多層溶接熱影響部における島状マルテンサイトの 形態と破壊特性*

—強度的不均質をもつ鋼溶接部のマイクロ裂発生特性に関する研究 (第一報)—

鈴木 秀一**, 別所 清**, 豊田 政男***, 南 二三吉***

Influence of Martensitic Islands on Fracture Behaviour of Multipass Weld HAZ*

—Study on Micro-crack Initiation Properties in Steel HAZ having
Microscopical Heterogeneity in Strength (Report 1)—

by Shuichi Suzuki**, Kiyoshi Bessyo**, Masao Toyoda*** and Fumiyoshi Minami***

A study was made on the relation between the microstructure and the mechanical properties of the HAZ which was produced by a thermal simulation test for a high strength steel. It was found that the HAZ toughness deterioration of the high strength steel is closely related to the amount and existing form of martensitic islands in the matrix. Blocky martensitic islands surrounded by ferrite grains did not deteriorate toughness, but lath shape martensitic islands formed in a large matrix packet of the same crystal orientation were quite detrimental to toughness depending on the amount of martensite. The latter structure was formed in the unaltered coarse-grained zone (UACGHAZ), in the inter-critically reheated coarse-grained zone (ICCGHAZ), and in the sub-critically reheated coarse-grained zone (SCCGHAZ). But among these structures, the structure in the ICCGHAZ had relatively short lath martensitic islands with softer lath matrix. This structure was especially apt to create micro-cracks. The dependence of strength and toughness on the martensite morphology was considered to result from the degree of restriction against the plastic deformation of matrix due to the microscopic heterogeneity in strength.

Key Words: High strength steel, Heat affected zone, Fracture toughness, CTOD, Local brittle zone, Local hard zone, HAZ simulation test, Offshore structures, Martensitic islands

1. 緒 言

最近の海洋構造物用鋼材は優れた母材靱性を有しているものの、多層溶接を受けた溶接熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)に対するCTOD試験において時として非常に低い靱性値が観察されることがある。この低いCTOD値の得られる原因について多くの研究結果が報告されており、多層溶接熱履歴を受けてHAZに生成する局部脆化域(LBZ: Local Brittle Zone)と呼ばれる領域の存在が靱性劣化に対して深く関わっていることがわかっている。また一方で、マクロ的観点にたった従来の研究においては、溶接部における強度的不均質が種々の状況下で溶接部に存在するき裂先端部周辺の塑性挙動に影響を与え、溶接構造物の破壊発生 の難易度を左右することが知られている¹⁻⁴⁾。しかし、実際にこれらの強度の不均質に起因した局所的歪集中部あるいは応力多軸度の高くなった部分から破壊が発生するかどうかは、その箇所の材質がもつ靱性レベルに依存するところが大きい。一方、溶接部の各位置での鋼の靱性は、いろいろな溶接熱履歴を受けた結果としてできるミクロ組織によって決まる。特に靱性劣化の大きなLBZに注目した場合には、生成する島状マルテンサイトが重要なミクロ的靱性支配因子であることがわかっており、溶接継手の

CTOD特性に対する島状マルテンサイトの量⁵⁻⁸⁾、形状⁹⁾、分布形態^{10,11)}等の影響が報告されている。これらの靱性劣化に対する島状マルテンサイトの役割に関するミクロ的研究結果が示唆するところは、破壊発生を引き起こすものは、島状マルテンサイト自体の破断よりも不均一な塑性変形によって歪の集中した母地あるいは母地との界面から発生した微小き裂である可能性の方が高いということである。すなわち、溶接部の靱性を支配している機構もミクロ的にみた強度の不均質に帰着し得るものと思われる。

そこでミクロレベルからマクロレベルにまでわたる強度的不均質という観点から、鋼溶接部における破壊発生機構を解明することを目的として研究を行った。本研究の第一報においては、まずミクロの見地から鋼の多層溶接熱影響部に生成するいろいろな組織を観察し、組織中に硬い第二相として生成する島状マルテンサイトが母地の強度レベルとの関連において各組織の特性にどのような影響をもたらすかを調査することにより、初期微小き裂の発生に対するミクロレベルの強度的不均質の効果を島状マルテンサイトの形態面から明確にすることとした。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材としては降伏点460 N/mm²クラスの30 mm厚TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 鋼を用いた。Table 1に供試鋼の化学成分を、そしてTable 2に母材性能を示す。この供試材は、軽量化のために高張

*原稿受付 平成6年5月24日 平成4年度IIW Doc. X-1254-92

**正 員 住友金属工業株式会社 Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

***正 員 大阪大学 Member, Osaka University

Table 1 Chemical composition of base metal.

(unit : mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	Ti	Ceq
0.07	0.23	1.51	0.007	0.001	0.30	0.48	0.010	0.015	0.38

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

Table 2 Mechanical properties of base metal.

Tensile			Charpy	CTOD
Q2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	vTrs (°C)	CTOD at -50°C (mm)
467	557	83.8	-110	1.550

力が要求される最近の海洋構造物用途を想定して製造された鋼であり、良好な溶接性を得るために低い炭素量及び低い炭素当量となっているが、TMCP 技術によって高い降伏強度を確保している。

2.2 再現熱サイクル試験

HAZ 中の局所的な個々の組織の機械的性質を個別に調査する目的で、HAZ が受ける熱サイクルを系統的に再現したシミュレーション試験を、11×11 mm 断面の角棒状試験片を用いて実施した。代表的な溶接条件として、SAW で溶接入熱 5 kJ/mm を受けた HAZ 中の各領域における熱サイクルを、移動点熱源(仮想板厚：無限大)を仮定した Rosenthal の解析解¹²⁾ によって求めた。これはオーステナイト粒成長速度の速い高温域、フェライト変態温度付近及びマルテンサイト変態温度付近の冷却速度、等を実際になるべく近い形で再現するように配慮したためである。

再現試験は高周波誘導加熱を利用したシミュレーターを用いて行い、計算した熱サイクルを20ステップ近くの折れ線で近似した後に試験機にプログラムして実行した。冷却は液化窒素ガス及び液化水素ガスを使い分けることによって200°Cまでの範囲をシミュレートしたが、冷却能力の関係から、最大冷却速度が約100°C/秒以上の領域では試験片温度をプログラム通り完ぺきに追従させることはできなかった。200°C以下の温度範囲は温度制御せずに、試験片を放冷した。このような方法を用いた場合、試験片がプログラム通り均一に加熱・冷却される領域は約30 mm であることが確認された。再現した熱サイクルの例を Fig. 1 に示す。

実際の溶接継手は多層溶接による複数の熱サイクルを受けることから、一部の試験片に対しては二重あるいは三重の熱サイクルを付与した。二重熱サイクルにおいては一回目の加熱温度を1400°Cに固定して二回目の加熱温度を1150°C～700°Cに変化させた。また三重熱サイクルにおいては一回目の加熱温度を1400°C、二回目の加熱温度を750°Cに固定して、三回目の加熱温度を600～300°Cに変化させた。ここで、二重熱サイクルは再熱を受けた HAZ 粗粒域 (CGHAZ : Coarse Grained HAZ) を、また三重熱サイクルは α - γ 二相温度域に再加熱された CGHAZ が更に三回目のテンパーサイクルを受けた状態を想定している。なお、単サイクル試験では加熱温度を1400°C～700°Cの範囲で変化させた。本報告ではこれらの一回目、二回目および三回目の各熱サイクルをその最

Fig. 1 Examples of simulated thermal cycles.

高加熱温度によって、それぞれ TP_1 , TP_2 , TP_3 という記号で識別することとする。

2.3 組織観察

種々の熱サイクル後の組織は加速電圧 20 keV の SEM、および 200 keV の TEM によって観察した。

SEM による観察においては島状マルテンサイトを炭化物と区別するために、井川らの二段階電解エッチ法⁶⁾ を適用した。

また、TEM による組織観察は、薄膜にした試料に対する透過電子像及び電子線回折像によって行った。

2.4 機械的性質の測定

熱サイクルを付与した角棒試験片から、Fig. 2 (a) 及び (c) の小型試験片をそれぞれ機械加工し、各組織の引張特性、CTOD 特性を調査した。

引張試験は常温で各 2 本実施し、2 本の平均値を各組織の引張試験特性とした。CTOD 試験は 10×10 mm 断面の試験片に対して切欠き深さが試験片巾の約 1/3 になるように機械切欠き加工後疲労予き裂を挿入し、3 点曲げによって実施した。試験温度 -10°C, -30°C, -50°C で各 2 本の試験を行ったが、本報告では -50°C での CTOD 試験結果を用いて検討を進める。

2.5 切欠き付き引張試験による破壊特性の観察

上記の小型 CTOD 試験ではその破壊発生点における組織を的確に観察することが難しいので、Fig. 2 (b) に示す様な切欠き付き丸棒引張試験片を一部の再現試験片か

Fig. 2 Shape and dimensions of test specimens machined from HAZ simulation test bars: (a) for tensile test, (b) for notched tensile test, (c) for CTOD test, and (d) SEM observation method for notched tensile test specimen (unit: mm).

ら加工し、 -30°C で破断した後に、Fig. 2(d)に示す様に試験片を中心線に沿って割断してから破面と断面組織をSEMで同時に観察した。この切欠き付き丸棒引張試験では切欠きのついた断面部で応力の多軸度が增加する結果、CTOD試験片の板厚中央付近の切欠き先端部が受ける応力状態に近い状態での材料の塑性変形・破壊特性を観察できるものと考えた。なお、Fig. 2(d)における断面組織はナイタールによるエッチングによって現出し、観察した。

3. 実験結果

3.1 組織観察結果

多層溶接 HAZ 部の組織を再現熱サイクル試験によって観察するにあたって、本報告では主に二重熱サイクル材の組織によって Table 3 に示す分類を行い、特に UACGHAZ (Unaltered CGHAZ), FGHZ (Fine Grained HAZ), ICCGHAZ (Inter-Critically reheated CGHAZ), SCCGHAZ (Sub-Critically reheated CGHAZ) の 4 領域における組織に注目して考察を行う。

Fig. 3 はこれら 4 領域での島状マルテンサイトの形態を SEM によって観察したものである。UACGHAZ においては大きなオーステナイト粒内に板状の島状マルテンサイトが一定の方向性をもって層状に分布していることがわかる。ここで言う板状の島状マルテンサイトとは、鋼のマルテンサイト変態において生成する結晶学的形態としての板状マルテンサイトを指すものではない。焼入性の低い鋼の UACGHAZ では急冷却過程でオーステナイトからベイニティックフェライトが生成・成長するが、その成長過程でラス状フェライトの α/γ 界面に残留

Table 3 Classification of HAZ-microstructure of multipass welds.

Peak temperature of first cycle(T_{p1})	Peak temperature of subsequent cycles(T_{p2})	HAZ-microstructure
Melting point $\sim$ 1250 $^{\circ}\text{C}$ (CGHAZ)	Melting point $\sim$ 1250 $^{\circ}\text{C}$	UACGHAZ
	1250 $\sim$ 850 $^{\circ}\text{C}$	FGHAZ
	850 $\sim$ 700 $^{\circ}\text{C}$	ICCGHAZ
	700 $\sim$ 450 $^{\circ}\text{C}$	SCCGHAZ
	450 $\sim$	UACGHAZ
1250 $\sim$ 850 $^{\circ}\text{C}$ (FGHAZ)	Melting point $\sim$ 1250 $^{\circ}\text{C}$	UACGHAZ
	1250 $\sim$ 850 $^{\circ}\text{C}$	FGHAZ
	850 $\sim$ 700 $^{\circ}\text{C}$	ICCGHAZ
	700 $\sim$	FGHAZ
850 $\sim$ 700 $^{\circ}\text{C}$ (ICCGHAZ)	Melting point $\sim$ 1250 $^{\circ}\text{C}$	UACGHAZ
	1250 $\sim$ 850 $^{\circ}\text{C}$	FGHAZ
	850 $\sim$	ICCGHAZ

した未変態オーステナイト中の炭素が濃化してマルテンサイト変態点が低下する結果、残留オーステナイトがラス状フェライト界面に板状に並んだ形のままでマルテンサイトに変態したものと考えられる。

これに対して、FGHAZ では島状マルテンサイトは塊状であり、フェライトの粒界に比較的確率ランダムに生成している。UACGHAZ に比べて FGHAZ ではオーステナイト粒径が小さく、冷却速度も遅いことから、ポリゴナルフェライトが生成・成長し、炭素の濃化したオーステナイト部分も塊状に残留して最終的にマルテンサイト化したものと思われる。このような組織は、鋼の母材においても、特殊な熱処理を行うことによって生成できることが知られている^{13,14)}。

一方、ICCGHAZ においては、CGHAZ が α - γ 二相領域に再加熱されたために、島状マルテンサイト部分から一部再オーステナイト化し、フェライトの成長と残留オーステナイトの濃化が更に進行した後に変態した結果、旧 CGHAZ の組織の一部継承して島状マルテンサイトは方向性を持って分布している。ただし、島状マルテンサイトは UACGHAZ の様な長く伸びた板状ではなく、短く断断された矩形板状の様相を呈している。

SCCGHAZ においては単一熱サイクルでの CGHAZ の組織がほとんど継承されている。

Fig. 4 は面積率として求めた島状マルテンサイトの量をそれぞれの再現組織の加熱温度によって整理した結果であるが、加熱温度によって島状マルテンサイト量は約 6 $\sim$ 9% の範囲で変化していた。 α - γ 二相域に加熱された場合あるいは加熱温度が 1400 $^{\circ}\text{C}$ に近づいた場合に、島状マルテンサイト量は若干多くなっていた。また、単サイクルと二重サイクルでは、加熱温度に伴う島状マルテンサイト量の変化がほぼ同じであり、前組織に関係なく最終熱サイクルによってその量がほぼ決まることがわかる。

以上の SEM によって観察した UACGHAZ や ICCGHAZ における板状あるいは矩形板状のマルテンサイトを有する組織は、降伏点 460 N/mm² クラスの鋼の母材では一般に観察されず、溶接によって高温加熱、急冷却された結果生成する HAZ 特有の組織である。そこで、これらの組織を更に TEM によって詳細に観察した。

Fig. 5 は UACGHAZ の組織に対する TEM 観察結果を示したものである。Fig. 5(a)で層状に並んだ黒い生成

物は、電子線回折により正方晶軸比が約1.1~1.3のマルテンサイトであることが確認された。マルテンサイトにおいてはその正方晶軸比が1より大きくなるに従って、その中に含有する炭素量が多くなることがわかっており¹⁵⁾、高炭素マルテンサイトとなっていることが推察される。またこれらの個々に分離している層状マルテンサイ

イトはほぼ同じ結晶方位を有していることが確認された。マルテンサイト以外の母地相は、Fig. 5 (b), (c)で示すようにフェライトと微細なセメントイトからなっていることがわかり、両者はBagaryatskijの結晶方位関係¹⁵⁾を有していた。このことから、このUACGHAZで観察された組織はベイナイト変態によって生成した下部ベイナイトのようにも思われるが、ベイナイトラスの成長によ

Fig. 3 Shape and distribution of martensitic islands for each HAZ-classified microstructures.

Fig. 4 Fraction of martensitic islands vs. peak temperature (T_{p1} for single cycle and T_{p2} for double cycle).

Fig. 5 Transmission electron micrographs of UACGHAZ, (a) bright field image: (b) diffraction pattern, and (c) its schematic representation.

Fig. 6 Transmission electron micrograph of ICCGHAZ.

Fig. 7 Transmission electron micrographs of ICCGHAZ subjected to 600°C third thermal cycle: (a) bright field image, (b) diffraction pattern, and (c) its schematic representation.

って母地にセメンタイトが析出したのであれば未変態オーステナイト中への炭素の拡散・濃化は生じないはずであり、マルテンサイトが生成している事実と矛盾する。フェライトとセメンタイトの間の Bagaryatskij の結晶方位関係は、炭素過飽和のフェライトから析出したセメンタイトの場合にも観察されている¹⁵⁾ことを考えると、この UACGHAZ のフェライト相中において確認されたセメンタイトは TEM 用薄膜を作製する過程で析出した可能性が高い。すなわち、UACGHAZ のフェライト相は炭素過飽和の α 固溶体になっていると考えるのが妥当と思われるが、いずれにしても比較的硬質のフェライト相を形成していると考えられる。

当然のことながら、マルテンサイトで分割された母地も皆同じ結晶方位を有していることが観察された。

Fig. 6 は ICCGHAZ の組織を TEM で観察した結果

Fig. 8 Classification of HAZ microstructure for high strength steels, based on the morphology of martensitic islands

Fig. 8 Classification of HAZ microstructure for high strength steels, based on the morphology of martensitic islands.

であるが、第二相として UACGHAZ の場合よりもやや短くなった島状マルテンサイトと塊状のセメンタイトが認められた。ただし、母地はフェライト単相からなっており、母地自体は UACGHAZ の場合と比較してかなり軟質であると考えられる。

ICCGHAZ が三回目のテンパーサイクルを更に受けたときの組織についても TEM 観察を行ったが、テンパーサイクル温度の上昇と共に島状マルテンサイトが減少してセメンタイトの量が増加する傾向が認められた。しかし 600°C のテンパーサイクルを受けた場合においても、Fig. 7 に示すとおり分解途中にあるマルテンサイトが存在することが観察され、今回調査した ICCGHAZ 組織では矩形板状マルテンサイトの分解が比較的遅いことがわかる。Fig. 7 に示した分散した分解途中の島状マルテンサイトは、同一のオーステナイト粒内から生成したものはほぼ同一の結晶方位を有し、またこれらの島状マルテンサイトで分割された母地のフェライト相同士もほぼ同一の結晶方位を有していた。このことから、UACG→ICCG→テンパー ICCG の過程においても島状マルテンサイトの形態、量が変化するだけで、フェライト相、マルテンサイト相それぞれの結晶学的な特徴はそのまま継承されているものと思われる。

以上の観察結果より、HAZ に生成する組織はその形態によって Fig. 8 に示す Lath タイプと Blocky タイプの二種類に分類することができる。Lath タイプは、基本的にオーステナイトがベイナイト変態に類似した変態過程を経て生成した組織であると考えられ、その組織の大きなパッケージ内で島状マルテンサイトと母地のフェライトが同一方向に、それぞれの決まった結晶方位を持って Lath 状に整列している。一方、Blocky タイプはオーステナイトから初析フェライトがランダムに変態生成した後に残部のオーステナイトが最終的にマルテンサイト変態した結果、塊状の島状マルテンサイトがポリゴナルフェライトの粒界付近にランダムに分布した形態を呈している。UACGHAZ、ICCGHAZ、SCCGHAZ の組織は共に Lath タイプ、FGHAZ の組織は Blocky タイプに分類できる。

3.2 HAZ 再現組織の機械的性質

Fig. 9~10 は、単サイクル試験と二重サイクル試験における、加熱温度に伴う 0.2% 耐力、引張強さ及び -50°C での限界 CTOD 値の変化を示したものである。ここで、

Fig. 9 Variation of tensile properties with peak temperature for single- and double-cycled HAZ.

Fig. 10 Variation of critical CTOD with peak temperature for single- and double-cycled HAZ.

Fig. 10における限界CTOD値の各データについた添字c, uは, BS7448¹⁶⁾に示された破壊様式, δc , δu を示している(添字の付いていないものは破壊様式 δm を示す).

単サイクル試験においては, 最高加熱温度の低下に伴って引張強さは単調に低下し, 限界CTOD値は単調に上昇する傾向が観察された. しかし, 0.2%耐力は α - γ 二相温度領域(供試材の $A_{C1}=680^{\circ}\text{C}$, $A_{C3}=840^{\circ}\text{C}$)に加熱された場合に顕著に低下する現象を示した.

一方, 二重熱サイクルを受けた試験片においては, ICCGHAZに相当する α - γ 二相温度領域に再加熱された

Fig. 11 Influence of third thermal cycle on tensile properties of ICCGHAZ.

Fig. 12 Influence of third thermal cycle on critical CTOD of ICCGHAZ.

場合に0.2%耐力, 引張強さともにやや増加し, 限界CTOD値は急峻に低下して, 最も低い靱性レベルを示した. 靱性劣化の観点からみれば, Fig. 10より, UACGHAZおよびICCGHAZの脆化度が顕著であり, Lathタイプの組織の場合に靱性劣化が大きいことがわかる. またこれらの組織では0.2%耐力, 引張強さともに比較的高く, Lathタイプ組織では強度レベルも高いと言える. ただし, これらの組織の中でもICCGHAZの熱サイクルの時に最も顕著な脆化がおこっており, Lathタイプ組織の場合でもICCGHAZのみが島状マルテンサイトが短い矩形板状になっていたことと関係があるものと思われる.

Fig. 11~12はICCGHAZが三回目の熱サイクルを受けた場合の, 引張特性, CTOD特性の加熱温度に伴う変化を示したものである. 0.2%耐力, 引張強さは三回目の熱サイクルを受けてやや上昇していたが, 限界CTOD値には明瞭な変化は観察されなかった. 井川ら⁹⁾及び有持ら¹⁷⁾の実験では, 三回目の熱サイクルを受けることによ

って LBZ の靱性が回復しているが、土師ら⁹⁾は BS4360-50D 鋼においてこの三回目のテンパーサイクルによる靱性回復が遅いことを報告している。本供試材の場合も後者と同様であり、Fig. 7 で示した通り、ICCGHAZ の熱サイクルで生成した島状マルテンサイトは 600°C 以下の三回目の熱履歴を受けてもセメントイトへの分解が十分進行せず、逆に時効硬化して強度が高くなり、靱性が回復しないものと思われる。時効硬化はフェライト相からのセメントイト析出が更に進行するために生じると考えられ、ICCGHAZ の二回目の熱サイクルを受けても旧 CGHAZ で生成した炭素過飽和のフェライト相からのセメントイト析出が完全に完了していないものと思われる。島状マルテンサイトの分解が遅れる理由としては、

Fig. 13 Fractured surface and sectional microstructure of notched round bar tensile test specimen.

Mn, Ni 含有量の多い高張力鋼においてマルテンサイト変態点が低下する結果、高炭素マルテンサイトが生成しやすいことと関係があると考えられる。また、鋼中の Si も同様に変態温度を低温化することが報告されており¹⁸⁾、これらの成分の相乗効果と思われる。

3.3 HAZ 再現組織の破壊特性

切欠き付き丸棒引張試験によって CTOD 切欠き先端の応力状態を模した形で供試材を破断し、その破壊形態を観察することによって島状マルテンサイトの破壊に対する役割を検討した。Fig. 13 に破面と断面部組織の SEM による同時観察結果を示す。

UACGHAZ を再現した試験片においては、破面は完全なへき開破壊の形態を呈しており、板状の島状マルテンサイトと交叉する位置で tear line が観察される。断面においては主破断面以外に微小き裂は観察されなかった。このことから、破壊は一カ所で発生した微小き裂がそのまま伝播して最終破断に至ったものと思われる。一方、FGHAZ では繊維状破壊によって破断しており、断面においては島状マルテンサイトないしはポリゴナルフェライト程度以下のサイズの微小なボイドが多数生成していた。これらのボイドは第二相粒子とフェライトの境界部で発生しているものが多く観察された。第二相粒子界面からの剝離で生成した多数の微小ボイドが連結してディンプル状破断に至ったと考えられる。ICCGHAZ 材の破面は UACGHAZ と同様にへき開型破面であったが、UACGHAZ 材と異なり、破面直下の断面部にはいくつかの微小き裂が観察された。これらの微小き裂はせいぜいフェライトラス程度のサイズであり、Fig. 13 に示す通り比較的直線状の鋭利な形状であったが、その存在形態から判断すると、主き裂とは独立に孤立して発生・停止したものと思われる。

4. 島状マルテンサイトの形態と破壊発生特性に関する検討

以上においては島状マルテンサイトをその形態面から観察し、機械的性質、破壊挙動への影響を調査した。ここでは更に、島状マルテンサイトが組織の強度・靱性に

Fig. 14 Relation between critical CTOD and fraction of martensitic islands for single- and double-cycled specimens.

Fig. 15 Relation between 0.2% proof stress and fraction of martensitic islands for single- and double-cycled specimens.

与える影響を、その量・形態両面から検討し、破壊発生機構を組織中の強度不均質の観点から考察する。

Fig. 14, Fig. 15 は一重及び二重熱サイクル試験で得られた、島状マルテンサイト量と機械的性質の関係を示したものである。ただし、これらの図中の Blocky タイプの組織には、Table 3 で組織分類した単サイクル材の ICHAZ 組織も含まれている。また、組織分類の境界条件にあたる熱サイクル材（例えば、FGHAZ と ICCGHAZ の境界条件である $T_{p2}=850^{\circ}\text{C}$ の試験片）に対しても組織の差に注目して分類を行った。更に、図中で島状マルテンサイト量が 0% のデータは $T_{p1}=700^{\circ}\text{C}$ の単サイクル材に対して得られたものであり、島状マルテンサイトの生成は観察されなかったが、ポリゴナルフェライトとセメントタイトの生成形態から Blocky タイプの HAZ 組織として分類した。

以上の整理の結果、島状マルテンサイト量と機械的性質の関係は、組織の形態、すなわち Lath タイプか Blocky タイプか、によって異なっていることがわかる。Lath タイプの場合には島状マルテンサイト量の増加に伴って限界 CTOD は急激に低下し、0.2% 耐力は徐々に増加する傾向を示した。一方、Blocky タイプの場合には島状マルテンサイト量が増加しても限界 CTOD はほとんど変化せず、0.2% 耐力は逆に島状マルテンサイトが多い程度に低下していた。

これらの観察結果から、Lath タイプの場合にはその靱性劣化の主因は島状マルテンサイト量の増加であると考えて良さそうである。しかし、Blocky タイプの場合には島状マルテンサイト量が変わっても靱性が劣化せずに高い値を有しており、基本的に細粒なフェライト主体の組織であることからマトリックスであるフェライト地の靱性レベルが組織全体の靱性を主に左右して、 -50°C の試験温度ですべて高い CTOD 値が得られたものと考えられる。

以上の検討から、機械的性質を把握するためには島状マルテンサイト一つ一つの形あるいはトータルの量といった画一的な見方をするよりも、更に島状マルテンサイト相互の位置関係、母地との強度的レベル差等を考慮した組織全体における島状マルテンサイトの存在形態に着目してとらえた方が妥当である。組織が Lath タイプと

なる UACGHAZ, ICCGHAZ では、Fig. 9~12 でみられる通り、強度が母材レベル以上で靱性も比較的低く、LBZ あるいは局所硬化域 (LHZ: Local Hard Zone) を形成する主要原因になっているものと考えられる。しかし、組織のタイプは同じ Lath タイプであっても、ICCGHAZ と他の Lath タイプ組織とは Fig. 13 で観察した通り、その破壊形態が異なっていた。この違いは、島状マルテンサイトがやや硬化した母地の中に板状に析出しているか、あるいは軟質の母地の中にやや分離した矩形板状に析出しているか、という組織上の差と対応していると思われる。分離して存在する矩形板状の島状マルテンサイトが軟質のフェライト中に存在すると、そのマルテンサイト先端部の母地に塑性歪が集中してき裂が発生しやすいという事が報告されており⁹⁾、今回の観察結果もその解釈を支持している。このような組織を有している ICCGHAZ では破壊の発生が容易に生じるものと思われる。

CTOD 試験で観察される目視レベルの破壊発生のためには、島状マルテンサイト近傍での微小き裂発生と（場合によっては島状マルテンサイト自体の破断がその引き金になることも考えられる）、それに続く他の島状マルテンサイト壁を貫通するき裂進展とが必要であり、その両段階を乗り越えるための全エネルギーの大小が靱性レベルを決定するものであり、材料・溶接条件等によって変化するそれぞれの HAZ 組織で各段階を越える難易度は異なるであろう。今回の材料・溶接条件では ICCGHAZ の方が UACGHAZ よりも総合面での破壊抵抗は低いと言える。

一方、Blocky タイプの FGHAZ では、母地が細粒で軟質のフェライトであると同時に島状マルテンサイトも塊状でランダムに存在していることから、Fig. 13 で観察された様に、かなりの塑性変形の後に球状のポイドという形でしか欠陥が生成しない。当然 FGHAZ ではき裂伝播抵抗も同様に増加すると思われ、総合的な破壊抵抗が大きくなっているものと考えられる。

しかし、実際の多層溶接継手においては靱性の最も低い ICCGHAZ から破壊が発生するとは限らない。それは本研究で個々に調べた種々の熱履歴を受けた組織が、HAZ 中に複雑に分布している結果、やや広域にわたる強度的不均質によって上記の見方よりもマクロ的レベルでの不均一塑性変形がおこり、それが破壊発生箇所に影響を与えるものと考えられる。このマクロ的な強度不均質の破壊発生挙動への影響については、本研究の第二報において検討する。

5. 結 言

TMCP 型降伏点 460 N/mm^2 クラスの高張力鋼多層溶接 HAZ 部の組織を島状マルテンサイトの形態を中心として観察し、その機械的性質、破壊特性への影響を調査した結果、以下の結論を得た。

(1) HAZ の組織は島状マルテンサイトを中心にした組織形態により Lath タイプと Blocky タイプに分類できる。

(2) Lath タイプの組織では、オーステナイト粒内に同一の方向性を持って板状あるいは矩形板状の島状マルテンサイトが整列しており、母地の塑性変形を強く拘束する結果、強度は母材に比べて高くなり、靱性は低下し、へき開型の破壊を引き起こす。これに対して Blocky タイプの組織では塊状の島状マルテンサイトがランダムに

フェライト粒界付近から生成しており、母地に対する塑性拘束効果が少ないと同時に、細粒フェライト主体の組織となっていることから、強度が低下し、靱性は比較的高くなり、破壊は繊維状延性破壊によって起こる。

(3) その結果、Lathタイプでは島状マルテンサイト量が組織全体の機械的性質に直接的影響を与え、その増加に伴って組織自体の強度は上昇し、靱性は急激に劣化するが、Blockyタイプでは島状マルテンサイト量が増加しても -50°C の試験温度において靱性の劣化は観察されない。

(4) 降伏点 460 N/mm^2 クラスの高張力鋼多層溶接HAZ部においては、UACGHAZ、ICCGHAZ、SCCGHAZすべてがLathタイプの組織を形成するが、ICCGHAZのLathタイプ組織では島状マルテンサイトの長さが比較的短くなると同時に母地がフェライト単相となって軟化し、微小き裂の伝播のみでなく、発生も容易に起こり、その結果最も低い靱性となる。

参考文献

- 1) 佐藤, 豊田, 南, 有持, 中西, 佐藤: 新しい局部CTOD仮説の提案とその溶接部への適用, 溶接学会論文集, 第2巻(1984), 447s-454s.
- 2) 佐藤, 豊田, 佐藤: 強度の異なる材の接合面近傍に存在するき裂のまわりの応力・歪挙動, 溶接学会論文集, 第3巻(1985), 617s-624s.
- 3) 豊田, 南, 羽田, 鈴木, 有持, 別所: 溶接HAZ切欠き材の応力・ひずみ挙動に及ぼすHAZの耐力低下の影響, 溶接学会全国大会講演概要, No. 50 (1992), 262s-263s.
- 4) F. Minami, S. Hada, C. Ruggieri, M. Toyoda: Analysis of Strength Mis-Matching of Welds on Fracture Performance of HAZ-Notched Joint, IIW Doc. X-1254-92 (1992).
- 5) 笠松, 高嶋, 細谷: 溶接構造用高張力鋼の溶接熱影響部の靱性に及ぼす島状マルテンサイトの影響, 鉄と鋼, 第65年(1979), 1222s-1231s.
- 6) H. Ikawa, H. Oshige and T. Tanoue: Effect of Martensite-Austenite Constituent on the HAZ Toughness of a High Strength Steel, IIW Doc. IX-1156-80 (1980).
- 7) M. Nakanishi, Y. Komizo, Y. Fukada: Study on the Critical CTOD Properties in the Heat Affected Zone of C-Mn Micro Alloyed Steel, The Sumitomo Search No. 33 (1986), 22s-34s.
- 8) T. Haze and S. Aihara: Metallurgical Factors Controlling HAZ Toughness in HT50 Steels, IIW Doc. IX-1423-86 (1986).
- 9) F. Minami, H. Jing, M. Toyoda, F. Kawabata and K. Amano: Effect of Local Hard Zone on Fracture Initiation of Weld HAZ, IIW Doc. X-1254-92 (1992).
- 10) B.C. Kim, S. Lee, N.J. Kim and D.Y. Lee: Microstructure and Local Brittle Zone Phenomena in High-Strength Low-Alloy Steel Welds, Metallurgical Transactions Vol. 22A (1991), 139s-149s.
- 11) 川端, 天野, 板倉, 南, 荆, 豊田: 鋼溶接熱影響部靱性に及ぼす局部的硬化部の形態効果, 日本造船学会論文集, 第173号(1993), 349s-357s.
- 12) K. Easterling: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths & Co Ltd (1983).
- 13) 橋口, 西田, 加藤, 田中: 混合組織鋼板の引張特性におよぼす合金元素と焼鈍後冷却速度の影響, 川崎製鉄技報, Vol. 11, No. 1 (1979), 68s-77s.
- 14) 大西, 鈴木, 染谷, 内村, 鎌田: 高層ビル用低降伏比 60 kgf/mm^2 高張力鋼の開発, 住友金属, Vol. 40, No. 3 (1988), 33s-42s.
- 15) クルヂュモフ, ウテフスキー, エンティン: 鉄鋼の相変態, アグネ技術センター (1987).
- 16) BS7448: Fracture mechanics toughness tests, Part 1. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials, British Standard (1991).
- 17) K. Arimochi and K. Isaka: Approaches to LBS Free Technologies, OMAE'91, ASTM (1991), 213s-219s.
- 18) 大谷, 渡辺, 川口, 山口: ボロン添加と低シリコン化による 60 kgf/mm^2 級高張力鋼板の大入熱溶接継手ボンド部の靱性改善, 鉄と鋼第64年, 第14号 (1978), 107s-166s.