

解説

受賞技術 - 35

大型鍛鋼品の靱性予測技術の構築と強度-靱性バランス および溶接性に優れた海洋構造物用鋼の開発

Construction of Toughness Prediction Technique for Large Forgings and
Development of Steel for Offshore Structures with Excellent
Strength-Toughness Balance and Weldability

本間祐太 日本製鋼所 M&E (株)
Yuta Honma 室蘭製作所 鋼材鋼管製品部 鋼管 Gr.
担当課長

1 はじめに

大型鍛鋼品には発電プラントのタービンロータシャフト、化学プラントの石油精製用リアクター及び海洋資源開発機器に適用されるストレスジョイントなど様々あり、近年の傾向として部材や機器の軽量化と破壊安全性の確保の観点から、高強度かつ高靱性な材料が志向されている。特に大型鍛鋼部材で脆性破壊が発生すると甚大な被害をもたらすため、部材には高い破壊靱性が要求される。また海洋資源開発に用いられる大型鍛鋼部材は溶接構造物として用いられることも多いため、溶接継手部も含めて低温靱性が要求され、特に溶接熱影響部 (HAZ) における靱性の確保が課題となる場合がある。

大型鍛鋼部材では、水焼入れでも冷却速度が低く、各温度域で生成した中間段階変態組織 (Zw)¹⁾ を含むため、焼入れ後は複雑な金属組織となる。さらに、その溶接継手の HAZ は多層溶接による複数回の溶接熱サイクルが付与され、溶融境界からの距離に応じて最高到達温度が異なることから、HAZ においても複雑な金属組織が形成される。したがって、多層溶接継手を有する大型鍛鋼部材の靱性向上のためには、これら複雑な金属組織の制御が必須となる。

金属組織と材料特性の関係として、旧 γ 粒径の微細化が、強度-靱性バランスの向上に繋がることが経験的にわかっている。そのため材料開発では、この“旧 γ 粒径の微細化”をキーワードに、化学組成や調質条件を変えた数多くの靱性評価試験結果を基に製造プロセスの最適化が図られるが、この従来の方法の問題点として以下の2点が挙げられる。

①実際に靱性を支配しているのは旧 γ 相ではなく、 α 相であること。

②靱性評価試験には、多くの労力、コストおよび時間が費やされること。

したがって、 α 相の靱性に及ぼす金属組織因子を明確にし、さらには金属組織因子から靱性を予測する手法を構築できれば、材料開発における靱性評価のほとんどを金属組織から予測し、実際の靱性評価試験は最低限実施すればよいことになる。

これらの背景から、本研究では Fig.1 に示した大型鍛鋼部材の Zw として代表的な塊状のグラニューラーベイニティックフェライト (α_B) と針状のベイニティックフェライト (α_B^0) を対象に、靱性を決定づける組織因子の明確にし、これらをパラメータ化することで、靱性予測技術を構築した。それに加え、母材を対象に構築した靱性予測式の HAZ 組織への展開可否を検証した。その後、本靱性予測技術を大型海洋構造物に展開し、母材の靱性ならびに溶接性に優れた Cu 含有低合金鋼 (ASTM A707 Grade 5L 改良鋼) の開発に結び付けた。なお、本成果は大阪大学大学院工学研究科博士課程にて大阪大学 南名誉教授ご指導のもと遂行したものであり、公益財団法人溶接接合工学振興会 令和2年度木原賞を受賞している。

2 中間段階変態組織を有する 大型鍛鋼品母材の靱性支配因子

フェライト鋼やマルテンサイト鋼では、へき開破面の一単位を破面単位と定義し、それに対応する金属組織サイズと

*令和2年度「木原賞」受賞

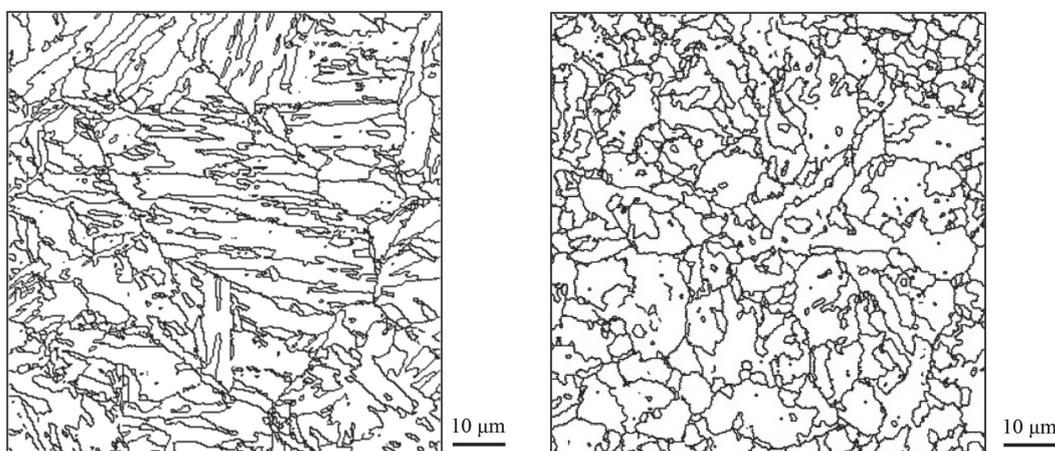
シャルピー衝撃試験から得られるFATT (延性-脆性遷移温度) に相関関係があることが報告されている²⁾。したがって、複雑なZw組織であっても、この破面単位に対応する単位組織が靱性を左右する金属組織因子となり得ると考えた。

そこで本研究では、調質後に α_B^0 組織となるCrMoV鋼および α_B 組織となるCu含有低炭素MnNiCrMo鋼を対象に、破面単位に対応する組織単位の明確化を行った。なお組織評価には、電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を用い、隣接する測定点の結晶方位差が 15° 以上となる境界を大傾角粒界と定義した。

各鋼での破面単位、EBSDより得られた組織単位および旧 γ 粒径の割合分布をFig.2に示す。 α_B^0 では大傾角粒界で区切られた切片間隔 (以下、ブロック幅) を、 α_B では大傾角粒界で囲まれた粒径 (以下、 α_B 粒径) を一つの単位組織とした。

本結果より、破面単位に対応する単位組織がこれまで靱性改善の指標として用いてきた旧 γ 粒では無く、ブロック幅 (α_B^0) または α_B 粒径 (α_B) であることが明らかとなった^{3,4)}。そこで、化学組成や熱処理条件の異なる鋼 (0.2 %Y.S.範囲: 450~800 MPa) を多数準備し、FATTとブロック幅または α_B 粒径の関係を調査した。その結果をFig.3に示す。鋼種や熱処理条件が異なっても、各組織サイズの微細化に伴いFATTは低下する関係が認められた。

一方で、金属組織が α_B^0 か α_B かによってFATTと組織サイズの関係性が異なること、また α_B^0 では同等のブロック幅であってもFATTの差が約50 Kも生じることも明らかとなった。これは、靱性を支配する組織パラメータが単位組織のサイズのみでは無いことを示唆し、靱性予測にはばらつきに起



(a) Bainitic ferrite: α_B^0 (b) Granular bainitic ferrite: α_B

Fig.1 High angle grain boundary map of bainitic ferrite (a) and granular bainitic ferrite (b).

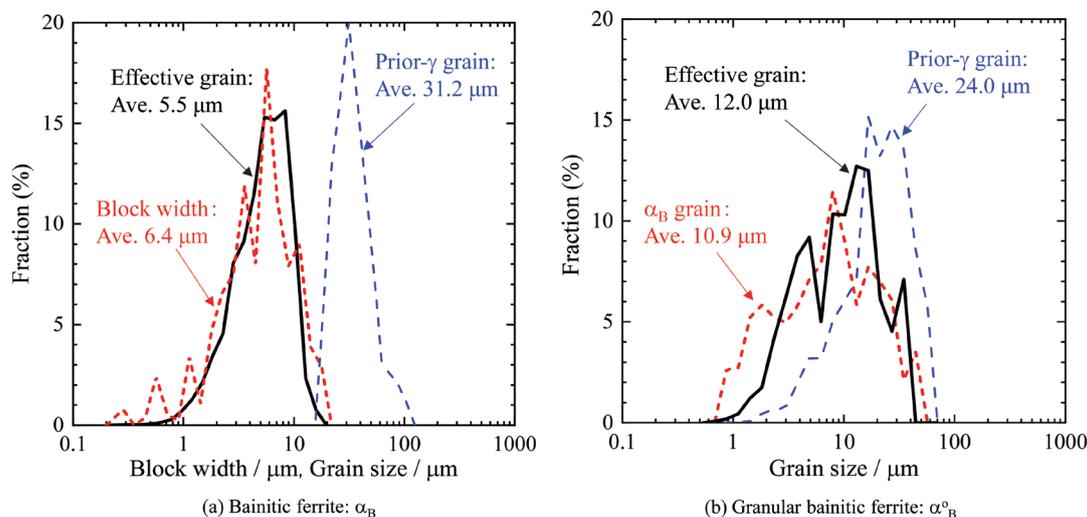


Fig.2 Histogram of effective grain size, prior-austenite grain size and structure unit for bainitic ferrite (a) and granular bainitic ferrite (b). (Online version in color.)

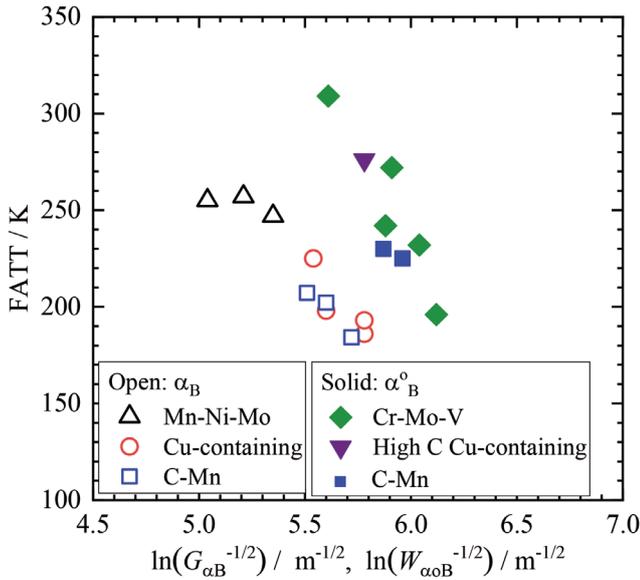


Fig.3 Relationships between $G_{\alpha B}$ or $W_{\alpha OB}$ and FATT of various steels ($G_{\alpha B}$: α_B grain size of α_B structure, $W_{\alpha OB}$: block width of α_B^o structure). (Online version in color.)

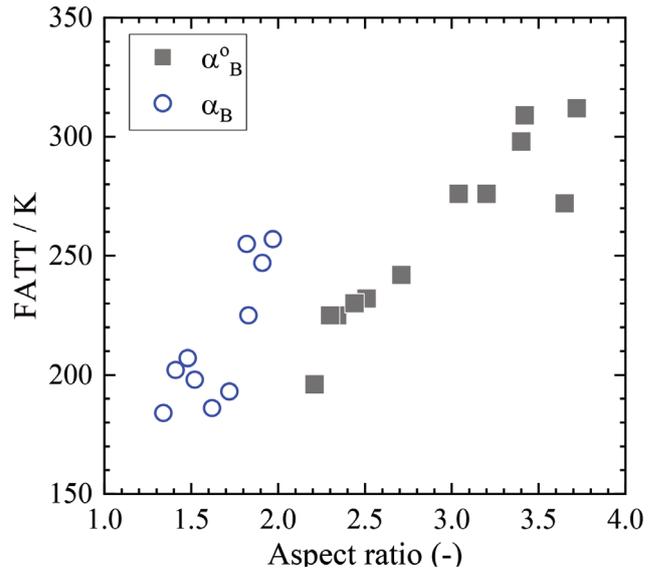


Fig.4 Relationships between aspect ratio of microstructure and FATT of α_B structure and α_B^o structure. (Online version in color.)

因する組織パラメータを考慮する必要があった。そこで我々は、 α_B^o 組織の形状(アスペクト比)が化学組成や熱処理によって変わることに着目し、アスペクト比がばらつきの主因と推測した。Fig.3に示した各データを用い、FATTとアスペクト比の関係をFig.4のように整理した。本図より、FATTとアスペクト比にも組織サイズと同様の相関が認められ、アスペクト比の低減に伴い、FATTが低温となった。これらの結果から、金属組織サイズ(ブロック幅または α_B 粒径)に加えて、アスペクト比を考慮することでFATTを体系的に整理できることが示された。

なお、靱性に及ぼすアスペクト比の影響について、本報では詳細は省くが、ほぼ同等強度の α_B 組織および α_B^o 組織の引張変形過程でのIn-situ EBSD測定を実施した結果、アスペクト比の高い α_B^o 組織では、塑性変形時に局所的な塑性ひずみの集積が発生し、この集積挙動の違いが材料の破壊に寄与したと推察している。

3 金属組織に基づいた靱性予測手法⁵⁾

3.1 大型鍛鋼品の母材を対象とした靱性予測手法

Fig.3に示した組織サイズとFATTの関数にアスペクト比の情報を加えて整理したものをFig.5に示す。組織のアスペクト比を基に分類することで、同一ブロック幅でのFATTの差異を表現できた。各アスペクト比の組織に対し、サイズとFATTの直線関係を靱性予測線図とし、近似直線から以下の靱性予測式(1)~(3)を導出した。

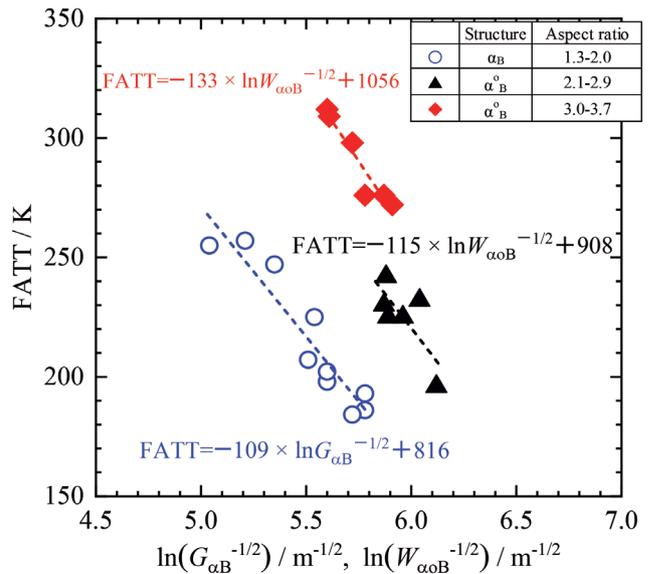


Fig.5 Relationships between $G_{\alpha B}$ or $W_{\alpha OB}$ and FATT considering the aspect ratio of various microstructures with approximation straight lines for toughness predictions ($G_{\alpha B}$: α_B grain size of α_B structure, $W_{\alpha OB}$: block width of α_B^o structure). (Online version in color.)

α_B 組織 (アスペクト比 ≤ 2.0):

$$FATT = -109 \times \ln G_{\alpha B}^{-1/2} + 816 \dots\dots\dots (1)$$

α_B^o 組織 (アスペクト比2.1~2.9):

$$FATT = -115 \times \ln W_{\alpha OB}^{-1/2} + 908 \dots\dots\dots (2)$$

α_B^o 組織 (アスペクト比3.0~3.7):

$$FATT = -133 \times \ln W_{\alpha OB}^{-1/2} + 1056 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $G_{\alpha B}$ は α_B 粒径、 $W_{\alpha OB}$ はブロック幅の加重平均値を示す。同図には、これらの予測式から得られる直線を破線で示しているが、測定データとの誤差も少なく、本予測式を

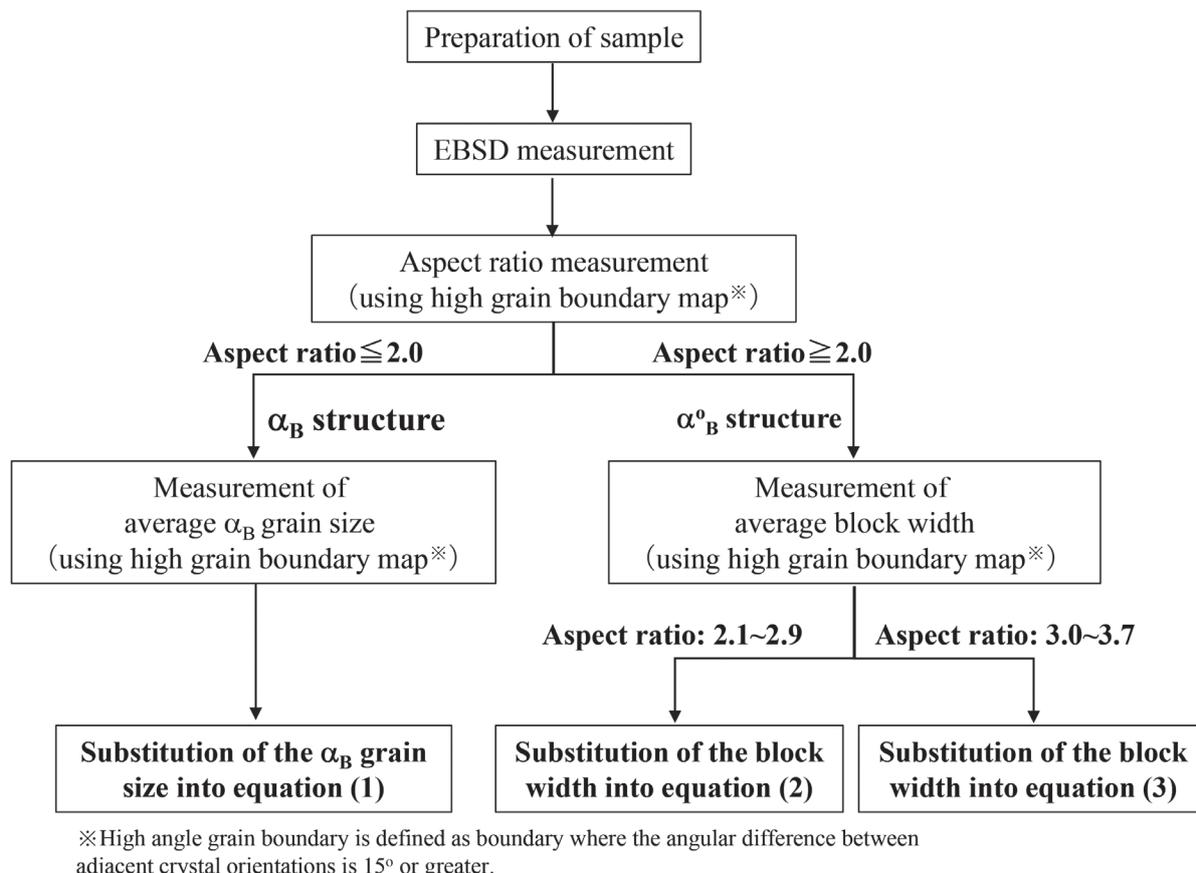


Fig.6 Procedure of the toughness prediction method.

用いることで、精度の高い靱性予測が可能となった。

本研究で構築した靱性予測手法の手順を Fig.6 に示す。対象とする材料の EBSD 測定を実施し、大角境界マップから組織のアスペクト比を測定する。アスペクト比 2.0 以下の場合には α_B 組織、アスペクト比 2.0 以上の場合には α_B^o 組織として判別し、 α_B 組織の場合には α_B 粒径 (円相当径) を、 α_B^o 組織の場合にはブロック幅 (切片間隔) を測定し、加重平均値を算出する。対象とする組織のアスペクト比を基に靱性予測式 (1) ~ (3) を選定し、各組織サイズを代入することで、FATT を予測できる。本手法によって、材料試験を実施することなく金属組織評価のみから FATT を予測できるため、30×30 mm 程度の金属組織観察用試料を準備するだけで、簡便かつ迅速に靱性を予測しながら材料開発を進めることができる。

3.2 靱性予測手法の HAZ 組織への展開

溶接構造物では、母材の溶接性改善の指標の一つとして、HAZ 靱性の改善が挙げられる。海洋構造物用大型鍛鋼品もその一つであり、上述した靱性予測手法が HAZ にも適用できれば、溶接性を考慮した材料開発において、非常に有用な技術となる。しかしながら HAZ 靱性は、溶接熱サイクル過程で生成する島状マルテンサイト (MA) の生成量などに依存す

ることが報告されている⁶⁾。本靱性予測式の HAZ 組織への展開において、HAZ 靱性への MA の影響度合いが適用可否を決定づけると予想された。

そこで本研究では、海洋構造物用鋼である Cu 含有低合金鋼を対象とし、実製品の多層溶接継手の HAZ 組織に加え、最高到達温度および冷却速度などを変動させた再現 HAZ 組織を準備し、それらの組織パラメータおよび MA 面積率の測定、シャルピー衝撃試験を実施した。得られた測定値を基に、靱性予測を実施し、実測値と予測値の差に及ぼす MA 面積率の影響を確認し、HAZ 組織へ靱性予測式が適用できる MA 面積率のクライテリアの明確化を実施した。なお MA 面積率測定は、レペラーエッチング⁷⁾後に SEM 像を取得し、画像解析によって算出した。

各 HAZ 組織の金属組織パラメータを基に、FATT 予測値と実測値の差と M-A 面積率の関係を Fig.7 に示す。MA 面積率が 5% 以下では予測値と実測値の差が ±15 K となったものの、それ以上では 20 K 以上の差が認められた。これは、本鋼において MA 面積率 5% を境に脆性破壊の発生がマトリクス主体から MA 主体に変化することが推定される。したがって、本研究で提案した靱性予測手法は、脆性破壊に対する MA の影響が顕在化しないことを条件 (本鋼の場合は MA 面積率 ≤ 5

%) としてHAZ組織にも適用できることが明らかとなった。

4 海洋構造物用大型鍛鋼品の材料開発

4.1 Cu含有低合金鋼母材の靱性改善

Fig.5にて得られた靱性予測線図より、海洋構造物用大型部材の母材の靱性を改善するための金属組織の作り込み指針として、靱性に対応する組織サイズの微細化、アスペクト比の低減ならびに α_B^o 組織から α_B 組織への組織改質が挙げられた。

しかしながら、これらの作り込みを従来の焼入れ(Q)-焼戻し(T)工程のみで行うことは困難であった。そこで我々は、従来大型鍛鋼品にはほとんど適用されてこなかった調質法である二相域焼入れ処理(L処理)に着目した。L処理は、 A_{C3} 点以上の保持温度(γ 相単相)から焼入れを実施する通常の焼入れ処理とは異なり、 A_{C1} 点と A_{C3} 点の間の α と γ 相からなる二相域温度で保持した後、焼入れを実施する熱処理方法である⁸⁾。

本研究では、構築した靱性予測手法を活用し、Cu含有低合金鋼の靱性を最大限引き出すための最適なL処理条件を模索した。その結果、比較的 A_{C3} 点に近い温度でL処理することにより金属組織を改良でき、靱性が改善することを確認している^{4,9)}。本報では、最も靱性改善効果が得られた α_B^o 組織から α_B 組織への組織改良について記述する。供試材として、ASTM A707 5L鋼を基本組成とした0.10%C-1.40%Mn-2.15%Ni-1.25%Cu-0.70%Cr(単位mass%)の組成を有する50 kg小型

鋼塊を溶製し、熱間鍛造した後に、通常の調質熱処理を施したQ-T材およびQとTの間にL処理を施したQ-L-T材を作製した。T条件を変えることで強度(0.2%Y.S.)を同等レベルに調整した。最適条件でのQ-L-T材と従来Q-T材の組織サイズとFATTの関係を図.8に示す。L処理により組織が改良さ

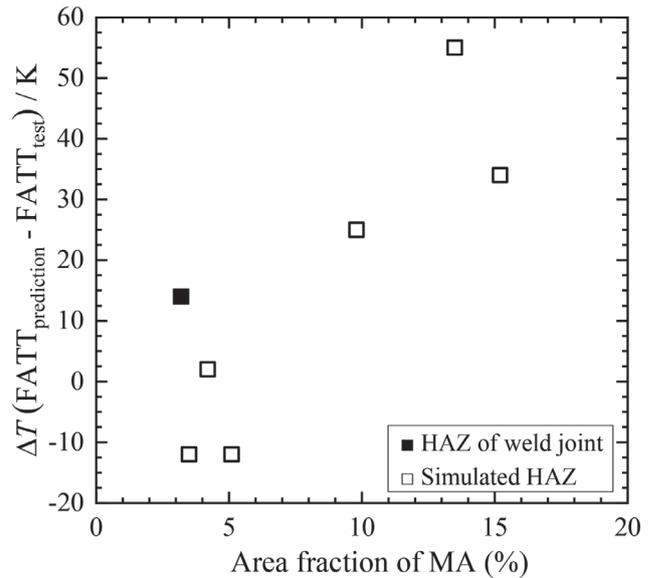


Fig.7 Relationship between area fraction of MA and ΔT ($FAT T_{prediction} - FAT T_{test}$) for HAZ of weld joint and simulated HAZ microstructures treated various thermal cycle patterns.

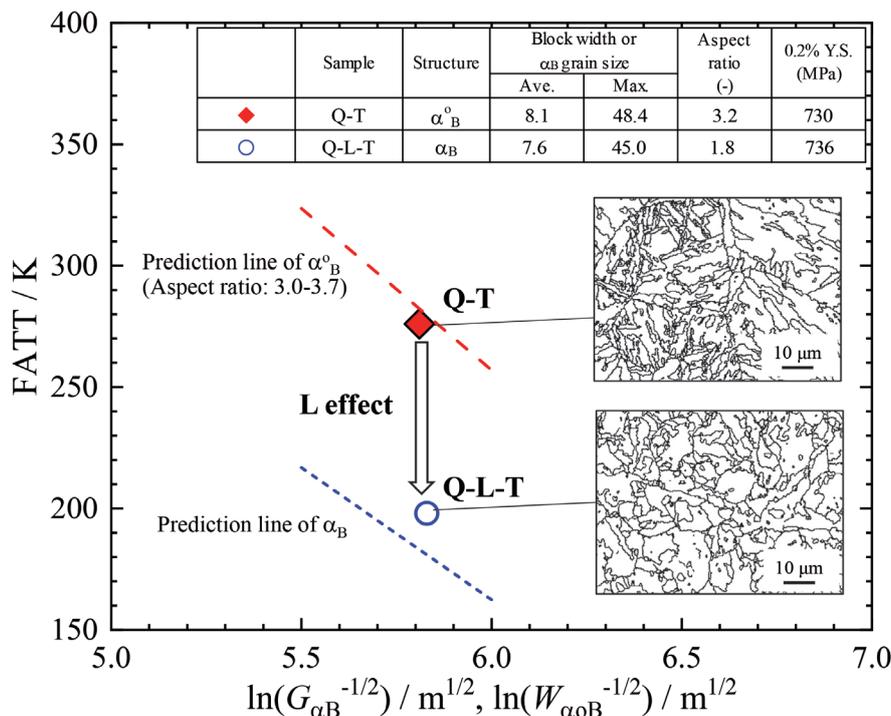


Fig.8 Relationship between microstructure parameter and FATT of Q-T and Q-L-T samples for Cu containing low alloy steel. (Online version in color.)

Table1 Results of CTOD test and area fraction of MA using simulated HAZ sample of developed and conventional steel (Specimen size: 10 x 10 mm, test temp.: 253 K)

	Mn content (mass%)	Area fraction of MA (%)	FATT (K)	CTOD value at 253K (mm)		
				0.16(δ_m)	0.12 (δ_m)	0.12(δ_m)
Developed steel	0.4	3.5	256	0.16(δ_m)	0.12 (δ_m)	0.12(δ_m)
Conventional steel	1.4	8.9	319	0.04(δ_c)	0.01 (δ_u)	0.02(δ_u)

れ、強度がほぼ同等にも関わらず、FATTが約80 Kも低温側にシフトした。

このようにL処理と組織因子に基づくFATT予測手法の研究により、強度-靱性を飛躍的に向上させたCu含有低合金鋼の開発に成功した。実機規模の大型鍛鋼品(全長18,000 mm、最大肉厚457 mm)にL処理を適用し、その解体調査から全長に渡って極めて良好な強度-靱性を有する大型鍛鋼品を製造できることを確認している¹⁰⁾。

4.2 Cu含有低合金鋼の溶接性(HAZ靱性)の改善

Fig.7より、Cu含有低合金鋼ではHAZ組織中のMA面積率を5%以下とすることでHAZ靱性に及ぼすMAの影響を無害化できることが示された。透過型電子顕微鏡(TEM)のエネルギー分散型X線分析(EDS)より、本鋼のMAにはMnの濃化が認められたことから、母材の材料特性も考慮しながらMn含有量を最適化することでHAZ靱性の改善が期待される。

そこで本研究では、標準材のMn含有量である1.4 mass%(従来鋼)から0.4 mass%(開発鋼)まで減じた試験鋼塊を準備した。母材を調質した後、実機を模擬した再現熱サイクル試験片を作製し、MA面積率ならびに靱性(FATTおよびCTOD特性)を調査した。各鋼の再現熱サイクル試験片のMA面積率、FATTおよびCTOD試験結果をTable1に示す。従来鋼ではMA面積率が8.9%であったのに対し、開発鋼では3.5%となり、狙い通りMA面積率を5%以下まで抑制できた。さらに開発鋼ではFATTおよびCTOD値も良好な値となり、HAZ靱性が大幅に改善されたCu含有低合金鋼の開発に成功した¹¹⁾。

5 結言

本論文では中間段階変態組織(Z_w)の中で大型鍛鋼品に主に認められる針状の α_B^* 組織と塊状の α_B 組織を対象に、金属組織パラメータ(組織サイズとアスペクト比)のみから靱性(FATT)を予測する手法を構築した。さらに、MA面積率のクラテリアを設けることで、靱性予測手法がHAZ組織にも適

用できることを示した。L処理および化学組成の最適化に対し本予測手法を活用することで、母材の強度-靱性バランスおよび溶接性に優れた海洋構造物用大型鍛鋼品を開発した。

本研究で提案した靱性予測手法は、強度レベルに一定の制限(0.2%Y.S.範囲:450~800 MPa)はあるが、予測手順も非常に簡便で特別な技術を要するものではないため、今後の大型鍛鋼品の耐破壊安全性を確保・改善するための製造条件の最適化や材料開発を行う上で、非常に有用であり、ものづくり技術の発展に貢献することが期待される。靱性予測手法の更なる高精度化・適用範囲の拡大のためには、マトリクス中の析出物(MA、介在物、炭化物など)もパラメータ化する必要がある、今後も引き続き検討していきたい。

参考文献

- 1) 鋼のベイナイト写真集-1, 日本鉄鋼協会 基礎研究会 ベイナイト調査研究部会編, 日本鉄鋼協会, (1992).
- 2) 花村年裕, 趙明純, 邱海, 殷福星, 長井寿: 鉄と鋼, 95 (2009) 1, 71.
- 3) 本間祐太, 茅野林造, 長井寿: 鉄と鋼, 102 (2016) 6, 311
- 4) 本間祐太, 橋邦彦, 佐々木元, 大川琢哉, 長井寿: 鉄と鋼, 103 (2017) 10, 579.
- 5) 本間祐太: 溶接技術, 69 (2021) 10, 104.
- 6) 平井征夫: 溶接学会誌, 50 (1981) 1, 37.
- 7) F. S. Lepera: Journal of Metals, 32 (1980) 3, 38.
- 8) 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸: JFE技報, (2007) 18, 23.
- 9) 本間祐太, 佐々木元, 橋邦彦, 南二三吉: 鉄と鋼, 105 (2019) 11, 1059.
- 10) Y. Honma, G. Sasaki and K. Hashi: Applied Science, (2019) 9, 1705.
- 11) Y. Honma, G. Sasaki, K. Hashi and F. Minami: Journal of Engineering Materials and Technology, 143 (2021) 1, 011006.

(2021年10月28日受付)