

高強度チェーンのフラッシュ溶接部の欠陥

技術報告

鈴木信一*・一山靖友*²・新田 宏*³・福島基海*³

Defects in Flash Welded Zone of High Strength Chain

Nobukazu SUZUKI, Yasutomo ICHIYAMA, Hiroshi NITTA and Motomi FUKUSHIMA

Synopsis :

A high strength chain is manufactured by bending steel bars, flash welding and subsequent heat treatment. The defects in the flash welded zone have been investigated.

1. The defects are detected in the flash welded zone by UST of 20 MHz. The defects are oxide clusters generated by welding.

2. The defects are found more in the outer area than in the inner of the transverse section of a chain link. This is because the molten steel flows to the inner area from the outer by the electromagnetic force generated during welding, thus the molten steel layer becomes thin in the outer area, where oxide clusters are not ejected together with the molten steel and remain there.

3. The defects can be eliminated by an increase of upsetting length in the weld process ; this is the most of the defect can be removed by cutting off the flash and oxide clusters are finely dispersed.

4. With increasing the upsetting length, the average impact value of the welded zone decreases but the scatter of the value is improved.

Key words : anchor chain ; flash welding ; quality control ; nondestructive inspection ; toughness.

1. 緒 言

フラッシュ溶接法は、非常に能率の良い溶接法であつていろいろな分野で使用されている。その代表的なものに、船舶などを係留する大型チェーンの製造がある。大型チェーンは、近年、石油掘削用リグの係留に多く使用されており、一連が1500 mもの長尺チェーンである。石油掘削海域が広がるにつれて、北海のように海象条件の厳しい所で、この種のチェーンが使用されるようになり高強度、高靱性のものが要求されるようになってきた¹⁾。このように高性能のチェーンが、要求されるようになってくると、従来は、全く問題にならなかつたようなフラッシュ溶接部の小さい欠陥が問題になってくると考えられる。

一方、フラッシュ溶接は制御の難しい溶接法であつて、古くから多くの研究がなされており²⁾⁻¹³⁾、それらの目的のほとんどが、溶接部の信頼性向上にあるといつてよい。しかし、現実には、フラッシュ溶接部には、小さな欠陥の存在することが多い。これらの欠陥は、使用する溶

接機の性能に起因するもの、溶接する鋼の合金成分あるいは対象物の形状によるものもあると考えられる。したがつて、研究により、ある種の欠陥の成因がわかり、その対策があるとしてもハイテンチェーンの製造に、その対策が適用できない場合もある。

本論文は、ハイテンチェーンのフラッシュ溶接部に発生する欠陥と溶接条件との関係を明らかにし、その欠陥対策について考察した。

2. 供試材および実験方法

ハイテンチェーンは棒鋼を素材にして、Fig. 1 に示

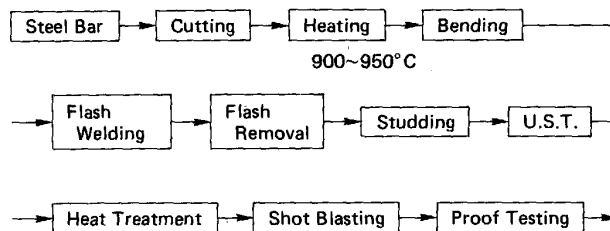


Fig. 1. Main process of chain manufacture.

昭和 61 年 3 月 26 日受付 (Received Mar. 26, 1986)

* 新日本製鉄(株)厚板・条鋼研究センター (Plate, Bar, Shape & Wire Rod Research Lab., Nippon Steel Corp., 5-10 Fuchinobe Sagamihara 229)

*² 新日本製鉄(株)接合研究センター (Joining Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 浜中製鎖工業(株) (Hamanaka Chain MFG. Corp.)

Table 1. Chemical composition of steel bar used for chain link.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
0.22	0.25	1.34	0.021	0.005	0.72	0.96	0.48	0.028

Table 2. Conditions of flash welding.

No.	Open voltage (V)	Flashing length (mm)	Upsetting length (mm)	Upsetting current cycle
1	9.4	14	8	0
2	11.6	14	8	0
3	12.7	14	8	0
4	13.3	14	8	0
5	11.6	14	6	0
6	11.6	14	8	6
7	11.6	14	12	0
8	11.6	14	16	0
9	11.6	14	16	6
10	11.6	14	27	0

Table 3. Mechanical properties of heat treated steel bar.

Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (G. L.=70 mm)(%)	Reduction of area (%)
96.7	83.7	17.4	69.0

す工程で製造される。本実験では、Table 1 に示す化学成分の 76 mmφ の素材を用い、フラッシュ溶接完了まで Fig. 1 に示す通常の工程でチェーンリングを造った。フラッシュ溶接条件と溶接部に生じる欠陥との関係を調べるために、溶接条件を Table 2 に示すようにいろいろ変えた。条件 1 から条件 4 はフラッシュ代 14 mm、アップセット長さ 8 mm を一定にし、オープン電圧のみ変え、条件 5 から条件 10 はオープン電圧 11.6 V、フラッシュ代 14 mm を一定にし、アップセット長さ、アップセット電流を変えたものである。一部のリンクは、そのまま溶接部を観察し、圧接面が中心になるように、リンクを 60 mm の厚さに輪切りにして、圧接面に直角方向から溶接部の欠陥を 20 MHz の UST (Ultrasonic Test) で調べ、欠陥があれば、その部分を切断して、光学顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡で欠陥の状態を調べた。他のリンクは、970°C 焼入れ、650°C 焼もどしを行い、溶接部のシャルピー試験を行った。

同一熱処理をしたチェーン素材の機械的性質を Table 3 に示す。なお、使用したフラッシュ溶接機は、500 kVA、クランプ力 50 tf、アップセット力 30 tf の能力でこの溶接機による溶接時の電圧、電流変化およびプラテンの移動を示す電磁オシログラフの例を Fig. 2 に示す。

3. 実験結果

Table 2 に示した条件 1~4 で、溶接したときのオー

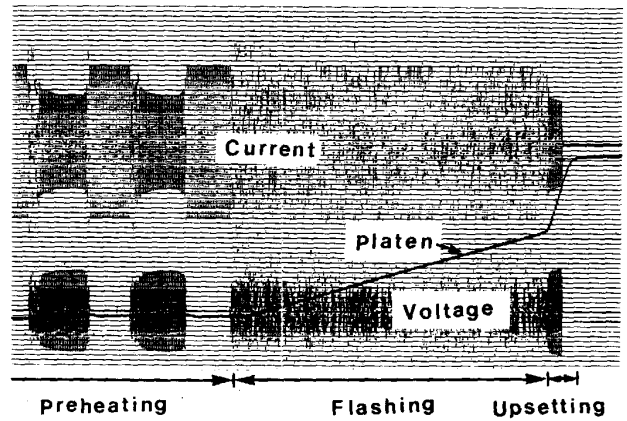


Fig. 2. Electromagnetic oscillographs showing electric current, voltage and movement of platen during flash welding.

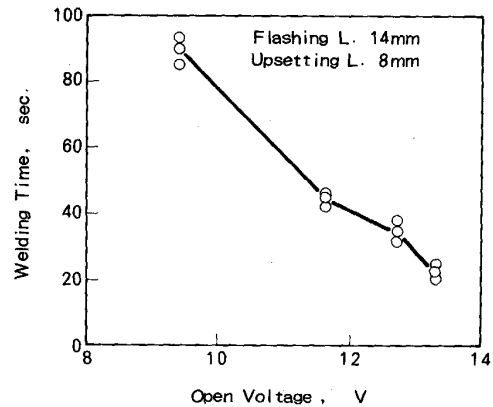


Fig. 3. Effect of open voltage on flash welding time for 76 mmφ chain link.

ン電圧と溶接時間との関係を Fig. 3 に示す。電圧によつて、溶接時間が大きく変わることがわかる。このときの溶接部の写真を Photo. 1 に示す。条件 1 はばりが大きく、特にリンクの内側に位置する部分は大きく溶出したあとがみられる。条件 4 はばりが小さい。フラッシュ溶接部の良否はばりの状態で経験的にある程度判定でき、条件 2, 3 の外観は、良い溶接状態といえる。しかし、これらを UST で調べてみると、欠陥がある。

Photo. 2 は、UST により条件 3 の圧接面全面を走査して得られた欠陥信号を画像処理したもので、円内の黒い部分が欠陥に対応している。これらの欠陥の一つが、Photo. 3 である。このものを欠陥部が損傷しないように破断して、走査型電子顕微鏡および EXD (Energy Dispersion X-ray Microanalysis) で調べた結果を Photo. 4 に示す。これらから UST による欠陥像は、欠陥面に Cr, Fe, Mn, Si からなる酸化物と思われる粒子の集合体であることがわかる。

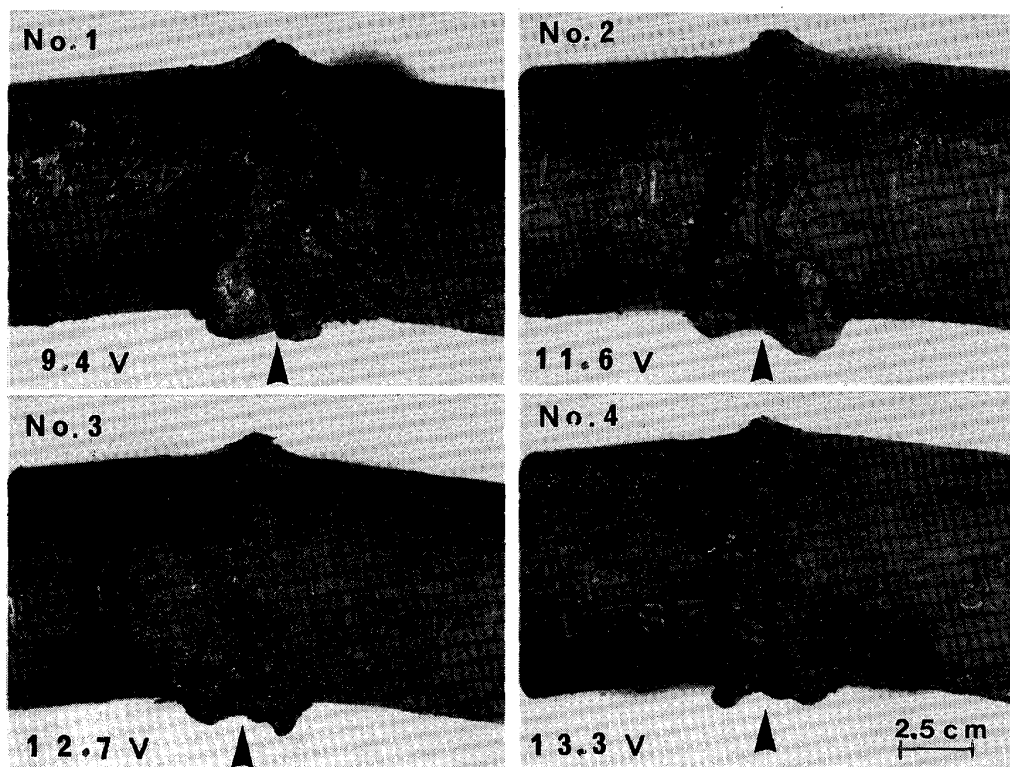


Photo. 1. Effect of open voltage on appearance of flash welded joint. Numbers correspond to the welding conditions in Table 2. Arrows show the inside of link.



Photo. 2. Photograph obtained by UST on flash welded zone of 76 mm chain link. An arrow shows the inside of link.

次に、このような欠陥をなくす条件を見出すために条件 5~10 で溶接し、溶接部の UST を実施した。さらに、溶接欠陥あるいは溶接条件と衝撃値との関係を見るために、UST した試験片を熱処理して、溶接部のシャルピー試験をした。

UST によつて得られた欠陥像の面積率（以下、欠陥率という）とアップセット長さとの関係を Fig. 4 に示

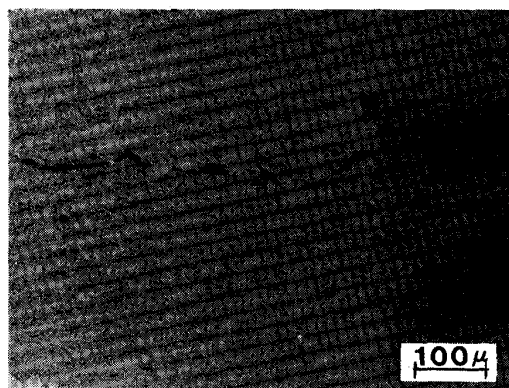


Photo. 3. Cross sectional view of defect detected by UST in flash welded zone.

す。アップセット長さを大きくすると、欠陥率は明らかに減少する。しかし、アップセット長さを大きくすると、Fig. 5 に示すように衝撃値は低下する。この現象はアップセットによるメタルフローの影響であることが知られている¹⁴⁾¹⁵⁾。また、アップセット長さが小さい場合は Fig. 4 に示したように欠陥率が大きいため、欠陥による異常に低い衝撃値を示すものが多くなる。そこで、Fig. 5 は試験片内の欠陥による異常値を除いた結果である。実際に、アップセット長さが異なる条件 2 と条件

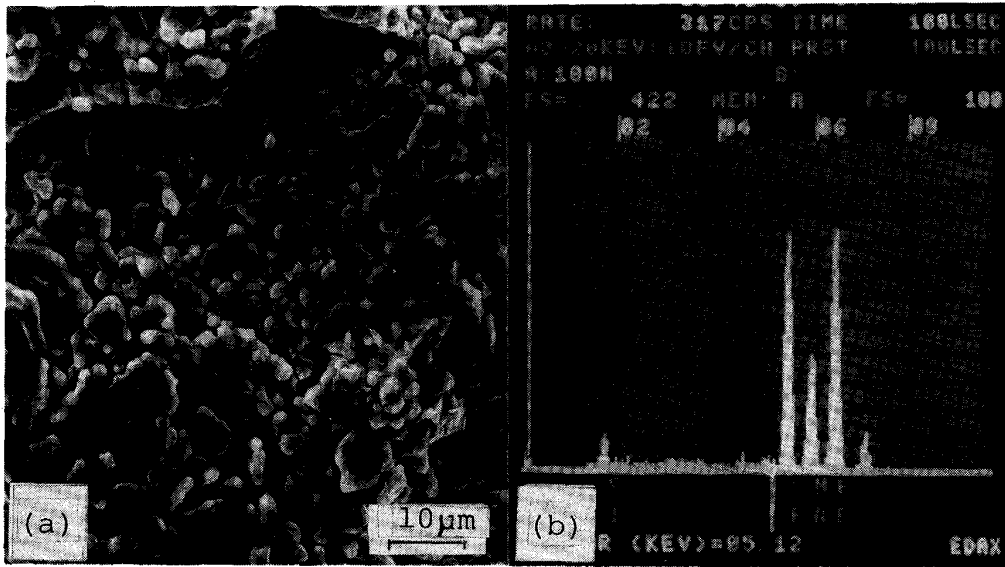


Photo. 4. Scanning electron fractograph (a) and chemical analysis by EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) (b) of flash weld defect.

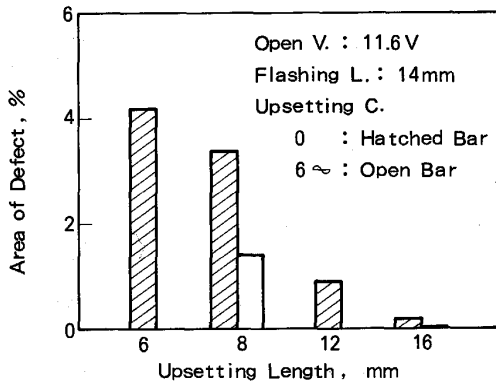


Fig. 4. Relationship between area of weld defect and upsetting conditions of flash welding for 76 mmφ chain link.

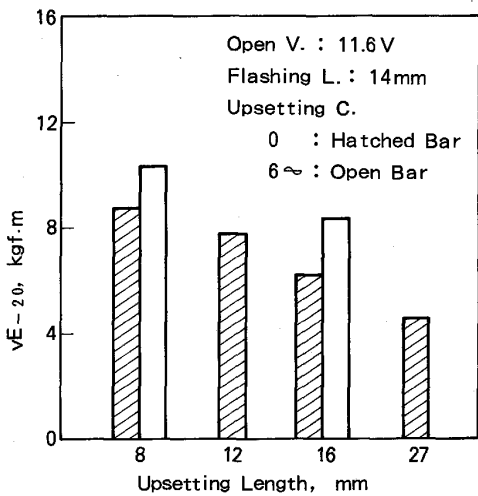


Fig. 5. Relationship between Charpy impact value at -20°C and upsetting conditions of flash welding for 76 mmφ chain link.

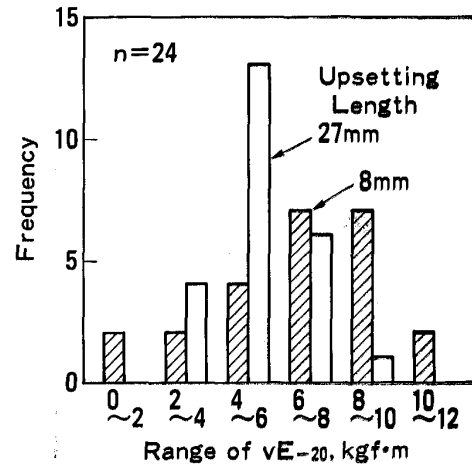


Fig. 6. Effect of upsetting length on scattering of Charpy impact value (-20°C) in flash weld zone of chain links.

10における衝撃値のばらつきを比較してみると、Fig. 6に示すように、前者は衝撃値のばらつきが大きく、後者は衝撃値のばらつきが小さい。さらに、欠陥と衝撃値との関係を詳細にみるために、条件2のリンク溶接部のUST欠陥像とその溶接部からできるだけ多くのシャルピー試験片を採り、試験した衝撃値とを重ねてみると、Fig. 7のようになる。明らかに、欠陥のために低い衝撃値になる場合もあるが、シャルピー試験片中の欠陥の位置とその大きさによつては、欠陥が存在しても低い衝撃値にならない場合もある。

Fig. 4, 5に示したように、アップセット電流は欠陥率を低減し、また衝撃値を高める効果が認められる。

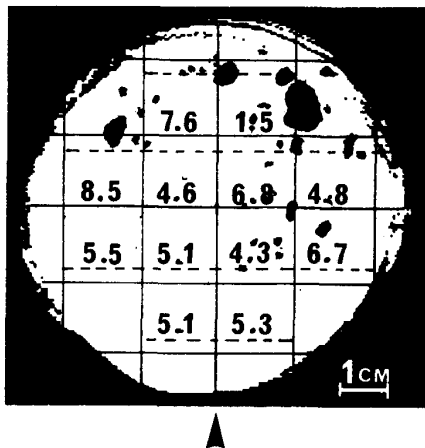


Fig. 7. Relationship between defect obtained by UST and impact value at -20°C . An arrow shows the inside of link.

4. 考 察

以上の実験でハイテンチェーン製造工程のフラッシュ溶接における溶接条件と溶接部のマイクロ欠陥および衝撃値との関係を明らかにした。以下、マイクロ欠陥の成因とその対策について考察する。

本実験におけるフラッシュ溶接は、Fig. 2 に示したように、予熱工程、フラッシング工程を経て、接合面に溶融層を生成させ、その溶融層を介して、アップセット工程で接合を完了するものである。一般に溶接入熱制御は、溶接の良否を決める重要な要件であり、フラッシュ溶接においても例外ではなく、接合面に最適な溶融層を形成するため、あるいはオーバーヒートを回避するために重要である。

フラッシュ代を一定にしてオープン電圧を変化させると、Fig. 3 に示したように、溶接時間が変わる。これは溶接入熱量が変わることに相当する。13.3V のような高い電圧の場合、フラッシングのための予熱工程を必要とせず、溶接初期から激しいフラッシングが起り、あらかじめ設定したフラッシュ代を短時間で消化し、アップセット工程を経て溶接が終わる。条件4がこれに相当し、この場合の溶接時間は約20sで、溶接部外観はPhoto. 1 にみられるように、入熱不足のためにばりが小さい。このような状態では欠陥が多く、ほとんど溶接されていない。一方、電圧の低い条件1の場合、溶接時間は約90sと長く、特に内側のばりが大きい。この場合、Photo. 5 に示すようなマイクロ欠陥が生じる。この欠陥はチェーンリンクの内側にのみみられ、オーバーヒートによつて局部的に溶融した部分が凝固するときに生じた収縮孔である。上記したように、溶接入熱量の適、

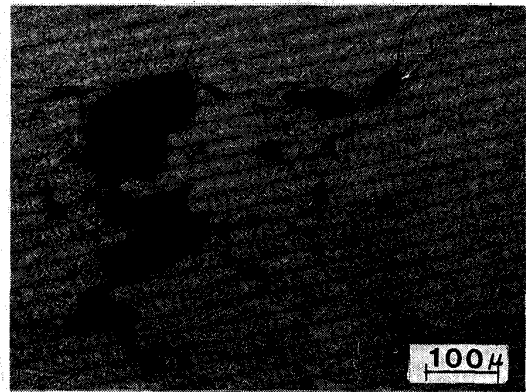


Photo. 5. Defect due to over heating during flash welding.

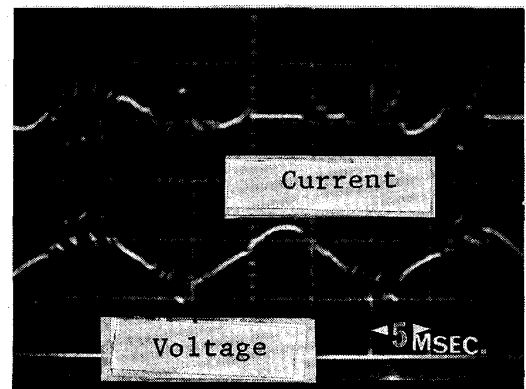


Photo. 6. Oscillograph showing electric current and voltage at final stage in flash welding.

不適はある程度溶接部外観で判断でき、実際に現場で活用されている。溶接部外観から判断すれば、本実験の場合、オープン電圧は11.6~12.7Vが望ましい。

しかし、溶接部外観の良いと思われる溶接部でも、USTの感度を高くして欠陥を捜すと、Photo. 3 に示したようなマイクロ欠陥が存在する。これは、Photo. 4 でわかるように、粒子の集合体から成るものである。フラッシュ溶接のフラッシング工程において、肉眼では連続したフラッシングと思われても、時間軸を拡大してみると、Photo. 6 でわかるように、電流1サイクル中、4回ほどしかフラッシングが起こっていない。すなわち、フラッシングとフラッシングとの間には約4msの時間がある。また、フラッシングは佐藤らの高速写真でわかるように¹⁶⁾、一種の爆発現象である。この爆発によつて、接合面間は正圧になり、接合面の酸化が防止されるが、その次の瞬間は負圧になつて、空気を吸い込む。このとき、接合面上の溶融層表面は瞬時に酸化されてしまう。上記のマイクロ欠陥を形成する粒子の集合体は、このよう

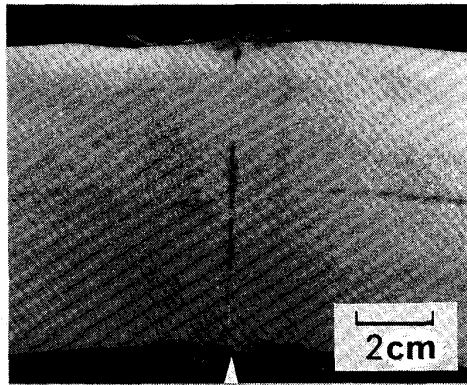


Photo. 7. Macrograph of flash weld joint of chain link. An arrow shows the inside of link.

にしてできた Cr 等の酸化物であることは明らかである。

フラッシュ溶接において、アップセット直前の接合面上には Cr 等の酸化物が必ず存在すると思わなければならない。したがって、Cr 等の酸化物から成るマイクロ欠陥を無くすためには接合面上の酸化物をアップセット工程で排出しなければならない。適当な厚みの溶融層が接合面上に存在する状態でアップセットすれば、酸化物は溶鋼とともに排出できると考えられる。適当な厚みの溶融層は適正な溶接入力熱量によつて形成されるが、さらに接合面全面がフラットで、一様な厚みの溶融層の形成が望ましい。

しかし、Photo. 3 にみられるように、欠陥はチェーンリンクの外側に多い。これは、Photo. 1 に示した溶接部外観において、チェーンリンク外側のばりが小さいことに対応していると思われる。すなわち、チェーンリンク外側は入熱不足になることを示唆している。そこで、条件 2 でフラッシングし、軽くアップセットしたところで溶接を中断した溶接部のマクロ組織を調べてみると、Photo. 7 に示すようにチェーンリンク外側は、内側より熱影響部が小さく、明らかに内側より入熱の少ないことがわかる。この原因は、溶接時にチェーンリンク内側と外側とで発生する磁束密度の差によつて生じる電磁力で、接合面上の給湯が常にリンク内側に引張られるためと考えられる。この原理を Fig. 8 に模式的に示す。実際、溶接時のチェーンリンク内外の磁束密度を測定すると、リンクの外側は内側より約 3 倍高い。この磁束密度の偏りは、直棒のようなものの溶接においても若干みられるが、リンクの場合は、Fig. 8 でわかるように、溶接電流によつて生じる磁場とリンクを直接流れる電流で生じる磁場とが打ち消し合うためにリンク内外の磁束密度差が大きくなる。

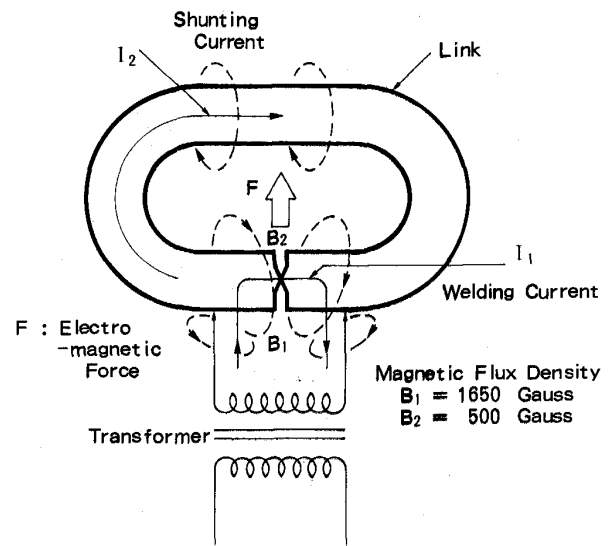


Fig. 8. Electromagnetic force occurred during flash welding of chain link.

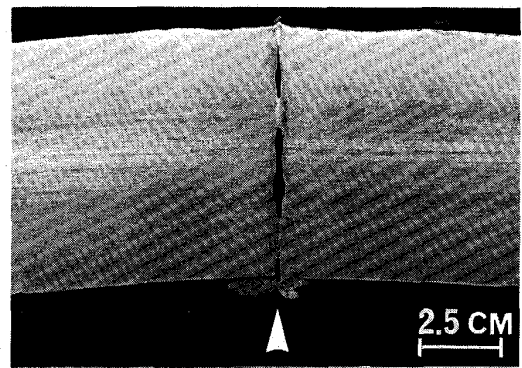


Photo. 8. Crater on connecting plane just before upsetting in flash welded process. An arrow shows the inside of link.

また、接合面にはフラッシングのときクレーターが生じる。Photo. 8 はオープン電圧 12.7 V、フラッシュ代 14 mm の条件でフラッシングし、アップセット直前で溶接を中断して接合面間の状態をみたものである。接合面にクレーターのあることがわかる。

上記したように、フラッシュ溶接のアップセット直前の接合面は理想的な状態からほど遠いものである。しかし、Fig. 4 に示したように、アップセット長さを大きくすることによつてマイクロ欠陥は相当解消できる。この効果は、マイクロ欠陥を形成している酸化物の集合体を分散させることにあると考えられる。アップセット長さの異なる条件 2 と 9 とにおける溶接後の圧接面積を比較してみると、後者のほうが約 1.2 倍大きくなっている。この圧接面積の増大とともに、酸化物が分散したと思われる。実際に、溶接部のシャルピー破面を走査型電子顕

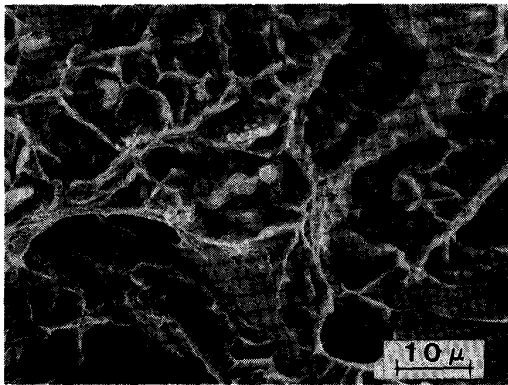


Photo. 9. Inclusions found on fracture surface of Charpy test specimen.

微鏡で詳細に調べてみると、Photo. 9 に示すような、小さな酸化物がよくみられる。これが、溶接部の衝撃値を熱処理で母材の衝撃値にまで回復させることができない¹⁷⁾原因と考えられる。また、この酸化物は本実験で使用した UST でも、検出できないものである。安藤らは、炭素鋼のフラッシュ溶接における接合面の酸化物について、圧接温度が十分に高ければ、酸化物（この場合、主として FeO）が溶融しており、圧接後に酸化物が析出しても、それらは微細に分散していることが報告されている¹⁸⁾。単純な炭素鋼の場合は、確かにアップセット長さが小さい場合でも、UST による欠陥像はほとんどみられない。しかし、本実験のように、Cr を含む鋼では、生成温度の高い Cr を主とする酸化物であるから、これらが接合面上で溶融しているとは考えられない。したがって、本実験のアップセットによる酸化物の分散機構は、安藤らのそれとは異なるものである。

アップセット電流がマイクロ欠陥を低減する効果のあることを示したが、その電流値は高々 20 A/mm² で、溶接部を再溶融するだけのパワーはないので、安藤らのいう¹¹⁾再溶融体と一緒に酸化物を排出することは考えられない。したがって、この電流の作用は、溶接部の冷却固化を遅らせ、アップセット効果がいつそう十分になり、酸化物の分散に寄与したものと考えられる。

チェーンリンクのフラッシュ溶接部の酸化物粒子から成るマイクロ欠陥は、アップセット長さを大きくし、アップセット電流を流すことによつて低減できることを示した。しかし、アップセット長さを大きくすると、Fig. 5 に示したように、衝撃値が低下することに注意しなければならない。

5. 結 言

ハイテンチェーンのフラッシュ溶接部に生じるマイクロ

欠陥と溶接条件との関係および溶接部の衝撃値におよぼす溶接条件の影響を明らかにした。それらを要約すると次のようになる。

1) オープン電圧が高い場合、溶接時間が短く、溶接入熱不足になる。反対にオープン電圧が低いと、溶接時間が長く、溶接入熱過剰になる。

2) チェーンリンクの外側は溶接入熱不足、内側は溶接入熱過剰となりがちなため、ともにマイクロ欠陥が生じやすい。

3) 適正な溶接入熱と思われる場合でも、チェーンリンクの溶接部を感度を高めた UST で調べてみると、酸化物の集合体と見られるマイクロ欠陥がある。

4) マイクロ欠陥は、アップセット長さを大きくし、アップセット電流によつて、軽減することができる。

5) 溶接部の衝撃値は、アップセット長さが小さい場合、平均値は高いが、欠陥のために異常に低い値になるものがある。一方、アップセット長さが大きい場合、平均値は低い、ばらつきは小さい。

本研究を遂行するにあたって、御協力いただいた浜中製鎖工業(株)浜中社長に感謝致します。

文 献

- 1) Det Norske Veritas, Mobile Offshore Units, Part 3 Chapter 2 Section 5 (1985)
- 2) J. C. BARRETT: Weld. J., **24** (1945), p. 25
- 3) H. KILGER: Weld. J., **24** (1945), p. 413, p. 459, p. 506
- 4) E. F. NIPPES, W. F. SAVAGE, S. S. SMITH, J. J. MCCARTHY and G. GROTOKE: Weld. J., **32** (1953), p. 113
- 5) E. F. NIPPES, W. F. SAVAGE, G. GROTOKE and S. M. ROBELOTTO: Weld. J., **36** (1957), p. 192
- 6) S. I. K.-YATOSSENKO: Auto. Welding, **15** (1962) 7, p. 31
- 7) A. S. GEL'MAN and S. N. MEL'BARD: Auto. Welding, **17** (1964) 6, p. 35
- 8) N. G. AGAFONOV, S. I. K.-YATOSSENKO, V. P. KRTVONOS and S. A. SOLODOVNIKOV: Auto. Welding, **20** (1967) 5, p. 27
- 9) S. I. K.-YATOSSENKO and M. N. KIEVSKII: Auto. Welding, **23** (1970) 9, p. 10
- 10) 安藤弘平, 仲田周次, 杉本威生: 溶接学会誌, **39** (1970), p. 1084, **40** (1971), p. 35
- 11) 安藤弘平, 仲田周次, 福井一郎: 溶接学会誌, **40** (1971), p. 137
- 12) 安藤弘平, 仲村 考, 仲田周次, 福井一郎: 溶接学会誌, **40** (1971), p. 233
- 13) 安藤弘平, 中根 豊, 下岡健蔵: 溶接学会誌, **51** (1982), p. 946
- 14) 南 俊弘, 清水哲吾: 鉄と鋼, **64** (1978), S234
- 15) 芳賀博世, 青木和雄, 飯野牧夫: 鉄と鋼, **64** (1978), S902
- 16) 佐藤次彦, 山口武夫: 溶接学会誌, **32** (1963), p. 527
- 17) 鈴木信一, 森 俊道, 原田武夫, 大羽 浩: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2282
- 18) 安藤弘平, 仲田周次, 西田順紀: 溶接学会誌, **40** (1971), p. 1140