象の程度は大きくなった (Fig. 11).

(3) 素材及び溶接継手材において引張の過大荷重に引き続き圧縮の過大荷重を負荷すると遅延現象の程度は小さくなった。とくに、その効果は溶接継手材で大きかった (Fig. 11).

(4) 少なくとも、溶接継手材において、開口比はまったく変化せず、遅延現象を $4K_{eff}$ の低下で説明することはできなかった (Fig. 8~10).

終わりに、本研究を遂行するにあたり、東京工業大学森猛助手に有益な御助言を賜わった。また実験に際しては大阪大学溶接工学研究所、中辻義弘氏に御協力戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、福田、渡、堀川：疲労き裂伝ばにおよぼす溶接残留応力の影響、日本機械学会論文集、47A-416 (1981)、384-390
- 2) 例えば、松岡、田中：疲労き裂伝ばにおよぼす過大荷重の影響、日本機械学会論文集、44-378 (1978)、375-384
- 3) 例えば、森、堀川：疲労き裂伝播の遅延現象に及ぼす溶接残留応力の影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、37-1 (1982)、183-184
- 4) 森、堀川：疲労き裂伝播速度に及ぼす溶接残留応力の影響、溶接学会論文集、1-3 (1983)、436-443
- 5) 柳原、堀川、森：低速度域における疲労き裂伝播挙動に及ぼす溶接引張残留応力の影響、溶接学会論文集、4-1 (1986)、193-199
- 6) 菊川、城野、田中、高谷：除荷弾性コンプライアンス法による低速度領域における疲労き裂進展速度とき裂開閉挙動の測定、材料、25-276 (1976)、899-903
- 7) W. Elber; The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486 (1971)、209-220

ステンレス鋼溶接部の成分偏析と透過X線写真にあらわれる影*

渡辺統市**, 祖父江直***, 佐伯義隆**, 水越秀雄****

Effects of Segregation on the Mottling Appeared on Radiographs of Stainless Steel Weldments*

by Toichi Watanabe**, Tadashi Sofue***, Yoshitaka Sacki** and Hideo Mizukoshi****

In previous work it has been shown that diffraction effects in the relatively coarse-grained metal of the weld is a prime cause of the mottling.

However, the mottling is most commonly observed in thin welds when one is using low voltage X-rays, with which differential absorption will be greater. There appears to be a possibility that a part of the mottling might be due to small differences in X-ray absorption in individual grains in the metal.

The extent of the contribution of the differential absorption to the mottled appearance of radiographs has, therefore, been studied using austenitic stainless steel welds.

Experimental results show that the extent of the contribution from the differential absorption is unimportant in so far as the austenitic stainless steel weld is concerned.

Key Words: Radiography, Mottling, Segregation, X-ray absorption, X-ray diffraction, Stainless steel, Weld metal

1. ま え お き

溶接部の透過X線写真にあらわれる影は、溶接金属中の内部ひずみによるX線回折強度の増大を伴った一種の回折模様であることはすでに報告した¹⁾。

ところで影は溶接金属の铸造組織をかたどってあらわれること、あるいは薄い試片において、また試片内部でのX線吸収の差のあらわれ易い、低い管電圧で撮影した場合より明瞭にあらわれるという特長がある。一方影は18:8ステンレス鋼溶接部についてしばしば問題とされ

て来たが、この鋼の溶接金属では成分元素、たとえばクロムの偏析が知られている。もし一定量のクロムの偏析があれば、鉄とクロムのX線吸収の差によって影のあらわれることが考えられる²⁾。

影の主原因はX線回折であるということについてはほとんど疑問の余地はないものと思われるが、それでは全ての影がX線回折のみによって生じたと言いきれるかということになると、明確な答はまだ得られていない。影の特長から見て、影の成因に関し、X線吸収の差も一部では関与しているのではないかとする疑問は依然として残されている³⁾。

この研究は影の発生に対する、成分偏析に起因するX線吸収の寄与について検討したものである。

2. 実験ならびに考察

成分偏析があって、それが影の発生原因となっている

*原稿受付 昭和61年9月3日 昭和62年度春季全国大会論文発表講演

**正会員 名古屋工業大学 Member, Nagoya Institute of Technology

***非会員 名古屋工業大学大学院 Graduate School, Nagoya Institute of Technology

****非会員 名古屋工業大学 Nagoya Institute of Technology

As weld

Annealed

0.05mm

Fig. 1 Effects of prolonged heating on the microstructure of an austenitic stainless steel weld. The dendritic segregation disappeared completely during the heating. TIG weld, 6 mm thick. base metal, SUS-304. filler metal, D308 plus Ni w.e. welding speed, 20 cm/min. Heated at 1050°C for 80 hours and then furnace cooled. Electrolytically etched with 10% of oxalic acid.

とすれば、試片を長時間加熱すれば成分偏析は消去されるので、それに伴って影にも変化があらわれることが考えられる。

Fig. 1 はオーステナイト系ステンレス溶接金属の長時間加熱による顕微鏡組織の変化を示した。溶接したままの試片では樹状的にあらわれた成分元素の微小偏析が見られるが、1050°Cで80時間加熱した後の試片では微小偏析は全く見られない。

Fig. 2 は Fig. 1 に示した試片の熱処理前後の透過X線写真を示す。熱処理前後の透過X線写真において、個々の影について見れば、消滅したもの、新しく発生したものあるいはコントラストが変わったもの等幾らかの変化は見られるが、熱処理によって影に顕著な変化が起ったとは思われない。

熱処理によって起った影の若干の変化については、微小偏析の消滅、熱処理前後の写真撮影時のわずかのX線照射角の変化あるいは熱処理中に起る内部ひずみの変化等考えられるが、そのいずれによるのかはこの実験ではよくわからない。しかしながら実験結果は成分の微小偏析は影の発生原因を考える上において重要でないことを示唆するものと思われる。

Fig. 3 はこの研究で定めた、試片に対するX線入射角の表示方法である。

Fig. 4-a はまた別のオーステナイト系ステンレス鋼溶接部の透過X線写真にあらわれた影を示す。写真の白枠で囲んだ部分では影は溶接中央部の溶接線方向に伸びたほぼ直線状の影と、これに向かって母材部から湾曲しながら伸びる枝状の影から成っている。

Fig. 4-b は Fig. 4-a に示した試片について、X線照射

As weld

Annealed

5mm

Fig. 2 Effects of prolonged heating on the mottling. The contrast of the mottling remained almost unchanged.

These results suggest that the contribution of the differential absorption due to the segregation of alloying elements to the mottling is unimportant.

The weld shown in figure 1 machined down to 4 mm thick.

Tube voltage, $V=80$ kV. current, $I=5$ mA. Exposure time, $t=10$ min. Specimen-film distance, $d=3$ mm.

Fig. 3 An interpretation of the incident X-ray beam angles, α and β to the specimen when radiographed.

X: Welding direction. Y: Normal to side surface. Z: Normal to top surface. α : X-Y plane. β : Y(Y')-Z plane.

角を変えて撮影した透過X線写真である。Fig. 4-a で見られた溶接中央部の直線状の影は消滅している。枝状の影についても両写真では微妙に変化しており、写真 a で見られる影のあるものは消滅し、代って別の影が写真 b では見られる。影の主原因はX線回折によるのであるから、影の様態が照射角の影響を受けて変化するのとは当然のことである。

ここでもし、X線回折でなく、試片内部でのX線吸収の差に起因してあらわれる影があるとすれば、その影は照射角の影響をほとんど受けないはずであるから、したがって Fig. 4-a, b に共通してあらわれる影があれば、それはX線吸収の差に起因する影である可能性が考えられる。しかしながら写真で見られるように個々の影は織

Fig. 4 Effects of a change of X-ray beam angle on mottling.
TIG weld, 6 mm thick, machined down to 3.9 mm thick. base metal, SUS304.
filler metal, D308. speed, 4 cm/min. $V=78$ kV. $I=5$ mA. $t=10$ min. $d=3$ mm.
 $\alpha=0^\circ$. β : a), 0° . b) $+8^\circ$.

Fig. 5 Projective magnification radiographs of an austenitic stainless steel weld. The specimen shown in figure 4, except an area enclosed by a white line, was covered with a strip of lead and then radiographed with a 250 mm gap between the weld and the film.
 $V=78$ kV. $I=5$ mA. $t=25$ min. $d=250$ mm. $\alpha=0^\circ$. β : a), 0° . b), $+8^\circ$.

Fig. 6 A linear mottling appearing on a radiograph of an austenitic stainless steel weld.
TIG weld, 6 mm thick. base metal, SUS304L. filler metal, SUS316L.
speed, 9 cm/min.

細であり、且つそれらの輪郭も判然としないこともあって、両写真に共通してあらわれる影を特定することは困難である。

Fig. 5-a は Fig. 4-a の写真で白枠で囲んで示した部分を除き、他は鉛板で覆って撮影した写真を示す。照射角と管電圧は Fig. 4-a の場合と同じであるが、試料-フィルム間距離が変えてあり、このため露出時間も変えてある。この撮影条件では白枠で囲んだ部分で起る全ての回折X線はフィルム上では写真の外側にはみ出すことになり、写真上には回折したX線による像は形成されない。したがって Fig. 5-a に示す写真は回折することなく、試片をまっすぐ透過したX線のみによって形成された像である。

写真では溶接中央部のほぼ線状の白い影と、これに向って伸びる板状の白い影が見られる。しかしながらこの写真においても、これらの白い模様はX線回折が起った結果の拔上り効果によるのか、あるいはX線をよく吸収する物質の偏在があってあらわれたのかを判断することは出来ない。

Fig. 5-b は Fig. 4-b に示したと同じ照射角で白枠で囲んだ部分のみ露出して撮影した写真である。Fig. 5-a で見られた溶接中央部の白い線状の影は消滅した。このことから Fig. 5-a に示す写真の中央部の白い線状の影はX線回折によるものであることがわかる。すなわち Fig. 5-a に示した撮影条件では白い線状の影に対応する領域で入射X線の一部が回折し、したがって写真上で白抜模様となってあらわれたと思われる。

一方枝状の影については Fig. 5-b においても幾つか見られる。Fig. 5-a, b を比較することによって、X線回折に起因するらしい白い影の存在については、これを推察することが出来るのであるが、両写真に共通して変化なくあらわれる影ということになるとこれまた特定することは困難である。

通常の透過X線写真では、X線回折に起因してあらわれる影が常に存在し、吸収の差に起因する影は、もしあるとしても、これを分離して示すことは困難である。吸収の差に起因する影の存否を厳密に確かめるためには、X線回折の全く起らぬ条件で透過X線写真を撮影する必要がある。このことは不可能なことのようにも思われるが、たとえば試片の一定の領域内で、隣合う数個の結晶粒を特定し、どの結晶粒からも可能な限り、X線回折の起らぬ条件で、それも強い回折を起す原子面からの回折をなるべく避けて透過X線写真を撮影すれば、あるいは事実上目的を達成出来る可能性が考えられる。

Fig. 6 はこの目的で用意したオーステナイト系ステンレス鋼溶接部の透過X線写真を示す。この溶接部では溶接中央部に試片の全長にわたって、溶接線方向に伸びた線状の影が見られる。

Fig. 7 は Fig. 6 に示した溶接部から切出した試片 (G

Fig. 7 The linear mottling. A specimen, called G-specimen, was machined out of the weld shown in figure 6. $V=60$ kV. $I=5$ mA. $t=10$ min. $d=3$ mm.

Fig. 8 Grain structure of G-specimen, 0.2 mm thick. Grain-A, B and C running roughly parallel to the axis of the weld can be seen at the central band of the weld.

Fig. 9 Crystal orientations of Grain-A, B and C. The axes of crystal growth, normal to (100) planes, of these grains are nearly parallel.

Site of expected linear mottling	β	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Right side on radiograph																		
Left side on radiograph																		

β : an incident beam angle to the specimen, degree.

$A(1\bar{1}1)$: an expected linear mottling due to diffracted X-rays from $(1\bar{1}1)$ planes of Grain-A.

Fig. 10 An expected relationship between the appearance of the linear mottling due to the X-ray diffraction from (111) , (200) and (220) planes of Grain-A, B and C, and the incident beam angle to G-specimen, 0.16 mm in thickness, when radiographed.

An assumed radiographic condition; $V=22.5$ kV. $\alpha=-10^\circ$. β : variable.

試片と呼ぶこととする)の板厚1.7mmのときの透過X線写真である。試片中央部に見られる線状の影は試片板厚が薄くなると明瞭、且つ繊細になる。

Fig. 8はG試片の結晶粒分布を示した。この時の試片厚さは0.2mmである。線状の影の発生源と見られる溶接中央部の巾約1mmの帯状の領域はA, B, Cの3つの結晶粒から成っている。ほぼ平行に並んだ3つの結晶粒はそれぞれ試片の一端から他端に達する細長く伸びた形をしており、それらはまたいずれも試片の表面から裏面に貫通し、その間に2つの結晶粒界がある。

溶接中央部は最も遅れて凝固する処であり、成分偏析を起し易い場所であると考えられる。したがってこの溶

接中央部の帯状の領域に注目し、この領域でなるべくX線回折の起らぬ条件で透過写真を撮影し、もって成分偏析の影の発生に対する寄与について検討した。

Fig. 9は結晶粒A, B, Cの結晶方位を示した。各結晶粒はそれらの(100)の法線方向がほぼ溶接線方向に向き、各結晶粒間の方位差はAとBの間で約 3° 、BとCでは約 17° となっている。結晶粒AとBの方位差は小さいのでFig. 8中には破線でその結晶粒界を示してある。

Fig. 10は図中に示した条件で、G試片の透過写真を撮影したとき、A, B, Cの3つの結晶粒の各(111), (200), (220)面でX線回折が起ると期待される照射角の範囲を示したものである。ここで(111), (200), (220)面は面心立方格子の種々の回折面のうちでも特に回折強度の強い回折面である。

Fig. 11は一例として照射角、 $\theta = +8^\circ$ の場合のG試片の透過X線写真を示した。Fig. 10で示した通り、この場合は結晶粒Aの($\bar{1}\bar{1}1$)ならびに($0\bar{2}2$)からの回折が起り回折による線状の黒い影が写真中央部より左側にあらわれている。一方写真中央部の結晶粒Aに対応する場所は拔上り効果として白い線状の模様となっている。

Fig. 12-aはFig. 11で白枠で囲んだ部分を残し、他は鉛板で覆って撮影した透過X線写真である。試片とフィルム間の距離を大きくとってあるので、回折したX線による像は写真上にはあらわれない。したがってFig. 11で見られた回折線による黒い線状の影は見られず、結晶粒Aに対応する白い線状の模様のみが明瞭に見られる。

Fig. 12 Projective magnification radiographs of G-specimen. G-specimen shown in figure 11, except an area enclosed by a white line, was covered with a strip of lead and then radiographed with a 50 mm gap between the specimen and the film. The radiograph-b does not show any radiographic mottling at the central band of the weld as shown in the diagram.

The results suggest that the contribution of the differential absorption due to the segregation of alloying elements on the mottled appearance is unimportant.

V=22.5 kV. I=10 mA. d=50 mm. $\alpha = -10^\circ$. β : a), $+8^\circ$. b), $+16^\circ$. t: a), 78 min. b), 85 min.

Fig. 12-b. は Fig. 12-a に示したと同様の方法で、照射角を変えて撮影した G 試片の透過X線写真である。この場合の照射角、 $\beta = +16^\circ$ である。この撮影条件では結晶粒 A, B, C の $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ いずれの面よりの回折も Fig. 10 に示したように起らない。もち論更に高次の面からのX線回折の起る可能性はあるが、写真を見る限りでは溶接中央部の帯状の領域には影は全く見られない。このことはオーステナイト系ステンレス鋼溶接部の透過X線写真にあらわれる影について、成分偏析の寄与は重要ではないことを示唆するものと思われる。

3. 結 論

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部について、その透過X線写真にあらわれる影の成因に関し、成分偏析の寄与を調べた。

(1) 長時間の熱処理によって微小偏析は消滅したが、その間影はほとんど変化しなかった。

(2) 可能な限りX線回折の起らぬ条件で撮影した透過X線写真上に影はあらわれなかった。

以上の実験結果はオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属については、その透過X線写真にあらわれる影の成因に関し、成分偏析の寄与は重要ではないことを示すものと思われる。

なお、本研究の経費は昭和60、61年度文部省科学研究費補助金、一般研究(A)によって賄なわれた。付記して謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) T. Watanabe and Y. Saeki: A Proposed Theory of the Mottling of Radiographs of Stainless Steel Welds. *British J. of NDT*, 24-4 (1982), 181-187.
- 2) R. Halmshaw: *Industrial Radiology*, Applied Science-Publisher (1982), 253.
- 3) R. Halmshaw: Diffraction Patterns on Weld Radiographs. *British J. of NDT*, 25-2 (1983), 84.