

高周波抵抗溶接における 冷接が延性及び破壊靱性に及ぼす影響とその評価

田川 哲哉*・山本 宗平*²・宮田 隆司*

Influence of Weld Oxides on Ductility and Fracture Toughness of Electric Resistance Welded Joint

Tetsuya TAGAWA, Syuuhei YAMAMOTO and Takashi MIYATA

Synopsis : Influence of the weld oxides on the ductility and fracture toughness of the electric resistance welded joint of steel pipe was investigated. Experiments were performed for round bar tensile tests and three point bend COD test. With the increase of the oxides zone area which was defined by fracture appearance, the ductility in the smooth and the notched bar specimens, and the fracture toughness were gradually decreased. Fractographic examination showed a good correlation between the stretched zone depth in COD specimen and the dimple size at the oxides zone. Finally, the validity of engineering evaluation method for the weld oxides was discussed.

Key words : electric resistance welding ; weld oxides ; ductile fracture toughness ; ductility ; stretched zone ; dimple size.

1. 緒言

電縫管の高周波抵抗溶接では、溶接条件により溶接欠陥が生じることがあり、一般に、溶接入熱が適正值に比較して低い場合には冷接と呼ばれる鉄酸化物に起因した欠陥が生じるとされている¹⁾。これは通常のアーク溶接における溶接割れやブローホールといった巨視的欠陥とは異なり、溶接時の反応生成物によるものであるため、欠陥というよりもむしろ材質異常であると考えられる。この冷接が存在すると、接合部の健全性が損なわれることは良く知られているが、強度及び破壊靱性への影響をフラクトグラフィあるいは破壊力学に基づいて検討した例はなく、その機構は明らかでない。冷接は鉄酸化物に起因する現象とされている¹⁾ことから、本研究では介在物が大きく影響を及ぼすと考えられる延性破壊を主要な対象とし、冷接が強度、破壊靱性に及ぼす影響について検討するとともに、冷接の評価法を検討し、従来の冷接評価法¹⁾の持つ意味を明確にすることを目的とした。

2. 供試材、試験方法

供試材母材は板厚10mmの600MPa級の熱延鋼板で、その化学成分、機械的性質をそれぞれTable 1, Table 2に示す。母材より10mmT×35mmW×4000mmLの板を切り出し、高周波電縫溶接試験機を用い、電源周波数300kHz、溶接速度18~23m/minでC方向の突き合わせ溶接を行った。溶接入熱

Table 1. Chemical composition of steel tested (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
0.05	0.19	1.35	0.009	0.001	0.034	0.03	0.02	0.02

Table 2. Mechanical properties of steel tested.

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
406	572	27

は適性値に対して0~25%の範囲で変化させ、意図的に冷接を生じさせ、その程度を変化させた。

実験はシャルピ試験、丸棒引張試験及び三点曲げCOD試験を行った。シャルピ試験片、COD試験片は破壊の進行方向が溶接方向となるように切り出し、いずれの試験片においても接合部が試験片中央に位置するように正確に加工した。シャルピ試験は、主に個々の接合部の冷接破面率を評価するために行った。この際、シャルピ破面面積に占める特異破面の割合を冷接破面率とした。引張試験片、COD試験片を切り出した位置の前後からシャルピ試験片を切り出し、それにより得られた冷接破面率を各試験片の冷接破面率とした。接合部の0.2%耐力、引張強さ及び断面減少率(R.A.)を測定するために、Fig. 1 (a)に示す砂時計型丸棒試験片を室温にて破壊させた。0.2%耐力は試験片最小断面部にはったひずみゲージにより測定した。また、三軸応力状態下での延性き裂発生時の延性をとらえるためにFig. 1 (b)に示す切欠き底半径1mmの円周切欠付丸棒試験片を用いた。

平成5年6月30日受付 平成6年1月14日受理 (Received on June 30, 1993; Accepted on Jan. 14, 1994)

* 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

* 2 名古屋大学大学院生 (現: 豊田自動織機(株)) (Graduate Student, Nagoya University, now TOYODA Automatic Loom Works, LTD.)

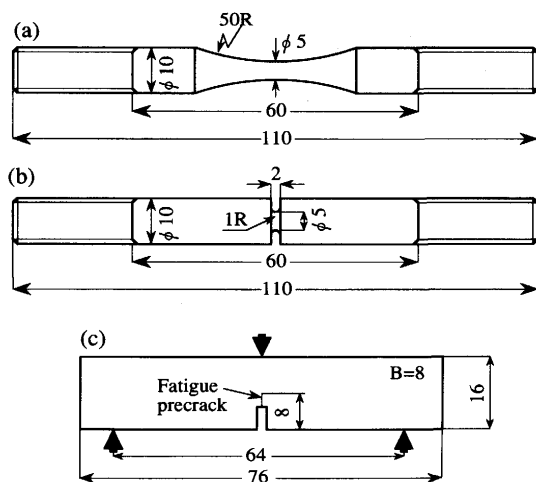


Fig. 1. Specimens, dimensions are in mm.
(a) Smooth round bar tensile specimen.
(b) 1mmR notched round bar tensile specimen.
(c) Three point bend COD test specimen.

引張試験を行い、ワイヤーゲージにより試験中の切欠部の直径変化を連続的に測定した。破断に先立ち急激なくびれを生じた時点で試験を中止し、試験片中央縦断面を切断、研磨後、延性き裂の生成を確認するとともに、その際の直径変化から延性き裂発生時の延性を算定した²⁾。COD試験は、Fig. 1 (c) に示す試験片を用い、疲労予き裂を導入後、BS5762³⁾に準拠し 0°C、-32°C、-46°C の 3 温度で行った。

各種試験で得られた破面はSEMにより観察を行った。特にCOD試験破面については巨視的観察による破面分類と微視的破面形態の対応づけを行うとともに、き裂先端の鈍化量 (Stretched Zone ; SZ) の測定を行った。SZの測定に際しては疲労予き裂端の鈍化領域の境界が不明瞭なものが多かったため、鈍化部深さ (Stretched Zone Depth ; SZD) を測定した。その際、予き裂面と接合面が完全に一致していない破面については、予き裂面と冷接面に段差を生じ、測定したSZDが極端に大きな値を示すものが見られた。そのようなものについてはステレオ観察を行い、段差の存在を確認し、SZDの測定対象から除外した。

3. 試験結果と考察

3・1 冷接破面

冷接は、シャルピ試験破面上で明瞭に識別されるため、冷接評価の簡易手法の1つとして、シャルピ試験が従来から行われている¹⁾。Fig. 2 にシャルピ試験で多量の冷接が認められる場合の破面と、その破面上で冷接と判断される特異破面領域を示す。しかし、連続した接合部から切り出した接合部であっても、COD試験片破面はかなり異なっており (Fig. 3)、冷接破面率が比較的高い接合部の場合、破面のほとんどが異常に平坦な破面となっている。冷接破面率の低い接合部の場合には、通常上部棚領域で見られるCOD試験片破面と同程度に凹凸のある破面であった。これ

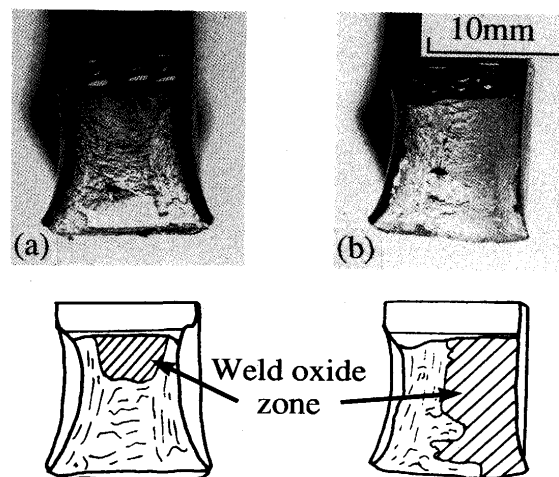


Fig. 2. Fracture morphology of Charpy impact specimen and definition of weld oxide zone area.
(a) Area fraction of oxide zone: 20%
(b) Area fraction of oxide zone: 50%

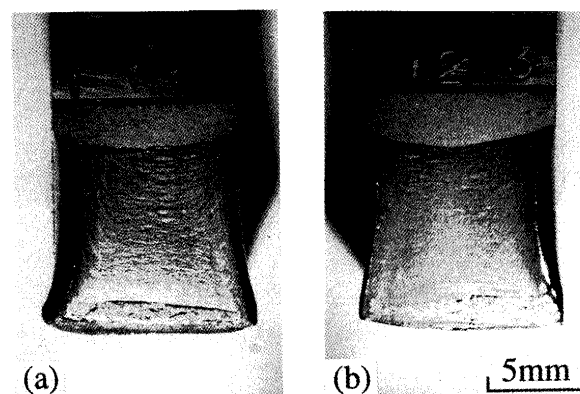


Fig. 3. Fracture morphology of COD test specimen.
(a) Area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen: 20%
(b) Area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen: 50%

ら巨視的破面様相の遷移は3・4節で考察するように、主に介在物密度の変化に伴うディンプル寸法の相異に関連しているものと考えられる。これらのCOD試験片の巨視的破面様相は定性的なものであり、かつ接合部の冷接破面率の変化に伴い連続的に変化しているため、どの程度平坦なものからかCOD試験片破面で見られる冷接特有の異常破面であるのか断定できないが、微視的にはおよそFig. 4 の 2 種類の形態に分けることができる。Fig. 4 (a) は酸化物が凝集したもので、母相界面と剥離した形態を示しており、前述のシャルピ試験で冷接破面とされている領域はほとんどがこの形態である。ただし、COD試験片の場合、その領域の大きさは小さく、シャルピ試験片と異なり巨視的には識別できない。一方、Fig. 4 (b) は微細な酸化物からのボイド合体で形成されたと思われる微細なディンプルで形成されている。健全な接合部の場合、ディンプル径はCOD試験片破面、引張試験片破面 (Fig. 6 (a)) とともに10 μ m前後であることから、Fig. 4 (b) に示すディンプル径は著しく小さいことがわかる。

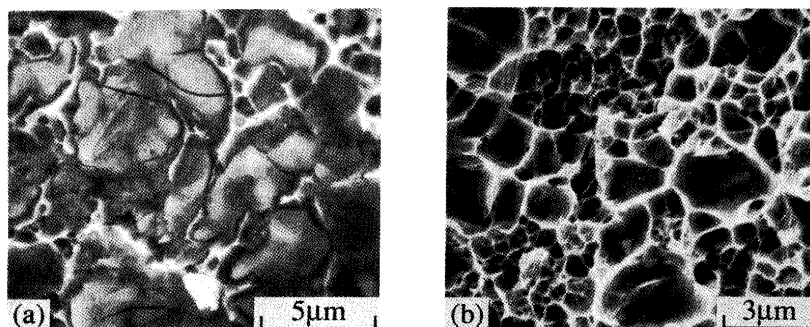


Fig. 4. SEM fractographs of weld oxide zone in COD specimen.

このディンプル径は3・4節および3・5節で後述するように、冷接の程度と密接な関係があり、ある程度の凹凸のあるCOD破面であっても、冷接の影響を定量的に反映しているようである。また、健全な接合部のCOD試験片破面の場合、力学的状態の相異より、破面上の位置により伸長、等軸などのディンプルの形態やその寸法にある程度の相異が見られたが、異常に平坦な破面（微視的にはFig. 4 (b)）が存在する場合はその領域中でディンプルの形態、寸法ともにほぼ一様であった。冷接破面率の高い接合部より採取したCOD試験片破面のほとんどの領域やシャルピ試験片破面で冷接とされる領域の周囲からも、この破面が観察された。丸棒引張試験片の破面もCOD試験片と同様で、冷接破面率の高い接合部であっても破面上にはシャルピ試験で定義されるような明瞭な冷接は認められなかった。引張試験片およびCOD試験片破面に明瞭な冷接破面が現れない理由については、更に詳細な解析が必要であるが、主にひずみ速度などの試験条件の違いに起因しているものと思われる。ひずみ速度の高い場合には酸化物凝集部で応力支配型の剥離破壊が起こるが、ひずみ速度の低い場合には周辺の酸化物が密に分布した領域でひずみ支配型のディンプル破壊が起こるなどの破壊機構の違いが考えられる。

3・2 引張試験結果

健全な接合部、冷接破面率20%及び50%の接合部についての引張試験結果をFig. 5に示す。降伏応力、引張強さ、及びR. A. は砂時計型丸棒試験片の結果で、延性き裂発生時

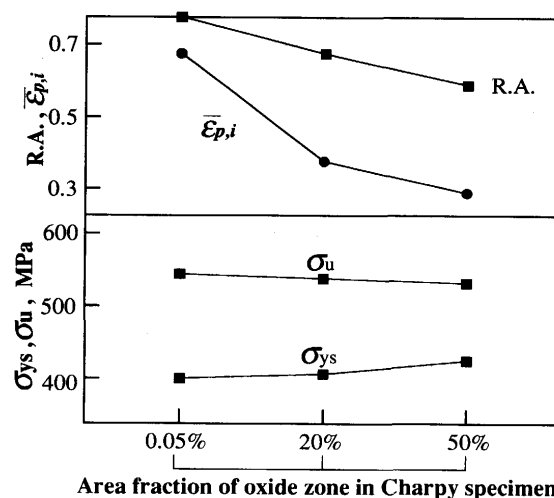


Fig. 5. Results of tensile tests.

のひずみ $\bar{\epsilon}_{p,i}$ は1 mm R円周切欠付丸棒試験片の結果である。冷接破面率50%の材料は、破断ひずみの95%においても延性き裂の発生は見られなかったため、破断延性で示している。図より、冷接破面率が増加しても降伏応力や引張強さはほとんど変化していないが、接合部の延性は冷接破面率の増加に伴い低下していることがわかる。ただし、冷接破面率が50%とかなり冷接度が高い場合でも接合部は30%あまりの延性に示しており、本研究で扱っている冷接は溶接割れのような巨視的な割れなどとは異なる材質欠陥であることが再認識できる。Fig. 6に室温で破壊させた砂時計型丸

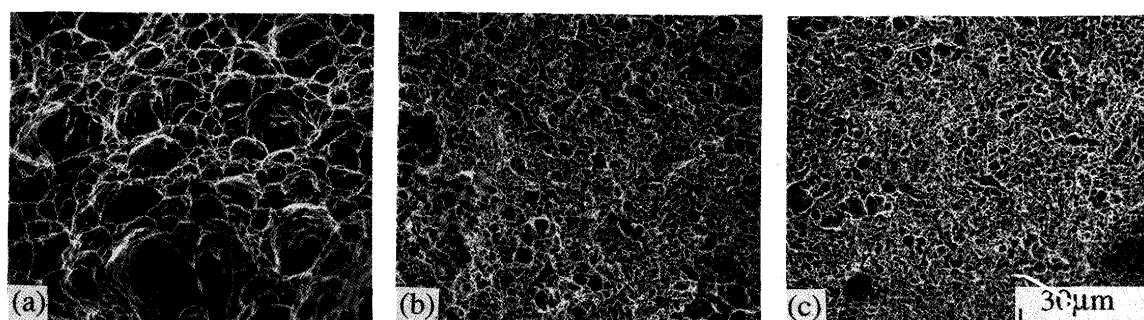


Fig. 6. SEM fractographs of smooth round bar specimen.

- (a) Area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen: 0%
- (b) Area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen: 20%
- (c) Area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen: 50%

棒試験片の破面観察結果を示す。Fig. 6 (a) (b) (c)はそれぞれ健全な接合部および冷接破面率30%, 50%の結果である。破面には前に述べたようにシャルピ試験で見られるような明瞭な冷接は現れず、剝離型の破壊を起こすような酸化物凝集領域はかなりの強度を持っていることが推察できる。Fig. 6の(a), (b), (c)はすべて同倍率写真であるが、冷接破面率が増加するとディンプル径が減少していることがわかる。必ずしもすべてのディンプルに酸化物の存在を確認してはいないが、冷接破面率が高い接合部には微小な酸化物がより多く散在しているため、ボイド発生サイトが多く、そこで発生したボイドはほとんど成長することなく合体し、破壊に至ったものと考えられる。

3・3 COD試験結果

Fig. 7に0°C, -32°C, -46°CのCOD試験結果を示す。横軸の冷接破面率とはCOD試験片に隣接した接合部のシャルピ試験片破面より測定した結果であり、図中の結果はすべて接合部のCOD試験結果である。この図を見る限り、ばらつきはあるものの、いずれの温度における結果も冷接破面率約20%程度までは限界COD値の低下は見られない。ただしここで行ったCOD試験では、すべての試験片で荷重低下を伴う破壊、すなわちBS5762³⁾というType IIIの破壊様式を示した。この破壊様式の場合、規格上COD値としては最大荷重時の値が用いられるが、これは破壊の発生を正しく表わす指標にはなっておらず、安定な延性き裂は最大荷重点以前に発生しているのが通常である。従って、冷接の存在が破壊発生時の靱性（この場合は延性破壊であるため、延性破壊靱性と呼ぶことにする）に直接的にどのように影響を与えているのかは明らかでない。延性破壊靱性としては、破壊発生時の開口変位に対応するストレッチゾーンの寸法が有力な指標となると思われるので、次節でストレッチゾーンとの関係について検討する。なお、ここで行ったCOD試験の温度範囲は、上部棚領域にあり、Fig. 7の結果でも、温度の違いによるCOD値変化はほとんど見られない。従っ

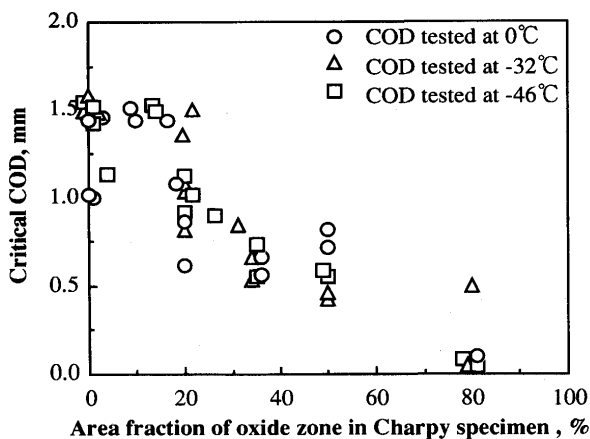


Fig. 7. Variation of critical COD with area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen.

て、以下の解析においては、試験温度にかかわらずすべてのCOD試験結果を一律に取り扱うことにする。

3・4 延性破壊靱性に及ぼす冷接の影響

個々のCOD試験片について、予き裂前縁部の破面形態を調べ、ここではFig. 4 (a) (b)のような破面を呈する部分を冷接部と定義し、その割合を調べた。CODとの関係をみたのがFig. 8である。Fig. 8の横軸の線冷接率とはCOD試験片の予き裂先端より0.1mmの位置における板厚全幅に対する冷接破面の割合を示したもので、図中のデータはすべて接合部の試験結果である。データ点数がFig. 7に比べて少ないのは、予き裂面と破面にずれを生じた試験片に対してはこの線冷接率の測定から除外したためである。図より予き裂前縁の冷接の存在はCOD値に一定の影響を与えていることがわかる。ただし、線冷接率の小さい範囲においてはばらつきが大きく、冷接の存在が靱性に及ぼす影響が必ずしも明確でない。これは、前述のようにCOD値がき裂進展開始に一致していないためであると考えられるので、安定き裂進

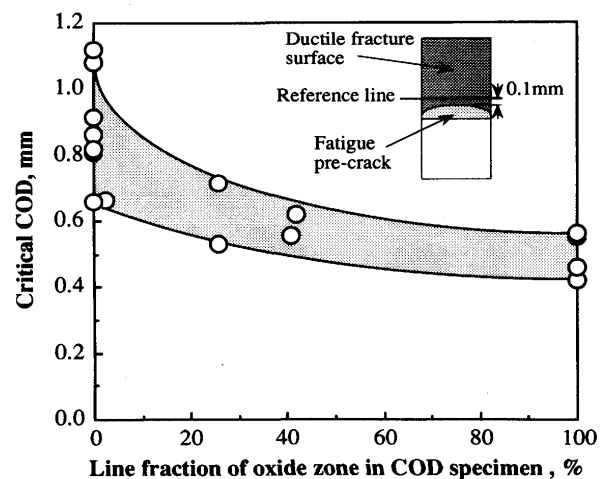


Fig. 8. Relation between critical COD and line fraction in COD specimen.

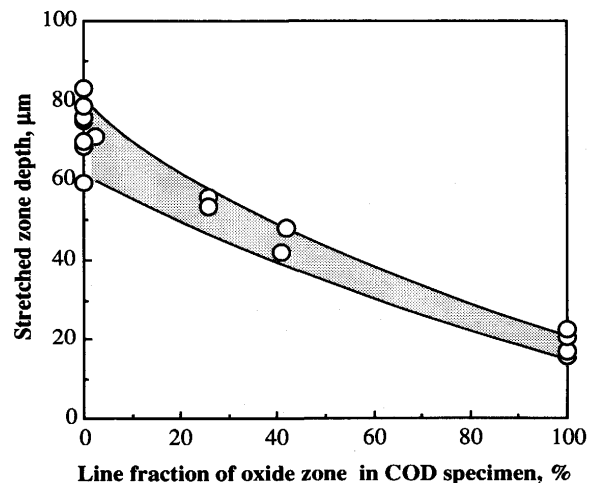


Fig. 9. Relation between SZD and line fraction of oxide zone in COD specimen.

展開始時の靱性指標としてCOD試験破面に残されたSZDで整理してみたのが、Fig. 9である。横軸はFig. 8と同様にCOD試験片の線冷接率であり、すべて接合部の試験結果である。ここで示しているSZDはJSME S001⁴⁾に従い板厚の3/8, 4/8, 5/8の位置で測定した値の平均値であり、試験片全体の平均的な靱性を意味する。両者の関係はばらつきが少なく、より明瞭に靱性に及ぼす冷接の影響がわかる。Fig. 9の結果によると、SZDすなわち延性き裂発生に対する靱性は予き裂近傍の冷接の存在により減少するが、その程度はそれほど急激ではなく、緩やかな減少にとどまることがわかる。これはFig. 5の引張試験の結果からも言えることである。

従来の研究²⁾⁵⁾では、力学的状態が同じであればディンプル直径は延性と密接な関係があり、理論的モデル⁵⁾及び実験²⁾⁶⁾によれば、両者の間には比例関係が成立するとされている。またSZWやSZDはき裂先端の塑性ひずみの積分値の意味を有するので、き裂先端の延性に比例することが知られている。Fig. 10は冷接破面率の異なるCOD試験片破面の板厚中央付近で測定したSZDとその近傍の50 μ m四方の領域で測定したディンプル直径の平均値との関係を示したものである。この図には様々な冷接度の結果が含まれているが、冷接の有無あるいはその面積率によらず、両者の間には一義的な比例関係が見られる。つまり、冷接やその度合いが靱性に及ぼす影響はディンプル径に直接的に現れているといえる。基本的に冷接は鉄酸化物であり、それが介在物としてボイ

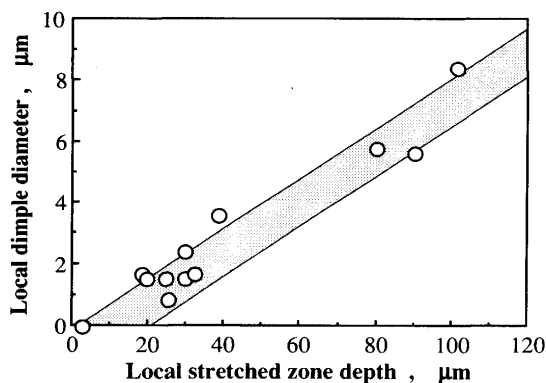


Fig. 10. Relation between dimple diameter and SZD.

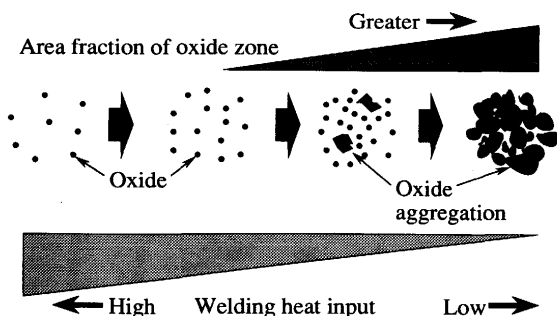


Fig. 11. Schematic model of the relation between oxide state and welding heat input.

ドの発生核となると考えると、冷接の度合すなわち鉄酸化物の分布状態はディンプル径と密接な関係があるものと考えられる。すなわち、微小酸化物の密度が増大するとボイド生成の核が増大するとともに、その間隔が小さくなるため、発生したボイドはほとんど成長することなく合体し、これが延性の低下につながるということができる。以上の考察より予想される溶接入熱の変化に伴う接合部の酸化物の生成状態の変化モデルをFig. 11に模式的に示す。溶接入熱の低下に伴い多数の微小酸化物が生じ、その間隔は密になっていく。そして、ある程度以上酸化物が生成されると、それらは凝集し、その凝集した領域は大きくなっていくものと思われる。シャルピ試験片破面より測定される冷接とは、この凝集した領域のみを評価しているものと考えられる。すなわち、シャルピ試験片破面で冷接と判断されなかった領域も、入熱の低下に従い微小酸化物の密度は増加していることが予想される。従って、シャルピ試験による冷接の評価は必ずしも接合部全体の状態を直接表わすものではない。

3・5 シャルピ試験片破面による冷接破面率の示す意味

前節で述べたように、現行の冷接評価法は酸化物の凝集体のみを評価しており、冷接全体の程度、特に軽度な冷接の程度を直接示してはいない。しかし、微小酸化物領域のディンプル径は現行の冷接評価法で測定された冷接破面率と一義的な関係を示すようである。Fig. 12に接合部のCOD試験破面上で酸化物凝集体を取り囲む領域のディンプル径とシャルピ破面より測定される接合部の冷接破面率の関係を示す。縦軸のディンプル径は酸化物凝集体に隣接した50 μ m四方の領域についてSEMにより測定した値の平均値であり、現行の冷接評価法¹⁾では健全とされている微小酸化物領域の値である。Fig. 10で示したディンプル径は板厚中央部SZ近傍で測定した値であるが、微小酸化物領域中では位置によりディンプル径に大きな変化が見られなかったことから、Fig. 12の値は概ね接合部全体を代表する値と考えてさしつかえないものと思われる。Fig. 12よりわかるように、微小酸化

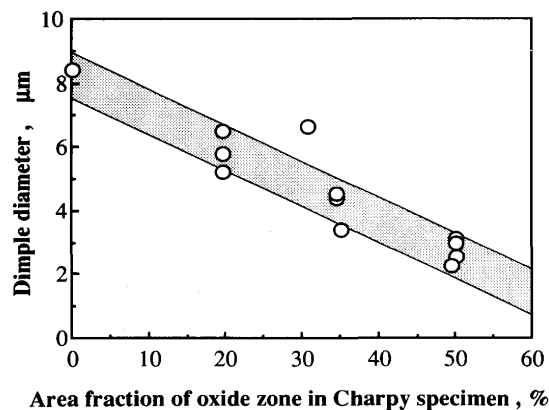


Fig. 12. Relation between dimple diameter and area fraction of oxide zone defined in Charpy impact specimen.

物領域のディンプル径とシャルピ破面より測定される冷接破面率間には一義的な関係があることがわかる。微小酸化物が介在物としてボイド生成核となっていると考えると、Fig.12の関係とFig.11に示した酸化物の生成状態の変化モデルより、COD破面等で大部分を占める微小酸化物領域の酸化物生成状態は、酸化物の凝集領域の凝集度に依存していることが予想される。すなわち、現行の冷接評価法で得られる冷接破面率は間接的ではあるが接合部全体の酸化物密集度を示すパラメータにはなっているといえることができる。

4. 結論

入熱不足により生じる冷接を含む600MPaクラスの電縫管接合部の引張試験、靱性試験、およびその破面解析を行い、以下の結論を得た。

1) 冷接はその原因となる酸化物の生成状態によって、微小酸化物分布領域と酸化物凝集領域の2種類に分けられる。従来の巨視的評価で冷接と見なされるものは后者だけである。

2) 引張試験及びCOD試験片破面には酸化物凝集領域はほとんど観察されず、それらが破壊の起点となっている形跡は認められなかった。

3) 冷接部のCOD試験においてディンプル直径は局所的なストレッチゾーン寸法、延性と関係があり、冷接を含む接合部の靱性評価指標となり得る。

4) 従来から用いられている冷接の評価パラメータであるシャルピ試験による冷接破面率は、間接的ではあるが冷接部全体の材質レベルを示すパラメータとなっている。

5) 冷接は接合部の延性破壊靱性に影響を及ぼすが、その影響度は冷接度に対してそれほど急激ではない。

最後に本研究の供試材は、新日本製鉄(株)より御提供頂いた。また、本稿をまとめるに当たり新日本製鉄(株)名古屋技術研究部山本康士氏、宮坂明博氏には貴重な御助言、御討論を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) H.Haga, K.Aoki and T.Sato: *Welding J.*, **60** (1981), p.104
- 2) 大塚昭夫, 宮田隆司, 桜井 勉, 飯田 浩: *材料*, **34** (1985), p.622
- 3) BS5762-1979, 'Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing', (1979), [BSI]
- 4) JSME S001-1992, 日本機械学会基準弾塑性破壊靱性JIC試験方法, (1992), [日本機械学会]
- 5) J.R.Rice and D.M.Tracy: *J.Mech. Phys. Solids*, **17** (1969), p.201
- 6) A.Pineau: *Proc. 5th Int. Conf. on Fracture (ICF5)*, ed. by D. Francois *et al.*, Vol. 2, (1981), p.553 [Pergamon Press, Oxford]