β 線によるスライバむら計測上の二、三の問題点*

川 上 達 也**

β 線を利用した厚み測定が工学への応用技術として起ったのは、1951年米国においてである。しかし歴史的にはかなり古いもので、1915年にすでに Varden によるこの種の研究が行なわれた。これは種々の厚さの紙、アルミ、スズ、白金フィルムを透過した β 線の強度を求めたものである。ただしこれに用いられた線源は天然放射性物質である。このようにフィルムやシートの単位面積当たりの重量（以下基本重量と呼ぶ）を測ろうとする独創的な考えは、かなり以前から技術者の頭にあった。

β 線を利用したスライバむらの計測といっても、その原理においては一般の β 線厚み計と異なるところはない。特に薄いもの、軽いものを対象とした β 線厚み計でも、わが国ですでに数台が実際に工場で利用されている現状で、紙工業を筆頭に数々の研究が発表されている。これらについて計装という面から概観してみると

(1) **パスラインの変動** これは線源と検出ヘッドとの空隙を被測定体が走行して連続計測されてゆくとき、被測定体が空隙での相対位置を変動すると、重量指示の上に誤差を生じる。たいていの計器ではこの測定溝における位置が決められている。その辺りでは $\pm \frac{1}{8}$ in の変動に対し重量指示のうえに $\pm 1 \sim \pm 0.3\%$ である。基本重量の軽いスライバのようなものでは大きい誤差の原因となる。

(2) **容積効果による影響** 同一重量でも容積が比較的自由に変化しやすいもの（たとえば綿塊、有孔物質）では、容積が変化するために起る誤差が生ずる。しかし従来までの研究ではほとんど問題とされなかった。これは主として紙工業における計装研究では容積変化といっても、さほどひどくなかったためと思われる。

(3) **有効測定面積の決定** 線源と検出器間で実際に測定にあずかる被測定体の領域を計器にそくして決定することで、これの決定は較正曲線を作るとき大きい誤差を生ずる。特に測定領域の外周の部分で β 線の散乱³⁾を起して重量指示の上に負を生ぜしめる領域がある点を考慮して有効測定面積を決めなければならない。

(4) **静電気の影響** 紙工業でも、繊維工業でも生産工程中機械部分との摩擦によって、被測定体が荷電される。 β 線計器では電離箱やその他ユニットは静電気的影響には完全にしゃへいされているので考えなくとも良いように思われるが、これは他に重要な問題を含んでいる。

それにはつぎに述べる2つの面からの影響がある。

(a) 被測定体が正に帯電すると基本重量は減少し、負に帯電すると逆の影響がおこる。これを実例で説明すると、帯電ウェブが20 000 V の電位を持ったとすると、これによってつくられた電界は、20 000 eV のエネルギーで加速されることになる。エネルギーを増加した電子は物質の透過力を増大して、ウェブが正に帯電していたとすれば、これを透過して電離箱に入射する粒子数は多くなり、見掛け上基本重量が低い値をとる結果となる。たとえば²⁰⁴Tlの最大エネルギーは0.77 MeVであるが、これに比較すると20 000 eVは小さいというものの、 β 線は1つのエネルギー分布を持ったものであり、その粒子の実質的エネルギーははるかに小さいものであるからである。ウェブを透過した後は逆に電界のため粒子の速度は遅くなり、検出器窓に到達したときは20 000 eVを失うが、この損失は粒子がすでにウェブを透過してしまった後のことであるから重要な問題とはならない。

(b) 第2には帯電によって生じた電界のために粒子経路が屈曲されるために起る影響である。この場合も正に帯電すると粒子を引きつける結果となって、電界が存在しないときに比べて電子経路を曲げ検出器窓の端の方にそれるべき電子が検出器に入る機会を増大して、見掛け上基本重量が少なく計数される。このような2つの理由から、静電気による誤差は無視することができない。

(5) 付近に存在するモータ、コイル、トランス、マグネット等による浮遊磁界によって β 線計測上に指示誤差を与える。これを除去するためには、その原因となるものを遠方に離すとか、磁氣的にしゃへいをほどこすことになる。

(6) **周囲温度、気圧による影響** 周囲温度の上昇や

* Some Problems on the Measurement of Sliver Irregularity by β -ray.

** T. Kawakami, 工業技術院繊維工業試験所

気圧の低下が測定空隙の空気密度の減少を来し、そのために基本重量の指示の上に誤差を生じる。温度が比較的急激に上昇するときは、大きい基本重量の減少をおこす。一例として米国の各メーカーの β 線計器を見ると、 $79.5^{\circ}\sim 98.5^{\circ}\text{F}$ まで 1 hr の間に上昇させた場合は 1.5~3.5% の誤差、 $77.5^{\circ}\sim 91.5^{\circ}\text{F}$ まで 3 hr かかってゆっくり上昇させたときは、1.3~2% という記録がある。とくに 10 mg/cm^2 程度で空気密度の変化に対する影響が大きくなるといわれている。これには 2 重チャンネル方式を採用して測定空隙部分の密度変化をキャンセルし、電離箱は密閉して防ぐ。

(7) その他電源電圧、周波数による影響 ドリフト揺動等により誤差を生じる。これらは計器の構成によっても異なるが、一例では 15V 変化に対し軽いき 1%、中程度で 0.2%、大のとき 0%、また $\pm 0.1\text{ c.p.s.}$ の変化で 0.25~0.2% という記録もある。

以上掲げた問題が β 線計器を現地的に使用するとき起る計装研究の内容であるが、これらの問題はほとんどが軽いきもの、薄いものを測定するときほど大きい誤差原因となるから、 β 線によるスライバむら計測も、以上の問題をないがしろにすることができない。

しかし、これらの問題は β 線利用計測一般として考えられるものも多く、すでに各方面でも研究されてきた。これらのうち、スライバむらを透過型を用いて計測するとき、とくに問題となるものを取り上げることとする。

従来 β 線計器が取り扱ってきた被測定体中、スライバがとくに他と異なっている点は

① 変形が自由である

② 一定重量に対して容積変化が著しい

という 2 点からスライバ自体のバネ性と、これを一定の形状に案内して測定する測定溝の形から種々の問題がおこって無難作に測定を行なうと大きい誤差を生じる。

以下われわれの行なってきた研究の結果を基にして話を進めてゆくことにする。

(8) 測定溝の問題 測定溝は U 型とし、U 型の底面に沿ってスライバを案内して測定を行なうことが望ましい。この場合当然のことであるが、U 型の幅を狭くすれば感度は上昇し、小さいむらを鋭敏に測定することになるが、検出器として電離管を用いるときは、U 型の幅を狭くすることから当然 β 線粒子の電離箱への入射線量が減少する。そのために 1 つには線源による β 線の統計的変動が問題となり、さらに重大なことは、イオン電流の減少が、それ以後の計器の構成に無理をきたす。

第 1 図は鉄製 U 型スライバ案内溝 3 種(幅 14.6, 11.0,

(第 1 図) 線源: ^{204}Tl 5 mc, テトロン束 3 mg/cm/1 本, 溝幅による感度の差異

(第 2 図) 溝幅変化に対する感度の差異

8.1 mm) を用い、試料としてテトロン繊維束 (1 本当たり 3 mg/cm) を順次溝中にそう入していったときの透過 β 線の G. M. 管に入射した計数率 (c.p.m.) の減衰曲線を片対数目盛に表わしたもので、それぞれのこう配はその溝の感度を示すことになる。束 1 本に対してこれを求めると

$$U_{14.6} \text{ では } \log 40\,200 - \log 16\,660/17 \text{ 本} = 0.0518$$

$$U_{11.0} \text{ では } \log 39\,340 - \log 15\,120/13 \text{ 本} = 0.0731$$

$$U_{8.1} \text{ では } \log 37\,400 - \log 13\,650/10 \text{ 本} = 0.102$$

これから溝幅に対する感度曲線を描くと第 2 図のようになる。ここで注目されることは、溝幅が 15 になる以前に感度がすでに 2 倍になってしまうことは、一見不合理に見えるが、この点について後に容積効果のところで

(第 3 図) 溝壁の比重が異なるときの計数の違い

考えることにする。その他これら溝型に対するイオン電流量の測定など関連事項については、『原子力工業 5, 4, (1959)』を参照されたい。

また測定溝はスライバを案内する壁を有し少なくとも 20 mm 以上の高さを持たせる必要があるが、この壁による散乱 β 線、制動放射が計数率に及ぼす問題については、鉄製 (比重 7.8)、エポキシ樹脂製 (比重 1.3) の 2 種を用いて行なった結果によると、第 3 図のごとく、実際上いずれを用いても差しつかえない。むしろ鉄製壁による散乱 β 線は計数率に關与して入射 β 線量が増大するため望ましいといえよう。

(9) 容積効果が計数率に及ぼす影響 カード スライバでも、トランペットから紡出された直後では、十分開いていて溝に案内することが容易であるが、これをケンスなどに入れて、長いこと放置するとかなりつぶれてしまう。これら 2 種の比較をそのまま β 線計器で測定することは不可で、極端な場合には 25% 近くの誤差におよぶ。これが容積効果である。したがってこのような形で 2 つのスライバを比較することは全然不可能である。よって β 線によるスライバむら測定は計装には有利であるが、測定器として用いてはならない。第 4 図はあらかじめ用

(第 4 図) 密度によってかなりの測定誤差を生ずる

意したテトロン束 3 種 (11.1, 21.0, 30.1 mg/cm) を鉄製溝 $U_{8.1}$, $U_{11.0}$ に個々にそう入し、はじめ溝一杯に詰め (溝高さ 25 mm) 容積大、密度薄、にして計数率を読み取り、後これに圧力を掛けて一時的に十分につぶした状態 (容積小、したがって密度大) で同様に読み取りこれをあらかじめ用意したテトロン束による校正曲線から重量指示の誤差を算出した結果である。

	$U_{8.1}$	$U_{11.0}$
30.1 mg/cm	11%	13%
21.0 mg/cm	15%	20%
11.1 mg/cm	23%	25%

第 4 図は密度の薄いものほど誤差を生みやすいことを示している。たとえば 21.0 mg/cm の繊維束を U 型 11.0 mm 幅、高さ 25 mm の溝に一杯に広がって案内された

とき (密度 8×10^{-3}) と、十分に圧されて計数されたときで 20% の誤差となる。なお図に示された直線と横軸との交点 (約 25×10^{-3} g/cm³) の当たりで溝に案内された繊維束が溝一杯となり圧縮できぬ状態と一致している。

以上の結果からすると、 β 線によるスライバ太さ計数率 (N) は、スライバの単位長さ当たりの重量 (W) を一義的に結んでいると考えられない。これに対する立ち入った考察は除いて結論だけ述べるなら、体積を一定に保って密度変化計数法、すなわちスライバを一定容積中に導いて計測するのが最も無難な計測法といえる。

(10) パスラインと容積効果について 従来パスラインの変動はやかましく論議されてきた。それに反して容積効果はほとんど問題とされず、全く別のもののごとく述べられてきたが、われわれの研究の結果からするとほとんど同一問題であるとみてよいことがわかった。すなわちパスライン変動位置と容積中心 (ただし一定密度) とを合致させるならば、容積効果はパスライン変動とみなしてよいのである。第 5 図はその結果を示した実験例である。これには第 6 図のごとき溝中にテトロン巻縮束 5, 7 本をそう入し、はじめ溝中目盛 24 mm 一杯にして計数し以後順次 20, 16, 12, 8 mm と圧して容積を減少さ

(第 5 図 a) 線源と検出器窓との距離を 40 mm としたとき。実線はテトロン一定重量 (I は 15 mg/cm, II は 21 mg/cm), 点線は 0.1 mm 厚さ A l 箔,

(第 5 図 b) 線源と検出器窓との距離を 60 mm としたとき。実線はテトロン一定重量 15 mg/cm, 点線は 0.1 mm 厚さ A l 箔,

バスラインまたは繊維束重心位置 (mm)

(第5図c) 線源と検出器窓との距離を 80 mm としたとき、実線はテトロン束一定重量 (15 mg/cm), 点線は 0.1 mm 厚さの Al 箔

バスラインまたは繊維束重心位置 (mm)

(第5図d) 線源と検出器窓との距離を 100 mm としたとき、実線はテトロン一定重量 (I は 15 mg/cm, II は 21 mg/cm), 点線は 0.1 mm Al 箔

せて計数した。次に 0.1 mm アルミ箔を溝中 24, 20, 16, 12, 8, 4 mm の位置に置いて計数し、テトロン束重心、アルミ箔バスラインを横軸、その計数率を縦軸に取ったときの曲線である。 L の値は線源、検出器窓の距離である。

(第6図) スライバ案内溝

(11) 容積変化の著しい物質に対する特性関数の補正とU型スライバ溝の適応性 以上述べてきたことからスライバのごとく、容積変化の著しいものについては、一般にいわれてきた β 線の物質による吸収法則

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

(ただし N は計数値, N_0 は基本重量 0 のときの計数値, x は基本重量, μ は吸収係数)

は成立せず、ここに容積変化分に対する吸収がさらに加わらなくてはならない。

いまU型溝中底面に厚さを持たず、基本重量が x mg/cm² の被測定体を置いたときの計数率 n は

$$n = N_0 e^{-\mu x}$$

つぎにこの被測定体が容積変化を生じ、その重心位置が溝中底面より y の位置まできたとき、すなわち底面より $2y$ まで容積が広がったときの計数率を改めて N とすると

$$N = n e^{-\epsilon y} = N_0 e^{-(\mu x + \epsilon y)}$$

となる。ここで ϵ は被測定体が重心移動を起したための係数を示すからこれを線吸収係数と名づける。

(第7図) 線吸収係数と L の関係

このように特性関数が変わってくることに注目するとつぎのことがいえる。

もしスライバの重量変化が同時に重量と比例して容積変化もおこすとすれば、上面自由のU型の溝を採用することによって測定感度を上昇させることができる。

²⁰⁴Tl の質量吸収係数は 0.023 cm²/mg 程度である。線吸収係数は第7図に示すように、線源—測定溝—検出器の相互位置で異なるが、0.017 1/mm ($L=100$ mm) ないし 0.0073 1/mm ($L=40$ mm) 程度でかなり大きい比率で線吸収係数が計数上にひびいてくることがわかる。

以上結論としては、U型溝を採用すれば感度の上昇は望めるが、精度は幾分粗雑となる。

これに反して、境界溝 (たとえば円筒中にスライバを案内するとき、あるいはソ連綿研で行なっている三角⁽⁴⁾構) を採用するときは、感度はU型に劣るが、精度の上昇が望める。いずれにしても β 線を利用したスライバむらの計測は計装としてのみ有利で、測定器としては不向きであるといえよう。

- 注 1) Rutherford, E., Chadwick, J., Ellis:
Radiations from Radioactive Substances
2) 第3回アイソトープ会議
3) 原子力工業, 1959-6~12, 測定講座
4, 5) 同上
6) ラジオアイソトープと繊維工業 (1956)