

技 術 資 料

鋼板鋼管の厚み測定法の進歩

丹 羽 登*

RECENT DEVELOPMENTS IN THICKNESS METERS FOR STEEL PLATES AND PIPES

Noboru Niwa

(Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

Synopsis:

Some methods to measure the plate thickness were reviewed. Especially magnetic, radiation and ultrasonic thickness meters were illustrated. Magnetic methods were explained for the direct current type, the alternating current type and the continuously measuring type, which were developed in Japan. The radiant ray methods, such as the X-ray, beta ray and gamma ray penetration types and the gamma ray scattering type were quoted from American magazines. Some Japanese experiments of the penetration type were mentioned.

The ultrasonic thickness meter of both the audible type and the cathode ray tube type were explained. Some Japanese examples using them were mentioned. Merits and demerits of magnetic methods, radiant ray methods and ultrasonic methods were discussed.

I. は し が き

電子管工学の発達につれて金属工業界でも計測化、自動化の歩みが急速に進められている。鉄鋼業方面でも板厚、パイプの肉厚等の測定に、又それらの腐蝕による危険の防止に種々の厚み測定法が新しく導入されつゝあるので、最近の進歩を中心に概観してみよう。

現在知られている鋼板、鋼管の厚み測定法を総括すると次の如く大別される。

1) 機械的方法: マイクロメータ、のぎす、ダイヤルゲージ、エアマイクロメータ等による最も直接的な方法で、使用可能な範囲で、極めて広く実用されている。

2) 電氣的マイクロメータ: 上記のダイヤルゲージを電氣化した様なものである。連続的に流れている鋼板を、固定及び可動ローラーで挟み、厚みの変化による可動ローラーの偏位量を電氣的に検出してメーターに板厚を指示させる。機械的偏位を電氣量に変換する方式も種々ある。既に本邦でもかなり使われており、Pflierの著書¹⁾(99頁他)にも詳しく紹介されているのでこゝでは省略する。

3) 電流法: 板の面方向に電流を流せば、その電氣抵抗は板厚で異なることを利用するもので、文献(1)にも出ている(118頁)が、他に簡便な板厚測定法があるので、現状では使われていない。

なお天然ガス採取用井戸の鋼管の腐蝕度を電流、電位差等によつて測る研究²⁾も試みられているが、本稿の目的には沿わないので省略する。

4) 光電的方法

5) 磁氣厚み計} この2種はやゝ古くから使われてきたが、その後の電氣測定技術の進歩と共に改良され、目的に応じて使われている。

6) 放射線厚み計

7) 超音波厚み計} 最近脚光を浴び始めた測定法で、今後大いに活用されるものと思われる。

(4)~(7)項について以下に述べる。

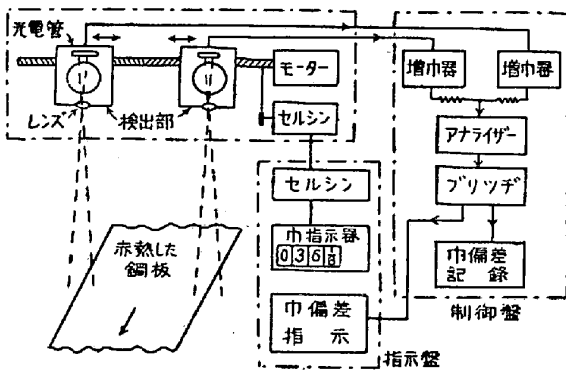
II. 光電的厚み測定法

物体表面の位置(高さ)を光電管を利用して測定する方法は Pflier の著書にも紹介されている。(73, 104頁)

* 東京大學助教授 生産技術研究所第3部

光電的方法は被測板面に接触しないで測定出来る点が長所だが、鋼板、鋼管の板厚測定に対しては他の諸方法の進歩に圧倒された形で、現在のところあまり利用されていない様である。そこで厚みではないが、圧延機から出て来た高温圧延鋼材の巾を光電的に測る方法⁶⁾を紹介する。

これは最近 U. S. Steel 社で実施されたもので、赤熱した鋼材からの光を利用する点が原理的に興味深く、今後厚み測定にも応用されるのではないと思われる。



第 1 圖 光電的鐵板幅測定裝置構成圖

第 1 圖の如くロールから流れ出た高温の鋼板の 5m 上方に光電管を内蔵する検出部が 2 個おいてあり、その間隔はロール後の鋼板の巾の予定値に合わせてある。赤熱した鋼板からの光は検出部下面のレンズを通り、内部の光電管の面に鋼板の縁の像が結ばれる。光電管とレンズの中間に、スロットをあけた回転円板があり、光を断続させて鋼板の縁の位置の、制定位置からの偏差に比例した巾の短形電圧が光電管から発生する様になっている。二つの検出部からの信号を差動的に取出すと鋼材の巾の制定値と、実際の巾との偏差がメーター上に表わされ、又自記される。制定値も勿論指示盤上に示されている。鋼板の縁の実際位置と制定値とのずれは最大 ± 5 in. 迄検出し得、検出部の間隔は 10~96 in. の範囲で変更出来る。即ち指示盤上には 10~96 in. の範囲で鋼板の巾の制定値が数字で示され、更にその値と実際の巾との偏差がメーター上に指示される。測定精度は $\pm 1/8$ in. である。

III. 磁 氣 厚 み 計

磁束を使つて鉄板、鋼板の厚みを一面だけから測定する方法としては原理的には次の 2 種がある。

1) 非飽和型：電磁石の両脚を鉄板面に当てると鉄板中に磁束が生ずる。磁束の通り難さ即ち磁氣抵抗は板厚で左右されるので、起磁力が一定ならば主磁束量を測定

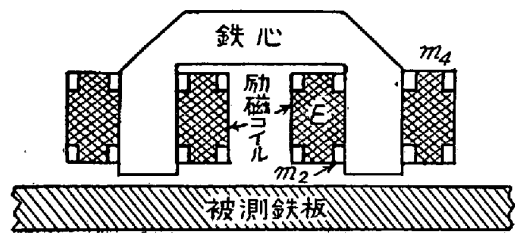
すれば板厚が求められる。

2) 飽和型：鉄板中に飽和する位の充分な磁束量を通し、漏洩磁束を測定する。

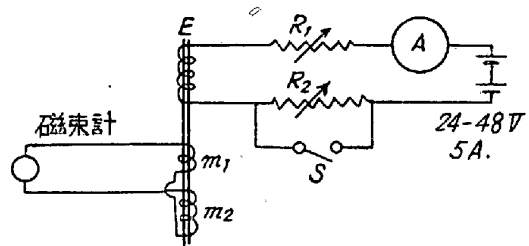
このうち 1) は古く 1938 年に英国の Stevenson 氏が発表⁷⁾したものだが、鋼板表面の錆、塗料の影響等が大きく、現在使われているのは主として(2)の方式である。

§ 1. 直流型磁氣厚み計

この方式については 1940 年に電氣試験所高橋氏他の研究があり、船体外板の実測等に好結果を得ている⁶⁾。更にその後同所で改良され⁷⁾、水圧鉄管の検査等に実績をあげている⁶⁾。



第 2 圖 直流型磁氣厚み計検出部



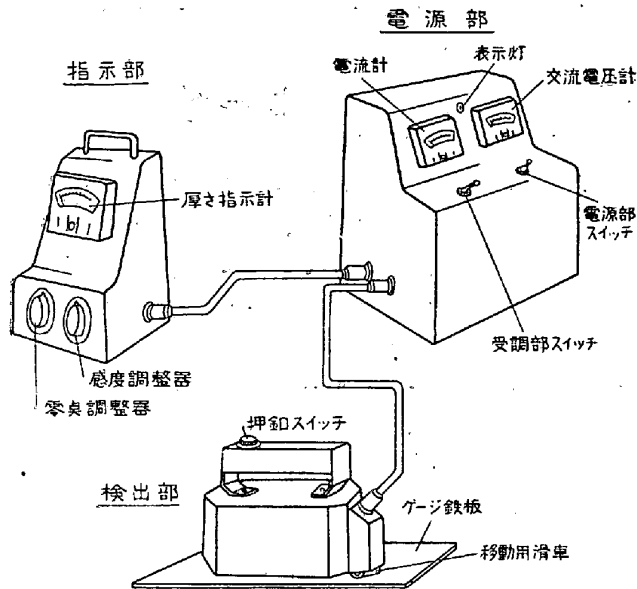
第 3 圖 直流型磁氣厚み計原理圖

その原理を第 2, 3 圖にしたがつて略記する。先ず検出部は第 2 圖の如く、鉄心の両脚に励磁線輪 E が捲いてあつて電磁石になつてゐる。その線輪の上下端部には内側外側に 1 組ずつの搜索線輪 m_1, m_2 が図の様に重ねて捲いてある。厚みを測るべき鉄板を飽和近くまで励磁せねばならぬので、電磁石が必然的に大きく、重くなるのはやむをえない。A 型 (板厚 1~9 mm 用) は 11 kg, B 型 (7~20 mm 用) は 16 kg の重量がある。電氣的構成は第 3 圖の通りで、直流電源から抵抗 R_1, R_2 を通して励磁線輪 E に電流を流し、鉄板を通して主磁束を発生させる。S の開閉によつて主電流を変化 (A 型 3→5 A, B 型 4.5→5 A) させることが出来る。 m_1, m_2 の搜索線輪は、互に逆方向に接続してあるので主磁束による起電力を打消し、 m_1, m_2 の間から出る漏洩磁束だけを取り出して磁束計で測定する。被測定板と検出部との空隙と、厚み測定値との関係は簡単ではないが、誤差を $\pm 5\%$ 以下に押え、空隙 1 mm 以内で A 型は 1~9 mm, B 型は 7~20 mm の板厚測定が出来る。

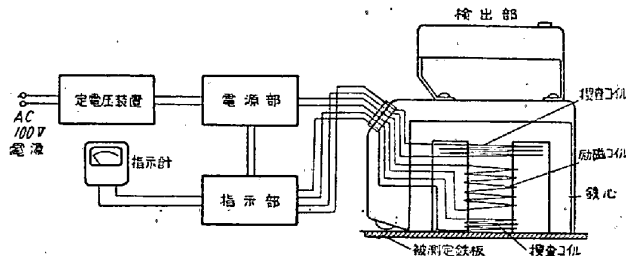
この方式は空隙（錆、塗料等）の存在を許せる点が特徴だが、大容量の安定な直流電源（24～48V，5A）を必要とするのが大きな欠点である。

§2. 交流型磁気厚み計

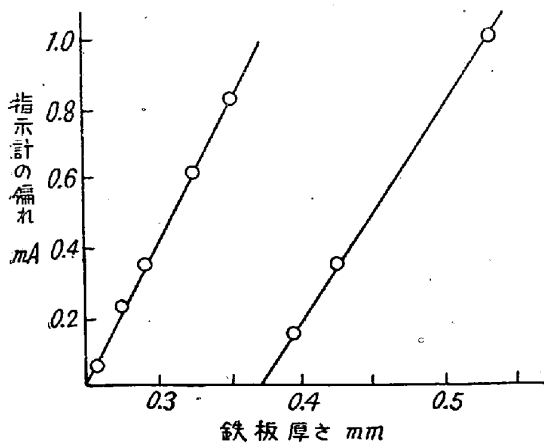
上記の電源に関する欠点を改良したのが交流型磁気厚み計である。電気試験所での研究⁹⁾¹⁰⁾に基づき現在製作市販されているものについて述べる。第4図にその外観を



第4図 交流型磁気厚み計外観図



第5図 交流型磁気厚み計原理図



第6図 交流型磁気厚み計の感度の一例¹⁰⁾

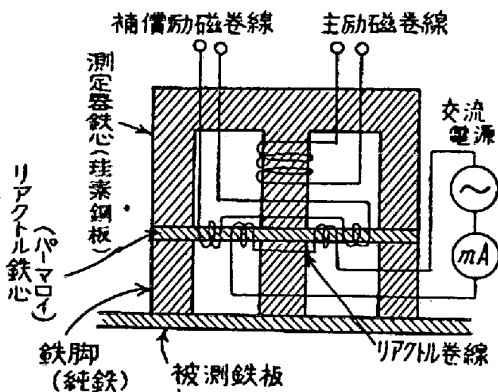
示す如く、3部分から成っており、大きな鉄板、タンク等の測定の場合、必要に応じて接続コードは延長出来る。検出部は第5図に見られる如く、E型鉄心に励磁線輪と2個の捜査線輪を巻いてある。励磁線輪に交流と（交流をヒレン整流器で整流して得た）直流とを重ねて流し、2組の捜査コイルに誘起した電圧の差から鉄板の厚みを求めるのである。6mm以下の鉄板の厚みを0.65 mA/mmの感度で測定出来る。空隙の影響は鉄板が薄い程小さく、4mm程度迄ならば實際上殆ど無視出来る。例えば6mmの板で、±5%以下の精度を要する場合は空隙が0.15mm以上もあると問題になる由である¹⁰⁾。板厚と指示計の偏れとの関係の1例を第6図に示す⁹⁾。鉄板の材質による影響は、炭素=0.09, 0.18, 0.28%の3種の材料について比較した結果は、測定誤差±0.02mmの範囲内では何等変化を認められなかつた。電源電圧の変動には敏感であつて、±1%以下に誤差を保つには100±1V以内の定電圧電源が必要である。測定範囲が1～3mm, 3～5mm, 5～7mmの3種が市販されている。

交流型厚み計は直流電源を必要とせず、厚みをメーター上に直読し得る点が特徴だが、交流磁束を通すために検出部の鉄心は珪素鉄板を重ねて作らねばならず、直流型よりも必然的に大きく、重くなる。例えば上記5～7mm用のものは18×32×22cm³で重量が25kgもある。測定範囲8～16mmのものも試作されてはいるが、検出部だけでも重過ぎて特殊な運搬機械を要する。(勿論測定中は磁力によつて鉄板に吸着しており、支える必要はない。)此の様に板厚の厚い場合は実用上交流型は使い難くなるので、ボイラー、タンク等、板が厚く、測定の足場が悪いが、やむをえなければ測定に時間をかけてもよい、という場合には直流型の方が良い様である。

なお検出部が被測定板に接する底面の面積はかなり広く、(最も小型の1～3mm用のものでも約9×12cm²位)その広さの部分の平均板厚を計ることになる。この点が腐蝕して凹凸のある板の平均厚を知りたい時等は特徴となり、細いパイプ等の肉厚を測りたい時は欠点となる。

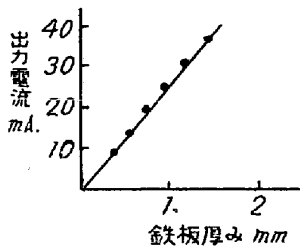
§3. 連続型磁気厚み計

交流型の磁気厚み計で、流れている鋼板の厚みを連続的に測定しようとする1例を述べる。富士電機K.K.で研究試作されたもの¹¹⁾で、原理は前項交流型とほぼ同様だが、板厚にほぼ比例した通過磁束量を検出する方法として、前項のものは漏洩磁束量を測つているのに対し、この方法では第7図の如く3本の鉄脚（珪素鋼板製）間にリアクター鉄心（パーマロイ製）をおき、それに捲いた



第7圖 連続磁気厚み計検出部¹¹⁾

線輪から鉄脚間の磁位差を検出している。主磁束によってこのリアクター鉄心が飽和するのを防ぐため補償励磁線輪によってリアクター鉄心内の総合磁界を零附近に保つておく。更にこのリアクター鉄心にはリアクター巻線を巻き、交流電源と電流計をつないでいる。この測定鉄心を鉄板にのせない時はリアクター鉄心を通る総合磁束は零に近いのでそのリアクタンスは大きく、その線輪を流れる電流は少い。鉄心を鉄板にのせると鉄板中を通る磁束量に比例した磁位差の変化が鉄脚中に生じ、リアクター鉄心内にも磁束が通り、磁位差が大きければ飽和する。従つてリアクター巻線のインダクタンスは減少して通過する電流は増加する。即ちこの電流値は鋼板の厚みと対応しており、その一例を第8図に示す。検出出力



第8圖 連続磁気厚み計感度一例¹¹⁾

である交流電流値は数百 mA～数 A 迄増加させることが出来る。

高精度が要求される時は、同様のものを鉄板の上下に1組ずつ配置し、励磁直流線輪はそれぞれ直列に、交流線輪はプッシュプルに接続することにより、電源電圧変動による誤差を減少させ得る。又鉄脚と鉄板とを離しておき、鉄板が上下の鉄脚の中間部になく、上下に多少隔つても誤差が相殺されるので、放射線厚み計の独特な場であった非接触連続厚み測定が、磁気によつても或る程度可能になる訳である。但し空隙を大きくできない為、検出部の磁気差の点から熱間圧延時の鉄板厚み連続測定は無理の様である。この方式は2～3 mm 迄の鉄板の厚み

を1%位の精度で測ることが出来る。しかも1種の磁気増巾器の形式を備えており出力電流が大きいので、それを自動制御に流用出来る。(前項の交流型は出力電流が数 mA 以下であり、指示電流計も高感度の必要がある。)更に真空管、可動部分等が無いので長期使用に耐えることも特徴である。

IV. 放射線厚み計

β線、γ線、X線等放射線を使つて鋼材の厚みを測定する方法には、板に放射線を透過させて他面での到着量を計る透過法と、板からの散乱を計る散乱法とがある。これらは被測定面に検出部を直接触れないで寸法が大きな特徴で、又厚みをメーターで直読出来る、その出力を自動制御回路へも流用出来る。この方式は最近欧米で急激に進歩しており、日本でも研究がすすめられている¹²⁾¹³⁾。即ち本所加藤助教授他によりγ線(Co⁶⁰)、β線(Sr⁹⁰)による厚み計基礎データが既に求められており、又1953年8月の放射線同位元素講習会¹⁴⁾で同氏等と神戸工業の共同研究による厚み計が展示された。放射線厚み計が市販されるのも近い様で、今後の活用が期待される。この詳細は別の機会にゆずり、こゝでは簡単な紹介に止めたい。

§1. 透過法

X線、γ線が或る物体中を透過するときは、その一部は物体中で吸収される。その吸収量は放射線の波長、透過距離、材質によつて変わるが、一定波長の放射線の強度については次式の関係がある。(β線にもほぼこの式が適用される。)

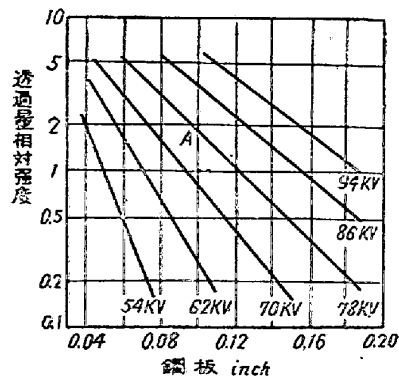
$$I_1 = I_0 e^{-\alpha x} \dots\dots\dots(1)$$

但し、 I_0 : 物体を透過する前の放射線強度

I_1 : 物体中を距離 x だけ透過したときの強度

α : 吸収係数

鋼板の厚みとそれを通つたX線の透過量の関係を、X線管陽極電圧をパラメータとして求めた例が第9図であ



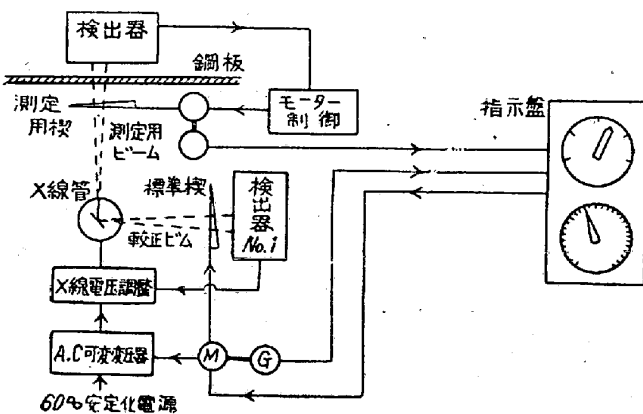
第9圖 鋼板厚みとX線透過量¹⁷⁾

る。この図の厚みの範囲ならばX線を使つて厚みを測れるが、鋼板の厚みが増すとX線管の陽極電圧をあげきれず、透過力の強い γ 線の方が有効になつてくる。又薄い場合は β 線が利用されている。即ち鋼板の厚み測定にあたり厚みの範囲に応じて適当な透過力の放射線を選ぶわけで、大体の区分は次の通りである。

0.025 mm 以下の鋼板の場合は透過力が弱くてもよいので、安定度が高く、しかも測定精度の高い β 線が主として使われている。0.025~1.25 mm 位はX線、 β 線双方とも有効だが、実際の装置としては β 線の方が小型で安価になる。1.25~50 mm の厚みになると β 線では透過力が不足なので、X線を使わざるを得ない。50mm以上になるとX線でも透過力不足となり、 γ 線を使うことになる。(この区分、文献²¹⁾による)

§2. X線厚み計

X線の透過量による厚み計では、検出されるX線量が鋼板の厚みだけでなく、発生されたX線量によつても変わり、そのX線発生量はX線陽極電圧及びX線管ビーム電流で左右される。例えば第9図A点について考えると、陽極電圧が10%低下することは鋼板の板厚が27%増加したのと同じ効果を検出管に与えることがわかる。ところが陽極電圧、ビーム電流を厚み測定に必要な精度で常に所定の値に保つことはかなり難しい。その誤差を避ける方法の1つとして、同一X線管から出るX線ビームを2つにわけ、被測鋼板と標準試料とに通して比較する方法を紹介する。これは鋼板の熱間圧延時の厚み測定用として General Electric 社で研究したもの¹⁷⁾である。



第10図 X線連続厚み計

第10図に示す如く、1つのX線管から出た2つのX線ビームの一方は厚みを測りたい鋼板を通つて検出部に入る。その行程中には図の様に厚み偏差測定用の鋼材の楔があつて、電動機で移動出来る様になつている。もう1つのX線ビームは鋼板の厚みの制定値を与える標準楔

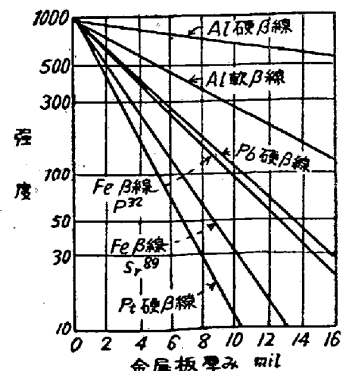
を通つて第2の検出部に入る。検出部には光電子増倍管があり、その外面に、陰極と向い合つて蛍光材料を薄く塗布してある。そこにX線が当たると微弱な光(波長4350 Å)を発生し、光電流となり順次増倍されて更に適当に増巾される。標準楔はその位置を予め測定すべき鋼板の厚みの制定値に定めておく。偏差測定用の楔は、双方の検出部からの出力が等しくなる様に電動機を使つた自動制御機構によつて移動し、平衡した位置は指示盤に示される。同時に最初の標準楔の制定値も指示盤上に出ているので、指示盤の二つのダイヤルから鋼板厚みの予定の値と、それと実際の値との偏差が1/1000 吋単位で読取れる。

特殊鋼材を溶製するのに使われる他の添加金属は、タングステンとモリブデンを除いてはX線の吸収係数は鉄と大差ない。18—8 不銹鋼は鉄との吸収係数の差は1%以内なので較正のときの零点調整で補正出来る。普通の珪素鋼板は7%の補正を要する。これらは指示盤のダイヤル上に鋼板の材質に応じて同心円状に目盛つておけばよい。圧延は1500°~1750°F 位の高温で行われるので、当然鋼板の吸収係数が常温と異り補正を要する。普通の炭素鋼で1000°F 当り1.6% 位であり、加工温度は或る範囲内に保たれているので補正は容易である。

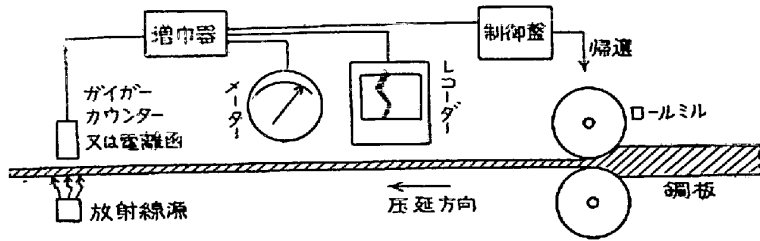
この例と別にX線源の不安定性を避ける方法の1つとして、同一電源で動作する2つのX線管のビームを被測定板と標準試料とに通して透過させる方式もある¹⁸⁾。

§3. β 線厚み計

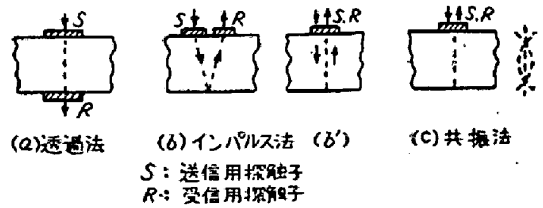
β 線を使う方式では、その線源の安定度がX線に較べて非常によいので、ビームを2つ使つて零位法にする必要はない。 β 線源としては Sr⁹⁰, P³² 等が使われる。これらはその崩壊にあつては γ 線を出さないで遮蔽等の問題も簡単になる。第11図¹⁵⁾に鉄その他の薄板の β 線透過量の例を示す。透過量の検出にはX線厚み計の検出部と同じく、蛍光面と光電子増倍管を組合せたものや、ガイガーミュラー計数管、電離箱等が使われている。



第11図 種々の金属の β 線の吸収



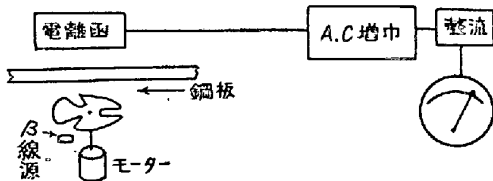
第12圖 放射線厚み計原理圖



第15圖 3種類の超音波検査法

その出力を適当な方法で増巾し、メーターを振らせるか或は記録させる。又必要に応じて、例えば第12図の如く、鋼板連続圧延に際し、ロールの間隔を制御する部分へその出力を帰還させた自動制御方式も行うことが出来る。

GM計数管等の出力は積分回路によつて直流に変換されるが、直流増巾回路は安定度の不足する場合があるので一定時間毎に自動的に較正を行い乍ら厚みを指示し、且つ記録する方式¹⁹⁾や、直流増巾回路を避ける手段としてβ線源と検出部との間に第13図の如くスリットのある回転円板をおき、検出された出力を交流増巾器に通す方式²⁰⁾等がある。

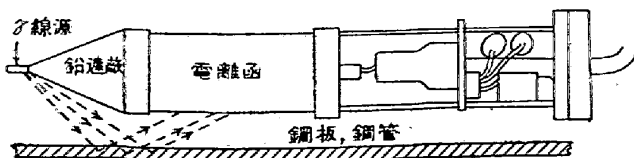


第13圖 交流増幅器を使った放射線厚み計

γ線厚み計の場合は、透過力が強大なため遮蔽等が難しくなるが、原理としてはβ線厚み計とほぼ同様である。これらは今後本邦でも大いに活用されるものと思われる。

§4. 散乱法

放射線源からの放射線が物体に当つて散乱する量はその物体の密度、厚さ等に関係することを利用する方式で、主として鉛板、真鍮板のメッキ層の厚さ、電線の被覆の厚さ等を測るのに使われている。鉛板等の板厚測定にも流用出来、透過法と違って被測定板の一方側だけに近ずき得ればよいのが大きな利点である。Penetron¹⁸⁾という名称で米国で市販されているものを紹介する。第14図の如く棒の中央部が電離函になつており、先端部には例



第14圖 Penetron 概略圖

えばラジウム等のγ線源が入れてある。その中間部にはγ線が直接電離函に入らぬ様鉛で充分遮蔽してある。厚みを測りたい板にこれを近づけるとγ線は板から散乱して電離函に入る。この検出部と板との相対位置が決つていれば、電離函の出力は板厚で左右されるので、その出力を増巾し、メーターを振らせる。検出部と被測定板の相対位置の点等で精度をあげ難いこと、γ線を使用するため人体傷害の対策を充分考えねばならぬこと等問題はあるが、片面だけから、しかも腐蝕して凹凸のある板でも測れる特徴があるので、化学工場等で配管の腐蝕状況を知るのに利用出来、肉厚1.25cm 迄±5%の精度で測ることが出来る由である。この原理のものは有効に使いこなせるに到れば、かなり広範囲の用途がある筈だが、今の所実用状況其他詳細は不明である。

V. 超音波厚み計

§1. 超音波による厚み測定法

金属材料の検査に超音波を利用すること²¹⁾は現在既にかなり普及しているが、それを厚み測定に利用する場合は次の如く、それぞれの方式によつて得失がある。

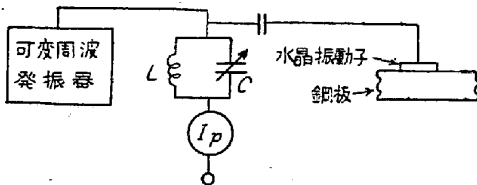
a) 透過法 第15図(a)の如く被検査体の1面から超音波を入射し、他端面に到着する超音波の強さを比較することにより、内部の部分的異常を検出する方法である。放射線厚み計と同じ原理なので受信側での超音波強度から厚みを知り得る訳だが、放射線に較べて超音波の金属中での吸収係数が小さいので、現在は厚み計としては使われず探傷器として時々使われている程度である。

b) インパルス法 戦時中に発達したレーダーと同様の原理と技術を使つて超音波のインパルスを金属中に往復させる方式で、(狭義の)超音波探傷器²²⁾として金属材料の内部欠陥の非破壊検査用として本邦でも製鋼、造船、車輛、機械等重工業方面で広く実用されている²³⁾⁻²⁵⁾。これを鋼板の厚み測定に流用した例²⁴⁾もあるが、板厚が3~4mm以上の場合に限られ、測定精度も次項の共振法に較べて悪い。又共振法より使用真空管数も多く、厚みを直読出来ない欠点もあるので、既にインパルス型の探傷器を持っている工場ですらそれを厚み測定に流用する場

合以外はこの方法は厚み測定には適しない。

① 共振法: 金属板中へ入射させる超音波の波長を連続的に変え、半波長の整数倍が厚みに等しくなると共振を生ずることを利用して、共振時の波長から板厚を求める方式で、探傷にも利用されてはいるが、厚み計として今後普及するものと思われるので以下に解説する。

§2. 超音波厚み計の原理

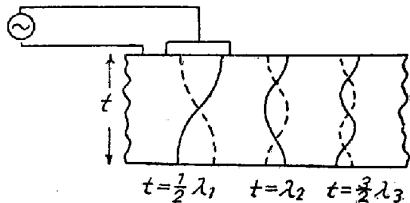


第 16 図 超音波厚み計原理図

第 16 図に示す如く真空管発振器の出力電圧を水晶振動子に加え、それを金属板に接着させると金属板中に超音波が輻射される。そのときの超音波の波長 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = v/f \dots\dots\dots(2)$$

但し v : 金属板中の音速度, f : 超音波の周波数。



第 17 図 鋼板内での超音波の共振

今、可変蓄電器 C を廻して発振器の周波数を変えると金属板内の超音波の波長が変り、第 17 図に示す如く半波長の整数倍が厚み t に等しくなつた時、即ち

$$t = n \cdot \lambda/2 \dots\dots\dots(3)$$

のとき板中に定在波を生じ、金属板は共振する。このときの振動エネルギーは発振器から供給されねばならず、そのために発振器の出力電圧は減少し、従つてプレートの直流電流 I_p は増加する。この電流増加を生ずる周波数は金属板中に生じた定在波の共振周波数であるから (2), (3) 式から板厚 t は

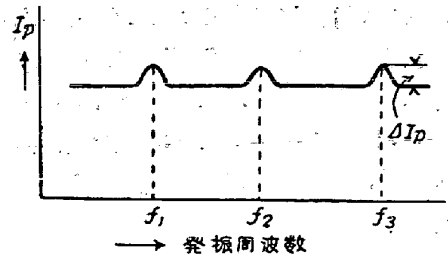
$$t = n \cdot v/2 \cdot f_n \dots\dots\dots(4)$$

となり音速度 v が既知ならば共振時の周波数 f_n とその共振次数 n を知れば厚みが求められる。実際には n は推定出来るが、又 f_{n-1}, f_n, f_{n+1} の如く相隣る共振周波数を求めればその差は何れも基本周波数 f_1 に等しいので

$$t = v/2 \cdot f_1 = v/2 (f_n - f_{n-1}) \dots\dots\dots(5)$$

から n が不明でも板厚を求めることが出来る。

第 18 図に示す如く発振周波数を変え乍ら発振管陽極



第 18 図 超音波厚み計の陽極電流と周波数

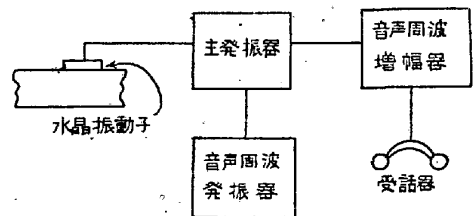
直流電流 I_p を観察すると、半波長の整数倍に相当する周波数毎に I_p が ΔI_p だけ増加する。従つて定在波が生じたことはこの ΔI_p の検出によつて知られる。それには次の方法がある。

- 1) ΔI_p を直接電流計で測る。
- 2) 音響型厚み計
- 3) ブラウン管直視型厚み計

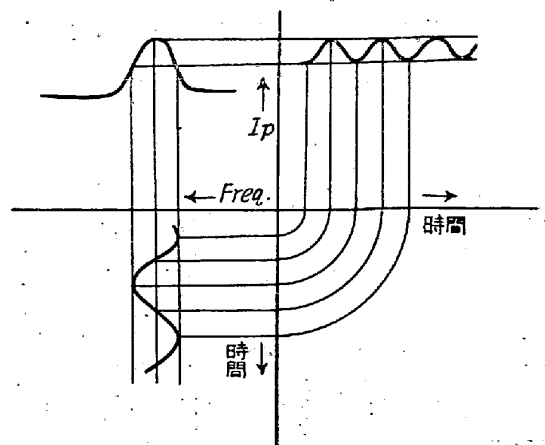
極めて条件の良い時は ΔI_p は I_p の 2~3 割に達するが、普通の厚み測定、特に腐蝕した面、パイプ等曲面からの検査の時は ΔI_p は微弱なので、1) の方式の場合主電流を別の電源で相殺させ変化分だけを感度の良い電流計で測らねばならず、現場向ではない。

§3. 音響型厚み計

この型の厚み計は第 19 図に示す様に、主発振周波数をあらかじめ可聴周波数で常に周波数変調しておき、可変蓄電器は手で廻して発振周波数を変える。定在波が金属板にのつた時には第 20 図に示す様に、陽極電流が可



第 19 図 音響型超音波厚み計構成図



第 20 図 周波数変調による音響型超音波厚み計の原理

聴周波数の2倍の周波数で変わるのでこれを増巾して受話器で聞き、定在波を生じた主発振周波数をダイヤルで読みとり、(4)又は(5)式から厚みを求める。主発振周波数は普通1~3 Mc位の範囲にとる。水晶振動子はX板(X Cut)を使い、その共振周波数は主発振周波数の上限以上に選ぶのが普通である。

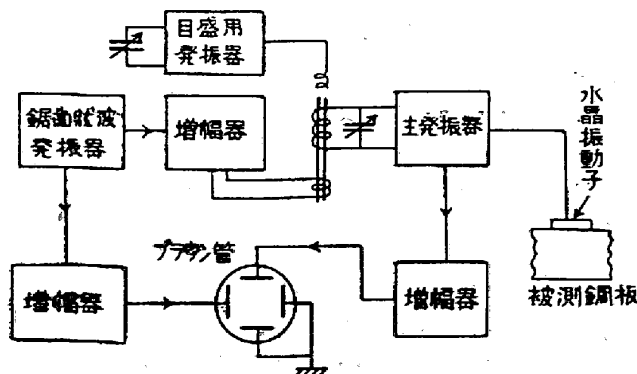
この種の方式は1944年にGeneral MotorsのW.S. ErwinがSonigageという名称で公表³⁵⁾し、又後にN.G. Bransonが電池を電源とした小型のものをAudigageとして発表した³⁶⁾。これらの記事が僅かずつ入手されるにつれて本邦でもこの種厚み計或いは更にそれを改良したものが各所で研究試作²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾され、特に東北大学田中氏により詳しい研究が行われた²⁹⁾。又この厚み計によつて水圧鉄管の厚みを実測し²⁹⁾、製鋼所で種々の材料について実用試験した例³⁰⁾もある。

§4. 直視型厚み計

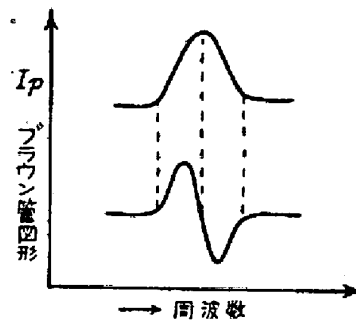
発振器の可変蓄電器を手で廻す代りに電動機で廻し、第18図の図形を直接ブラウン管上に画かせる方式、即ち前節Sonigageを自動化した様なものが同じ研究者によつて考案され³⁶⁾、Sperry社からReflectogage³⁷⁾として市販されている。又ほぼ同様なものがMagnaflux社からSonizonという名称で出されている。筆者等も始め音響型を試作し、現場で試用した結果、周囲の噪音に邪魔され易く、又感度が不足なので直視型厚み計の必要を痛感し、当時設計資料が全く不明なため基礎実験を重ねて試作改良し³¹⁾、更に厚みを直読する電気的目盛方式を考案して1951年頃から各所で実用し、音響型より種々の面で有効なことを確めたので、以下に略記する。

(写真も筆者等の装置による)

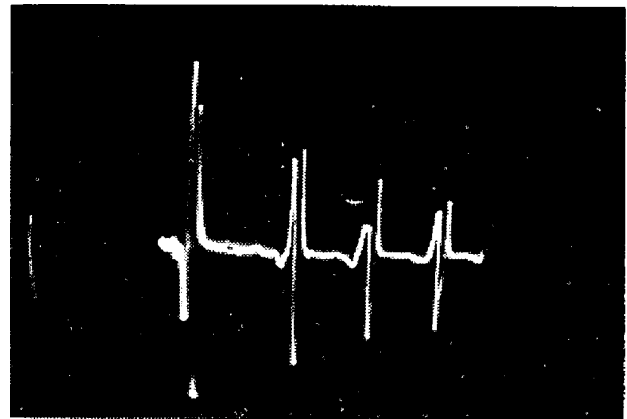
発振器の周波数を変えるには電動機は使わず、これを電気的に行うことにより、機械的な振動による故障を防いでいる。即ち第21図の如く発振器の同調コイル中に圧粉磁心を挿入し、これに励磁線輪を巻いて鋸歯状波を流すとそれに応じて発振周波数が変わる。 ΔI_p を増巾して



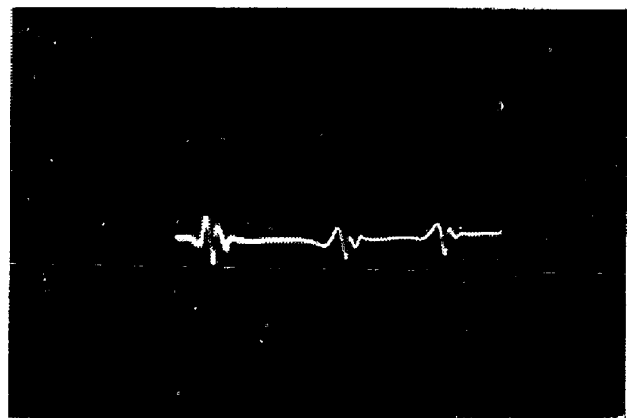
第21図 直視型超音波厚み計構成図



第22図 共振曲線とその微分波形



(a) 新しい鋼板 11.0 mm



(b) 腐蝕した鋼板約 8 mm

第23図 超音波厚み計による鋼板の厚み測定例

ブラウン管の縦軸に加え、横軸には鋸歯状波を加えるとブラウン管上には第18図の図形が現われる。実際には ΔI_p の生ずる位置(即ち周波数)の検出を明瞭にするため第18図の図形を微分して第22図の様な図形を画かせている。第23図に鋼板の厚み測定を行った場合のブラウン管図形の写真例を示してある。(a)は板厚11.0mmの新しい鋼板である。黒皮を被つたまゝだが、新しいので共振が極めて明瞭に出ている。(b)は腐蝕のため表面の凹凸の甚しくなつた鋼板である。凹凸のため板厚は明瞭には示せないが約8mmである。共振図形も(a)に較べて弱く、又巾広くなつている。(5)式の如く相隣る共

振周波数の差、即ち図形上での共振点の間隔が厚みを示し、板厚と共振周波数とは逆数の関係にあるため、厚い方が共振点の間隔が狭い。即ち第 23 図の場合の如く掃引する周波数巾を同一に保つておけば厚い方が共振点が多く現われる。(この点がインパルス型超音波探傷器を使つて多重反射によつて厚みを測る場合と逆である。)

幾つかある共振点の 1 つに着目すれば厚みの変化に応じて共振の生ずる位置はブラウン管上を左右に移動するので、目盛を書いておけば直接厚みを読取ることが出来る。Reflectogage 等はこの方式を採用している。しかしこの方法では主として基本共振周波数を使うので 1 つの測定範囲は厚みの比を 1:2 位迄しかとれず、1 例をあげれば鋼材の厚み 0.025 in. から 0.30 in. (0.64~7.6mm) 迄を 7 種の周波数切換範囲と水晶振動子によつて順々にほぼ 2 倍の厚み範囲に分けて測定している³⁹⁾。(それ以上の厚みは高調波を利用して 4 in. 迄測れる由) 又この目盛板による方法では電源電圧の変動によりブラウン管上の図形が目盛板に対して移動すると誤差の原因となる。

これらの不便を除くために第 21 図の装置では電氣的目盛方式を採用している。即ち目盛周波数発振器によりブラウン管上に共振図形と共に目盛周波数の高調波を出し、共振点と重なる様に目盛周波数のダイヤルを廻せば、ダイヤル上に共振周波数即ち厚みが読み取られる。この目盛周波数を変調しておけば厚みの標準値に対して許し得る偏差の範囲(例えば $\pm 3\%$ 、 10% 等)の両限だけを目盛に出すことが出来るので、例えば鋼板の厚みが或る範囲内にあるか否かだけを知りたい場合等はこの電氣的目盛方式が便利である。

§5. 超音波厚み計実用例

1) 板厚測定

平面或は曲率の小さい板ならば、腐蝕が甚しくない限り黒皮のままの鋼板でも、軽合金板、ガラス板等も 2% 以下の誤差で容易に板厚を求め得る。(5)式を使うので、その物体中での音速が必要だが、不明ならば板の端部で板厚を超音波厚み計とマイクロメータで測定し、音速を逆算しておけばよい。筆者等が実用した鋼板厚みの範囲は 0.3mm~15cm 位である。(それ以上でも必要とあれば測れるが実用性が少いと、既に普及している探傷器が使える。)

なお圧延機から流れ出る軽合金板の板厚、被鉛機から出るケーブル鉛皮の肉厚等の測定を試みて好結果を得たが、被測定板の温度が高いと探触子が使えなくなるので鋼板の熱間圧延時の連続測定等では板に直接触れなくてすむ放射線厚み計が有効である。

2) 鋼板の腐蝕度検査

船体外板、化学薬品タンク、ボイラー等大きくて同一個所の両面に近ずき難いものゝ厚み測定、腐蝕度測定等³²⁾に極めて有効である。但し表面、裏面の凹凸が甚しいと測れぬ場合もあり、ボイラー等保温材で覆われている場合、それを取除かねばならぬ。(放射線厚み計ならば或る程度可能である。)



第 24 図 超音波厚み計による薬品タンクの腐蝕度測定状況



第 25 図 電磁石で吸着する探触子

第 24 図は薬品タンクの厚み測定の 1 例で、中央の白い箱がブラウン管型超音波厚み計である。高さ約 4 m の個所(梯子の上端)を測つているところで、この時の厚み計と探触子をつなぐケーブルの長さは約 6 m である。第 25 図は鋼板の厚み測定用に設計した電磁石型探触子³⁹⁾で、電磁石内に探触子を組込んであり必要に応じて開閉器を開けると鋼板面に吸着するので、作業者の疲労が減り、測定、写真記録等に便利である。

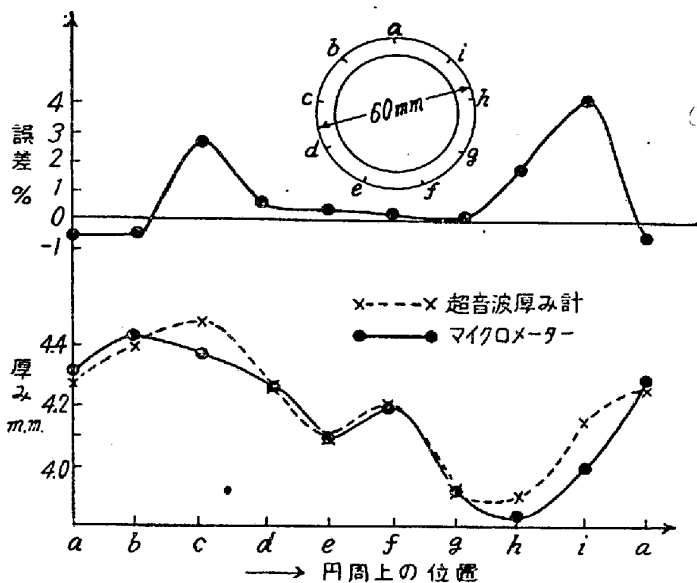
3) 水圧鉄管の腐蝕検査

発電所水圧鉄管の厚み測定の場合は周囲の騒音が比較的少いので、乾電池で動作し、携行に便利な音響型厚み

計が使える。しかし裏面の凹凸の甚しい場合には感度が不足するので測定の容易なブラウン管型の方が有効である。

4) 鋼管の偏肉測定

製管工場で肉厚の偏心を早期に発見したいので測定を行つた。曲率の大きいものは共振波形が複雑になつて精度が落ちるが、直径の細い方では10mm φ(肉厚1mm)、厚肉物では外径51mm、内径21mmのパイプ迄測れている。第26図は直径6cmのパイプの周りを(マイクロメータの届く端部で)20mmおきに測定し、マイクロメータによる厚み測定値と比較した例である。



第26図 超音波厚み計による鋼管偏肉測定例

又高圧ガス容器(ボンベ)は直径が大きいので偏肉測定は容易であり、長期使用後の内面腐蝕量も、特に凹凸の激しくない限り測定出来ている。

5) 鋼板ラミネーション検出³⁴⁾

鋼板の板厚を測つていると、大部分の箇所ではブラウン管上に明瞭な共振が得られるにもかかわらず、一部分正常な共振の得られぬ箇所のあることがある。これは板内に異常があるために共振が生じないのであつて、明瞭なラミネーションがあれば、そこ迄の厚み即ちラミネーション迄の表面からの深さがブラウン管上に現われる。これらの検査は板が厚ければ超音波探傷器でも出来るが約5mm以下だと厚み計が必要である。

VI. 磁気、超音波及び放射線厚み計の比較

1) 放射線透過法による厚み測定は鋼板の両面に装置が必要なのが欠点だが、鋼板に直接接触しないですむ点

る鋼板、特に熱間圧延の場合等に極めて有利である。厚みに応じてβ線、γ線、X線の使い分けが必要で、X線の場合は電源安定化対策、β、γ線の場合は崩壊による補正と線源の補給が必要である。

2) 超音波厚み計は鋼板の片面だけに接し得れば良く、可搬性もよいので鋼板、パイプ等の製造時の厚み測定のみならず、タンク、船体外板等の腐蝕度測定に適する。

3) 磁気厚み計も鋼板の片面だけに接し得ればよく、可搬性もよいが厚肉用のものは重量の大きいのが欠点である。小物、パイプ等は測れないが、超音波厚み計では測れぬ様な表面の凹凸の甚しい場合でも測定可能である。連続型ならば流れる鋼板の厚み直読も出来る。

4) 放射線散乱法による厚み計は、面の片側だけに近ずき得ればよく、小型で、パイプ等でも測れるが、測定精度が悪く、又γ線であるため人体障害の対策を必要とする。

VII. 結 言

鋼板、鋼管の厚み測定は部分的には古くから容易に行われてきたが、最近各方面の技術の進歩に基いてその可能範囲、測定精度等が急速に進んできた。それらを網羅するには関連する分野が広すぎるので筆を尽し得なかつた点も多い。参照文献によつて本文の不備を補つていたべく、目ぼしい文献にはその題目もかゝげた。

厚み計に関する研究を終始御指導下さる本学高木昇教授、資料を提供された本学加藤正夫助教授、電気試験所内藤正氏、富士電機 K. K. 中島吉雄氏に深謝すると共に、計測日本の速かなる実現を夢みつつ筆をおく。

(昭和28年11月審稿)

文 献

- 1) Pfler: 機械量の電氣的計測(岡譯)(1953年), コロナ社.
- 2) B. Carlin: Ultrasonics, 1949, McGraw-Hill.
- 3) 牧野, 新井: 鐵管腐蝕の測定, 電気試験所彙報, (1950.8) 14, 8, pp. 479~484; 電気三學會連合大會(1950.4) F. 39.
- 4) E. S. Sampson: Photoelectric Width Gage for Hot-Strip Steel Mills, electronics (1953.3) 26, 3, pp. 114~118.
- 5) A. B. Stevenson: Magnetic Comparator Metal Thickness Testor, J. Sci. Instr., (1938) 15, pp. 156~158.
- 6) 高橋, 杉浦, 南井: 鐵板厚き磁氣測定器, 電試

- 彙報 (1940.12) 4, 12, pp. 799~809.
- 7) 内藤, 井元, 木下: 磁氣的鐵板厚さ測定器, 電試彙報, (1950.12) 14, 12, pp. 746~754.
- 8) 水壓鐵管の厚み測定, 電試 = ヌ = ス, (1950.2) 14, 2, pp. 6~7.
- 9) 鐵板の厚み測定器, 電試 = ヌ = ス (1950.10) 14, 10, pp. 5~7.
- 10) 内藤, 木村: 交流式鐵板厚さ測定器, 電氣三學會連合大會 (1952.10) 2—7, p. 51.
- 11) 中島, 小林: 鐵板厚み連續測定器, 同上, (1952.5), 2—37, p. 78.
- 12) 押田, 寺畑外: 放射能測定裝置, 神戸工業技術, (1951.5) 10, pp. 5~19.
- 13) 加藤: 放射性同位元素の工業的應用, 生産研究, (1952.3) 4, 3, pp. 98~103.
- 14) 加藤: (題名同上), Radioisotopes, (1953.8) 2, 2, pp. 38~47.
- 15) O. J. M. Smith: Beta-Ray Thickness Gage for Sheet Steel, electronics (1947.10) 20, 10, pp. 106~112.
- 16) N. N. Lundahl: X-ray Thickness Gauge for Cold-rolled Strip Steel, AIEE Trans. (1948) 67, p. 83; Westinghouse Eng. (1948.3) pp. 42~43.
- 17) C. W. Clapp, R. V. Pohl: X-ray Thickness Gauge for Hot-Strip Rolling Mills, AIEE Trans. (1948) 67, pp. 620~626; E. E. (1948.5) 67, 5, pp. 441~444.
- 18) J. W. Jorvine, Jr.: Industrial Applications of Radionuclides, Analy. Chem. (1949.3) 21, 3, pp. 364~368.
- 19) J. R. Carlin: Radioactive Thickness Gage for Moving Material, electronics, (1949.10) 22, 10, pp. 110~113.
- 20) C. W. Clapp, S. Bernstein: Noncontacting Thickness Gauge using Beta Rays. E. E. (1950.4) 69, 4, pp. 308~310; G. E. Rev. (1950.3) pp. 31~34.
- 21) C. W. Clapp, S. Bernstein: Thickness Gaging by Radiation Absorbption Methods, G. E. Rev. (1950.11) 53, 11, pp. 39~42.
- 22) 高木, 丹羽: 超音波探傷器, 電氣學會誌(1949.9) 69, 731, pp. 290~294.
- 23) 高木, 丹羽: 材料試験 (1952.12) 2, 3, pp. 14~17.
- 24) 岡崎: Reflectoscopeによる板厚測定, 學振超音波探傷法協議會資料, 19委 2455 (1952.1.23).
- 25) 高木, 丹羽: 非破壊検査, (1952. 秋) 1, 1, pp. 13~16, (1953. 春) 2, 1, pp. 15~16.
- 26) 田中: 日本音響學會講演會豫稿 (1949.5) pp. 55~59.
- 27) 高木, 丹羽, 佐下橋: 生産研究, (1950.3) 2, 3, p. 95.
- 28) 井元: 電試彙報, (1951.11) 15, 11, pp. 939~942.
- 29) 田中: 東北大科學計測研報告 (1951.8) 1, 2, pp. 85~127.
- 30) 野坂: 學振超音波探傷法協議會資料 19委 2754 (1952.12.25).
- 31) 高木, 丹羽, 石井: 生産研究 (1951.6) 3, 6, p. 227.
- 32) 高木, 丹羽: 電氣三學會連合大會 (1952.10) 2—8; 生産研究 (1952.4) 4, 4, p. 145.
- 33) 丹羽, 佐下橋: 電氣通信學會超音波專門委員會資料 (1952.11.22).
- 34) 丹羽: 非破壊検査研究會資料, NDI-2005 (1953. 1.16); 學振超音波探傷法協議會資料, 19委 2769 (1953.2.10).
- 35) W. S. Erwin: Sonigage, Iron Age, (1944. 11.9), 154, pp. 59~61; Scient. American (1945.2) 172, 2, p. 94; Steel, (1945.3.5) 116, 10, p. 131.
- 36) W. S. Erwin, G. M. Rassweiler: Automatic Sonigage, Iron Age, (1947.7.24) 160, pp. 48~55.
- 37) W. S. Erwin, G. M. Rassweiler: Reflectogage, Rev. Sci. Instr. (1947.10), 18, 10, pp. 750~753, p. 804.
- 38) N. G. Branson: Portable Ultrasonic Thickness Gage, electronics (1948.1) 21, 1, pp. 88~92.
- 39) B. Carlin: Supersonic Resonance Testing, Product Eng. (1949.12), 20, 12, pp. 122~123.