

# 土木工學に於ける X 線の應用

島田 八郎

緒 言

X 線は西曆 1895 年（明治 28 年）Roentgen が真空放電の實驗中發見せしより近々 40 年の間に各種の部門に應用せられ特異な位置を占めてゐる。其の主な理由は普通光線の到底及ぶ事の出来ない透過性による事は周知の事である。一方 X 線の廻折現象は結晶質の原子構造に類する内部構造の研究に必要缺くべからざるものである。X 線其のものに關する研究も微に入り細に互り進められてゐる。今日に於ては既に自然科學及び應用方面の研究に盛に其の性能を發揮してゐる。斯かる現状なれば所謂土木工學の部門に於ても X 線の利用が近年著しくなつて來た。其の最も最近な例は鋼材等の電弧溶

接部の検査法として盛に使用されて來た事である。米國に於ては A. S. M. E の銲接パイラーの第 I 級に對して規格が實施せられドイツに於ても DIN, 案 2, E, 1914 を發表し實用期に入りつゝある現狀である。我國に於ても各種の學術雜誌報告に此種 X 線寫眞が掲載されてゐる將來益々試験法として利用され發達するものと考へらる。従て X 線に關聯し X 線管發生裝置も年を追ひて改良され、レントゲン當時の姿を全く變へてしまつた。殊に X 線による透過試験法が如何なる精度を有するものなるやは嚴密な意味に於て未だ研究の途上にあると思ふ。鋼材の銲接片に對しても未だ研究を要すべき問題の餘りに多くあるに驚く次第である。

斯かる現狀なれば我等土木技術者としても X 線に對し概略にても正しき常識を持つ事は試験に従事する者は勿論試験結果を利用する者にとつても頗る必要な事である。一例として擧げた電弧銲接の部門に於ても上記の如き有様であるが土木材料全般より見れば X 線の應用は更に驚くべき廣範圍に及ぶものである。勿論土木建築材料とは一般のものにて特に斯かる名稱を附すは誤謬を來す恐れあるも著者は土木技術者が最も多く取扱ふ材料とし、セメント、コンクリート、硝子の如き窯業製品や瀝青系統の物質を第一義的に軽く意味せるものである。唯だ問題が内容的に考察するに可なり廣汎に涉るもので其の全貌の一端を適宜選擇し記述せんとするものである。若し拙文により X 線の性能及び應用方面に關する理解を深め讀者の參考に供する事を得ば幸である。

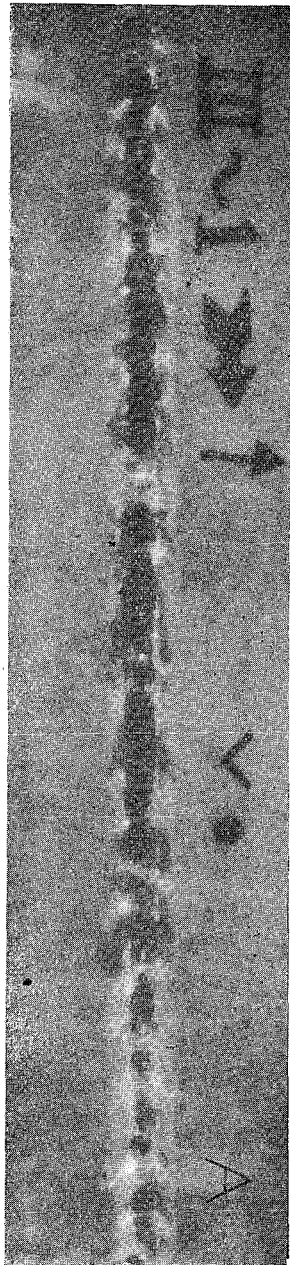
下記の如き事項により順次記述する考へである。

- (A) X 線の發生に關する事柄 (X 線管、發生裝置をも含む) に就て
- (B) X 線の特長 (主として應用の立場より) に就て。

(C) 現在に於ける土木材料部門に於ける X 線應用の實例に就て。

(A) (B) (C) の各項目を更に説明の便宜上適宜多くの小部門に分類し記述す。

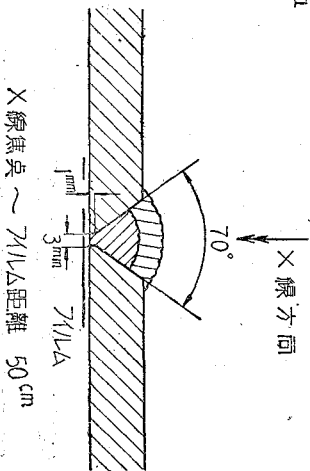
各論に入る前に X 線が應用工學上に利用される主なる理由及び其の應用される方式を一通り理解しをく事が必要であ



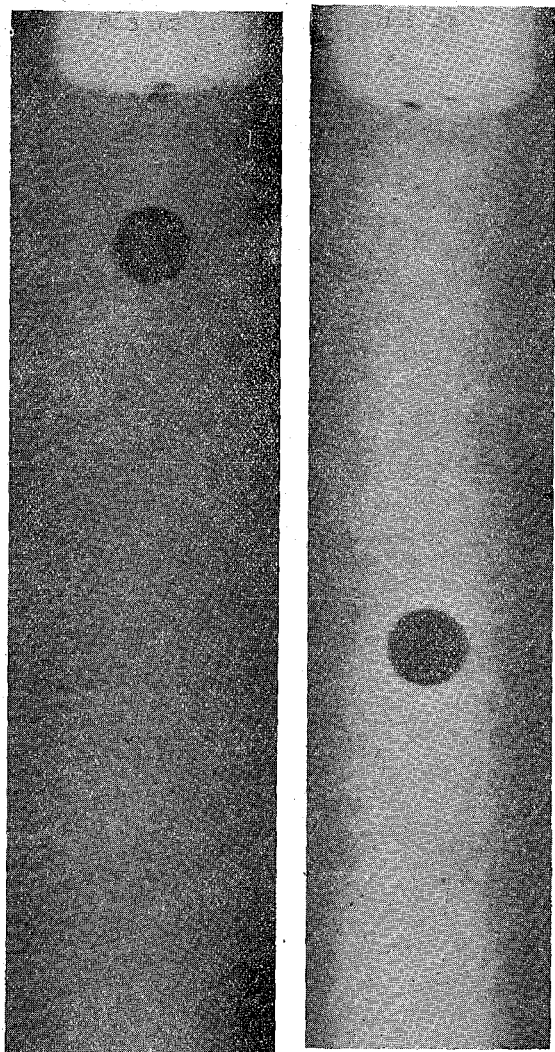
寫 眞 第 1

る。 下記の如き 4 つの方式により X 線により實驗研究等が行はれてゐる様である。

(I) 透過法 (吸收法、absorption method); X 線の物質を透過する特性は同時に物質により吸收率を異にせる事を意味す。其の差異を利用し肉眼的に透視し得ざる各種物質の内部状況を明かにするものにて更に大別し二種に分ち得、即ち



I~a 透過法により物質内部各種の状況を明かに観察せんとするもので通常最も一般に用ひられてゐる方法である。寫眞第1は其の一例として示せる銲接片の X 線寫眞にて白き斑點は瓦斯囊又は銲け込み不充分等による瑕を示すも



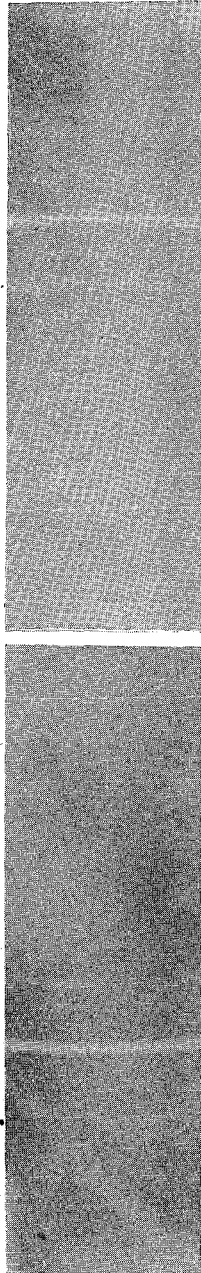
寫 眞 第 2

アスファルト標準砂混和物内に於ける鋼球落下状況を示す。X線寫眞（向つて左は上部を示す。）

ので寫眞は可なり銲接不良のものを示した。

I~b 透過法による觀察を他の特性を實驗測定せん爲め利用するもので例へば實例の項に於て示すも砂層の動きを測定し物體力學に資せんとす場合の如きものである。寫眞第2は、アスファルトと標準砂よりなる混和物内に於ける鋼球落下速度を測定してマカザム類似物質の可塑性の試驗研究の一例である。

(II) X線の廻折、反射、散亂 等を利用するものにて物質の微細構造の研究を行ふものである。例へばセメントの硬化理論に於て其形成物の判定、金属材料各種の組織と物の性との研究及び歪状態の研究にも其の應用の一部として用いられる。寫眞第3デバイ・ハル (Debye・Hull) 標末法によりハルカメラ使用による鋼の干渉圖を示すもので寫眞より結晶組織の状態を判ず。



寫 眞 第 3

デバイ・ハル標末法干渉圖、試料、銲接用電極棒、ハルカメラ、 $Fe\sim K$ 線による。

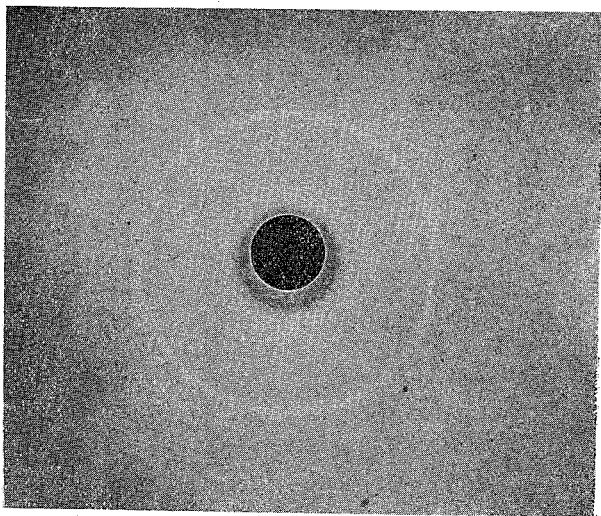
寫眞第4は、鋼の反射による X線の干渉圖であるが表面の歪状態を研究する際に使用する。

(II) X線の吸収と物質の變化 に関するものにて廣義の吸収法の中に入れても稍々趣を異にせる爲め別に之を掲げ

た。主に生理學的方面に於て細胞に刺激を與へ、治療を行ふ場合に採用される方式なれど X 線取扱者が照射の爲め蒙る炎傷作用を防止する上にも、其の傾向を理解し置く必要がある。又材料老化の研究滙青乳劑の組織的研究の一部にも利用し得るものである。

(W) X線の分光 に関するもの、主として X線のスペクトルの研究をするものである。各元素特有の X線及び其の微細構造を研究するものにて最も主要な基礎的の事柄であるが應用工學としては寧ろ I の X線廻折による部門の範圍に含まると解して大なる誤は無い

以上の如く説明不充分なるも X線の理論及び應用は可なり高き水準にまで進歩し専門雜誌に於て常に絶えざる發展を示してゐる次第なれば到底充分其の内容を記述し得ざるも杜撰ながら一通りの説明を試み土木技術者としても如何に其の應用利用範圍の廣く、其の恩恵に與かり得るかを相共に考察せん。



寫 眞 第 4

反射法による X線干涉圖、試料、鋼材、Fe $\sim$ X線による。

## I 章 X 線の 發 生

1 節 X 線 の 概 念 先づ最初に X 線とは如何なるものであるか一通り其の概念を作つて見よう。勿論嚴密な意味の定義を考察するものでない。殊に最近の物理学の異常な發達により可なり其の概念にも變化を來してゐるから寧ろ應用 X 線を理解し得る事を目標として考へるのが得策である、即ち、

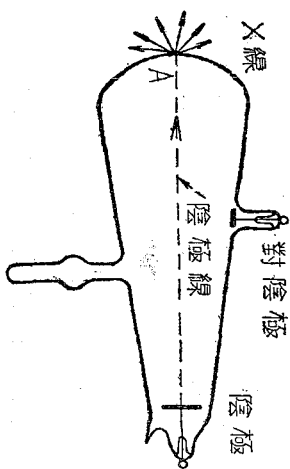
X 線は光波と同一速度を有する電磁波的振動を有す輻射線であるが其の波長は通常の光波に比較し極めて短い。第一表は各種の電磁波の波長の關係を示すものである。

副射線の種類	波 長
無線電信電波(ヘルツ波)	2mm~2km
熱副射線(赤外線)	0,001mm~0,5mm
可 視 線	(0,4~0,8)×10 <sup>-6</sup> mm
紫外線スペクトラム	(0,1~0,4)×10 <sup>-6</sup> mm
X 線	2~0,06Å
R 線線	0,02Å

但 Å = オングストロム單位  
 Angstrom unit = 10<sup>-8</sup>cm.

第 1 表に示す如く各電磁波は波長により順次無線電信電波より減少し遂に放射能物より輻射される R 線級に至る。通常の光波の 5 萬分の一程度の波長を有す。X 線も學術上は廣範圍に及ぶものであるが應用工學上の目的に使用されてゐるものは第 1 表の如き範圍のものである、斯る X 線は物質内を透過する際吸收される事至つて少く最も著しい結果である透過作用を呈す。一方或る物質に照射する時螢光及燐光を發せしめ又寫眞乾版に感光作用の有る事實を利用し X 線の物質透過能力の大小を判定するものである。同じ物質にても(選擇吸收を除く) X 線に對する吸收力は X 線の波長により著しく異なるもので波長の大なる X 線は容易に吸收され透過能力が少い。之に反し波長の短きも

のは全く反對の性質を有し強い X 線と稱へられてゐる。一般に工學上使用してゐる X 線發生をみるに所謂真空放電の場合より考察するが便である。即ち減壓の下に真空放電を繼續して行くと真空度が増加し殘留ガスの壓力が水銀柱 0.01 ~ 0.001mm 程度に至ると兩電極に加へられた電壓が適當な高壓とすれば陰極(-)附近より放射された電子が高速度を有し其の電子の進路内に置れた物質に衝突し此處に急激に其の運動が停止される電子の運動量の急變により一種のエネルギーが輻射される事となる此れが即ち X 線である。第 1 圖に示す如く、電子が高速度にて真空放電管の壁に衝突し、壁外に置



第 1 圖

れた白金ツェン化バリウムが螢光を呈せしにより壁より一種の輻射線の出てゐる事實に由り最初レントゲンが X 線を發見した。現今科學的研究及び應用工學上使用されてゐる X 線管球は同様の原理によるものである。第 2 圖の如く陰極(-)と陽極(對陰極, anticathode)(+)が相對してゐる。斯くして電子の流れ即ち陰極線は陰極より對陰極に兩極に加へられた電壓により定る非常に大なる速度で衝突し、對陰極により急激に遮斷せられ電子の停止した所から X 線に輻射する。

今第 1 圖の陰極對陰極に加へられ加速電壓を  $V$  とし、電子の質量及び帶電量を夫々  $e, m$  とすれば對陰極に衝突する時の電子の速度  $v$  は (1) 式で與へられる。

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve \dots\dots\dots (1)$$

$$m = (8,994 \pm 0,014) \times 10^{-28} \text{ gr.}, e = (4,770 \pm 0,005) \times 10^{-10} \text{ e. s. u.},$$

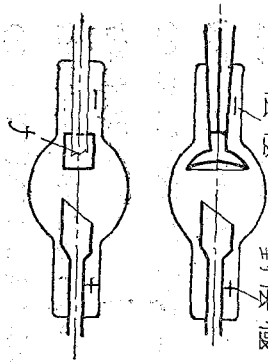


$V = V(\text{ボルト}) \times 3 \times 10^9$ , と置けば  $v$  は cm./sec., で求まる。  $V$  が 100K.V. にも達すると  $v$  は真空中の光の速度  $c = (2.99796 \pm 0.00004) \times 10^{10}$  cm./sec.,

$$m_0^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right\} = Ve \dots \dots \dots (2)$$

の半角を超えるから(2)式の如き相對性理論による箱圧を加へたものより求むべきである。但し同式の、 $\beta = v/c \dots$ を示す  $V = 100\text{K.V.}$  に對しては  $v = \beta c = D_1 549c = 1.88 \times 10^{10}$  cm./sec., となり對陰極に衝突する時の電子の速度の如何に大なるかを了解する事が出来る。又輻射 X 線の波長を求める場合にも後に述べる如く(1)(2)式を變形し適用す。

上述の如き X 線發生の機構は X 線管内に行はれるものである。第2圖(a)(b)は X 線の代表的2形式を示すものである。



第 2 圖

2圖(a)は**瓦斯X線管**、2圖(b)は**熱陰極X線管**(又は發明者の名を用ひ **Coolidge型X線管**とも)と稱すものにて前者は加速される電子の供給源として管内に殘留せる微量のガスを利用するもので先きに述べし如く實際には 0.001~0.005mm 水銀柱位の壓力を保たしめる。後者は眞空度を高め通常  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  mm 水銀柱位とし電子は陰極にある加熱フィラメントより放出せしめる。兩者共に對陰極により電子の運動が停止され X 線を發生する事は全く同じであるが電子を放出する有様が全く異なる。従つて陰極より對陰極に對し流れてゐる電子即ち X 線管球を通る電流は瓦斯管に於てはガス壓力によつては勿論兩極間の電壓により著しく影響を蒙るものであるが、Coolidge 管球に於ては熱陰極の溫度と構造により定まるもので電壓には無関係

係である此性質は兩管球使用の際に考慮に入れてをく必要がある。

斯くして對陰極より放射された X 線は一種の波長の放射線でなく或る範圍に涉りエネルギーの分布を有するもので其の形式を大別すれば二種ある。

(1) は陰極線電子が對陰極に衝突し急激な運動量の變化の爲め生ずる白色 X 線 (White X-Ray) で或る波長の間連續せるエネルギー分布を有するもので連續 X 線 (Continuous X-Ray) とも云ふ。従て管球に掛けた電壓により非常に異なる分布を示す。

(2) は對陰極金屬に特有な波長のみが存在するもので陰極電子の衝突により刺激誘發され對陰極金屬原子内の電子が軌道を變ず其の際放射する X 線に従つて管球に掛けた電壓に無關係である。示性(特性) X 線 (Characteristic X-Ray) 又は Homogeneous X-Ray とも稱す。

兩者共に波長〜エネルギー分布の有様より考察し連續スペクトル又は線スペクトル (Line Spectrum) とも稱す。對陰

第 1 表

對陰極物質	最小剛發電壓(K,V)	示性 X 線波長(Å)
Cr	6	2,287
Fe	7	1,935
Cu	9	1,539
mo	20	0,710
Ag	25	0,560

極の材料は示性 X 線を放射せしめる場合と白色 X 線の場合とにて自ら異なる。

前者の場合には所要 X 線の波長に應じ金屬は定る、管に掛ける電壓は各金屬に應じた剛發電壓以上のものであればよい。第 1 表に對陰極として屢々使用される上三の金屬の示性 X 線の波長と剛發電壓を示す。後者には通常透過試驗等に於て短波長の硬い線を得んとする場合の如き高電壓を使用するを以て種々の條件より原子量大なる熔融點高き熱傳導良好なる、タングステン、モリブデン、

白金等が用ゐられる。

白色 X 線のエネルギー分布は第 3 圖の如く管球に掛けられた電壓 (V) に應じ或る定つた波長より長き範圍に存在せる

もので且つ短波長の側には鋭い境界がある。斯かる最短波長  $\lambda_{\min}$  は

(1) 式に類似の式で與へられる。

$$h\nu = Ve \dots \dots \dots (3)$$

但し、 $V, e$  は (1) 式の場合に述べしものと同じ、 $h$ 、プランクの定數 ( $6.547 \pm 0.008$ )  $\times 10^{-27}$  erg. sec.,  $\nu$ ; 白色 X 線の最短波長  $\lambda_{\min}$  の

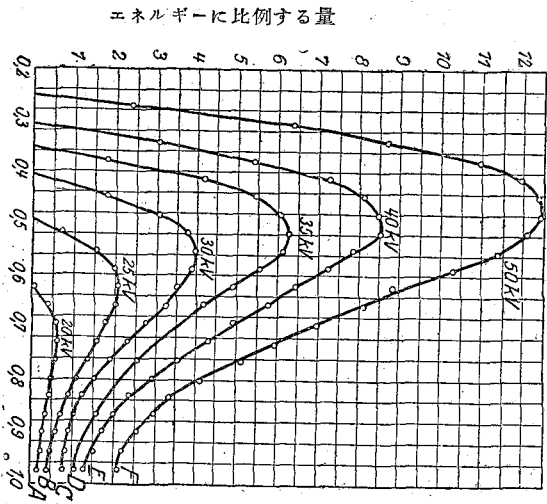
ものゝ振動數  $\nu = c/\lambda_{\min}$ ,  $c$ ; 真空中の光速を示す。今  $\lambda_{\min}$  を、オングストローム ( $\text{\AA}$ )、 $V$  を K. V. で表せば (3) 式は (3)' 式の如くなる。

$$\lambda_{\min} = \frac{12,345}{V(\text{K.V.})} \dots \dots \dots (3)'$$

(3) 式はデュアノン・フント (Duan Hund) の方程式と呼ばれ第 3 圖と比較するも實驗とよく一致してゐる。第 3 圖はタンゲンツ對陰極

にした場合の白色 X 線のスペクトルで曲線に記入した電壓は屢々述べた管球に掛けられた電壓である。横軸は發生する X 線の波長で相

對する縦軸にはエネルギーを取つた。例へば  $V = 30 \text{K.V.}$  に對する曲線

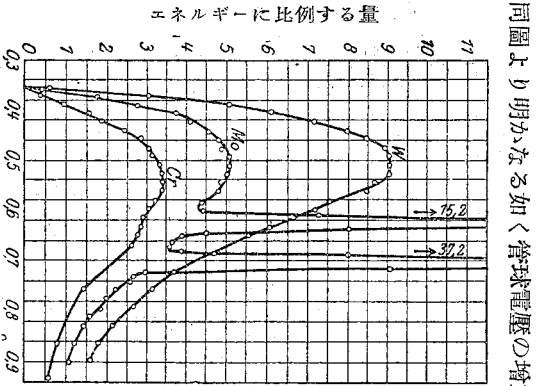


第 3 圖

を見るに波長約  $0.44 \text{\AA}$  より長波長の範圍に於て波長の増加と共に多量の X 線が存在し、 $\lambda = 0.55 \text{\AA}$  のものが最大となり更

に波長の増大と共にエネルギーの減少する事を示す。(3)'式の  $\lambda_{min}$  で與へられる波長は今の場合約  $0.4\text{\AA}$  に相當する。最大エネルギーとなる波長  $\lambda_{max}$  と  $\lambda_{min}$  の間には略々下記(3)''式の如き關係がある。

$$\lambda_{max} = \frac{3}{2} \lambda_{min} \dots \dots \dots (3)''$$



λ (波長, Å)

第 4 圖

同圖より明かなる如く管球電壓の増加と共に波長短き X 線の量及び X 線の總量も著しく増加せる事が分る。第4圖も全く同様のエネルギー-波長の關係を示すものにて管球電壓 37~38K.V. の程度とし對檢極金屬を第3圖の場合のタンゲステン(W)の外、Mo、(モリブデン) Cr. (クロム) を使用せる場合である。對檢極金屬を Mo とせる時には第4圖の如き連續スペクトルの外に2ヶ所特定の波長に對する X 線が強線スペクトル即ち X 線の存在せる事を示す。勿論 X 線管球に掛けた電壓が關發電壓以上の場合 W, Cr. 對檢極の場合も各金屬の示性 X 線發生するも波長の關係で第4圖に表れてゐない。

兎に角にも X 線は如何にして發生せられ乎且つ其の種類及び性質の概略を述べた。尙ほ實驗に必要な特性に關しては更めて詳しく述べる。實際に斯る X 線を發生するに用ひる X 線管球及び發生装置も最近著しく發達し殊に數年間に絶縁物の進歩と共に應用工學上面目を一新せるかの觀がある。(續く)