

熱間振り試験機の試作について*

田島 喜久雄**・久貝 啓次郎**

ON THE TRIAL MANUFACTURING OF HOT
TORSION TESTING MACHINE

Kikuo Tajima, Keijiro Kugai

Synopsis:

This report deals with the newly-designed hot torsion testing machine, and this machine is designed to investigate the workability i.e. the strength and malleability of steels at high speed, high temperature corresponding to general hot-working processes.

This machine consists of the torque pick-up, a resistance furnace, a motor and reduction gears etc, and its capacity is as follows;

- (1) Twisting speed of specimens can be changed from 30 to 1500r.p.m. by nine steps.
- (2) Testing temperature range is below 1400°C.

The feature of this machine is the use of strain gage as torque measuring apparatus, and in this way, torque can be measured accurately even at initial instant of twisting.

In this article, one example of experimental results were described together with the construction of this machine.

I. 緒 言

金属材料の熱間加工を行うに当り、その熱間における加工性、すなわち、変形抵抗および変形能を知る必要のあるのはもちろんであり、この方面に関する研究はすでに古くより行われている^{1)~6)}。

一般に、高温にての金属材料の加工性を論ずるに当り、その変形抵抗、変形能に影響する因子として、あげられるのは

- (i) 材料の化学成分、およびその履歴
- (ii) 加工温度
- (iii) 加工速度
- (iv) 加工度

等である。

ゆえに、金属の熱間加工性を、正確かつ詳細に知らんがためには、これらの因子を種々変化せしめて、変形抵抗および変形能に対する各因子の影響を、調査する必要がある。そしてその結果を工業的あるいは塑性理論的基礎資料として利用するためには、変形機構が簡単で、理論的に解析が容易であること。また、金属の変形能をば端的に指示し得ることを必要とする。

かかる観点に立つて種々の金属材料の、高温試験を比較検討した結果、此処にては、高温にての金属材料の変形抵抗とともに、変形能をも端的に表わすものとして熱間振り試験をとり上げた。

なお、この振り試験による金属材料の熱間加工性の測

定は、すでに、市原⁷⁾、C.L. Clark⁸⁾、D.E.R. Hughes⁹⁾、F.K. Bloom¹⁰⁾等により行われており、振り試験による破断までの回転数、すなわち、破断回転数、あるいは破断回転数と振り回転力との比をもつて、金属材料の変形能を代表させ、そして振り回転力により変形抵抗を求めている。

これらの実験結果を見るに、熱間振り試験は種々の加工温度にての金属材料の成分組織—変形抵抗—変形能の三者間の関係を調査するに便利であると考えられる。

II. 熱間振り試験機の概要

当所にて、設計製作せる熱間振り試験機の概略図は Fig. 1 に示すごとくである。

Fig. 1 を簡単に説明すると、電動機より回転力は、右端の減速機函中のウォームギヤ正歯車により減速され所要回転速度となつて、試験機の主軸に伝達される。ただし、最高回転速度 (=1500r.p.m.) の時のみ、電動機直結とした。また、左端の回転力測定子の表面には、抵抗線歪計ゲージが貼布され、その左端が固定されておりこの回転力測定子の弾性歪を利用して、振り回転力を測定する。

そして、試験片は電気炉にて加熱し、その両端をチャックにて固定し、左側チャックは回転力測定子を通して

* 昭和 30 年 10 月本会講演大会にて発表

** 富士製鉄株式会社、室蘭製鉄所、研究所

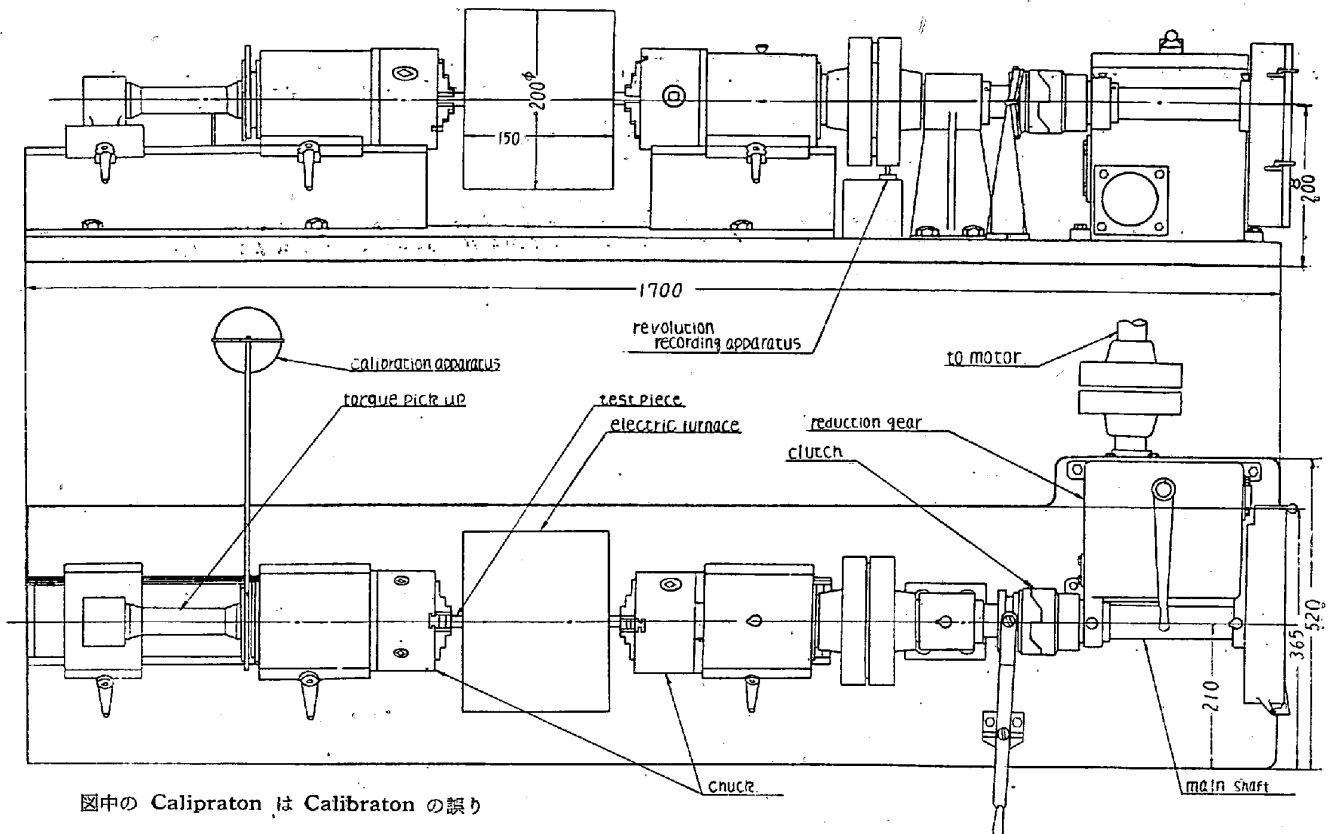


Fig. 1. Skeleton diagram of the hot torsion testing machine.

固定され、右側チャックは所要回転速度にて回転される。振り回転数は回転数記録装置にて記録され、振り回転力とともに、電磁オシログラフに入れられる。

なお Fig. 1 にて、左側チャックと回転力測定子間の軸受には厚擦のなきようにとくに留意し、心向き球軸受および推力球軸受を組合せて用い、そこに完全を期した。また、試験片を固定する際、その中心の狂わざるようにチャックを設計した。

つぎに、試験機の主要部分について説明する。

a) 振り回転力測定機構

本試験機にては前述のごとく、回転力測定機構は回転力測定子、歪計よりなっている。

すなわち、振り回転力による回転力測定子の弾性歪をその表面に貼布された歪計ゲージより測定し、振り回転力を知るもので、このため、回転力測定子の材料は、弾性限の高いことが要求される。ゆえに、ここには Ni-Cr 鋼(第2種)に対し、適当に熱処理を施して用いた。

なお、回転力測定子の寸法の決定に当つては、まず焼入れ焼戻しの熱処理を施した粗材の精密引張り試験を行いマルテンズの微小伸長計を用いて、応力-歪曲線を求め、正確な弾性係数を知り、その値を基礎として振り回転力に対する回転力測定子の表面にて、その軸方向に対し $\pi/4$ なる角度の方向の適当な歪量を与える 回転力測

定子の半径を計算により求めた。

ただし、適当な歪量は歪計、およびオシログラフの増巾率により定まってくるものであつて、ここには歪計として共和無線製 6M6-E 型動的歪計、オシログラフとしては横河製 6 素子電磁オシログラフを用いている。

以上のごとくして、歪計を用いることにより、振り初期より振り機構を全く乱すことなく、より正確に振り回転力を測定し得る。

Fig. 2 はかくして決定された回転力測定子の寸法の一例および、歪計ゲージの貼布法を示す。

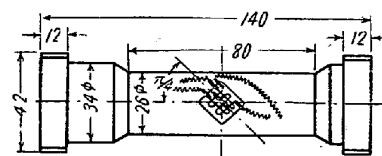


Fig. 2. Torque pick-up.

使用した歪計ゲージは、共和無線製歪計ゲージ KR-4 (直角2方向の歪を測定し得る。)である。

また Fig. 3 は、Fig. 2 の回転力測定子を用いた時の各振り回転力に対する電磁オシログラフの振れの較正曲線にして、両者は完全に直線関係を有することが判る。ただし、回転力測定子の較正は、Fig. 1 にて回

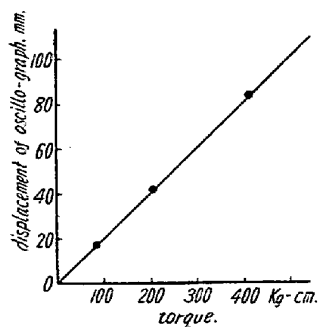


Fig. 3. Torque-displacement of oscillograph relation curve.

転力測定子の較正装置に錘りをのせ、その錘りによる回転力と電磁オシログラフとの関係を求めて行つた。

b) 試験片加熱用電気炉

試験片加熱用電気炉およびその温度測定法は Fig. 4 に示すごとくであつて、加熱用抵抗線は、白金およびニクロム線を用い、前者は 900°C 以上、後者はそれ以下の温度の実験に用いることにした。

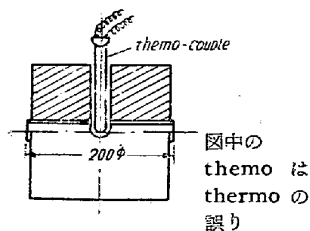


Fig. 4.

Electric furnace.

熱電対の保護管としては、外径 $6\text{mm}\phi$ の石英管を用い、その先端を試験片試験部に接触するごとくにした。

そして、試験片試験部の真温度との較正は、耐熱鋼にて振り試験片を作り、その試験部に直径 $2\text{mm}\phi$ の小孔を穿ち、別の Pt-Pt-Rh 熱電対を挿入して行つた。

なお、試験片加熱用電気炉の製作に当つては試験片の温度分布を均一とするため、つぎのごとくにした。すなわち、まず試験部の寸法 $10\phi \times 20\text{mm}$ の試験片にて、試験部中央と端部との温度差が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内に入るとく電気炉を作つた。この時、温度差測定法は示差熱式に Pt-Pt-Rh 熱電対を結線し、検流計により、測定する方法である。

このようにして電気炉の製作方法、すなわち、抵抗線の巻き方、その他の条件を決定し、この方法にしたがつてその後の電気炉を作つた。

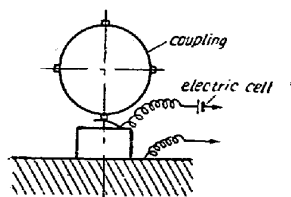


Fig. 5. Revolution recording apparatus.

c) 振り回転数記録装置

振り回転数記録装置は Fig. 1 および Fig. 5 に示すごとくである。

すなわち、カップリングの周辺に等間隔に突起部を設け、回転にともなつて、

その突起部が別の固定せる端子に、接触し、電池の回路が短絡されるごとくにしてある。このようにすることにより、カップリング周辺の短絡用突起の数を増減して、振り回転数の1回転の数分の1まで正確に記録することが可能となる。またこの回転数の記録とオシログラフ印画紙上に記録されている時間軸との比較により、試験中の振り回転速度の変化を調べるができる。なおこのようにして調べたところ、試験中の振り回転速度はほとんど一定であつて変化は認められなかつた。

III. 試験片寸法の決定

振り試験に当つては、試験片試験部は均一に加熱されそして均一に捻回されることを必要とする。試験部の均一加熱については前述のごとく、加熱用電気炉の寸法その他を適當とすることにより、その目的を達した。しかし、たとえ試験部を完全に均一に加熱してもその寸法により振り分布が不均一となる。ゆえに試験片試験部の寸法の決定のためつぎの実験をおこなつた。すなわち、試験片試験部の寸法が

$$10\phi \times 40\text{mm}, 10\phi \times 30\text{mm}, 10\phi \times 20\text{mm}, \\ 10\phi \times 10\text{mm}$$

の4種の試験片を作り、その試験部表面に軸方向に痕をつけ、試験温度 800°C 、振り回転速度 68r.p.m. にて試験を行つた。ただし、この時振りには破断まで行わず、途中にて止め、さきに試験部軸方向につけた痕により、振り分布を測定した。その測定結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 によれば、試験片試験部の振り分布は、その寸法が $10\phi \times 10\text{mm}$ の時にいたつて初めて一様になっている。ゆえに試験片試験部の寸法を

$$10\phi \times 10\text{mm}$$

と決定した。すなわち Fig. 7のごとくである。

なお、試験片試験部の寸法の決定に当つては、振り分布についてのみ、考慮したが振り時の試験片の寸法と軸方向の応力分布との関係については考慮しなかつた。この点検討すべき点あるも、振り試験の性質上、また現在の目的すなわち変形抵抗とともに、変形能をも併せ考慮している場合には、この程度にて十分であると考えらる。

IV. 振り回転速度

一般に熱間加工作業の変形速度は大略 $1 \sim 100 \text{ 1/s}$ の範囲に入るようであり、室蘭製鉄所分塊第2連続圧延機にてのシートバー圧延時の鋼材の変形速度も大略 $22 \sim 71.5 \text{ 1/s}$ である。

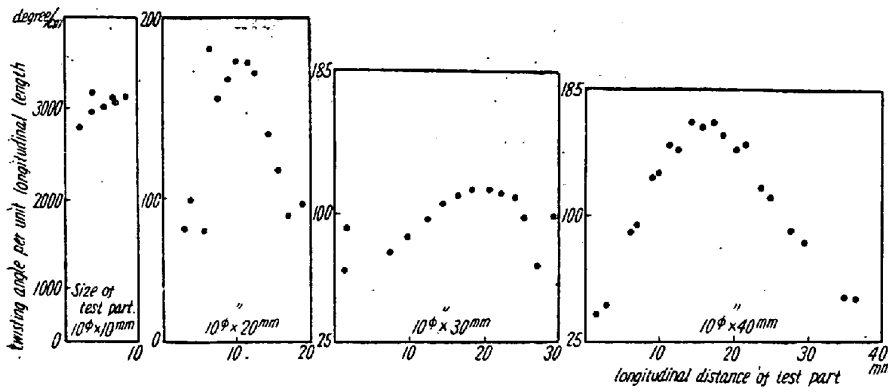


Fig. 6. Twisting distribution diagram.

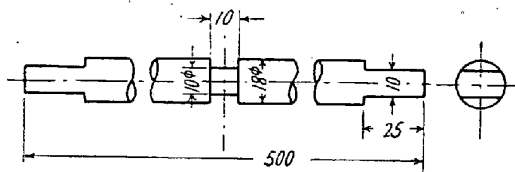


Fig. 7. Size of test piece.

ゆえに本振り試験機の試験片の変形速度もまたこの範囲にわたるごとく、振り回転速度を振ぶべきである。したがって、振り回転速度の決定に当つては、この点を考慮し、さらに電動機および回転力伝達機構の点をも考え Table 1 のごとくにした。

なお、振り試験にては、その試験片試験部断面内の位置により、変形速度は異つており、ゆえに各振り回転速度に対する試験片試験部の変形速度は試験部断面内の位置によつて異なる種々の変形速度の平均、あるいは代表により表わされることとなる。

市原⁷⁾は P. Ludwik の静的振り試験の結果を基礎としてつぎの計算式、すなわち

$$\dot{\epsilon} = \pi R n / 30 l = 5.23 \times 10^{-2} n \text{ 1/s}$$

ただし $\dot{\epsilon}$: 変形速度 1/s

R : 試験片試験部の半径 = 5 mm

l : 試験片試験部の長さ = 10 mm

n : 振り回転速度 r.p.m.

なる式により、変形速度を求めている。

一方、振り試験片試験部断面内にて、変形速度がその半径により異なるのを考慮し平均化した変形速度

$$\bar{\epsilon} = \int_0^R \frac{2\pi r n}{60 l} \times 2\pi r dr / \pi R^2 = \frac{\pi n}{45 l} R = \frac{2}{3} \dot{\epsilon}$$

Table 1. Revolution speed-deforming speed.

Revolution speed n r.p.m.	31.5	63.0	107	160.5	213	320	482	840	1500
Deforming speed (Itihara) $\dot{\epsilon}$	1.65	3.3	5.6	8.4	11.14	16.7	25.2	43.9	78.45
Mean deforming speed $\bar{\epsilon}$	1.1	2.2	3.7	5.6	8.4	11.2	16.8	29.3	52.35

$$= 3.49 \times 10^{-2} n \text{ 1/s}$$

ただし $\bar{\epsilon}$: 平均変形速度 1/s

r : 試験片試験部断面内の任意の半径

も考えられる。

この両者のいずれをとるかは今後の実験により、決定されると思うも Table 1 にては両者を掲げた。

V. 実験操作

a) 試験片の粗材の焼鈍

試験片はその切削に先立ち、粗材にてそれぞれその成分に応じた焼鈍温度において 1 h の焼鈍を行つた。そしてその後 Fig. 7 に示す寸法に切削した。

b) 試験温度の校正

振り試験に先立ち、前述の方法により試験片試験部の真温度と加熱炉用熱電対の指示温度の関係を再確認する。この校正は試験温度を変化さす毎に行う。

c) 振り試験操作

まず振り試験直前に歪計、電磁オッシログラフの調整を行い、さらに回転力測定子の校正を行う。

つぎに試験片の加熱法であるが、初め加熱炉を試験温度とし、その後試験片を挿入した。そしてふたたび試験温度に達するまでの時間、すなわち昇熱時間を大略 20mn とし、その後試験温度に 15mn 間保持し、振り回転数記録装置をセットして後換る。この時振り回転力の変化を歪計を用いることにより振り回転数とともに電磁オッシログラフに記録する。

VI. 本振り試験機の測定精度

一般に、新しい試験機の設計および製作に当り、まず問題になるのはその試験値の再現性および精度である。

本試験機は試験片の振り回転力の測定機構として抵抗線歪計を、また記録装置として電磁オッシログラフを用いており、このため、歪計ゲージの貼布方法、歪計、および電磁オッシログラフの操作の良否により測定精度は大きく影響される。ゆえに現在本試験機がどの程度の測定精度を有するかを調べるべく、最近の試験結果について

て測定精度の計算を行つた。

すなわち Table 3 および Table 4 は Table 2 に示す成分の材料についての振り試験結果である。

Table 2. Chemical composition of testing materials.

C	Mn	P	Si	S
0.58	0.53	0.014	0.16	0.015

Table 3. One example of exp. result—number of twist to fracture.

Rev. speed	Testing temp. 800°C					
	900 //	1000 //	1100 //	1200 //	r.p.m.	
31.5	12.4 12.0	11.5 10.8	16.3 14.6	22.3 23.8	24.5 24.0	
213	13.7 14.0	15.6 15.0	18.3 18.3	18.3 18.3	17.5 18.2	
840	19.9 19.9	15.5 15.5	17.3 16.8	16.0 15.8	12.3 12.2	

Table 4. One example of exp. result—max. mean shearing stress.

Rev. speed	Testing temp. 700°C						
	800 //	900 //	1000 //	1100 //	1200 //	r.p.m.	
31.5	14.03 13.00	10.70 10.78	7.61 7.77	5.15 5.79	4.12 4.20	2.85 2.85	
213	18.71 19.42	14.74 13.24	10.59 11.26	6.98 6.98	5.87 5.67	3.88 4.12	
840	18.23 19.18	15.22 15.69	11.81 11.10	9.74 8.24	6.74 6.98	4.71 5.23	

なお、Table 3, および Table 4 にて、破断回転数とは、試験片の破断までの回転数、最大平均剪断応力とは振り試験中の最大振り回転力が試験片試験部の全断面にわたつて一定の剪断応力により生ずると仮定した時の剪断応力であつて、最大振り回転力との関係はつきのごとくである。すなわち

$$T_M = \int_0^R 2\pi r d\tau_{\text{avr}} = \frac{2}{3} \pi \bar{\tau}_M R^3$$

$$\therefore \bar{\tau}_M = 3.82 T_M$$

ただし $\bar{\tau}_M$: 最大平均剪断応力 kg/cm²

T_M : 最大振り回転力 kg-cm

R: 試験片試験部の半径=0.5cm

r: 試験片試験部断面内の任意の半径

また、測定精度の計算に当つては、材質的に一応安定

している。800°C以上の試験結果を対象とした。

この試験結果にて、2つの測定値の平均値の平均に対する2つの測定値の差の百分率の平均値を求めれば

最大平均剪断応力については 5.55%

破断回転数については 2.88%

となり、一応満足すべき値と考えられる。

VII. 試験結果

Table 2 に示すごとき成分を有する材料について種々の温度、および振り回転速度にて振り試験を行つたところその試験結果は Table 3 および Table 4 のごとくであつた。Fig. 8 はこの試験にて附記せる各々の温度および振り回転速度にての振り回転角に対する回転力の変化を示し、Fig. 9, 10, 11 および 12 は Table 3 および Table 4 を図にて表わしたものである。

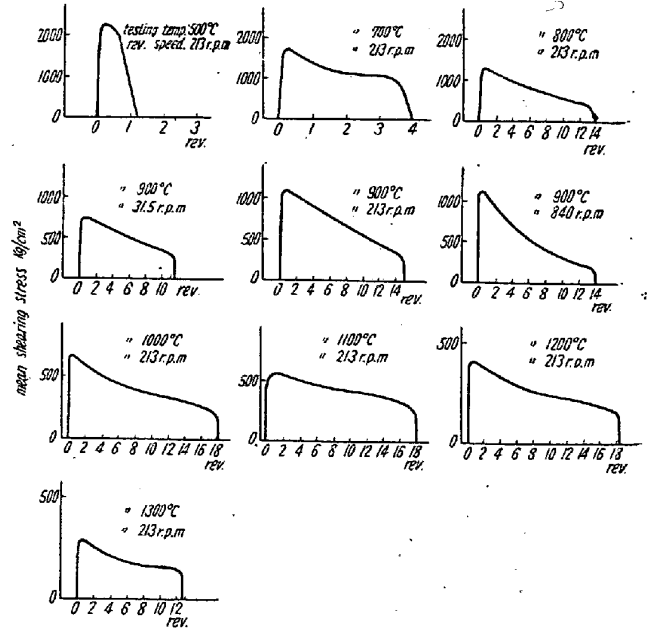


Fig. 8. Mean shearing stress-revolution curve.

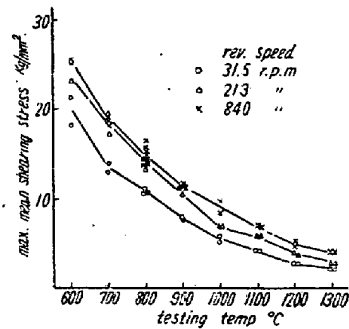


Fig. 9. Max-mean shearing stress-testing temperature curve.

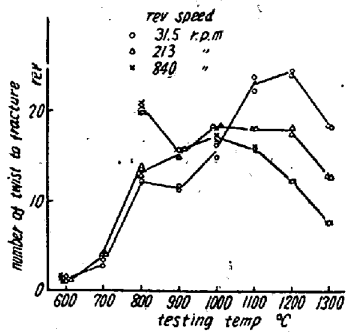


Fig. 10. Number of twist to fracture-testing temp. curve.

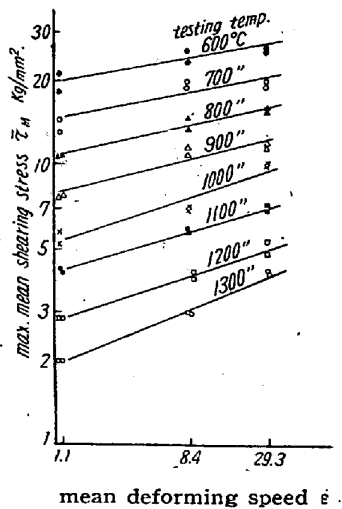


Fig. 11. Relations between $\ln \bar{\tau}_M$ and $\bar{\epsilon}$

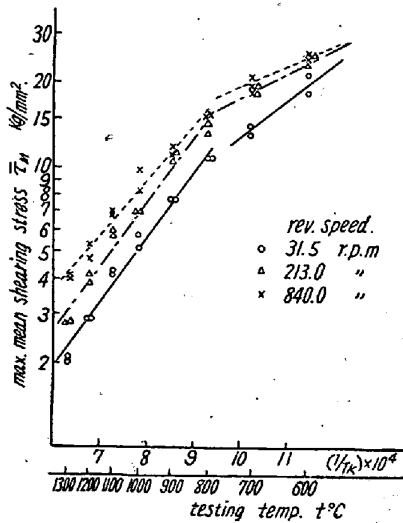


Fig. 12. Relations Between $\ln \bar{\tau}_M$ and $1/T_K, t$

これらの中、Fig. 10 および 11 を見るに、当然のことながら、一般に变形抵抗 σ と、变形速度 $\dot{\epsilon}$ 試験温度 T_K (絶対温度) の間にて成立している関係式

$$\sigma = K_1 \bar{\epsilon}^m$$

$$\sigma = K_2 e^{A/T_K}$$

ただし K_1, K_2, A, m : 常数

と同じ関係が、最大平均剪断応力 $\bar{\tau}_M$ と平均变形速度 $\bar{\epsilon}$ 試験温度 T_K (絶対温度) の三者間にも成立することが判る。

以上の試験結果の一例を見るに、本振り試験機によれば、種々の温度にての金属材料の状態、あるいは加工条件等によりその变形能および变形抵抗がいかにより影響を受けるかが明確に判り、種々興味ある示唆が得られると思う。

VIII. 結 言

以上室蘭製鉄所にて設計製作せる熱間換り試験機について説明し、あわせて試験結果の一例を掲載した。これらの結果より考えるに、熱間換り試験機にては金属材料の熱間における变形抵抗とともに变形能をも明瞭に表わすようであり、熱間における金属材料の加工性を論ずるに際してははなはだ便利であると考えられる。

終りに本研究に当つて懇切なる御指導を賜つた室蘭製鉄所研究所、所長前田元三氏に厚く謝意を表します。

(昭 31~4 月寄稿)

文 献

- 1) Robin: I. & S. Inst. Carnegie Scholarship Memoirs II (1910) 70~270
- 2) O. W. Ellis: Trans A.S.S.T. 21 (1933) 673~699 etc
- 3) A. Nadai: Proceedings A.S.T.M. 40 (1940) 822~837
- 4) A. Nadai: J. Applied Mechanics 6 (1941) 77~91
- 5) 前田元三, 他: 鉄と鋼, 36 (1950) No. 4
- 6) 池島俊雄: 扶桑金属工業報告, 昭 25. 4
- 7) Itihara: Tech. Rep Tohoku Imp. Univ. 12 (1936~38) 63~118
- 8) C. L. Clark: Metals Technology 12 (1945) No. 1839 Dec. 1~13
- 9) D.E.R. Hughes: J.I.S. Inst. (1952) No. 3 214~220
- 10) F. K. Bloom etc: Metals Progress 59 (1951) 250~256