

銅 テ ー プ 厚 み 測 定 装 置

杉 正 男 ・ 熊 丸 博 之

1. 緒 言

薄肉銅テープ圧延機用厚み測定装置としては、100 μ以下の銅テープの肉厚を±1 μ以下程度の精度で測定可能なことが要求される。従来この種の測定器としては差動トランスを用いるフライングマイクロメータが広く用いられ、また最近ではβ線厚み計などが用いられている。しかるに前者は接触型の測定ヘッドを用いるため、圧延工程中の動的な厚み計としては信頼性に乏しく、その精度は圧延速度にもよるが、だいたい±5 μ程度と考えられる。また後者はβ線の散乱や特性X線の発生に対する遮蔽を必要とし取扱いに注意を要した高価でもあるので、筆者らは独自で比較的精度がよく取扱い容易かつ安価な厚み計を開発することにした。

試作した厚み計は渦電流法に基づくもので、誘導コイルにより銅テープ中に50 kcの渦電流を流し、その反作用を検出コイルで取り出して増幅後位相検波して、ある設定値よりの厚み偏差を指示記録した厚み制御系への出力信号を出すようにしたものである。試作器の性能は厚さ20~100 μの銅テープを0.5~1.5 μ程度の精度で測定が可能でいちおう満足すべきものである。なお筆者らは概略設計のみ行ない、細部設計ならびに製作は安藤電気に依頼した。

2. 設 計 理 論

渦電流法による電磁厚み計を設計するには、まず与えられた厚み測定範囲に適した測定コイルの形状および周波数を定める必要がある。その具体的な数値は、最終的には実験結果に基づき定められるべきであるが、だいたいの見当をつけるため、第1図に示す導体配置につき理論的に考察する。厚さ t の非磁性薄肉金属の無限平面上高さ h の所に $2S$ なる間隔で流れる往復交流電流 I は、金属平面の存在のため反作用を受け、その単位長さ当たりのインピーダンスを増加する。この反作用インピーダンス z の実部、虚部をそれぞれ R, X とすれば次のように計算される⁽¹⁾。

$$R = \frac{\omega\mu_0 S^2}{\pi h^2} \cdot m \left\{ 1 - 2mF(2m) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$X = -\frac{\omega\mu_0 S^2}{\pi h^2} \cdot 2m^2 G(2m) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ただし} \begin{cases} F(x) = C_i(x) \sin x + \left\{ \frac{\pi}{2} - S_i(x) \right\} \cos x \\ G(x) = -C_i(x) \cos x + \left\{ \frac{\pi}{2} - S_i(x) \right\} \sin x \\ m = \frac{ht}{\vartheta^2}, \quad \vartheta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \end{cases}$$

かつ $\vartheta \gg t$ と仮定する。

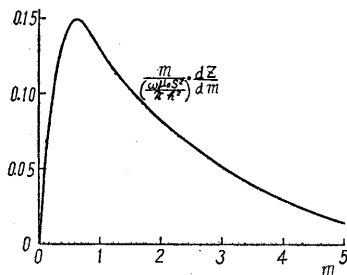
ここに ω, μ_0, ρ はそれぞれ角周波数、真空の透磁率、金属平面の固有抵抗を表わし、 ϑ は等価導体厚と呼ばれるもので、また $C_i(x), S_i(x)$ はそれぞれ余弦積分、正弦積分を表わす。

さて高感度の厚み計を得るといことは t の単位割合変化に対し(1)および(2)式で与えられる z の変化率が大きくてかつ安定した領域を見出すことである。このためには z の m に関する微分曲線を求めればよいがその厳密な表示は簡単でない。数値的な近似式のみを示せば次のようになる。

$$t \frac{dz}{dt} = m \frac{dz}{dm} = \begin{cases} \left(\frac{\omega\mu_0 S^2}{\pi h^2} \right) \cdot 0.66 m e^{-1.63m} & (0 \leq m < 1.5) \dots (3) \\ \left(\frac{\omega\mu_0 S^2}{\pi h^2} \right) \cdot 0.25 m e^{-0.9m} & (1.5 \leq m < 5) \dots (3)' \end{cases}$$

ただし

$$z = |z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$



第2図 反作用インピーダンスの m による変化率

(3)式および(3)'式を図示したものが第2図で $m \approx 0.6$ に極大を有し、それより m が増加するにつれて緩やかに減少している。したがってこの極大値

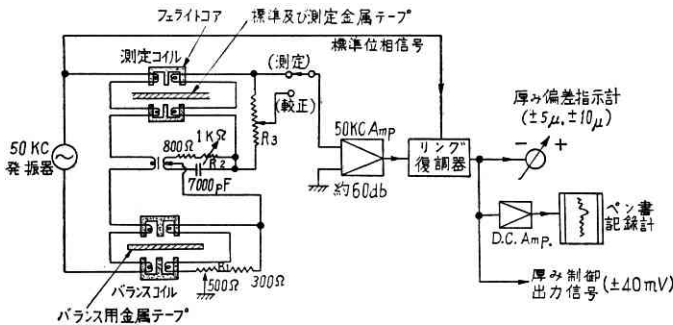
に近い右側の範囲に測定系を設計すれば良好な厚み検出特性が得られるものと期待される。今対象とする金属テープの材質を銅とし t の主なる測定範囲を10~100 μとすれば、 h, ϑ をそれぞれ5 mm, 0.3 mmと選べば、 m のとりべき範囲は t の測定範囲に従い0.5~5となる。

測定周波数 f は θ の値より 50 kc と定まる. また (3) 式が f により最大値をとるのは $m=1.2$ で上述の m の範囲に含まれ, かつ $\theta \gg t$ なる仮定も満たされるので, 測定周波数を 50 kc と定めることは妥当と考えられる. S の値は検出感度を上げる点からは大きい方がよいが, 測定すべき金属テープ幅の 1/2 以上とすることは端末効果の混入の点より好ましくなく上限が存在する.

以上により厚み計設計のための大略の方針がつかめたわけで, あとは二三測定コイルを試作し所要巻回数やそれに流すべき電流値および所要増幅度などを実験的に決定すればよい. 以下基礎実験結果に基づいて試作した電磁厚み計につき述べる.

3. 測定装置の構成

電磁厚み計は第 3 図に示すようにその心臓部たる測定



第 3 図 電磁厚み計の回路

コイル系と発振器, 増幅復調指示計およびペン書き記録計より構成される. コイルは磁界の集中をよくし金属テープの局部厚を高感度で測定するため E 字形のオキサイドコアに一次側および二次側を 100 回共巻し, かつ金属テープの振動による h の変動の誤差を小さくするため 2 個のコイルを 1 mm の間隙を隔てて対向させその間を金属テープを走らせることにした. さらにこれとまったく同一構造のバランスコイル系をもう一組設け, 目標値の厚みをもつ金属テープサンプルを挿入し, コイルの二次側を測定コイルのそれと差動的に結線し, そこに残った微小な不平衡電圧の振幅および位相をそれぞれ R_1 , R_2 により零調整する. これらのコイル系に発振器より 50 kc, 1~10 mA 範囲の定電流を流しておき, まず測定コイルに標準サンプルを挿入しコイル系の零バランスをとっておけば, 次に測定すべき金属テープを標準サンプルと置換すればそれらの厚み偏差に応じた不平衡出力電圧が増幅器の入力端に与えられる. なおバランスコイル系は単にインダクタンスブリッジとしての平衡電圧を発生するためだけでなく, 室温など周囲条件の変化が測定コイルに与える誤差の影響を補償するのにも役立つ.

コイル系より得られる偏差電圧は, 内部位相回転を少

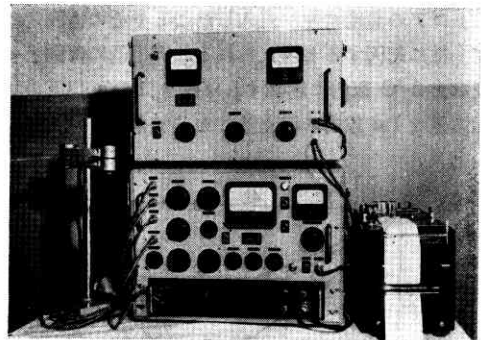
なくかつ十分利得を安定化した CR 結合増幅器により所要の大ききまで増幅され, さらにリング復調器により 0 または π の位相検波により厚み偏差の正負を判別される. 増幅器利得は標準サンプルにさらに厚さ 5 μ 以内の金属箔を追加挿入して所要の偏差指示を得るよう調整するか, または全厚み測定範囲にわたり較正されたポテンショメータ R_3 より較正用偏差電圧を得てフルスケール偏差指示を得るよう調整される.

リング復調器より得られる厚み偏差に比例した直流出力電圧は厚み偏差指示計ならびに直流増幅器を通じてペン書き記録計に与えられる. ペン書き記録計は最高周波数 60% のものを使用したので, 金属テープ走行速度が 60 m/min の場合でも分解能は約 15 mm であり, この数値は圧延機のワークロールの円周長よりも小で実用上十分な値である. 分解能はオキサイドコアを含む測定コ

イルの大きさによっても制限を受け, この点よりの分解能は約 20 mm と考えられる. 直流出力信号はまた厚み制御回路たとえば金属テープ張力制御器へ供給され, 圧延機工程の品質制御系の検出器としての役割を果たすことができる. 第 4 図には電磁厚み計の全景を示す.

4. 特性試験結果ならびに考察

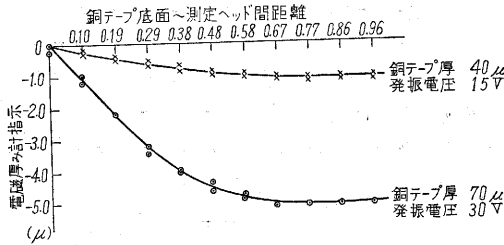
電磁厚み計の諸特性に関し実用上問題になるのは, 金属テープの上下振動および横振れの影響, テープ温度の変動, 電源電圧変動の



第 4 図 電磁厚み計の全景

影響および各種誤差要因の集積の結果たる測定器零点の時間的変動などである. 厚み計の静的な指示精度は使用に先立ちその都度標準サンプルで較正を行なうので再現性のみが問題であるが, 実験結果によれば再現性の誤差は 1 μ 以内程度である. 各種の特性試験は硝酸により所要の厚さまで溶かして得た軟銅テープサンプルを用いて行なった.

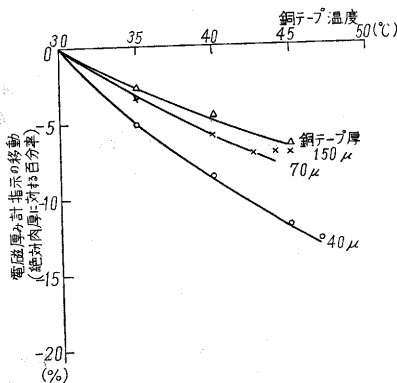
まず金属テープ上下振動による指示誤差の測定結果を第 5 図に示す. 測定コイル間の 1 mm 隙間に磁界が一様に分布していれば, 一次近似では金属テープの位置す



第5図 電磁厚み計指示に対する銅テープ上下振動の影響

なわち(1), (2)式中の h の影響はないはずであるが、磁界の小さな乱れのためか第5図のようにテープ位置により指示移動を生ずる。しかしテープをコイル間隙の中央すなわち 0.5 mm の位置におけば上下振動 ± 0.1 mm でも指示誤差はたかだか $\pm 0.5 \mu$ 程度と推定できる。実際の圧延工程においても測定ヘッドの前後にガイドローラーを置くことによって ± 0.1 mm 以内に上下振動を抑えることは容易であろう。

次に大きな誤差要因と考えられるものに金属テープの温度が挙げられる。このことは理論式(1), または(2)中に t/ρ なる因子が含まれ、温度上昇により ρ が大となれば厚み計は等価的に t が小さくなったように指示するはずである。指示の温度による理論的变化率は $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ 程度であるが第6図では $0.4\sim 0.8\%/^{\circ}\text{C}$ の結果が得られている。実験値と理論的推定値との食い違いはもちろん実験誤差にもよるが、サンプルの銅テープをハンダゴテ用ヒータで加熱する際測定ヘッドに熱が移ってオキサイドコアの温度特性が混入したことやその他測定器の不完全性に起因すると考えられる。実用的には銅テープ温度を $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内に制御すれば厚さ 100μ 以下の場合指示誤差を 1μ 以内に抑えることができる。



第6図 銅テープの温度変化による測定器零点の移動

測定ヘッド内を走行中の金属テープの横振れの影響はテープ幅 25 mm 厚さ 100μ の銅テープの場合、横振

れ ± 2 mm に対し指示変動は -0.5μ と測定された。この程度であれば実用上問題ない。

その他長期零点変動試験の結果では、1時間半の予熱時間を置けばその後の零点の移動は5時間以上にわたって問題なく、また電源電圧も $100\text{V} \pm 5\text{V}$ の範囲で変化しても問題ないことが実験的に確かめられた。結局総合精度としては、 $10\sim 100 \mu$ の銅テープに対して、約 $0.5\sim 1.5 \mu$ 程度であろうと推定される。なお本測定装置を実際の圧延機へ取りつけての実測結果は別稿に示されているからここでは省略する。

この電磁厚み計は主に $10\sim 100 \mu$ の銅テープ厚み測定に適するように設計されているが、さきほども述べたように t/ρ が同一な金属テープはコイル系に同一な電磁的反作用を及ぼす。この事実は実験的にも容易に証明されるが、この関係を用いて銅テープに関する実験結果をそのままアルミニウムや錫などの他の金属テープに適用することができる。また銅テープでも加工硬化による導電率の低下がいちじるしい場合は、同一関係式により指示偏差に補正を施す必要がある。しかしながらこの影響は適当な標準サンプルで零調整を行なうかぎり指示偏差の大きさにのみ現われるので、指示誤差は 1μ 以内に止まるものと考えられる。

5. 結言

渦電流法による金属テープの厚み測定は、非接触方式でかつ比較的簡単かつ安価な装置で高感度を得ることができるという大きな特長をもっている。その操作法も通常のレベルメータと同様で至って簡便であり工業的精度では十分な再現性を有している。一方金属テープの上下左右の振動により誤差を生じた温度特性にやや劣るといふ短所を有する。金属テープ振動の影響は測定コイル系の設計に留意し、かつそれを圧延機に取りつける際振動をなるべく少なくする機械構造とすることによって、実用上問題ないほどにまで軽減される。一方温度特性に関しては、測定原理上本文に述べた程度の誤差は避け難いものである。これらの短所を十分認識した上で使用すれば、実用上この測定法の特長を十分発揮させることができる。

梶尾に本装置の細部設計ならびに製作に当たられた海保芳郎氏初め安藤電気株式会社の諸氏に深く感謝したい。

(1961年10月12日受理)

—本件は特許申請中—

参考文献

杉 正男: 薄い平面導体に平行せる燃対線の抵抗およびインダクタンス, 電気通信学会誌 昭和30年6月号