

# 管端スピニング加工に関する研究 (第4報)

—加工抵抗, および所要動力の数学モデル(銅管の定速加工の場合)—

田 中 秀 穂・岡 村 俊 一

(受理 昭和52年5月31日)

## Studies on Tube-end Spinning (4th Report).

Estimations of Experimental Equations on Spinning Force and Power  
with the Design of Factorial Experiment (on Copper Tube).

Hideho TANAKA and Shun'ichi OKAMURA.

The principal forming factors controlling the forming torque, thrust and the required power in Tube-end Spinning, are three-die revolution, feeding rate of tubular stock, and heat relief area (grooves provided at innerface of die).

In this paper, on the nose forming of copper tube with conical die, experimental equations on the forming torque, thrust and the required power which include the above factors are developed to know the 3 factors' influences for the formabilities by using the Design of Factorial Experiment, as 3 factors 3 levels.

## 1. 結 言

筆者らは、さきに、管端スピニング加工において、旋盤を利用した機械的ネジ送りを管の送りに採用するいわゆる定速加工する場合の加工現象に、実験的検討を加え、その中で、ダイス回転数 ( $N_D$  rpm), 管の送り ( $f$  mm/rev), ダイス内壁に設けたみぞ面積比 ( $Ar$  %) が、加工抵抗の制御要因として大きく影響することを定性的に明らかにした<sup>1)~3)</sup>。ここで、これら各要因と加工抵抗の間の定量的関係を知ることは、油圧式実用機設計の基礎資料をうる上にも、また、本加工法の解析の上にも必要なことと考えられる。

しかしながら、加工中にはげしい温度変化をとともなう本加工法における加工中の変形抵抗の変化を、変形温度、ひずみ速度の関数として、連続的に解析することは、極めて複雑である。

そこで、本報では、定速加工において、或る絞り比のとき (絞り比  $K=0.5$  とした) の各要因と加工抵抗 (トルク, スラスト) および所要動力との関係を、実験計画法を応用して奥島ら<sup>4)</sup> の方法にしたがい、数学モデルをたて、実験式を推定することにより、各要因と加工抵抗, 所要動力との定量的関係を知ろうとした。

## 2. 実験装置および方法

実験には、昌運カズヌーブ旋盤 HB-500 型 (12 PS, 40~3200 rpm) を利用し、表 1 (イ) に示す 9 種類のダイスで、(ロ) の銅管を円錐状に絞り比  $K=0.5$  まで、口絞り成形する場合について、加工抵抗 (トルク  $T$ , スラスト  $Th$ ) を、自製の動力計にて測定し、併せて、加工中の平均トルク  $\bar{T}$ , 平均スラスト  $\bar{Th}$  より所要動力を求めた。なお測定値の記録には、動ひずみ計 (新興通信工業製, DS 61 R型) を経て直記式電磁オシログラフ (横河電機製 EMO-62 型) をもちいた。

採用した加工条件は、要因計画にしたがい、ダイス回転数, 送り, みぞ面積比をそれぞれ 3 水準に変化させるところの 3 要因 3 水準として表 1 (ハ) のように決定したが、これは、推定する実験式の適用範囲を、成形可能な範囲と加工機の出力を勘案し、実際の生産条件で採用しうると考えられる加工条件が、本実験範囲に含まれるように決定したものである。3 水準の選定にあたっては、以後、推定する数学モデルの中の対数変換される変数の 3 水準を等間隔に選ぶことが、数学モデルの係数推定などの統計解析が容易になるので、あらかじめ、決定された高水準, 低水準から後述

表1 実験条件

(イ) 使用ダイス			
材 質	SKD 4		
ダイス頂角 $2\alpha^\circ$	30, 45, 60,		
みぞ面積比Ar%	12.5, 25.0, 50.0,		
(ロ) 供試銅管 (リン脱酸銅管第1種硬質)			
成 分	Cu 99.94%, P 0.0125%		
硬 度	92 HR(F)		
寸 法	外径(Do)×肉厚(to)×長さ		
(mm)	19.05×(0.6,1.0,1.4,)×50		
(ハ) 加工条件(その1)と対数変換した変数の3水準			
	N <sub>D</sub> rpm	fw mm/rev	Ar %
低 水 準	1250 (−1)	0.1 (−1)	12.5 (−1)
中 水 準	2000 (0)	0.225 (0)	25.0 (0)
高 水 準	3200 (+1)	0.5 (+1)	50.0 (+1)

の(4)式にしたがって中水準を決定した。すなわち、3水準に対応する変数の値が-1, 0, +1になるように対数変換を行なった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加工要因と加工抵抗および所要動力の関係

三つの加工要因、すなわち、ダイス回転数 ( $N_D$  rpm)、管の送り (fw mm/rev)、みぞ面積比 ( $Ar$  %) の変化が、加工抵抗 (トルク  $T$ 、スラスト  $Th$ ) および所要動力に与える影響は、図1のようになり、各要因に対する加工抵抗、所要動力の増減の一般的傾向を知ることができる (平均トルク  $\bar{T}$ 、平均スラスト  $\bar{Th}$  は、トルク、スラストの変化と全く同じ傾向を示すので省略した)。ここで、これらの各要因の効果<sup>5)</sup>が、互いに独立<sup>5)</sup>であるのか、あるいは、各要因間で相互に関係しながら (交互作用をもちながら) 影響するのかを調べるため表2に示すような分散分析の結果、加工抵抗、所要動力の制御要因と考えた3要因は、いずれも有意<sup>5)</sup>でありトルク、スラストについては、各要因間に交互作用も認められない。また、それぞれの要因効果は<sup>5)</sup>、寄与率 $\rho$ により計算されるが、採用した実験条件の範囲で、トルク、スラストに最も大きく影響をおよぼすのは、管の送り  $fw$  であり、ついで、みぞ面積比  $Ar$ 、ダイス回転数  $N_D$  の順となる。

一方、所要動力  $L_k$  に対しては、管の送り  $fw$ 、ダ

表2 分散分析結果

(イ) トルク (kg cm) $2\alpha=30^\circ$ $K=0.5$ $t_o=1.4mm$					
要 因	S	$\phi$	V	F	$\rho$ (%)
A(fw mm/rev)	0.437	2	0.2186	156.1**	56.1
B( $N_D$ rpm)	0.140	2	0.0701	50.1**	17.7
C(Ar %)	0.171	2	0.0854	61.0**	21.7
A $\times$ B	0.009	4	0.0023	1.6	
A $\times$ C	0.009	4	0.0022		
B $\times$ C	0.000	4	0.000		
e	0.011	8	0.0014		
**有意水準99% *有意水準95%					
(ロ) スラスト (kg)					
要 因	S	$\phi$	V	F	$\rho$ (%)
A(fw mm/rev)	0.810	2	0.405	23.0**	41.0
B( $N_D$ rpm)	0.190	2	0.095	5.49*	8.1
C(Ar %)	0.476	2	0.238	13.75**	23.3
A $\times$ B	0.103	4	0.025	1.44	
A $\times$ C	0.081	4	0.020	1.16	
B $\times$ C	0.079	4	0.019	1.10	
e	0.146	8	0.0173		
(ハ) 所要動力 (kw)					
要 因	S	$\phi$	V	F	$\rho$ (%)
A(fw mm/rev)	0.360	2	0.180	300.0**	47.5
B( $N_D$ rpm)	0.243	2	0.122	203.3**	31.9
C(Ar %)	0.107	2	0.054	90.0**	13.7
A $\times$ B	0.018	4	0.005	8.3*	1.8
A $\times$ C	0.009	4	0.002	3.3	
B $\times$ C	0.004	4	0.001		
e	0.005	8	0.0006		

イス回転数  $N_D$ 、みぞ面積比  $Ar$  の順となり、管の送りとダイス回転数の間に交互作用が認められるが、その寄与率は1.8%と小さく、実験誤差内に入ると考えられると同時に、後述のように、所要動力に関する数学モデルを(5)式のように考えるので、ここでは無視する。そこで、一応、加力抵抗と各要因間の関係をつぎの(1)式で表示できるものとする。

$$f(x) = \xi N_D^c fw^\gamma Ar^\nu \quad (1)$$

$f(x)$  は  $T$ ,  $Th$ ,  $\bar{T}$ ,  $\bar{Th}$  を表す。

いまここで、推定した(1)式が妥当であるか否かは関数 $\xi$ 、および指数 $c$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ のt検定によって確

かめることにする。そのために、(1) 式を対数変換したモデル (2) に書きなおし、

$$\log f(x) = \log \xi + \zeta \log N_D + \eta \log fw + \nu \log Ar \quad (2)$$

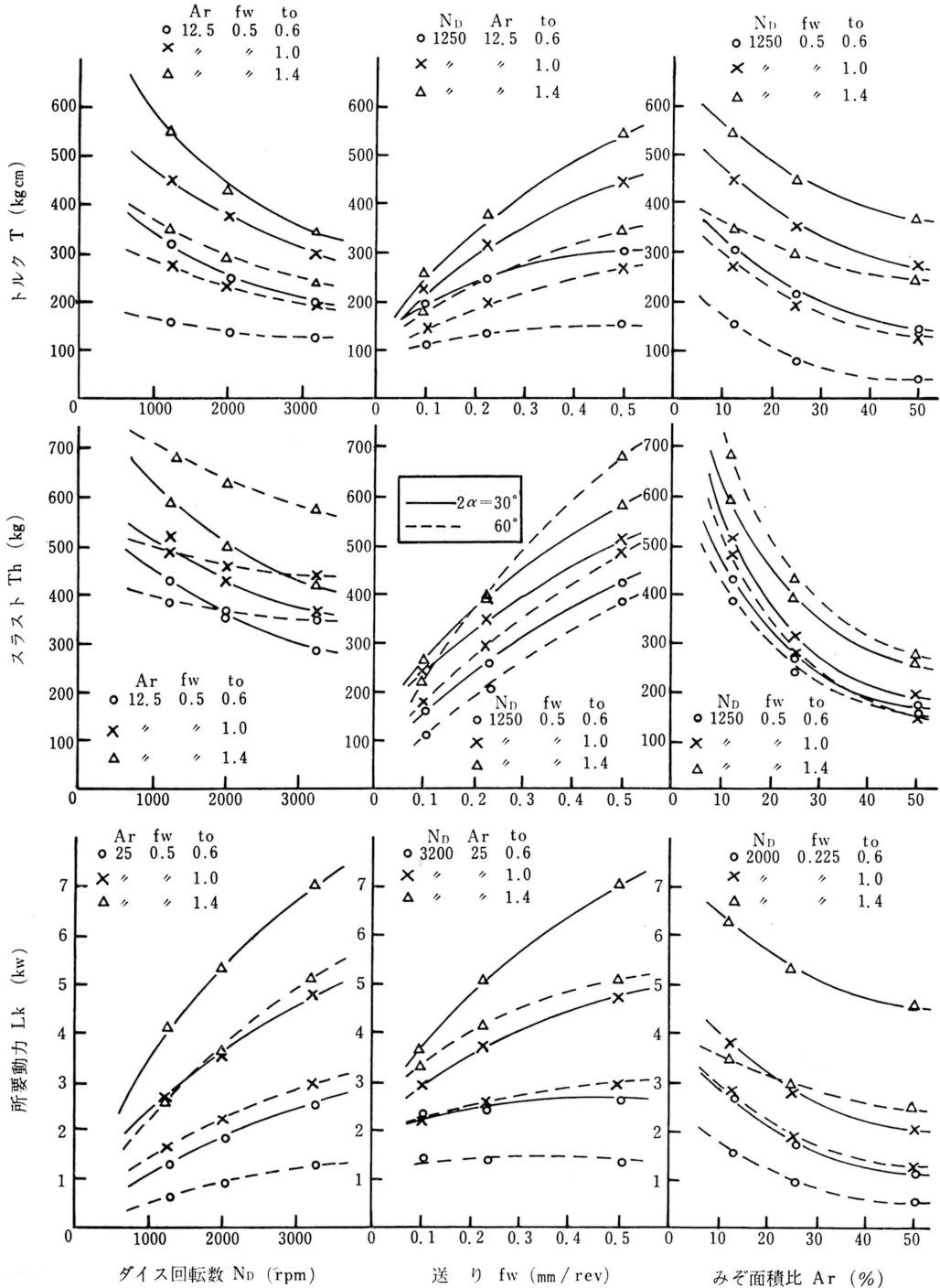


図1 加工条件と加工抵抗, 所要動力の関係 ( $Do: 19.05^\circ$ )

(2) 式をさらに, つぎの (3) 式に書きなおして

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

とし, これらの関数関係を一次方程式で近似し, 以後の実験解析に用いることにする. すなわち,  $y$  は, 加工抵抗, 変数  $x_1, x_2, x_3$  は, それぞれ後述の (4) 式によるダイス回転数  $N_D$ , 送り  $fw$ , およびみぞ面積比  $Ar$  の適当な対数変換された値に対応し,  $b_0, b_1, b_2, b_3$  は, (1) 式の係数  $\xi$ , および  $\zeta, \eta, \nu$  にそれぞれ対応することになる<sup>4)</sup>. この (3) 式を1次モデルと呼ぶことになる. この (3) 式の変数  $x_1, x_2, x_3$  は, 2でのべたように, 各係数推定の統計解析を容易にするため, 対数尺で表わされる3水準の間隔を等間隔にするべく (4) 式にて, それぞれ,  $-1, 0, +1$  にするように, 各要因間の水準を選ぶ.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\log N_D - \log 1250)}{\log 3200 - \log 1250} - 1 \\ x_2 &= \frac{2(\log fw - \log 0.1)}{\log 0.5 - \log 0.1} - 1 \\ x_3 &= \frac{2(\log Ar - \log 12.5)}{\log 50 - \log 12.5} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

つぎに, (3) 式の回帰係数は, 最小二乗法に基づいて推定することになり, 奥島ら<sup>4)</sup>の方法により推定した回帰係数を表3に示す. 本来, 推定された回帰係数は, 2次の数学モデルを設定して各要因間の効果が独立であるか, また, 交互作用の有無についての有意性の検定を行わなければならないが, 本項では, 表2により各要因の効果は独立しており, 各要因間に交

表 3 計算された回帰係数と判定結果

$2\alpha = 30^\circ$  19.05 $\phi$

	$t_0$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
T	0.6	2.141**	-0.092**	0.092**	-0.158**
	1.0	2.229**	-0.091**	0.153**	-0.110**
	1.4	2.389**	-0.100**	0.163**	-0.083**
Th	0.6	2.136**	-0.085**	0.208**	-0.200**
	1.0	2.251**	-0.078**	0.167**	-0.215**
	1.4	2.346**	-0.074**	0.174**	-0.173**
$\bar{T}$	0.6	1.888**	-0.044**	0.028**	-0.220**
	1.0	2.158**	-0.073**	0.144**	-0.117**
	1.4	2.282**	-0.088**	0.162**	-0.060**
$\bar{Th}$	0.6	1.940**	-0.048**	0.152**	-0.228**
	1.0	2.068**	-0.089**	0.164**	-0.172**
	1.4	2.226**	-0.049**	0.196**	-0.132**

\*\* 99% 有意

\* 95% 有意

互作用が認められなかったので, 1次モデルにより係数の推定を行なった. その結果を表3に示す. 推定した係数  $b_0, b_1, b_2, b_3$  は, いずれも99%有意となり本実験に関して (1) 式の妥当性が認められる. したがって, 本加工法において, 任意の絞り比において, 加工抵抗 (トルク, スラスト, 平均トルク, 平均スラスト) と加工要因の関係を (1) 式の形にて記述してもさしつかえないものと考えられる.

表 4 計算された指数および係数の例

$2\alpha = 30^\circ$  19.05 $\phi$

	$t_0$	$\xi \times 10^4$	$\zeta$ (Nd)	$\eta$ (fw)	$\nu$ (Ar)
T	0.6	3.418	-0.451	0.263	-0.524
	1.0	3.633	-0.444	0.439	-0.366
	1.4	5.039	-0.492	0.466	-0.277
Th	0.6	6.757	-0.417	0.596	-0.665
	1.0	6.545	-0.380	0.478	-0.714
	1.4	4.696	-0.364	0.497	-0.574
$\bar{T}$	0.6	0.472	-0.216	0.079	-0.731
	1.0	1.395	-0.356	0.413	-0.389
	1.4	1.922	-0.430	0.464	-0.201
$\bar{Th}$	0.6	1.151	-0.237	0.434	-0.756
	1.0	4.080	-0.436	0.470	-0.570
	1.4	0.976	-0.238	0.562	-0.437

表4に, 表3の各係数より計算された (1) 式の係数  $\xi$ , 指数  $\zeta, \eta, \nu$  の数値例を示す. この指数  $\zeta, \eta, \nu$  が加工抵抗評価の指標となる. たとえば,  $T, \bar{T}, Th, \bar{Th}$  に対して, 管厚  $t_0$  のうすいときは,  $\nu$  の値が大きく, みぞ面積比 ( $Ar$ ) の変化の影響が大きく,  $t_0$  が厚くなると  $\nu$  は小さくなり,  $Ar$  を変化させる影響の度合いが小さくなることを示している (表3の寄与率からも明らかである). また,  $\zeta, \eta$  の値の変化により, 各管厚  $t_0$  における, ダイス回転数  $N_D$ , 送り  $fw$  の変化の影響をかうがい知ることが可能となる. すなわち,  $T, \bar{T}$  に対しては, 管厚増加につれ  $\zeta, \eta$  の値は大きくなり,  $Th, \bar{Th}$  に対しては, 逆に小さくなる. すなわち, 管厚の厚いほど,  $T, \bar{T}$  に対しては,  $N_D, fw$  を変化させる影響が大きく,  $Th, \bar{Th}$  に対しては, 逆に, 管厚のうすいほど  $N_D, fw$  を変化させる影響が大きいことがわかる.

一方, 所要動力については, 平均トルク, 平均スラスト  $\bar{T}_h$  が求めれば, つぎの (5) 式より計算できる

が、

$$L_k = \frac{1}{102} \left( \frac{2\pi N_D \bar{T}}{60 \times 100} + \frac{N_D \cdot fw \cdot \bar{T}_h}{60 \times 1000} \right) (KW) \quad (5)$$

( ) 内の第2項は、第1項にくらべて小さく無視しても大差ないと考えられるので、<sup>註1)</sup>

$$L_k = 1.03 N_D \bar{T} \times 10^{-5} (KW) \quad (6)$$

としてよい。(6)式に、 $\bar{T} = \xi N_D^\zeta fw^\eta Ar^\nu$  を代入し

$$L_k = 1.03 \xi N_D^{1+\zeta} fw^\eta Ar^\nu \times 10^{-5} (KW) \quad (7)$$

がえられる。本実験では、 $-1 < \zeta < 0$  であるため、 $1 + \zeta > 0$  であり、また、 $\eta > 0$ 、 $\nu > 0$  なるため、所要動力は、ダイス回転数  $N_D$  送り  $fw$  の増加とともに大きくなり、みぞ面積比  $Ar$  の増加につれて小さく

なることを示す。

図2、図3に、(1)、(7)式より計算された、トルク、スラスト、および所要動力と、ダイス回転数、管の送り、みぞ面積比の関係の1例を示す。

図4は、(1)式および(7)式により計算されたトルク、スラストおよび所要動力の計算値と、実測値の比較を示したもので、その誤差は、ほとんどが10%以内に入り、たまに、12~14%のバラツキのものもでてくるが、本実験のバラツキの母標準偏差が95%信頼限界に対して約2~8%の間にあることを考えれば、(1)、(7)式のバラツキの程度はよい方にあるといえる。したがって、本加工法の加工抵抗、所要動力の実験式として、(1)、(7)式は充分適用できると考えられる。

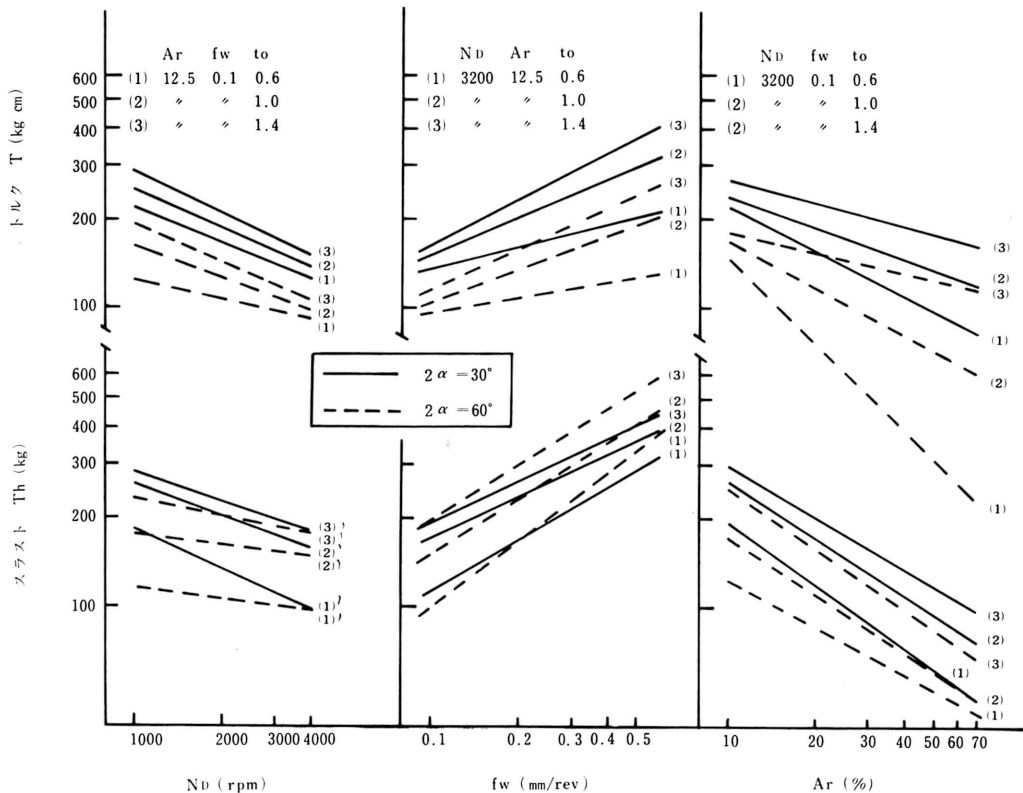


図2 加工条件とトルク、スラストの関係 (K=0.5)

註1 ( ) 内の第1項と第3項の比は、 $(fw \bar{T}_h / 2\pi \bar{T} \times 10)$  となり、図2からもわかるように  $T$  と  $Th$  のオーダーはほぼ等しいので、この比は、 $fw / (2\pi \times 10)$  と考えてよく本実験で採用した最大送り  $fw = 0.5 \text{ mm/rev}$  をとって、第2項は、せいぜい1%以下で、無視してもかまわないと考えられる。

#### 4. 結 論

従来、全くの経験的基礎にもとづいて、実用化がはかられてきた管端スピニング加工法における、加工条件と加工抵抗、所要動力の関係について、旋盤を利用する定速加工の場合における実験式を実験計画法の応用により推定し定量化ができ、今後の油圧式実用機設計の基礎資料とすることができた。

得られた主な結果はつぎのとおりである。

- 1) 同一管径、管厚に対しては、加工抵抗を制御する要因としては、ダイス回転数  $N_D$  rpm、管の送り  $fw$  mm/rev、ダイスに設けるみぞの面積比  $Ar$  %があげられ、加工抵抗、所要動力と、これら各加工要因との関係をつぎの形の式で記述できる。

加工抵抗に対して

$$f(x) = \xi N_D^{\frac{1}{2}} fw^{\frac{1}{2}} Ar^{\frac{1}{2}}$$

ここで  $f(x)$  は、 $T$ ,  $\bar{T}$ ,  $T_h$ ,  $\bar{T}_h$  を表わす。

所要動力に対して

$$L_k = 1.03 \xi N_D^{\frac{1}{2}} fw^{\frac{1}{2}} Ar^{\frac{1}{2}} \times 10^{-5} (KW)$$

- 2) 加工抵抗は、ダイス回転数、みぞ面積比の増加につれて小さくなり、送りの増加につれて大きくなる。
- 3) 所要動力は、ダイス回転数、送りの増加につれて大きくなり、みぞ面積比の増加につれて小さくなる。
- 4) 採用した加工要因のうちで、加工抵抗に関しては、管の送りが最も大きく影響し、ついで、みぞ面積比、ダイス回転数の順となり、所要動力に関しては、送り、ダイス回転数、みぞ面積比の順となる。

#### 文 献

- 1) 岡村・田中：管端スピニング加工に関する研究（第1報）加工性に関する基礎的研究，第8号（昭42），19。
- 2) 岡村・田中：管端スピニング加工に関する研究（第2報）加工部の組織変化について，第8号（昭42），27。
- 3) 岡村・田中・中西：管端スピニング加工に関する

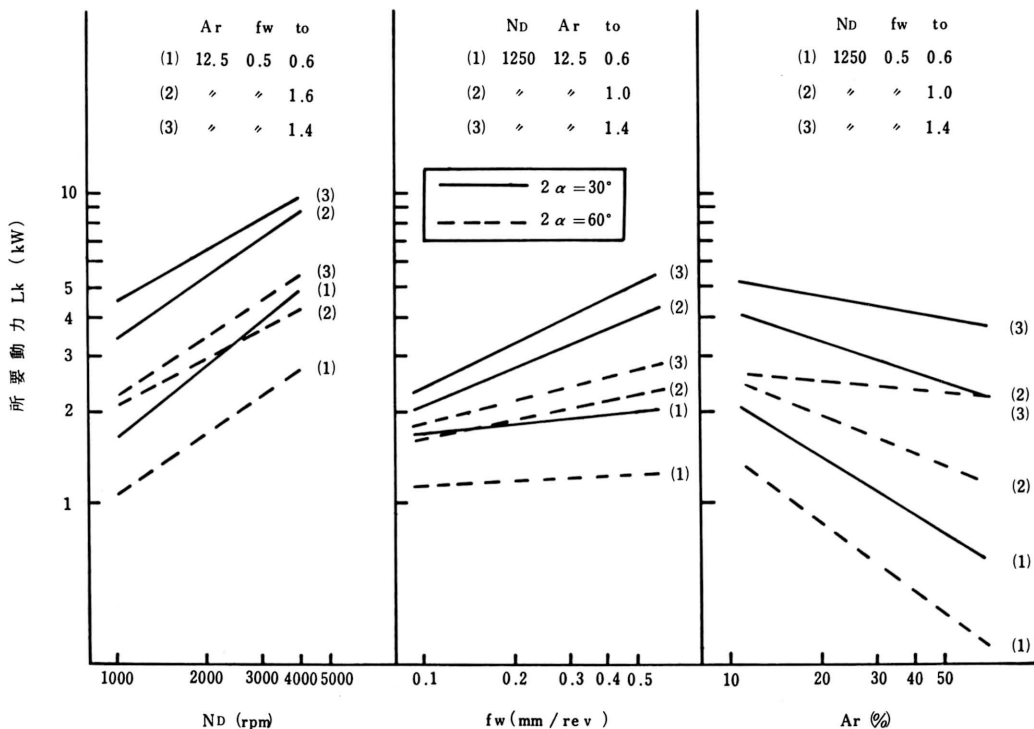


図3 加工条件と所要動力の関係 ( $K=0.5$ )

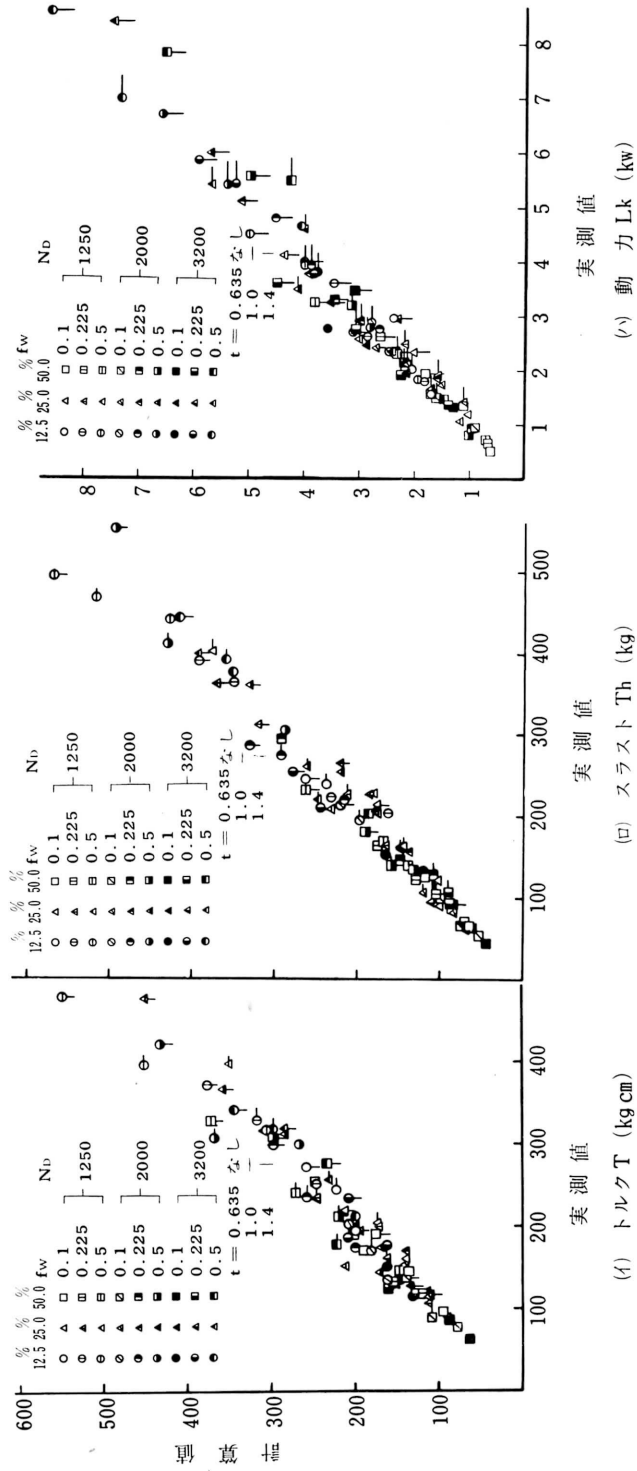


図4 計算値と実測値の比較（トルク，スラスト，動力） $K=0.5$   $2\alpha=30^\circ$

- 研究 (第3報) ダイスに設けた溝の有意性について, 第9号 (昭43), 9.
- 4) 奥島ほか2名: 被削性試験における実験計画法の応用, 日本機械学会論文集33巻255号 (昭42-11), 1869.
- 5) 例えば田口: 新版実験計画法 (上・下), 丸善, 1962.
-