

諸種金属材料の引抜による加工 硬化曲線に就いて

小 河 弘*

The Work Hardening Curved Lines of Various Metals by Cold Working

By Hiromu Ogawa, D.S.E.
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The writer has made public in the article the calculation formula of the drawing force in both cases when the drawing material is hardened and not hardened during drawing proceeding. He has obtained the most reasonable die shape by which the minimum drawing force is reached. Studies disclosed are also concerned with conical and curved surface dies, although the relation between calculation formula and drawing material not touched.

Here he has made clear the work hardening curved lines of various drawing materials showing how the hardenings are raised in accordance with drawing proceedings. The results are as given below:

Copper and aluminium show nearly equal strengths over all drawing proceedings, and lower, medium alloy steel and monel metal give work hardening lines curved so slightly as appearing as almost straight lines. Austenitic stainless steel, brass, Halman (Cu-Al-Mn alloy) and nickel show remarkably curved work hardening lines, and phosphor bronze alone yields a complex line.

Moreover, he refers to some investigations of work hardening which were carried out to examine his above experimental data.

〔I〕 緒 言

金属を変形加工する。即ち引抜、圧延、鍛造、絞り、並びに曲げ作業等に関する塑性変形学の発展は最近頃に著しきものあり。このことは所謂金属の原料現場に対して新しい理論的体系を織込むものとして極めて注意すべきことと思われる。

筆者はさきにこの一端として引抜力に関して若干の報告を行つた^{(1)~(6)}が、その際引抜材が加工作業中所謂加工硬化することを考慮した場合の引抜力計算式を求めた。尤もこれに先立ち全く加工硬化せずとした場合に就いても論じているのであるが、加工硬化の程度が材料に

よつて如何に異なるかという点に関しては未だ詳細に発表する機を得なかつた。こゝに極一般的に 10 数種の材料に就いて加工硬化曲線を求めたところを述べ、以て計算式の選択と使用に便ならしめると共に、引抜以外の冷間加工に関しても参考になるものと考えこゝに報告する次第である。

なお末尾に加工硬化に関して行つた若干の調査事項を要約して述べ、以て考察を加えるための参考とした。

〔II〕 筆者の引抜力計算式

順序として筆者がさきに得た計算式の概要を摘記すれば、先ず円錐ダイスに就いて次の 3 式がある。

* 日立製作所日立工場 工博

P_m = 最大引拔力

R = 引拔材の半径

α = 円錐ダイス頂角の $1/2$

μ = 引拔材とダイス壁との間に働く摩擦係数

k = 引拔材の引張降伏応力

τ_f = 引拔材の剪断降伏応力

r = 剪断歪

G' = 引拔材の剪断応力—歪曲線に於ける直線的加工硬化の係数 (第1図)

A, B = 引拔材の剪断応力—歪曲線に於ける曲線的加工硬化の係数 (第2図)

p = 引拔材繊維曲げに要する応力

しかして a, b はそれぞれダイス出入口に於ける値を表わすものとすれば、

(A) 引拔材の降伏限度を一定と仮定した場合⁽¹⁾

$$P_m = 2\pi R_a^2 k \left\{ (1 + \mu \cot \alpha) \log \frac{R_b}{R_a} + \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}} \right\} \dots (1)$$

(B) 引拔材の加工硬化時の応力がその歪と直線的関係にある場合⁽²⁾⁽³⁾

$$P_m = \pi R_a^2 \left\{ \sigma_{rm} + \mu \cot \alpha \left(\sigma_{rm} - p_b \frac{R_b^2}{R_a^2} \right) + p_a \right\} \dots (2)$$

こゝで

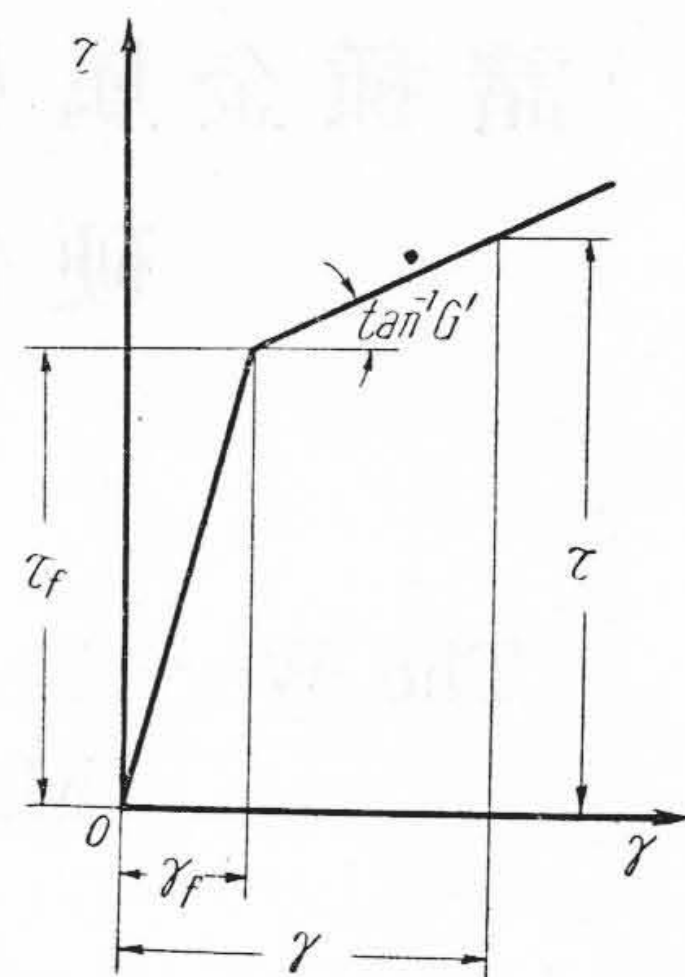
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rm} &= p_b + 4 \left\{ \tau_{fb} \log \frac{R_b}{R_a} \right. \\ &\quad \left. + 2G' \log \frac{(R_a^3 + R_b^3)^{2/3}}{\sqrt[3]{4} R_a R_b} \right\} \\ p_a &= \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}} k_a = \frac{4}{3\sqrt{3}} (\tau_{fb} + r_a G') \alpha \\ p_b &= \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}} k_b = \frac{4}{3\sqrt{3}} \tau_{fb} \alpha \\ r_a &= \frac{2(R_b^3 - R_a^3)}{R_b^3 + R_a^3} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

(C) 引拔材の加工硬化時の応力が歪と曲線的関係にある場合⁽⁴⁾

$$p_m = \pi R_a^2 \left\{ \sigma_{rm} + \mu \cot \alpha \left(\sigma_{rm} - p_b \frac{R_b^2}{R_a^2} \right) + p_a \right\} \dots (4)$$

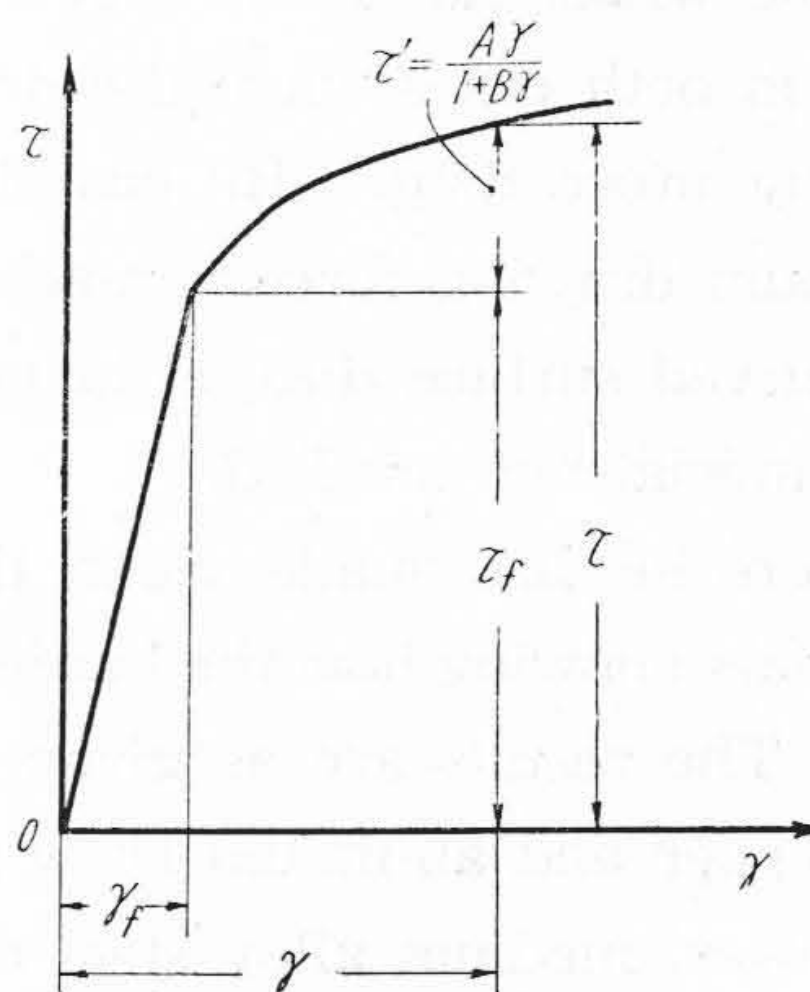
こゝで

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rm} &= p_b + 4 \left(\tau_{fb} + \frac{2A}{1+2B} \right) \log \frac{R_b}{R_a} \\ &\quad - \frac{16A}{3(1-4B^2)} \log \frac{2}{(1+2B) + (R_a/R_b)^3(1-2B)} \\ p_a &= \frac{2d}{3\sqrt{3}} k_a = \frac{4}{3\sqrt{3}} \tau_{fa} \alpha = \frac{4}{3\sqrt{3}} \left(\tau_{fb} + \frac{Ar_a}{1+B\tau_a} \right) \alpha \\ p_b &= \frac{2d}{3\sqrt{3}} k_b = \frac{4}{3\sqrt{3}} \tau_{fb} \alpha \\ r_a &= \frac{2(R_b^3 - R_a^3)}{R_b^3 + R_a^3} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$



第1図 直線的加工硬化をする場合の剪断応力—歪線図

Fig. 1. Shearing Stress-strain Diagram when Material Shows Straight Work Hardening



第2図 曲線的加工硬化をする場合の剪断応力—歪線図

Fig. 2. Shearing Stress-strain Diagram when Material Shows Curved Work Hardening

次に曲面ダイス (曲面は双曲線 $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$ の $y > 0$ なる部分が y 軸のまわりに形づくる回転体なりとした) に就いても、円錐ダイスの場合と同様、引拔材の降伏限度一定なる場合⁽⁵⁾⁽⁶⁾並びに引拔材が直線的加工硬化をなす場合 (未発表) に就いての計算式を得ているが、本文は計算式の紹介をするのが主な目的ではなく、又これらは相当煩雑な結果となつていたのでこゝでは割愛することとした。

〔III〕 実験の方法

(1) 引 拔 材

実験に供した材料は第1表に見るような成分を有する炭素鋼 3, 不銹鋼 2, 構造用特殊鋼 1, 計6種の鉄金属材料、並びに第2表の成分を有する銅その他の非鉄金属材料計7種である。表中横線ある成分は分析を行わなかつたことを示す。

第 1 表 鉄金属材料の分析成分 (%)

Table 1. Analysed Components of Ferro-Alloys (%)

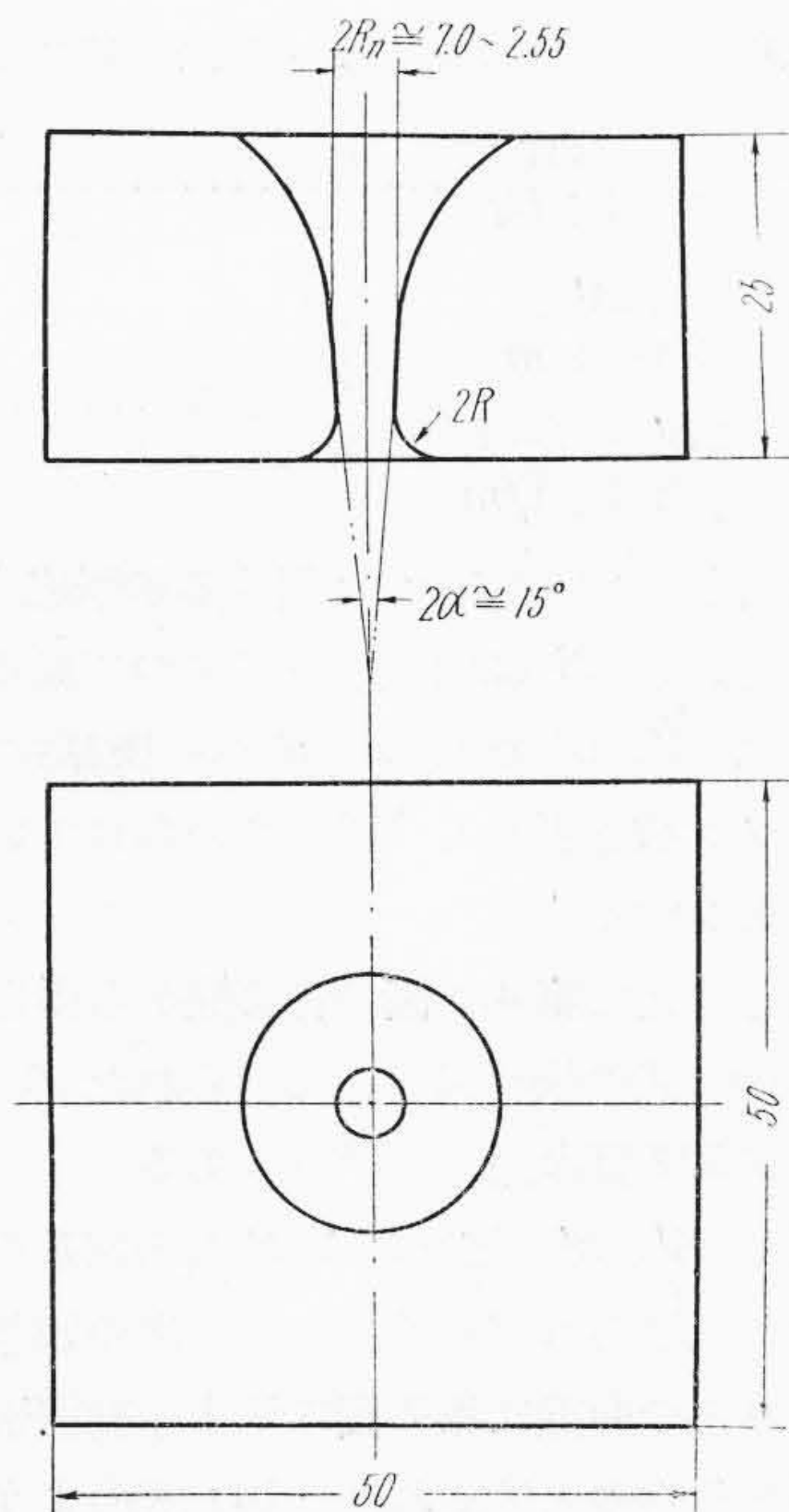
No.	材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
1	低炭素鋼	0.10	0.03	0.35	0.016	0.019	0.09	0.06
2	普通炭素鋼	0.15	0.18	0.40	0.018	0.017	0.08	0.08
3	高炭素鋼	0.74	0.23	0.31	0.013	0.013	0.05	0.04
4	A系不銹鋼	0.04 0.05	—	1.10 6.70	—	—	7.60 7.80	17.50 18.30
5	P系不銹鋼	0.19	0.03	0.29	0.023	0.010	0.21	12.90
6	中級合金鋼	0.88	0.19	1.14	0.020	0.025	0.61	1.44

第 2 表 非鉄金属材料の分析成分 (%)

Table 2. Analysed Components of Non-Ferro-Alloys (%)

No.	材 料	Cu	Zn	Sn	Mn	P	Ni	Al
7	銅	99.8	—	—	—	—	—	—
8	黄銅	59.5	39.3	—	—	—	—	—
9	磷青銅	93.5	0.2	5.9	tr.	0.26	—	—
10	ハルマン	89.2	—	—	6.1	—	—	4.0
11	ニッケル	—	—	—	—	—	99.4	—
12	モネルメタル	29.6	—	—	—	—	67.3	—
13	アルミニウム	—	—	—	—	—	—	99.4

(備考) 上表材料は特別なるものゝ外はいずれも直径 6~7mm の線材である。



第 3 図 引 抜 ダ イ ス

Fig. 3. Drawing Die

(2) ダイス並びに試験方法

ダイスは日立製作所安来工場製ダイス鋼 (C.R.D.) と呼ばれる高炭素クロム鋼 (C 2.2, Cr 13%) にて第 3 図のような形状に作製した所謂“叩きダイス”を使用した。即ち各々の引抜角度 2α は約 15° なる一定の値とし、その出口直径 $2R_n$ が約 7.0, 6.0, 5.4, 4.85, 4.35, 3.90, 3.50, 3.15, 2.85, 2.55 mm になるように順次径を小にする (直径減少 90%) 10 箇のダイスを準備した。ダイス孔内壁はよく研磨した。

次に第 1, 2 表の成分をもつ線材を順次小径のダイスにかけて引抜き、各引抜毎に長さ約 130 mm なる試片を 2

第 3 表 鉄材料引抜材の寸法と引抜伸び

Table 3. Dimensions and Drawing Elongations of Ferro-Alloy Drawing Materials

No.	材 料	2R(mm)		ϵ_d	2R(mm)		ϵ_d
		n	$2R_n$		n	$2R_n$	
1	低炭素鋼	0	6.85	0	5	3.90	2.090
		1	6.00	0.300	6	3.45	2.940
		2	5.35	0.640	7	3.15	3.730
		3	4.87	0.980	8	2.79	5.040
		4	4.37	1.460	9	2.56	6.180
2	普通炭素鋼	0	6.15	0	5	3.48	2.135
		1	5.54	0.230	6	3.30	2.475
		2	4.90	0.573	7	2.79	3.530
		3	4.41	0.940	8	2.62	4.500
		4	4.03	1.330			
3	高炭素鋼	0	6.85	0	5	3.91	2.070
		1	5.96	0.322	6	3.57	2.680
		2	5.49	0.555	7	3.14	3.260
		3	4.82	1.015	8	2.94	4.420
		4	4.32	1.515	9	2.67	5.590
4	A系不銹鋼	0	3.56	0	4	2.84	0.574
		1	3.44	0.072	5	2.54	0.970
		2	3.28	0.178	6	2.30	1.400
		3	2.98	0.428	7	2.00	2.170
5	P系不銹鋼	0	6.99	0	5	3.88	2.240
		1	5.92	0.395	6	3.50	3.130
		2	5.44	0.650	7	3.07	4.190
		3	4.75	1.170	8	2.93	4.700
		4	4.25	1.705			
6	中級合金鋼	0	7.05	0	5	4.03	2.060
		1	6.05	0.355	6	3.45	3.180
		2	5.45	0.675	7	3.15	4.020
		3	5.00	0.990	8	2.85	5.120
		4	4.50	1.460	9	2.50	6.950

本づゝ採取した。なおこの時の引抜速度はいずれも約 7 m/min とし、引抜の潤滑剤としては伸線用石鹼を用いた。次にこれらを引張試験機にかけてそれぞれの抗張力 σ_B を測定した。

第 3 表(前頁参照)、第 4 表は引張試験を行つた引抜材の寸法並びに引抜伸び ϵ_d を材料別に掲げたもので、 ϵ_d は次のような値である。

第 4 表 非鉄材料引抜材の寸法と引抜伸び
Table 4. Dimensions and Drawing Elongations of Non-Ferro-Alloy Drawing Materials

No.	材 料	2R(mm)		ϵ_d	2R(mm)		ϵ_d
		n	$2R_n$		n	$2R_n$	
7	銅	0	5.98	0	5	3.45	2.000
		1	5.38	0.235	6	3.15	2.610
		2	4.81	0.545	7	2.75	3.720
		3	4.35	0.890	8	2.55	4.500
		4	3.85	1.410			
8	黄 銅	0	6.97	0	5	3.46	3.060
		1	6.00	0.352	6	3.21	4.000
		2	5.40	0.665	7	3.00	4.400
		3	4.85	1.070	8	2.80	5.200
		4	3.88	2.230	9	2.58	6.300
9	磷 青 銅	0	7.15	0	5	3.90	2.360
		1	6.00	0.420	6	3.47	3.250
		2	5.40	0.755	7	3.20	4.000
		3	4.89	1.140	8	2.80	5.520
		4	4.38	1.665	9	2.58	6.700
10	ハ ル マ ン	0	6.45	0	4	4.96	0.684
		1	6.02	0.144	5	4.50	1.050
		2	5.72	0.269	6	4.00	1.600
		3	5.41	0.418	7	3.68	2.100
11	ニ ッ ケ ル	0	6.00	0	5	3.45	2.020
		1	5.40	0.235	6	3.14	2.660
		2	4.85	0.535	7	2.75	3.760
		3	4.35	0.902	8	2.55	4.540
		4	3.92	1.340			
12	モルネメタル	0	4.00	0	3	2.80	1.040
		1	3.45	0.345	4	2.55	1.465
		2	3.25	0.515	5	2.50	1.565
13	アルミニウム	0	6.95	0	5	3.85	2.260
		1	5.97	0.355	6	3.45	3.060
		2	5.36	0.682	7	3.15	3.870
		3	4.82	1.080	8	2.73	5.480
		4	4.34	1.565	9	2.54	6.500

$$\epsilon_d = \left(\frac{R_0}{R_n} \right)^2 - 1 \dots\dots\dots (6)$$

即ちその引抜材は素材に比べて如何程引伸ばされているかを表わしたものであり、又 n は引抜回数を示す。

[IV] 実 験 結 果

(1) 抗張力と引抜伸びとの関係

第 3, 4 表の各引抜材に就いて測定した抗張力 σ_B と (6) 式にて計算した引抜伸び ϵ_d との関係を図示すればそれぞれ第 4, 5 図の如き曲線になる。これが求むる加工硬化曲線である。

(2) 加工硬化曲線の形状

第 4, 5 図を見るに第 5 図 No. 7, 9, 13 の外は、曲率の差こそあれいずれも円滑なる上向に凸なる曲線を以て表わされている。こゝでこれらの曲線は第 6 図に示す単純引張応力—歪曲線に相当するものと考えれば (7) 式の如く表わされる。この場合加工硬化時の応力は歪と双曲線関係をもつものと仮定した。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma' = \sigma_0 + \frac{A' \epsilon_d}{1 + B' \epsilon_d} \dots\dots\dots (7)$$

但し σ は任意の ϵ_d に対する引張応力、 σ_0 は曲線が縦軸と交わる点の応力であり、 A' , B' は曲線の形によつて異なる常数である。

しかしてこの引張応力—歪曲線を表わす (7) 式より、次の形に於てその剪断応力—歪曲線を表わす式を理論的に導き得ることは証明し得るのであるが、このことは本文の主旨とは離れるのでこゝでは詳細は省略する。

$$\tau = \tau_f + \frac{A\gamma}{1 + B\gamma} \dots\dots\dots (8)$$

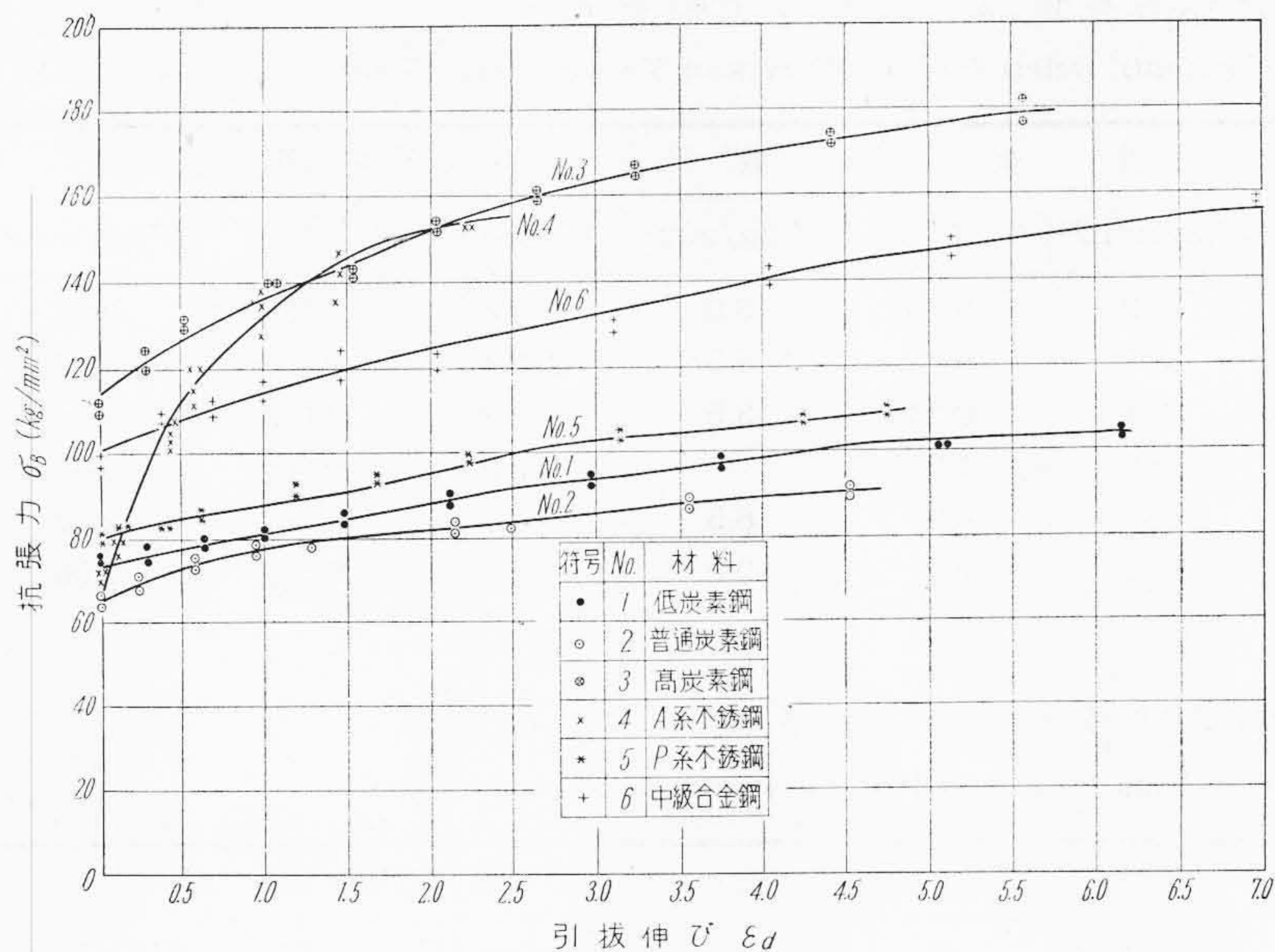
$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{A'}{2(1+1/m)} \\ B &= \frac{2B' - (1-1/m)}{2(1+1/m)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

但し τ は任意の剪断歪 γ に対する剪断応力、 τ_f は剪断降伏応力、 A , B は曲線の形によつて異なる常数である。(9) 式は A' , B' から A , B への換算式であつて、 m はポアッソン数を表わし一般に認められている 2 を以つてすることゝする。

以上の如く考えて第 4, 5 図の各曲線から得られた A' , B' 並びに (9) 式の換算によつて得られた A , B の値は第 5, 6 表 (第 112 頁参照) の通りである。

なお同表中 A' , B' 並びに A , B なる常数の外に E' , G' なるものが掲げられてあるがこれは次の如き内容を持つ。即ちこれらの曲線は第 7 図に示す単純引張応力—歪曲線に相当するものと考えれば (10) 式のように表わされる。

$$\sigma = \sigma_0 + \epsilon_d E' \dots\dots\dots (10)$$

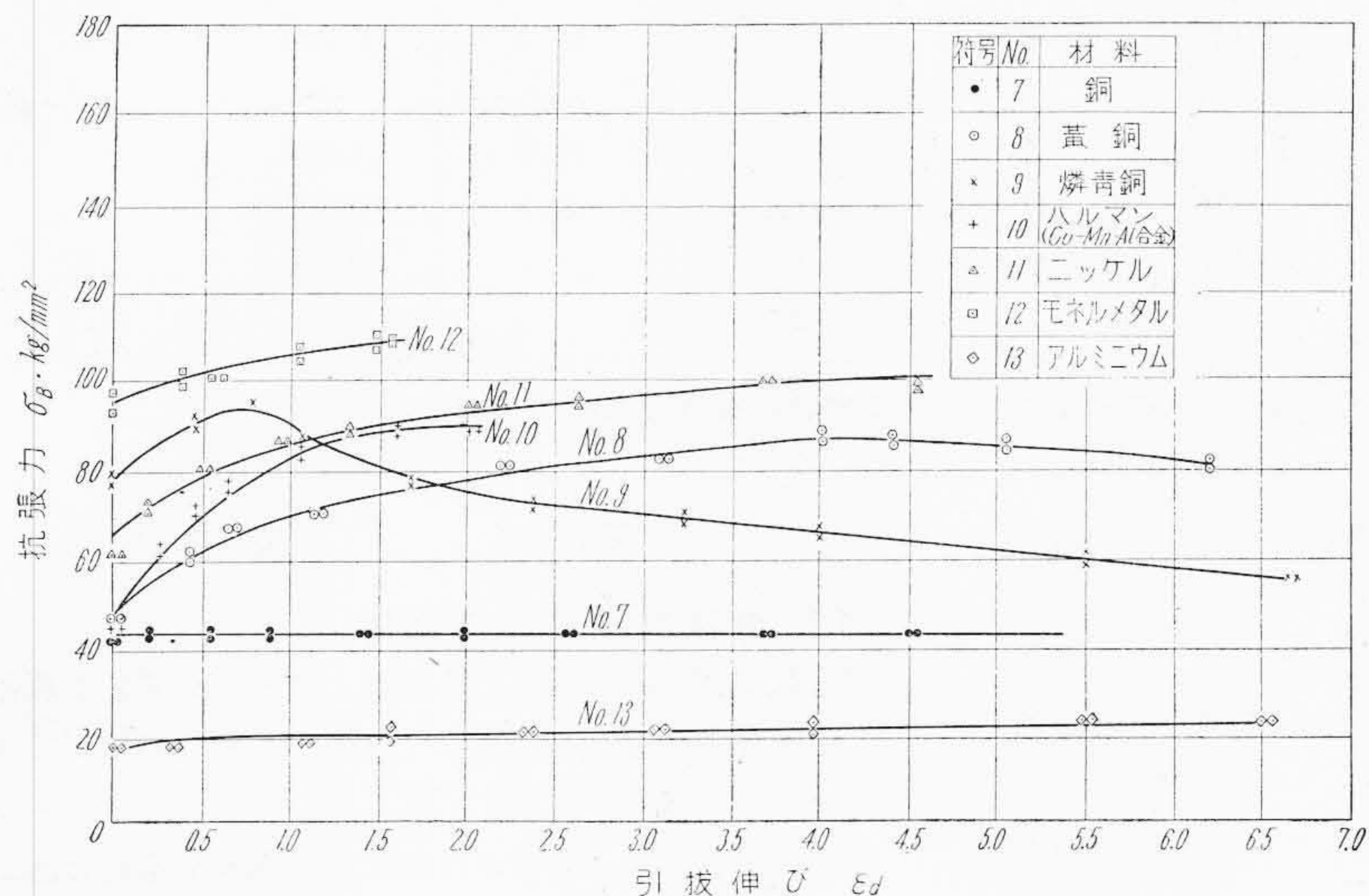


第4図

鉄材料引抜材の抗張力と引抜伸びとの関係

Fig. 4.

Relations between Tensile Strengths and Drawing Elongations for Various Ferrous Materials

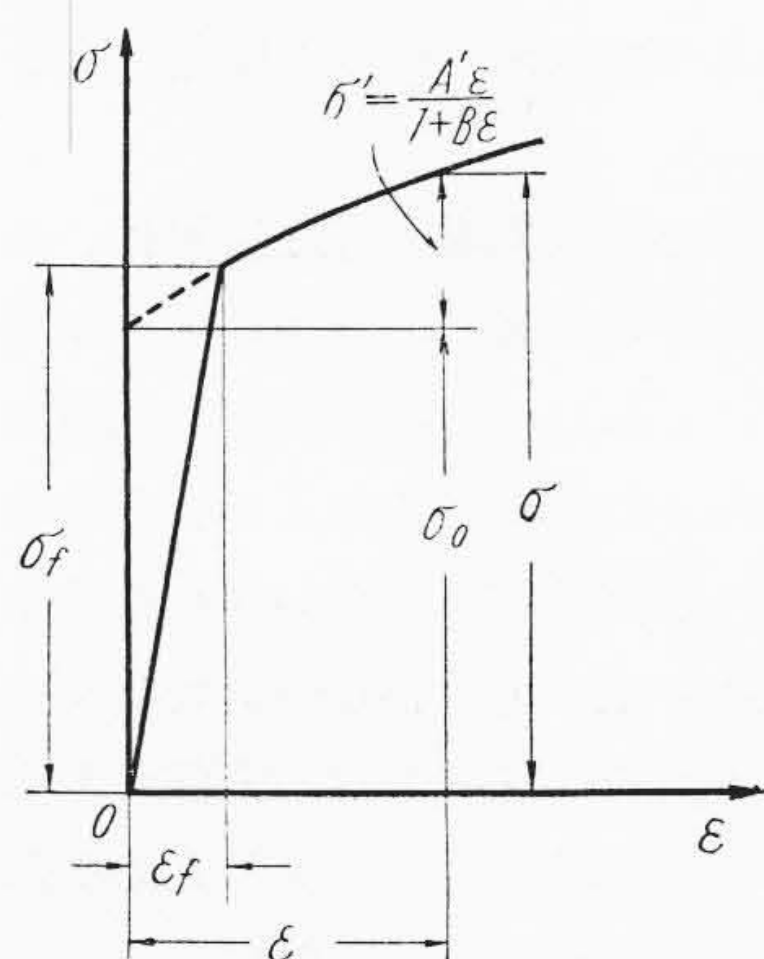


第5図

非鉄材料引抜材の抗張力と引抜伸びとの関係

Fig. 5.

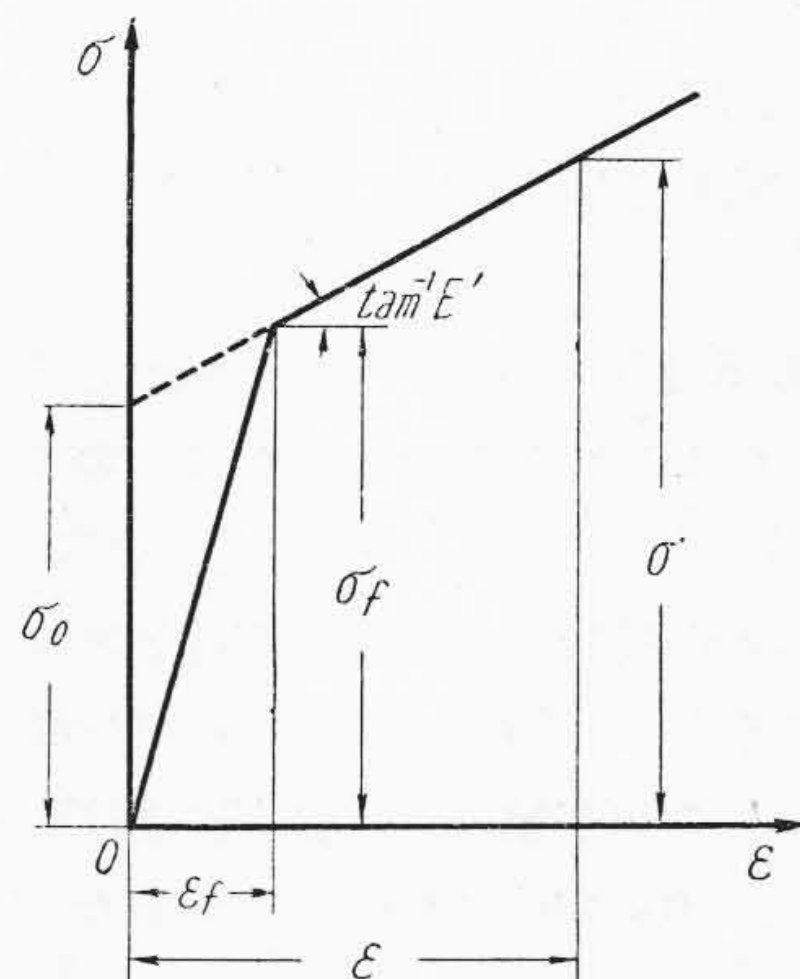
Relations between Tensile Strengths and Drawing Elongations for Various Non-Ferrous Materials



第6図

曲線的加工硬化をする場合の引張応力—歪線図

Fig. 6.
Tensile Stress-Strain Diagram when Material Shows Curved Work Hardening



第7図

直線的加工硬化をする場合の引張応力—歪線図

Fig. 7.
Tensile Stress-Strain Diagram when Material Shows Straight Work Hardening

第5表 鉄材料各曲線より決定せられた常数

Table 5. Constants Determined by Curves of Various Ferro-Alloys

No.	材 料	引 張 曲 線			剪 断 曲 線 (換 算)		
		$A'(\text{kg/mm}^2)$	B'	$E'(\text{kg/mm}^2)$	$A(\text{kg/mm}^2)$	B	$G'(\text{kg/mm}^2)$
1	低炭素鋼	14.3	0.28	8.0	4.8	0.020	2.67
2	普通炭素鋼	16.1	0.43	5.5	5.4	0.120	1.83
3	高炭素鋼	32.4	0.30	13.5	10.8	0.033	4.50
4	A系不銹鋼	159.6	1.27	—	53.2	0.680	—
5	P系不銹鋼	14.1	0.26	6.5	4.7	0.007	2.17
6	中級合金鋼	15.1	0.12	9.0	5.0	0.087	3.00

第6表 非鉄材料各曲線より決定せられた常数

Table 6. Constants Determined by Curves of Non-Ferro-Alloys

No.	材 料	引 張 曲 線			剪 断 曲 線 (換 算)		
		$A'(\text{kg/mm}^2)$	B'	$E'(\text{kg/mm}^2)$	$A(\text{kg/mm}^2)$	B	$G'(\text{kg/mm}^2)$
7	銅	—	—	0.5	—	—	0.17
8	黄銅	50.9	1.00	—	17.0	0.500	—
9	青銅	—	—	—	—	—	—
10	ハルマシ	109.9	1.82	—	36.6	1.047	—
11	ニッケル	46.0	0.95	—	15.4	0.467	—
12	モネルメタル	20.2	0.55	8.0	6.7	0.200	2.67
13	アルミニウム	—	—	1.3	—	—	0.22

(備考) 上表中 A , A' は曲線の傾斜特に曲線最初の部分の傾斜の程度を表わしている。

こゝで E' は引張塑性変形時の弾性係数とも名付けらるべきものである。

なお引張に関する(10)式から次のような形の剪断に関する式にまで理論的に導き得るのであるが、その詳細はこゝでは省略する。

$$\sigma = \sigma_f + (r - r_f)G' \dots\dots\dots(11)$$

$$G' = \frac{E'}{2(1+1/m)} \dots\dots\dots(12)$$

但し r_f は剪断降伏歪、 G' は(12)式から E' よりの換算で得られる数字で、剪断塑性変形時の弾性係数とも名付けられる値である。

以上の如く考えて第4, 5図中 σ_B と ϵ_d とが殆ど全く直線的関係にありと思われるものについての E' 並びに(12)式による G' 、及び σ_B と ϵ_d とは曲線関係にはあるが、その曲り方が甚だ緩やかで、一応直線的関係にあるものと見做され得るものについての E' の平均値並びに(12)式による G' の値が第5, 6表中に掲げられてある (E' は大体 $\epsilon_d = 0 \sim 4.0$ の範囲の平均値をとった)。

〔V〕 考 察

(1) 引抜き計算式の適用

以上加工硬化曲線を求める実験としては必ずしも豊富なものとは申し難いが、こゝで取扱った範囲の材料では大体次の如く概括する事が出来よう。

(A) 銅、アルミニウムは加工度が進んでも殆ど加工硬度の現象を示さず、従つてこれらの引抜き力は降伏限度を一定と考えた(1)式の計算式によるのが適当と思われる。(但し十分焼鈍したものではある程度の硬化はみとめられる。)

(B) 鉄材料の大部分即ち低炭素鋼、普通炭素鋼、高炭素鋼、P系不銹鋼、中級合金鋼並びにモネルメタル等は加工硬化の現象を示す。しかしてその加工硬化曲線はいずれも双曲線を以て表わされ得るのであるが、その曲り方が緩やかであるため一応直線を以て表わされ得るものとも見做すことが出来る。従つてこれらの材料に関する引抜き力は、加工硬化時の応力が歪と曲線的関係にあると考えた(4), (5)式或は同様直線的関係にあると考えた(2), (3)式の計算式によつて計算することが出来る。

(C) A系不銹鋼、黄銅、ハルマン、ニッケル等は著しく加工硬化の現象を示す。しかして加工硬化の曲線は双曲線を以て表わすことが出来、従つてこれらの引抜力は(4),(5)式の計算式によつて計算するのが適当と思われる。

(D) 磷青銅はある加工度まで加工硬化の現象を示すが、それ以上の加工度ではかえつて次第に軟化する傾向にある。

従つてその引抜力は(1),(2),(3),(4),(5)式いずれの計算によることも不可能であるが、強いて計算するとすれば他の式によるよりは(1)式によつた方が無難ではないかと思われる。

(2) 一般的検討

本章で加工硬化の現象を取扱うにあたり一応これを手近にある参考書^{(7)~(12)}に就いて調査した。本実験に関係深き点のみを要約して〔VII〕節に後記した次第であるが、これとの対照の便宜のため概略以下同節の順に従つて、本実験に関する限りについて逐次若干の検討を加えることゝしよう。

(A) 磷青銅を除く他のいずれの材料でも明らかに加工によつて抗張力、硬さを増大し伸びと絞りとを減少する。又硬度が進むに従つて粘性変形能が消耗せられていく傾向が認められる。但し銅、アルミニウム等は加工硬化の現象が殆ど現われず、この原因は軟化温度が低温度にあるためと思われる。

なお磷青銅で例外的な現象を示す原因を考えるに、恐らくこの材料は加工度が或程度以上に加わると著しく脆性を増大し引張強さをも低下するに至るといふ材質的な問題が含まれているものと思われる。しかし本実験の主目的が加工硬化曲線の形状の決定にあつたので、このことに関しては深くは追及せず、こうした例外もあることを示すに止めることゝした。

(B) 加工硬化の本質に関しては既に多くの研究者によつて議論せられ一応結晶の滑りを以つて説明せられている。勿論貧弱なる本実験のみを以つてしては到底この問題に考えを及ぼすことは不可能であるが、引抜なる常温加工問題を取扱う筆者としては重要な問題の一つであると考えている次第である。

(C) 加工硬化に及ぼす加工条件の一つとしては種々の要素がある。先ずダイス角度に就いて考えるに、本実験ではいずれの線径並びに材料に対しても一樣なるものを用いた。この角度は鋼線に就いて一般に適當と認められている $6\sim 12^\circ$ よりも大きい。従つてこゝで得られた加工硬化曲線は特に鉄材料では一般に實際作業の場合のそれよりは幾分大きく現われているものと考えられる(但しこの傾向は加工度大なる範囲では消失するものといわれている)。

次に断面減少並びに引抜回数に就いて考える。第4,5図を見るに一般には正しく順次加工度約20%(直径の減少10%)なるダイスによつたので問題はないものと思われる。但しA系不銹鋼とハルマンでは主として材質の関係上一般よりも更に小さい加工度にて引抜を行つた(即ち同一の断面減少を行うのに引抜回数を多くした)ので両者の曲線は幾分硬化が大き目になつていゝものと思われる。引抜速度並びに潤滑剤の条件はいずれの実験でも同様であるので問題はない。

なお引抜終了後試験まで並びに試験終了後次の引抜までの時間に就いては特別なる注意なしに実験を行つた。従つて材料によつて硬化曲線に幾分の影響が含まれていゝかも知れないが明らかではない。

(D) 材料による加工硬化性の相異に就いて考えよう。先づ合金の硬化性を週期率表によつて説明づけていゝ研究があるので本実験結果をそうした考えの下に観察したが、これだけの実験範囲では到底何等の傾向をも見出すことができなかつた。

次に材料の最初の状態と加工硬化曲線との関係であるが、本実験はいずれも初期条件即ち未だ引抜を行わぬ場合の状態にはさして嚴密なる考慮を払わなかつた。実験の主目的が諸材料の硬化曲線の相異を見るにあり、又初期条件が異つても曲線の全般的な傾向には大なる影響はないものといわれているからである。

更に各材料の硬化性を個々に考えて見る。銅、アルミニウム等は殆ど加工硬化の現象を示さず、この点はこの研究結果とよく一致する。(加工度が進むと却つて軟化するといふ実験結果もあるが本実験ではそこまでは行かなかつた。)実験に供した鉄材料の大部分即ち各種炭素鋼、中級合金鋼、P系不銹鋼並びにモネルメタル等は殆ど同様の加工硬化を示すことがわかつた。但し鉄材料のうちA系不銹鋼だけは大きな硬化を示し、この点他の実験結果と極めてよく一致するところである。非鉄材料では黄銅が大きな硬化性を持ちこれまた他の研究と一致する。

又ニッケルは相当大なる硬化性を持つことがわかつた。ハルマンもまた硬化性大なる部類に属するものであるが、この点銅の高合金固溶体は一般に大なる硬化性を持つといふ他の研究結果と一致する。磷青銅は上述の如く或加工度に於て硬化の最大を示し以後却つて軟化することが分つたが、その原因は恐らくこの材料固有の本質的問題にあらうと思われるが明らかではない。

〔VI〕 結 言

以上を要約すれば次の如くである。

引抜材が一定降伏限度を持つ場合、硬化時の応力が歪と直線的関係にある場合及び同様応力が歪と曲線的関係

にある場合なる三者に対する引抜き計算式は既述の通りである。如何なる材料が三者の中のいずれの計算式によるのが最も適当であるかを知るために本実験を行つた。鉄材料6種、非鉄材料7種について加工硬化曲線を求めた結果次のことが明らかにせられた。

1. 銅、アルミニウム等は引抜き材の降伏限度を一定とした式にしたがえばよい。(但し十分に焼鈍を施した場合はある程度の硬化を考える必要がある。)
2. 低炭素鋼、普通炭素鋼、高炭素鋼、P系不銹鋼、中級合金鋼及びモネルメタル等は加工硬化の現象を示し、硬化時の応力が歪と直線的又は曲線的関係にありと考へたいずれの式にもよることができる。
3. A系不銹鋼、黄銅、ハルマン及びニッケル等は著しい硬化を示し、応力が歪と曲線的関係にありと考へた式によるのが最も適当と思われる。
3. 燐青銅は加工度小なる間は硬化するがその後は却つて軟化するので、三者いずれの式によることも出来ないが先ず一定降伏限度の式を用いることが無難のようである。

なお加工硬化に関して二、三調査したところを要約して掲げ、又これを基として若干考察を加えたところを記載した。

諸材料の加工硬化曲線に関する実験としては未だ十分なるものとは申し難いが、本実験にて普通使われている材料について大体の傾向は掴み得たものとする。

〔VII〕 附 録

加工硬化に関する二、三の調査

延性ある金属材料を常温加工すれば所謂加工硬化又は常温加工の効果を示す事実はよく知られている。本研究で諸材料の加工硬化を求める実験を取扱うにあたり、手許にある数種の参考書^{(7)~(12)}に就いて調査した資料より本実験に関係深き点のみを摘記し、以つてこれに対する参考並びに考察の基礎とした。

(1) 加工硬化現象

常温加工を受けた材料は一般に如何なる性質を持つものであるかを概略列挙すれば次の通りである。

(A) 強さ、硬さを増加するが、同時に横方向の断面縮みで表わした延性は減少する。即ち抗張力、弾性限、降伏点、硬度を増大し、伸び、絞りを低下する^{(7)~(9)}。又衝撃値も減少する⁽⁹⁾。

(B) 一般には硬化が進むにしたがつて粘性変形能が消耗せられて行く⁽⁷⁾。(但し例外として銅、アルミニウム、銀、金等あり、この理由はこれらの軟化温度は極めて低い所にあることによるものと解釈せられている⁽⁷⁾。

(C) 加工の方向に著しく組織が引き伸ばされ、機械的性質の方向性が著しい⁽⁶⁾。

(D) 加工を受けた材料はこれを高温に保てば再結晶並びに軟化の現象が見られる。再結晶温度は加工度が激しい程低温である^{(7)~(9)}。

(E) 化学作用に敏感で腐蝕され易くなる^{(8)~(12)}。

(F) 比重、電気抵抗等の変化は一般に小さい⁽⁹⁾。

(G) 硬化性の異なる材料は一般に抗張力に対して降伏点が低い⁽⁷⁾。

(2) 加工硬化の本質

加工硬化の原因を研究するためには先ず結晶組織を考える必要がある。金属材料は普通頗る数多の結晶より成るが、このような結晶材料の塑性変形を研究するためにはその単結晶の機械的性質を調べるのが便利である。

単結晶の塑性変形とは或る結晶面に沿つて滑りを起すことであるが、滑り始めは滑面に沿う剪断応力の大きさに関係し垂直応力には無関係である。試験片の伸びが進むとこの滑りの起る面が増しこれらに仿く剪断応力の大きさも同様に増していく、このように伸びを進めるために応力が増す必要があるということは即ち単結晶の加工硬化を表わすこととなる。

普通の工業用材料でもまたその塑性変形は大体単結晶の場合と同様なりと考えられている。但しこゝでは数多の結晶粒が各々勝手に配列せられている関係上、或変形力に対して各結晶に滑りの難易が存在するという点だけが異り、かくて加工硬化の現象は単結晶の場合と同様に説明せられている⁽⁸⁾。

恐らく加工状態の結晶では結局格子が滑りを起しながら彎曲しており、原子の或る小礎体はその格子内の位置から非常に不均一に偏位しているものと考えられ、この偏位はX線干渉線の変化によつても証明せられている⁽⁷⁾。

以上の如く加工硬化に対する説明は一応結晶の滑りを以つて行われているのであるが、さてその滑りが果して又如何に加工硬化に関連するものであるかという本質的な解明に至つては今までのところ十分とはいへない状態である⁽⁷⁾。

(3) 加工硬化に及ぼす加工条件の影響

加工条件としては種々の要素が考えられるが、その中の二、三に就いて述べよう。

(A) ダイス角度 傾角を異にする円錐ダイスによつて同一の断面減少を行うような引抜きでは、一般にダイス角度が大きいほど加工硬化の程度が著しい。このことは加工度(例えば断面の減少率を以つて表わす)が小さい範囲に於て特に甚だしく、或程度加工度が大きくなるにしたがいダイス角度による差異は次第に減少することがわかっている。又ダイス角度の小さいダイスで減少率を

大きくして引抜く場合よりも、角度の大きいダイスで減少率を小さくして引いた場合の方が平均硬化度は大きくなるという事実も知られている⁽⁷⁾。

この原因は次のように説明せられている。即ち引抜材の表層部は壁面との摩擦のために剪断作用を最も強く受けるのであるが、中心部はこの影響が少い。したがって表層部の方がより多く加工硬化を受けることになる。ダイス角度が大きいほど剪断作用の影響は大となり加工硬化の程度が著しくなる⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。

この剪断作用は引抜かれた線材の尾部が凹形を呈している事実、或は予め印をつけた線材を引抜いて得る印の変形より見ても明らかに認めることができる。このことはX線によつてもまた確かめられている。即ち中心部は一定の結晶配列をもっているが、外側になるにしたがつて結晶配列は乱れ、その方向はダイス角度にしたがつて傾斜していることがわかる。この傾斜の原因はダイス角度によるよりも、むしろ摩擦によることが鋼ダイスの場合の方がタングステンカーバイドダイスの場合よりも大きい事実によつて想像され得るところである⁽⁷⁾。

なお軟質又は硬質の鋼線を引抜くに最適のダイス角度は $6\sim 12^\circ$ の間にあるといわれている。又最近ダイスの入口に於て角度大きく出口に進むにしたがつて角度の小さいダイスを用いる理由は、これを硬化の方面より見れば上述したところにより入口に於て断面の強度分布不均齊になつた線材を出口に於てなるべく一様強さの線材にするに役立つものと思われる⁽¹⁰⁾。

(B) 断面減少並びに引抜回数 同一の断面減少を行うに当りダイス角度は一定として、1回の減少率を大きくして数少く引抜くよりも、1回の減少率を少くして数多く引抜いた方が断面の歪は大となり加工硬化の程度は大きくなる。

因みに線又は棒の引抜に於て一般に行われ得る1回引抜の断面減少率は 40% ⁽¹⁰⁾ 或はせいぜい 60% ⁽⁷⁾ とせられている。

(C) 引抜速度 塑性変形速度と加工硬度との関係に就いては従来あまり顧られなかつた。しかし極く僅か温度を上昇させて正確に調べると、例えば純粋の引張、圧縮、剪断に就いて得られる応力-歪曲線は変形速度に影響せられるように思われる。即ち鋼又は銅の引張試験では速度が大なれば大なるほど降伏応力の上昇することが実験によつて確かめられている。又単結晶の応力-歪曲線に就いても同様のことがわかつている。これらのことより線の引抜の場合にもまた速度高ければ、加工硬度は大となるものと考えられる⁽¹¹⁾。但し一方では引抜力は引抜速度を相当広範囲に変化させても殆ど影響されないとされている⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。

(D) 潤滑剤 引抜材の加工硬化は潤滑剤の如何によつて起る温度上昇によつて影響を受けるであろうことは当然考え得られるところである。即ち潤滑作用不良なれば温度上昇甚だしく、ために軟化作用が起るものと思われる⁽⁷⁾。

(E) 再負荷するまでの時間 加工硬化の現象は最初に荷重を加えてこれを除去し、次に再び荷重を加えるまでの時間によつて差異を生ずることが知られている。Ewing が軟鋼の引張試験に就いて行つた実験では、最初過大な歪を与えた後 10 分間を経て再負荷した場合には材料は Hooke の法則にしたがわないが、5 日後には一部弾性を恢復し、21 日後には殆ど完全に弾性を恢復することがわかつた⁽⁸⁾。

次にこれとは別の事実が O. Haase 及び E. Schmid によつて行われた実験で知られている。即ち両氏は亜鉛に毎回順次 50% づゝの常温展延加工を加えてその都度引張試験を行つた結果、その前の加工を終つてから試験を行うまでの時間を 30~40sec とした場合の降伏点の低下は大したものではなかつたが、その時間を 24 hr とした場合の降伏点の低下は甚しく、この場合には展延の加工度が進むにしたがい次第に降伏点は低くなるという事実を確かめている⁽¹¹⁾。

(4) 加工硬化と材料

加工硬化の現象が材料によつて異なることは当然のことであるが、それらに就いて知られていることを二、三列挙すれば次の通りである。

(A) 或母元素に相等しい重量の種々の元素を加えた合金の加工硬化性を比較するに、週期律表に於ける母元素と添加元素との間隔が大きいほど硬化性（並びに硬化能）は大きくなる傾向があるといわれている⁽⁷⁾。

(B) 不均質成分となるような元素を含む合金、即ち析出硬化性合金の如きは著しく硬化性を増大する傾向がある⁽⁷⁾。

(C) 材料は一般に例えば焼鈍の如きその最初の状態の如何によつて、加工硬化曲線の形に差異を生ずることはよく知られている事実である。但し、これは初期条件が異なる程度で全体の傾向に影響はないものといわれている⁽⁷⁾。

(D) γ 鉄、 α 真鍮等は大きな硬化性を有し、又銅、 γ 鉄、銀等の高合金固溶体では硬化性大である。（恐らくニッケル、金等の場合でもそうであろうと思われる。）反対にアルミニウム、 α 鉄ではかゝる例は見られない⁽⁷⁾。

(E) 銅、アルミニウム、銀、金等の加工硬化曲線は或加工度に於て最高値に達し、それ以上の加工度では却つて低下するものといわれている。この原因はこれらの材料の軟化温度は恐らく 100°C 以上僅かのところにあ

り、強加工を受けた後には既に変形熱又は摩擦熱によるのみにて軟化が起ることにありと考えられている⁽⁷⁾。

(F) 銅に於ては酸素、磷等の不純物の如何によつて加工硬化曲線の異なることが知られている。

本研究は筆者が日立研究所在勤中引抜力に関する諸研究の一端として行つたものであるが、当時本研究に際し種々御便宜を与えられた日立研究所兼先所長外関係の方々に厚く御礼申し上げると共に、終始熱心に実験を担当していただいた同伊藤久太郎君等に心からの謝辞を捧げる。又この研究の発表を快く許可していただいた日立工場水戸分工場田村副工場長、野村部長に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

(1) 山内弘：一塑性変形と加工 p. 219~220, 223~

224 (昭 26-8) に実験と共に筆者の研究の要約が掲載せられている。

(2) 覚前、小河：機械学会論文集 9 (36) (昭 18-8)

(3)(4) 小河：機械学会論文集 11 (41) (昭 20-2, 5)

(5)(6) 小河：機械学会論文集 18 (65) (昭 27-1)

(7) G. Sachs 著、川崎訳：応用弾性学 2, p. 13~46

(8) Timoschenko 著、片山、北畠訳：材料力学、下、439~444

(9) 機械工学便覧 354~357 (昭 12)

(10) E. Siebel: Die Formgebung im Bildsamen Zustande 43~48 (1932)

(11) Nadai: Plasticity 271~274 (1921)

(12) 工業材料便覧、金属 474~480 (昭 17-10)

実 用 新 案

実用新案 第 393066 号

高 木 正・菊 地 彌 十 郎

傘 型 発 電 機

傘型発電機の推力軸受は一般に回転子スパイダーの下部に構成されるも、従来の構造では油槽内筒が発電機主軸の外面に近接しているため、発電機の分解に当り回転子を上方に抜き出す場合、推力軸受及び油槽を先づ分解して軸端フランジの通過を妨げないようにする必要があつた。然るに本案に於ては図面に示すように油槽内筒 11 の内径 D_2 を軸端フランジ 13 の外径 D_1 より大径に設計したため、推力軸受及び油槽の分解を必要としない。即ち推力軸受及び油槽は組立状態のまま回転子を上方に抜き出して発電機の分解を行うことができるから、分解及び組立作業を容易且つ迅速に行い得るものである。

(滑 川)

