

討22 ブリキ原板硬度の渦流計測について

日本鋼管(株)技術研究所 森 年弘 渡部勝治朗

1. 圧延材の品質計測について

最初に、今回の討論会のテーマである「圧延材の品質」とは何かということを話題にしたい。

思いつくまゝの関係事項を書き並べてみると、① 寸法、② 形状、③ 疵の有無、④ 非金属介在物の種類と程度、⑤ 機械試験値や⑥ 異材判別などが挙げられよう。

これらの項目のうち、①と③については現在すでにオンライン(非破壊的)計測が広く盛んに行われるようになっていっているので、今回の討論の主たる対象からは外してもよいと考えるが、その他の項目との比較のために計測という観点からこれらの技術を振り返ってみると次のような特徴のあつてがわかる。

① 寸法 については、直径にしても厚さにしてももとも長さという基本的物理量であつて、その定義は極めてはっきりしている。

③ 疵 については、圧延材の疵とは何かという古くてなお新しい問題は残されているものゝ、わが国材料メーカーは個々のキズ(異常部や不連続部)があつた場合にそれらが有害か無害かということには余り立入らず、出荷する商品の品質保証を目的として関係規格に準拠した下で出来るだけキズを検出し不良とされた商品を除去することに主眼が置かれて来た。

ところが最近ではキズの検出のみならず、ワレの長さ、深さ(高さ)などキズの寸法測定にもウエイトがかけられるようになり、一方計測の目的も中間成品の品質管理並びにミルコントロールへと適用面が広がって来ている。

④と⑤ はいわゆる材質と呼びがけにふさわしく、今回の討論の対象として適していると思われるが、それらの現状は次のようである。

④ 非金属介在物 については、先ずオースドックスな分析法や測定法および表示方法の定義を明確にした上で、試験片を切出し、しりしりして介在物に関する材質量に代替可能な物理量を探索する必要がある。介在物はミクロ的では「疵」に似ており、またマクロ的には化学組成に似ているところがあると思われる。

⑤ 機械試験値 のうち引張り強さについては、試験片を材料試験機にかけてその材料を破壊に至らしめることによつてはじめて定義される量であるから、破壊させる前にそのような量の値を推定することは本来的に困難なことであらうと思われる。

もつとも化学成分や硬度からある程度は推定できると言われているが、本来の材料試験に代替し得るところまでは行っていない。

⑤ 機械試験値 のうち硬度は材料の塑性変形に対する変形抵抗を局部的に測定するものであるが、その間接的推定方法は古くから試みられており、保磁力や初透磁率など磁気的な量との相関を調べた報告が多くある。

このことを応用してブリキ原板の硬度をオンラインで計測し、操業管理に役立てようという報告がある。すなわち保磁力と初透磁率とは鋼の成分や組織に対して密接な関係があると言われているので、硬度との相関も良いものと考えられるが、硬度は物理量ではないから、物性論のようなより基礎的な学理から導かれるような関係は存在しない筈であると考えている。

⑥ 異材判別は圧延材の品質に関連したニーズであって従来から火花試験が供用されて来ているが、これに代って自動化できる手法が要望されている。

2. 渦流計測について

薄鋼板の初透磁率を計測する手段として渦流法が用いられる。導体の表面に相對して空芯コイルを置き、このコイルに交流を通ずると導体内部の表面近くにも同心円状の交流が発生する。これを渦電流と呼ぶ。

渦流計測の基本はこのコイルのみかけのインピーダンスを測定することである。

2-1, 導体平面に相對した空芯コイルのインピーダンス

本論に關係ある諸量を次のように表わすこととする。

導体の厚さ	: t	[m]
導体の導電率	: σ	[S]
〃 〃 初透磁率	: μ	[H/m]
真空中の透磁率	: μ_0	[H/m]
コイルの直径	: $2a$	[m]
〃 長さ	: l	[m]
〃 巻数	: N	
〃 インダクタンス	: L_0	[H]
長岡係数	: ν	
浸透深さ	: δ	[m]
コイルと導体間の距離	: z_1	[m]

$$L_0 = \nu \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{l}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

$$F \equiv \omega \mu \sigma a^2$$

この空芯コイルを導体に近接させるときのみかけのインピーダンスを空芯コイルのリアクタンス ωL_0 で除したものを正規化インピーダンスと呼ぶ。

導体平面に相對したコイルの正規化インピーダンスの独立変数は次の5つであって、 F を正規化周波数と呼ぶ。

$$\mu/\mu_0, t/a, l/a, z_1/a, F$$

特に、導体が非磁性の場合には $\mu = \mu_0$ となる。図1³⁾ はさらに $t = \infty$, $l/a = 1$ に選び、残る独立変数2つ、 z_1/a , F をパラメータとして正規化インピーダンス $Y + jX$ を計算したものである。この図のように一般に非磁性導体に近接したコイルの正規化リアクタンスは常に1よりも小さい。

ところが、強磁性導体の場合には正規化リアクタンスが1よりも大きくなることのあることが判っている。従って、正規化リアクタンスが距離変動の影響を受けない場合の存在することが予想できる。

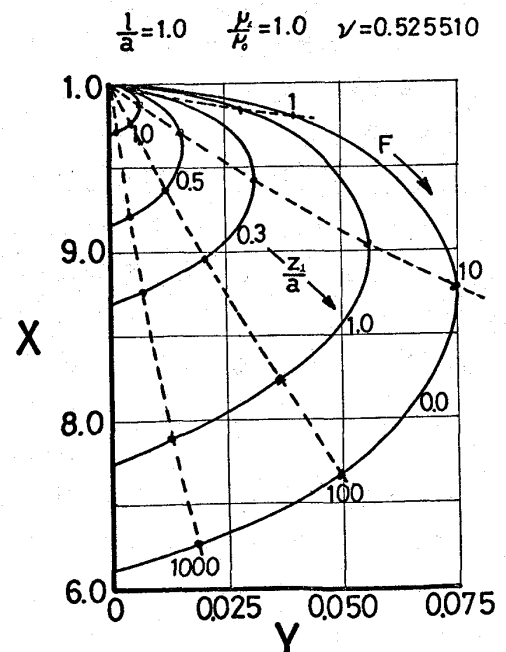
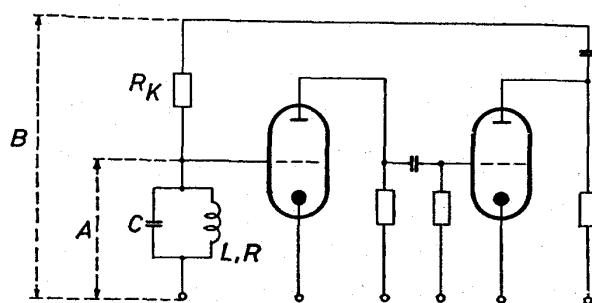


図1³⁾ 非磁性半無限導体に近接相對した有限長ソレノイドコイルの正規化インピーダンス軌跡

2-2, 発振法による渦流計測

渦流計測に用いる電子回路は線型と非線型とがある。後者は発振回路であって、図2は負性コンダクタンス二端子発振回路を示している。

検出端のコイル $R+j\omega L$ と固定コンデンサ C と負性コンダクタンスとを並列に接続し、もので調節箇所がなく極めて安定である。従って、いわゆる較正という操作はよい。出力は発振周波数で与えられるが、D-A変換すれば連続記録も可能となる。



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}]$$

図2 負性コンダクタンス二端子発振回路

3. ブリキ原板硬度との対応

図2は焼鈍温度を変えて作成した5英のサンプルについて、ロックウェル30T硬度と渦流計測を行い対応を調べたものである。この実験に限り、この字型コアを有する検出コイルを用いている。

発振周波数は硬度に対して正の相関を持つことが判る。このことは初透磁率が硬度に対して負の相関を持つことと相当している。

なお図2には保磁力法も併記されているが、これは電磁石とシンクロスコープを用いて保磁力に相当するものを測定したので参考として利用したものである。

空に検出コイルを決めれば渦流測定に直接関係する因子は前記正規化インピーダンスの独立変数からみて μ , σ , M であるが、間接的には鋼板の温度、張力、成分などがある。板の厚さは浸透深さより較べて充分大きいので無視出来ると考えた。

そこでリフトオフ M と板の温度 T それぞれの影響を調べる実験を行った。

発振法では検出コイルのみかけのリアクタンスだけが周波数出力に影響するので、正規化リアクタンスの値がリフトオフ M が少し変動しても変わらないような条件を用いれば、リフトオフに対する自動補償が出来る筈であるが、このとき実験に用いたコイルと周波数では正規化周波数 F が大きすぎた。

板の温度 T は鋼板の導電率 σ に直接関係することが判っているが、発振周波数との関係も極めて直線的な結果を得た。

発振法渦流計測の出力周波数の再現性は非常に良好であったため、日をかえて測定しても較正は全く不要であった。

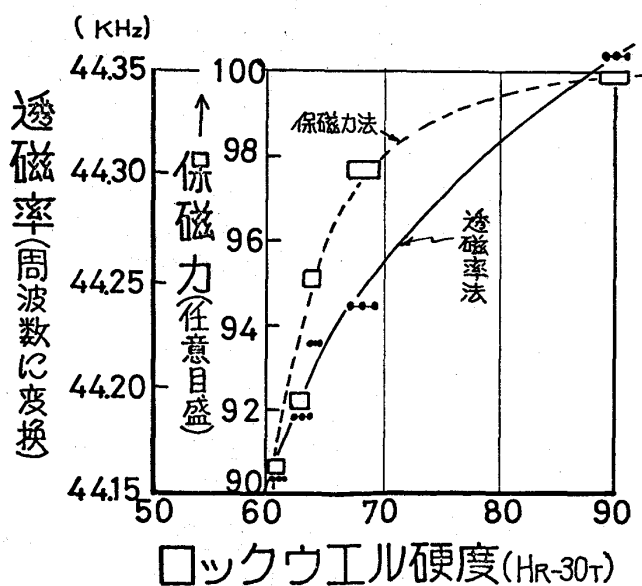


図3 ブリキ原板硬度の磁気的量との対応

京浜製鉄所連続焼鈍炉の右側のブライドルロールに対向して検出コイルを置き、工場実験を行った。

実験時の操業は通常操業と他の条件は一定にして加熱炉温度を操作する試験操業とがあった。

サンプリングパンチによるロックウェル硬度とその個所の渦流計測の出力値とを求め対応を調べた結果の一例を図4に示す。

この工場実験について次のことが言える。

- 1) 測定場所として適している。
- 2) 渦流測定器の安定性は良好で、ノイズ発生などの故障はない。
- 3) ロール偏心の影響はあるが、周期的変動のため時間的平均をとれば解決される。

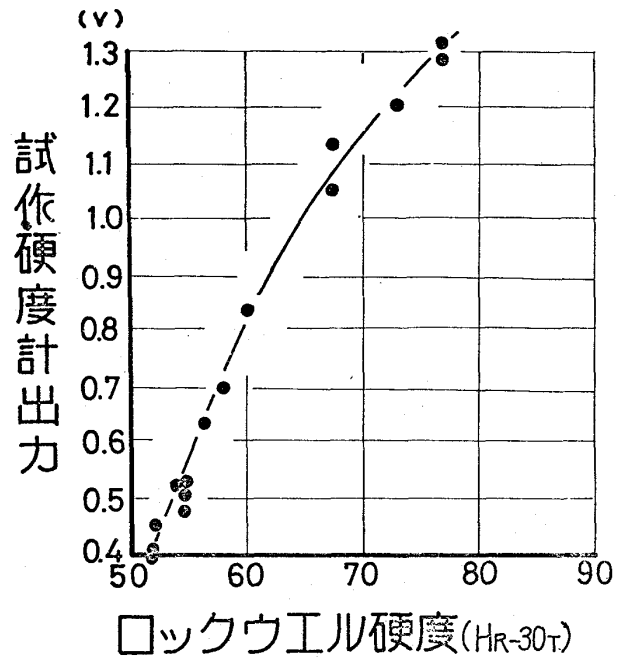


図4 工場実験のサンプリング硬度との対応

4. 考察

圧延材の材質のオンライン測定の一例としてブリキ原板の硬度を渦流計測(巻板法)を用いて推定する実験を紹介した。この場合は最も単純な空心コイルの自己誘導型検出コイルと巻板回路を組合わせているが、条件と選ぶはリフトオフ変動を自動的に自己補償する可能性がある。

このことは渦流計測時の自由度が2ということによっても、解型回路法における信号処理(位相解析)に相当している。

さて、硬度に影響する因子として、炭素量、熱処理、加工度などがある。初透磁率と硬度とはよい相関があると言われているが、これらの因子による硬度でも果して同じ曲線に束縛されるだろうか。

導電率ならば温度によるものでも加工による変化でも同じ結果と与えらるであろう。

圧延材のもの他の機械試験値にしても硬度より代替物理量と求める困難さがあり、むしろおそろく複数の物理量と多くの材料情報を複雑に組合わせる必要があるだろうと考えている。

引用文献

- 3) 尾上守夫：導体に近接した有限長ソレノイドコイルの解析, 電学誌 88, No. 10 (昭43年10月) 1894~1902
- 1) 宮副泰, 原田博之：透磁率による鋼板の硬度の連続測定, 九大工学集報 38, No. 2 (昭40年6月) 191~197
- 2) 川島, 土門 他：ブリキ用鋼板の渦電流による連続硬度計の開発, 非破壊検査 21, No. 7 (昭47年7月) 401~410