

後方散乱ガンマ線による厚さ測定に関する研究 (II)

—厚さ測定限度と最適条件の検討—

Study on the Measurement of Thickness Using Backscattered Gamma-Rays (II)

—On the measurable thickness and the most suitable source-detector distance—

斉藤 秀雄*・佐藤 乙丸*

Hideo SAITO and Otomaru SATO

1. ま え が き

後方散乱ガンマ線を利用した厚さ計は、ボイラチューブ内に生じる腐食、潰食、付着物による凹凸、および液体や粉体を収容するタンクの側壁の厚さなどを、外部から非破壊的に測定する手段として利用されている。^{1,2)} このような観点から筆者らも、鉄の前面に存在するカーボン煉瓦の厚さを測る基礎的な実験を試みた。³⁾

本報は前報⁴⁾に引きつづき、低原子番号物質（アルミニウム、コンクリート、カーボン、水、木材）からの散乱ガンマ線を多重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分に選別計数し、この両成分による厚さ測定に関する研究である。すなわち、線源(S)と検出器(D)間の距離を変化して、各種物質の飽和厚さ測定曲線を求め、簡単な数式を用いて得られた測定可能な厚さの限度からS-D間の最適距離を定めた。

2. 実験方法

密封ガンマ線源 ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir を鉛照射容器(150×150×150 mm)の中心部に収容して固定し、その線束を20 mmφに絞り、散乱体に対し45°の角度で入射さ

せ、135°方向に散乱してくるガンマ線のエネルギースペクトルを、マルチチャンネル波高分析器で測定した。ここで使用したシンチレーション検出器は2"φ×2" NaI (TI)である。この場合も前報⁴⁾と同様に、散乱ガンマ線エネルギースペクトルを選別できるように、検出器側の前面に内径50 mmφ、または10 mmφの鉄製コリメターを用いた。この多重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分の測定方法、積分範囲および幾何学的な測定配置は、前報^{4,5)}で詳述したので省略する。

3. 実験結果

(1) 多重散乱ガンマ線、1回散乱ガンマ線および全計数率による厚さ測定

図1(a), (b)は、⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir ガンマ線源を用い、カーボン煉瓦を無限厚とし、x=0 mm (S-D間の距離240 mm)のときの、多重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分によるエネルギースペクトルで、それぞれの斜線の部分は前報⁴⁾で述べたエネルギー積分範囲を示したものであ

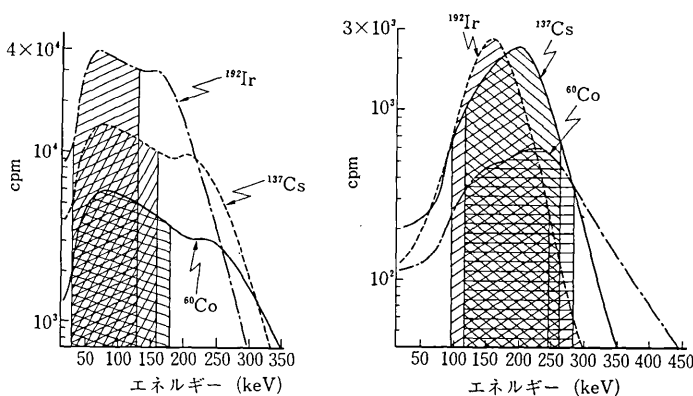


図1(a) ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir 線源を用い、x=0 mm (S-D間距離240 mm)のときのカーボン煉瓦からの多重散乱ガンマ線エネルギースペクトル

図1(b) ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir 線源を用い、x=0 mm (S-D間距離240 mm)のときのカーボン煉瓦からの1回散乱ガンマ線エネルギースペクトル

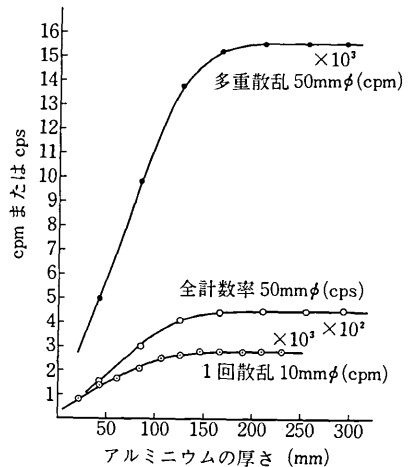


図2 ¹³⁷Cs ガンマ線源を用い、x=100 mm (S-D間の距離340 mm)のときの多重散乱ガンマ成分(○印)、1回散乱ガンマ線成分(○印)、および全散乱ガンマ線成分(○印)によるアルミニウムの厚さ測定特性曲線

*東京大学生産技術研究所 第4部

る。図1(a)の多重散乱ガンマ線スペクトルのピーク(約75 keV)は、カーボン煉瓦特有のものである。また一次ガンマ線エネルギーによってエネルギー積分範囲が異なっている。図2は¹³⁷Csを用いアルミニウムの厚さを変化して得られた多重散乱ガンマ線成分(○印)、1回散乱ガンマ線成分(◎印)、および全散乱ガンマ線成分(全計数率)内径50 mmφ コリメーター使用、(○印)による厚さ測定の特曲線である。この図は x=100 mm (S-D間の距離 340 mm) のときの特曲線である。それぞれの飽和厚さは200, 145, 165 mm である。内径50 mmφ のコリメーターを用いた場合、全計数率よりも多重散乱ガンマ線成分の方が飽和厚さが大きいので、多重散乱ガンマ線と1回散乱ガンマ線の両成分による厚さ測定方法の比較を、以下のように試みた。

(2) xを変化したときの飽和厚さと測定限度

低原子番号物質の厚さを後方散乱ガンマ線によって測定する場合は、計数値が大きく、しかも厚さ測定限度が大きいことが望ましい。これらの値は一般に、散乱体の形状や幾何学的な配置によっても異なってくるが、著者らは次のようにして厚さ測定限度を求めた。すなわち、図2に示した飽和厚さ(mm)のときの計数率 N₀(cpm)、厚さ測定限度 t(mm) のときの計数率を N_t(cpm) とし、それぞれの標準偏差の2倍を求め次式が成立するときを測定限度とした。

$$N_0 - 2\sqrt{N_0} = N_t + 2\sqrt{N_t} \quad (1)$$

$$(1) \text{ から } N_t = (\sqrt{N_0} - 2)^2 = N_0 - 4\sqrt{N_0} \quad (2)$$

(2)式によって、飽和厚さから最大測定可能な厚さを求めることができる。

図3(a), (b) は¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir ガンマ線源を用い、多

重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分に分け、それぞれ x の値を0~200 mm, 0~120 mm まで変化して、コンクリートの厚さ測定したときの特曲線である。この両者のグラフから、x の値をしないで大きくするにつれて、飽和する厚さも大きくなっていくことがわかる。この両成分が飽和する厚さを図3(a), (b) から読みとると表1, 2のコンクリートの欄の括弧のない値となり、括弧内の値はそれぞれ(2)式によって求めた厚さ測定限度である。表1, 2には⁶⁰Co およびアルミニウム、カーボン、水、木材について調べた結果も示してある。これらの表から x を大きくすれば両成分とも飽和厚さが大きくなるが、(2)式で求めた計数の統計誤差に基づく測定限度に着目すると、その値はアルミニウムとコンクリートの場合には比較的小さく、カーボン、水、木材などの低密度物質の場合にはしだいに大きくなっている。また1回散乱ガンマ線成分より多重散乱ガンマ線成分で測定した方が、前者の物質の場合にはそれぞれ1.00~1.89, 1.00~1.77倍、後者の物質の場合にはそれぞれ1.12~1.96, 1.01~1.56, 1.05~1.80倍、測定限度厚さが大きくなる。

(3) S-D間の最適な距離

SとDとの最適な測定距離に関し、多重散乱ガンマ線方式および1回散乱ガンマ線方式について検討を行った。

(2)式で求めた表1, 2の厚さ測定限度をアルミニウム、カーボン、水についてプロットすると図4になる。横軸を x mm (S-D間の距離) で表し、縦軸はそれぞれの厚さ測定限度で示した。この図から、多重散乱ガンマ線を用いてアルミニウム(図4(a))の厚さを測定する場合、x を大きくすると計数率はしだいに小さくなる。すなわ

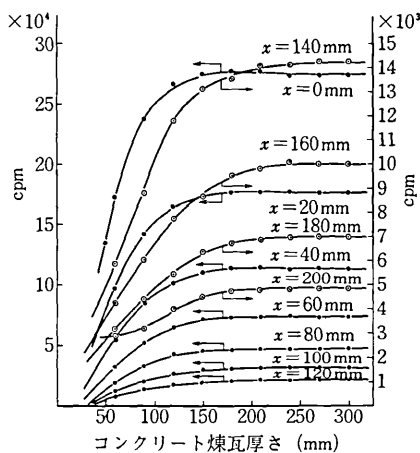


図3(a) 多重散乱ガンマ線成分を用い、x=0~200 mm に変化したとき、コンクリートの厚さ測定特曲線 (¹³⁷Cs)

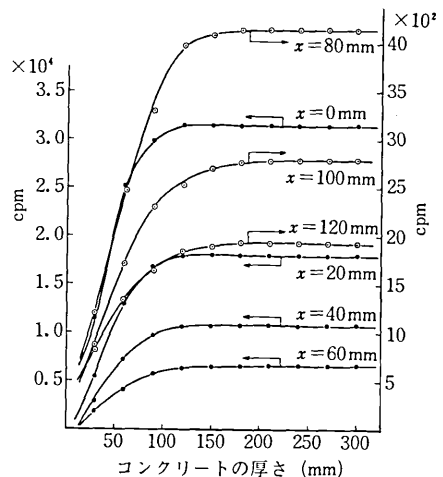


図3(b) 1回散乱ガンマ線成分を用い、x=0~120 mm に変化したとき、コンクリートの厚さ測定特曲線 (¹⁹²Ir)

研究速報

表1 多重散乱ガンマ線を利用した厚さ測定時における S-D間 (x mm)の距離を変えた場合の飽和厚さと厚さ測定限度 (括弧内)

(a) ⁶⁰Co の場合

被測定物質 x mm の距離	アルミニウム	コンクリート	カーボン	水	木材
0	115 (105)	130 (115)	200 (175)	225 (210)	275 (250)
20	140 (128)	200 (180)	213 (195)	230 (213)	300 (275)
40	150 (138)	210 (190)	230 (193)	232 (210)	350 (300)
60	155 (140)	210 (190)	232 (205)	235 (210)	360 (310)
80	160 (150)	210 (190)	240 (210)	250 (212)	375 (330)
100	170 (150)	210 (190)	250 (220)	260 (225)	420 (375)
120	190 (155)	220 (180)	255 (230)	265 (232)	450 (415)
140	190 (152)	220 (180)	260 (233)	275 (235)	465 (385)
160	190 (140)	220 (175)	295 (237)	310 (248)	480 (450)
180	190 (120)	210 (150)	300 (240)	320 (250)	—
200	175 (115)	210 (160)	310 (242)	—	—

(b) ¹³⁷Cs の場合

0	140 (135)	160 (150)	200 (190)	225 (205)	330 (320)
20	160 (147)	165 (155)	200 (185)	227 (213)	340 (300)
40	170 (155)	167 (152)	220 (210)	255 (235)	350 (320)
60	170 (160)	170 (150)	230 (220)	260 (230)	400 (365)
80	200 (150)	190 (150)	235 (220)	270 (230)	410 (375)
100	200 (160)	210 (180)	235 (225)	273 (245)	450 (425)
120	210 (150)	210 (180)	280 (245)	270 (255)	450 (430)
140	210 (146)	240 (180)	275 (230)	300 (275)	400 (360)
160	210 (125)	240 (180)	300 (230)	320 (275)	540 (440)
180	—	—	250 (175)	310 (240)	325 (290)
200	—	240 (157)	—	320 (255)	—

(c) ¹⁹²Ir の場合

0	115 (110)	125 (115)	180 (175)	195 (180)	—
20	130 (115)	150 (140)	170 (165)	190 (175)	—
40	150 (135)	160 (140)	180 (175)	190 (180)	—
60	150 (135)	175 (150)	190 (180)	200 (190)	—
80	150 (125)	210 (160)	200 (182)	210 (195)	—
100	155 (120)	180 (150)	200 (180)	225 (210)	—
120	160 (125)	180 (150)	210 (195)	270 (265)	—
140	175 (130)	210 (150)	220 (185)	320 (280)	—
160	190 (140)	210 (150)	225 (190)	320 (280)	—
180	195 (135)	210 (145)	—	330 (273)	—
200	—	210 (135)	—	340 (280)	—

表2 1回散乱ガンマ線を利用した厚さ測定時における S-D間 (x mm)の距離を変えた場合の飽和厚さと厚さ測定限度 (括弧内)

(a) ⁶⁰Co の場合

被測定物質 x mm の距離	アルミニウム	コンクリート	カーボン	水	木材
0	110 (100)	120 (110)	130 (125)	175 (150)	240 (180)
20	125 (110)	160 (125)	160 (132)	175 (150)	240 (180)
40	140 (105)	160 (125)	175 (140)	200 (153)	240 (180)
60	150 (135)	165 (128)	180 (145)	220 (170)	250 (210)
80	150 (115)	170 (150)	180 (150)	230 (185)	300 (220)
100	168 (112)	180 (150)	190 (165)	260 (220)	360 (240)
120	135 (120)	180 (123)	215 (160)	260 (222)	370 (243)
140	145 (90)	200 (120)	230 (200)	260 (225)	450 (265)
160	150 (75)	200 (115)	250 (155)	260 (195)	350 (250)
180	—	—	275 (167)	—	—
200	—	—	200 (125)	—	—

(b) ¹³⁷Cs の場合

0	125 (100)	130 (110)	150 (137)	175 (155)	240 (195)
20	127 (110)	140 (120)	170 (140)	180 (155)	270 (210)
40	125 (95)	147 (125)	175 (150)	190 (157)	275 (240)
60	145 (120)	155 (142)	180 (155)	200 (160)	300 (245)
80	150 (120)	160 (148)	185 (160)	250 (220)	310 (255)
100	140 (118)	180 (135)	195 (168)	270 (222)	330 (275)
120	150 (94)	180 (135)	240 (180)	280 (240)	360 (280)
140	150 (105)	225 (112)	275 (160)	282 (245)	400 (285)
160	150 (90)	210 (138)	250 (165)	280 (210)	480 (340)
180	—	—	260 (163)	—	—
200	—	—	275 (163)	—	—

(c) ¹⁹²Ir の場合

0	115 (110)	120 (115)	140 (130)	160 (140)	170 (150)
20	140 (110)	120 (107)	140 (120)	180 (155)	225 (170)
40	140 (105)	130 (103)	140 (128)	190 (160)	250 (210)
60	130 (110)	135 (115)	160 (130)	190 (170)	325 (260)
80	145 (115)	150 (110)	190 (140)	200 (180)	300 (250)
100	150 (75)	180 (140)	195 (140)	225 (200)	360 (250)
120	—	180 (110)	200 (155)	270 (215)	400 (290)
140	—	—	—	310 (260)	540 (325)
160	—	—	—	320 (280)	450 (360)

ち x が 100 mm と 200 mm のときは、最初 ($x=0$ mm) の値のそれぞれ 1/10, 1/100 以下に低下し、このために厚さの測定限度も小さくなる。したがってアルミニウムの厚さ測定限度が大きくなる $x=60\sim 100$ mm (S-D間の距離 200~260 mm) の距離で測定すればよい。またガンマ線エネルギーで比較すると、¹³⁷Cs が最も優れており、¹⁹²Ir が最も悪い。

同様にしてカーボンと水 (図4 (b), (c)) の場合、 x を大きくしたいときの計数率は、たとえば x が 200 mm のときに 0 mm のときの、それぞれ 1/12, および 1/10 に低下する。この値はアルミニウムとコンクリートの場合より 1桁程度大きいので測定限度も大きくなる。また x の値はカーボンのとき 140~180 mm (S-D間の距離 380~420 mm), 水のとき 160~180 mm (S-D間の距離 400~420 mm) が最適距離となる。このようにし

て多重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分を用い、五つの物質の厚さ測定時の最適距離をまとめたものが表3である。この表から最適距離は低密度物質(カーボン, 水, 木材)ほど大きく、しかも1回散乱ガンマ線成分よりも多重散乱ガンマ線成分の方が大きいことがわかる。

4. 測定誤差

後方散乱ガンマ線によって平板状の物質の厚さを測定する場合、一般的に考えられる誤差として放射線計数に伴う統計的な誤差および幾何学的な配置を含めた計器誤差の二つが上げられる。しかし、最近、エレクトロニクスの進歩に伴い、電子回路からの誤差はかなり小さくなっている。一方、幾何学的な配置に基づく誤差もそれほど大きいものとは考えられない。したがって、ここでは統計的な誤差を中心に検討してみる。

一般に厚さ d (mm) のときの計数値 n (cpm) の平方根が放射線計数の統計的誤差に基づく標準偏差である。このときの厚さの変化分を Δd (mm) とすると、厚さの

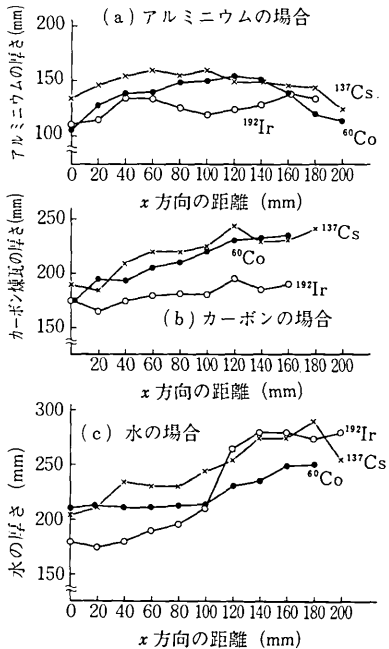


図4 多重散乱ガンマ線を用いたときのS-D間(x mm)

の最適距離((2)式による計算値)

相対誤差 E は次式になる.

$$E = dd/d \times 100\% \quad (3)$$

いま、三つのガンマ線源を用い、 $x=0$ mm (S-D間の距離 240 mm) のときの、カーボン煉瓦の厚さ測定特性曲線を描くと図5となる。ただしこの場合の縦軸は相対計数率 cpm/mCi に書き直してある。このグラフから飽和厚さに近づくにつれて、 dd が大きくなり、 E の値も大きくなるのがわかるが、(3)式を用いて相対誤差を求めたグラフ(図6)からも明らかである。3線源共に図5の立ち上がりの急なカーボン煉瓦の厚さ領域(50~100 mm)では、2%以下の誤差となり、厚さが150 mm以上になると、しだいに誤差が増大する傾向にある。たとえば厚さ測定誤差を5%以下に押さえる場合は厚さ170 mm(ただし、このときの相対計数率は ^{60}Co の場合、 9.9×10^3 cpm/mCi)まで測定可能となる。しかし、さらに測定誤差を小さくしたい場合には、測定時間を長くするか、または線源の放射能を増大すればよい。

5. むすび

後方散乱ガンマ線によるアルミニウム、コンクリート、カーボン、水、木材の厚さ測定は、片側から測定できるという特長を持っている。この点を生かして、入射角 45° 、散乱角 135° の場合について実験を進めてきたが、なお測定ヘッドと被測定物体の間隙の影響をはじめ、検討すべき課題が残されている。しかし、この実験の過程で、多重散乱ガンマ線成分と1回散乱ガンマ線成分の寄与を明

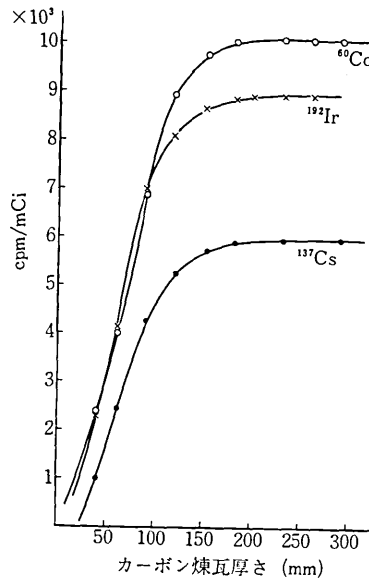


図5 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir ガンマ線源を用いたカーボン煉瓦の厚さ測定特性曲線(ただし縦軸はcpm/mCiで表した)

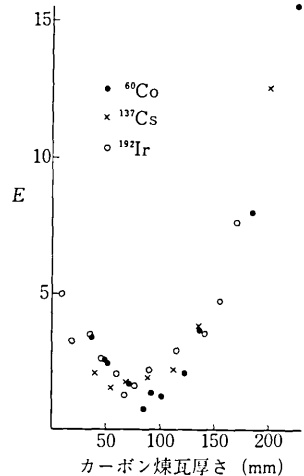


図6 図5のときのカーボン煉瓦厚さ測定時の計数誤差(^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir)

表3 両成分を用い各種物質の厚さ測定時におけるS-D間(x mm)の最適距離の比較

被測定物質	散乱成分	
	多重散乱(x mm)	1回散乱(x mm)
アルミニウム	60~100	40~60
コンクリート	60~120	60~100
カーボン	140~180	100~120
水	160~180	120~160
木材	160~200	160<

らかにすることができたので、現在は、 180° 方向の散乱ガンマ線を用い、これらの両成分や全散乱ガンマ線成分との比に着目して、厚さを測る方式の検討を始めている。(1979年5月30日受理)

参考文献

- 1) 大野, 関; 散乱形ガンマ線厚さ計の特性および適用限界, 電力中央技術研究所報告, No. 64053, 1969, 11
- 2) 柴田, 若林, 藤井, 上田; γ 線の後方散乱による工業計測の基礎的研究(第1報), Radioisotopes, **15**, (5), 204~208 (1967)
- 3) 佐藤, 齊藤, 加藤; 多重散乱 γ 線によるカーボン煉瓦厚さの測定(第2報), 生産研究, **26**, (1), 36~39 (1974)
- 4) 齊藤, 佐藤; 後方散乱ガンマ線による厚さ測定に関する研究I, 生産研究, **31**, (2), 57~60 (1979)
- 5) 齊藤, 佐藤; 散乱ガンマ線スペクトルの挙動1, 1回散乱ガンマ線とその応用, 生産研究, **30**, (4), 13~16, (1978)