

# 匍匐限の迅速測定法に就て(I)

(日本鐵鋼協會第28回講演大會講演 昭17.10 於東京)

越 智 通 夫\*

## ON THE RAPID METHOD OF MEASURING THE CREEP LIMIT OF STEEL (I)

Obi Mitio

**SYNOPSIS:**—Being judged from literatures and the author's experience, the elongation  $\epsilon$  is represented by the experimental formula  $\epsilon = ct^n$  in the first stage of creep which continues at least 1000 hrs. at 500°C or below, and in the second stage the velocity of creep is approximately constant. So the velocity at the end of the first stage, approximately equal to the velocity in the second stage, is calculated from the formula  $v' = n\epsilon'/t'$ , where  $t'$  is the time interval of the first stage and  $\epsilon'$  the total elongation of creep of the first stage; and  $\epsilon'$  is obtained by the  $\log\epsilon - \log t$  straight line extrapolated through the first stage.

It was pointed out that the creep strength is more precisely inferred from the velocity  $v'$  calculated as above than from the mean velocity of the short duration  $\bar{v}$ , for  $v'$  varies considerably even if  $\bar{v}$  is constant, according to the variation of  $n$  with the material, the testing temperature or the stress applied. In applying the present discussion, the author investigated the effect of various heat treatments on Cr-Mo steel by the extrapolating method abovementioned, showing that the normalized and tempered specimen has greater creep strength than the quenched and tempered one.

### I. 緒 言

匍匐限の測定法は種々あるが、これ等を長時間法と迅速法とに大別する事が出来る。前者は數百時間以上の實驗結果より求める方法で、主として米國等に於て行はれてゐるものであり、後者は數時間乃至數十時間の實驗に於ける平均匍匐速度より求めるのが普通で、その代表的なものを挙げれば第1表の如きものがある。

第 1 表

方法名	測定時間 h	匍匐限 %/h
Kaiser Wilhelm 協會 <sup>1)</sup>		
第 1 法	3~6	$50 \times 10^{-4}$
第 2 法	5~10	$30 \times 10^{-4}$
第 3 法	25~25	$15 \times 10^{-4}$
獨逸材料試驗協會法 <sup>2)</sup>	25~35	$10 \times 10^{-4}$
Zürich 研究所法 <sup>3)</sup>	24~48	$10 \times 10^{-4}$
Hatfield 法 <sup>4)</sup>	24~72	$1 \times 10^{-4}$

長時間法は信頼性の大なる點で迅速法に優るが、能率増進生産擴充を第一とする現時局下に於ては、比較的短時間の實驗結果より、可及的確實な匍匐強度を決定し得可き方法を確立する事が肝要である。

迅速法に依て匍匐限を測定する場合、特に注意すべきは

\* 三菱製鋼株式會社長崎製鋼所

<sup>1)</sup> A. Pomp und W. Enders: Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg 12 (1930) S. 127/47

<sup>2)</sup> DIN-Vornorm DVM-Prüfverfahren A 117/118, September 1937

<sup>3)</sup> Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 1044

<sup>4)</sup> Iron Age 124 (1929) p. 348/50

被試験材の試験温度に於ける組織の安定度と言ふ事である。本報告に於ては、組織の安定度と匍匐との關係に就て二三の實驗、並に考察を行ひ、迅速法に就き検討し、長時間後の匍匐強度を比較的確實簡單に推知し得る方法を指摘し、1例として、この方法に依て求めたクロム-モリブデン鋼の匍匐強度と熱處理との關係に就て述べる事とする。

### II. 迅速法の吟味

#### 1. 試料及實驗法

最初の實驗に供した試料は、第2表の通りのクロム-モリブデン鋼及ニケルクロム鋼で、約 15 mm  $\phi$  に鍛造したるものを、850°より油焼入後、各試料共その半數は 650°に焼戻油冷し、他の半數は 400°に焼戻油冷した。以下この2様の熱處理のものを區別するためにそれぞれ A, B なる符號を附する事とする。

第 2 表

%	C	P	S	Cu	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
符號									
M	0.29	0.028	0.005	0.24	0.27	0.15	0.62	1.09	0.35
N	0.24	0.013	0.007	0.15	0.37	0.18	3.36	1.13	0.13

匍匐試験は 485°C に於て行つた。即ち試験温度に於て A は比較的安定であり、B は相當不安定な譯である。試験機は市原式匍匐試験機を使用した。その構造精度等に関しては、既に日本金屬學會誌<sup>5)</sup>に市原教授自身の發表が出て

<sup>5)</sup> 日本金屬學會誌 3 (1939) 45 頁

<sup>6)</sup> 日本金屬學會誌 5 (1941) 286/94 頁

居る故説明は省略する。

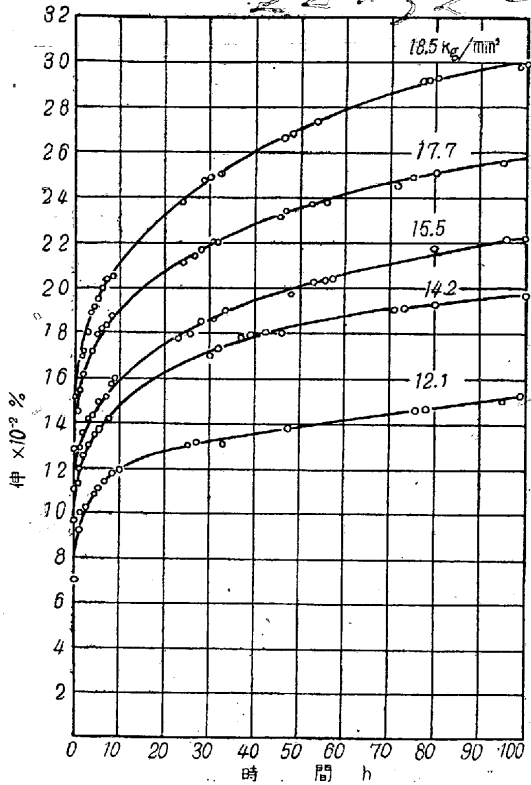
2. 実験結果

第1~4圖は個々の匏匏曲線で、先づ Kaiser Wilhelm 協會の方法に従ひ、3~6h, 5~10h, 25~35h の平均匏匏速度と應力との關係を求むれば、第5圖の如くになり、第

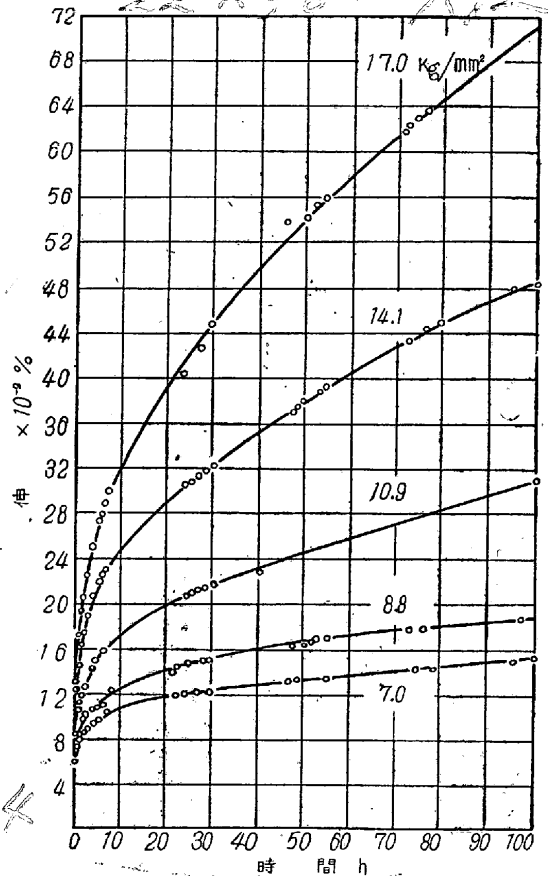
1~3 法に定義された匏匏限は、第3表の通りになる。

第3表 K-W-I法により求めた匏匏限

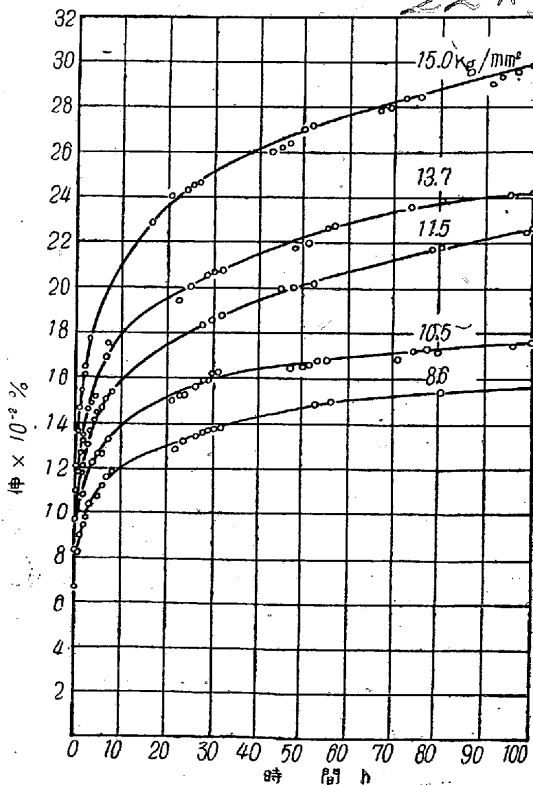
符號	50×10 <sup>-4</sup> %/h (3~6 h)	30×10 <sup>-4</sup> %/h (5~10 h)	15×10 <sup>-4</sup> %/h (25~35 h)
MA	18.2 kg/mm <sup>2</sup>	17.7 kg/mm <sup>2</sup>	18.6 kg/mm <sup>2</sup>
MB	12.6 "	12.2 "	18.4 "
NA	9.5 "	8.7 "	10.8 "
NB	6.2 "	6.0 "	8.6 "



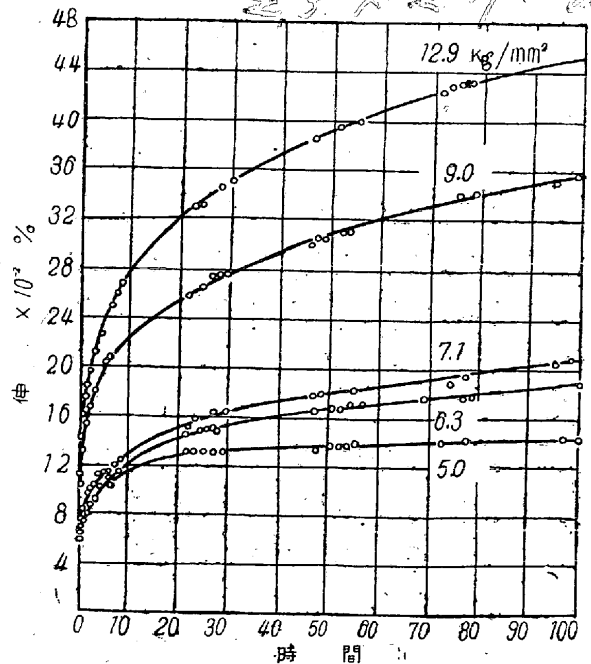
第1圖 MA 試料



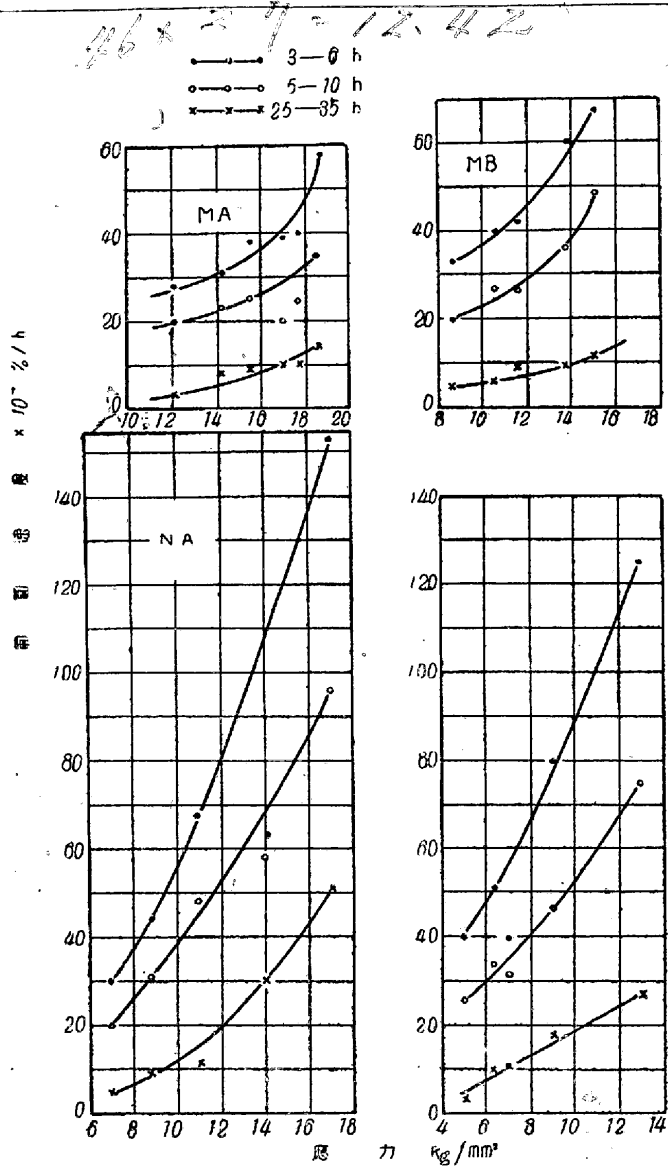
第3圖 NA 試料



第2圖 MB 試料



第4圖 NB 試料



即ち上の方法に依て求めた匏匏限は、何れも 400° 焼戻のものが相當低く現はれてゐる。又 3 種の匏匏限は必ずしも一致して居ない。この事は後述の計算結果から見ても當然である。

第 1 表に掲げたこれ以外の方法も、Kaiser Wilhelm 協會の方法と、その原理は全く同様である故、以下 Kaiser Wilhelm 協會の方法を對象として、迅速法に對する検討を試みる事とする。

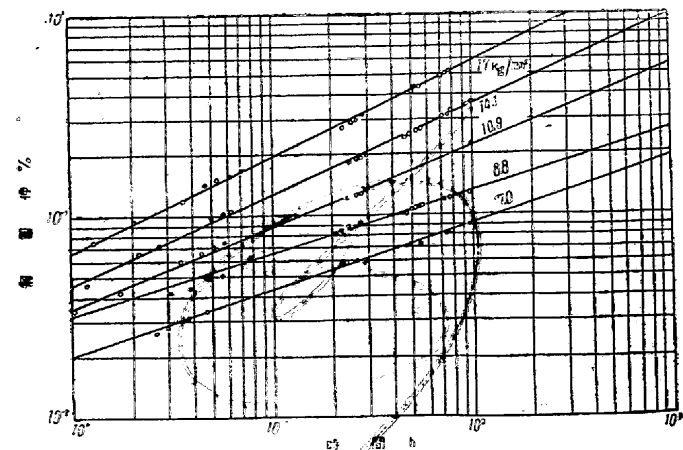
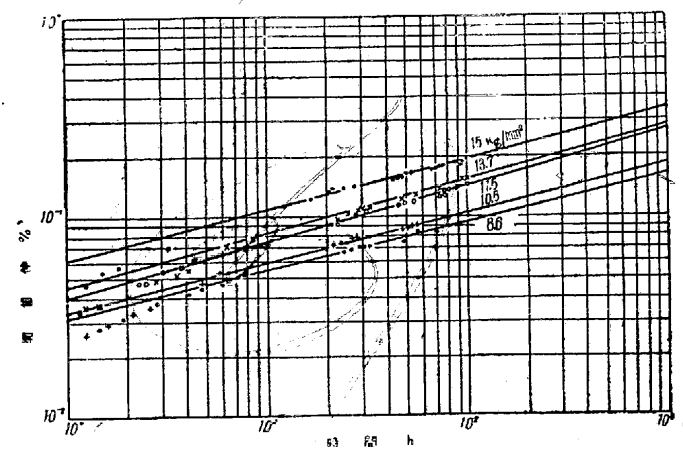
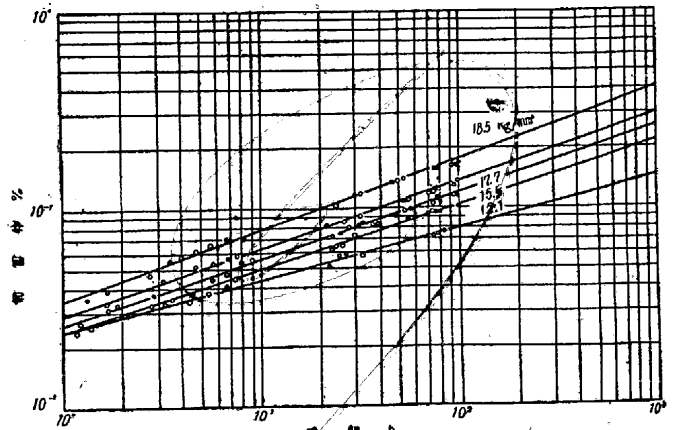
### 3. 迅速法に對する検討

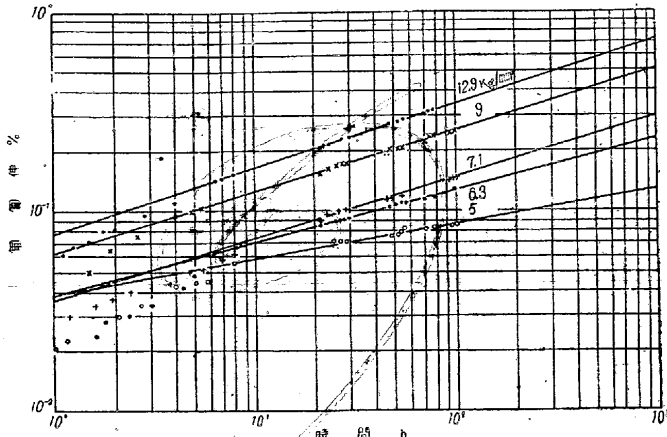
上述の實驗に依て求めた匏匏量  $\epsilon$  と、時間  $t$  との關係を兩對數座標に表せば、第 6~9 圖の如くなる。これに依れば 650° 焼戻のものは直線關係にあり。

$$\epsilon = Ct^n \dots\dots\dots(1)$$

が成立する事を示してゐるが、400° 焼戻のものは加重後約 10 h を界として、 $n$  の値が相當變化してゐる。これは

試驗溫度が焼戻溫度より高い爲に、初期には組織の變化が甚しく、その爲初期の匏匏速度は特に大であるが、約 10 h 後は組織が漸次安定化して來る爲に、 $n$  が小となるものと考へられる。さてこの安定化には、かくの如く、比較的短時間で起るものと、相當長時間後に完了するものが考へられ、これ等をそれぞれ第 1 次及第 2 次の安定化と呼ぶ事とする。普通匏匏の階程は時間と共に匏匏速度  $v$  の減少す





第 9 圖 NB 試料

る第1階程, 續いて  $v$  が略一定値を示す第2階程, 最後に  $v$  が時間と共に却つて増加する第3階程の3階程に區分せられるが, 第3階程は應力の高きに過ぎる場合に現れるもので, 通常の匍匐限の程度の應力では, 第2階程までを考

慮すれば十分であらう. 而して第1次の安定化は, 第1階程中に起るものであり, 第2次の安定化が第2階程の開始に與るものと考へられる. (1) 式は第1階程に於て適用されるものであつて, その場合には匍匐速度は

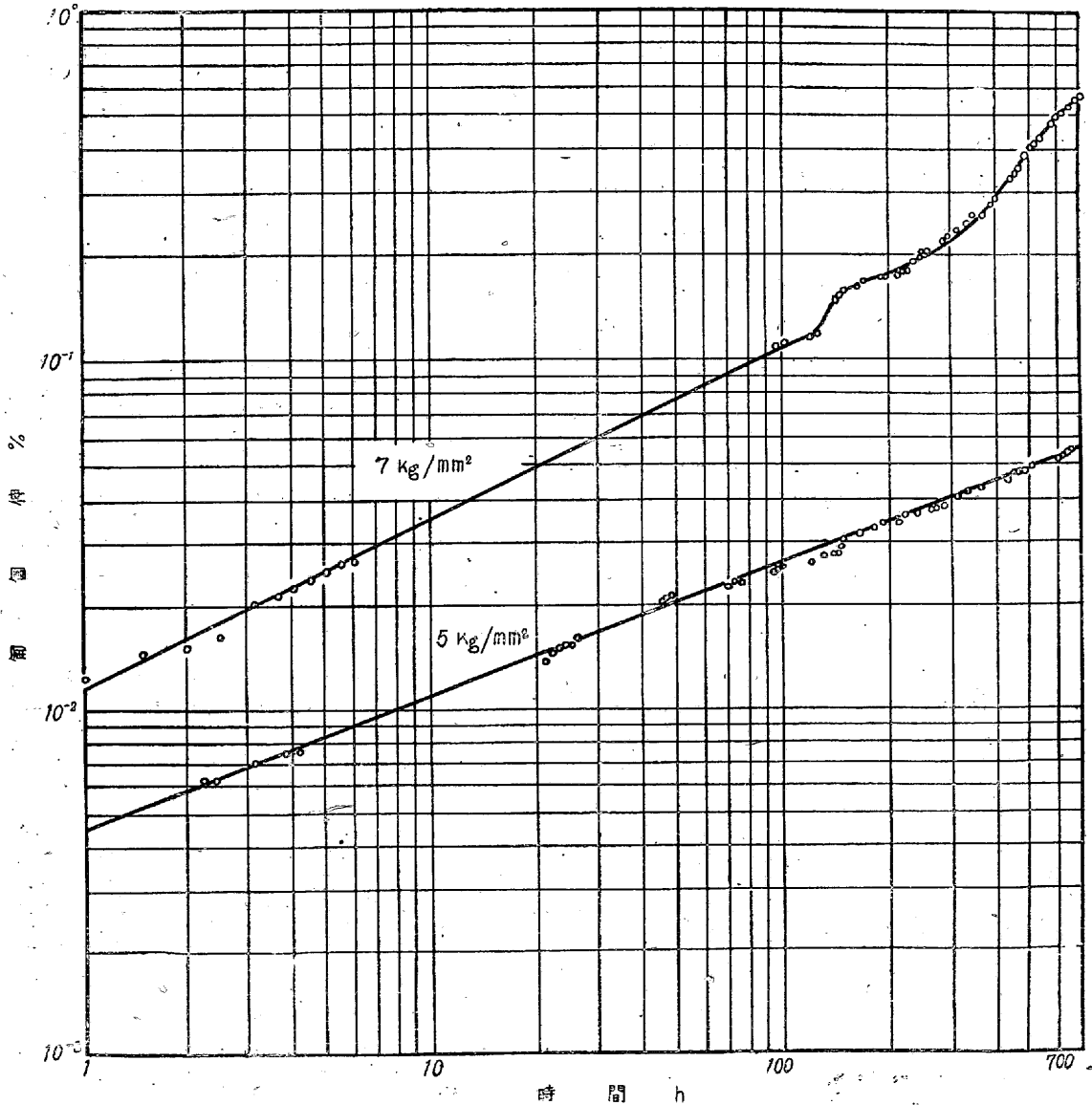
$$v = ne/t \dots \dots \dots (2)$$

より求められ, (2) 式より第1階程の終りに於ける匍匐速度を求むれば, これが略第2階程の匍匐速度を示す譯であるが, これを求める爲には, 第1階程の繼續時間が問題となる.

三菱長崎造船所の奥田博士<sup>7)</sup> は, 比較的低温に於ては, 凡そ 2000 h まではこれが繼續するものとして, 長時間後の匍匐強度を求められて居る. 又 0.35% 炭素鋼に就て, 454° に於て, 5.26 kg/mm<sup>2</sup> の應力のもとで, H. C. Cross 及 J. G. Lowther<sup>8)</sup> の行つた實驗の結果では, 6000 h までは

<sup>7)</sup> 三菱長崎造船所實驗報告(非公刊)第 1875 號(昭 15. 11)

<sup>8)</sup> Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 38 (1938) I, p. 121/8



第 10 圖 R 試料 550°C の匍匐曲線

47 x 46 = 21.6 等

(1) 式が適用せられ、それ以後は約 20000 h まで  $v$  は殆ど一定である。一方同じ炭素量の鋼に就て、同温同應力のもとで C. L. Clark<sup>9)</sup> の行つた結果では、1500 h までは (1) 式が適用されるが、それ以後は  $v$  は尙減少の傾向を示してゐるが、略一定と見做すのが安全であらう。更に A. Krisch<sup>10)</sup> は二三の特殊鋼に就て、500° に於て 1000 h 内外の匍匐試験を行つて居るが、この結果に對しても (1) 式が略適用される。A. E. White, C. L. Clark 及 R. L. Wilson<sup>11)</sup> は軟鋼に就き、538° で 10000 h 内外の實驗を行つてゐるが、應力が高過ぎざる限り、第 1 階程は 1000 h までは續いてゐる。第 10 圖は、第 4 表の如き組成の極軟鋼に就て 550° に於て、著者の行つた實驗結果であるが、この場合にも、應力が高過ぎざる限り、實驗時間を通じ (1) 式が成立する。更に高温に於ては第 1 階程は短縮され、(1) 式の成立する時間は短くなる様である。<sup>12)</sup>

第 4 表

符號	C	P	S	Cu	Mn	Si
R	0.05	0.034	0.033	0.34	0.46	0.23

かくの如く、(1) 式の適用される時間は、實驗温度が高い程短縮されるが、上の諸例から判断するに、500° 以下に於ては少くとも 1000 h までは成立するものとして、差支ないものと思ふ。<sup>13)</sup> 依て第 6~9 圖及 (2) 式より  $n$  及び加重後 1000 h の時の匍匐速度を求むれば、第 5 表の如く

第 5 表

試料	應力 kg/mm <sup>2</sup>	$n$	100 h の時の匍匐速度 $\times 10^{-6}\%/h$
MA	12.1	0.261	38
	14.2	0.317	70
	15.5	0.331	86
	17.7	0.338	101
	18.5	0.354	143
MB	8.6	0.235	38
	10.5	0.243	44
	11.5	0.274	74
	13.7	0.256	76
	15.0	0.250	85
NA	7.0	0.325	65
	8.8	0.253	67
	10.9	0.400	220
	14.1	0.448	448
	17.0	0.467	804
NB	5.0	0.176	23
	6.3	0.250	68
	7.1	0.301	91
	9.0	0.304	154
	12.9	0.320	230

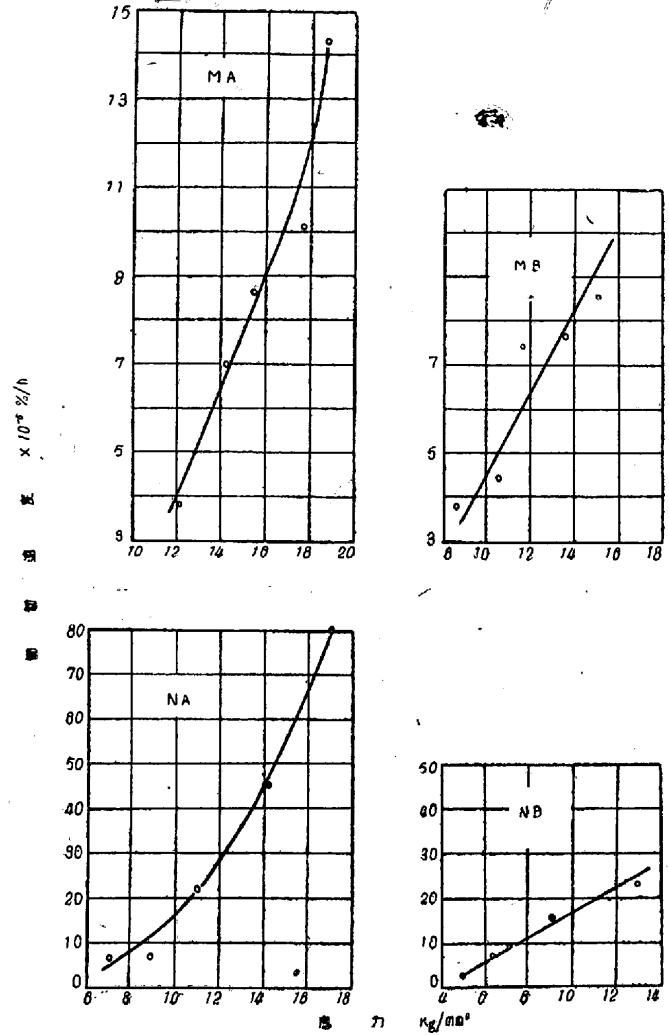
<sup>9)</sup> Proc. Amer. Soc. Test. Mat, 38 (1938) I, p. 130/9

<sup>10)</sup> Arch. Eisenhüttenw. 12 (1938) S. 199/206

<sup>11)</sup> Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 36 (1936) II, S. 139/60

<sup>12)</sup> C. L. Clark and A. E. White: The Properties of Metals at Elevated Temp. 1936

<sup>13)</sup> 繼續時間が更に長い場合には 1000 h の時の匍匐速度より定められた匍匐限は安全側の數値を與へるものと言ふ事が出来る。



第 11 圖 加重後 1000 h の時の速度曲線

になる。 $n$  は材質及應力に依つて變つてゐるが、試驗温度に依つても變る事は明かである。尙 1000 h の時の匍匐速度と應力との關係を圖示すれば、第 11 圖の如くなり、これより  $50 \times 10^{-6}\%/h$ ,  $100 \times 10^{-6}\%/h$  の匍匐速度に相當する匍匐限を求むれば第 6 表を得る。これを短時間の平均匍匐速度より求めた第 3 表の結果と比較すれば、A と B との差は減少してゐる。即ち第 6 表の結果も A より B の方が低い、第 3 表の場合の方がその差異が甚だしい。これは  $n$  の値が B の場合に時間に依り異なる事に因るものである。

第 6 表 外挿法により求めたる匍匐限

符號	$100 \times 10^{-6}\%/h$	$50 \times 10^{-6}\%/h$
MA	17.0 kg/mm <sup>2</sup>	12.8 kg/mm <sup>2</sup>
MB	15.8 "	10.5 "
NA	8.5 "	7.0 "
NB	7.5 "	5.7 "

次に  $n$  が時間に對し一定の場合には、短時間の平均匍匐速度と、長時間後の匍匐速度との關係は次式に依て求められる。短時間  $t_1 \sim t_2$  に於ける平均匍匐速度を  $\bar{v}$ , 長時間  $t$

に於ける匏匏速度を  $v$  とすれば

$$v/v = (t/t_3)^{n-1} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{茲に } t_3^{n-1} = (t_2^n - t_1^n)/(t_2 - t_1) \dots \dots \dots (4)$$

今種々の  $n$  に對して 3~6 h, 25~35 h の平均匏匏速度と, 1000 h の時の匏匏速度との關係を(3)及(4)式より求むれば, 第7表の如くなる。これに依れば, 例へば 3~6 h の

第7表 短時間の平均速度と長時間後の速度との關係

$n$	3~6 h $\times 10^{-4}\%/h$	25~35 h $\times 10^{-4}\%/h$	1000 h $\times 10^{-6}\%/h$
0.2	50	11	65
	56	15	72
	78	17	100
0.3	45	12	100
	50	13	109
	55	15	122
0.4	26	9	100
	47	15	174
	50	20	760

平均匏匏速度が齊しく,  $50 \times 10^{-4}\%/h$  の場合にも  $n$  が 0.2, 0.3, 0.4 と異れば, 1000 h の時の匏匏速度はそれぞれ  $65 \times 10^{-6}\%/h, 109 \times 10^{-6}\%/h, 760 \times 10^{-6}\%/h$  となり, 可成り相違してゐる。從て例へば 1000 h の時の匏匏速度が  $100 \times 10^{-6}\%/h$  に相當する應力を匏匏限に採り, これを 3~6 h の平均匏匏速度より求めんとする場合には,  $n=0.2$  の場合には  $78 \times 10^{-4}$ ,  $n=0.3$  の場合には  $45 \times 10^{-4}\%/h$ ,  $n=0.4$  の場合には  $26 \times 10^{-4}\%/h$ , と言ふ風に  $n$  の値に依て, 基準に採るべき平均速度を變へなければならぬ。5~10 h, 25~35 h 等の平均匏匏速度より求める場合にも同様の事が言へる。

かやうな意味で, 短時間に一定の平均速度を與へる應力を以て匏匏限を決定する方法は, 長時間後の匏匏速度を推定するには適當でない。これに對して(1)式が成立する範圍に互り,  $\log \epsilon - \log t$  直線を外挿して, 長時間後の匏匏速度を求め, これより匏匏限を決定する方が妥當であると考へられる。

### III. クロムモリブデン鋼の匏匏と熱處理との關係

#### 1. 試料

組織の安定度と匏匏との問題に關聯して, 匏匏強度に及ぼす熱處理の影響を調べた。外挿法による迅速測定法の適用例として述べる事とする。試料は第8表の通りのクロムモリブデン鋼で約 16 mm  $\phi$  に鍛延後, 第9表の如く, 5通りの熱處理を施した。常溫及高温に於ける機械的性質は第10表の通りである。焼戻溫度が等しい場合は, 焼戻溫度がの高い方が常溫高温共に衝擊値が高く, 抗張力は大き

無い。焼戻溫度が等しい場合は, 焼戻溫度の高い程抗張力が低く, 衝擊値が高い。焼準焼戻したものは, 同溫度の焼戻焼戻を施したものより抗張力, 衝擊値共稍低い。

第8表

%	C	P	S	Cu	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
符號 P	0.28	0.021	0.005	0.21	0.49	0.28	0.80	0.92	0.23

第9表

符號	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5
熱處理	830°C O.Q. 600°C O.C.	880°C O.Q. 550°C O.C.	880°C O.Q. 600°C O.C.	880°C O.Q. 650°C O.C.	880°C A.C. 600°C A.C.

第10表

符號	試驗溫度 °C	抗張力 kg/mm <sup>2</sup>	降伏點 kg/mm <sup>2</sup>	伸 %	絞 %	シャルピー kgm/cm <sup>2</sup>
P 1	常溫	95*	—	—	—	13.4
	400	83**	—	—	—	13.5
	550	50**	—	—	—	8.6
P 2	常溫	107.2	103.9	19.0	68.7	7.2
	400	94.8	88.0	18.5	56.8	10.2
	550	63.6	—	28.0	82.7	8.0
P 3	常溫	95.0	85.4	25.5	67.3	15.3
	400	82.6	72.8	29.0	56.8	21.6
	550	61.8	—	33.0	82.7	12.7
P 4	常溫	86.5	69.6	26.5	55.0	22.3
	400	81.6	—	27.0	54.9	16.9
	550	55.6	—	31.5	82.7	14.8
P 5	常溫	90.5*	—	—	—	—
	550	56.1	—	21.0	72.1	10.9

\* ブリネル硬度よりの推定値

\*\* 相互壓縮法による高温硬度よりの推定値

#### 2. 匏匏速度

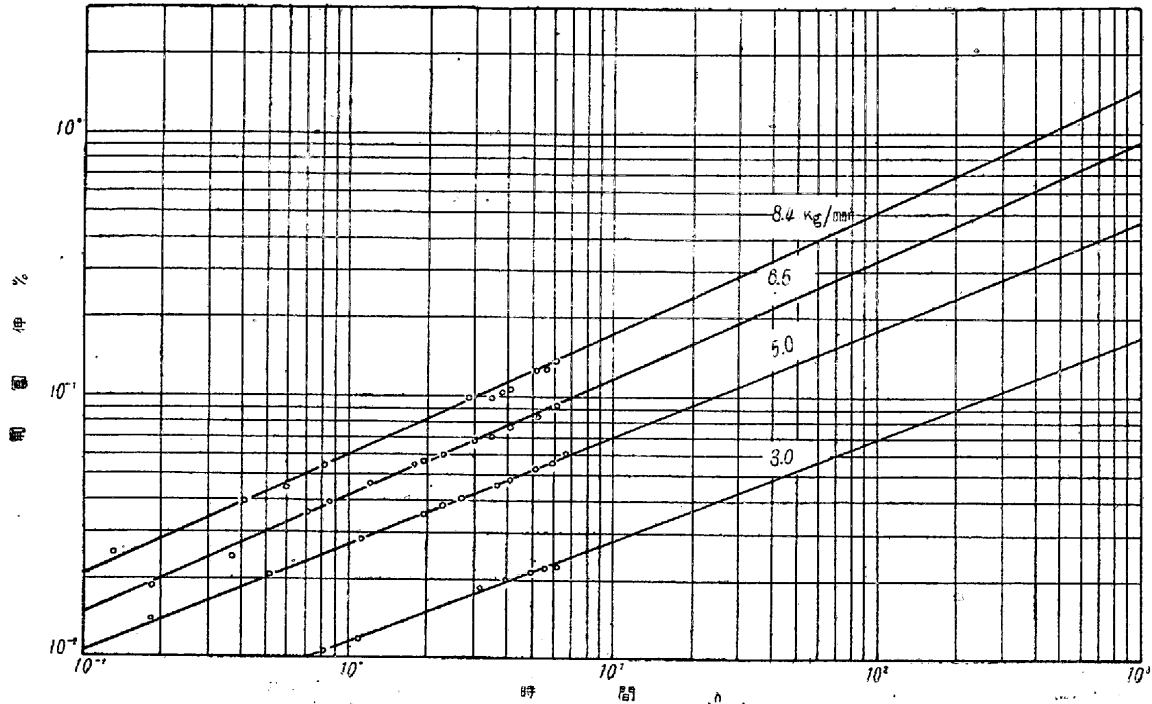
匏匏試験は 400°, 470°, 550° に於て行ひ, 試験時間は 6 h 宛とし, 試験溫度に 15 h 豫熱後加重した。繁雜を避ける爲に, 個々の匏匏曲線を掲げる事は控へるが, 1 例として, 試料 P 5 の 550° に於ける試験結果を示せば, 第12圖の如くである。各熱處理のものに就き 1000 h の時の匏匏速度を求むれば, 第13圖及第11表の通りである。<sup>14)</sup>

第11表 1000 h の時の速度  $100 \times 10^{-6}\%/h$  に相當する應力

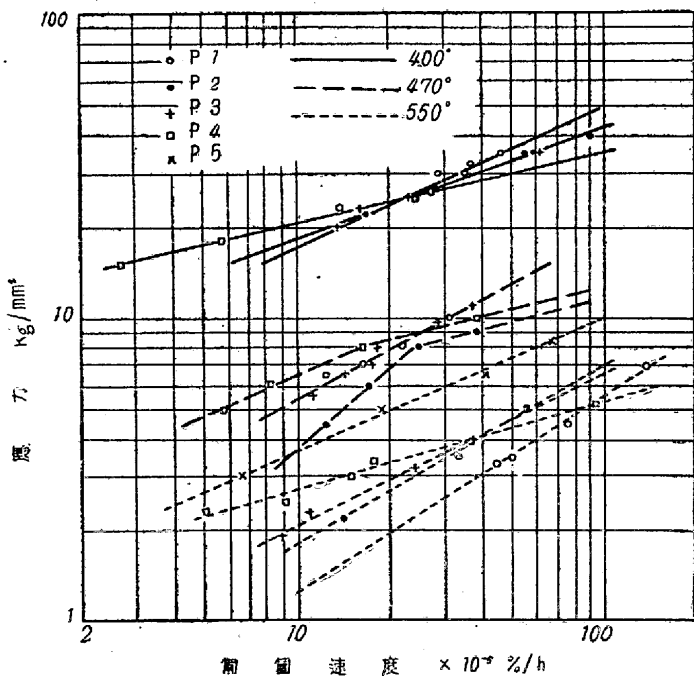
符號	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5
kg/mm <sup>2</sup>					
溫度 °C					
400	17.0	18.0	18.0	20.5	—
470	5.3	3.6	5.3	6.5	—
550	1.3	1.8	2.1	2.7	3.6

焼戻溫度の異り, 焼戻溫度の等しい P 1 と P 3 とを比較すれば, 焼戻溫度の高い P 3 方が匏匏強度が大であり, これはオーステナイト結晶粒度の小となつた爲と考へられる。又焼戻溫度の等しく, 焼戻溫度の異なる P 2, P 3, P 4

<sup>14)</sup> 550° に於ても 1000 h まで(1)式が成立するものとしたが, この點に關しては, 尙 検討の餘地があらう。



第12圖 P5 試料 550° の 匏匏 曲線



第13圖 加重後1000hの時の速度曲線

に於ては、焼戻温度の高いもの程、匏匏強度が大であつて、これは、第14圖に掲げた寫眞1~3にも見られる如く、焼戻組織に於ける結晶粒の成長に依るものと考へられる。尙この匏匏強度の相違は、匏匏限を苛酷に採る程、顯著になる傾向を示す事が、第13圖から窺はれる。高温抗張力は、第10表に示した如く、焼戻温度の高い程低いが、匏匏強度及衝擊値は焼戻温度の高い程大なる故、高温で使用する場合は焼戻温度を高めにする方が良好であらう。全體

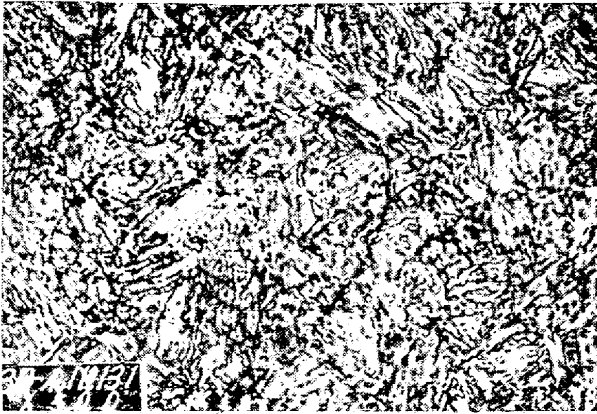
としては焼準、焼戻したP5が匏匏強度著しく大で、この場合の組織は第14圖寫眞4に見られる如く、針狀地鐵が顯はれて居り、一般にベイナイト的な組織が匏匏に強い事が想像される。實用に際しては、熱處理に敏感なる衝擊



1. 880° O. Q. 550° O. C.



2. 830° O. Q. 600° O. C.



3. 880° O. Q. 650° O. C.



4. 880° A. C. 600° A. C.

第 14 圖 P 試料の顯微鏡組織 (×500)

値の必要度をも考慮して、適当な熱處理を施すべきである。

尙 第 12 表は Kaiser Wilhelm 協會第 1 法に従つて求めた匍匐限であるが、これを第 11 表と對比すれば、全般に匍匐限が高めに現れて居り、匍匐強度の順序も異なるものが多い。

のが多い。

第 12 表 K-W-I 第 1 法による匍匐限

温度 °C	符號				
	kg/mm <sup>2</sup>	P 1	P 2	P 3	P 4
400	28	29	28	27	—
470	8.8	7.9	9.0	8.0	—
550	2.8	2.6	2.9	3.0	5.0

#### IV. 結 言

1. 匍匐の比較的初期に於て適用される實驗式  $\epsilon = C t^n$  に於て、 $n$  は材質、温度、應力に依て異り、短時間の平均匍匐速度が等しくとも、 $n$  が異なれば、長時間後の匍匐速度は異なる故、迅速測定の場合に於て匍匐限は短時間の平均速度より決定するよりも、上式の成立範圍に互つて  $\log \epsilon - \log t$  直線を外挿して、長時間後の匍匐速度を求め、これより匍匐限を決定する方が妥當である事を述べた。

2. この外挿法により、クロム-モリブデン鋼の匍匐強度と熱處理との關係を調べた結果では、

(1) 焼戻温度の等しい場合には、焼戻温度の高い方が匍匐強度が大であり、オーステナイト結晶粒度の影響が顯はれて居る。

(2) 焼戻温度の等しい場合には、焼戻温度の高いもの程匍匐強度が大であつて、これは焼戻組織の結晶粒の成長に因るものと考へられる。

(3) 焼入焼戻したものよりも、焼準焼戻したものの方が匍匐強度が大であり、ベイナイト組織が匍匐に強い事が知られる。

#### 正 誤

鐵と鋼第 29 年第 2 號 140 頁 論說 日下和治、千葉喜美、大橋登茂英：海南島田獨産鐵鑛石及佛印産無煙炭を原料とする回轉爐海綿鐵製造法の研究 第 20 圖 海綿鐵ブリケット寫眞上部

正	20 t	10 t	5 t
誤	5 t	10 t	20 t