

# 銅線の精密引拔条件に関する考察

久本方\* 柿崎公男\*\*

## Considerations on the Precision Drawing Conditions of Copper Wires

By Tadashi Hisamoto, D.S.E., and Kimio Kakizaki  
Hitachi Electric Wire and Cable Works, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The writers who have been keeping diligent attention to the problems concerning the control of drawing dies and establishment of wire drawing dies and establishment of wire drawing conditions, discuss in this paper the wire drawing conditions in relation to the accuracy and quality of drawn copper wire on the basis of previously reported studies.

As a result of their studies, the following have been brought to light.

- (1) The roughness or the quality of drawn wire surface depends upon the frictional condition of drawing. Accordingly, if a good quality of the product is to be expected, the roughness of die surface not exceeding  $0.01 \mu$  ( $\mu = 1/1,000 \text{ mm}$ ) and the reduction between 10~25% are considered as the primary requisite.
- (2) The accuracy of diameter and circularity of drawn wire is affected largely by the fixing method and drawing stress, not to mention the accuracy of dies. Therefore, it is necessary to align the die hole axis and drawing stress must be lower than 70% of rupture stress of drawing wire, and the drawing condition should be best.
- (3) The results are applicable to the coiling wire of standard inductance which agrees to the "International Electric Standard."

### 〔I〕 緒 言

著者らは現在まで電線製造の基本作業としての銅線引拔作業の諸条件に関し系統的検討を加え、ダイスの測定<sup>(1)</sup>、引拔時の摩擦<sup>(2)</sup>、回転ダイス引拔法<sup>(3)</sup>などについて報告して来た。今回は銅線の精密引拔条件に関する考察を行つたのでその経過を報告したいと思う。

電線製造作業においては、精密に加工された伸線用ダイスを常時使用しているが、引拔作業条件が適正を欠くと所期の精度および品位をもつ製品が得難くなる。この

問題は現場作業者の関心が高いにかゝらず従来看過されている分野であり、より良い製品をうるためにはぜひ究明しておく必要がある。

本論文はこの見地より銅線の引拔条件と銅線表面の粗さ、直径および真円精度などについて基礎的検討を加えたものであり、その成果が現場における銅線製造作業をより高度にする資料となることを期待している。

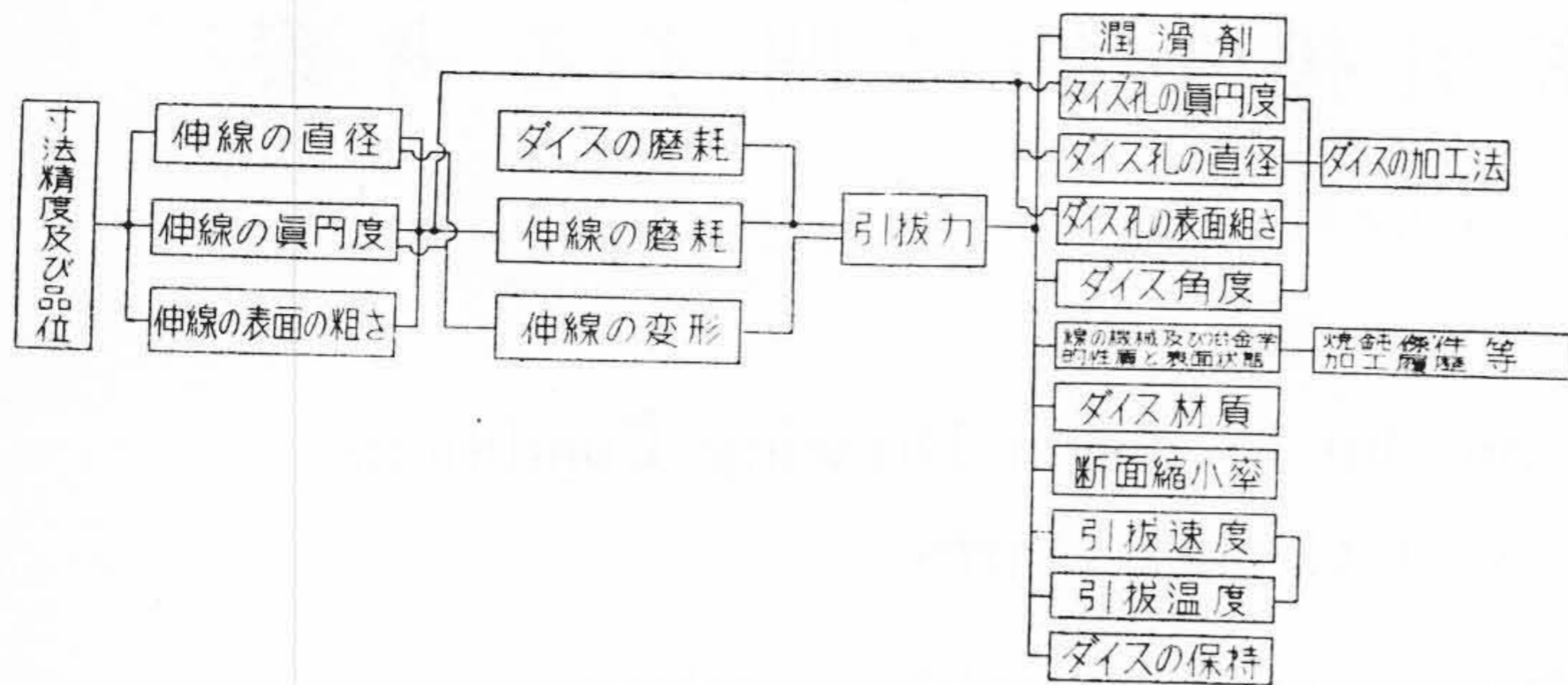
### 〔II〕 研究方針の検討

引拔製品の寸法精度および品位に関係ある因子を分類すると第1表(次頁参照)のようになる。同表よりあきらかなように引拔作業には多くの因子が存在するとともに

\* 日立製作所日立電線工場 工博

\*\* 日立製作所日立電線工場





第1表 伸線の精度および品位に関する因子と引抜き条件

Table 1. Factors Concerning Measurement Accuracy and Grade of Drawn Wires, and Drawing Conditions

因子相互間にも密接なつながりをもっているため、その中の一つだけを取上げて検討しても全体を把握することはできない\*。

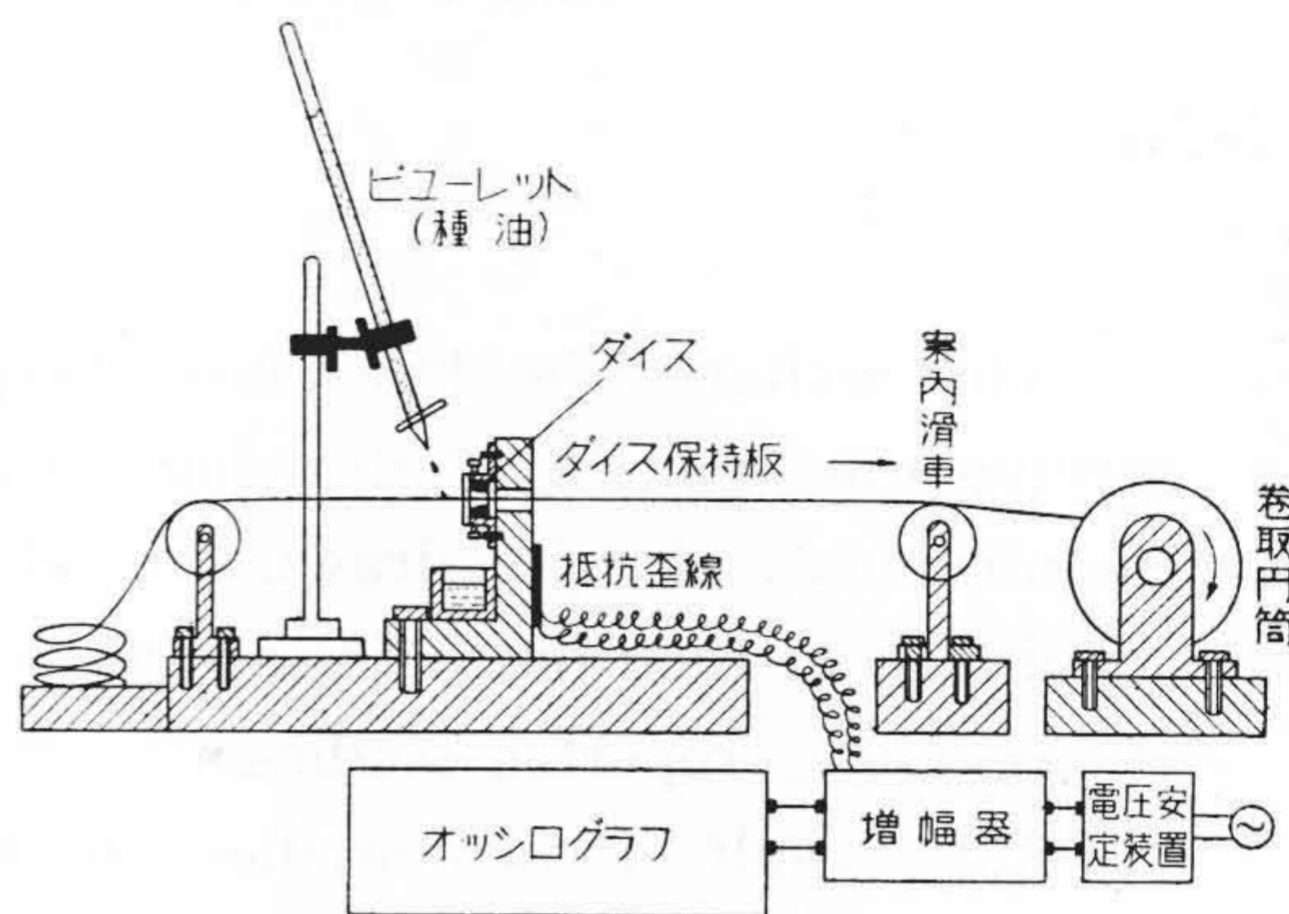
さて第1表について考察してみると、伸線の寸法精度に関係のあるおもな因子としては、用いるダイスの寸法精度および引抜き条件による引抜き後の変形が考えられる。伸線の变形は引抜き応力と引抜き素線の塑性変形曲線に密接な関係があるものと推察される。つぎに製品の品位に関する伸線表面の粗さ(光沢, 色)は伸線表面の磨耗と直接関連するもので、その大方は引抜き条件特に摩擦条件に依存すると考えられる。他方現場作業においてはダイスの加工および引抜き作業の管理に必要な最適引抜き条件の把握に努めているが、引抜き力よりみた最適条件と、本研究の目的とする伸線の寸法精度および品位を高める条件とがどのような関係にあるかを検討することも本研究の課題とする。

### 〔III〕 精密引抜き条件の検討

#### (1) 実験装置と引抜き条件

銅線の精密引抜きに関する研究を行うに当たり、実験装置自体の不備によつて起りうる悪影響はあらかじめ除いておかなければならない。第1図は実験装置の概要であるが、伸線の振動防止法として引抜きダイス保持板と巻取円筒(引抜き力を直接与える)は別箇の定盤に固定しかつ巻取の直前に伸線の案内を兼ねた滑車を設定し、巻取円筒を駆動するモータの振動が伸線を伝つてダイスに達することのないようにしてある。また引抜き力の測定には抵抗歪線を用いダイス保持板の変位をできるだけ小さくしてある。なお潤滑剤は磨耗銅粉の混入を避けるため一度使用したものは廃油とした。つぎに引抜き実験条件を第2表に示す。ダイス角度は厳密な直線ダイスでないため第3表のようになる。ただしこれは後に述べる特殊精密銅線の実験用として作製したものである。

\* これらの因子の中ダイスの加工法ならびに耐摩耗性については別の機会に報告する予定である。  
† 引抜き後の銅線を伸線と呼び引抜き前の銅線は引抜き素線と呼ぶことにする。



第1図 実験装置の概要  
Fig.1. Experimental Apparatus

第2表 精密引抜きに関する実験条件  
Table 2. Conditions for Experimenting Precision Drawing

| 項目           | 引抜き条件                           |
|--------------|---------------------------------|
| 引抜き素線        | 一般電気用銅線(軟, 半硬, 硬銅) 無酸素銅線(軟)     |
| ダイス直径 (mm)   | 0.7±0.005 1.2±0.005 1.8±0.01    |
| ダイス角度 (°)    | 1~14 (半角)                       |
| ダイス孔面の粗さ (μ) | 0.01~0.8                        |
| ダイス孔の真円度 (μ) | 0.08~0.68 (最大真円歪)               |
| 断面縮小率 (%)    | 2.8 ~70.1                       |
| 引抜き速度(m/mn)  | 1.2 ~18.8                       |
| 潤滑剤          | 種油 5 cc/mn (0.7mmφ線のみ) 700cc/mn |

#### (2) 引抜き条件と伸線表面の粗さ

伸線外観の良否は伸線表面の光沢と色によつて定まるが、光沢は表面粗さと酸化金属被膜の状態できまる。色は酸化金属被膜の状態ではあるが、主として大気条件や表面の汚れと焼鈍条件に左右される。ここでは引抜きによつてえられる伸線の外観を問題とすることにし表面粗さについて検討する。

伸線表面の粗さがそれを引抜いたダイス孔面の粗さに対し桁違いに大きいことは日頃見聞するところであるが、その原因について基礎的に検討されたことはなく、現場的経験を基礎にして改善に努めている状態である。そこで第一に伸線表面粗さの生いたちについて検討する



第3表 実験用ダイス (0.7 mmφ) の実効角度  
Table 3. Angle of Dies Experimentation (0.7 mm diameter)

| 素線直径<br>ダイス番号 | 0.71  | 0.72  | 0.73  | 0.74  | 0.75  | 0.77  | 0.80  | 0.84   |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1             | 1°40' | 2°10' | 3°    | 3°40' | 4°    | 4°50' | 5°15' | 5°40'  |
| 2             | 1°    | 1°40' | 2°10' | 2°20' | 2°30' | 2°30' | 3°15' | 4°     |
| 3             | —     | 3°15' | 3°50' | 4°    | 5°15' | 6°30' | 9°10' | 12°15' |
| 4             | 2°30' | 3°    | 3°15' | 3°15' | 3°15' | 3°43' | 3°40' | 3°40'  |
| 5             | 2°50' | 1°40' | 2°    | 2°    | 2°10' | 2°40' | 3°    | 3°15'  |
| 6             | 1°40' | 1°50' | 2°    | 2°    | 2°    | 2°30' | 2°46' | 2°50'  |
| 7             | 1°20' | 1°45' | 2°    | 2°20' | 2°30' | 2°50' | 3°10' | 3°40'  |
| 8             | 1°25' | 1°35' | 1°45' | 2°    | 2°20' | 2°40' | 2°50' | 3°30'  |
| 9             | 1°10' | 1°30' | 1°30' | 1°45' | 1°50' | 2°    | 2°20' | 2°40'  |
| 10            | 1°15' | 2°40' | 3°10' | 3°20' | 3°50' | 4°25' | 5°    | 6°50'  |
| 11            | 2°20' | 1°10' | 1°20' | 1°25' | 1°35' | 1°40' | 2°    | 2°30'  |
| 12            | 40'   | 50'   | 1°    | 1°20' | 1°45' | 2°    | 2°20' | 2°50'  |
| 断面縮小率(対数歪)    | 0.027 | 0.055 | 0.083 | 0.112 | 0.138 | 0.181 | 0.264 | 0.364  |

こととし、つぎのような予備的実験を行った。

すなわち軟銅および硬銅のブロック表面に一定粗さの仕上加工を施し、これに種油を塗布してブロックゲージ面を合せ、オルゼン型万能試験機によつて圧縮し、表面粗さの減少過程を触針法および顕微干涉計によつて測定した。第2図はその結果で圧縮変形のみで容易にブロックゲージ面に近付くことを示している。

つぎに直径 0.9 mm の銅線を回転ダイス法によつて、0.8 mm に引落とし同法特有の表面粗さをもつ伸線を作り、これを普通の引抜によつて 0.7 mm にした場合について顕微鏡観察を行った。

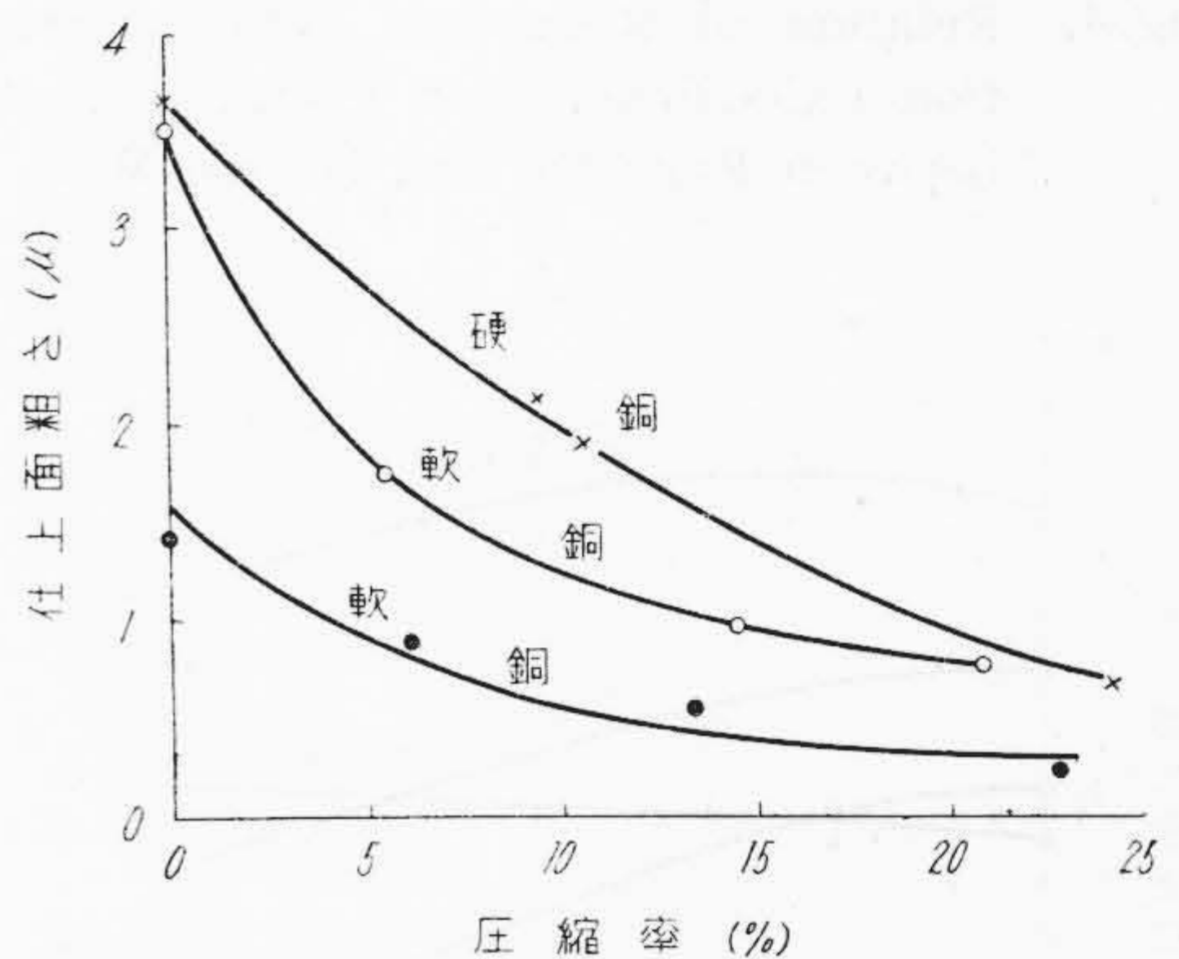
第3図はその結果で初期加工面の粗さは全く消失している。引抜時の外部摩擦が完全な油膜を挟んで行われるならば圧縮実験の結果に徴して初表面の粗さは小さくなり、しかも粗さの方向性は断面縮小率に応じて引抜方向に向きを変えるものと考えられる。そこで第3図をよく観察するとダイス入口ですでに新しい疵(粗さ)が発生していることがわかり、引抜時の摩擦がきわめて凝着しやすい条件下にあることがわかる。

伸線表面粗さが上述の機構によつてできるならば凝着量は摩擦係数に直接関連するものであり、摩擦係数の数値は伸線表面の磨耗に結びつく。したがつて潤滑—ダイス条件—凝着—摩擦係数—伸線表面の磨耗—伸線表面の粗さなどの間に密接な相互関係があると考えられる。

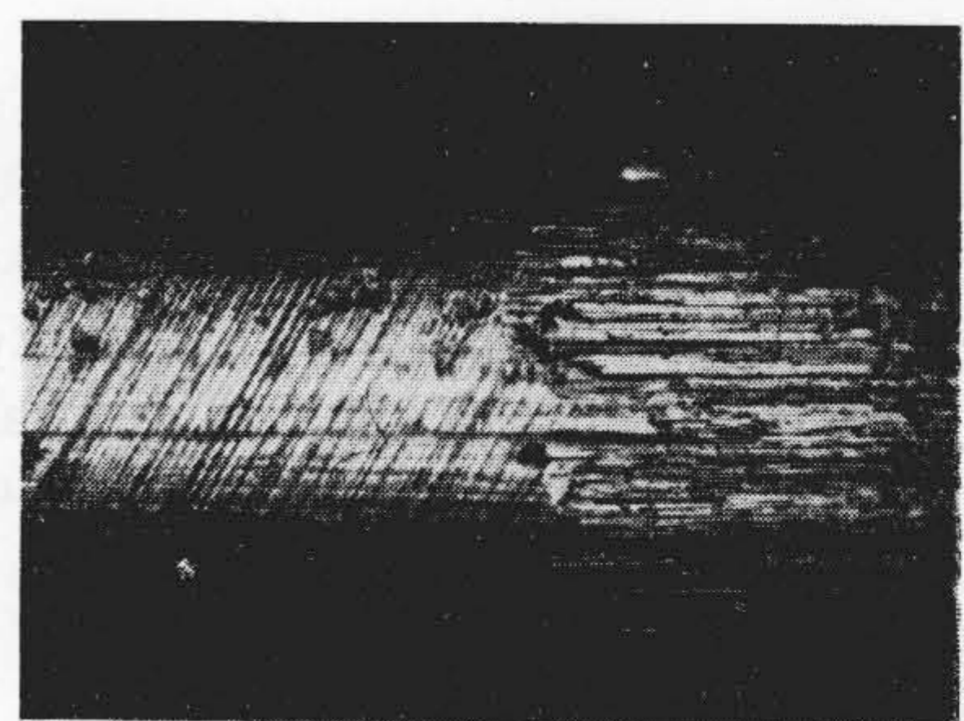
第4図～第8図(次頁参照)はこれらの相互関係を実験的に求めた結果である。引抜時の摩擦係数は回転ダイスを用いて摩擦力を測定<sup>(2)</sup>して求めたものである。同法によると

$$f = \frac{\sigma_x \cos \alpha (1 + \cot^2 \beta)}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし  $\beta = \frac{\gamma}{2}$   $\gamma = \tan^{-1} \cdot \frac{\pi N \sqrt{(d_0^2 + d_1^2)}/2}{v \cdot \sec \alpha}$



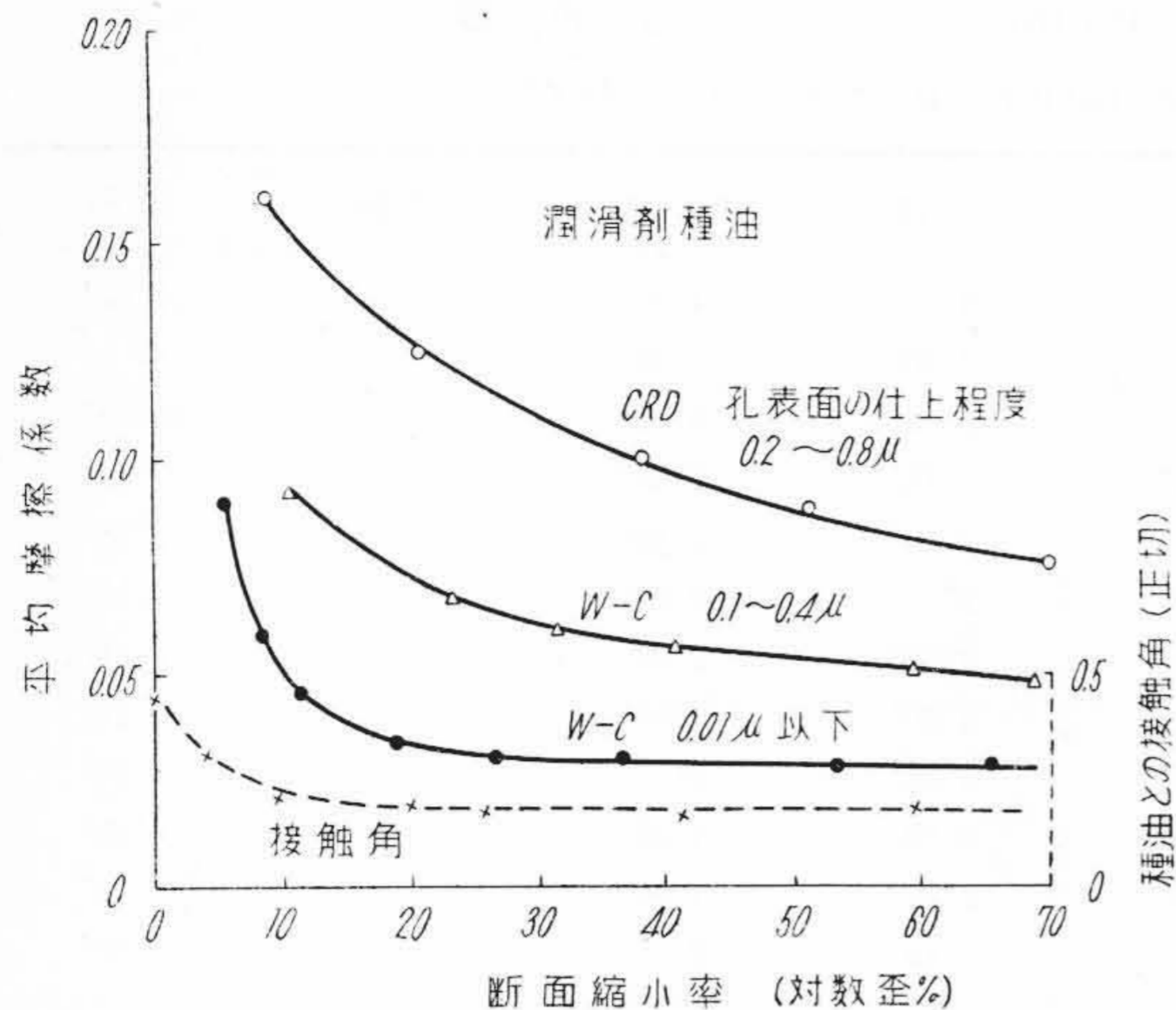
第2図 銅の圧縮変形による仕上面粗さの変化  
Fig. 2. Relation between Surface Roughness and Compression Ratio of Copper



第3図 引抜による表面粗さの生成  
Fig. 3. Surface Roughness of Drawn Copper Wire

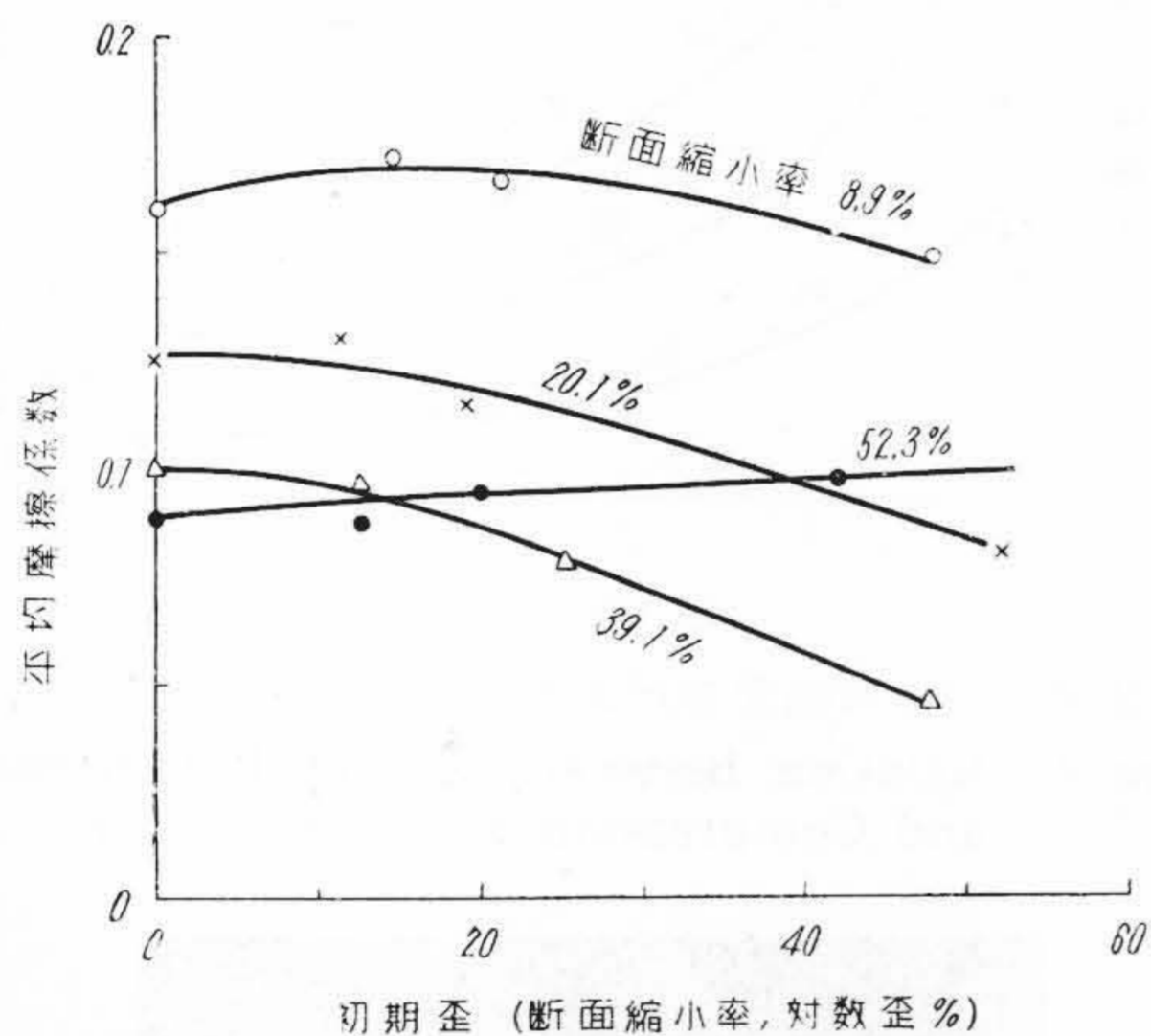
ここで  $f$ : 引抜時の外部摩擦抵抗  
 $\alpha$ : ダイス角度 (半角)  
 $\sigma_x$ : ダイスを回転することによつて減小する引抜方向の力





第4図 断面縮小率と摩擦係数および種油と伸線の接触角

Fig.4. Relation of Reduction Ratio to Frictional Coefficient and Contact Angle between Rape Oil and Drawn Wire



第5図 初期歪を受けた銅線引抜時における摩擦係数 (ダイス孔面の仕上程度 0.2~0.8μ)

Fig.5. Frictional Coefficient of Initially Strained Copper Wire During Drawing (Surface Roughness of Die Hole, 0.2~0.8μ)

$v$ : 引抜速度

$N$ : ダイスの単位時間当りの回転数

$d_0d_1$ : 引抜前後における伸線の直径

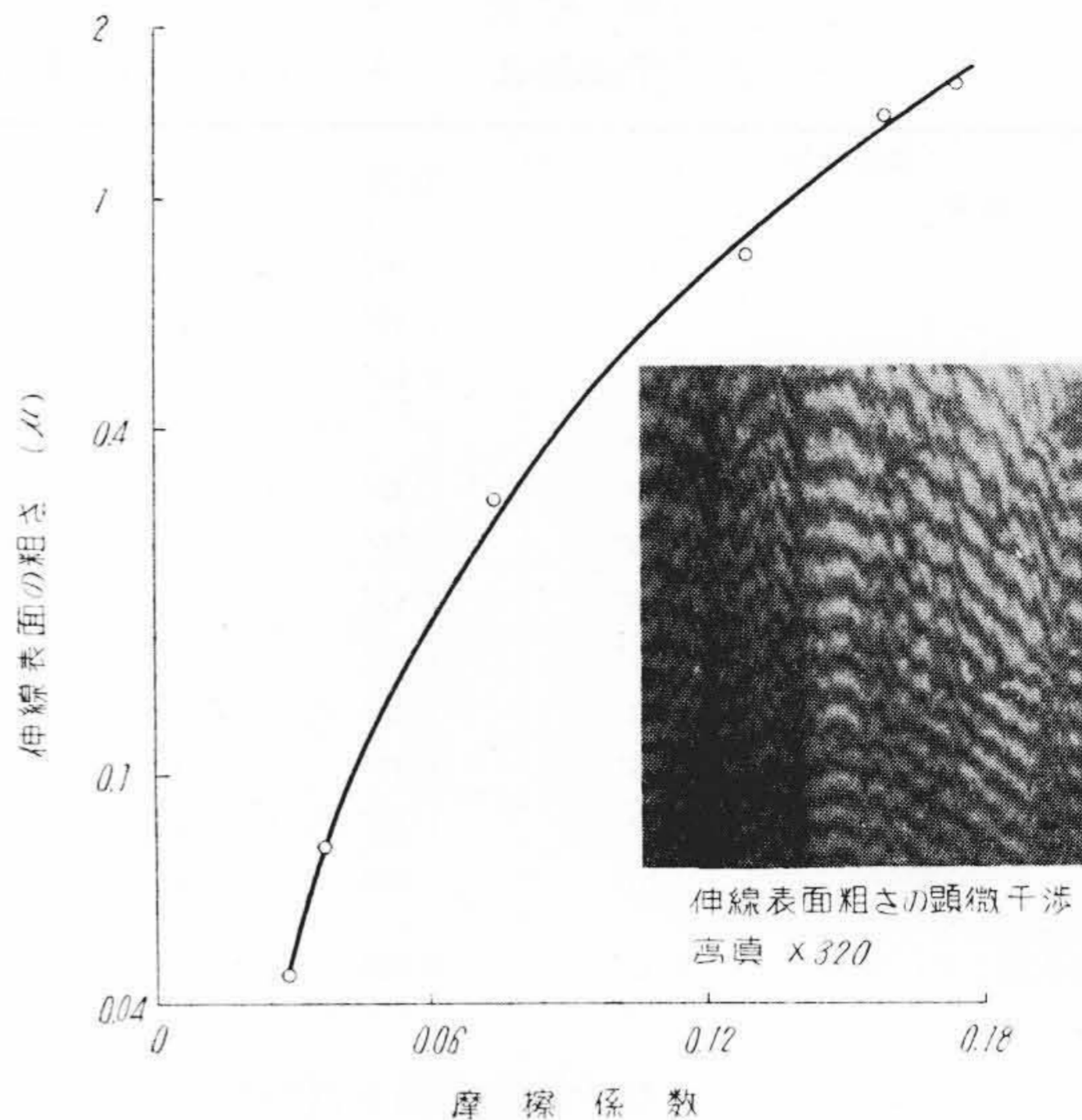
摩擦抵抗以外の引抜抵抗を  $\sigma_0$  とすると

$$\sigma_0 = P_m - f \sec \alpha \dots \dots \dots (2)$$

ただし  $P_m$ : 全引抜力

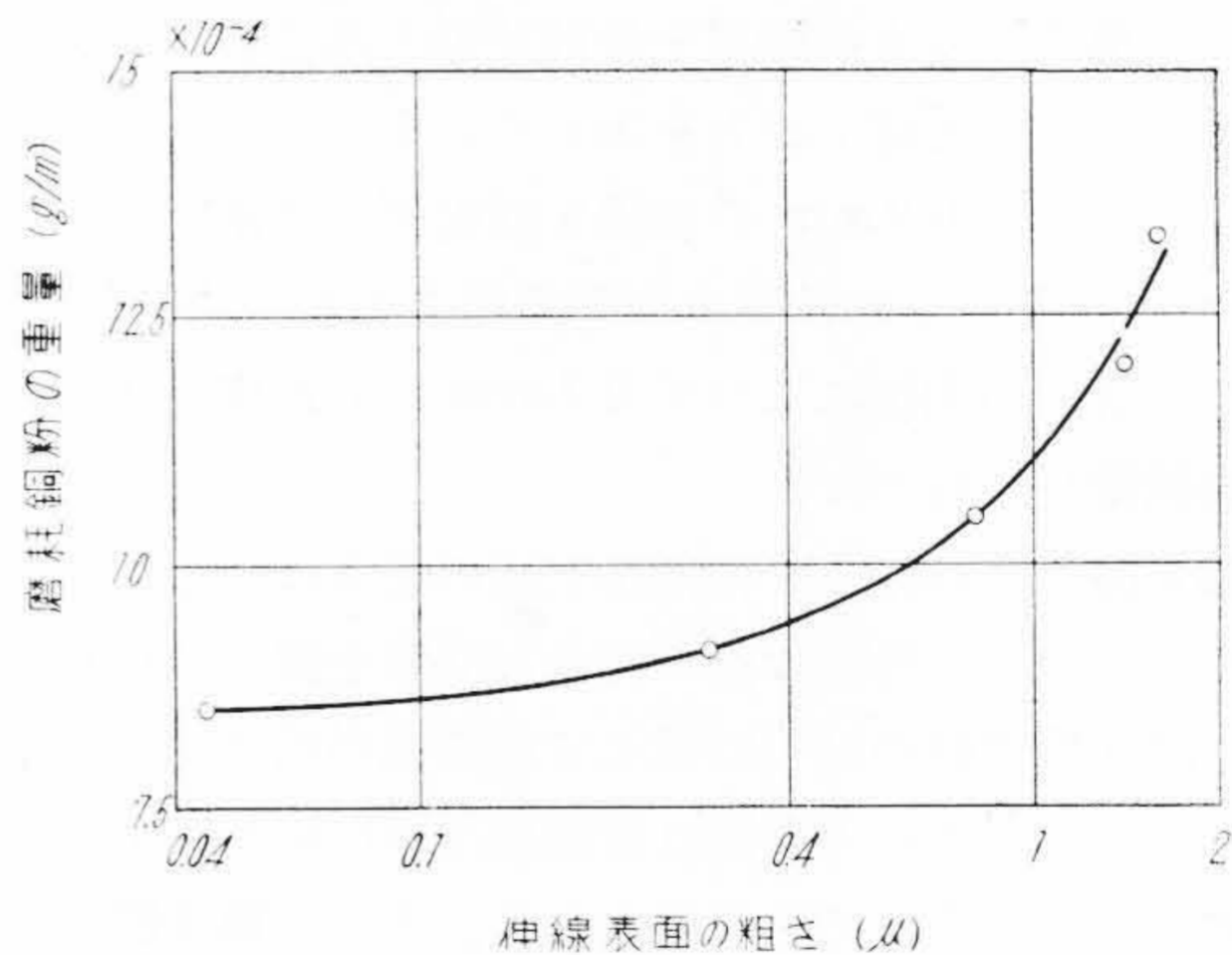
したがってダイス孔壁に対する直圧力  $P$  および摩擦係数  $\mu$  は

$$P = \frac{\sigma_0}{\sin \alpha} \dots \dots \dots (3)$$



第6図 引抜時の摩擦係数と伸線表面の粗さ

Fig.6. Relation between Frictional Coefficient of Drawing and Surface Roughness of Drawn Wire



第7図 伸線表面の粗さと磨耗銅粉の重量

Fig.7. Relation between Surface Roughness of Drawn Wire and Weight of Abraded Copper Powder

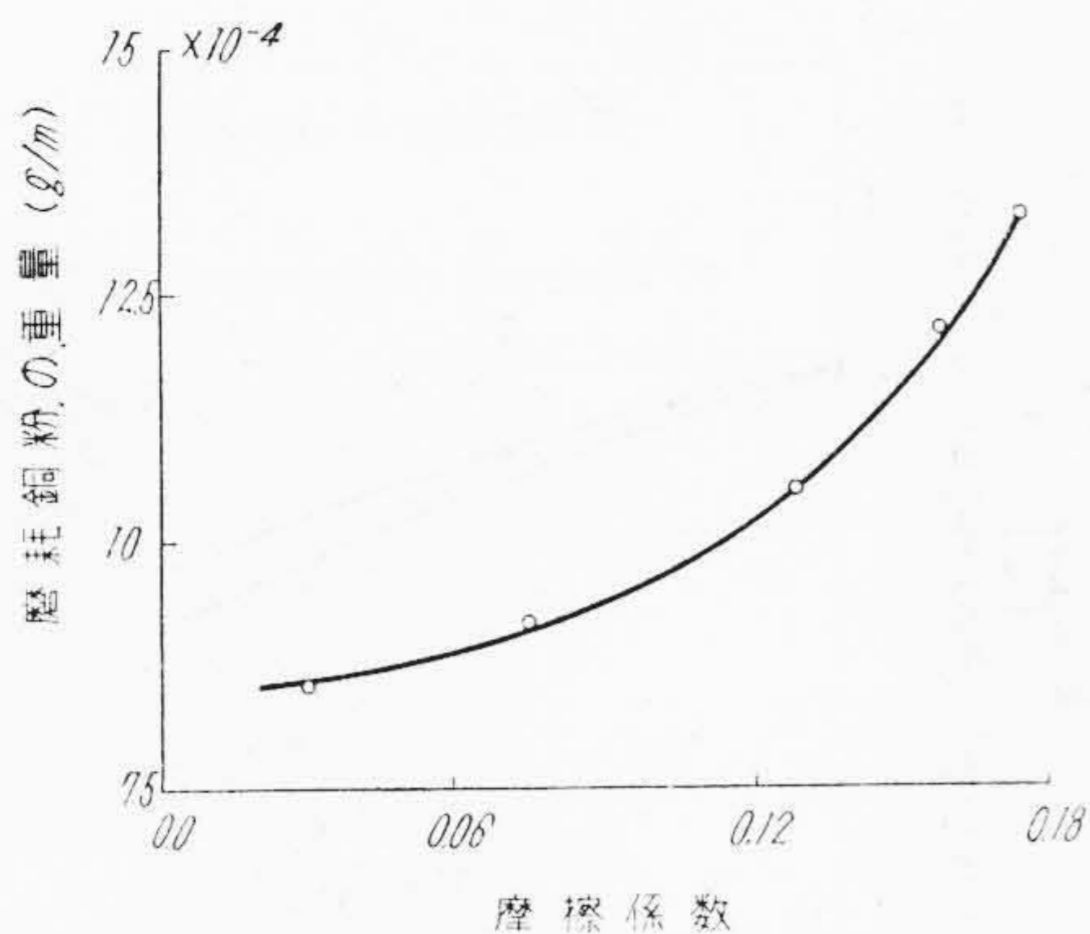
$$\mu = \frac{f}{P} \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。

本測定法の誤差を検討するためダイス壁圧を測定した結果、ダイス角度が小さく断面縮小率が増すにしたがいまた(1)式の $\beta$ が大きくなるにつれて摩擦抵抗は実際より大きく測定されることを確めたが、これに関しては稿を改めて報告する予定である。ここでは測定法に注意すれば避けられる誤差であることをつけ加えておく。

第6図~第8図の磨耗銅粉の測定はダイスの出入口より排出される銅粉および伸線に附着した銅粉を捕集し、沃化法によつて定量し伸線直径 1.8mm で引抜条長 1m





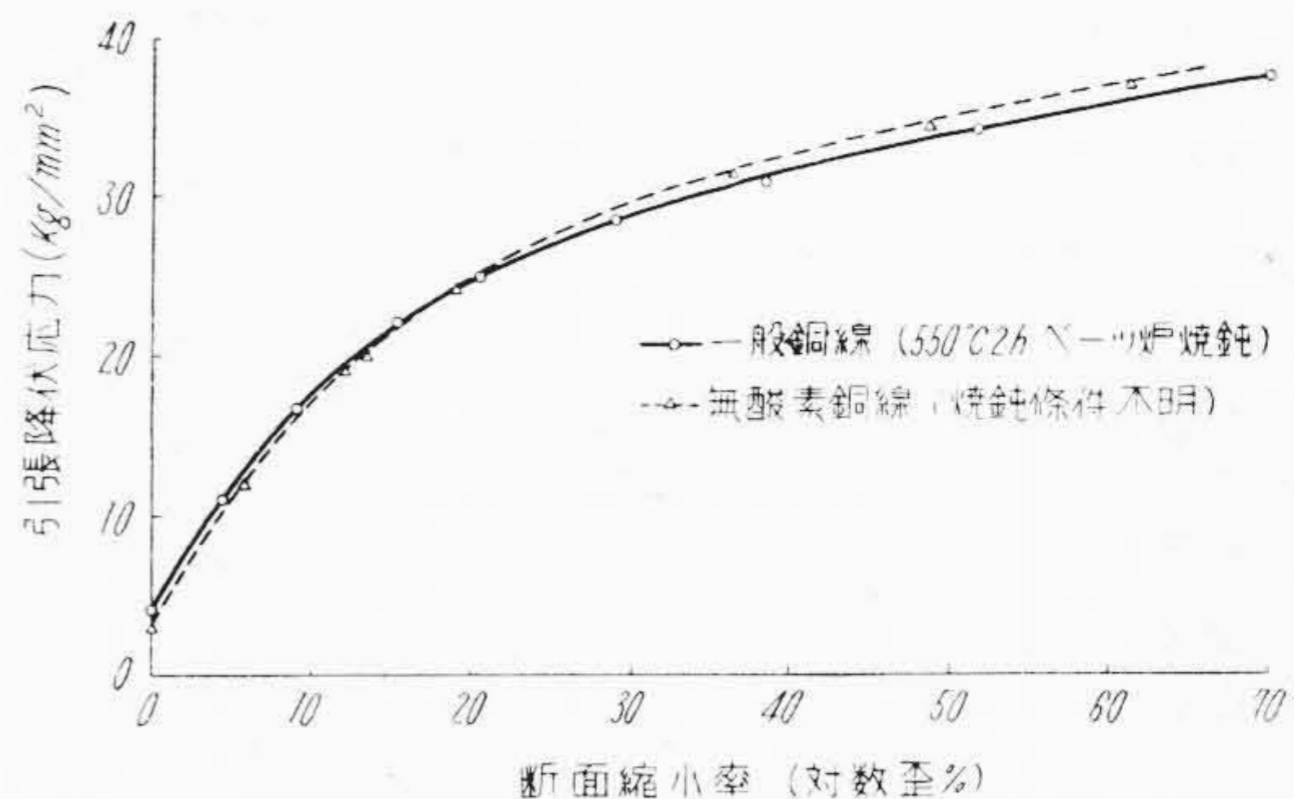
第8図 摩擦係数と磨耗銅粉の重量  
Fig.8. Relation between Frictional Coefficient and Weight of Abraded Copper Powder

当りの磨耗量(重量)に換算したものである。実際の引抜作業においては乳化油中にこの銅粉が排出されるので、その酸化物がダイスの磨耗を促進するばかりでなく油脂を吸着して沈澱し乳化油の寿命を著しく阻害するものと思われる。

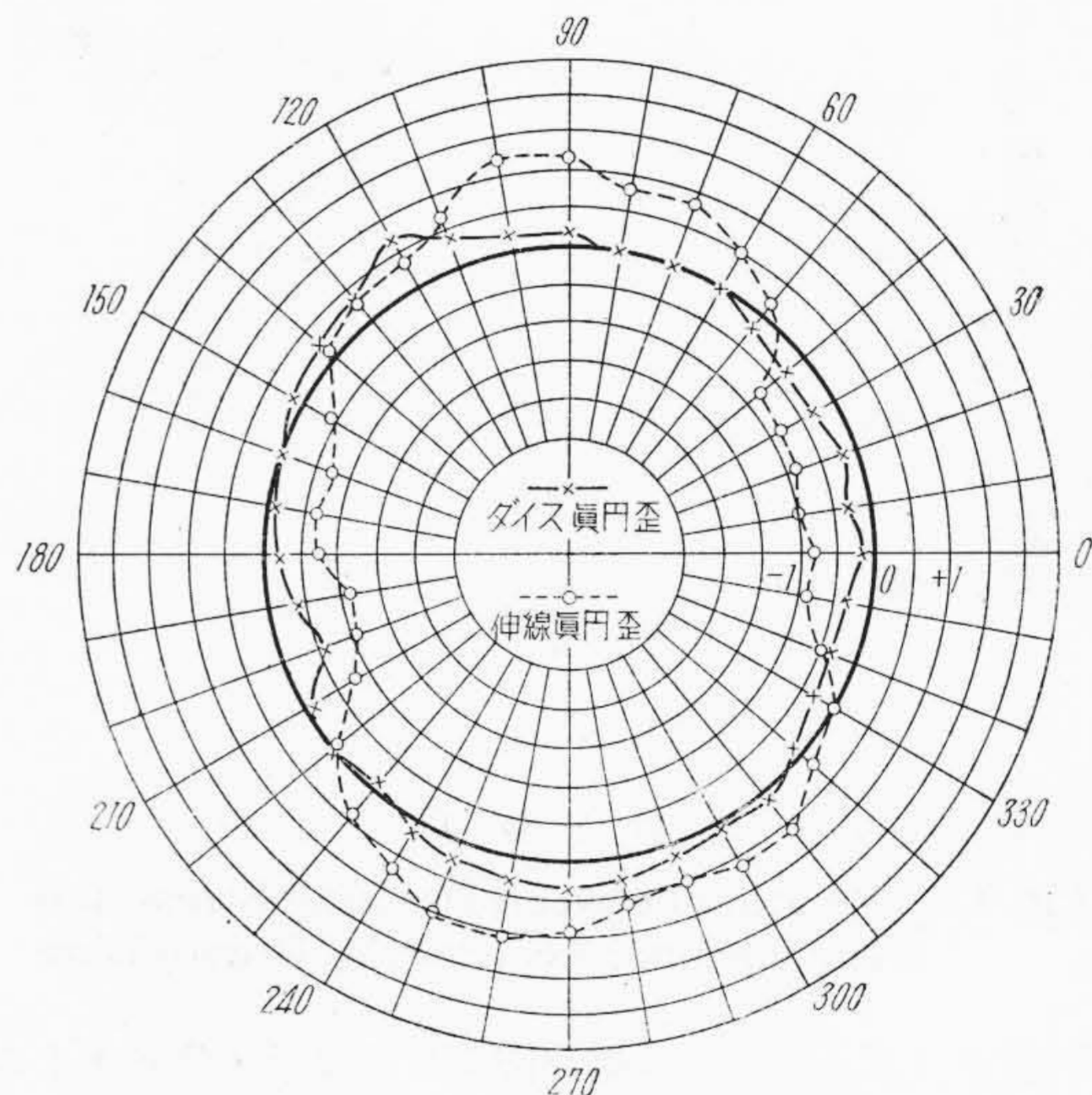
つぎにこれらの実験結果について考察しよう。まずダイス孔の表面粗さがよくなるにつれて摩擦係数が減少するが、これは表面凹凸の度合が機械的および熱的に油膜を破断する因子となることを考えれば当然の結果である。

つぎに加工度が増すにしたがつて摩擦係数が減少する傾向はダイス壁圧の増加する場合に相当ししばしば指摘<sup>(2)~(5)</sup>されているものである。しかしながらダイス壁圧の増加がかならずしも摩擦係数の減少を伴わない場合もある。特に初期歪を受けた線の引抜では壁圧が大きくなるにもかかわらず焼鈍線の引抜より大きい値を示すことがある(第5図参照)。これらの現象はきわめて複雑で現在あきらかにされていないが、ダイス孔面の仕上がが悪い場合の引抜では伸線表面の磨耗状態より遷移領域<sup>(6)</sup>に属する摩擦と考えられ、潤滑剤の酸化や酸化金属被膜の生成が原因となつて摩擦係数が低下するものと推察される。ダイス孔面の仕上がよい場合の摩擦係数は0.03となつたが、これは純粋の境界摩擦係数<sup>(7)</sup>に近いものと思われる。この場合にも同様な現象がみられるが、これは加工硬化に基く表面の活性化によるものと考えられ、このことは伸線の加工度と伸線に対する種油の接触角との関係が、摩擦係数と加工度との関係と同一傾向にあることより推察される。

以上の実験結果は伸線表面の粗さをよくし品位を高めるためには、摩擦係数ができる限り小さくなるような引抜条件を選ばなければならないということで、そのためには潤滑剤の選定はもとより、ダイス孔面の仕上がを0.01μ



第9図 銅の塑性変形曲線  
Fig.9. Plastic Deformation Curve of Copper



第10図 ダイスと伸線の真円度比較  
(無雑作に引抜いたもの)  
Fig.10. Circularity of Drawing Dies and Arbitrarily Drawn Copper Wire

以下にすることが必要であり、かつ断面縮小率は10%より大きくすればよいことを示している。ただしその限界は後述する伸線の寸法精度より抑えられる。

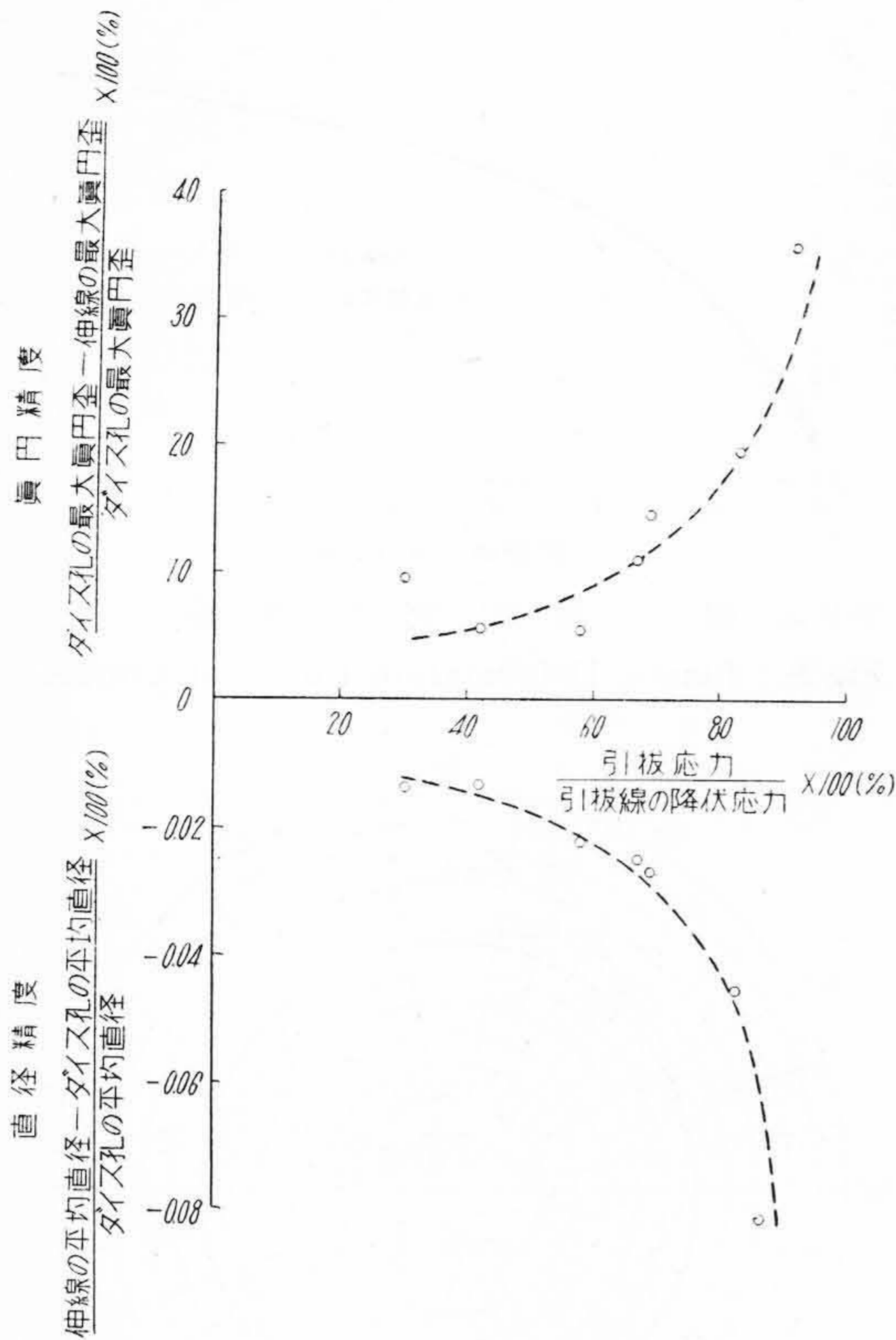
### (3) 引抜条件と伸線の寸法精度

伸線の真円精度および直径精度は使用するダイス孔の精度によつて決定されるが、ダイス出口の引抜応力が過大であつたり、ダイスの取付が悪かつたりしたならばダイス精度がいくらよくても目的とする伸線の寸法精度は得難い。そこで第一に銅の塑性変形曲線を求めることにした。その要領は直径2mmの軟銅線(550°C 2時間ベーツ炉焼鈍)を0~70%(対数歪\*)の断面縮小率を与え

\* 引抜によつて断面積 $a_0$ が $a$ に変わったとすると

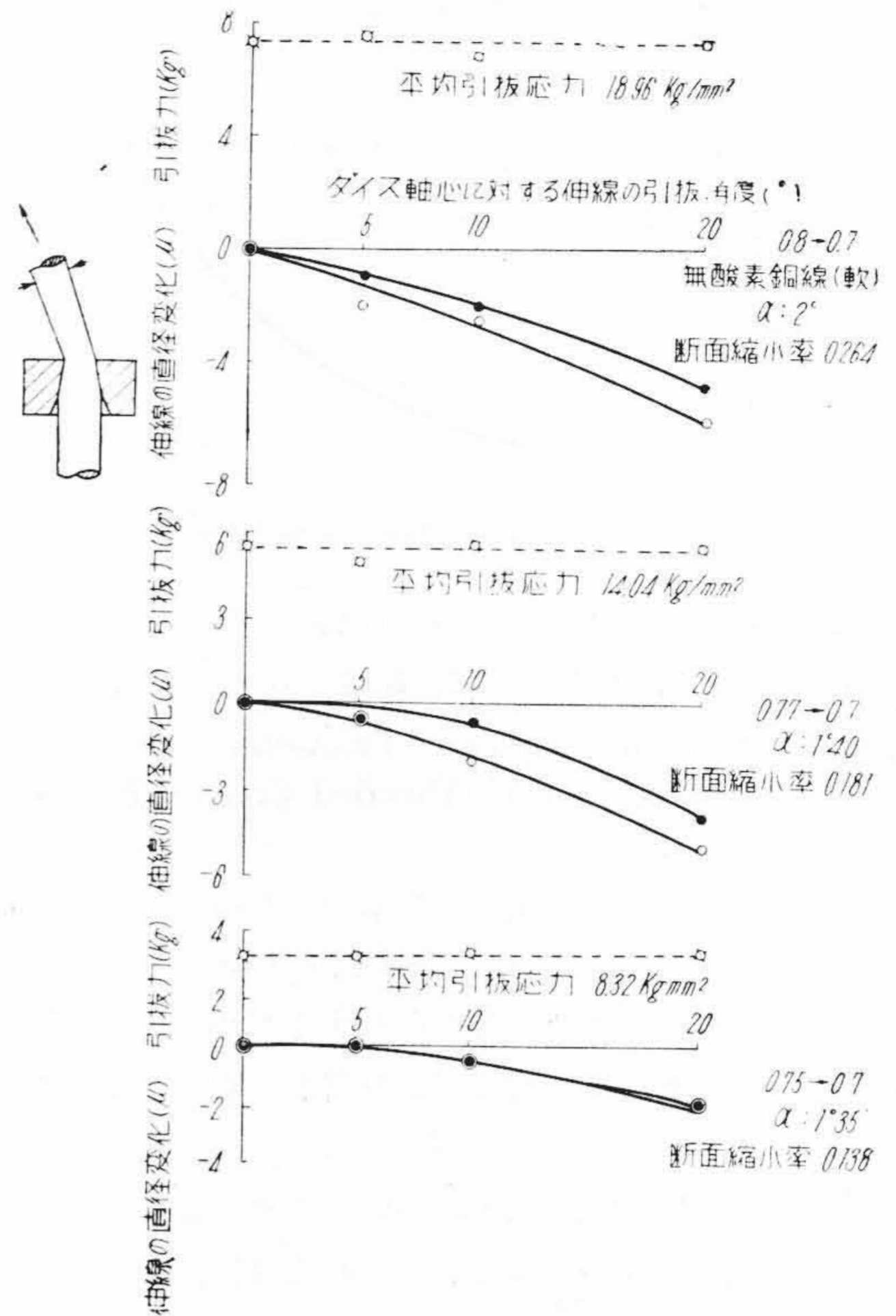
$$\begin{aligned} \text{対数歪 } \epsilon &= \int_{a_0}^a \frac{-da}{a} \\ &= \ln \frac{a_0}{a} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$





第11図 引抜応力と伸線の寸法精度  
Fig. 11. Relation between Drawing Stress and Dimensional Accuracy of Drawn Wire

て引抜き（ダイス角度は第17図150頁に示す最適ダイス角度を用いた）引張試験の試験片とした。つぎにこの試験片に  $50 \pm 0.005 \text{ mm}$  の標示線を罫書いて引張り  $0.2\%$  の永久伸びが生じたときの引張真応力をもつて引張降伏応力とした。第9図はその結果である。つぎにダイスおよび伸線の真円精度を測定した。伸線の真円度測定は線をダイスで途中まで引抜き、そのまゝの状態触針式真円度測定器<sup>(1)</sup>に取付けて行つたのであるが、伸線に反りができやすく測定誤差はダイスの場合と比較して大きいものと考えられる。第10図は無雑作に引抜いた場合の伸線の真円歪と引抜に用いたダイス孔の真円歪とを比較したものである。第11図は伸線の引抜応力と真円精度および直径変化との関係を求めた結果である。つぎにダイスの保持法が悪くダイス孔の軸心と引抜方向が一致しない場合の直径変化を測定した。なお直径測定はすべてブロックゲージを用い光波干渉による比較測長法を用いた。第12図～第15図は伸線の曲げ方(向印●)および上下方向(第12図で紙面に垂直●印)の直径変化を測定したものである。これより断面縮小率が増す程、かつダイス角が大きくなるにしたがい直径減少の度合が大きくなる傾向を知ることができる。また線がダイス入口で斜に入つ



第12図 ダイス軸心に対する引抜角度と伸線直径の変化(1)  
Fig. 12. Relation between Drawing Direction and Diameter Variation of Drawn Wire (1)

ても直径変化に大きな影響を与えないことがわかる。つぎに引抜速度による直径変化を測定したが測定誤差の範囲内で一定であつた。

つぎにこれらの実験結果について考察しよう。第10図に示した伸線の歪は測定誤差を考慮してもダイス孔の真円歪より大きい。これはつぎに考察する実験結果にも関連するが、ダイス孔軸心と引抜方向が完全に一致しないことや摩擦による伸線表面の荒れに基因するものと思われる。したがつて実際の作業においては伸線に要求される真円精度(直径公差の  $1/2$ )<sup>(8)</sup>よりダイス孔の真円精度をさらによくする必要がある。

つぎに引抜応力と直径および真円精度との関係について考察する。銅の降伏点は不明瞭であるため降伏応力は前述のように定められているが巨視的には問題にならなくても実際にはもつと低い応力で降伏が起るものと考えられる。特に  $1\mu$  以下の変形を問題とする本研究のような場合には無視できなくなる。第11図の傾向はこのことを証明する。すなわち引抜応力の増大する引抜条件は断面縮小率が大きいかダイス角度が適正を欠く場合に相当

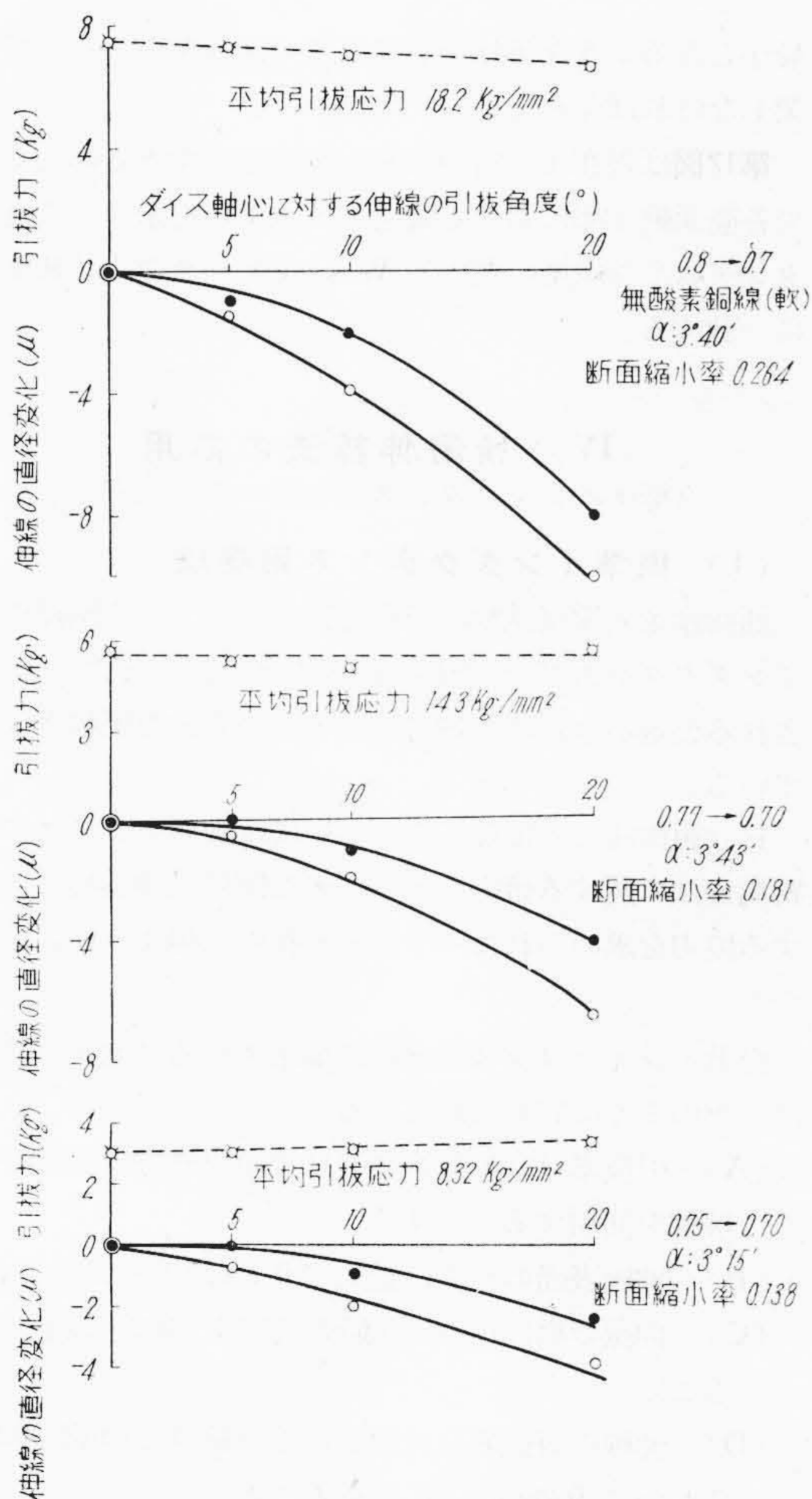


し、その引抜応力に応じて引抜後にも引張変形が進行するものと思われる。なお本実験の結果引抜応力が引抜後の線の降伏応力の70%以下であれば真円精度および直径精度の変化は無視されるものと考えられる。つぎにダイス孔軸心と引抜方向が一致しない場合の直径変化は、通常曲げ方向の直径が減少するならば上下方向の直径は増すものと考えられる。実験結果はこれに反しいずれも直径の減少を見せ引細りの現象を呈している。引抜応力が引抜かれた線の降伏応力を超す場合は引細りが起るが本実験では引抜応力に変化は認められない。そこでこの現象はダイス出口付近において伸線に曲げと引張りが同時に働きその組合せ応力によつて降伏するため起るもの

と考えるのが妥当かと思われる。またこのような引抜条件ではダイス孔内部における線材の応力分布にも変化があるものと考えられる。

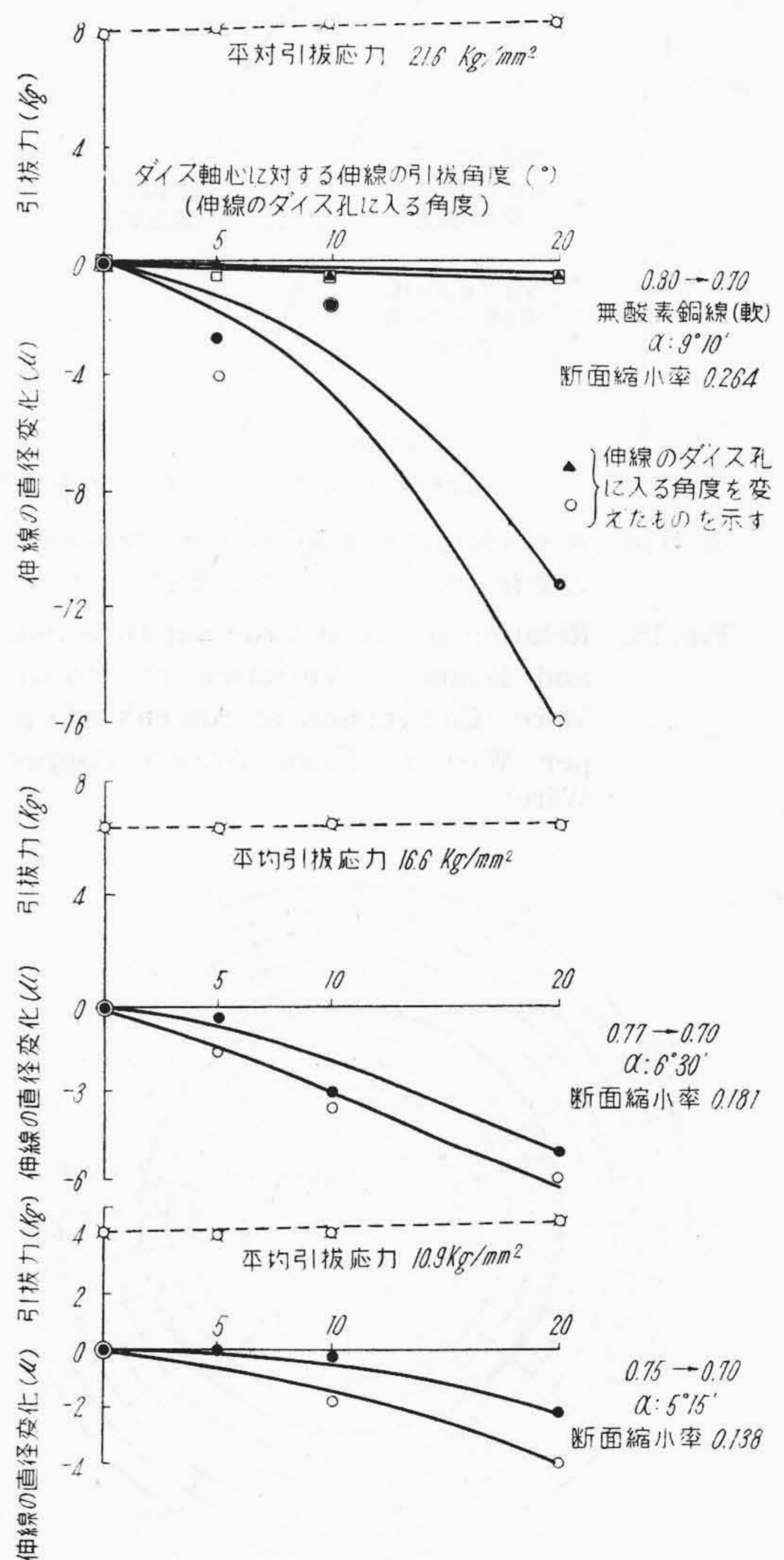
これらの実験結果はダイス孔軸心と引抜方向を一致させることが伸線の寸法精度をダイス孔の精度に近づける必要条件の一つであることを教えている。第16図(次頁参照)は光学的に軸心と引抜方向を一致させて引抜いた場合の測定結果であり、ダイス精度に匹敵する伸線がえられることを示している。

以上の直径および真円精度に関する実験結果を要約すればつぎのようになる。すなわち伸線の寸法精度をよくするにはダイス孔の仕上精度をよくするとともに引抜力



第13図 ダイス軸心に対する引抜角度と伸線直径の変化(2)

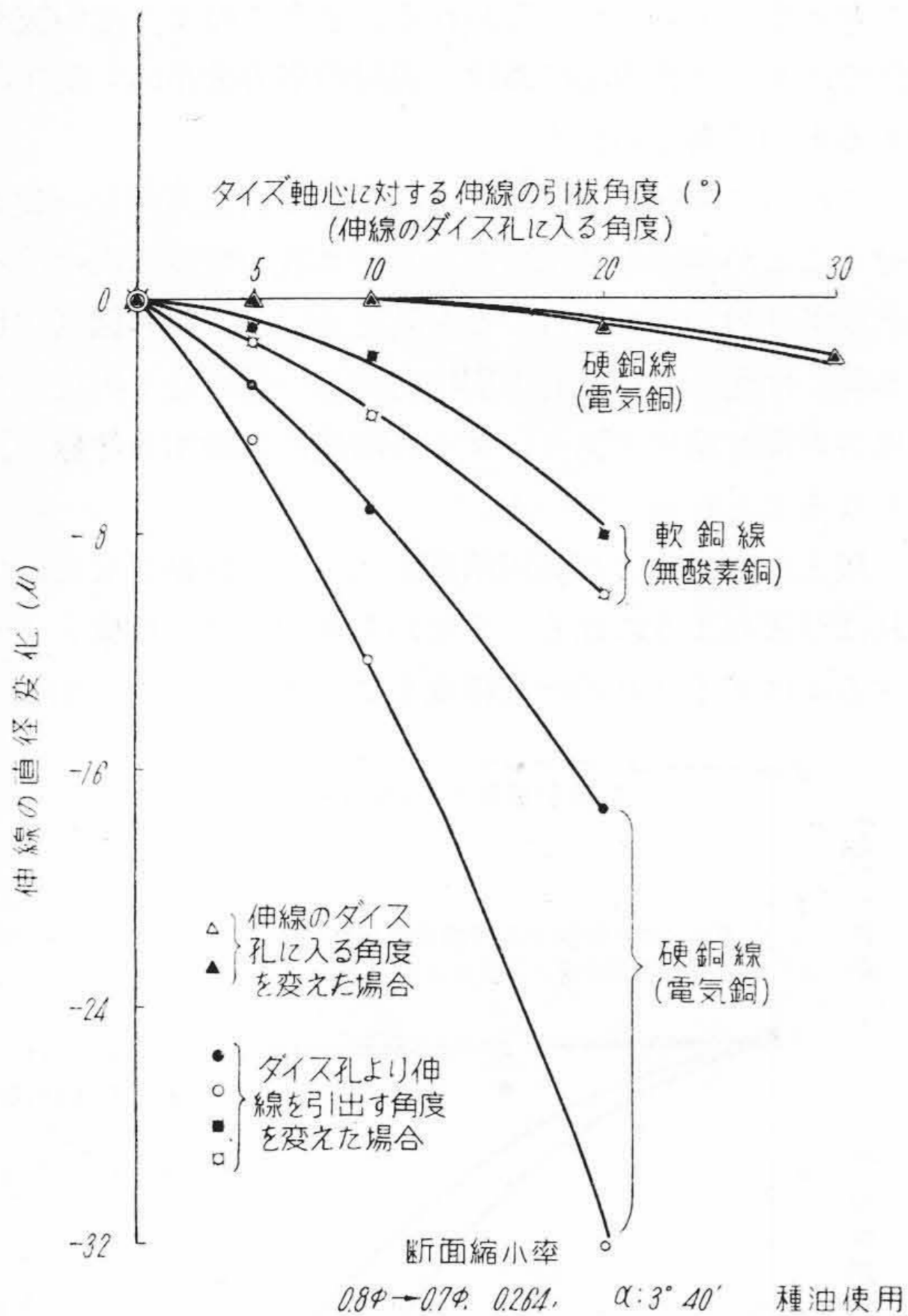
Fig. 13. Relation between Drawing Direction and Diameter Variation of Drawn Wire (2)



第14図 ダイス軸心に対する引抜角度と伸線直径の変化(3)

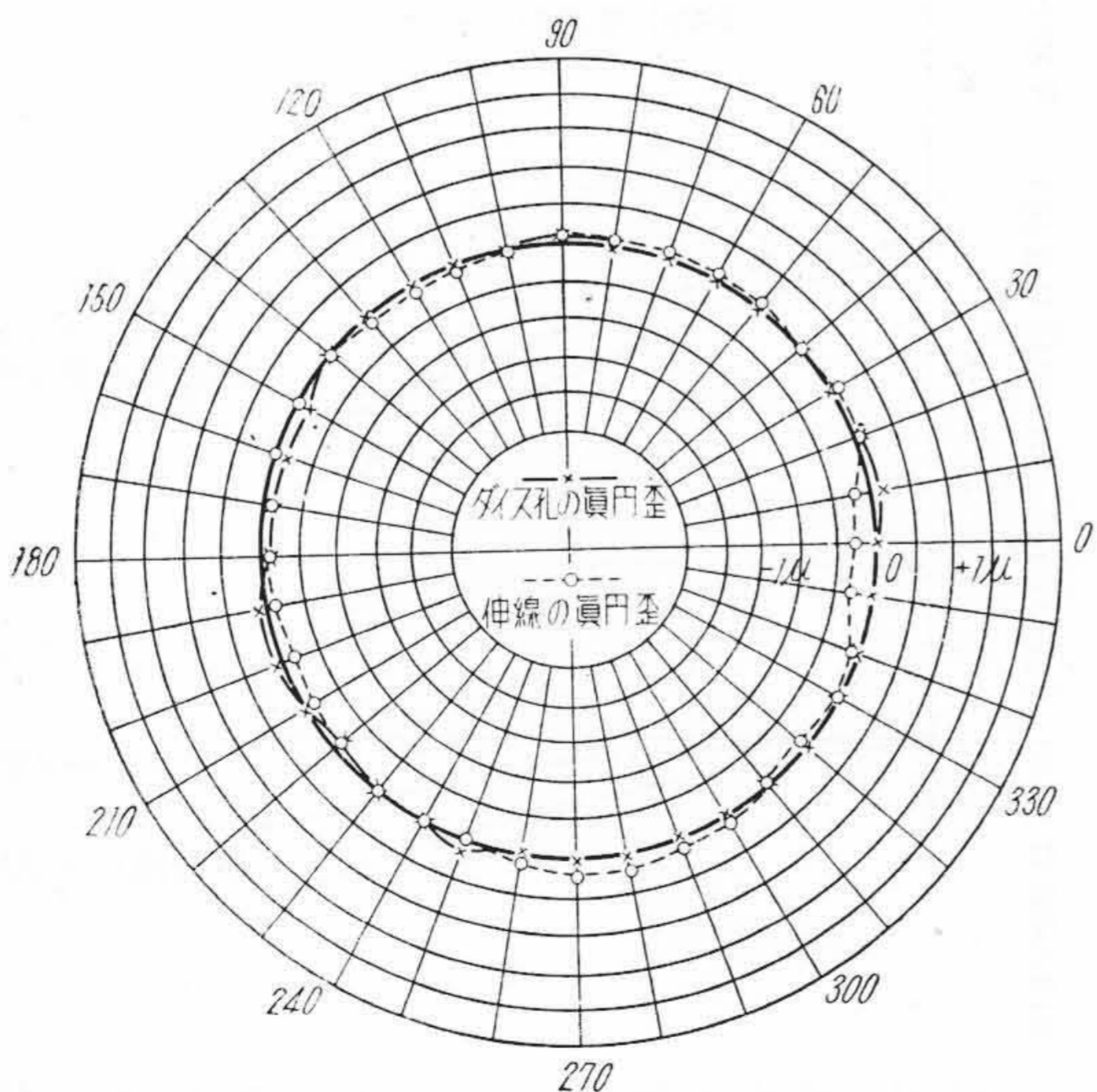
Fig. 14. Relation between Drawing Direction and Diameter Variation of Drawn Wire (3)





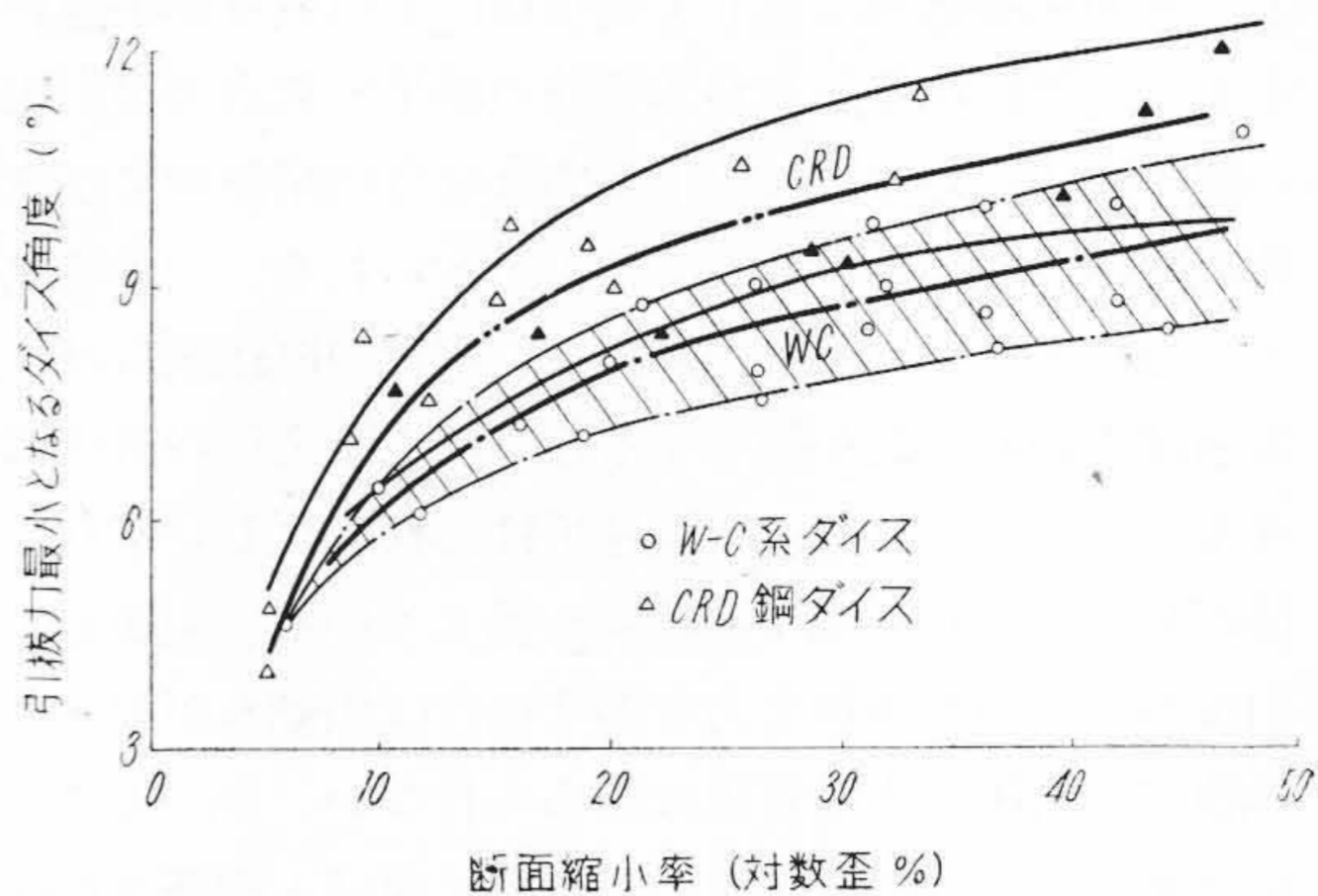
第15図 ダイス軸心に対する引抜角度と伸線直径の変化 (軟銅線と硬銅線の比較)

Fig. 15. Relation between Drawing Direction and Diameter Variation of Drawn Wire (Comparison of Annealed Copper Wire to Hard Drawn Copper Wire)



第16図 ダイスと伸線の真円度比較 (光学的心出しを行ったもの)

Fig. 16. Circularity of Drawing Dies and Optically Centered Drawn Copper Wire



第17図 引抜力最小となるダイス角度と断面縮小率との関係

Fig. 17. Relation between Reduction Ratio and Die Angle of Minimum Drawing Power

最小となるような条件を選びダイス保持を正しくして作業しなければならない。

第17図は現在まで行つて来た実験結果をまとめたもので各断面縮小率に対する最適ダイス条件を示す。これはタンデム型伸線機に用いる W-C 系ダイスの設計基準<sup>(9)</sup>に一致する。

#### 〔IV〕精密伸線法の応用

(標準インダクタンス用巻線への応用例)

##### (1) 標準インダクタンス用巻線

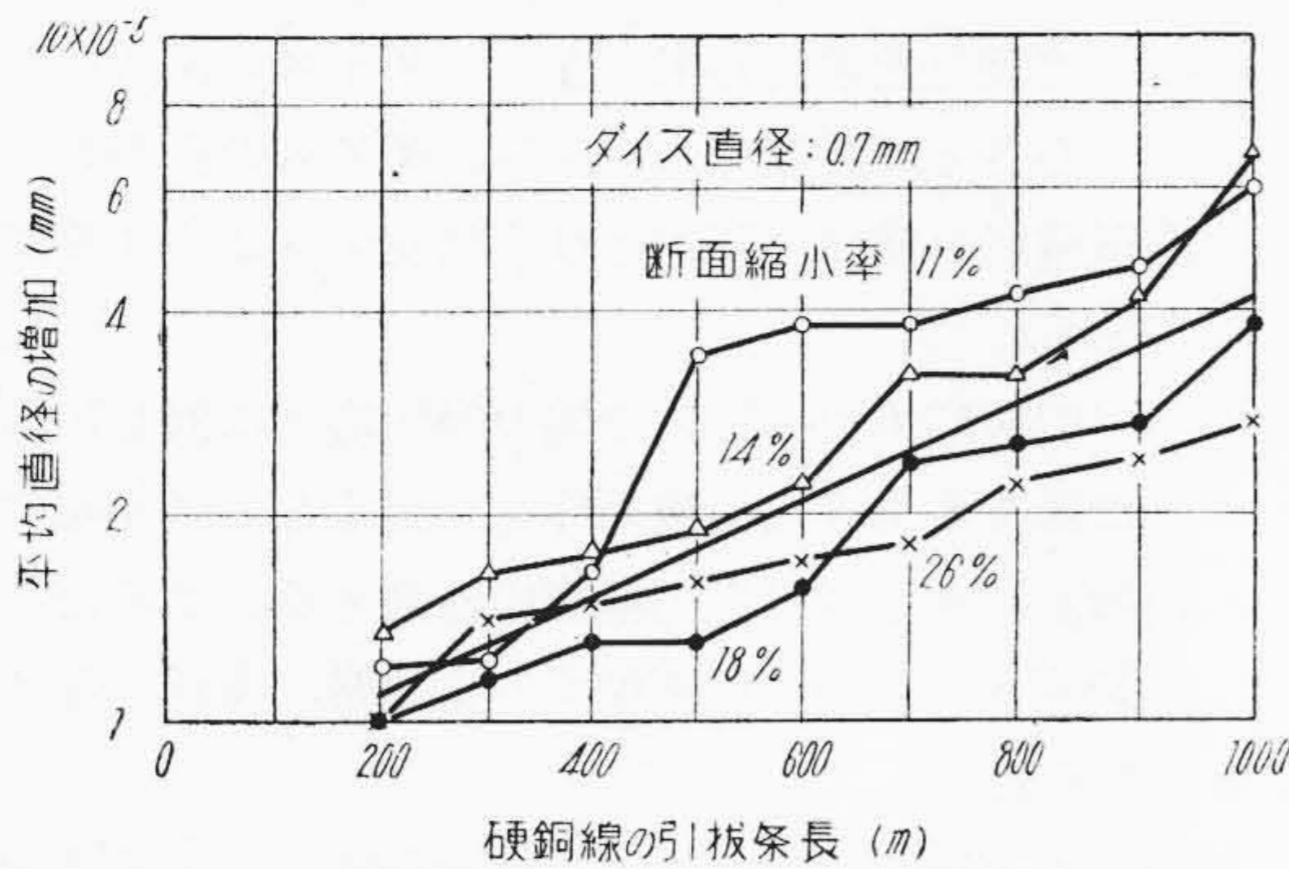
通商産業省電気試験所で研究製作されている国際標準インダクタンス<sup>(10)</sup>用巻線の製造はその性能上より規定される公差がきわめて厳格であるため非常な困難を伴っている。

日立製作所日立電線工場においては数年来ダイスの精密測定法に関する研究を行つて来た関係上伸線技術に関する協力を求められたので精密引抜の立場より検討を行つた。

標準インダクタンス用巻線に要求される精度上の諸元はつぎのように定められている。

- (A) 引抜素材は無酸素銅 (日立中央研究所製真空溶解銅を使用する) とする。
- (B) 伸線表面の粗さは最大で  $0.1\mu$  以下であること。
- (C) 伸線の真円精度は (最大真円歪)  $0.2\mu$  以下であること。
- (D) 伸線の直径変化は巻始めと巻終りとの間 300m において  $0.2\mu$  以下に抑えること。
- (E) 引抜力はそのまゝ巻付力となるため、パイロックスガラスポピンおよび巻線が変形を起したり、巻線がゆるみを生じたりしないことを前提条件として与えられる。





第18図 W-C ダイスの磨耗と銅線の引抜条長との関係

Fig. 18. Relation between Wear of Tungsten-Carbide Die and Drawing Length of Copper Wire

(F) 巻線の直径は 0.7~0.9mm の間とする。

(G) 伸線は電気伝導率高く耐蝕性、耐経年変化性に富んでいなければならない。

(2) ダイスの選定

以上のように要求される精度がきわめて高いのでダイスの選定が必要になる。ダイヤモンドダイスは幾多のすぐれた特長をもっているが、結晶軸に対する穿孔角度により孔面各部の耐磨耗性を異<sup>(11)</sup>にするため真円精度を得難い欠点をもっている。著者らの研究によるとダイヤモンドダイスの平均真円歪<sup>(8)</sup>は 0.5μ となつているので耐磨耗性が十分であるならば真円精度のしやすい W-C 系ダイスを用いるのが得策であることになる。第18図は引抜条長に対するダイスの磨耗を示すもので引抜条長 300 m における直径変化は無視されることがわかる。

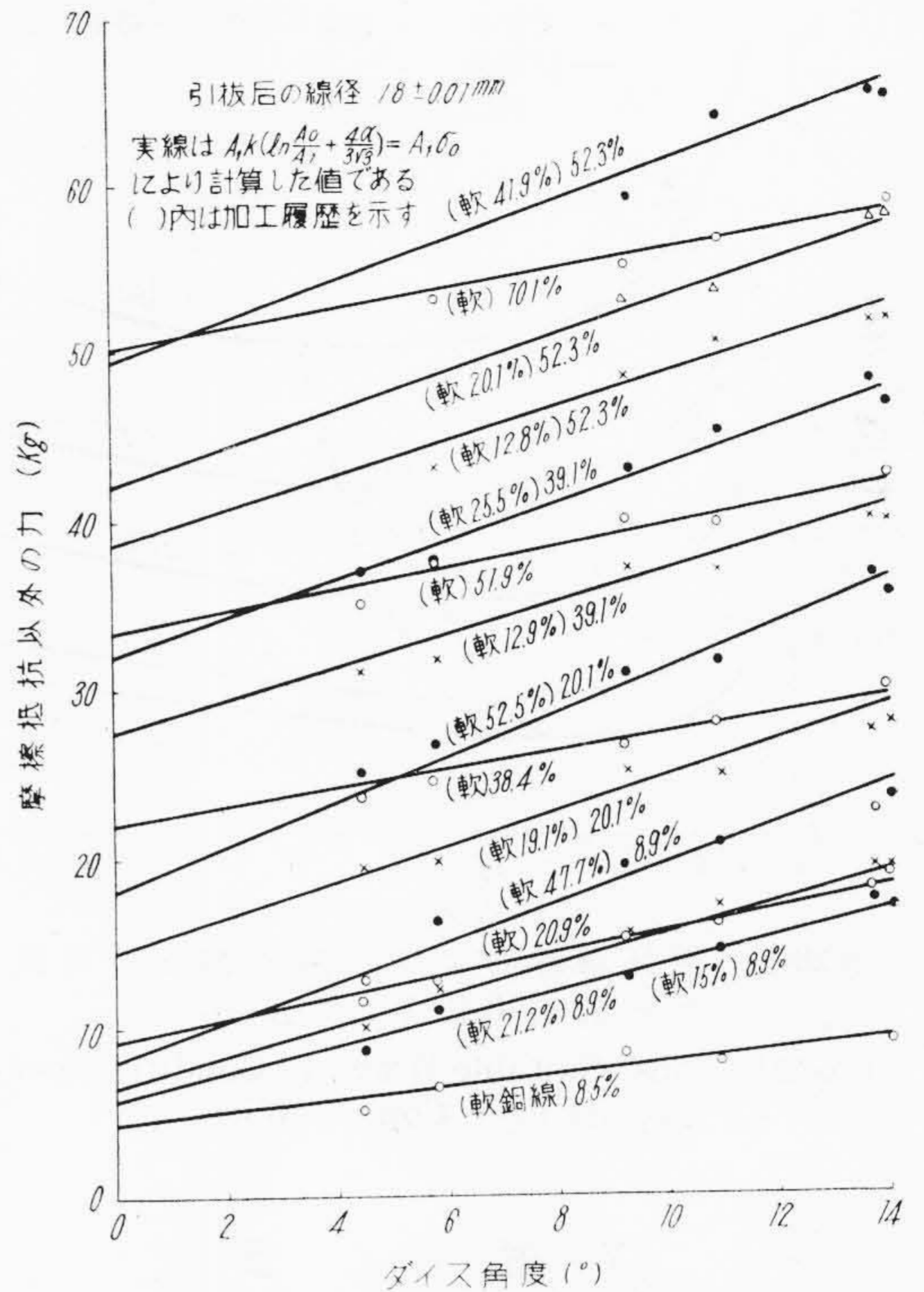
(3) 引抜力の算定

第3表よりあきらかなようにダイス角度の条件を各断面縮小率に対し大幅に与えて実験することが困難なため、引抜力の近似計算を行つて補足することにした。計算に必要な無酸素銅線の塑性変形曲線は第9図に一般電気銅ととも示してある。

第19図は各種の加工履歴をもつ銅線について前述の摩擦力測定結果より摩擦以外の引抜抵抗を求めたものである。この摩擦以外の抵抗を均一な変形抵抗と附加的剪断抵抗の和と考えて計算し同図上に重ね合わせるとよく一致する。ゆえに摩擦抵抗以外の引抜抵抗は次式によつて表わされるものとしてよい。附加的剪断による修正項はダイス角度が大きくなるにつれてまた断面縮小率が増すにしたがつて減少する傾向がある<sup>(4)</sup>といわれるが本実験ではあきらかにできなかつた。

$$\sigma_0 = A_1 \bar{k} \left( \ln \frac{A_0}{A_1} + \frac{4\alpha}{3\sqrt{3}} \right) \dots \dots \dots (5)$$

したがつてダイス出口における全引抜力は



第19図 摩擦以外の引抜抵抗に関する実験値と理論値との比較

Fig. 19. Drawing Resistance Except Friction (Comparison of Experimental Value to Theoretical Value)

$$P_m = A_1 \bar{k} \left( \ln \frac{A_0}{A_1} + 0.768 \alpha \right) \times (1 + \mu \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \alpha) \dots \dots \dots (6)$$

こゝで  $\bar{k}$ : 引抜前後における平均降伏応力

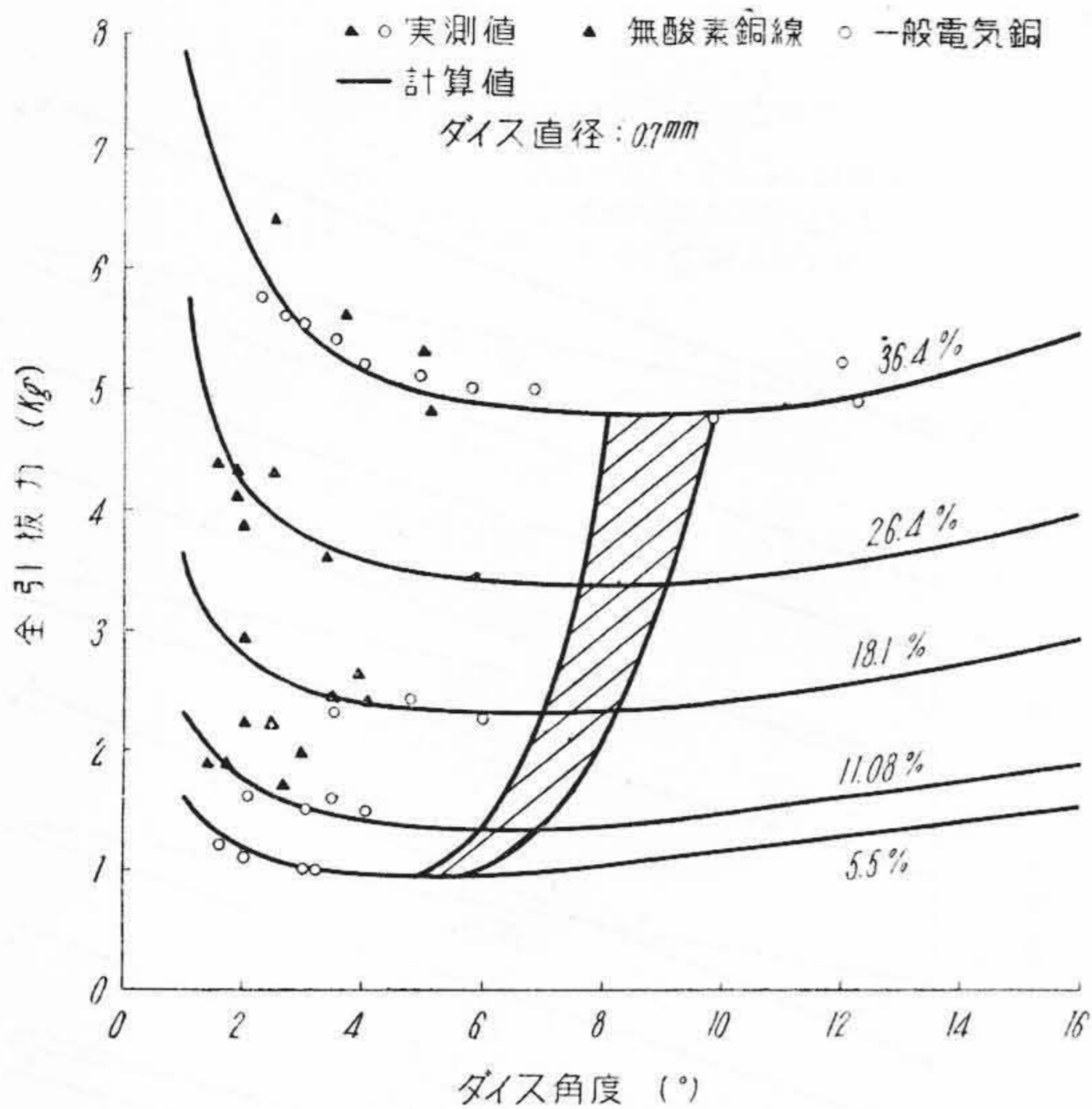
$A_0$ : ダイス入口における伸線の断面積

$A_1$ : ダイス出口における伸線の断面積

本実験式の計算結果は前報の実験式<sup>(3)</sup>と大差ないが摩擦力の測定より求めた摩擦以外の引抜抵抗と、理論的にえられる摩擦以外の引抜抵抗を比較することにより摩擦力測定値の妥当性を検討しあわせて前報<sup>(3)</sup>実験式中の面倒な係数を省いて簡単にしたものである。

第20図(次頁参照)は引抜力の計算値および実験値を示す。同図斜線を施してある部分は最適ダイス角度の範囲である。したがつて巻附力が与えられるならばそれに相当する引抜力を与える引抜条件は同図よりたゞちに求められる。その条件では伸線の精度は引抜応力より考えてもダイス精度に匹敵するものがえられるものと思われる。なお本実験における無酸素銅線と W-C 系ダイスの摩擦係数は 0.03~0.11 の間にあり、摩擦係数の低いところでは(断面縮小率 10% 以上)表面粗さも要求される精度を満足する。





第20図 電気銅線および無酸素銅線の引抜き力と最適引抜き条件の範囲

Fig. 20. Most Suitable Drawing Condition and Oxygen-Free Copper Wire

〔V〕 結 言

以上を総括すると

- (1) 伸線の寸法精度および品位に影響を与える因子を分類し、表面粗さは主として摩擦条件に、寸法精度は引抜き力を与える作業条件に関係すると推論した。
- (2) 断面縮小率—摩擦係数—伸線の磨耗—伸線表面の粗さなどの相関関係を実験的にあきらかにし、伸線表面の粗さをよくするためには摩擦係数が小さくなるような引抜き条件を選ばなければならないことを確めた。そのためには潤滑剤の検討はもとよりダイス孔面の仕上げを  $0.01\mu$  以下にするのが理想で、一回の断面縮小率は 10% より大きくすればよい。ただしその限界は真円精度の面より抑えられる。
- (3) ダイスの保持が悪いと引細りの現象を起し直径および真円精度は低下する。したがってダイスの保持を正しくすることは伸線精度をダイス精度に近づけるための必要条件である。

(4) 實際上光学的心出しをしてダイスの保持を正しくすることは困難であるから、ダイスの真円および直径精度を伸線に要求される精度よりよくする必要がある。

(5) 引抜き応力を引抜き後の線の降伏応力に対し70%以下に抑えるような引抜き条件を与えるならば伸線の真円精度はダイスの真円精度に匹敵する。このためには最適ダイス条件を確保するよう常に留意しなければならない。

(5) 本研究の応用として超精密銅線の引抜き条件を求めた。その結果 W-C 系ダイスによる引抜きは可能であり、伸線の精度も要求精度に達しうるものと判断された。

終りに臨み本研究は電気試験所より派遣された長岡氏の御協力をえたものであり、ここに深謝するとともに、貴重な助言を頂いた東京大学生産技術研究所鈴木博士、日立製作所水戸工場小河博士、実験に協力された阿部、茅根の両君に感謝の意を表して筆を擱く。

参 考 文 献

- (1) 久本, 柿崎: 日立評論 34 (4) 65~72 (昭 27-4)  
久本, 柿崎: 精密機械 18(10)321~329(昭27-10)  
久本, 柿崎: 計測 4 (2) 60~63, 80 (昭 29-2)
- (2) 久本, 柿崎: 日立評論 35(5) 97~107 (昭 28-5)
- (3) 久本, 柿崎: 日立評論 36(5) 95~103 (昭 29-5)
- (4) 鈴木: 生産技術研究所報告 1 (3) (昭 25-12)
- (5) 小河: 日本機械学会論文集 11 [41(第1部)] 31~39 (昭 20)
- (6) 曾田: 機械の研究 3 (9) 37~40 (昭 26-10)
- (7) 曾田: 機械の研究 1 (8) 43~46 (昭 24-8)
- (8) 久本, 柿崎: 日立評論 35(8)1235~1241(昭28-8)
- (9) F.T. Clever and H.J. Miller: Journal of Institute of Metals 78 537~563 (Jan., 1951)
- (10) 小林: 電気試験所彙報 15(5)310~315 (昭26-5)
- (11) G. Grodzinski and W. Stern: Nature 164 193~194 (July, 1949)

