

制動放射X線の吸収によるスペクトル変化

——固体半導体検出器による測定——

Modification of the Shape of Bremsstrahlung X-ray Spectrum by Absorption

片岡 邦郎*・山沢 富雄*・本間 禎一*

Kunio Kataoka, Tomio Yamazawa, and Teiichi Homma

1. まえがき

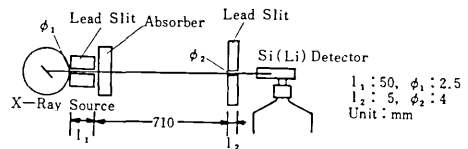
X線透過検査に用いられるタングステン対陰極からの制動放射X線は、広範囲の連続スペクトル分布をもち、銅板等の被写体透過の際の吸収、散乱によって、軟X線成分は、より強く減弱され、スペクトルの最大強度の部分は、管電圧によりきまる最短波長に漸近する。

従って、このようなX線の被写体透過能力—X線線質—は、RIからの γ 線のように、単一のエネルギー値では表示しにくい。普通は、X線の被写体吸収曲線から求めた線吸収係数を、単波長として換算した実効エネルギーで表示しており、とくに吸収曲線の直線域からの実効エネルギーで、そのX線の線質を代表させようとする提案もなされている¹⁾

しかしこのような制動放射X線の実効エネルギーによる表示が、実際にどのようなスペクトル変化に対応するものか、十分わかっている訳ではない。透過写真に用いられるX線が短く、スペクトルの分光分析が、困難であったためであるが、最近NaI(Tl)のようなシンチレーション計数管や、Si(Li), Ge(Li)のような固体半導体放射線検出器(Solid State Detector)が開発され、そのX線エネルギーの高分解能と、多チャンネルの波高分析器とを組合せて、低、中、高エネルギーの広範囲のX線や γ 線のスペクトルの精密な分析が可能となり各種の研究に利用されている。透過検査ではNaI(Tl)を用いて、 γ 線の被写体透過によるスペクトル変化を測定した報告がなされたが²⁾、S.S.D.によるものはまだないようである。

最近われわれは、理学電機株式会社で昨年開発した、200KVP微小焦点X線発生装置と、Si(Li)のS.S.D.を借用して、銅、アルミニウム等の透過にともなう、制動放射X線のスペクトル変化を測定でき、若干の知見をえられたので報告する。

2. 実験方法、装置



第1図 X線スペクトル測定配置図

実験装置の配置は、第1図に示すように、従来被写体吸収によるX線線質の測定に行われている方法によった。

X線発生装置：200KVP微小焦点定電圧X線発生装置。W対陰極，焦点寸法； $0.15 \times 0.15 \text{mm}^2$ 。電圧安定度； $\pm 10\%$ 入力変動で、 $\pm 0.15\%$ 。

計測器：Si(Li)S.S.D.；ORTEC MODEL452，Si厚さ3mm，波高分析器；KEVEX—RAY3300—1024チャンネル。

被写体：銅板1～10mm，アルミ板2～50mm

管電圧：90KVP—銅板，60KVP—銅板，アルミ板。なお測定した管電圧では、Ge(Li)の方が、計数効率などで適しているが、他工場で使用中のため、Si(Li)を用いた。そのため測定を90KVP以下とした。また被写体厚さ増加にともない、透過X線強度は著しく減少するが、計数の便利のため、管球のバイアス電圧を減らして、X線強度を増大させた。

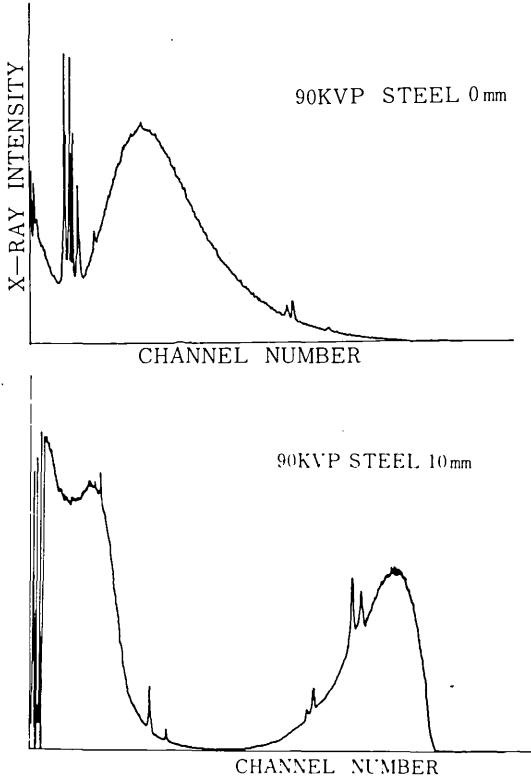
3. 測定結果

3.1 90KVP—銅板

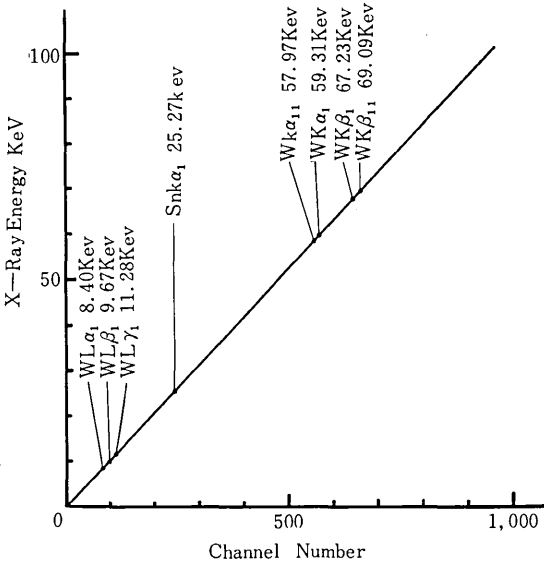
被写体なしと銅板を入れたときの、X線計数を同時記録したまゝのX線スペクトル曲線を第2図a, bに示した。X線の窓は、Be箔なので、2図aの被写体なしは、対陰極から発生したまゝの白色X線スペクトルにほゞ近いと考えられ、白色X線の山と高エネルギー側の巾広い裾野とWの特性X線などが認められる。こゝでチャンネル数(波高値)をX線エネルギー値に換算し、また両者の対応の直線性を確認するため、上の特性X線のエネルギーと、該当するチャンネル数をプロットして、各点を結ぶ直線を求めた。第3図。各特性X

* 東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報

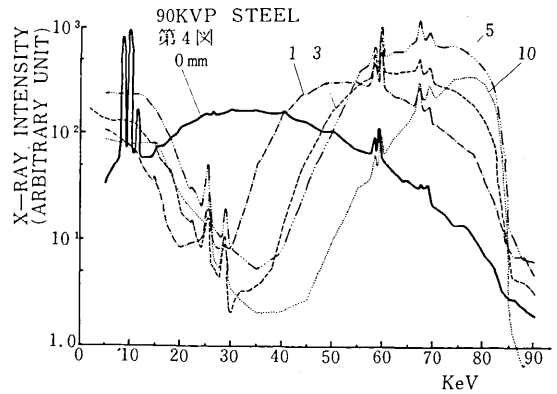


第2図a,b 測定したまゝ (計数未補正) の透過X線スペクトル, 90KVP, 鋼板0~10mm



第3図 X線エネルギーと波高値 (チャンネル数) の更正直線
線値は、非常によく直線に沿っており、エネルギーと波高値の対応が正しいことを示している。実際の換算には、最小自乗法により係数を決めた一次式を用いた。

次に各X線エネルギーでのみかけの計数値を、Si (Li) 検出器のX線エネルギー-VS. 光電吸収+コンプトン散乱による計数効率との更正曲線⁴⁾(計算値)により、入射X線の計数値に換算し、X線スペクトル曲線を描いた。S. S. D. の計数効率の補正は、RIからの既知のγ線によって、実験的に求めた更正曲線を用いるべきであるが、時間的余裕がなかったため、文献の計数値によった。また光電吸収のみによる計数効率更正曲線⁴⁾によっても、同様X線スペクトルを描いたが、スペクトルの山の上部が、2~3 KeVより高エネルギー側に動く程度で、全体の傾向は同様であった。実際の計数値は、両者の中間にある⁴⁾とのことなので、前記の更正法で大きな誤差はないと考えられる。第4図に、90KVPでの、鋼板厚さを変えたときの、制動放射X線スペクトルを示した。被写体なし (実線) では、35KeV附近に

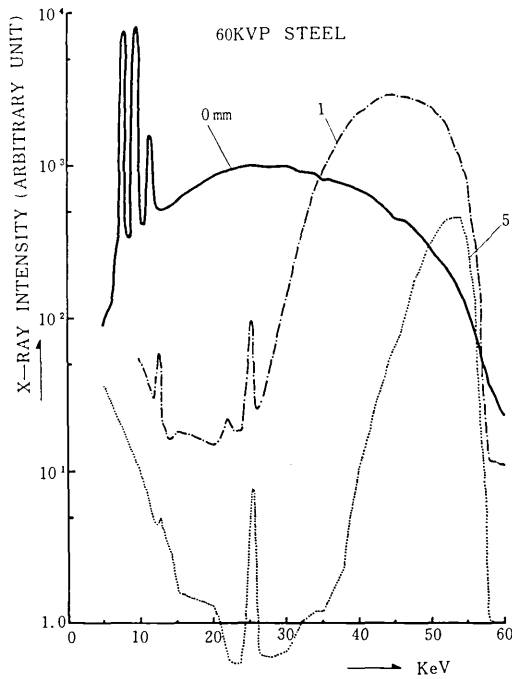


第4図 被写体吸収による透過X線スペクトルの変化 (計数更正後) 90KVP—鋼板

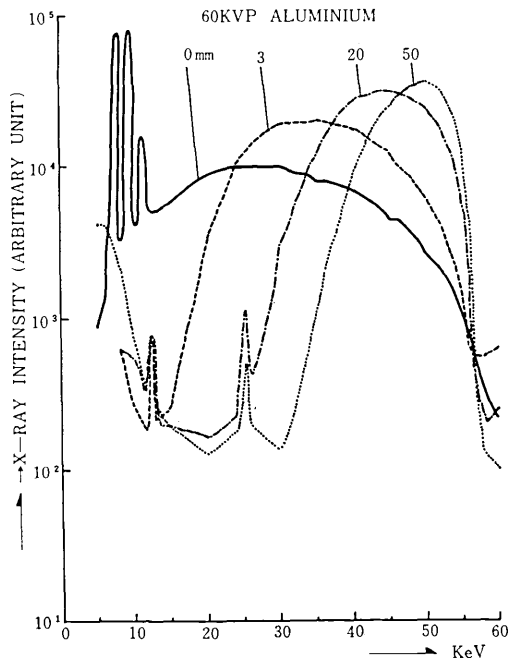
スペクトルの頂上があって、 $W_{L\alpha, \beta, \gamma}, W_{K\alpha I}, \alpha_{II}, W_{K\beta I}, \beta_{II}$ なども明瞭に分離して認められ、70KeV附近にWk吸収端による落込みがある。鋼板を透過すると、30KeV以下に吸収による著しい落込みができ、この谷底とスペクトルの山の頂部は、厚さ増大にともなって、順次高エネルギー側に移行している。各厚さにおける15KeV以下の強い軟X線成分は、被写体からのX線ではなく、Si中のコンプトン散乱によるものであろう。また W_L 線は吸収されてなく、鉛スリットや計測器のはんだや配線から出たと思われる $Pb_{L\gamma}, Ag_{K\alpha I}, Sn_{K\alpha I}, Sn_{K\beta I}$ などのかなり強いピークが、 $W_{K\alpha\alpha}$ とともにつねに観測された。これは、SiのX線吸収が小さいため、X線の一部が透過して、蛍光励起を起したためであろう。また高エネルギー側では、厚さ増加にともなって、急傾斜で落込んでおり、85KeVが最高エネルギーと考えられほぼ一定である。

3.2 60KVP—鋼板, アルミ板 第5, 6図

この管電圧では、 $W_{K\alpha, \beta}$ は発生しないので、被写



第5図 被写体吸収による透過X線スペクトルの変化(計数更正後) 60KVP—鋼板



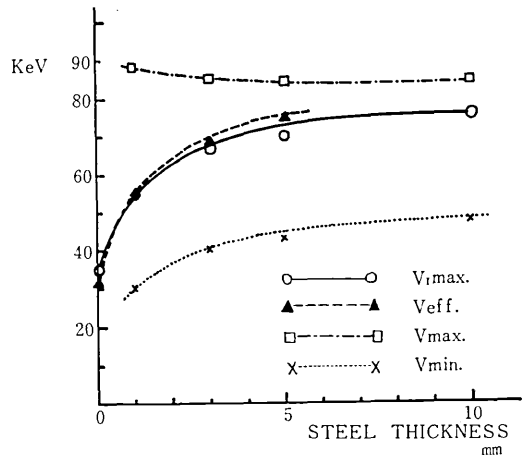
第6図 被写体吸収による透過X線スペクトルの変化(計数更正後) 60KVP—アルミニウム板

体なしでは、 $W_{L\alpha}$, α , γ と白色X線の山がある。被写体

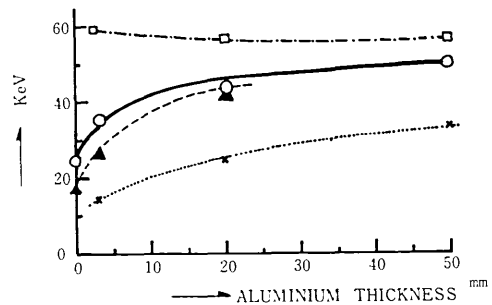
透過後は、 $W_{L\alpha}$ 線はなく、前と同様 $Pbk_{\alpha I}$, $Snk_{\alpha I}$ 等のみが認められたので、この2線によって、波高値とKeVの換算を行った。鋼とアルミを比較すると、後者では、低エネルギー成分がかなり残り、山のやせ方もゆるやかで、鋼の山のように鋭角的でない。

3.3 スペクトル頂上位置の移動とX線実効エネルギー

被写体透過にともなうX線線質の変化は、前述したように、吸収曲線から求めた実効エネルギーにより表示されるが、これとX線スペクトルの対応を見るため、4~6図から、各スペクトルの頂上(最大X線量)の位置 $V_{I\max}$ を求めて、7, 8図に実線で示した。一方



第7図 X線スペクトルの線量最大位置($V_{I\max}$),吸収曲線による実効エネルギーなどの被写体厚さにもなう変化 90KVP—鋼板



第8図 X線スペクトルの線量最大位置($V_{I\max}$),吸収曲線による実効エネルギーなどの被写体厚さにもなう変化 60KVP—アルミニウム板

同一条件で、X線線量計(Victoreen 440RF/C)で測定した吸収曲線の線吸収係数⁵⁾(半価層による)から求めた実効エネルギー V_{eff} を同様派線で示した。また比較のため、スペクトルの山の最高エネルギー V_{\max} (鎖線),最低エネルギー V_{\min} (点線)も画いてみた。

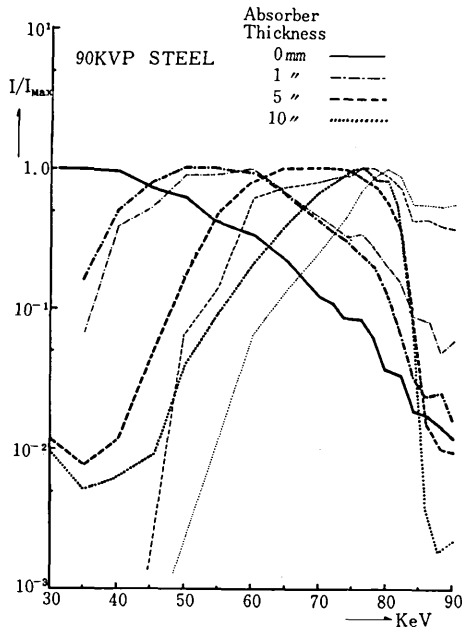
研究速報

これらを正確に定めるのは容易ではないが、スペクトルの山の急傾斜から見て、その最大X線量 I_{max} の2%にあたる線量をもつ高、低両側のエネルギーが、それぞれ V_{max} 、 V_{min} にほぼ等しいとして、これを用いた。これによると、 V_{Imax} の位置は、 V_{max} の半分位から始めて、被写体厚さ増加にともなって、急激に増加し、漸次飽和して行く。一方実効エネルギーも、被写体の薄い間は、 V_{Imax} とほぼ同じか、やや低目であるが、同様急に増加して、逐次前者に接近して行くようである。 V_{max} は当然のことながらほぼ一定であるが、 V_{Imax} と V_{eff} もそれに漸近するが、被写体をさらに厚くしても、 V_{max} に到達することはなさそうである。これは、次項で述べるように、高エネルギー側のX線の減衰が著しいためと思われる。他方 V_{min} も増大するが、ゆるやかである。なお、60KVP—鋼板の図は、同様なので省略したが、アルミと比較すると、 V_{max} はほぼ同じで、 V_{Imax} 、 V_{min} の飽和値は、後者が、3~5 KeV低くなっている。

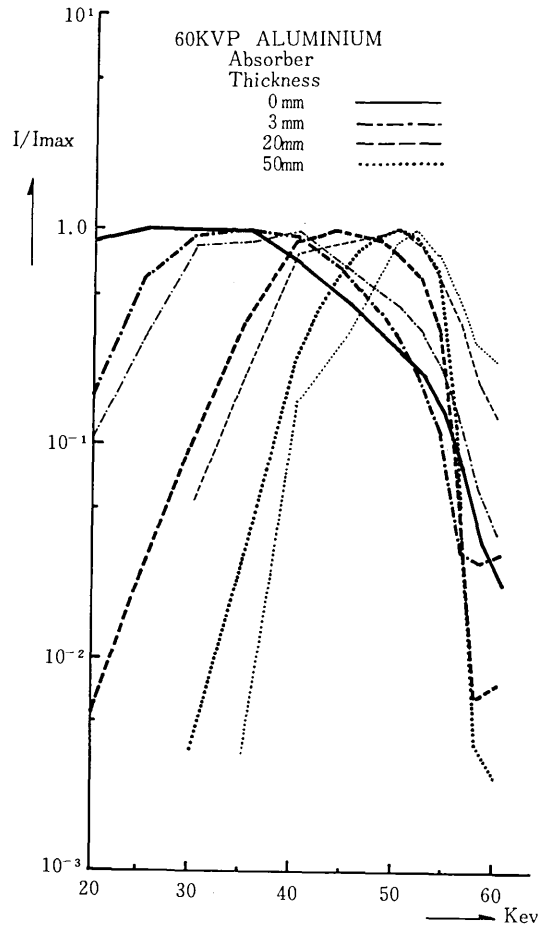
上の結果からみると、従来の線量計により吸収曲線を測定する簡単なX線線質評価法でも、X線スペクトルの山の傾向と、かなりよく対応していると云えよう。

3.4 被写体散乱線の影響

次に被写体散乱線の影響をみるため、一次X線スペクトルの形状の被写体吸収にともなう変化を、 $I = I_0 e^{-\mu t}$ の式から計算し、実測値と比較した。ここで、 I 、 I_0 ；各エネルギーにおける被写体透過後と前のX線量、 μ ；



第9図 X線スペクトルの被写体透過にともなう変化。太線；実測値，細線；計算値。90KVP—鋼板。



第10図 X線スペクトルの被写体透過にともなう変化。太線；実測値，細線；計算値。60KVP アルミニウム板。

各エネルギーにおける線吸収係数 μ ；被写体厚さ。なお規格化のため、各厚さにおける最大X線量 I_{max} と、他のエネルギーでのX線量との比をとった。第9、10図。それによると、各例に共通して、同じ被写体厚さでは、実験値(太線)より、計算値(細線)の方が、数KeV程度より高くなっており、スペクトルの山が全体として、より硬い方へ移動している。これは、計算では、被写体の多重散乱を考慮しておらず、また被写体でのコンプトンの散乱によって、高エネルギーX線が、より低エネルギーの散乱線に変化することなどのため、被写体が厚くなっても、つねに相当量の散乱X線が残ることを示すのではないかと考えられ、前項で述べた V_{min} が大きくならず、飽和して行くことと対応しているが、再生計数を計算してないので、詳細な検討は

さけたい。その他、考慮すべき散乱線として、被写体からの回折X線⁶⁾、蛍光X線があるが、前者は、ほぼ Direct Beamの測定なので、考慮しなくてもよいと考えられ、後者は、鋼、アルミ等の特性X線が、いずれもエネルギーが、7 KeV以下と低く、問題にしなくてよい。鉛スリット等によるPbk_{α,β}は、87~82KeVで、90 KVPのとき、出ている筈であるが、明瞭には認められなかった。さらに、Si検出器からの、SiK_α放出によるいわゆるエスケープピークは、測定したエネルギー範囲では、SiK_αのエスケープ確率が0.1%以下⁴⁾なので除外できる。

次に各例で、被写体透過後、15KeV以下につねに、かなり強い連続X線分布が見られたが、これは、鋼やアルミからの蛍光X線のほかに、前にも述べたように、Si内での、光子と電子のコンプトン散乱による連続エスケープピークであろう。いま90KVPにおいて、この散乱の最大エネルギーに当るコンプトンエッジを求める式、 $E_c = E_\gamma - E_\gamma / (1 + 2E_\gamma / m_0 c^2)$ ⁷⁾ ここで E_c ; Si 中のコンプトン散乱電子最大エネルギー、 E_γ ; 入射X線エネルギー、 m_0 ; 電子静止質量、 C_0 ; 光速、によって、

$V_{\text{max}} = E_\gamma = 76\text{KeV}$ とすると、 $E_c = 17\text{KeV}$ となり、また60KVP—アルミニウムで、 $E_\gamma = 50\text{KeV}$ として、 $E_c = 8\text{KeV}$ となり、4、6図の低エネルギー側の連続ピークの肩のところとほぼ一致している。

終りに、X線装置、計器の使用、測定に多大のご便宜を与えられた理学電機株式会社の西垣茂、上松英明、小林勇二の各氏、および種々ご指導、ご対論いただいた東大生研の佐藤乙丸の各氏に、厚くお礼申し上げます。

(1975年3月17日受理)

参考文献

- 1) NDIS案 ; 非破壊検査協会資料—1299.
- 2) 丸山 : 非破壊検査, 13, 4, (1964)
- 3) 辻本, 桂山 : 非破壊検査, 20, 3 (1971), 同21, 9 (1972), 同22, 12 (1972)
- 4) Woldseth, R : X-Ray Energy Spectrometry (1973) Kevex Corp., Burungame, Calif., U. S. A.
- 5) Leipunskii, Novozhilov, Sokharov : Propagation of Gamma Quanta in Matter, Translation, Perg. Press (1965)
- 6) 一色, 片岡, 高, 山沢 : 生産研究, 13, 7 (1964) 一色, 高, 片岡, 山沢 : 非破壊検査, 15, 7 (1966)
- 7) Heath, R. L., : TID—4500, 8, 1964.

