

精密冷間可逆圧延機による銅テープ試作実験

— 極薄テープの圧延とその厚み精度について —

古川 孟・河本 恭爾

1. 緒言

本圧延機は多層撚同軸ケーブルに使用される極薄、超精密銅テープ中心導体を試作製造する目的で開発されたものである。多層撚ケーブルは、内部導体として、0.02～0.07 mm 厚、精度 $\pm 5\%$ (最終的には $\pm 2\%$) の非常に薄くて精度の高い銅テープを多層に重ねて撚り、高周波領域での表皮効果による抵抗損失を低減し、従来の同軸ケーブルよりも一段とすぐれた特性を有する広帯域伝送を目的とするケーブルである。この銅テープは厚さ精度はいうにおよばず、機械的、電気的特性も相当良好なものが要求される。本圧延機の最終の目的は、要求に合致した厚さ精度、および機械的・電気的性能をもつテープを製造することであるが、今回そのための試作予備実験を行ない、銅テープを試作した。ここでは予備実験より得られた種々の圧延特性、および試作したテープに関して、特に厚さ精度を中心に、報告する。圧延特性としては、一定のパス・スケジュールにしたがって、圧下力・塑性変形抵抗・圧延速度ならびに張力のテープ厚さ変動に及ぼす影響を調べた。また、試作テープの肉厚を測定した結果、本圧延機によれば、テープの肉厚公差 $\pm 2 \sim \pm 5\%$ 以内で、所要の非常に薄いテープを圧延できることが確かめられた。

2. 圧延実験

(1) 実験方法

多層撚ケーブル用内部導体試作のための予備実験として一定のパス・スケジュールにしたがって、圧下力を測定し、Stone の薄テープ圧延理論から2次元降伏応力を求めた。また各パスごとに、圧延速度、張力を変化して、それらが出口の厚さ変動に及ぼす影響を調べた。

実験に供した粗材は、厚さ 0.3 ± 0.01 mm、幅 30 mm の半軟銅テープで、抗張力 $22 \sim 25$ kg/mm²、伸び $12 \sim 15\%$ (標点距離 100 mm、引張速度 60 mm/min) であった。実験のパス・スケジュールを第1表に示すが、これは、圧下力を各パスでできるかぎり均一になるよう選んだものである。実験は、1本の材料を順次圧下して行なった。各パスに供する粗材は前工程のものであるが、前工程で実験に供したものはすべて磨却し、次工程には一定の条件下で圧延したテープを使って、前工程の実験の影響を除く配慮をした。使用したワーク・ロールはSK-2 炭素工具鋼ロール、表面あらさ $1 \sim 2S$ である。圧延油は #60 スピンドル油、流量は 12 l/min とした。圧延速度の変化範囲は、12, 18, 24 m/min の3種、前・後方張力は計画値の 50, 80, 100, 120, (150)% に変化させた。張力値には圧延可能最低限界、機械の仕様

第1表 圧延スケジュール

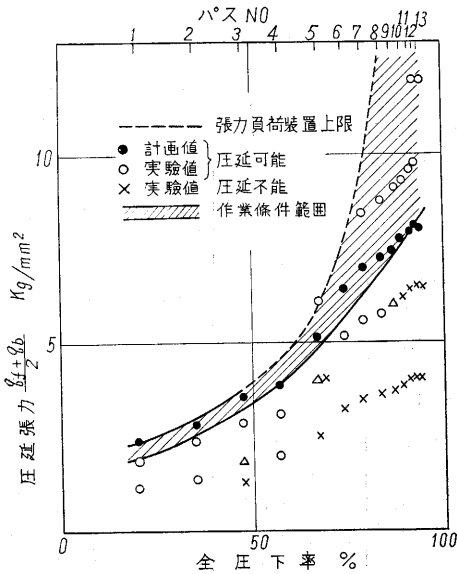
パス No.	全圧下率 (%)	入口厚さ (mm)	出口厚さ (mm)	1パス圧下率 (%)	後方張力		前方張力		q_f/q_b (%)
					q_b (kg/mm ²)	Q_b (kg)	q_f (kg/mm ²)	Q_f (kg)	
1	(20.1)	0.30 (0.298)	0.24 (0.238)	20 (20.1)	2.2	20	2.5	18	113
2	(34.9)	0.24 (0.238)	0.20 (0.196)	16.7 (17.6)	2.5	20	3.0	18	120
3	(47.5)	0.20 (0.196)	0.16 (0.158)	20 (19.4)	3.3	20	3.7	18	112
4	(57.1)	0.16 (0.158)	0.13 (0.127)	18.7 (19.6)	3.7	18	4.1	16	111
5	(67.6)	0.13 (0.127)	0.10 (0.097)	23.1 (23.6)	4.6	18	4.1	16	115
6	(73.7)	0.10 (0.097)	0.08 (0.079)	20 (18.6)	6.0	18	6.7	16	112
7	(79.0)	0.08 (0.079)	0.065 (0.064)	18.8 (19.0)	6.7	16	7.2	14	107
8	(83.6)	0.065 (0.065)	0.050 (0.049)	23.1 (24.6)	7.2	14	7.3	11	102
9	(86.6)	0.050 (0.049)	0.040 (0.040)	20 (18.4)	7.3	11	7.5	9	103
10	(89.3)	0.040 (0.040)	0.032 (0.0315)	20 (21.2)	7.5	9	7.8	7.5	104
11	(91.3)	0.032 (0.0315)	0.027 (0.0265)	15.6 (16.0)	7.8	7.5	8.0	6.5	103
12	(92.3)	0.027 (0.0265)	0.023 (0.023)	14.8 (13.2)	8.0	6.5	8.0	5.5	100
13	(93.3)	0.023 (0.023)	0.020 (0.020)	13.0 (13.0)	8.0	5.5	8.0	4.8	100

・ () 内は実験の際の平均値
 ・ 中間焼鈍なし

で定まる上限があるので、実験は各パス大略 3 種の張力値について、行なった。前方 (q_f) と後方張力 (q_b) の応力値の比 q_f/q_b は、100~120% ではほぼ 100% に近いものとし、実験に適用した圧延張力の応力値は 1.1~9.6 kg/mm² であった。

(2) 圧延可能な張力範囲

ワーク・ロールの径が小さいため、圧延テープとロールとの接触弧長が短く、またロールと材料の摩擦係数が小さいために、ある程度の圧延張力をかけないと、普通の 4 段ロールで十分圧延できるような形状外観のテープでも、材料がロールの幅方向にさまよい、また幅中心に集中しようとする傾向が大きくなり現われ切断、絞り込みが起りやすくなる。一方後方張力に比べて、前方張力が比較的少ないと、中立点がロール出口側に寄ってテープがロールに噛み込みにくく、滑りが生じやすくなる。この状態で摩擦係数が増加すると中立点が出口、入口側を周期的に移動しやすい傾向を生じ、圧延スタンドの弾性振動と影響し合って「チャタリング(騒音現象)」を生ずる。このため俗に「ヘリング・ボーン」と呼ばれるテープ表面の模様が見られることはよく知られているところである。第 1 表の圧下スケジュールの場合、実験によると、ある張力値以下では、テープに片のびが生じやすく(第 1 図△記号)、さらには圧延不可能になった。テープ



第 1 図 圧延張力適用範囲

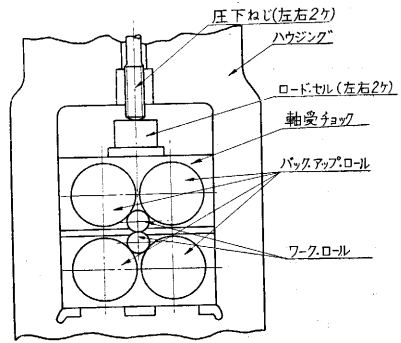
が薄くなるにしたがい、引張応力を大きくする必要がある。前方と後方の応力値の比は 100~120% で、前方張力を相当程度かけたので、特に薄いテープ圧延の際に起りやすいテープ幅両端のフリルはなくすることができた。第 1 図は縦軸に前・後方張力の平均、横軸に全圧下率をとってある。

圧延張力が小さいと圧延自体が不安定になる。第 1 図

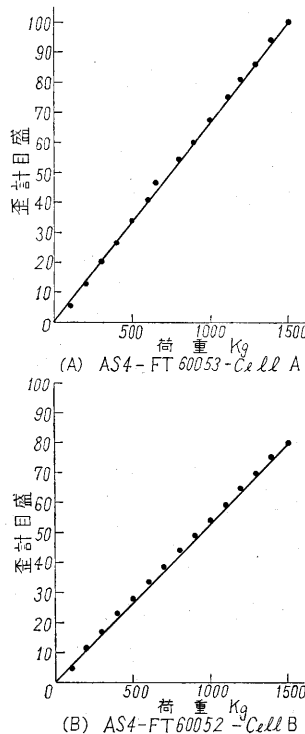
には圧延作業上適切な範囲を、機械仕様を考慮に入れて示した。また第 5 パスの場合のように、1 パス圧下率が大きであると、圧下率が小なる場合よりも、ヘリング・ボーン、フリルが現われやすく張力を大にする必要があった。

(3) 圧下力の測定

圧下力は、バック・アップ・ロール軸受ショックと圧下ねじの間に挿入したロード・セル(ストレインゲージ 120Ω を 4 ゲージ法に組んだもの)発信器により、新興通信製 AS4-FT、約 300×10⁻⁶ フル・スケール指示計に指示させた。第 2 図にロード・セルの位置、第 3 図に



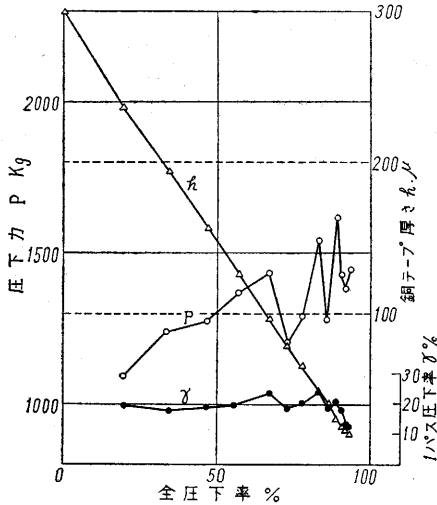
第 2 図 ロード・セル装着位置



第 3 図 ロード・セル指示計較正曲線

指示計の較正結果、第 4 図に圧下力の測定結果を示す。1 パス圧下率の圧下力に及ぼす影響は、全圧下率が大きなるほど大きく、圧下力は圧下率とともに増減している。なおこの図は、1 パスの張力、速度を変化した場合のデータにつき全平均をとってプロットしたものである。圧延は、中間で軟化焼鈍することなく行なった。また Stone の最小圧延厚の式からすると、圧延可能限界は 17.5μ になるが、圧延実験の結果、17.5μ 以下に圧下することも可能で、最終 12μ まで圧下した。この時、15~12μ 厚の肉厚では、1 パス

1.0~0.5μ 圧下して圧下力は約 2,900 kg にも達した。



第4図 圧下力測定結果

したがって、SK-2 炭素工具鋼ロールを用いて圧延可能な限界は、肉厚 12μ程度であるといえる。

(4) 平均圧延圧力・2次元降伏応力

圧延理論には、材料の不均一変形を考慮したものもあるが、ロール接触弧長がテープ厚の3倍以上で、テープ厚がワーク・ロール径の1~2%以下、テープ厚に比してテープ幅が50~100倍ある場合は、一般に圧延による圧縮は、均一に行なわれ、2次元の平面歪として考えてほとんど誤差はないといわれている。Stoneは、このような場合、ロールの扁平化を考慮すると一定肉厚の塑性材料板の、2枚の平行平板(ロール)による2次元圧縮変形と近似的にみなすことができるとして、Nadai, von Karmanの2次元剪断降伏応力と圧縮変形抵抗との関係、Hitchcockのロール扁平化の式を用いて、平均圧延圧力 p_m を導いている。今、 P : 圧下力 kg, P' : テープ単位幅当たり圧下力 kg/mm, $Q_f \cdot Q_b$: 前方・後方張力 kg, $q_f \cdot q_b$: 引張応力 kg/mm², μ : ロールと材料間の摩擦係数, γ : 圧下率 %, v : 圧延速度 m/min, b : 圧延材料幅 mm, S_0 : 2次元降伏応力(均一変形抵抗) kg/mm², S_m : 入口厚さ h_1 と出口厚さ h_2 の平均値に対応する降伏応力 kg/mm², $L \cdot L'$: ロール扁平化前、後の接触弧長 mm, S : 2次元拘束変形抵抗 kg/mm² とすると、平均圧延圧力 p_m kg/mm² は、

$$p_m = (S - q'), \frac{\mu L'}{h} - 1 = (S - q') \times PMF, \text{ kg/mm} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P = p_m \cdot b \cdot L', \text{ kg}, \quad P' = p_m \cdot L' = \frac{P}{b}, \text{ kg/mm} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left(\frac{\mu L'}{h}\right)^2 = \left(e^{\frac{\mu L'}{h}} - 1\right) \cdot 2a \cdot \frac{\mu}{h} \cdot (S - q') + \left(\frac{\mu L'}{h}\right)^2 \quad (3)$$

ここに、

$$a = \frac{8(1 - \nu^2)R}{\pi E}, \quad q' = \frac{q_f + q_b}{2}, \quad S = 1,155 S_m,$$

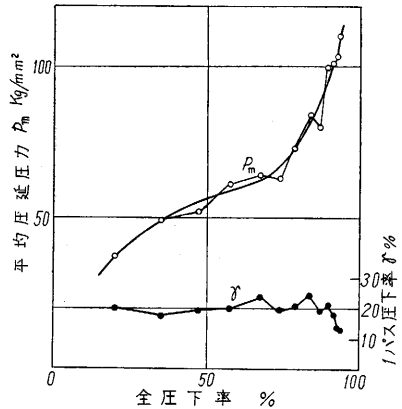
$$L = \sqrt{R(h_1 - h_2)}, \quad h = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

PMF: 圧力増倍係数

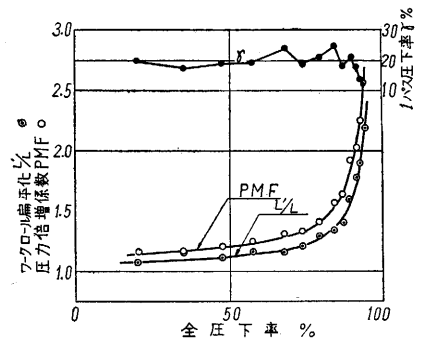
ν : ワーク・ロールのポアソン比

E : " の弾性係数 kg/mm²

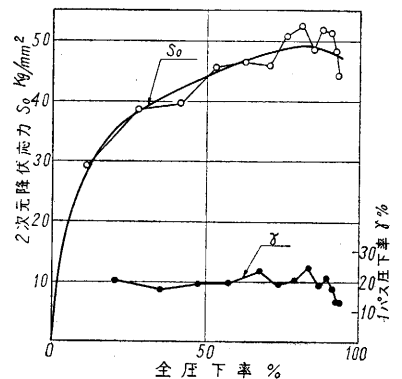
である。これらの式から、変形抵抗 S の変化が PMF, L' にまで影響を及ぼすことが明らかである。実験結果から p_m , S_0 を算出する際は、種々の $S - q'$ について P' をあらかじめ Stone の式によって計算し、その結果



第5図 平均圧延圧力曲線



第6図 圧力増倍係数、ワーク・ロールの扁平化



第7図 塑性変形抵抗曲線

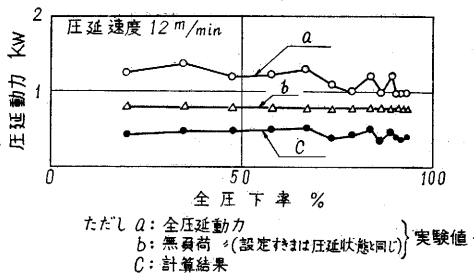
を用いて実験から得た P' に対応する $S-q'$ を逆に決めて、それに対する PMF, L' を求め、 p_m を算出した。なお、 $S-q'$ から S_0 を求めるには各パスにおけるすべての圧延実験の P', q' に関する平均値を用いた。第 5 図に以上のようにして求めた平均圧延圧力 p_m 、第 6 図にロールの扁平化をあらわす量 L'/L 、圧力増倍係数 PMF を、第 7 図に 2 次元降伏応力 S_0 を示す。

もちろん、実験の際の圧延条件は前述の均一変形圧延理論の条件をすべて満足するものであることはいうまでもない。

第 5~7 図いずれの場合についても、各パスの 1 パス圧下率が異なるので正確に変形抵抗などを議論することはできない。 S_0 は圧延材料の不変形領域を考えなければ、理論的には 1 パス圧下率の影響は受けないはずである。ところが第 7 図では明らかに S_0 自身も圧下率の影響を受けている。このことは、ロールとテープ間の摩擦にもとづく不均一変形、すなわち 1 パス圧下率により、ロール面間で変形を拘束されている不変形拘束領域の上下の距離が変化し、この距離が小さくなるほど変形抵抗は増大することが圧縮試験から知られているが、この影響がかなり存在することを示すものである。いずれにしても、 $P_m, L'/L, PMF, S_0$ はすべて 1 パス圧下率の影響を受けているが、銅テープ薄板圧延の大略の傾向は、この実験結果から十分把握できる。ただし、以上の Stone の式による計算ではワーク・ロールの弾性係数 $E=20.3 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ 、ロールと材料間の摩擦係数 $\mu=0.08$ とした。

(5) 圧延に要する動力

ミル・モータ (5.5 kW) の消費動力を YEW 製ワット・メータにて測定した結果を第 8 図 (a) に示す。(b) は設定すきまを圧延状態と同じにして圧延しない場合の無負荷動力を測定したもの、(c) は Stone の式にもとづいて計算した結果である。



第 8 図 圧 延 動 力

すなわち、

$$\text{圧延トルク } T_m = b \cdot R \cdot \{ p_m (h_1 - h_2) - (q_f h_2 - q_b h_1) \}, \text{ kg-mm} \dots (4)$$

R : ワーク・ロール半径 mm

$$\text{純圧延動力 } IP_{roll} = \frac{T_m \cdot v}{75 \times 60 \times R}, \text{ HP} \dots (5)$$

v : 圧延速度 m/min

バック・アップ・ロール軸受での損失動力 IP_{brg}

$$IP_{brg} = \frac{2\mu_{br} \cdot p \cdot v}{75 \times 60 \times \cos \alpha} \left(\frac{D_{br}}{D} \right), \text{ HP} \dots (6)$$

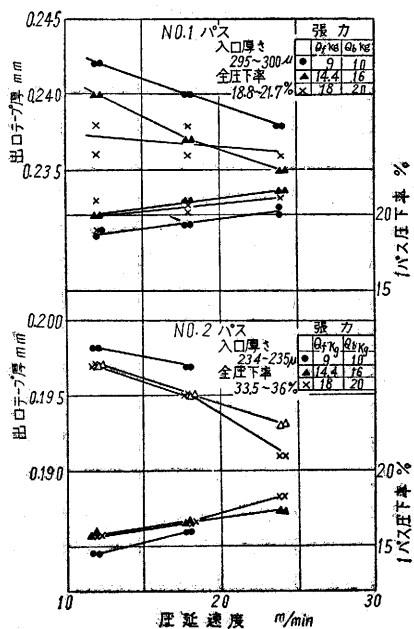
α : バック・アップ・ロールの荷重角

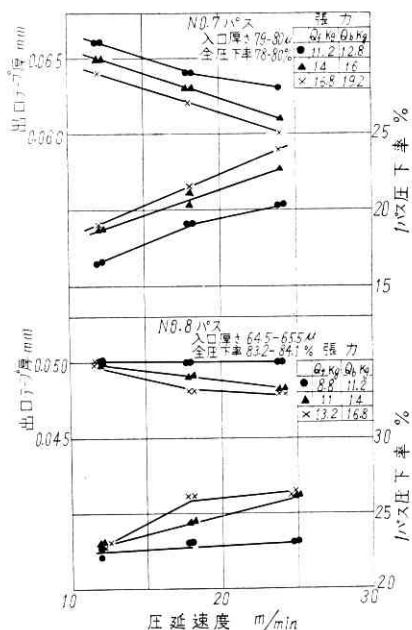
μ_{br} : 軸受の摩擦係数 (0.06 と仮定)

上記 (4) (5) (6) 式にもとづいて、12 m/min の場合を計算したものである。第 8 図 (c) には、Hertz の公式を用いてワーク・ロールとバック・アップ・ロールの接触圧力による損失動力 (約 0.01 kW) を計算した結果も加算してある。減速機、モータの効率を考えると、実験値と計算値は定性、量的によく一致するといえる。したがって第 8 図は圧延機の設計上有効な資料となるものと考えられる。計算によると純圧延動力は 0.14~0.03 kW、軸受摩擦損失動力は 0.3~0.4 kW で、純圧延動力の占める割合は No. 1 パスで 47%、No. 13 パスで 6% と順次減少している。また圧延速度 24 m/min の場合も実測の結果は 2 kW を越えることはなかった。いずれにしても、第 1 表のパススケジュールにしたがえば、圧延機の動力限界を越えることなく圧延が可能である。

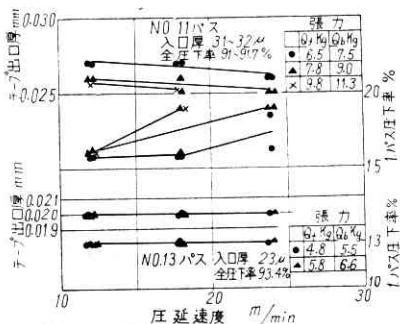
(6) 圧延速度の肉厚に及ぼす影響

冷間圧延では、圧延速度が変化するとロールすきまにおける摩擦条件が変わり、圧延速度の増加とともに変形抵抗が増加する傾向をも打ち消して、圧下力が減少する場合もあるが、歪速度 3 in/in/sec 以上であればほとんど圧下力は影響されないといわれている。われわれの実験では、平均歪速度は、肉厚の厚い場合 49~98 mm/mm/sec、薄い場合 60~120 mm/mm/sec ($\Delta h / \frac{h_1 + h_2}{2}$) を、ロー





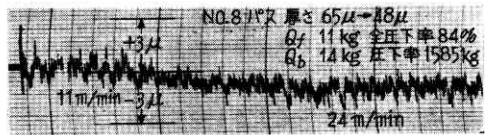
第 10 図 圧延速度の影響



第 11 図 圧延速度の影響

ル接触弧長 L' を材料が通過する時間で除したもので、後出の第 13~15 図からも判るように、圧延速度による圧下力の変化はほとんど認められなかった。第 9~11 図は、入口厚さの比較的バラツキの少ない圧延パスで、しかも、全圧下工程の最初・中間・終わりのものについて圧延速度のテープ出口厚さ、圧下率に及ぼす影響を示したものである。前述のように圧下力は圧延速度によりほとんど変化しないにもかかわらず、テープ出口厚さは圧延速度の増加とともに減少し、圧下率は増加する傾向が明瞭に認められる。これは、圧下力が一定の場合、圧延速度が増加すると、(1)ロール接触部の摩擦係数が減少する、(2)ロールすきまの圧下力に対応するくさび型油膜厚が増す。(3)バック・アップ・ロール軸受油膜厚が増加する、などの原因によるものと考えられる。このデータからみると、圧延速度が 2 倍 (100% 増加) になっても肉厚の減少は約 2~6% 程度であり、肉厚精度 $\pm 2 \sim \pm 5\%$ のテープを得るには圧延速度の設定値に対する

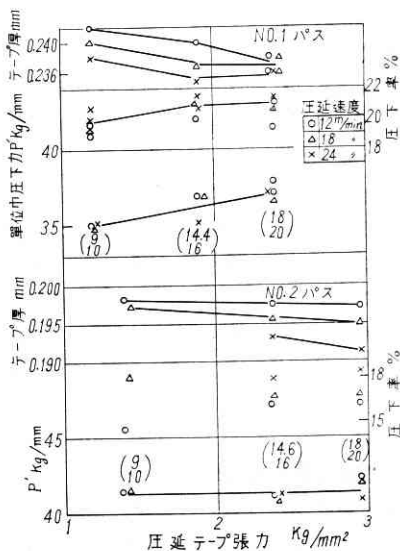
精度 $\pm 5\%$ は十分なものであるといえる。第 12 図は、圧延速度の増加による肉厚の変動状態を非接触型電磁厚み計で測定、ペン書きオシロに記録したもので、第 10 図 No. 8 パス、張力値 $Q_f=11 \text{ kg}$ 、 $Q_b=14 \text{ kg}$ の場合を示したものである。



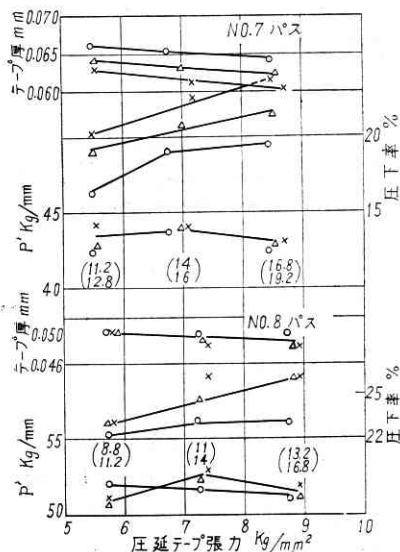
第 12 図 圧延速度の変化による肉厚の変動

(7) 圧延張力の肉厚に及ぼす影響

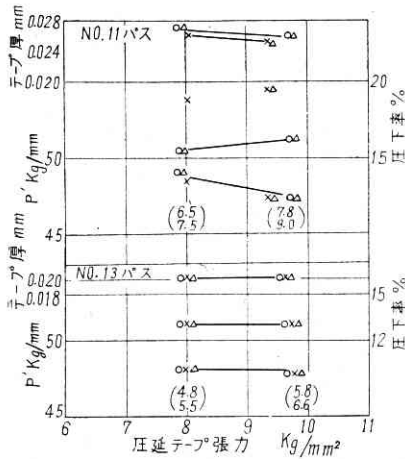
一般に圧延材料に加える張力を増加すると、圧延材料のロール分離力が減少し、この場合ロールすきまを一定



第 13 図 圧延張力の影響



第 14 図 圧延張力の影響



第 15 図 圧延張力の影響

に保つと圧延後の肉厚は減少する。われわれは、極薄肉銅テープの圧延で張力が肉厚にいかほどの影響をもつか実験的に調べた。第 13~15 図に、横軸に圧延テープ張力として前方・後方張力の応力値の平均 $\frac{Q_f + Q_b}{2}$ kg/mm² をとり、縦軸に圧延テープ出口厚、圧下率、テープ単位幅当たりの圧下力 P' kg/mm をとって、実験結果を示した。図中 () を施した数値は、各パスでの平均張力応力値に対応するテープ張力を示したもので、上が前方張力 Q_f kg、下が後方張力 Q_b kg である。圧延張力の肉厚変動に及ぼす影響は明瞭に認められ、張力の設定値に対する変化 $\pm 20\%$ で、肉厚は約 $\pm 0.4 \sim \pm 3.5\%$ 変化する。もちろんテープ肉厚が薄くなるにしたがって、張力による肉厚変動割合は大きくなっている。しかし No. 11 パス 20μ の場合、全然張力の影響が現われていない原因は不明で、なお今後の検討を要する。また、

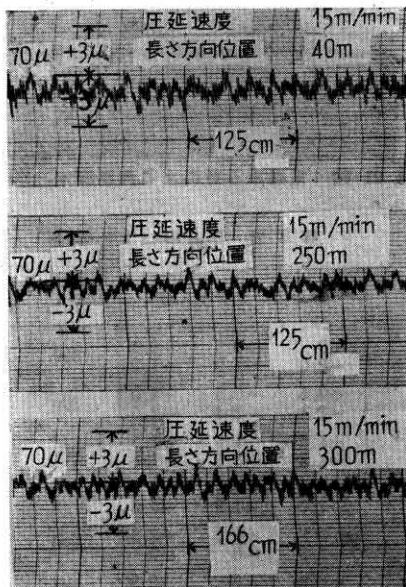
図から、圧下力は張力変化によっても、ほとんど変化しないといえる。以上のことから、精密圧延機の張力定値制御系の制御精度が $\pm 5\%$ 以内であることを考慮すると、張力変動による厚み偏差は考慮する必要はない。しかしながら、この事実を逆の立場から考えると、もし、圧延速度の変化、およびその他の圧延条件の変化によって、肉厚がごく僅か設定値より外れることが起こった場合、肉厚偏差信号をフィード・バックして、圧延張力の設定値を、圧延張力と肉厚の変化割合の関係に応じて変化せしめることによって、肉厚偏差を零にするよう修正することができることがわかる。実験データからわかるように、張力をその設定値から $\pm 20\%$ 変化することにより、大略 $\pm 1\mu$ の肉厚変動を修正することができる。これは、非常に薄いテープの肉厚微小調整の手段として有効な武器となるもので、本精密圧延機にもこの肉厚制御方式が採用されている。

3. 試作銅テープの厚み精度

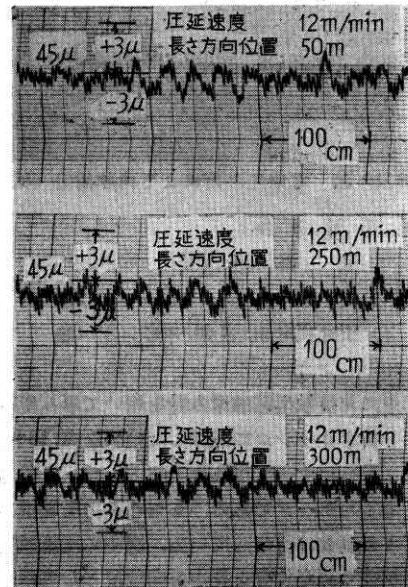
3 項で行なった予備実験により、多層燃内部導体として要求される肉厚精度をもつ極薄銅テープは、十分本圧延機を使用して圧延可能なことが判明した。また圧延条件も明らかになった。ここでは、第 1 表の圧延スケジュール (ほぼ妥当なスケジュールであることが 2 項で証明された) にしたがって、6 種のテープを中間焼鈍なしに 0.3 mm から圧延して、試作したのでその結果を報告する。銅テープ寸度、および圧延条件は、

(1) 銅テープ寸度;

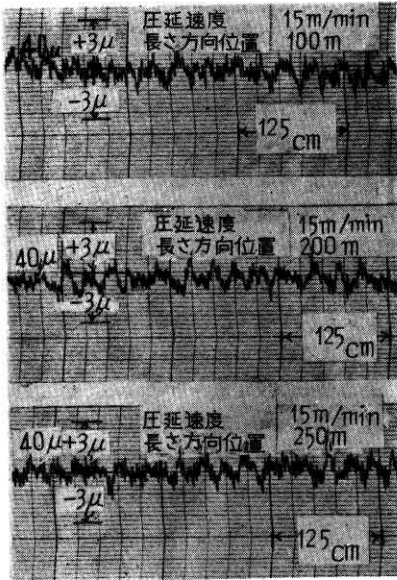
- 厚 さ : 70, 40, 30 μ , 幅 30 mm
- " : 45, 25, 20 μ , 幅 30 mm
- 圧延単長 : 250~350 m



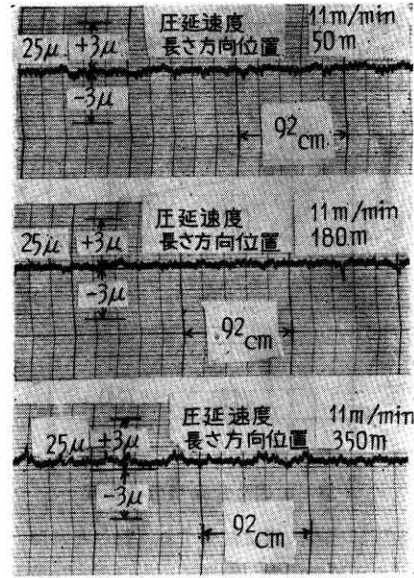
第 16 図 電磁圧み計による肉厚測定 (70 μ)



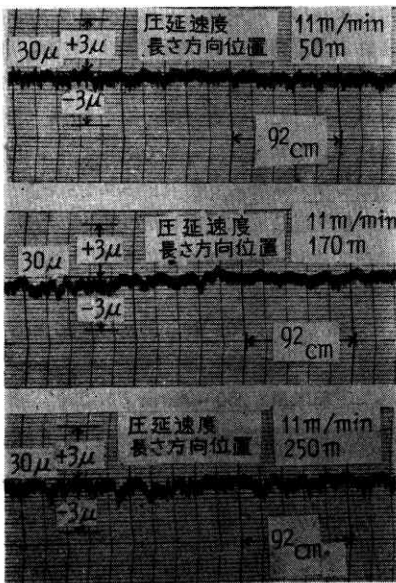
第 17 図 電磁圧み計による肉厚測定 (45 μ)



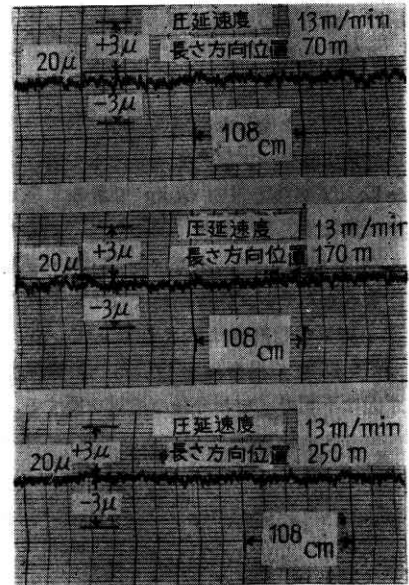
第 18 図 電磁圧み計による肉厚測定 (40 μ)



第 20 図 電磁厚み計による肉厚測定 (25 μ)



第 19 図 電磁圧み計による肉厚測定 (30 μ)



第 21 図 電磁厚み計による肉厚測定 (20 μ)

(2) 圧延条件;

室温: 24±2°C

ワーク・ロール: SK-2 炭素工具鋼

圧延潤滑油: #60 スピンドル油

である。

圧延中に非接触型電磁厚み計を用いて厚み変動を連続的にペン書きオシロに記録した結果を第 16~21 図に示す。これらはすべて厚みフィード・バック張力制御なしで圧延したデータである。もちろん、圧延張力の設定値に対する制御は行なっている。図中に圧延速度および圧延開始後の測定位置を長さ方向位置として示した。この図から読みとれる厚み精度は第 2 表のとおりである。

第 2 表 厚さのパラツキ

基準厚さ (μ)	厚みのバラツキ (μ)			単長 (m)	最大最小偏差 (μ)
70	+0	+0.5	+0.5	300	+0.5
	-2.0	-1.3	-1.2		-2.0
45	+0.5	+0.5	+1.0	300	+1.0
	-2.4	-2.4	-1.5		-2.4
40	+1.5	+1.0	+1.5	250	+1.5
	-1.5	-1.3	-1.3		-1.5
30	+0.3	+0.4	+0	250	+0.4
	-1.0	-1.3	-1.3		-1.3
25	+0.5	+0.5	+0.8	390	+0.8
	-0.5	-0	-0		-0.5
20	+0.2	+0	+0.3	250	+0.3
	-1.0	-0.8	-0.5		-1.0

多層燃同軸ケーブルとして要求される銅テープの性能は、肉厚精度が厚さの $\pm 5\%$ 以内（最終目標としては $\pm 2\%$ 以内）であって、前の 6 種の場合についてその許容公差を示すと、

肉厚 70 μ ,	精度 $\pm 1.4 \sim \pm 3.5 \mu$
” 45 μ ,	” $\pm 0.9 \sim \pm 2.25 \mu$
” 40 μ ,	” $\pm 0.8 \sim \pm 2.0 \mu$
” 30 μ ,	” $\pm 0.6 \sim \pm 1.5 \mu$
” 25 μ ,	” $\pm 0.5 \sim \pm 1.25 \mu$
” 20 μ ,	” $\pm 0.4 \sim \pm 1.0 \mu$

となる。これを第 2 表の最大、最小偏差と比較すると、試作テープはいずれも肉厚の $\pm 2 \sim \pm 5\%$ 以内の偏差にあり、試作テープの厚み精度は十分要求仕様を満足している。第 16~21 図のデータはすべて電磁厚み計によるものであるので、テープの幅およびある長さ方向の平均値を測定していることになる。ここで、渦電流法を応用した非接触型電磁厚み計による測定精度を調べると、測定条件が、

- a) 予熱時間 1~2 時間
- b) 電源電圧 100V $\pm 5V$ 以内
- c) 銅テープ温度 $\pm 1.5 \sim 2.0^\circ\text{C}$ 以内
- d) 銅テープ上下振動 $\pm 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 以内
- e) 銅テープ横振れ $\pm 2 \sim 3 \text{ mm}$ 以内
- f) 零点およびゲイン調整 1 時間につき 1 回

を満足する場合、肉厚 10~100 μ の範囲で、測定精度は $\pm 0.5 \sim 1.0 \mu$ となっている。われわれの測定の際、前記 a), b), f), は満足されていた。さらに c), d), e), を詳細に調べると、電磁厚み計の実験結果によれば

- c) 銅テープの温度：温度 10°C の上昇で
 厚さ 40 μ の場合、 -0.9μ の指示移動を生ず
 ” 70 μ ” -0.6μ する
- d) テープの上下振動：
 $\pm 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ で $\pm 0.2 \mu$ の指示移動を生ずる
- e) テープの横振れ
 $\pm 2 \text{ mm}$ で、 $-0.4 \sim -0.5 \mu$ の指示移動を生ずる

という結果が得られている。われわれの測定では単長約 300m の圧延であったので、圧延時間は約 20 分で温度上昇は問題にならない。また電源には $\pm 1\%$ 定電圧装置をつけており、テープの上下振動も $\pm \frac{5}{100} \text{ mm}$ 程度であるので問題はない。したがって、第 16~21 図で、厚さがときおり瞬間的に変化している原因は、銅テープのパス・ラインが $\pm 2 \sim 3 \text{ mm}$ 瞬間的に横振れするためであると考えられる。非常に薄いテープの圧延作業では、テープの横方向の動きは、テープの幅方向の両端を押えて止めることは不可能で、ガイド・テンション・ロールおよび圧延張力によらなくてはならない。この点からも圧延張力がある程度大きくとる必要があるわけである。

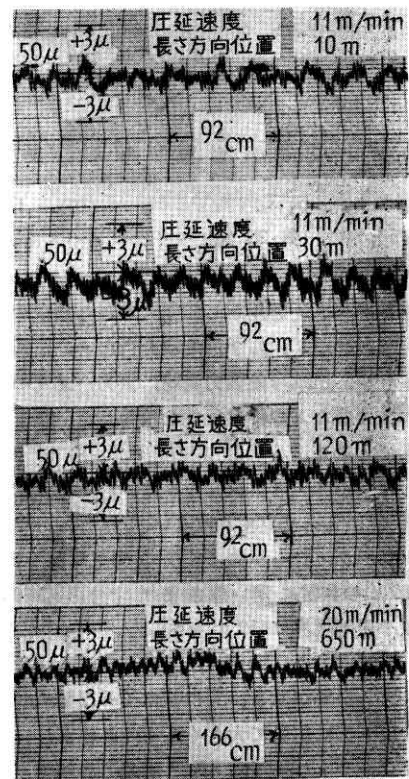
30 μ の記録の場合、相当長期にわたって、厚さがマイナス側にずれているのはパス・ラインが少し移動したためと考えられる。第 22 図と第 23 図は、電磁厚み計による測定結果と、 $\frac{2}{1,000} \text{ mm}$ スクリュー・マイクロメータによるものとを比較する目的で示したもので、明らかに電磁厚み計による並外れて大きい厚み偏差指示は、銅テープの横振れが原因していることがわかるであろう。第 22 図の圧延条件は、厚さ 62 \rightarrow 50 μ に圧延、圧下率 20%、圧延速度 11 m/min、ワーク・ロール SK-2、圧延油 #60 スピンドル油である。

以上のことを考慮して、この精密圧延機で圧延可能な厚み精度をまとめると、

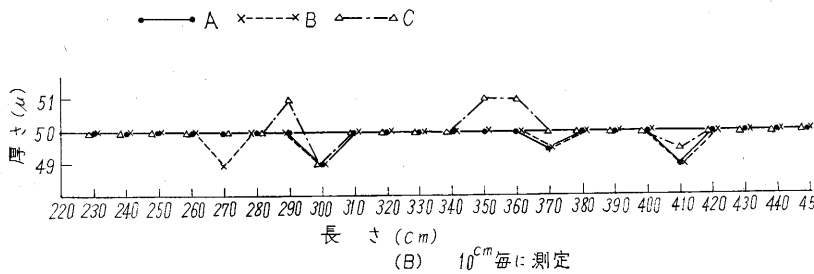
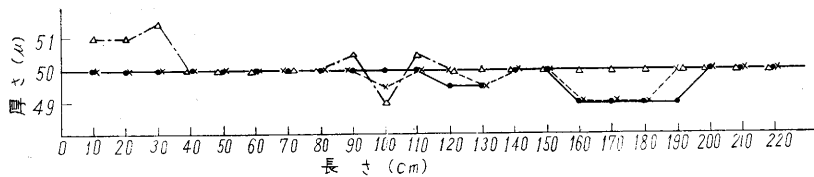
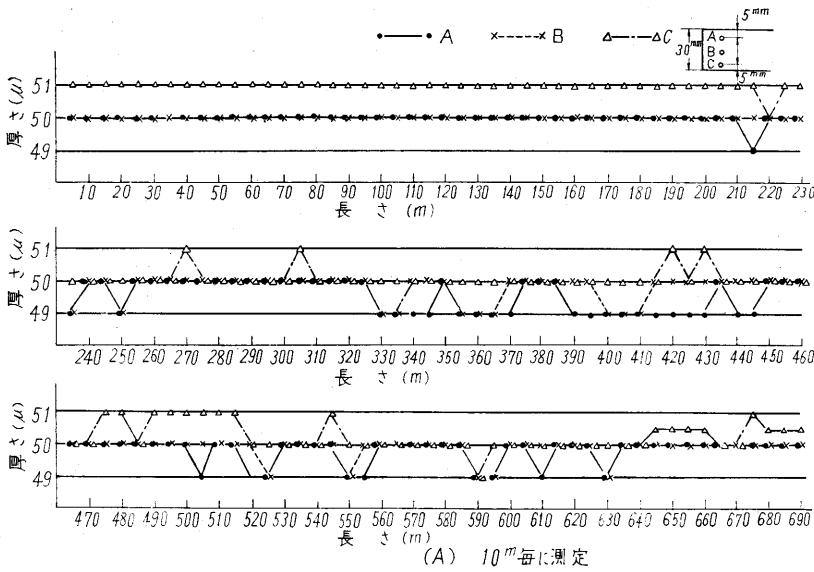
- (1) 40~70 μ の肉厚では、精度 $\pm 1.5 \sim 2 \mu$ 以内
- (2) 20~40 μ ” ” $\pm 0.5 \sim 1 \mu$ 以内
- (3) 肉厚設定精度 $\pm 0.2 \sim 0.5 \mu$ 以内

となる。これは厚さ精度の点で十分要求される極薄銅テープ仕様を満足するものである。

現在市販されている極薄肉銅テープの厚み精度について、一例を示せば、0.04 mm 厚までのもので、厚み精度 $\pm 7 \sim 9\%$ 、また、0.03 mm 以下のものでは、厚み精度 $\pm 10 \sim \pm 12\%$ 程度のものが普通である。今回試作された精密圧延機による圧延厚み精度は、 $\pm 2 \sim \pm 5\%$ の範囲内にあり、これらを比較してみても、本圧延機がいかに精度の高いものであるがわかるであろう。



第 22 図 電磁厚み計による肉厚測定 (50 μ)

第23図 マイクロメータによる肉厚測定 (50 μ)

5. 総括

極薄肉銅テープ圧延用として開発された精密冷間圧延機について、テープ試作予備実験を行ない、圧延パス・スケジュール、圧延可能張力範囲、張力、速度の肉厚変動に及ぼす影響などの作業条件を検討した。以下に、その大要をまとめる。

- (1) 圧下パス・スケジュールは、1パス圧下率を20%~15% にとって立てればよい。
- (2) ワーク・ロールにSK-2炭素工具鋼を用いても、20 μ の非常に薄い厚さまで十分圧延可能であり、最小圧延限界は12 μ であった。
- (3) 圧延張力の応力値は、全圧下率にはほぼ比例して大きくする必要があり、その値は2~12 kg/mm²と順次、全圧下率に応じて大きくするのが望ましい。
- (4) ワーク・ロールにSK-2炭素工具鋼ロールを用いた場合、テープ厚が70 μ 以下になると、ロールの扁

平化が急激に大きくなり、平均圧延圧力も同様に増大の割合が大となる。

(5) Stoneの式により、2次元降伏応力を圧下力から逆に計算で求めた結果、銅テープの2次元降伏応力は、50 kg/mm²にも及ぶものであることがわかった。

(6) 圧延消費動力は、材料の2次元降伏応力が既知であれば、Stoneの理論式から大略予測することができる。

(7) 圧延速度の肉厚に及ぼす影響はかなり顕著であるが圧延機の世界精度は $\pm 5\%$ であるから、厚み精度上全然問題にならない程度である。

(8) 圧延テープ張力のテープ肉厚に及ぼす影響も明瞭に認められるが、張力を機械仕様通り $\pm 5\%$ 以内の精度に保てば十分所要の肉厚精度(厚さの $\pm 2\sim 5\%$)をもつテープを得ることができる。また逆に張力設定値を、肉厚偏差信号のフィード・バック量に応じて強制的に変化せしめることにより、なんらかの原因(たとえば圧延速度の変更、変動)によって肉厚が設定値からずれた場合、肉厚変動を

修正することが可能である。実験結果によると、張力を $\pm 20\%$ 変動せしめて、 $\mp 1\mu$ 程度の肉厚偏差を修正し、所要の肉厚設定値に戻すことができる。

(9) 肉厚精度は、非常に薄い20 μ 厚の場合でも最終的に $\pm 2\sim \pm 5\%$ 以内に納めることができる。

6. 結言

以上の実験は、圧延実験そのものとしては、不備な点が非常に多く、今後さらに実験を継続する予定であるが一応本精密圧延機による圧延特性の解明ならびに今後、圧延作業を進める上に必要な予備実験としての目的は果たしたと考えている。その結果、本圧延機は、世界最高級を誇る薄肉圧延機に優るとも劣らない高精度の優秀な極薄テープ圧延機であることが実証された。

本圧延機の開発ならびに実験に関して、東京大学、鈴木教授の懇切なるご指導を頂いたことに対し、深く感謝の意を表します。
(1961年10月12日受理)