

## 鋼の高温加工強度に関する研究 (I)\*

(高温高速度引張り試験装置)

井 上 勝 郎\*\*\*

## STUDIES ON THE HOT-WORKING STRENGTH OF STEEL (I)

(The High Temperature-High Speed Tension Testing Machine)

Katsuro Inouye

## Synopsis:

In order to obtain the value of deforming strength of steels at high speed-high temperatures corresponding to such hot-working processes as hot-rolling, forging, extrusion etc., the author specially manufactured a tension-testing machine. Main parts of this machine were as follows:

- (1) Deformation speed of specimens at gage length could be converted into 77/sec, 7/sec & 0.8/sec respectively.
- (2) As for the direct resistance heating of specimens using direct current, rapid heating was possible within the range of 700°~1400°C. Actual measurements were done standardized by 800°, 1000° & 1200°C.
- (3) Tension stress was measured by the use of a capacity-change pick-up and elongation was measured using inductance change. Recording was made by the use of an electromagnetic oscillograph (H-Vibrator).

Using this tension-testing machine, both nominal stress-strain curve and true stress natural strain curve in all deforming conditions of all types of steels were to be obtained, the latter being data of deforming the strength.

In this article, the design and construction of this testing machine, together with a suitable experimental technique were described in details.

## I. 緒 言

圧延・鍛造・押し出しその他の鋼の高温加工作業に対する最も基本的な特性は高温変形抵抗であつて我々は作業の難易、疵の発生等を之によつて判断し、作業方法の改善に利用する事が多い。変形抵抗は一般に材料が一樣な1軸引張り又は圧縮を受けて、変形を生じた時に呈する応力を以て定義する\*\*\*。従つてその測定は引張り試験或いは圧縮試験によるのが普通である。所が一方鋼の高温に於ける変形抵抗は、材質、温度、変形速度及び加工度に著しく支配される。従つて工業的に有用な変形抵抗の資料を得る為には、之等4条件を實際工業に於ける値に合せて実験しなければ無意味である。例えば、Table 1は継目無し鋼管製造に於ける之等の値であるが

\* 昭和 29 年 10 月塑性加工専門講演会にて発表

\*\* 日本特殊鋼管株式会社

\*\*\* 鋼が塑性変形を生ずる条件については、周知の様に多くの研究があつて、最終結論に至つていないが、3軸応力状態に於て

(最大応力)-(最小応力) = (1.0~1.15) × (1軸変形抵抗)の時変形を生ずると考えて大きな誤りはない。

Table 1. Temperatures and deforming speeds corresponding to practical rolling

Temperature °C	Deforming speed		
	100/s	10/s	1/s
1200	○ <sub>1</sub>	○ <sup>1</sup>	○ <sup>1</sup>
1000	○	○ <sup>2</sup>	○ <sup>2</sup>
800	○	○ <sup>3</sup>	○ <sup>3</sup>

1.....Piercing Mill

2.....Plug Mill

3.....Reducing Mill, Sizing Mill

之を見ると、温度については800~1200°C、変形速度については1/s~100/sの範囲で実験を行わなければならない事がわかる。鋼管製造以外の他の高温加工作業も、特殊な例を除けば大体此の範囲内に含まれるから、高温変形抵抗の測定は必然的に高温速度の引張り試験或いは圧縮試験となる。之は実験技術上種々の困難を伴うので、古來信頼すべき研究はごく少ない。普通の引張試験機を用いた高温引張り試験は比較的実行容易であるから、発表例もいくつかあるが<sup>1)</sup>、此の場合の変形速度は10<sup>-3</sup>/s~10<sup>-1</sup>/sであるから、変形抵抗の測定値としては不十

分である。

筆者は日常継目無し鋼管の製造に従事する間に、鋼管用の各種鋼材の高温変形抵抗の正確な値を知る必要に度々遭遇したが、上記の様な理由から、満足な資料を得る事ができなかつた。そこで之等を中心とした信頼すべき測定値を得たいと考え、数年前より実験を行つていたが最近一通り実験を完了したので、ここにその結果を報告する。

## II. 試験方法の検討

高速圧縮による高温変形抵抗の測定は、円筒形試験片を落下重錘で圧縮し、その際の落下エネルギー  $A$  と、圧縮前後の試片の長さ  $h_0$  及び  $h_1$  から、次式により平均変形抵抗  $k_f$  を計算する。但し  $V$  は試片の容積である。

$$A = k_f \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}$$

この方法は比較的容易に行えるが、次の欠点がある。

- イ) 試験片端面と金具の間の摩擦を 0 にし、又金具の接触による温度降下も 0 にせねばならない。之は工夫により或る程度迄は達せられるが、完全は期し難い。
- ロ) 圧縮変形の特質として、変形速度は 0 より始まり最大値迄上昇し、再び 0 迄低下する。従つて (1) 式で求めた  $k_f$  は変形速度に関して或る平均値となり、一定変形速度に対する値は得られない。
- ハ) 圧縮力を直接測定する事が困難であつて、応力・歪曲線が得られない。従つて (1) 式から求めた  $k_f$  は加工度についても平均値である。
- ニ) 鋼材は圧縮で破壊する事は少ないから、変形能に関する情報が得難い。

この方法による高温変形抵抗の研究は Hennecke<sup>3)</sup> 及び池島<sup>3)</sup> がある。殊に池島の研究は種々の工夫によつて上記諸欠点の影響を少くした貴重な研究であるが、しかし本質的には之等の欠点は避け難いものである。

高速引張りによる試験には上記の欠点がなく、一定変形速度に於ける応力・歪曲線を得る事ができる。之は変形抵抗の測定として最も望ましい点である。又同時に変形能に関する情報も得られる便宜がある。反面最大の欠点は、伸び率 20% 程度で局部収縮を生ずる為に、之以上の加工度に対する値を求め難い事である。此の方法による高温変形抵抗の研究は Nadai-manjoine<sup>4)</sup> のものがある。この研究は  $10^3/\text{sec}$  の変形速度迄含み、著名なものであるが、測定鋼種が少なく、又結果の検討が工業的見地からは不十分と思われる。

筆者は上記諸点を比較検討した上で、引張り試験法に

よつて変形抵抗を測定する事にした。

尚振り試験による研究も行われていて、市原<sup>5)</sup> の研究は此の例であるが、振りによる試片内の応力分布は不均一であるから、相対的な比較はできるが、変形抵抗の絶対値は求め難いので採用できない。又圧延機のロール圧力の測定から実際作業に於ける変形抵抗を求める研究も数多く行われていて、Siebel<sup>6)</sup>、Pomp<sup>7)</sup>、豊島<sup>8)</sup> 等が此の例であるが、之等の値は実用上貴重ではあるが、純粋変形抵抗の測定値としては、圧延変形に於ける各種損失の程度が不明であるから、完全なものとは言えない。

## II. 試験装置の概略

今回の研究の為に、筆者は新たに高温高速度引張り試験機を製作した。Fig. 1 は全体の構造を示す。試験機

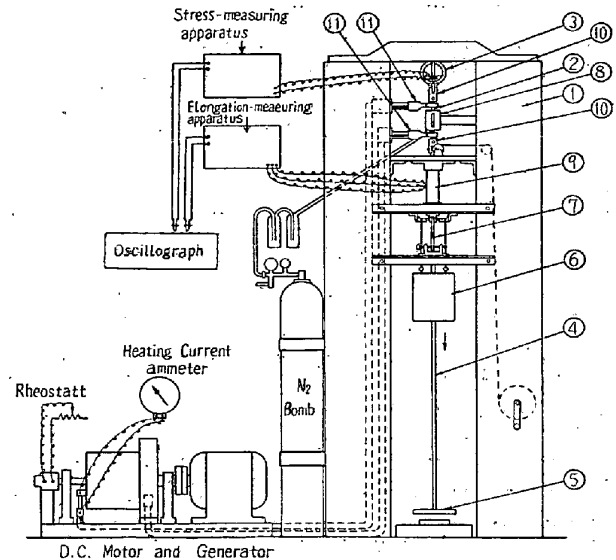


Fig. 1 High temperature and High speed tension testing machine.

本体①は厚鋼板の溶接で作つた頑丈な架構である。試験片は②であつて、その周囲を酸化防止用ケース③でかこみ、ボンベからの  $N_2$  ガスを流してある。試験片の上端は荷重測定装置③に連結し、下端には長い荷重用ロッド④が吊り下げてある。之等の連結部は可撓接手⑩によりピン・ジョイントにしてある。ロッド④の下端は荷重受け皿⑤になつていて、予め吊り上げておいた落下荷重⑥がクラッチ⑦を外すと自由落下してきて之にあたり、衝撃荷重を試験片に伝える。試験片の伸びの測定は、伸びによるロッド④の移動をインダクション・コイル⑨により検出する。之等の詳細は後に説明する。此の試験装置の全体の高さは 2.5m、落下荷重の吊上げ高さは約 1.15m、荷重は 30kg である。



## VI. 荷重測定法

急激に変化する荷重の測定には種々の方法が考えられるが、筆者は輪バネの弾性変形を静電容量の変化によって検出する方法をとつた。

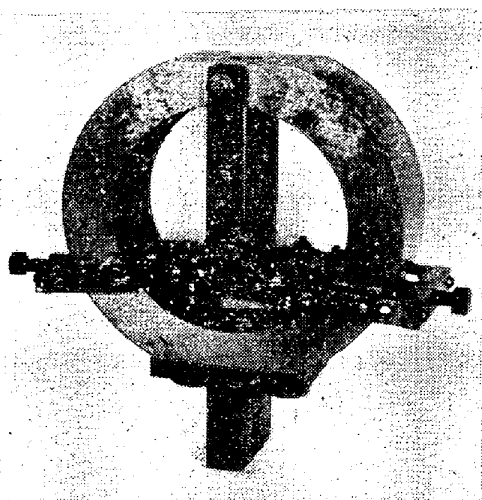


Fig. 3. Steel ring for measuring tension load

Fig. 3 はこの検出装置である。リングは調質したCr-Mo 鋼管から削り出したものである。リングの中の下側に見えるのが2枚の極板であつて、上極板は2本の棒によりリング上端に固定した板に絶縁のための合成樹脂板を介して取り付け、下極板はリング下端にねじ込んで固定してある。リングの両側につけた金具は上極板を左右に引張つて振動を防止する工夫である\*。

この検出装置で最も苦心を要するのは、衝撃荷重による振動の発生であつて、その防止には長い間苦心した。結局リング自体の固有振動の他に、極板支持機構の剛性を高める事、各種取付部の弛みをなくする事等が大切である。

静電容量の変化は、東芝製オートダイン式微小容量変化測定装置によつて電流変化に換え之を電磁オシログラフのH型振動子に入れて記録した。

実荷重と振動子の振れとの関係は引張り試験機で検定しておくが、測定装置の変動は避け難いから、別に基準静電容量の変化と振動子の振れとの関係を実験毎に毎回求めて、増巾度の変化の影響を除く必要がある。

100/s の高速変形の場合は 1/1000 秒単位の変化の測定になるが、之は電磁オシログラフで記録し得る限度と思われる。

\* この工夫は八幡製鉄研究所豊島清三博士の教示による。

この為には振動子の糸をやや強く張る等の工夫により今回の実験程度の手速ならば十分可能である事を確かめた。例えば Fig. 4 は常温の鋼の高速引張り試験の結果を 1200°C の場合と比較したものであつて、急速な応力上昇をも十分に記録し得る事を示している。

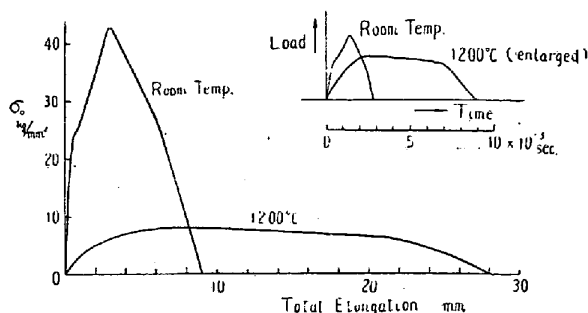


Fig. 4. Stress-strain and load-time curve of mild steel at high speed. (at room temperature and at 1200°C)

## VII. 伸測定法

伸測定法としては試験片の標点距離間の伸だけを直接測定するのが最も好ましいが、高温・高速度の変形では頗る困難である。恐らく唯一の可能な方法は連続写真をとる事であろう\*\*。

筆者も標点距離の伸を直接測定する努力をしてみたが満足する結果を得なかつたので、全長の伸を測定し之を標点間伸に換算する方法をとる事にした。

伸検出装置\*\*\*は Fig. 1 ⑨のコイルであつて、その中には黄銅棒を介して⑩及び④に連結された鉄心がありこの鉄心は試験片の伸びた量だけ下降する。インダクタンスコイルは2個からなり、差動的に変化する。この2個のコイルと、2個の固定抵抗、可変抵抗及び固定コンデンサーによつて1つのブリッジを構成してある。最初2個のコイルの中央に鉄心を置き、可変抵抗を調節してブリッジの平衡を保つておく。鉄心が移動すれば平衡が破れ、それによつて不平衡電圧が発生する。之を増巾して電磁オシログラフに入れて伸の測定とする。ブリッジ電源の周波数は 10,000 サイクルにして、速い変位にも追従できるようにしてある。鉄心の変位と振動子の振れとの関係は、実験の前後に鉄心を一定量づつ移動させて検定しておく。此の検出装置で得た記録は試験片の全長の伸であるから、之と標点距離間の伸の関係を求めなければならない。その為に各種の材質、温度及び速

\*\* 大幸氏<sup>9)</sup> は常温の高速引張り試験でこの方法を行った。

\*\*\* この装置は東芝鶴見研究所の製作である。

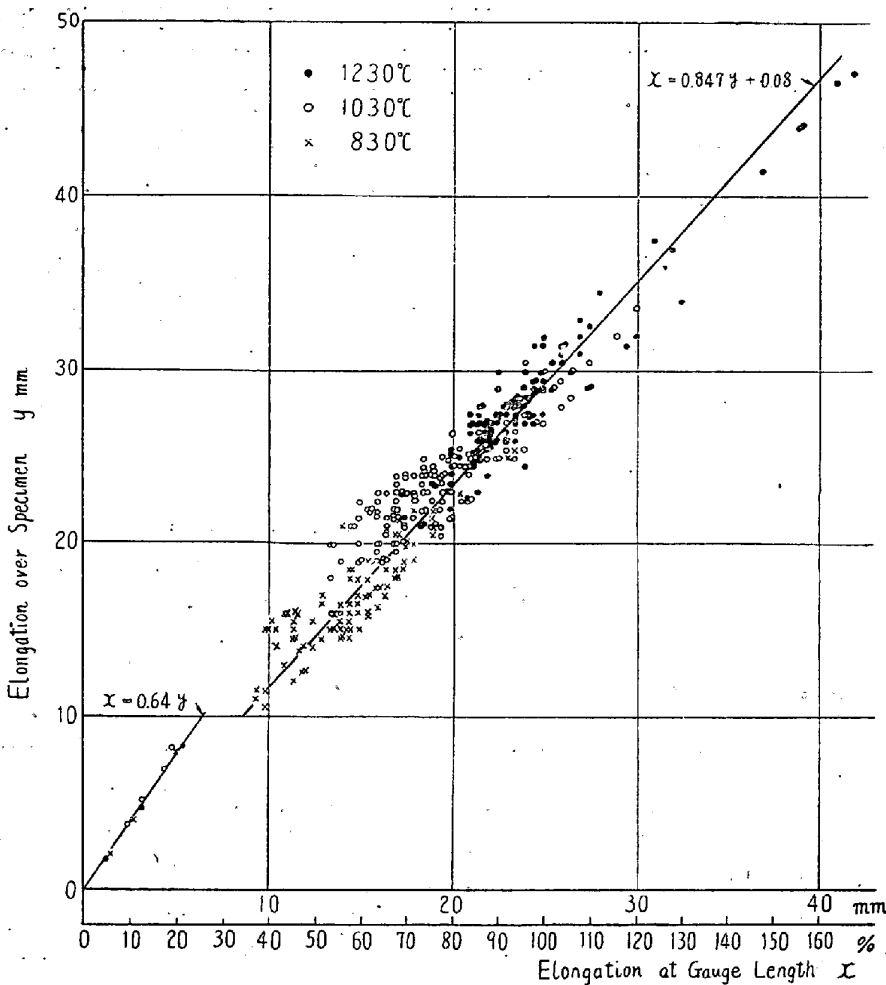


Fig. 5. Corrective diagram to introduce elongation at gauge length from elongation over specimen

度について試験片全長の伸と標点間の伸の関係を集めてプロットした。その結果は Fig. 5 であつて、幸いな事に両者は高度な相関があり、2つの回帰直線で結ぶ事ができる。

第1の直線は局部収縮開始前、第2の直線は開始後の関係に相当する。試験開始より切断迄の各瞬間の全長伸の値は、この補正直線を使つて標点距離間の伸に換算できる。

### VIII. 伸速度の算定

試験片の伸速度は前節の方法で得た伸—時間の曲線を微分すれば得られる。Fig. 6 は低炭素キルド鋼について、1230°C と830°C に於ける3種類の速度の記録である。図より明らかな如く、速度上昇の時間的遅れは止むを得ない。しかし此の点は試験結果の整理の時に速度修正を施す事ができる。

定常状態になつた時の伸速度は、全部の試験結果を検討してみた所、平均として、3種類の速度について夫

々 77/sec, 7/sec 及び 0.8/sec である事がわかつた。この値は、試験片の標点距離 25 mm が伸びる速度を示すものであつて、今後の試験結果の整理にはすべてこの値を用いる。

### IX. 温度測定法

試験片の温度は酸化防止ケースに付けたガラス窓を通して、光高温計により測定した。この読みと真温度との関係は特別な熱電対を用いて検定した\*。熱電対は自身の熱容量が小さくて敏感なものである事を要するから、特に直径0.14 mm の極めて細い Pt-Pt-Rh の熱電対をつくつた。之を予め標準熱電対で検定しておき試験片の中央表面に取りつけた。取りつけ方法は工夫を要するが、結局、試片表面の深さ0.5 mm 程度のマクレをつくり、そこへ封じ込む事にした。そして試験片に規定の電流加熱を行い、光高温計と熱電対の両者の読みを比較した。

この結果は Fig. 9 であつて、多数のデータはよく1つの直線上にのり、800~1250°C の範囲内で、真温度は光高温計の読みよりも平均 25°C 高いと見ればよい事がわかつた。この値は全輻射能0.80

に相当し、酸化状態の鋼の輻射能は 0.80~0.87 といわれているので、妥当な値と考えられる。

この他に試験片の変形エネルギーも温度上昇の原因となる。この値は、変形エネルギーが全部温度上昇に使われたとして、色々な鋼種、温度及び速度について計算すると、5°~13°C の上昇となる。之は全変形のエネルギーを換算したものであるから、試験中に発生するのはこの1/2と考え、平均して 5°C の温度補正をする事とした。

結局2つの補正を合せて、光高温計の読みに 30°C 加えた値を真温度とする。

### X. 試験結果

以上の方法で試験を行うと、オッシログラムとして、荷重—時間、伸—時間の曲線が同時に得られる。之を結び合せ、伸その他の必要な補正を行えば、応力・歪曲線

\* この方法は東大工学部菅義夫教授の御教示による

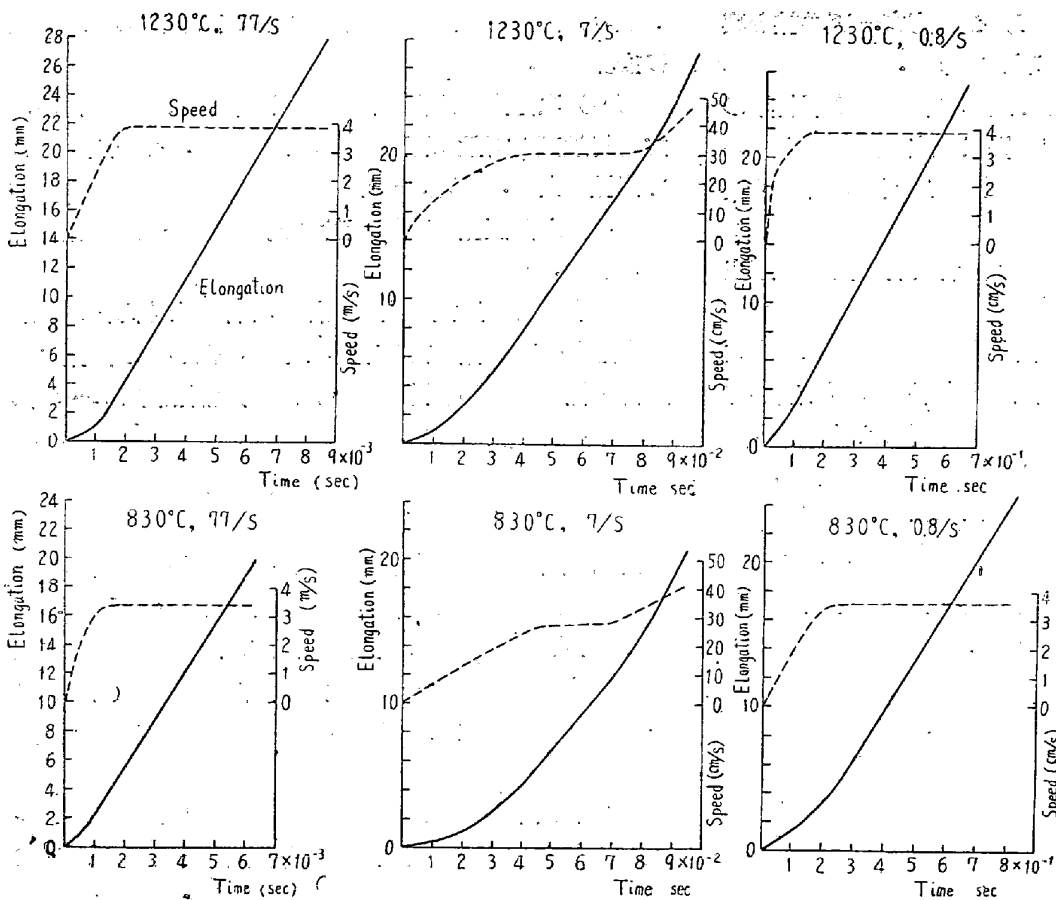


Fig. 6. Deforming speed shown in testing records. (low carbon killed steel)

XI. 結果の整理

周知の如く、所謂応力・歪曲線は引張り変形の概況を知るには有効であるが、変形抵抗の測定値としては不十分である。この目的の爲には真応力—対数歪曲線 (True stress—Natural strain curve) が最も良い事が既に明らかになっている。試験片が局部収縮を生じてから後は、応力と伸の分布が不均一になる為、正確な値を求め得ないが、それ迄の間は両者には次の関係がある。

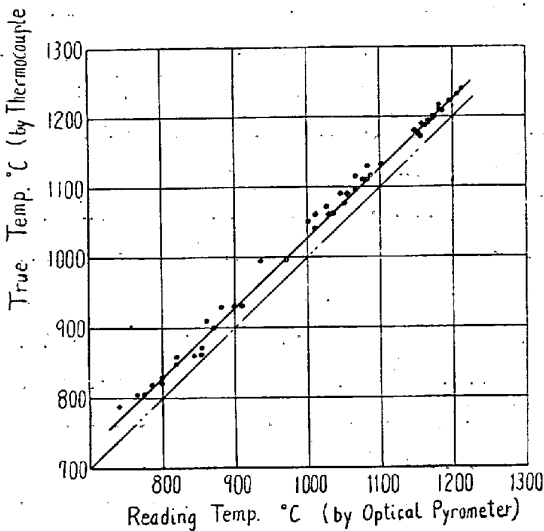


Fig. 7. Relation between true temperature and reading temperature with optical pyrometer.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{公称応力 } \sigma_0 = P/a_0 \\ \text{真応力 } \sigma = P/a \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{常用歪 } e = (l-l_0)/l_0 \\ \text{自然対数歪 } \epsilon = \ln(l/l_0) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1.2)$$

但し、 $P$ : 荷重、 $a_0$ : 最初の断面積、 $a$ : 各瞬間の断面積、 $l_0$ : 最初の標点距離、 $l$ : 各瞬間の標点距離である。従つて (1.1) と (1.2) より次の関係を得る。

$$\sigma = \sigma_0(1+e) \dots\dots\dots (1.3)$$

$$e = \ln(1+e) \dots\dots\dots (1.4)$$

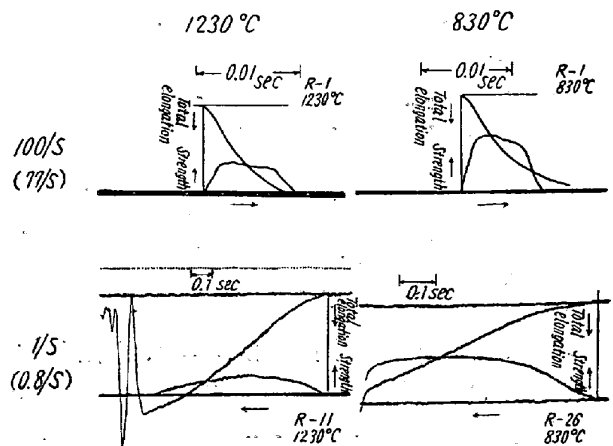


Fig. 8. Examples of oscillogram.

(Nominal stress—conventional strain curve) を得る事ができる。Fig. 8 はオシログラムの例として、低炭素リムド鋼及び 18-8 不銹鋼の種々な場合を示したものである。

(1.3) 式と (1.4) 式によつて、公称応力-歪曲線を真応力-対数歪曲線に書き直す事ができる。

この換算にあつて第8節で述べた様に、変形初期の歪の小さい部分には変形速度の修正を施す必要がある。之には変形抵抗が変形速度の  $m$  乗に比例するという関係\* を利用する。

$m$  の値は平均 0.15 であるが\*、各場合に依つて適当な値を用いた。

更に便利な事は実験結果を検討すると、Ludwik<sup>10)</sup> 或いは Hollomon<sup>11)</sup> が常温の低速度変形について示しているのと同様に、真応力と対数歪との間には常に次の簡単な関係が成立する\*。

$$\sigma = K_1 \cdot e^{n_1} \dots\dots\dots (1.5)$$

或いは  $\ln \sigma = K' + n \cdot \ln e \dots\dots\dots (1.6)$

そこで筆者が真応力-対数歪曲線を求めた方法は、次の手順による。例として低炭素リムド鋼の 1230°C 77/s の場合を Fig. 9 に示す。

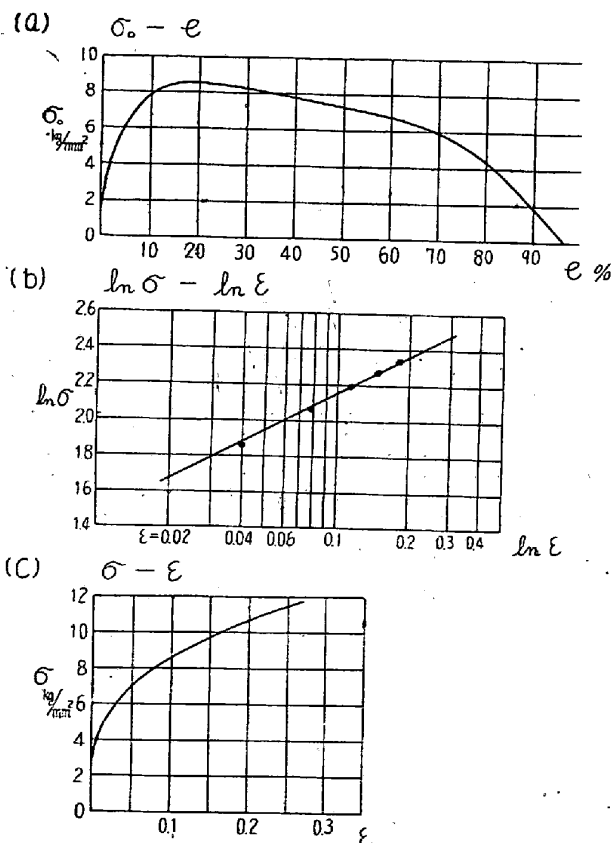


Fig. 9. Procedure to introduce from  $\sigma_0 - e$  curve

(イ) 公称応力-歪曲線 (Fig. 9 a) より応力-歪の組合せをいくつか読みとる。

\* 第2報で述べる。

(ロ) 応力と歪を (1.3), (1.4) 式で真応力と対数歪に換算する。

(ハ) 真応力に上記の速度修正を各々について行い、之と対数歪を対数に直してプロットする。その点を連ねて直線を引く。(Fig. 9 b)

(ニ) 上記直線を真数に直すと、真応力-歪曲線となる。(Fig. 9 c)

他のすべての鋼種の実験条件の場合も全く同様の手順で真応力-歪曲線を得る事ができる。但しこの曲線は、局部収縮発生迄しか得られないから、常用歪で20~30%迄のデータに限られる。

### XII. 高温変形抵抗の意義

高温に於ける鋼の変形抵抗は、例えば Fig. 9(c)でも明らかな様に、歪或いは加工度に著しく左右される。従つて変形抵抗の定義には鋼種、温度、速度の他に加工度を指定しなければならない。之は池島<sup>3)</sup> が既に強調している所であるが、加工度をいくらにとればよいか問題である。

庄延等の高温加工を調べると、加工度は0から20~50%に及んでおり、厳密には各瞬間毎のすべての加工度に対する変形抵抗を考えねばならない。この意味では真応力-歪曲線そのものが最も完全なデータとなるわけであつて、筆者が引張り試験によつてこの曲線を求めた理由もここにある。然し鋼種間の比較その他には或る加工度を仮に定めて、その時の変形抵抗を代表値とするのが便利であるから、筆者は今後その様な場合には、常用歪20%を主に用いる事にした。

以上述べた方法による実際の測定結果は第2報に於いて述べる。  
(昭和29年12月寄稿)

### 文 献

- 1) 例えば、前田元三、吉川丞一、太田伝：各種鋼材の熱間抗張試験、鉄と鋼、昭和25年4月  
*French, H. J. and W. A. Tucker: Iron Age 1923, pp. 193~195*
- 2) *Hennecke, H.: Warmstauchversuche mit perlitischen, martinitischen und austenitischen Stähle, St. u. E., 1928 pp. 315~316*
- 3) 池島俊雄：高温に於ける鋼の変形抵抗に関する研究、昭和24年5月、扶桑金属工業報告
- 4) *Nadai, A. and M. Manjoine: High-Speed Tension Test at Elevated Temperatures, (I) Proc. ASTM., 1940, pp. 822~839, (I), (II) J. of Applied Mechanics, 1941, pp 77~*

91

- 5) 市原通敏: 衝撃振り試験, 第1報~第5報, 日本機械学会誌, 昭和7年7月, 昭和10年2月6月
- 6) Siebel, E. and E. Fangmeier: Versuche über den Formänderungswiderstand und den Formänderungsverlauf beim Warmwalzen, Mitt. K.W.I., 1930, pp. 225~244
- 7) Pomp, A. and W. Lueg: Walzversuche an kohlenstoff und silizium-legierten Stählen, Mitt. K.W.I., 1933, pp. 81~97
- 8) 豊島清三: 鋼材の変形抵抗に関する研究, 昭和27年1月, 八幡製鉄技術研究所報告
- 9) 大幸喜三郎: 火砲の安全係数について, 火兵学会誌, 昭和18年1月, pp. 301~326
- 10) Ludwik, P.: Element der technologischen Mechanik, 1909
- 11) Holloman, J. H.: Tensile Deformation, Trans. AIME, 1945, p, 268

## 高温度に於けるスケールの浸透について\*

鷺田光俊\*\*・山本大作#・吉田潔司#

### ON SCALE PENETRATION IN STEEL AT HIGH TEMPERATURES

Mitsutoshi Washida, Daisaku Yamamoto and Kiyoshi Yoshida

#### Synopsis:

When the iron and steel are heated in the oxidizing atmosphere at high temperature, the oxidation scale penetrates into matrix right below the surface scale. The authors studied on the phenomena of this penetration under various conditions using a rimmed steel (C 0.08%).

Heating conditions: temperature 1150°C~1350°C, atmosphere O<sub>2</sub> 5~50% N<sub>2</sub> Bal.

CO<sub>2</sub> 5~50% N<sub>2</sub> Bal.

time 30mn~2h

In order to compare the individual results each other, the depth of penetration and the size of penetrated scale were measured and those results were as follows:

1) The granular scales penetrated in considerable depths even in the atmosphere of only N<sub>2</sub> gas, and this penetration depth was nearly the same value gained when it was mixed with gases of O<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub>

2) Penetration of scale was greatly affected by the heating temperature:- the higher the temperature, the deeper the depth and the larger the size of the penetrated scales.

3) Heated above 1300°C, huge scale appears and was remarkable under such conditions as O<sub>2</sub> gas was added. Therefore it was evidenced that the penetration of scale took part in the defect of the over-heating.

4) The color of granular penetrated scales were light-bluish-gray and that of the huge scales were composed by both light-and dark-bluish-gray.

5) If the heating condition changed, then the thickness of surface scales increased, and huge penetrating scale was produced even at below 1300°C.

#### I. 緒 言

鋼材を酸化性雰囲気中にて高温度に加熱すると、選択酸化により非酸化性元素 (Ni, Cu, As) がスケール層直下に濃化し、熱間加工後に欠陥として現われることは既に知られているが、最近、高温加熱によりスケール層直下

の地鉄にスケールが浸透し、その結果熱間加工後に微細な表面疵を生じることを認め<sup>4)5)</sup> 非酸化性元素の濃化と共にスケールの浸透は加熱の影響として重要な問題となっている。勿論非酸化性元素の含有量によりスケールの浸透の程度が左右されるがH. Buchholtzの実験<sup>6)</sup>によれば1250°C近くになると材質の差よりも温度の影響が明らかに認められスケールの浸透は甚しくなるといつている。又田島氏<sup>7)</sup>によれば、表面濃化により熱間脆性を起すとされた危険限界を遙かに下廻つていてもスケールの

\* 昭和29年10月本会講演大会にて発表

\*\* 日亜製鋼株式会社技術部研究課長

# 同上技術部研究課