比例して変化するためである。脆化は 250°, 500°C で起こっており平滑試験片の場合と同様である。

4.2.2 静的振り特性

Fig. 8 に静的振り特性と焼もどし温度との関係を示す。150°C 以下の焼もどしでは一部の曲線が 2 本の破線に分離しているが、これは統計的検定の結果ひずみ速度の影響が認められたことを示す。長破線は $\dot{\gamma} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ を、また $\dot{\gamma} = 7.5 \times 10^{-4}, 6.0 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の両ひずみ速度においては互いに有意差がないとみなされたので両者を一括し、その平均値を短破線で示した。150°C 以上の焼もどしでは 3 者すべての間に有意差が認められ

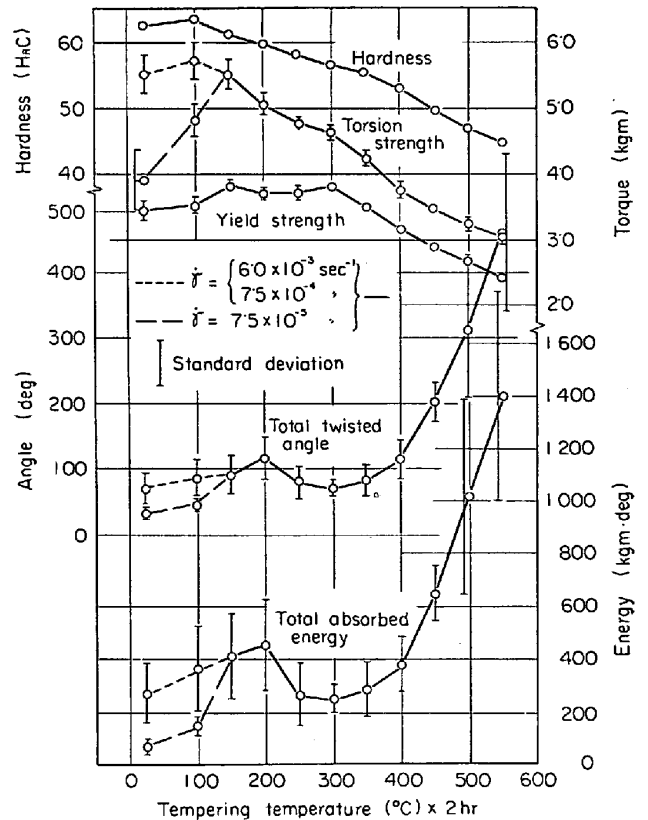


Fig. 8. Torsion properties versus tempering temperature.

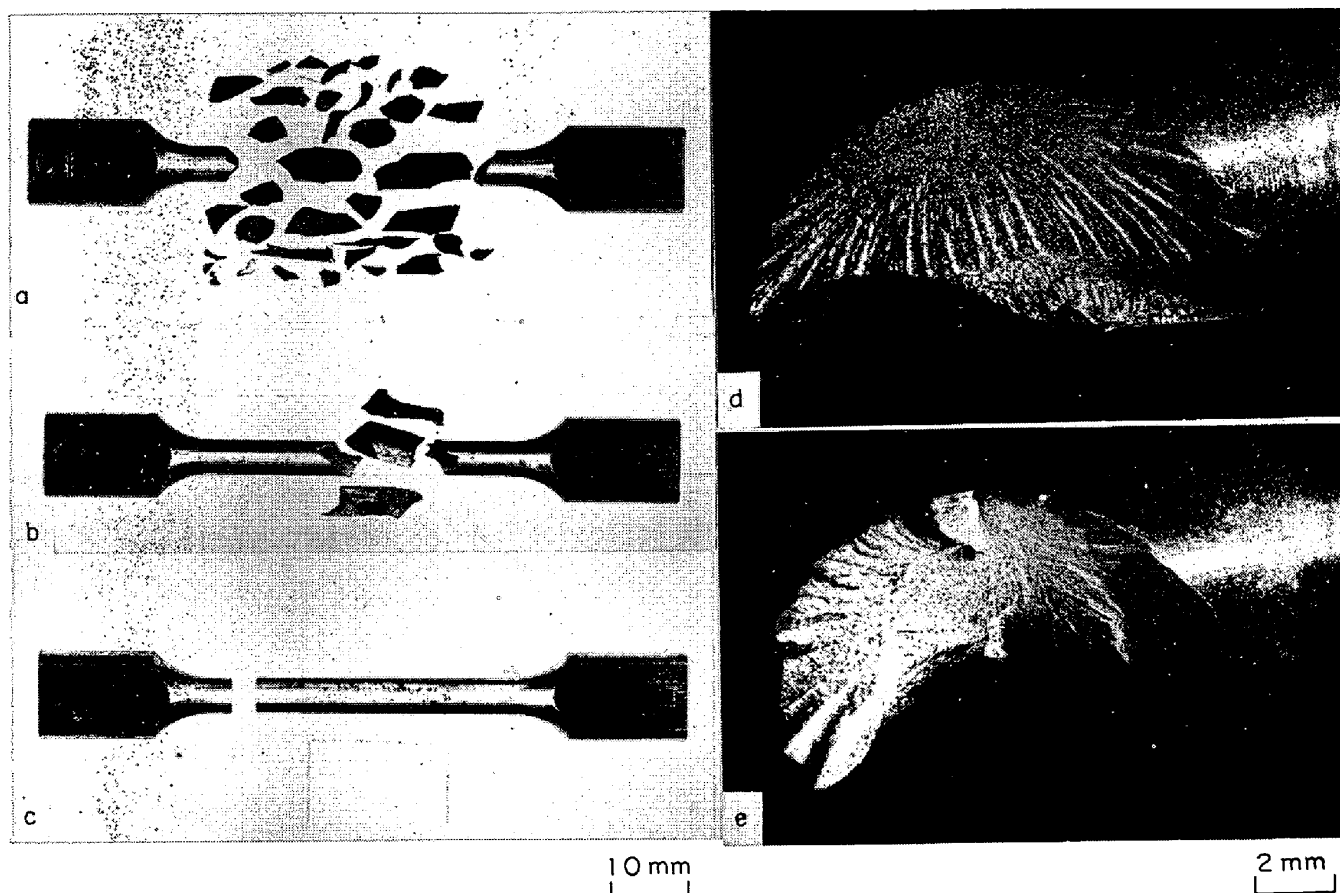
なかつたので、これらを一括し改めて全体の平均値を求め実線で示した。ひずみ速度に関する以外の本図の結果はつぎのように要約される。

(1) 振り強度は焼もどし温度 150°C までは急上昇し、以後連続的に低下する。300°±100°C の範囲で曲線上にわずかなふくらみがみられる。ばらつきは 200°C 以上では非常に小さい。

(2) 降伏強度は 150°, 300°C に明りようなピークを示す。300°C 以上では連続的に減少し、降伏比は一定値 0.83 ± 0.01 を示す。ばらつきはすべての振り特性のうちで最小である。

(3) 全振り角、同吸収エネルギーは同様の変化をたどり、300°C を中心として顕著な脆化を示す。

つぎに $\dot{\gamma}$ の影響は 150°C 以上の焼もどしでは全く認められない。これは変化させた $\dot{\gamma}$ が $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ と比較的小範囲にあること、測定値の分散が大きいため小数の試験片では強度特性の差を精度よく検出できないためと思われる。しかし 100°C 以下の焼もどしで降伏強度以外の振り特性が影響を受けており、 $\dot{\gamma}$ の大きい方が諸特性は高い。ところでこの現象は引張り特性などにみられるひずみ速度依存性とはつぎのように異なっている。(1) 一般のひずみ速度依存性は降伏強度と塑性強度



(a): Typical example for high hardness levels (As quenched).
 (b): Typical example for middle hardness levels (Tempered at 200°C).
 (c): Typical example for low hardness levels (Tempered at 500°C).
 (d): Fracture started in cleavage mode in the plane declined by 45 deg. to the specimen axis (As quenched).
 (e): Fracture started in shear mode in the plane parallel to the specimen axis and changed to the cleavage mode (Tempered at 150°C).

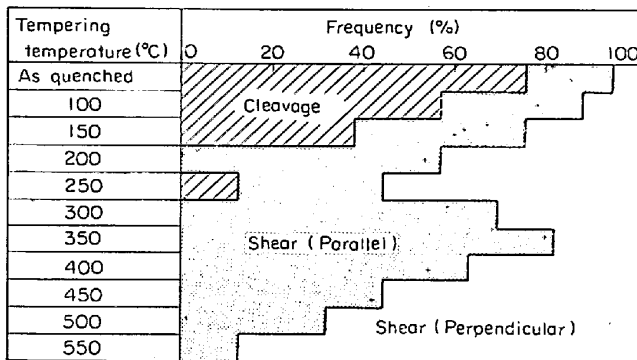
Photo. 1. Fractures of torsion specimens.

の双方に現われるのに対し本結果は降伏強度には認められない。(2) 100°C 以下の低温焼もどし温度すなわち高硬度域でしか認められない。そこで本結果については破壊における時間感受性の現われと解釈するのが妥当のように思われる。 $\dot{\gamma}$ が小さい場合は低応力状態で長時間さらされてそこで破壊発生に遭遇する確率が高いのに対し、 $\dot{\gamma}$ が大きい場合には低応力域は短時間に通過し、より高応力状態にいたって破壊発生確率が高くなるであろう。この点を明確にするには定応力負荷試験を行ない、破壊発生時間を測定すればよいが、一般の試験ではばらつきを表わす変動係数(標準偏差/平均値)において観察される。変動係数は硬くて脆い材料で大きいことも本論題の1つである。

4.3 破面の観察

まず振り試験片につきその破片ならびに破面を観察した。Photo. 1はその代表例を示す。焼もどし温度が低い場合には大部分(a)に示すように多数の小破片に粉碎され、焼もどし温度が上昇し低硬度になると(b)のよ

うに高々数個の破片になるか、もしくは(c)のように試験片の軸に垂直な面(τ_{\max} の作用面)でせん断破壊する。(a)や(b)の場合についてさらに詳細に観察すると破片のどの部分にもせん断き裂を含まず軸と45°の傾きを成す面(σ_{\max} の作用面)でへき開破壊している例;(d)、破片の一部に軸を含み軸と平行な面(τ_{\max} の作用面)にせん断き裂を有する場合;(e)とに区別された。(d)や(e)はたまたま小破片に粉碎されなかつた例であり、(e)はせん断き裂が一定の大きさに成長したのちへき開破壊に転化したことを示している(この破壊様式をshear (parallel)と称す)。一方軸に垂直な面でのせん断破壊(この破壊様式をshear (perpendicular)と称す)については途中でへき開破壊に転化する例は非常にまれであつた。Fig. 9はこのようにして個々の試験片の破壊様式を分類した結果で、ごく一部でもせん断き裂を含む場合はすべてせん断破壊とした。この場合 $\dot{\gamma}$ の相違は無視したが低温焼もどし時に多くみられるへき開破壊は $\dot{\gamma}$ が小さい場合にその頻度が高い。図で

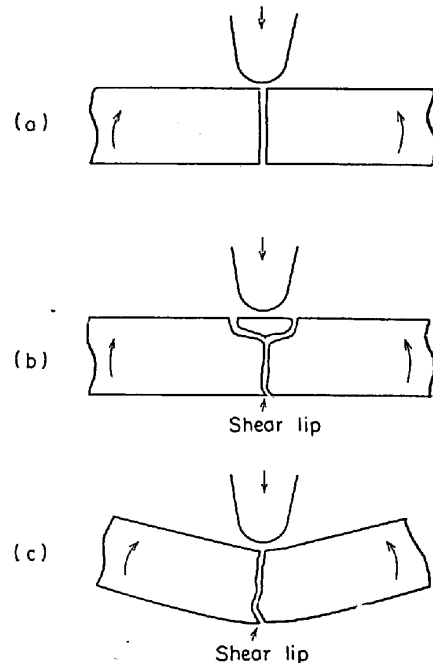


Cleavage: shown in (a) or (b) of Photo. 1, Shear (Parallel): shown in (b) or (e) of Photo. 1, Shear (Perpendicular): shown in (c) of Photo. 1.
Strain rates were not distinguished in this classification, however, cleavage mode was often observed in low strain rates. In both shear modes there was no difference due to strain rates.

Fig. 9. Classification of fracture modes of torsion specimens.

明らかなように低温焼もどし時にへき開破壊が多く、200°C 以上では大部分せん断破壊である。これは焼もどし温度が上昇し硬さが低下すると材料のせん断破壊限界強度よりもへき開破壊限界強度のほうが高くなるためと思われる。またせん断破壊のうち shear (parallel) と shear (perpendicular) とについては図に示すように焼もどし温度が高い場合に後者が支配的になる傾向がみられる。 τ_{max} は両面に共役に作用しているが shear (perpendicular) はせん断単独の破壊様式で破壊が完成しうるのに対し shear (parallel) は途中でき裂進展方向を変えへき開破壊に転化しない限り試験片は破断しえない。したがって上述の変化は焼もどし温度が上昇すると材料のへき開強度が上昇し、せん断き裂からへき開き裂への転化が困難になるからであろうと推察される。

つぎに曲げ試験片の破面について同様の観察を行なった。Fig. 10 に各焼もどしにおける破壊状況の代表的パターンを示すように、低温焼もどし (高硬度) の場合には (a) のごとくき裂は試験片引張り側の表面から垂直にはいりそのまま直進して破断にいたっているが、まれに中立面を通過したのちき裂進路がやや曲げられる場合もある。これはき裂発生位置が中央押し治具の中心線からはずれている場合であり、き裂の進展に伴って最大応力の作用している方向にその進路が曲げられるためでこの種の破壊における本質的な現象ではない。曲げの場合試験片の軸に垂直な面に σ_{max} (引張り側の表面で最大) が作用しているのでこの破壊は σ_{max} によりへき開破壊が発生したものと考えられる。250°C~400°C 間では (b) に示すように T 型破断をし、破片は 3 個に分離する (T 型破断は 200°C 以下の低温焼もどし時でも起こること



(a): Typical example for high hardness levels (Tempered at temperatures below 200°C), (b): Typical example for middle hardness levels (Tempered at temperatures between 250°C and 400°C). (c): Typical example for low hardness levels (Tempered at temperatures between 450°C and 600°C).

Fig. 10. Fractures of unnotched static bend specimens.

がある)。この場合破面を注意深く観察すると引張り側の面および両側の側面と破面とによって構成される3つの稜線に非常に小さな shear lip が認められる。shear lip で囲まれた内側は脆性破面を呈している。この型の破壊はまず τ_{max} によりせん断き裂が発生 (shear lip の形成) し、途中でへき開破壊に転化して破断にいたつたものと推察される。曲げの場合 τ_{max} の作用面にも引張り応力 ($\sigma_{max}/2 = \tau_{max}$) が作用しているのでせん断き裂面は互にこすり合うことなく口を開くと考えられる (実際 shear lip の面にはせん断の痕跡が認められない)。

4.4 最適硬さ現象ならびに諸試験法の比較

硬さと強度特性との関係および強度特性にみられる諸試験法の特徴を明らかにするため Fig. 6, 7, 8 から代表的強度特性を取り上げ、硬さによって整理した結果を Fig. 11, 12 に示した。まず破断強度については平滑曲げ、振りの双方に最適硬さ現象が認められる。前節の破面観察に基づいてその破壊様式を区別して示してある (曲げの場合 shear lip のある場合をせん断破壊とし、ない場合をへき開破壊とした) ように、この現象は曲げ、振りでそれぞれ $HRC \approx 60, 62$ を境に破壊様式がせん断型からへき開型に遷移しはじめることに基づくものと解釈され、振り試験における OLLEMAN らの指摘⁶⁾に一致している。また曲げの場合遷移硬さが振りにおけるよ

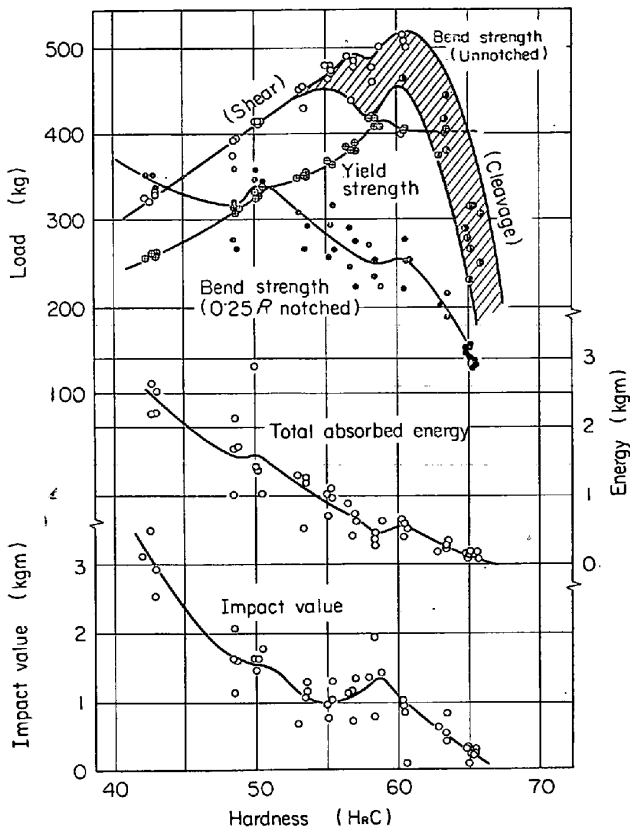


Fig. 11. Relationships between bend properties and hardness, replotted from Fig. 6, 7.

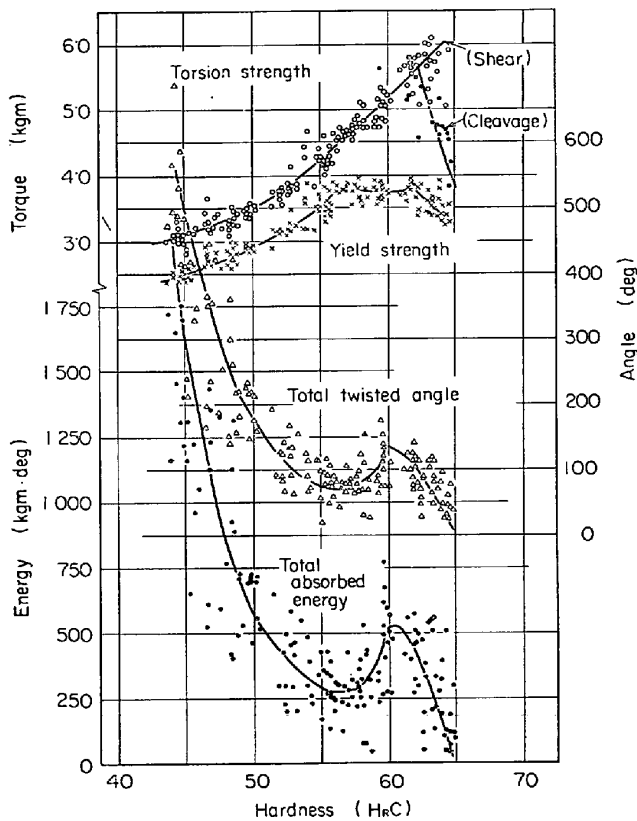


Fig. 12. Relationships between torsion properties and hardness, replotted from Fig. 8.

りも低硬度側にあるのは曲げ試験での τ_{max}/σ_{max} が振りにおけるそれよりも小さいためと考えられている²⁾。一方切欠き曲げ破断強度の遷移硬さは Fig. 1 に示したように切欠きが鋭くなるに従い低硬度側に移行している。この理由については切欠き底付近の塑性拘束によって応力の三軸性が大きくなり τ_{max}/σ_{max} が減少する³⁾ ということのほかにはせん断破壊強度とへき開破壊強度との切欠き感受性の差異、すなわち前者は切欠きに対して鈍感でそれほど変化しないのに対し後者は著しく低下するという事実¹⁰⁾にも依存しているものと思われる。いずれにしろ破断強度にみられる最適硬さ現象については材料のせん断破壊限界強度とへき開破壊限界強度との一定硬さにおける相互大小関係ならびに試験法に依存する応力状態によって定まる見かけの現象にすぎず、硬さと両限界強度との関係はせん断強度が硬さとともに増大するのに対しへき開強度は逆の変化をする、すなわち高硬度側と低硬度側とでは2つの異質の強度特性が測定されるという認識が重要であるように思われる。この複雑さを避けるには単純応力状態のもとでそれに個有の破壊様式を起こさせる実験を行えばよく、この点で破壊力学の手法は有効と思われる。

つぎに降伏強度については曲げの場合高硬度側では得られていない。振りでは降伏後破断していることからこの硬さ範囲で材料のへき開破壊限界強度がせん断降伏限界強度よりも大きくその2倍よりも小さいという関係にあることを示している。また曲げ、振りでそれぞれ $H_{RC} \approx 59$ (焼もどし温度 $250^{\circ}C$)、 56 (同 $300^{\circ}C$) に降伏強度のピークが認められる。いずれも脆性が最も顕著な領域に対応しており、とくに振り変形能、吸収エネルギーの低下は著しい。同様の脆化は平滑、切欠き曲げ破断強度にも認められ、衝撃値では $H_{RC} \approx 55$ (同 $350^{\circ}C$) を中心に現われている。これは焼もどしマルテンサイト鋼にしばしばみられる低温焼もどし脆性¹¹⁾を示すものと思われるが、応力負荷形式の相違によって脆化点あるいは強度特性の特異点が移動し同一の硬さ領域に一致していない。このことは本脆性が応力状態、ひずみ速度などに敏感に影響され別の組織状態に対応して現われることを示している。同様の傾向は炭素工具鋼¹²⁾、合金工具鋼¹³⁾についても観察されている。

このほか振り降伏強度には $H_{RC} \approx 62$ (焼もどし温度 $150^{\circ}C$) にもピークが認められるが、他の強度特性との関連は明らかでない。また $H_{RC} \approx 49$ (同 $500^{\circ}C$) 付近の切欠き曲げ破断強度や衝撃値の低下は第一焼もどし脆性の現われとみられるが、振り特性にはそのような不連続は認められない。

4.5 高硬度鋼の靱性

靱性は脆性に対置される経験的用語であるが、もともとは破面の様相に由来するといわれる。その定義は必ずしも明確ではないが、通常衝撃値や吸収エネルギーが当てられていることからその物理的意味は「材料が破壊することなしに変形エネルギーを吸収しうる能力」¹⁴⁾と考えられる。したがって靱性は破断強度と変形能とに依存する量であり、高硬度鋼の場合に特別の定義¹⁵⁾をする必要はないように思われる。むしろ靱性の内容が重要であるが、硬さの増大に伴う諸強度特性の変化は必ずしも同方向ではない。本供試鋼の場合 Fig. 11, 12 に示したように低温焼もどし脆性点以上の高硬度の範囲ではへき開強度は硬さとともに減少し、せん断強度は増大する。一方変形能は破壊様式には区別なく減少する。したがって引張り応力のもとに高硬度材を適用する場合は許容限度まで硬さを低くすることが望ましい。しかし引張り応力がなくせん断応力下での適用を考える場合はせん断強度と変形能のいずれを重視するかにより逆の選択を強いられる。この場合はその適用条件(応力状態)を吟味し、平面応力条件(変形が起こりうる)と考えられる場合は変形能を、また平面ひずみ条件(変形が拘束されている)の場合はせん断強度を尺度として適用硬さを定めるべきであろう。

5. 結 言

焼入れ鋼の焼もどしに伴う強度特性の変化を静的、衝撃曲げ試験および静的振り試験により比較検討し、つぎの結果を得た。

- (1) 切欠き曲げ試験を行なうことにより比較的低硬度側までへき開破断強度が求められる。
- (2) 曲げ塑性たわみ： δ 、および衝撃値： E と切欠き底の応力集中係数： α との間に $\delta, \text{or}, E = A \exp(B/\alpha)$ の関係が認められた。
- (3) 低温焼もどし脆性は試験法によりその現われ方(脆化する焼もどし温度ならびに温度範囲、脆化に対する感度)が異なるが、脆化中心における降伏強度の上

昇、変形能などの低下が共通の特徴である。

(4) 静的振り特性におよぼすひずみ速度の影響は降伏強度を除いて低温焼もどし時に認められ、ひずみ速度が大きいほど破断強度や変形能は高い。しかしこれは一般のひずみ速度依存性とは区別され、破壊における時間敏感性の現われと考察された。

なお高硬度鋼の強度、靱性を高めるということは一定の硬さ水準での諸強度特性を個別に改善することであり、今後引き続き高硬度鋼の金属組織学的諸因子と諸強度特性との相互関係について検討を進める考えである。

終わりに、本研究遂行に当たり、種々ご便宜をはかっていたいただいた勝田工場部長武市彦二郎氏ならびにご助言を賜った日立研究所添野浩博士、田野崎和夫博士に感謝するとともに熱心に実験を遂行された大越幸夫君に深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 出口, 伊藤: 日本金属学会々報, 7 (1968) 9, p. 516
- 2) J. D. MORROW, J. R. HALFORD, and J. F. MILLAN: Fracture (Sendai), 3 (1965), p. 1611
- 3) L. S. CASTLEMAN, B. L. AVERBACH, and M. COHEN: Trans. ASM, 44 (1952), p. 240
- 4) 田口訳: 数理統計学入門, (1951), p. 161 [科学新興社]
- 5) 西田: 応力集中, (1967), p. 572 [森北出版]
- 6) 横堀: 材料強度学, (1955), p. 7 [技報堂]
- 7) 横堀: 材料強度学, (1955), p. 4 [技報堂]
- 8) R. D. OLLEMAN, E. T. WESSEL, and F. C. HULL: Trans. ASM, 46 (1954), p. 87
- 9) 北島: 結晶の強度, (1968), p. 257 [朝倉書店]
- 10) 安藤: 私信 (未発表)
- 11) 今井, 佐藤: 日本金属学会々報, 8 (1969) 3, p. 186
- 12) K. BUNGARDT, O. MÜLDERS, and W. SCHMIDT: Arch. Eisenhüttenw., 36 (1965) 6, p. 407
- 13) K. BUNGARDT, O. MÜLDERS, and W. SCHMIDT: Arch. Eisenhüttenw., 34 (1963) 4, p. 247
- 14) R. S. ROSE: Metal Prog., 37 (1940) 1, p. 407
- 15) M. V. ZAUSTIN: Machine Design, 31 (1959) 15 p. 134