

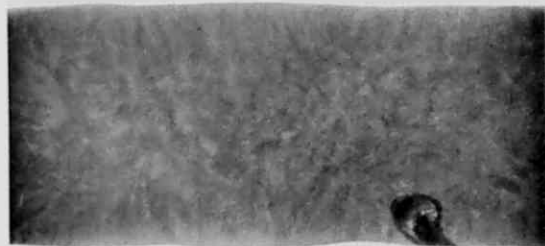
## X 線透過写真の異常像

一色貞文・片岡邦郎・高 正植・山沢富雄

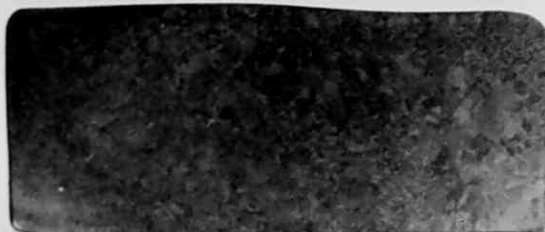
アルミニウム合金やオーステナイト系ステンレス鋼の鋳物、溶接部の X 線透過写真に見られる斑点状、層状等の異常像は、材料中の粗大結晶粒による透過 X 線の回折像と考えられ、アルミニウム合金では  $0.2 \sim 0.5 \text{ \AA}$  の波長範囲の X 線が像の発生にあずかっている。異常像の模様は、材料のマクロ的金属組織とよく対応しており、金属組織状態の推定への利用が考えられる。ただし結晶粒が微細なときは像は認められない。異常像の除去法として、前記の波長範囲に吸収端を持つ錳箔をフィルタに用いたところ、異常像が顕著にはげるのが認められた。

## 1. ま え が き

X 線透過検査は、物質の X 線に対する吸収率の相違を利用して、金属材料内部の欠陥を検出する方法である。簡単にいえば一種の影絵で、医学でいうレントゲン写真と原理はまったく同じである。したがって透過撮影する物体が板のようなもので、厚さの差や密度の差がなければ、まったく均一の濃度に写るはずである。ところが金属材料の場合には、欠陥や厚さの差等がなく、吸収率の差がないときでも、透過像内部に斑点状の淡い濃淡模様が出るのが往々ある。そこで透過検査技術者は、そうした原因はよくわからないが、一見欠陥像とまぎらわしいような濃淡模様を総称して、透過異常像 (Abnormal transmission pattern) あるいは単に斑点像 (Mottling) と呼んでいる。従来このような透過異常像は、普通の撮影法では、像がうすく不明瞭で、研究の対象として取り上げにくい。そのため、フィルムの現像むら、あるいは散乱線の影響、あるいは偏析による像であろうと簡単にかつあいまいな説明のまま放置されていた。最近ステンレス鋼の溶接が盛んに行なわれ、また高濃度の写真が撮られる傾向にあり、とくにオーステナイト系ステンレス鋼溶接部にこの透過異常像が、しばしば明瞭な像として観察され、欠陥像とまぎらわしく現実に判定の障害となってきたため、問題として取り上げられるようになった。現在この透過異常像の原因や、出やすい金属材料、像の模様などについて、まだ十分な知識が得られているわけではないが、この透過異常像は、なんらか金属材料内部の組織状態を示すものであって、将来 X 線透過法の新しい利用への手がかりとなると考えられるので、以下にその紹介と、利用の可能性、防止法など若干述べてみよう。なお文中にある透過 X 線とは、工業用透過試験に用いられる波長が短く (最短波長が  $0.02 \sim 0.2 \text{ \AA}$ )、透過力の大きい白色 X 線のことをいっている。また欠陥とは、金属材料中に見られる割れ、気泡、融合不良、溶け込み不足、スラグ等のマクロ的欠陥を指している。

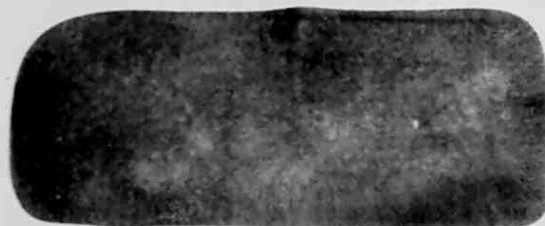


(a) 純アルミニウム (99.7%) の X 線透過写真。X 線管電圧 62 kV, さくら R



(b) 純アルミニウム (同上) の鋳造試料 (115×50×12 mm) のマクロ組織。撮影条件、試料寸法等は以下ほぼ同様なので略す。

第 1 図

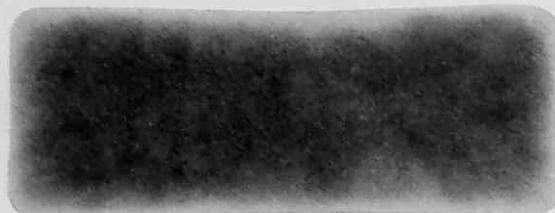


(a) Al-4%Cu 合金。X 線透過写真



(b) 同上。マクロ組織

第 2 図



(a) Al-7%Cu 合金, X線透過写真

(b) 同上, マクロ組織  
第 3 図

## 2. 透過異常像とは

### (1) 軽合金鋳物の異常像

アルミニウム合金を厚板に鋳込んで、その両面を削り X線透過写真を撮ると、透過像全面に第1図(a)~第3図(a)のような淡い濃淡模様が見られることがある。これらの模様の出た試料の部分の断面をとってマクロ組織を見ても、健全な金属組織を示し、気泡やスラグなどの内部欠陥は認められず、欠陥像ではないらしい。むしろどの写真を見てもわかるように、濃淡模様は、試片周辺の層状像部分と中心の斑点像部分とから成っていて、第1図(b)~第3図(b)のマクロ組織写真の柱状晶部、粒状晶部とよく対応し、これがなんらかの金属材料の組織状態を現わしていると考えた方がよいようである。これらの試料は Al-Cu 合金 (Cu 0~7%) であるから、銅の偏析組織像とも考えられるが、第1図(a)の純アルミニウムや Al-Si 系合金でも明確に認められるので、偏析のみによる像であるとはいえない。

Glaisher<sup>3)</sup>は、Al-Cu 合金について、このような透過異常像を研究した結果、その特徴を次のようにあげた。

- 1) 斑点像は気泡、ボイド等の容積が全体の0.1%以下の健全な材料にも生ずる。
- 2) 個々の斑点像の大きさは、通常材料の結晶粒径にはほぼひとしく、また柱状晶、粒状晶等の組織に対応して像も層状や斑点状に現われる。
- 3) 試片厚さが1/2in以上になると、それ以上厚くなくても像は変化しない。薄いと現われにくい。
- 4) 粗大粒と微細粒の試片を重ねて撮ると、両者による像が現われるが、フィルムから遠い側にある試片の結晶粒の像が比較的良好に出る。
- 5) 試片をひっくり返して撮っても、反転像(鏡像)

は現われず、異なった像になる。

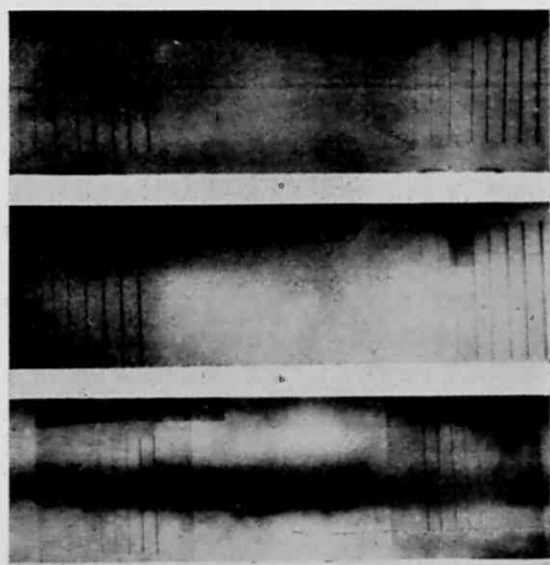
6) 非常に薄い合金試片では、偏析した合金相の透過像(樹枝状晶像)が現われる。

7) 斑点像は最純アルミニウムでもよく出るので、X線吸収率の差による偏析組織の透過像ではない。

Glaisherはこのような特徴を挙げたのち、透過異常像は、透過X線が材料中の適当な方位の結晶粒によって回折されて生じたラウエ斑点であると結論している。

### (2) オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の異常像

このような異常像は、比較的結晶粒が大きくなりやすいオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部や鋳物の透過写真にもよく見られる。これについては、昨春非破壊検査協会の“非破壊検査における疑似探傷像”シンポジウムで、渡辺<sup>2)</sup>、富田<sup>3)</sup>、河村<sup>4)</sup>、入江<sup>5)</sup>の各氏によって詳細に報告され、またのちに入江、藤井、山下<sup>6)</sup>氏による論文が同協会誌に掲載された。入江氏らによると、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の透過写真には、1) ビードの中央部にビード方向に細線状、波線状のやや濃い像が現われる。像が濃淡二重像で現われることもある。2) ビード全面に鱗片状、むら状に濃淡像が現われる。3) 両者が混在していることもある、などの特徴があると述べており、これは他の各氏の報告にも共通している(第4図)。



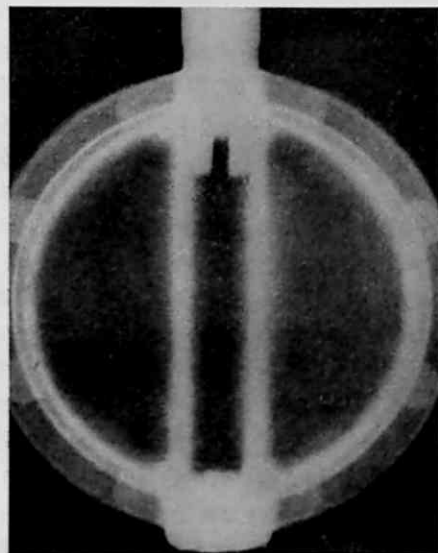
第4図 オーステナイト系ステンレス鋼(SUS 32 相当) 溶接部の透過異常像。上から a) 細線状 b) むら状 c) 両者の混在。

またこれらの像の出方は、溶接法によって異なり<sup>2)</sup>、ステンレス鋼板手溶接多層盛はむら状模様、ユニオンメルト三層盛は線状とむら状の混在、ユニオンメルト単層と純銅の溶接または真空鋳造試片では、柱状組織像が現われたという。異常像の成因については、各氏の説は一致せず微細なボイドの分布、Ni, Cu等の偏析、透過X

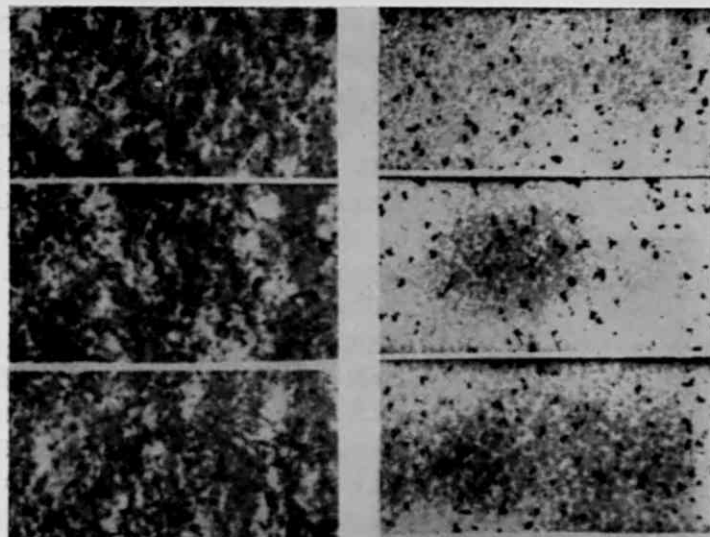
線の回折等に意見が分かれている。入江氏らの論文では X 線回折像との説を採っており、このような像は他の金属でも認められ、たとえば無酸素銅の場合、0.44~0.51 Å の波長範囲の X 線によって像が生じたと報告している。

### (3) 333 アルミニウム合金の異常像

上の 2 例は、透過異常像の原因を X 線の回折によるものとしているが、偏析による試料各部の X 線吸収率の相違にもとづく報告されている異常像もある。



第 5 図 333 アルミニウム合金金型鋳物の透過異常像 (K. R. Van Horn<sup>7)</sup>による)



第 6 図 333 アルミニウム合金金型鋳物からとった薄片試料のマイクロジョグラフィ。いろいろの段階の斑点像を示す (K. R. Van Horn<sup>7)</sup>による)

左 0.050 in 厚さ。Cu の偏析による白い斑点が見られる。とくに黒い点々は気泡。×3

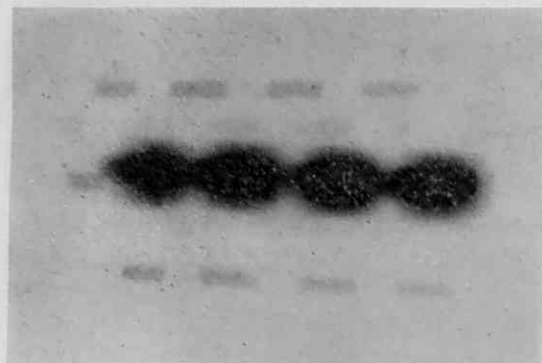
右 0.005 in 厚さ。あらい白い斑点が連続して粒間を埋める白い網目状になっている。

Al-Cu-Si 系の 333 合金 (Cu 3.8%, Si 9.0%, 残り Al) は鋳物合金としてすぐれているが、これをナトリウム微細化処理して金型に鋳込むと、その透過写真には夏みかんの肌のような粗い模様様の斑点像が現われる (第 5 図)。Na で処理しないものは非常に微細な斑点像が一様に分布している。Van Horn<sup>7)</sup>によると、この場合は結晶粒が微細なため、回折像のみの効果とは考えられず、偏析した Cu 濃度の高い相の透過像が現われていると考えるべきで、Cu > 2%, Si ~ 9%, Na 処理、急冷凝固がこのような荒れた斑点像発生条件であると述べている。薄片の透過写真、第 6 図を見ると無数の白点が一面に分布しており、これは Cu 濃度の高い相 (組成は不明) が局所的、点的に析出したためということである。

以上 X 線透過写真における異常像の代表的な例を紹介したが、その生因は、回折現象——透過 X 線が結晶粒により回折されてきたラウエ斑点像 (やや濃い) と、回折によって X 線の一部がぬけ出たのちの結晶粒の透過像 (周りよりやや薄い) とができる——であって、これにマクロ的な偏析が加わるとさらに異なる像を生ずると考えるのが最も妥当なようである。その理由として、上に紹介した例のほか、著者等が行なった実験結果を紹介してみよう。

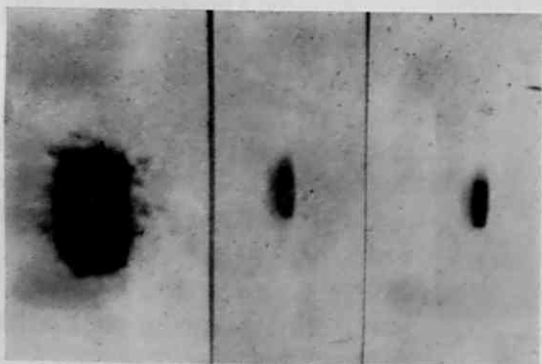
### 3. 異常像の生因

X 線を 1 mm 幅の鉛スリットで細長いビームにしぼり、大きい結晶粒の純アルミニウム薄板に入射透過させると、X 線はその一部が、試料中の回折に適切な方位にある結晶粒により回折され、試料から約 5 cm 離れて下に置いたフィルムに入射して感光し、第 7 図のような細長い回折像を生ずる。スリット透過像と対応する回折像との中心間の距離およびフィルムと試料間の距離とから回折角  $\theta$  が計算され、ブラッグの X 線回折の式  $n\lambda = 2d \sin \theta$  ( $n$ : 反射の次数、ここでは  $n=1$  とする。 $\lambda$ : 回折した X 線の波長、 $d$ : 結晶の格子間隔) に  $\theta$  と、アルミニウムのとくに強く X 線を回折させる格子面 (111) の  $d=2.33$  Å, (200) 面の  $d=2.02$  Å, (220) 面の  $d=1.430$  Å 等を入れると、回折した X 線の波長  $\lambda$  が求められる。第 9 図の場合は、スリット透過像に近い順に、(111), (200), (220), (311), (222) 等の各面による回折像で、回折された X 線の波長は 0.19 Å から 0.50 Å までの範囲にあることがわかった。この像は、管電圧を増大させても変化なく、また他の試料によっても同様な結果が得られた。この撮影には通常異常透過像

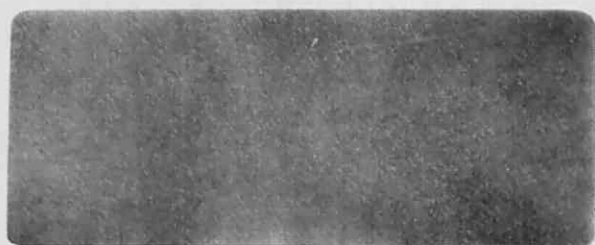


第7図 スリットによってしぼった透過X線ビームの純アルミニウム粗大晶による回折像。中央のとくに濃い四角が、透過X線像で、周囲の薄い像が回折像。像の対応位置を示すため、長隙スリットに鉛針金をのせて、像を分断している。80 kVP,  $\times 3$ を撮るときの2~3倍の露出時間をかけているので、実際には直接の透過像に近く、回折線が試料中を通る距離の短い回折像が、写真に出るのみで、回折を与える格子面は(111), (200)等の少数の面であり、回折X線は $0.50 \text{ \AA}$ よりむしろ $0.19 \text{ \AA}$ に近い波長であろう。なおブラッグの式で $n \geq 2$ の高次の回折も考えられるが、(111), (200)等の格子面によって、第7図と同じ回折像を生ずるためには、2次の回折として、 $\lambda \approx 0.1 \text{ \AA}$ となり、第7図に使用した管電圧80 kVPから求められる白色X線の最短波長 $\lambda_{\min} = 0.166 \text{ \AA}$ より小さくなるので、上のような高次の回折は考えなくてもよい。また同様なX線ビームを、第1~3図で用いた試料に入射させたところ、結晶粒が小さくなるに従って、回折像も、微細に分布することが認められた(第8図参照)。

以上のように異常像の一因は、透過X線の回折であると考えられるが、Al-Cu合金のように構成元素間のX線吸収率の差が大きいときは、合金元素の偏析による透過像が生ずる可能性も考えられる。Al-Cu合金の透過



第8図 スリットによってしぼった透過X線ビームを第1~3図の試料に入射してえられた回折像。スリット透過像のまわりの斑点像が、結晶粒が小さくなるにつれ、微細になり散在している。65 kVP,  $\times 1$

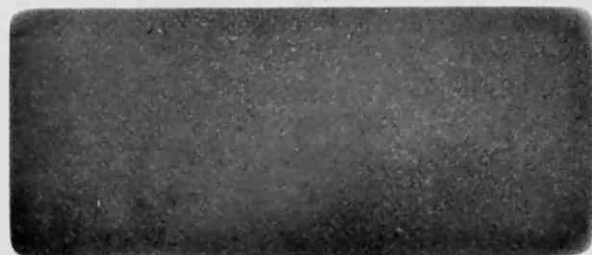


第9図 純アルミニウムに0.05%Tiを添加した鋳造試料の透過写真。柱状晶とやや微細化した粒状晶よりなる。82 kVP

写真(第2図)と純アルミニウムの写真(第1図)を比較すると、前者には粒状晶の部分に斑点をかこむ白い網目状の像が見られ、これが偏析組織の像のようにも見える。しかし同様な像は、純アルミニウムにチタンを微量添加して粒子を細かくした試片の写真、第9図にもややうすいが認められている。顕微鏡組織を見ると、大きいマクロの粒界の中が、さらに細かい粒子に分かれ、さらにその中に樹枝状組織らしい微細な濃淡の腐食模様認められた。X線マイクロアナライザによる分析でもCuの分布は、粒径のオーダーでなく、数十 $\mu$ のオーダーで深い鋸の歯のように変化していた。したがって、偏析はミクロ的なもので、X線透過写真に出るようなマクロ的なものではないらしい。つぎに第3図はCuを7%加えて、ゆっくり凝固させたものであるが、Cuの少ない $\alpha$ 相と、Cu濃度の高い $\theta$ 相 $\text{CuAl}_2$ が、微細な共晶として析出しているの、これは一種の偏析組織と考えられる。しかしチタンのみを微量添加し、第9図よりさらに微粒にした純アルミニウム鋳造方式片について、やや濃淡のコントラストは少ないが、第3図とよく似た像が得られており、第3図のような透過像が偏析組織を示すものと断定できない。偏析の透過像には、必ず結晶粒による回折像も伴っていると考えられる。透過写真を一見して、合金試料であるか否か、マクロ的偏析があるか等を判定することは、案外容易でないようである。

#### 4. 異常像と金属組織

第1~3図の透過写真(a)とマクロ組織写真(b)を対照すると、マクロ組織の粒状晶には、透過写真の斑点像が、また柱状晶には、層状像が、それぞれ対応して現われている。このようにアルミニウム合金では、その透過異常像はかなりよく材料内部の金属組織の状態を示しているといえよう。結晶粒はどんな位置にあっても回折像が出るわけではなく、Glaisherも述べているように、試片中の結晶粒のうち、フィルムから遠い側にあるものの回折像がより現われやすいらしい。それは20mmくらいの厚さの同一試片をフィルム側から順次削って行なっても、厚さが半分程度になるまで異常像にあまり変化がないことからいえよう。また結晶粒が、およそ0.3



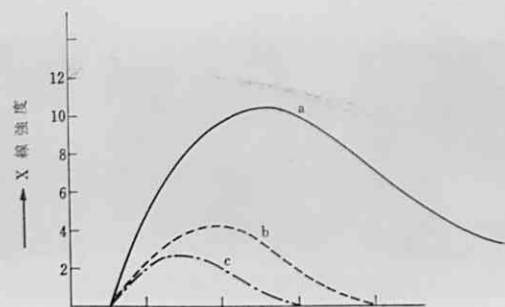
第 10 図 純アルミニウムに 0.1% Ti を添加した鋳造試料の透過写真。結晶粒が著しく微細化して、濃度はほとんど均一に見える。

mmφ 以下になると、異常像は微細な斑点像の分布になり、第 10 図のように一見均一の濃度のように見える。このように X 線透過異常像が現われるには、試料の結晶粒がある程度以上大きいことが必要で、高温の  $\gamma$  相が変態分解しないで室温まで持ち越されるオーステナイト系ステンレス鋼溶接部に異常像が見られるとの報告が多いのはこのためであろう。

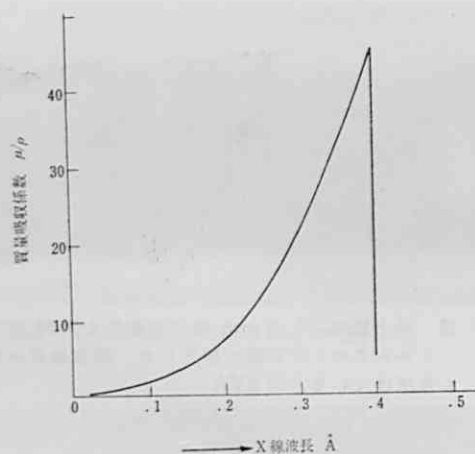
ただ軟鋼でも、柱状晶組織では、幅が細く不明瞭ではあるが、層状模様が認められたとの報告<sup>5), 6)</sup>があり、また鋳鉄でも欠陥でない斑点模様の分布がしばしば観察されているから、オーステナイト系ステンレス鋼以外の合金鋼、軟鋼、鋳鉄には異常像が現われないと断定はできない。むしろ透過異常像は、その名称から想像されるように、例外的な現象ではなくて、白色透過 X 線で金属材料の透過写真を撮るときは、必ず現われているのであるが、多くの場合は結晶粒が小さいため、斑点像も微細で一見均一の濃度のように見ると考えるべきであろう。入江氏等<sup>6)</sup>が指摘しているように、透過異常像は NDI や IIW の標準写真集にも取り上げられておらず、これについてわれわれはまだ何も知らぬというべきである。各種の鉄鋼や軽合金、銅合金等について広く異常像の写真を集めてみると、相当おもしろい結果がえられると思われる。なお圧延板や鋼管等、加工によって材料中の結晶粒が歪んでいるときは、回折像がはけて斑点として現われぬようである。これについては粗大結晶粒に引張り応力を加えて、その透過異常像のはけを観察する実験を行なっているので別に報告したい。

### 5. 異常像の防止

このように透過異常像はそれ自体は内部欠陥の像ではないのであるが、欠陥像と間違ひやすく、多く出現するときは真の欠陥像の識別を妨げる。そこでこれを除く方法が検討され、たとえば溶接部の場合には X 線照射角を  $20^\circ$  ないし  $40^\circ$  傾けると淡くなるのが経験的にわかっている。これも一つの方法であろうが、ビードのように柱状晶の場合には可能でも、鋳物の場合はあまり効果がないであろうと思われる。そこで Al 合金について、異常像が  $0.19 \sim 0.50 \text{ \AA}$  の範囲の X 線により生じていること



(a) 白色 X 線の波長に対する強度分布



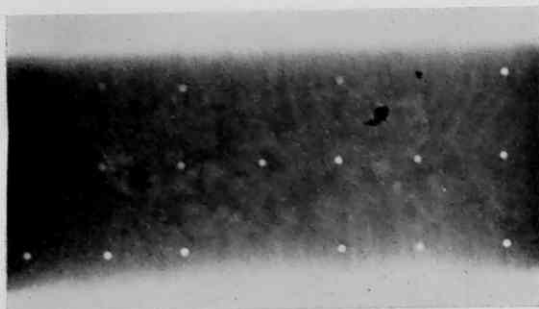
(b) 錫の K 吸収端付近の質量吸収係数曲線

- 200 kV のときの試料入射前の X 線強度分布 (C. S. Barrett による)
- 10 mm 厚さのアルミニウムを透過後の強度分布 (同上)
- b. の曲線と下図 (b) の吸収端とから 0.18 mm 厚さの錫箔を透過したのちの強度分布を求めたもの

### 第 11 図

に注目し、この範囲の X 線を適当な金属の吸収端を利用し、吸収除去することが考えられる<sup>5)</sup>。吸収端の構造は第 11 図のような直立した直角三角形であるから、この三角形の中に回折波長範囲がはいるようにして、回折像をフィルタし、欠陥像はもっぱら、より短い波長で伝達するようにすれば、S/N 比が高められぬかとするものである。上記の波長範囲に吸収端を持つ元素は、 $Z=70$  の Yb (K 吸収端が  $0.20223 \text{ \AA}$ ) から、 $Z=47$  の Ag ( $0.48582 \text{ \AA}$ ) の辺まで多数あるが、金属箔に圧延できた容易に入手可能なものは、 $Z=50$  の Sn ( $0.42458 \text{ \AA}$ ) と Ag しかない。両者のうち Sn の方がより吸収端が  $0.19 \text{ \AA}$  に近いのでより有効であろうと考え、 $0.03 \text{ mm}$  厚さの錫箔と比較のため同じ厚さの鉛増感紙 (K 吸収端  $=0.14077 \text{ \AA}$ , L 吸収端  $=0.95029 \text{ \AA}$ ) を入手し、これを試片とフィルムカセットの間にはさんで透過写真を撮ってみた。第 15~17 図に見られるように、錫箔が薄いとあまり効果がないが、重ねて十分厚くすると、異常像が著しくは

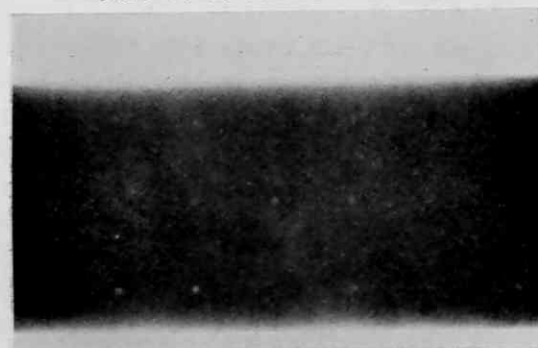




第 12 図 Al-1.7%Cu 合金鋳物の透過写真。65 kVP、スクリーンなし。白点は疑似欠陥の小孔像。



第 13 図 同上試料。0.09 mm 厚さの錫箔を試料とフィルムカセットの間に挿入した。異常像がかなりぼけている。97 kVA



第 14 図 同上試料。0.18 mm 厚さの錫箔を挿入。異常像が著しくぼけている。113 kVA

けることが認められた。ただ疑似欠陥として試片に明けた小孔の像が錫箔が厚いといくぶんぼけているが、これは第 11 図 (a) に見られるように、回折を起こす波長の相当部分が欠陥像の伝達にも寄与していることを示すものであろう。錫箔を異常像除去に用いる場合は異常像除去により得られるプラスと欠陥像の鮮明さの多少の低下によるマイナスとの差をできるだけ大きくするよう経験的に厚さをきめるべきである。また錫箔を X 線管球窓と試片の間に挿入し、X 線フィルタとして使用すると、上記のようにスクリーンとして使用した場合にくらべ、異常像のぼけ効果はやや落ちるが、欠陥像の鮮明さは相当回復する。また鉛箔増感紙では、薄いとほとんど効果が

ない。錫箔と同じくらい厚くすれば、 $0.2 \text{ \AA}$  付近の波長に対しては、同様な吸収効果が期待できるが、K 吸収端が  $0.14 \text{ \AA}$  にあるため、より短い波長も著しく吸収され、欠陥像を選択的に伝達させるという目的には適しない。また錫箔に限らず、箔に圧延できて、吸収端が  $0.2 \text{ \AA}$  にもっと近い金属があれば、さらに異常像のぼけ効果は大きいと考えられる。鉄鋼における異常像については検討していないが、 $\alpha\text{Fe}$  の最も強い回折線を出す (110) 格子面の格子間隔は  $2.03 \text{ \AA}$  で、アルミニウムのそれと大差なく、また鉄鋼では使用管電圧が  $100 \sim 250 \text{ kVP}$  程度であるから、よりいっそう錫箔の使用が適していると考えられる。

## 6. む す び

以上 X 線透過試験における透過異常像について、その主要例と利用の可能性、像の除去法などを紹介した。超音波の、多重反射波の異常減衰が材料の組織、鍛錬度の推定に用いられているのと同様に、X 線透過試験においても、異常像の利用によって、一部の軽合金や特殊鋼については、X 線写真を撮るだけで、材料内部金属組織の状態や結晶粒の大きさをおよそ推察できるようになることは、さして困難ではないであろう。ただそのためには前述したように広範囲に、種々の金属組織について、写真が集められ、またもっと明瞭な異常像の写真が容易に撮れるような方法の開発が望ましい。また異常像の防止については、錫箔の吸収端によって、異常像が著しくぼけるという、透過検査技術者にとって、興味あると思われる現象を紹介し、その利用を提案した。これが実用になるか否かは今後の問題であるが、透過散乱線の除去について、従来のように鉛箔一点ばかりでなく、最も有害な波長範囲を吸収端の利用によって、選択的に除去するという考え方で、各種金属元素について再検討してみる必要があると思われる。

(1964 年 9 月 30 日受理)

## 参 考 文 献

- 1) Glaisher, W. H., Betteridge, W., Eborall, R.: The Mottling of Aluminium Alloy Radiographs, Jour. Inst. Metals, 70, 81-89 (1944)
- 2) 渡辺ほか 3) 富田 4) 河村ほか 5) 入江ほか: 昭和 38 年度日本非破壊検査協会「非破壊検査における疑似探傷像」に関するシンポジウム予稿集。
- 6) 入江, 藤井, 山下: ステンレス鋼溶接部の X 線異常透過像, 非破壊検査, 第 12 巻 6 号 (1963)
- 7) Van Horn, K. R.: Mottling in Radiographs of Aluminium-Silicon-Copper Alloy Permanent Mold Castings: Non-Destr. Test., 176-187, 3-4 (1958) Mehi Lecture.
- 8) 一色, 片岡, 高, 山沢: 昭和 39 年度日本非破壊検査協会第 2 回第 1 分科会資料。