

曲面ダイスによる引抜き力近似計算式 (第3報)

—加工硬化時の応力が歪と直線的に変化する場合の計算—

小 河 弘*

Proximate Calculating Formula for Drawing Force of Curved Surface Die (Report III)

—Applicable when Drawing Material Hardens Linearly with Strain During Drawing—

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

Abstract

The writer handled the drawing die as a cone at the start of his study on the drawing force. Later, he made public in the previous issues (Report I and II) a proximate calculating formula, derived from the results of his experiment on curved surface die which was conducted on the assumption that a yielding point for the drawing material was constant throughout the drawing process. However, it is not deniable that the drawing material is often hardened by drawing. In this report is given another proximate calculating formula for the drawing force which is consistent when the drawing material hardens linearly with the strain during the drawing process. The curved surface of the die was considered as a surface shaped by the revolution of hyperbola, and the drawing force was obtained by summing up (1) the force to deform the material, (2) the frictional force acting between the die-wall and material, and (3) the force required to bend the material at each points on the die-wall.

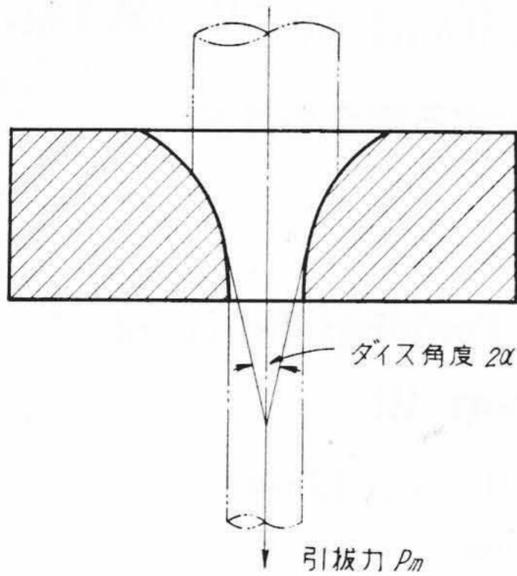
The writer examined the formula to look for the die shape by which the minimum drawing force would be attained, and found that there was an ideal die shape, which could be determined only by the frictional coefficient between the material and die-wall and regardless of the area-reduction ratio. Furthermore, he investigated the difference between this formula and the previously reported one which was proved useful when the yielding point of materials was constant.

〔I〕 緒 言

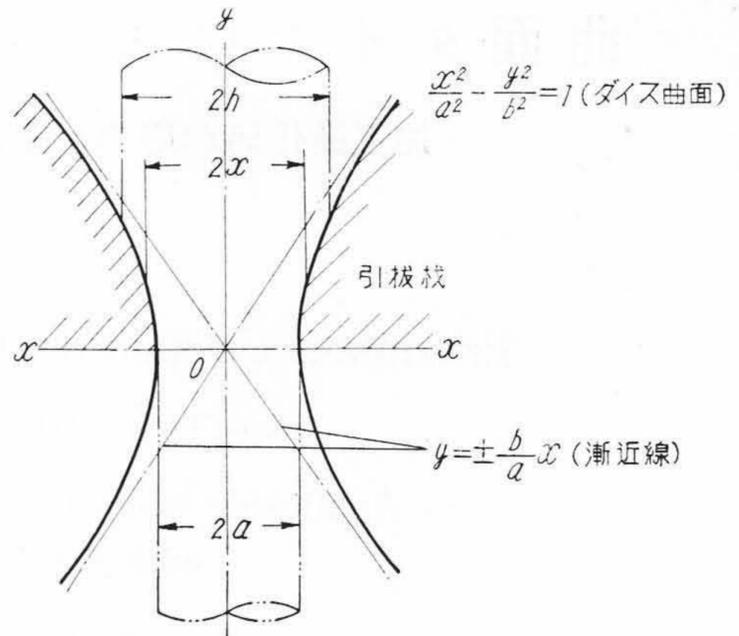
在来発表せられている引抜き力計算式の多くは第1図(次頁参照)に示すように引抜きダイスを截頭円錐ダイスとして取扱っており、筆者もまた引抜き力研究の初期においてはその例に倣った。⁽¹⁾⁽²⁾しかし実際使われているダイスの内面形状は円錐面であるよりは曲面である場合が多

いのでこれらについても論じてきた。⁽³⁾⁽⁴⁾この既報⁽³⁾⁽⁴⁾すなわち第1, 2報ではまず引抜き材は引抜きの前後において降伏点一定という条件を用いたのであるが、実際には引抜き材は多かれ少なかれ加工硬化の現象を呈するので、さらにこの条件を考慮に入れて引抜き力計算式を求めたのが本報である。計算に当り特に摩擦力を求めるのに複雑な積分にでくわしたのであるが、函数を展開することにより極近似的に解くことができた。以下計算の過程はで

* 日立製作所日立工場 工博



第1図 円錐ダイス
Fig.1. Conical Die



第2図 曲面ダイスの形状
Fig.2. Curved Surface Die Shape

きるだけ簡略にして概要のみについて述べる。

〔II〕 計算の基礎

(1) ダイス曲面

ダイスの内面は(1)式で表わされるような双曲線が y 軸のまわりに回転して形づくる回転体の面なりと考える。

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \dots\dots\dots(1)$$

第2図で h, a はそれぞれ引抜前後の引抜材半径を表わしている。

(2) 塑性変形の条件

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を主応力, 塑性変形応力を k とし, 引抜の塑性変形は最大歪エネルギー説にしたがうものとすればこの場合つぎの関係がある。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = k \dots\dots\dots(2)$$

また純粋剪断が作用するときの最大剪断応力を τ とすればつぎの関係が成立する。

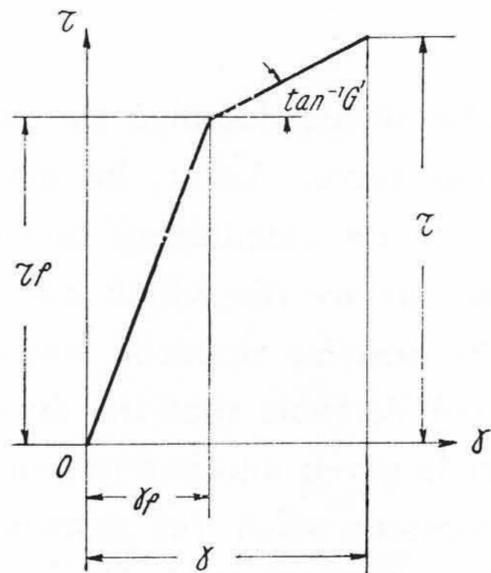
$$\tau = \frac{k}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(3)$$

つぎに塑性変形を起す場合の歪間の関係は次式にしたがうものとした。ここで $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ はそれぞれ x, y, z 方向の歪を表わしている。

$$(1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z) = 1 \dots\dots\dots(4)$$

(3) 加工硬化

第3図に示すように横軸に剪断歪 γ , 縦軸に剪断応力 τ をとった応力-歪曲線が降伏点を過ぎて後は直線的に加工硬化を示す場合を考える。 τ_f, γ_f をそれぞれ剪断降伏応力ならびに歪とし, G' を加工硬化時の剪断弾性係数とすると, 任意の歪 γ に対する応力 τ は次式で表わされる。



第3図 剪断応力-歪線図
Fig.3. Shearing Stress-Strain Diagram

$$\tau = \tau_f + (\gamma - \gamma_f)G' \dots\dots\dots(5)$$

この式は直接振り試験によつて求めれば最も正確であるが, また引張試験による応力-歪曲線からえられる値を用いて計算することができる。すなわち引張降伏応力を σ_f , 加工硬化の弾性係数を E' とすれば

$$\tau_f = \frac{\sigma_f}{2}, \quad G' = \frac{E'}{2(1 + 1/m)} \dots\dots\dots(6)$$

とおけばよい。ただし m はポアッソン数である。

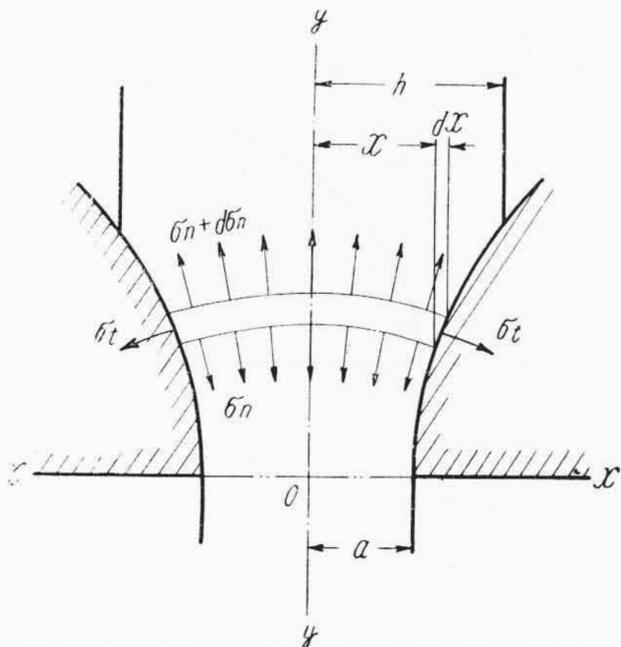
つぎに塑性変形応力 k について考えるに, 引抜の場合は $k = 2\tau$ となるから (2), (3) 式はつぎのように表わされる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau = 2\{\tau_f + (\gamma - \gamma_f)G'\} \dots\dots\dots(7)$$

$$\tau = \frac{2\tau}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \{\tau_f + (\gamma - \gamma_f)G'\} \dots\dots\dots(8)$$

(4) 任意の点における剪断歪と応力

第4図のような引抜が行われる場合, ダイス内任意の位置 x における微小板状部分に働く法線および切線方向



第4図 引抜材の微小部分に働く応力
Fig. 4. Stress Acting on Minute Part of Drawing Material

応力をそれぞれ σ_n, σ_t , これに対応する歪を ϵ_n, ϵ_t とすれば, (4) 式からつぎの関係がある。

$$(1+\epsilon_n)(1+\epsilon_t)^2=1 \dots\dots\dots (9)$$

しかるに同図よりあきらかに概略つぎの関係がある。

$$\epsilon_t = \frac{x}{h} - 1 \quad \therefore 1 + \epsilon_t = \frac{x}{h} \dots\dots\dots (10)$$

(9), (10) 式から次式がえられる。

$$1 + \epsilon_n = \frac{h^2}{x} \dots\dots\dots (11)$$

ここでお互に垂直なる直応力が働く場合, 剪断歪 r と直歪 ϵ_n, ϵ_t との間にはつぎの関係がある。

$$\frac{1-r/2}{1+r/2} = \frac{1+\epsilon_t}{1+\epsilon_n} \dots\dots\dots (12)$$

この式に(10), (11) 式の値を入れて r について解けば

$$r = \frac{2(h^3-x^3)}{h^3+x^3} \dots\dots\dots (13)$$

(5)式において r_f は r に比べて省略しうる程度の小数として取扱い, これに(13)式の値を用いれば, ダイスイ任意の点の応力はつぎのようになる。

$$\tau = \tau_f + \frac{2(h^3-x^3)}{h^3+x^3} G' \dots\dots\dots (14)$$

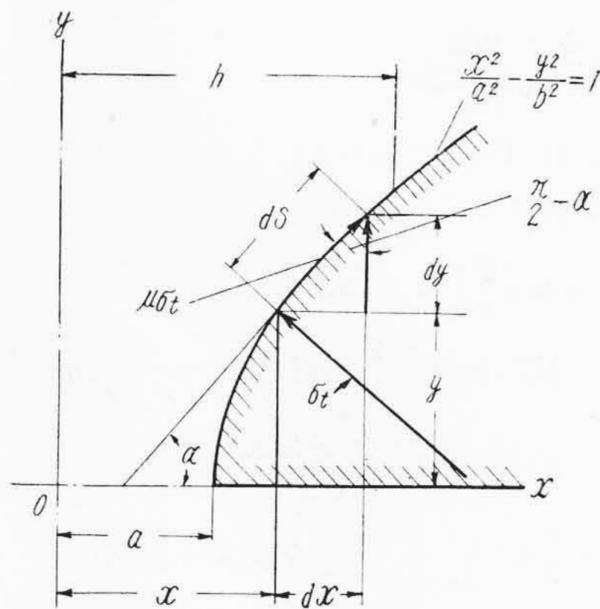
なお以上(2)(4)の基となる計算については既報⁽¹⁾でくわしく述べてあるから参照されたい。

〔III〕 引抜き力計算式

(1) 引抜き変形に要する応力

既報⁽³⁾と同じく第4図の微小板状部分に働く力の釣合を考えると

$$\frac{d\sigma_n}{dx} + \frac{2}{x}(\sigma_n - \sigma_t) = 0 \dots\dots\dots (15)$$



第5図 ダイスイ壁面の微小部分に働く応力
Fig. 5. Stress Acting on Minute Part of Die-wall Surface

これに(14)式の関係を用いて x について解けば次式がえられる。

$$\sigma_n = -4 \left\{ \tau_h \log x + 2G' \log \frac{x}{(h^3+x^3)^{2/3}} \right\} + C \dots\dots (16)$$

ここで境界条件は計算を簡単にするため $x=h$ なるとき $\sigma_n=0$ とおくと

$$C = 4 \left\{ \tau_h \log h - 2G' \log^3 \sqrt{4h} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

$$\therefore \sigma_n = 4 \left\{ \tau_h \log \frac{h}{x} + 2G' \log \frac{(h^3+x^3)^{2/3}}{3\sqrt{4hx}} \right\} \dots\dots (18)$$

これより

$$\sigma_t = \sigma_n - 2\tau = 2 \left[\tau_h \left(2 \log \frac{h}{x} - 1 \right) + 2G' \times \left\{ 2 \log \frac{(h^3+x^3)^{2/3}}{3\sqrt{4hx}} - \frac{h^3-x^3}{h^3+x^3} \right\} \right] \dots\dots\dots (19)$$

ここで τ_h は $x=h$ における τ_f の値を表わしている。よつて $2h$ から $2a$ まで引抜くに要する引抜き変形力を P とすれば, これは(18)式で $x=a$ とおきかつ πa^2 を乗ずることにより次式のように求められる。

$$P = 4\pi a^2 \left\{ \tau_h \log \frac{h}{a} + 2G' \log \frac{(h^3+a^3)^{2/3}}{3\sqrt{4ha}} \right\} \dots\dots (20)$$

(2) ダイスイ壁との摩擦に基づく応力

ダイスイ壁と引抜材との間に働く摩擦係数を μ とすればダイスイ面微小部分に働く応力の関係は第5図のようになる。引抜材を直径 $2h$ から $2x$ まで引抜くときの摩擦に打ちかつために要する力を R_x とすれば, これは微小部分に働く摩擦力引抜き方向分力の和を求めて符号を逆にすることによりえられる。

すなわち既報⁽³⁾と同じく

$$-R_x = 2\pi\mu \int_x^h \sigma_t x dy \dots\dots\dots (21)$$

ここで

$$dy = \frac{b}{a} \frac{xdx}{\sqrt{x^2 - a^2}}$$

また σ_t は(19)式で表わされる。これらを用いて整理すればつぎのようになる。

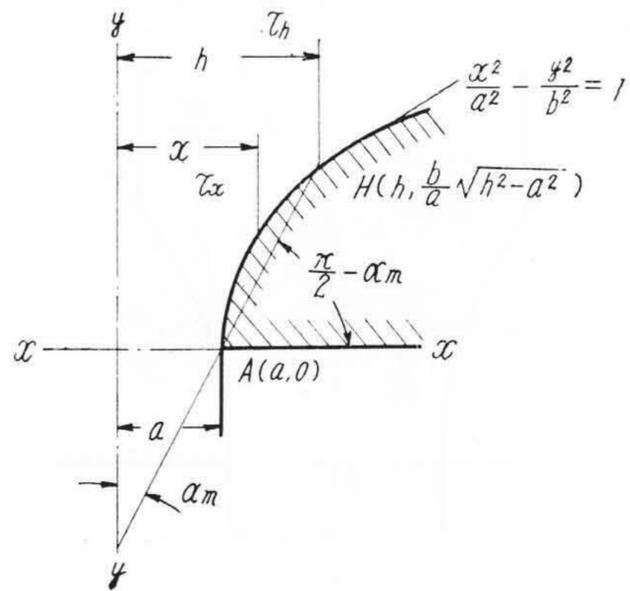
$$\begin{aligned} -R_x = & 4\pi\mu \frac{b}{a} \left[\left\{ \tau_h (2 \log h - 1) \right. \right. \\ & - 4G' (\log h + \frac{2}{3} \log 2) \left. \left. \right\} \int_x^h \frac{x^2}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx \right. \\ & - 2(\tau_h + 2G') \int_x^h \frac{x^2 \log x}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx \\ & + \frac{8}{3} G' \int_x^h \frac{x^2}{\sqrt{x^2 - a^2}} \log(h^3 + x^3) dx \\ & \left. - 2G' \int_x^h \frac{x^2}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{h^3 - x^3}{h^3 + x^3} dx \right] \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

この(22)式の計算は第1~4項の4種の積分を含んでいるが、第1項は普通の公式により、また第2項は既報⁽³⁾の方法によつて解くことができる。しかし第3, 4項はそれぞれ $\log(h^3 + x^3)$, $\frac{h^3 - x^3}{h^3 + x^3}$ を級数に展開することにより近似的に解くこととした。以上のごとくにして求めた(22)式についてその積分限界を $a \rightarrow h$ として計算した結果の符号を逆にした値が、求むるダイス壁と引抜材との間に働く摩擦にうちかつたための力 R である。

$$\begin{aligned} R = & -4\pi\mu b \left[\frac{1}{2} \left\{ \tau_h (2 \log h - 1) - 4G' (\log h + \frac{2}{3} \log 2) \right\} \right. \\ & \times \left\{ h \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} + a \log \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right) \right\} \\ & - (\tau_h + 2G') \left[\frac{1}{2} \left\{ h \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} (2 \log h - 1) \right. \right. \\ & + a \log \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right) \left. \left. \right\} + a \left\{ \log \frac{a}{2} \cosh^{-1} \frac{h}{a} \right. \right. \\ & + \frac{1}{2} \left(\cosh^{-1} \frac{h}{a} \right)^2 - \frac{1}{2} e^{-2 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} \\ & \left. \left. + 0.125 e^{-4 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} - 0.056 e^{-6 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} + 0.431 \right\} \right] \\ & + G' a \left[\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \left\{ \frac{1}{a} (4 \log h - 0.490) + 1.418 \frac{a}{h} \right. \right. \\ & + 3.454 \left(\frac{a}{h}\right)^3 + 0.755 \left(\frac{a}{h}\right)^7 + 1.580 \left(\frac{a}{h}\right)^9 \\ & \left. \left. - 0.465 \left(\frac{a}{h}\right)^{11} + 0.680 \left(\frac{a}{h}\right)^{13} + 1.360 \left(\frac{a}{h}\right)^{15} \right\} \right. \\ & + \log \left\{ \frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right\} \left\{ (4 \log h - 1) \right. \\ & \left. \left. - 1.458 \left(\frac{a}{h}\right)^6 - 0.975 \left(\frac{a}{h}\right)^{12} \right\} \right] \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

(3) 引抜機繊維の方向変化に基づく応力

引抜材繊維は第6図に示すように α_m なるダイス角度をもつ円錐ダイスによる場合のようにダイスの入口において曲げられるものとする。このことは既報⁽³⁾の取扱いと同様であるが、ここではダイスの入口と出口とは



第6図 引抜材繊維の方向変化
Fig. 6. Direction Change of Drawing Material Fiber

引抜材の降伏限度が一定でない点が既報⁽³⁾と異なる。

ダイス内任意の点における塑性変形応力を k_x , 平均塑性変形応力を k_m とすれば、前述したように引抜の場合は $k = 2\tau$ なる関係があるから、これと(14)式の関係とから次式が成立する。

$$\begin{aligned} k_m = & \frac{1}{h-a} \int_a^h k_x dx = \frac{1}{h-a} \\ & \times \int_a^h 2 \left\{ \tau_h + \frac{2(h^3 - x^3)}{h^3 + x^3} G' \right\} dx \dots \dots \dots (24) \end{aligned}$$

ここでもまた $\frac{h^3 - x^3}{h^3 + x^3}$ を級数に展開することによつて解くこととした。

この場合には(24)式で表わされる平均塑性変形応力をもつてダイス入口および出口において引抜材繊維がそれぞれ α_m だけ曲げられるものとする。この曲げに要する平均引張応力を p_m とすれば、前述ならびに(3)式から容易につぎの関係が導かれる。

$$\begin{aligned} p_m = & \frac{2}{3\sqrt{3}} k_m \alpha_m = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[2(\tau_h + 2G') \right. \\ & - \frac{8G'}{1-a/h} \left[\frac{1}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^4 \right\} - \frac{1}{7} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^7 \right\} \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{10} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^{10} \right\} - \frac{1}{13} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^{13} \right\} \right] \right] \\ & \times \cot^{-1} \left\{ \frac{b \sqrt{(h/a)^2 - 1}}{a \frac{h}{a} - 1} \right\} \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

この引張応力がダイスの入口および出口に働くものとする。これに要する力を S とすればつぎのようになる。

$$S = 2\pi a^2 p_m \dots \dots \dots (26)$$

(4) 引抜力ならびに引抜応力

$2h$ から $2a$ まで引抜くに要する力を P_m とすれば、とこれ $P + R + S$ すなわち(20), (23) および(26)式を加えあわせることによつてえられる。

$$\begin{aligned}
 P_m = & 4\pi a^2 \left\{ \tau_h \log \frac{h}{a} + 2G' \log \frac{(h^3+a^3)^{2/3}}{3\sqrt{4ha}} \right\} \\
 & - 4\pi \mu ab \left[\frac{1}{2} \left\{ \tau_h (\log h - 1) - 4G' \right. \right. \\
 & \times \left(\log h + \frac{2}{3} \log 2 \right) \left. \left. \left\{ \frac{h}{a} \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + \log \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right) \right\} - (\tau_h + 2G') \right. \right. \\
 & \times \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{h}{a} \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} (2 \log h - 1) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \log \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right) \right\} + \left\{ \log \frac{a}{2} \cdot \cosh^{-1} \frac{h}{a} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{2} \left(\cosh^{-1} \frac{h}{a} \right)^2 - \frac{1}{2} e^{-2 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0.125 e^{-4 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} - 0.056 e^{-6 \cosh^{-1} \frac{h}{a}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0.431 \right\} \right] + G' \left[\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right. \\
 & \times \left\{ \frac{1}{a} (4 \log h - 0.490) + 1.418 \frac{a}{h} + 3.454 \left(\frac{a}{h}\right)^3 \right. \\
 & \left. \left. + 0.755 \left(\frac{a}{h}\right)^7 + 1.580 \left(\frac{a}{h}\right)^9 - 0.465 \left(\frac{a}{h}\right)^{11} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0.680 \left(\frac{a}{h}\right)^{13} + 1.360 \left(\frac{a}{h}\right)^{15} \right\} \right. \\
 & \left. + \log \left\{ \frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right\} \left\{ (4 \log h - 1) \right. \right. \\
 & \left. \left. - 1.458 \left(\frac{a}{h}\right)^6 - 0.975 \left(\frac{a}{h}\right)^{12} \right\} \right] + \frac{4\pi a^2}{3\sqrt{3}} \\
 & \times \left[2(\tau_h + 2G') - \frac{8G'}{1-a/h} \left[0.250 \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^4 \right\} \right. \right. \\
 & \left. \left. - 0.143 \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^7 \right\} + 0.100 \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^{10} \right\} \right. \right. \\
 & \left. \left. - 0.077 \left\{ 1 - \left(\frac{a}{h}\right)^{13} \right\} \right] \right] \cot^{-1} \times \left\{ \frac{b \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}}{a} \right. \\
 & \left. \frac{h/a - 1}{h/a - 1} \right\} \dots \dots \dots (27)
 \end{aligned}$$

引抜き応力を σ_m とすればこれは P_m を πa^2 で除してえられる。なお(27)式の第1, 2, 3項 P, R, S に相当する応力を $\sigma_P, \sigma_R, \sigma_S$ を以つて表わすこととする。

$$\sigma_m = \frac{P_m}{\pi a^2} = \frac{P+R+S}{\pi a^2} = \sigma_P + \sigma_R + \sigma_S \dots \dots \dots (28)$$

なおこの式を用いて実際に計算してみると、(27)式で実線のアンダーラインを施した項は省略してよい程度に小さく、また点線のアンダーラインを施した項は a/h の小さい場合には省略してよいことがわかつた。

〔IV〕 数 値 計 算

既報⁽³⁾と同じようにダイス形状を表わすものとして b/a を横軸にとり、引抜き応力 σ_m を縦軸にとつて $\mu = 0.035, 0.060, 0.092, 0.120$ なる4つの場合について(28)式により計算を行つた結果をそれぞれ第7図～第10図(次頁参照)に掲げる。この計算は $a/h = 0.95, 0.90, 0.80$ かつ $a = 2\text{mm}$ の場合のものであるが、 $a = 5, 10\text{mm}$ の場合についても若干の計算を試みたところ、その結果は変らなかつた。

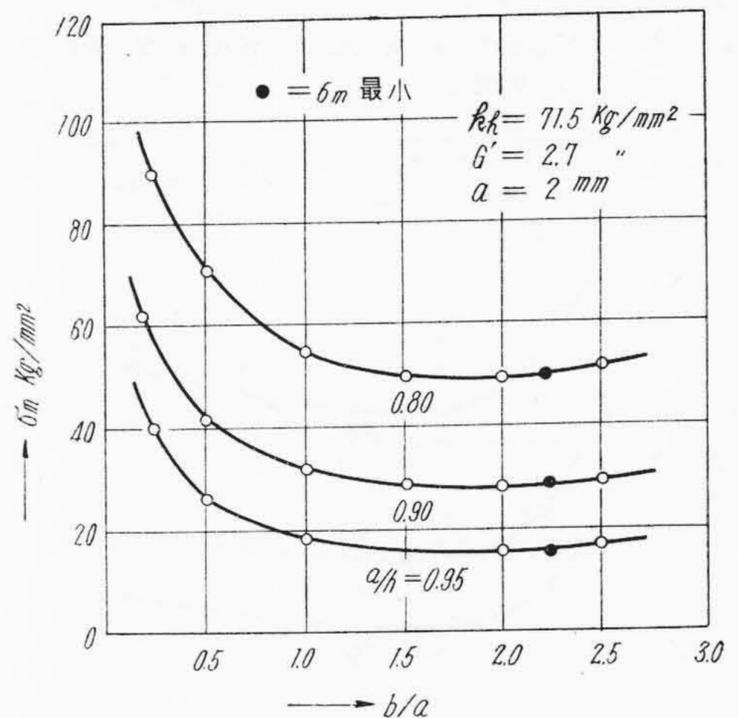
各図に σ_m の最小なる点を示しておいたが、これは(28)式 σ_m を b について微分してこれを0とおき、具体的数字を入れて計算した値である。その結果については考察の項でくわしく述べることとし、つぎに計算式だけを掲げておく。

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma_m}{db} = & -\frac{4\mu}{a} \left[\frac{(27)\text{式第2項}}{\text{項に同じ}} \right] + \frac{4}{3\sqrt{3}} \left[\frac{(27)\text{式第3項}}{\text{項に同じ}} \right] \\
 \times & \frac{a^2(h/a-1)\sqrt{(h/a)^2-1}}{a^2(h/a-1)^2+b^2\{(h/a)^2-1\}} = 0 \dots \dots \dots (29)
 \end{aligned}$$

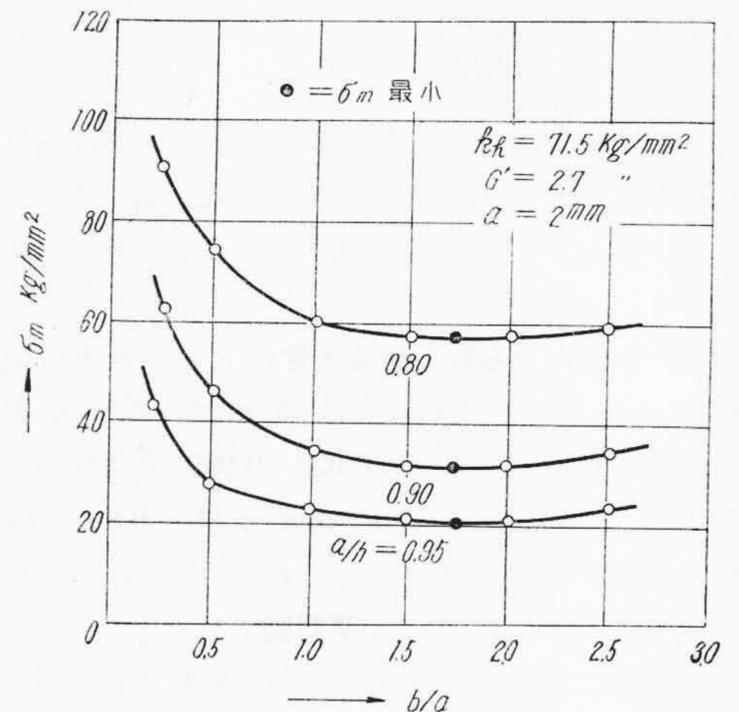
〔V〕 考 察

(1) 引抜き応力を最小ならしめる条件

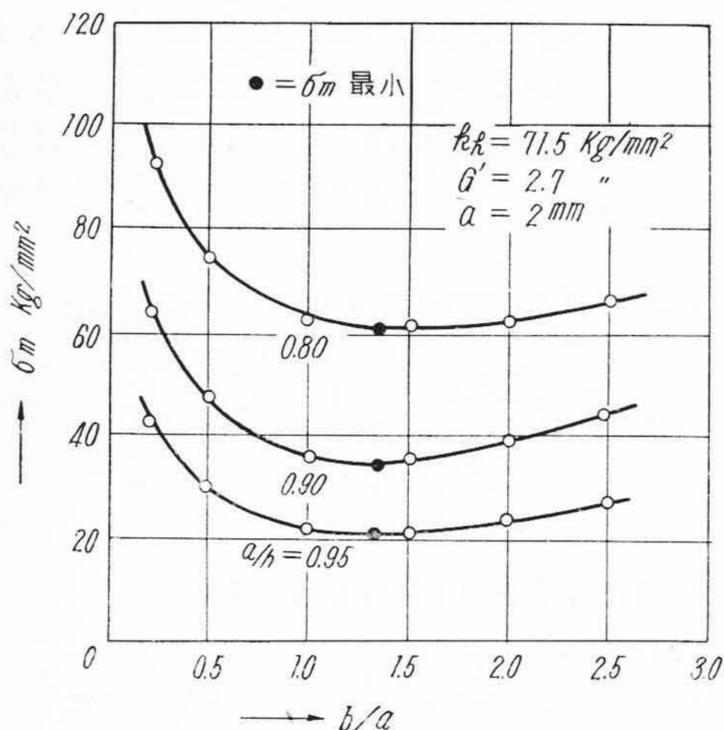
第7図～第10図をよく観察すると μ のある値に対しては a/h のいかんにかかわらず、ある b/a の値において



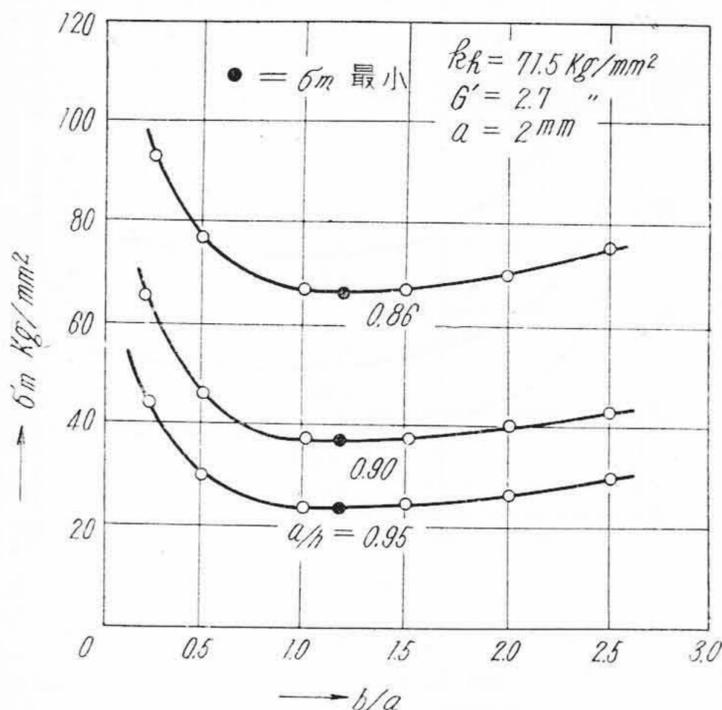
第7図 σ_m と b/a との関係 ($\mu = 0.035$ の場合)
Fig. 7. Relation between σ_m and b/a (when μ is 0.035)



第8図 σ_m と b/a との関係 ($\mu = 0.060$ の場合)
Fig. 8. Relation between σ_m and b/a (when μ is 0.060)



第9図 σ_m と b/a との関係 ($\mu=0.092$ の場合)
Fig.9. Relation between σ_m and b/a (when μ is 0.092)

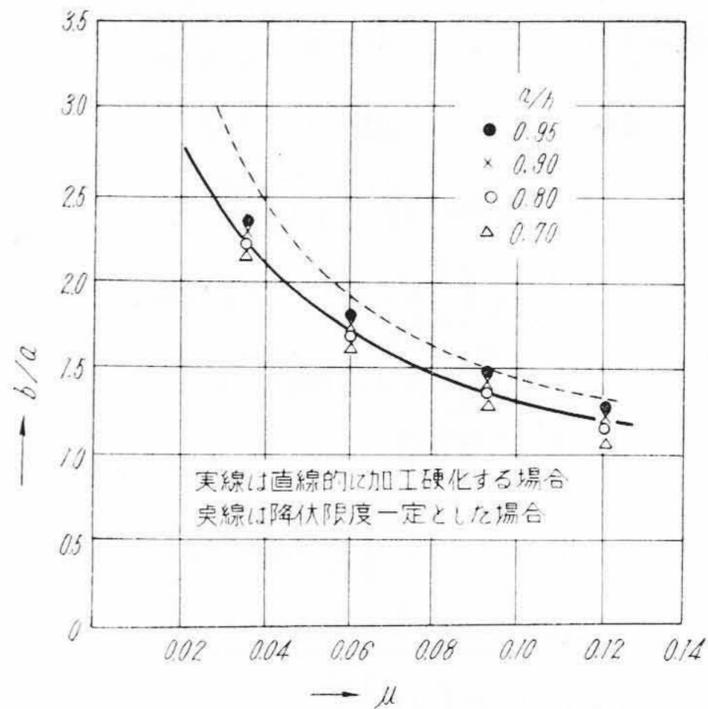


第10図 σ_m と b/a との関係 ($\mu=0.120$ の場合)
Fig.10. Relation between σ_m and b/a (when μ is 0.120)

σ_m の最小値が見られることがわかる。この点は既報⁽³⁾ 曲面ダイス、降伏限度一定なる場合と同じ関係になったわけであるが、つぎにこのことに関し少しく考察を加えよう。

(a) σ_m を最小ならしめる時の μ と b/a との関係 (29)式において $k_h=2\tau_h=71.5 \text{ kg/mm}^2$, $G'=2.7 \text{ kg/mm}^2$, $a=2 \text{ mm}$ とし, $\mu=0.035, 0.092, 0.060, 0.120$ なるおのおの場合について $a/h=0.95, 0.90, 0.80, 0.70$ なる値を用いて b について解き, それらの b/a と μ との関係を図示したものが第11図である。

なお同図には既報⁽³⁾でえられた μ と b/a との関係を掲げておいたが, 本報の方が b/a は幾分小さく計算されるようである。同図を見てあきらかなようにある μ に対しては a/h のいかにかわらず σ_m を最小ならしめ



第11図 引抜応力を最小ならしめる時の μ と b/a との関係

Fig.11. Relation between μ and b/a at which Drawing Force Becomes Minimum

第1表 a の影響
Table 1. Influence of a

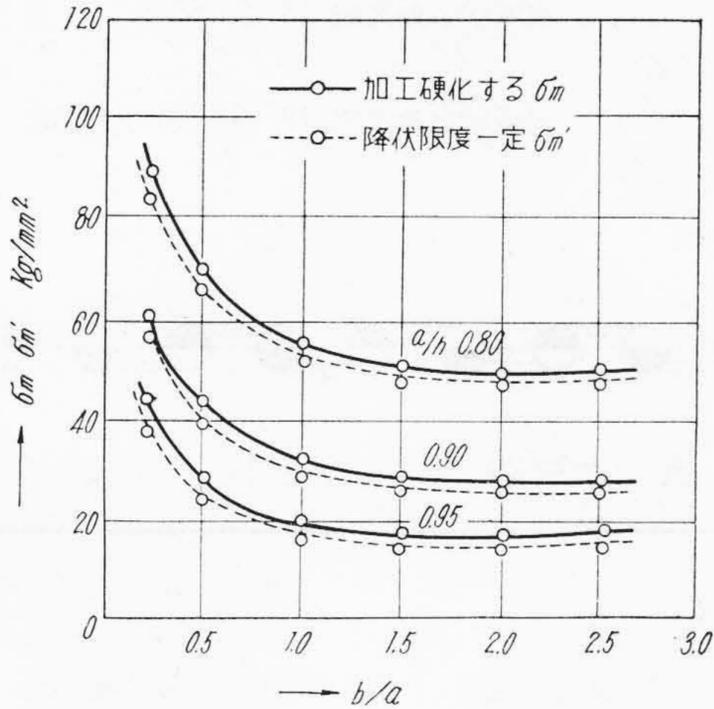
a (mm)	b/a
2	1.360
5	1.365
10	1.380

第2表 τ_h, G' の影響
Table 2. Influence of τ_h, G'

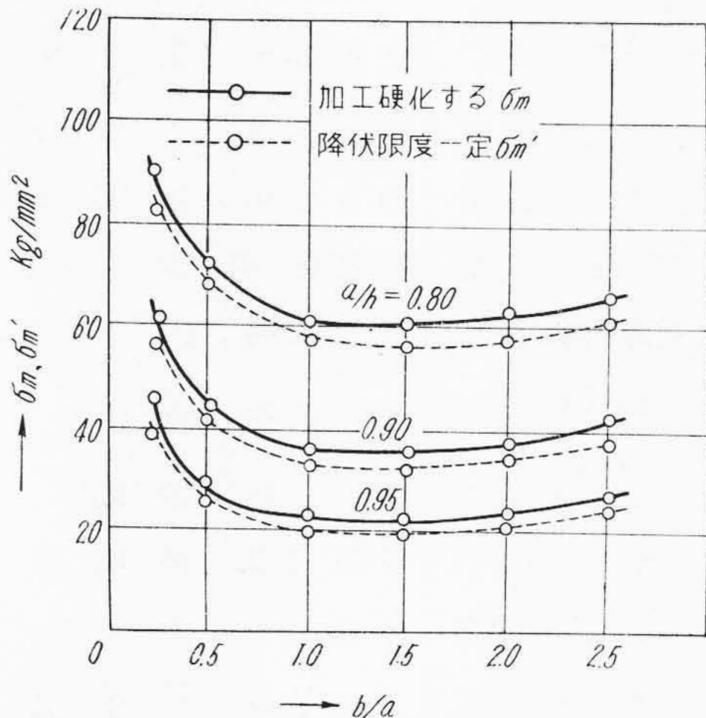
$2\tau_h$ (kg/mm ²)	G' (kg/mm ²)	b/a
71.50	2.70	1.360
35.75	2.70	1.345
35.75	1.35	1.355
143.0	2.70	1.385
143.0	1.35	1.370

る b/a はほぼ一定値を示す。 a/h によつて幾分 b/a の値に差異あるかのように見えるのは計算上の誤差によるものではないかと考えている。計算が煩雑なので特に詳細な検算は行わなかつた。

(b) 上記(a)に対する a, τ_h, G' などの影響 まず a の影響を調べるため $\mu=0.092, 2\tau_h=71.5 \text{ kg/mm}^2, G'=2.7 \text{ kg/mm}^2, a/h=0.95$ なる値に対し $a=2, 5, 10 \text{ mm}$ なる3つの場合の b/a を計算したが, 結果は第1表の通りで, ほぼ差異なきことを知つた。つぎに同じく $\mu=0.092, a=2 \text{ mm}, a/h=0.95$ なる値に対し τ_h, G' の値を種々かえた場合について b/a を計算したが, 結果は第2表の通りで, その影響は大體ないものと思われた。これらの計算はやゝ断片的ではあるが, 以上により引抜



第12図 σ_m と σ_m' との比較 ($\mu=0.035$ の場合)
Fig.12. Comparison between σ_m and σ_m' (when μ is 0.035)



第13図 σ_m と σ_m' との比較 ($\mu=0.092$ の場合)
Fig.13. Comparison between σ_m and σ_m' (when μ is 0.092)

応力を最小ならしめるときの μ と b/a との第11図の関係は a, τ_h, G' のいかんにかかわらずきまるものと思われる。

このように加工硬化を考慮した曲面ダイス引抜き力に関してもある μ に対しては引抜き力の最小なる条件に対して理想的なダイス形状が a/h のいかんにかかわらず存在することがわかった。こゝでもまた既報⁽³⁾で述べたと同じく曲面ダイスが一般に用いられる理由をあきらかにしえたわけである。

(2) 曲面ダイスで引抜き材の降伏点在一定なる場合との比較

引抜き材が引抜きによつて加工硬化しないと考えた場合のことは既報⁽³⁾で述べたが、その引抜き応力を σ_m' とする。

既報⁽³⁾では横軸に b/a を、縦軸に σ_m'/k をとつて応力を図示したが、本報との比較を行うため同報の k に 71.5 kg/mm^2 (本報の引抜き前の値) を用いて計算した値を求めこれらを本報でえられた結果と同じ図表に併せ掲げることとした。すなわち第12, 13図がそれであるが、それぞれ $\mu=0.035, 0.092$ なる場合を示し、実線は本報加工硬化を考慮した引抜き応力 σ_m ($k=7.15 \text{ kg/mm}^2, G'=2.7 \text{ kg/mm}^2$), 点線は既報⁽³⁾降伏限度一定とした引抜き応力 σ_m' ($k=71.5 \text{ kg/mm}^2$) を表わす。ここでいずれの場合にも $a=2 \text{ mm}$ である。

両図を見るに σ_m は σ_m' に比べて一般に大きく、最小応力値についての比較では σ_m の方が7~10%程度大きく計算せられるようである。このことは σ_m では引抜き材の硬化を考えたためと思われる。

[VI] 結 言

既報⁽³⁾⁽⁴⁾で曲面ダイスによる近似引抜き力を取扱つたが、その場合引抜き材は加工によつて硬化しないものと考えた。しかしほとんどすべての金属材料は加工硬化の現象を示すものなので、ここではそれを考慮に入れた近似引抜き力を計算した。たゞし加工硬化時の応力は歪と直線的關係にあるものとした。えられた引抜き力計算式(27)式までの誘導の順序、考え方などは前とほとんど同様であるが、曲面ダイスならびに加工硬化という仮定が組合わさり、特に摩擦力の計算を複雑にした。

つぎに(27)式から引抜き力を最小ならしめるダイスの形状を求めたが、本報でも既報⁽³⁾と同様円錐ダイスとは異なり a/h のいかんにかかわらず μ だけによつて適当な形状がきめられることを知つた。さらに曲面ダイスによる硬化を考へない場合(既報⁽³⁾)との比較を試みたが、引抜き力ならびに引抜き力を最小にするダイスの形状などに関して概略一致した結果を示している。

なおこの計算はすべて職務の余暇を利用して行つたもの、それに加えて日頃不勉強の筆者ではこの程度の数式の取扱いがせいぜいであつた。こうした困難な問題を不器用な計算式だけで片付けるのは少しく危険かも知れないが、加工硬化のことは円錐ダイスでも取扱つてきた関係上本報をまとめてみた。大方の御検討をいたゞければ幸である。

終りに臨み本報をまとめるに当り終始御鞭撻を賜つた同志社大学覚前博士ならびに常によき御理解をいたゞいた日立製作所日立研究所兼先所長に厚く御礼申し上げる次第である。

注(1) 本報は筆者日立研究在所中にまとめた引抜き諸論文の中の一部である。

(2) 本報は昭和28年9月東大における第3回連合応用力学講演会において発表した。

参考文献

- (1) 覚前, 小河: 機械学会論文集 9巻, 65号 I-132頁, (昭18, 8)
 (2) 小河: 機械学会論文集 11巻, 41号, I-35頁, (昭20. 2. 5)

- (3) 小河: 機械学会論文集 18巻, 65号, 71頁 (昭27)
 (4) 小河: 機械学会論文集 18巻, 65号, 78頁 (昭27)



日立製作所社員社外講演一覧表 (昭和29年11月分受付) (その1)

講演月日	主 催	演 題	所 属	講 演 者
10/4~5	中部電力株式会社	① 電気絶縁油の選択 ② タービン潤滑の選択	日立研究所	高橋治男
11/17	東北熱管理協会 日本ボイラー協会	ボイラーにおける自動燃焼制御装置について	日立工場	吉岡孝幸
11/10	三菱鉱業株式会社	設備計画に関する MAPI 方式の解説	本 社	村川武雄
12/18	真空技術研究会	真空溶解銅の諸性質に及ぼす真空度の影響について	中央研究所	土井俊雄
11/12	広島市産業課	工 具 鋼 の 熱 処 理	安来工場	小柴定雄
11/17	電 気 協 会	磁気増幅器とその応用	日立工場	藤木勝美
11/下	日本ビニル工業会	塩化ビニル樹脂混和物中の可塑剤の拡散速度	日立電線工場	吉川充雄
11/17	東北熱管理協会	空気作動調節計による自動制御計画と実際	多賀工場	山下史郎
11/19	東京産業安全協会 三鷹支部	災害ポテンシャルの除去に重点をおいた安全管理	亀戸工場	寺下 信
12/1	東京電信電話管理局	自動車用電装品気化器について	本 社	古屋 勇
12/18	工業技術協会	シュラー高速度自動プレスについて	多賀工場	池田良平
10/14~15	茨城労働基準協会	溶接装置の構造および取扱	日立工場	山内一能
11/26	工業技術協会	高送り切削の実用化	川崎工場	岩瀬泰人 八木研司
11/27	日本分光学会	日立記録式炎光分光光度計による金属分析への応用について	日立研究所 多賀工場	鎬木 猛助 古渡 賢
12/8	労働科学研究所	通信機生産における Conveyer の実例	戸塚工場	小林季八 坂田一志
11/4	東京都立工業奨励館	倣い削り装置とその応用について	川崎工場	花岡 浩
11/28	電 気 学 会	最近の電子顕微鏡の傾向について	多賀工場	大沼嘉郎
11/17	建設省関東地方建設局	0.6 および 1.2 m ³ ショベルについて	亀有工場	安井 厚
30/夏	International Committee on Illumination	On the New Type Recording Spectrophotometer	中央研究所	角野正夫
12/2	農林省農地局	排水機場電気設備について	本 社	木村 勝
4/10	鉄 鋼 協 会	軸受鋼の焼入性におよぼす球状化セメント 粒度の影響	水戸分工場	渡辺 準平 宇和野 晃三
11/30	日 本 化 学 会	化学工業における作業標準の作り方	茂原工場	宮城精吉
12/10	神奈川県工業試験所	超硬工具研磨盤の試作と工具の研磨	川崎工場	八木研司