

R. T.による人工欠陥評価の一方法

西 田 常 夫・吉 村 精 治

One Method of The Evaluation of The Artificial Defects By R.T.

Tuneo NISHIDA・Seizi YOSHIMURA

The particular ^{60}Co -irradiation instrument and Schaukasten type illuminator had been constructed by authors. Then, the specimens of steel with columnar artificial defects were tested by the above instruments. Some of formulas were introduced to guess the width and depth of the defects from figures and photographic density. In this time, careful attention was paid on to the influences on the geometrical condition, and calibration ratio of the defects or blackness ratio of films were also investigated.

A authors hope their formulas and charts will be of some help for non-destruction inspections on the work-site.

1. ま え が き

近年、鉄骨建造物、石油等の備蓄タンク等が増加してきており、これらに対する非破壊検査の必要性がますます高まっている。

非破壊検査に関する研究は、いろいろとなされているが、検査以降の構造物に対する正確な耐余年数、耐久性の判定が困難視されており、より精度の高い欠陥評価が望まれている。

今回、 ^{60}Co で鋼材試験片（人工欠陥）を透過し、黒化したフィルムの真影、半影等の濃度測定を行ない考察を進めた。欠陥評価に関して、実験と理論（考察の項で算出）による、それぞれの式でよい関係が見られたのでここに報告する。又、現場における欠陥評価の一資料となるよう、理論式に数値を代入して、図表を作成した。

2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した試験片材料は、一般構造用圧延鋼材（SS41, $S=7.8\text{ [g/cm}^3\text{]}$ ） $5\text{ [mm]}\times 75\text{ [mm]}\times 150\text{ [mm]}$ である。この鋼材を円柱状（口径 1 [mm] から 10 [mm] 、深さ 1 [mm] から 4 [mm] ）に削り取り、人工欠陥試験片とした。これは、今後、超音波、X線による非破壊検査とも対比させていくことを目的としているためである。

そして、試験条件は次のとおりとした。

^{60}Co 照射装置(11.1[GBq], 私製品), 線源-フィルム間距離(250[mm]), 露出時間(25[min]), シャーカステン(20[W]×2, 私製品), フィルム(富士工業用X線フィルム, #100), 増感紙(PbLF 0.03, 大日本塗料), 透過度計(JISZ3104-F08), 階調計(JISZ3104-I形), 濃度計(PDA-81, SAKURA)。

又, 実験方法は次のとおりである。

^{60}Co 位置は, 試験片中心鉛直線上, ならびに, その線上より水平に移動して透過し, 黒化したフィルム欠陥像の真影, 半影を観察, 測定した。

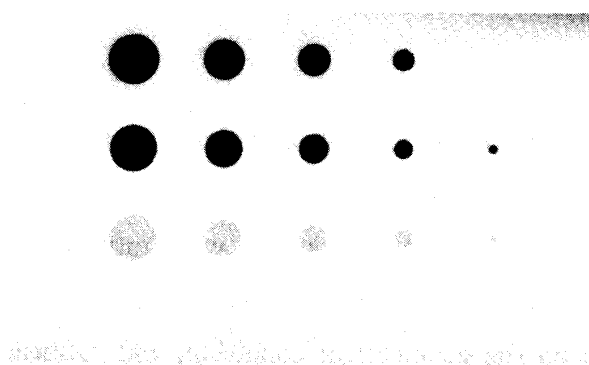


図-1 試験片の人工欠陥像

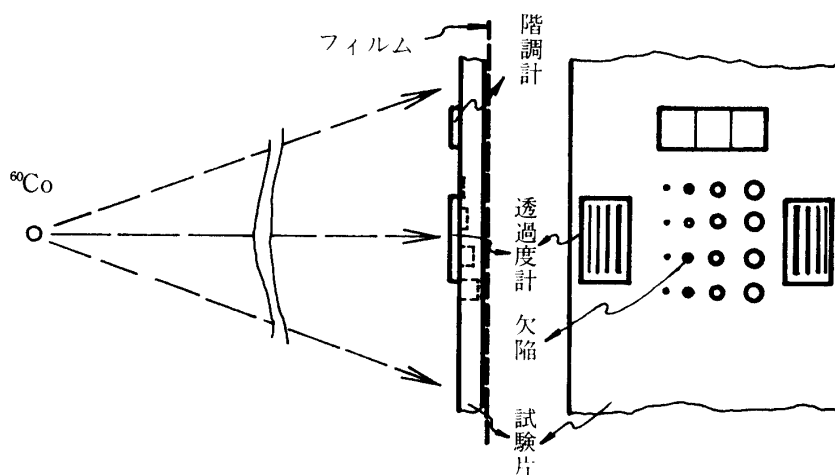


図-2 ^{60}Co 照射実験図

3. 実験結果および考察

試験片欠陥像の測定結果を次に示す。表-1には試験片欠陥口径に対するフィルム欠陥像の長

さ。表－2には試験片欠陥深さに対するフィルム欠陥像の濃度として示した。又、それぞれを実験式として表わした。

表－1 試験片欠陥口径に対するフィルム欠陥像の長さ

直径(mm) 深さ(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.31	2.16	3.39	4.16	5.56	6.29	7.36	8.26	9.41	10.19
2	1.17	2.37	3.27	4.27	5.46	6.15	7.47	8.27	9.40	10.22
3	1.23	2.33	3.53	4.31	5.38	6.43	7.38	8.26	9.28	10.31
4	—	2.26	3.58	4.53	5.58	6.38	7.51	8.31	9.31	10.48
平均値(\bar{R})	1.24	2.28	3.44	4.32	5.50	6.31	7.43	8.28	9.35	10.30
\bar{R}/R	1.24	1.14	1.15	1.08	1.10	1.05	1.06	1.03	1.04	1.03

(試験片欠陥口径 $R=1\sim10$)

表－2 試験片欠陥深さに対するフィルム欠陥像の濃度

直径(mm) 深さ(mm)	(1)	(2)	3	4	5	6	7	8	9	10	平均値(\bar{D})	\bar{D}/D
1	3.20	3.30	3.30	3.33	3.33	3.33	3.30	3.26	3.26	3.28	3.30	1.03
2	3.21	3.32	3.38	3.43	3.42	3.39	3.35	3.33	3.35	3.36	3.38	1.05
3	3.22	3.35	3.49	3.54	3.53	3.47	3.44	3.46	3.45	3.43	3.48	1.08
4	—	3.46	3.57	3.59	3.59	3.53	3.46	3.48	3.50	3.52	3.53	1.10

(試験片健全部の濃度 $D=3.21$)

フィルム濃度差により、欠陥口径を推定する実験式

$$R = \frac{1.17\bar{R}}{1 + 0.0174\bar{R}} \quad [\text{mm}]$$

フィルム濃度差により、欠陥深さを推定する実験式

$$d = 45.7 \ln \frac{\bar{D}}{D} - 0.352 \quad [\text{mm}]$$

3. 1 欠 陥 像

下記、図－3～6のように、試験片（点線部－欠陥の断面）の下にフィルムを、上方には放射線源を作図した（図－3、4は欠陥部の鉛直上方に、図－5、6は斜め上方に線源を作図）。線源より下方に照射された放射線のうち、 Ra_1 、 Rb_1 、 Ra_2 、 Rb_2 の範囲内において、欠陥像（真影と半影）が表われるものとして、幾何学的に考察していく。

Ra_1 ；図－3では、欠陥底面の全ての照射が欠陥像になるとした。 Ra_1 内平均して濃度は大となるが、 Ra_1 中心部は両端部より大である。

Rb_1 ；図－4では、欠陥上面両端範囲内の照射が欠陥像になるとした。中心部は図－3と同じであるが、両端部は濃度小である。

Ra_2 ；図－5では、欠陥上面左端と、下面右端の範囲内照射が欠陥像になるとした。図－3とはち

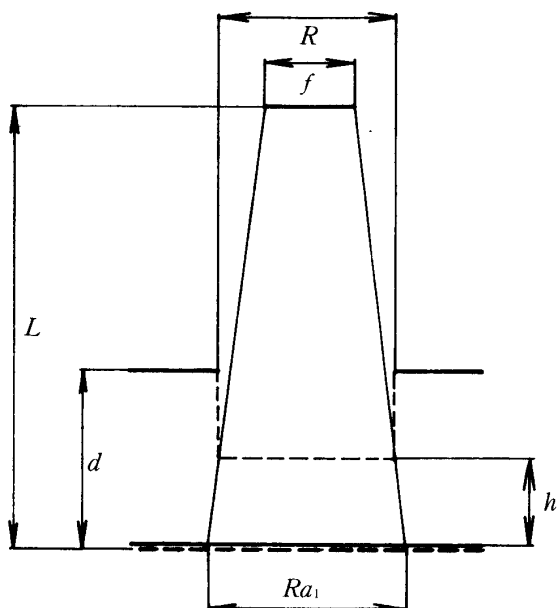


図-3 欠陥上方から照射
(欠陥底面による像)

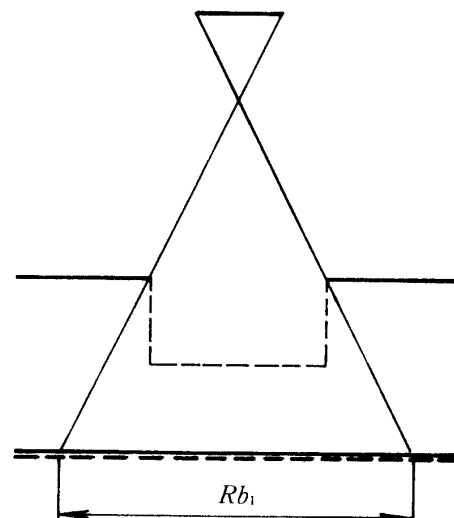


図-4 欠陥上方から照射
(欠陥上面による像)

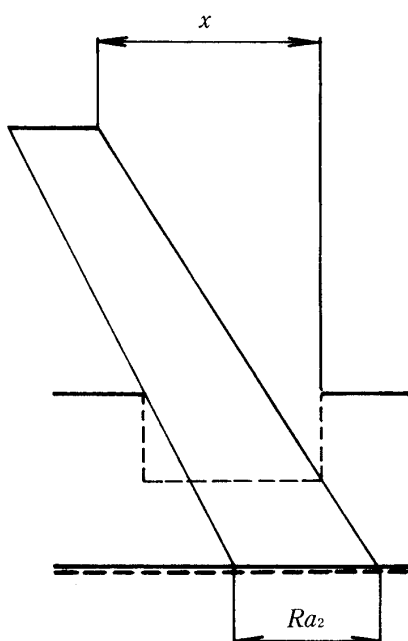


図-5 欠陥左上方から照射
(欠陥左上面, 右底面による像)

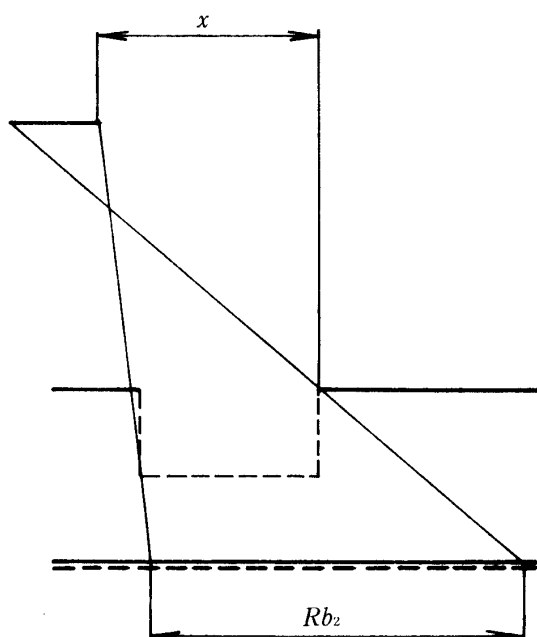


図-6 欠陥左上方から照射
(欠陥左底面, 右上面による像)

f ; 線源長さ $f_1 \sim f_2$
 c ; 線量
 Rh ; Rhm 値
 K ; 単位長さの線量
 Q_0, Q_{x0} ; 距離 l における $f=0, f=f_1 \sim f_2$ の時の線量率
 $Q_1 \sim Q_3$; 試験片を置き, $f=0$ の時の A, B, C を通る線量率
 $Q_{x1} \sim Q_{x3}$; 試験片を置き, 欠陥底面, 欠陥側面, 健全部を透過した線量率

L ; f からフィルムまでの距離
 d ; 試験片健全部の厚さ
 h ; 欠陥底面からフィルムまでの距離 (欠陥部底面の厚さ)
 r ; 欠陥上面における照射距離
 R ; 試験片の欠陥口径
 x ; 欠陥右端鉛直線上上方から, 線源右端までの距離
 Ra_1, Ra_2, Rb_1, Rb_2 ; 欠陥像から見られる口径

がって、左端が濃度大で、右端へと濃度は小になり、 Ra_1 より小さい像となる。

Rb_2 ：図-6では、図-5と逆の端の範囲内照射が欠陥像になるとし、図-5と似ている像が見られるが、像の右の部分で、長い半影が見られる。

左図より次式を得た。

$$Ra_1 = R + \frac{h}{L-h}(R-f) \quad (1)$$

$$Rb_1 = R + \frac{d}{L-d}(R+f) \quad (2)$$

$$Ra_2 = R + \frac{h}{L-h}(R+x) - \frac{d}{L-d}(f+x) \quad (3)$$

$$Rb_2 = R + \frac{d}{L-d}(R+x+f) - \frac{h}{L-h}(f+x) \quad (4)$$

3. 2 欠陥口径推定比

前記実験方法により黒化したフィルムの欠陥像を測定し、試験片の欠陥口径の大きさを推定する方法について述べる。

関係式(1)～(4)に、実験値 $L=250$ 〔mm〕、 $f=2.6$ 〔mm〕、 $d=5$ 〔mm〕、 $x=5$ 〔mm〕、 $h=1$ 〔mm〕から5〔mm〕、 $R=1$ 〔mm〕から10〔mm〕を代入し、計算した。そして、欠陥口径推定比を次のように定めて、図表をつくった。

$$\text{欠陥口径推定比} = \frac{\text{フィルム欠陥像による口径}}{\text{試験片欠陥の口径}}$$

$$a_1 = \frac{Ra_1}{R}, \quad b_1 = \frac{Rb_1}{R}, \quad a_2 = \frac{Ra_2}{R}, \quad b_2 = \frac{Rb_2}{R} \quad (5)$$

図-7は、欠陥部底面厚さ1〔mm〕、図-8は、欠陥部底面厚さ4〔mm〕のとき(他は省略)で、横軸に欠陥口径($R=1$ 〔mm〕～10〔mm〕)、縦軸に欠陥口径推定比 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 を示す。

この図から、欠陥口径に関して、推察されることは次のとおりである。

- (i) 試験片欠陥口径 R が大きい値10〔mm〕に近づくほど、又、欠陥部底面厚さが4〔mm〕に近づくほど、欠陥口径推定比 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 の値が、同じような値(約1.01)をとるようになる。深さ5〔mm〕、試験片欠陥口径〔mm〕での a_1 , b_1 , a_2 , b_2 を平均すると、1.016となり、1よりは、やや大きな比率となるが、欠陥像と試験片欠陥口径とは近い値を示すようになる。
- (ii) 試験片欠陥口径が、小さい値1〔mm〕に近づくほど、又、欠陥部底面厚さが0〔mm〕に近づくほど、欠陥口径推定比 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 の値には、ばらつきが出てくる。欠陥口径推定比は大きい方で、 $b_1=1.073$ 、小さい方で、 $a_2=0.868$ の値をとる。
- (iii) 図-3～図-6の欠陥像のうち、欠陥口径推定比に変動が少なく、比率1に近い値をとるのは、図-3の Ra_1 を測った場合で、図-7、図-8のうち、欠陥口径推定比 a_1 の場合である。即ち、欠陥の上方から ^{60}Co を照射し、欠陥像が、はっきり、明るく現われている Ra_1 の値を求めると、

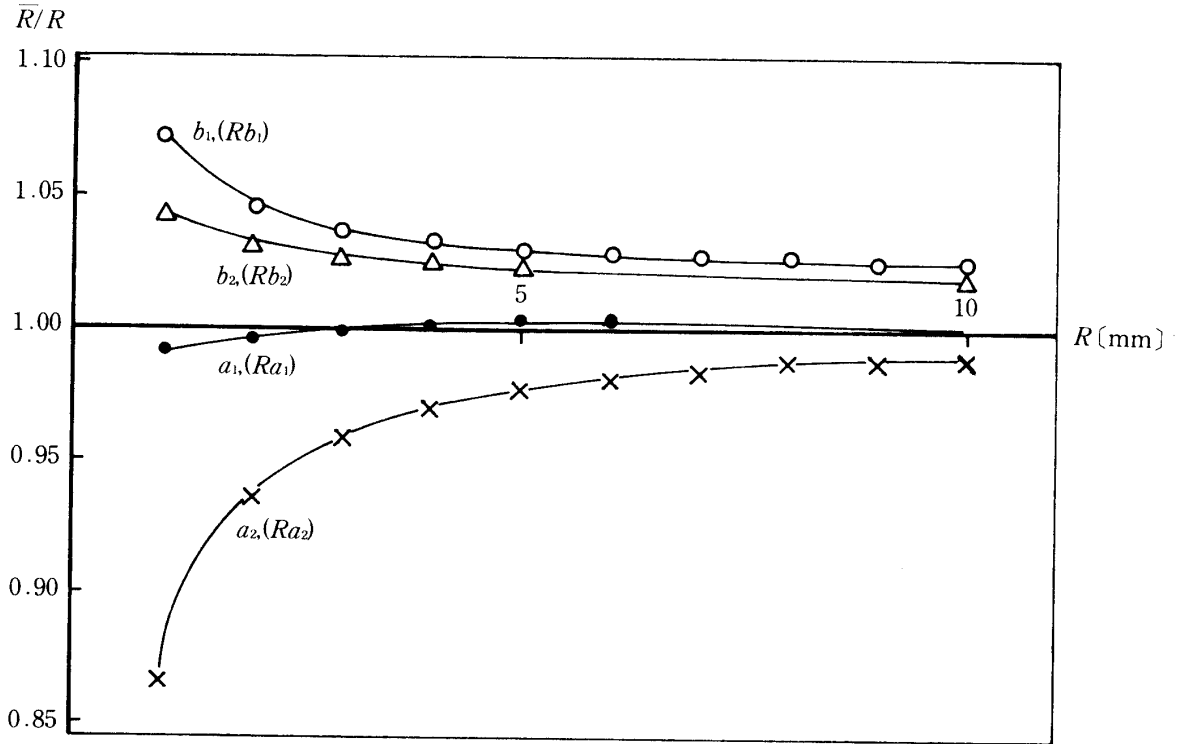


図-7 欠陥口径(R)とその推定比(\bar{R}/R)(欠陥部底面厚さ 1 mm)

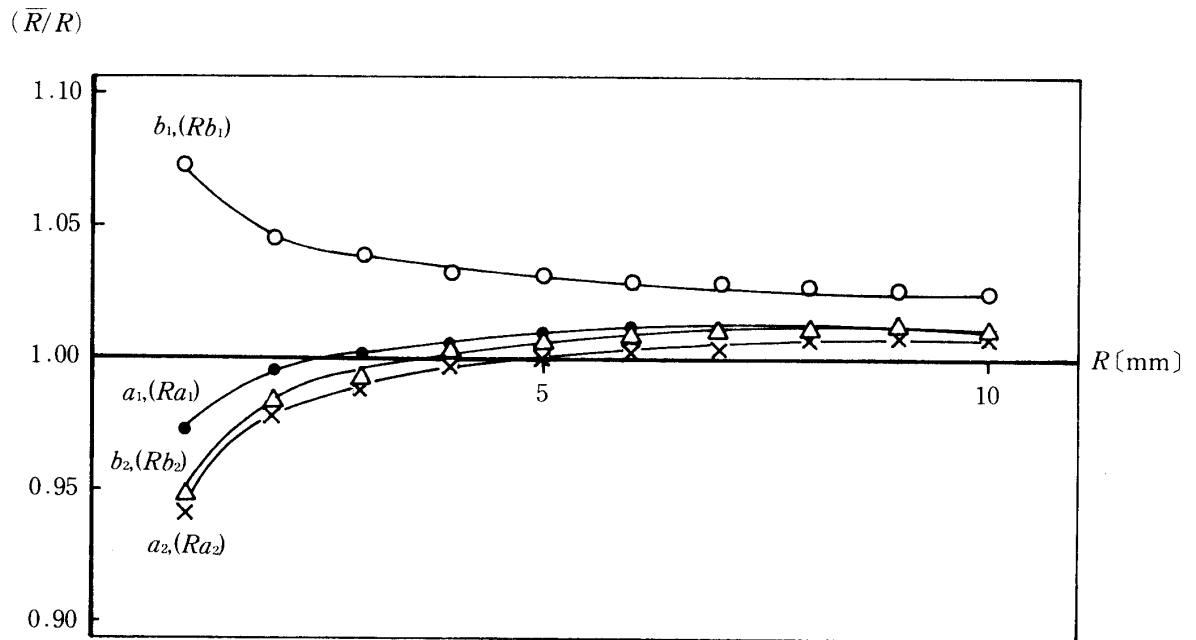


図-8 欠陥口径(R)とその推定比(\bar{R}/R)(欠陥部底面厚さ 4 mm)

試験片の欠陥の口径に、より近い値、と推定されることになる。

3. 3 フィルム黒化度比

前項の欠陥口径推定比に続き、この項では、線量率からフィルム黒化度比(後述)を考え、欠陥深さの推定について述べる。図-9は、図-3と同様な配置とし、フィルム面での線量率を求める図とした。

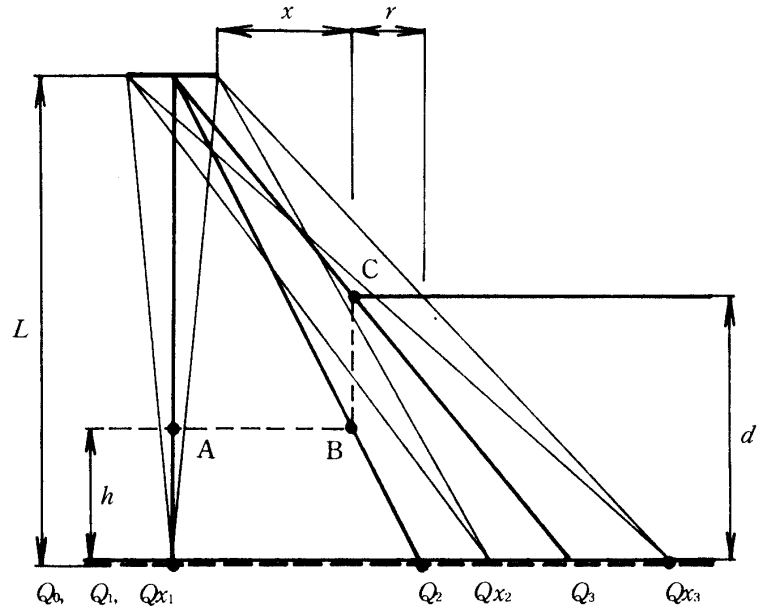


図-9 フィルム面での線量率

又、式(6)から(9)には、線源の長さ $f = f_1 \sim f_2$ の時、そして式(10)から(13)には $f = 0$ の時と、それぞれフィルム面での線量率を求める式として示した。

$$Q_{x0} = \int \frac{RhK}{x^2 + L^2} dx \quad (6)$$

$$Q_{x1} = \int \left(\frac{RhK}{x^2 + L^2} e^{-\mu h \sqrt{L^2 + x^2} / L} \right) dx \quad (7)$$

$$Q_{x2} = \int \left(\frac{RhK}{x^2 + L^2} e^{-\mu r \sqrt{L^2 + x^2} / x} \right) dx \quad (8)$$

$$Q_{x3} = \int \left(\frac{RhK}{x^2 + L^2} e^{-\mu d \sqrt{L^2 + x^2} / L} \right) dx \quad (9)$$

$$Q_0 = \frac{RhC}{L^2} e^{-\mu d} \quad (10)$$

$$Q_1 = \frac{RhC}{L^2} e^{-\mu h} \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{RhC}{L^2 + \left\{ \frac{R}{2} + \frac{R \cdot h}{2(L-h)} \right\}^2} e^{-\mu \sqrt{h^2 + \left\{ \frac{R \cdot h}{2(L-h)} \right\}^2}} \quad (12)$$

$$Q_3 = \frac{RhC}{L^2 + \left\{ \frac{R}{2} + \frac{R \cdot h}{2(L-d)} \right\}^2} e^{-\mu \sqrt{d^2 + \left\{ \frac{R \cdot h}{2(L-d)} \right\}^2}} \quad (13)$$

点A, 点B, 点Cを通るときの上記 Q_1, Q_2, Q_3 は, フィルム黒化度が特に変化の見られるところの線量率であると考えられる。

ここで, フィルム黒化度比を次のように定めた。

$$\text{フィルム黒化度比 } (Z_1 \sim Z_3) = \frac{\text{試験片欠陥部を透過した線量率 } (Q_1 \sim Q_3)}{\text{試験片健全部を透過した線量率 } (Q_0)}$$

$$Z_1 = \frac{Q_1}{Q_0}, \quad Z_2 = \frac{Q_2}{Q_0}, \quad Z_3 = \frac{Q_3}{Q_0} \quad (14)$$

次に, 式(10), (11), (12), (13)に前記実験値と, R, h, μ の値を代入し, 式(14)を計算して, フィルム黒化度比と欠陥部底面の厚さとの関係を求め, 図-10に示した。

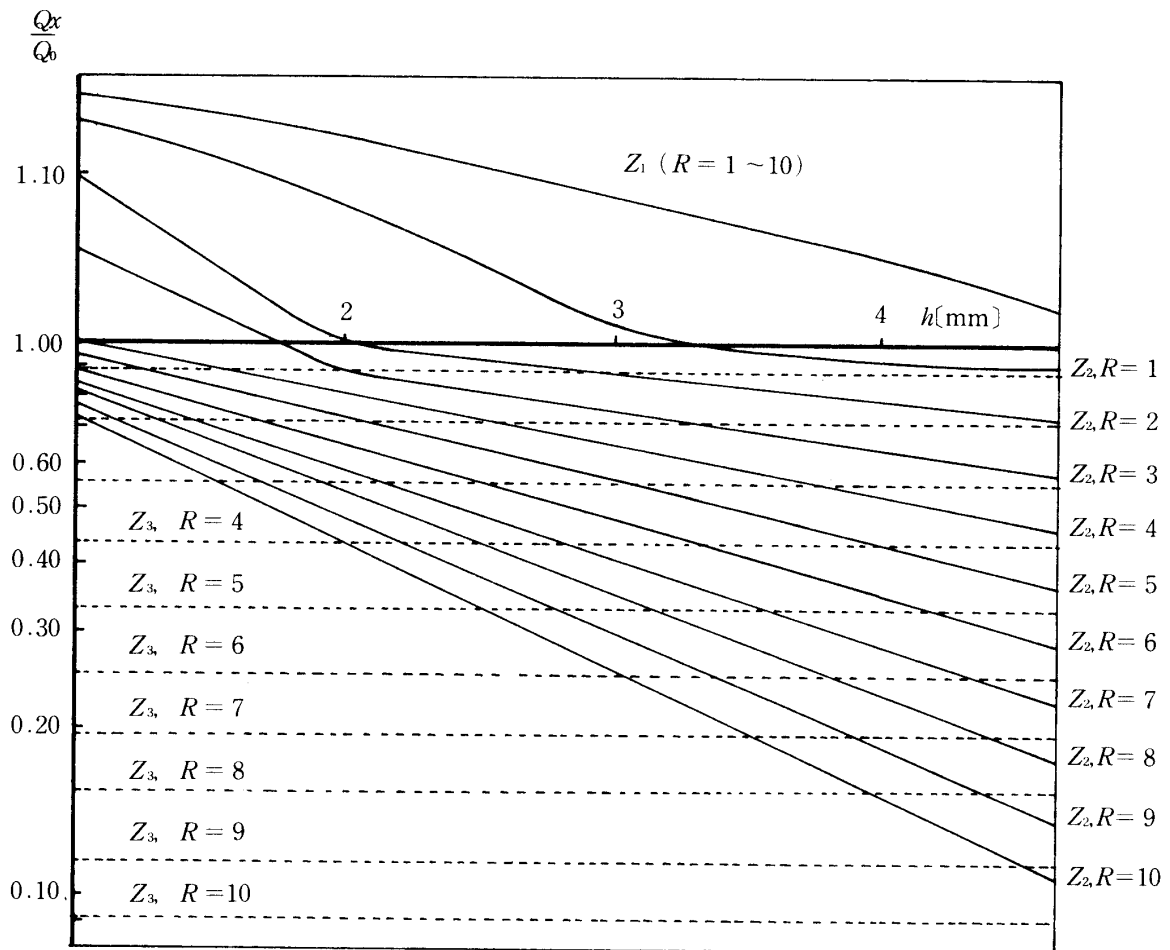


図-10 欠陥部底面の厚さ(h)と黒化度比(Qx/Q_0)

この図-10には, 各点でのフィルム黒化度比 Z_1, Z_2, Z_3 について, それぞれ試験片欠陥口径 $R = 1$ [mm] から10 [mm] の時の値を作図した。フィルム黒化度比 $Z = 1$ は, 試験片健全部の厚さ d と, 欠陥部底面の厚さ h が等しいことを示す。即ち, 欠陥なし, ということで線量率は同じになるからである。

A, B, C各点透過後のフィルム黒化度比 Z_1, Z_2, Z_3 について次に述べる。

- (i) Z_1 は欠陥口径 R に関係なく、厚さ h のみの影響を受ける。深い欠陥の時($h = 1$ [mm])の $Z_1 = 1.179$ から欠陥なしの時($h = 5$ [mm])の $Z_1 = 1.00$ へと小さくなる。
- (ii) Z_2 は欠陥口径 R , 欠陥部底面厚さ h の両方の影響を受ける。欠陥が小さい時 $R = 1$ [mm], $h = 1 \sim 5$ [mm])では Z_1 に似た変化をするが、欠陥が大きくなるにしたがって、図-10のグラフ Z_2 の公配は大きくなる。即ち $R = 10$ [mm], $h = 1$ [mm]で、 $Z_2 = 0.73$ であるのに対して、 $R = 10$ [mm], $h = 5$ [mm]では、 $Z_2 = 0.09$ と約 $1/10$ に小さくなる。
- (iii) Z_3 は厚さ h に関係なく、欠陥口径 R のみの影響を受ける。欠陥口径が小さい($R = 1$ [mm])で Z_3 は $Z = 1$ に平行で、1に近い値 0.886 で、欠陥口径が大きい($R = 10$ [mm])では、小さい($R = 1$ [mm])時の約 $1/10$ の 0.09 となる。

4. む す び

欠陥口径に関する実験値の \bar{R}/R が漸減することに関して、欠陥像の真影・半影などより、幾何学的方法で、計算していける。

また、欠陥深さについての欠陥像は、計算上、指数関数的変化をするが、非破壊検査現場で使用するような機器を使って、実験値でいどの欠陥の測定をする場合は、直線的变化に判定される。

おわりに、ここで示した図-7, 図-8, 図-9を応用し、一般的なグラフ、図表等を作つていけば、R.T.による人工欠陥評価の一資料になると考えるものである。

謝 辞

本研究にあたり、多大なご指導、ご援助を賜りました各位に、心から感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 富士岳：X線透過試験と超音波探傷試験との比較，非破壊検査，Vol 18, No. 5，日本非破壊検査協会，1969。
- 2) Radiography Versus Ultrasonic Testing, F. Karlsen : Det Norske Veritas' Engineering Service Division, NON-DESTRUCTIVE TESTING, 5-6(1972)340.
- 3) 守部憲義他：放射線透過試験と超音波探傷試験の併用，昭和56年度(株)日本非破壊検査協会関西支部研究発表会。
- 4) 窪堀俊文：超音波及びX線検査法による溶込み不足の評価，非破壊検査，Vol 32, No 1，日本非破壊検査協会，1983。
- 5) X-rays or Gamma-rays?, R. HalmsHaw, B. Sc., : R.A.R.D.E., Ministry of Defence, Fort Halstead, *The British Journal of NDT* 18-6(1976).