



入門講座

鉄鋼材料における析出物の利用ー7

析出物・介在物による変態制御

Phase Transformation Induced by Precipitates and Inclusions

重里元一

Genichi Shigesato

日本製鉄(株)
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
上席主幹研究員

1 はじめに

船舶、建築、橋梁、海洋構造物、ラインパイプなどの鋼構造物においては、安全性確保の観点から、鋼板母材および溶接部の靱性確保が重要である。一方、構造物の大型化に伴い鋼材が高強度化し、また、溶接施工効率向上のために溶接の大入熱化が進んでおり、靱性確保は益々難しくなっている。

鋼の靱性を向上させるには、粗大介在物などの破壊起点となる脆化相を減らすこと、および鋼の組織微細化が有効である。そのため、鋼の清浄度の追求と並行して、微細な組織を作り込む技術が長年研究開発されてきた。

鋼の組織微細化技術は大きく二つに分類される。一つは高温でのオーステナイトの結晶粒成長を抑制する技術、もう一つは冷却中の相変態を利用してフェライトの結晶粒を微細化する技術である。ここでは後者について述べる。オーステナイトからフェライトへの相変態において、フェライトの核生成サイトを増やすことでフェライト結晶粒を多数生成させ、変態後の組織を微細させることができる。フェライト核生成サイトを増やす手段としては、加工により歪を導入すること、および変態を促進させる能力をもった析出物・介在物を分散させることが有効である。

厚鋼板母材の場合、制御圧延(Thermomechanical Control Process: TMCP)により歪を導入することが可能であり、組織微細化が比較的容易である。それに対し、溶接金属や溶接熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)の場合、加工を加えることが出来ないため加工歪導入による変態促進は期待できない。そのため、析出物・介在物を利用した変態制御が重要であり、これまでに多くの技術が研究開発されてきた。

2 粒内変態フェライトの利用による組織微細化技術

2.1 析出物・介在物による粒内変態フェライト生成促進

析出物・介在物を変態核生成サイトとして利用すると、フェライト変態がオーステナイト粒界からだけでなく、オーステナイト粒内部でも発生するため、このようにして生成したフェライトは粒内フェライト(Intragranular Ferrite: IGF)と呼ばれる。HAZや溶接金属においてIGFを積極的に生成させることで組織を微細化し靱性を改善する技術の研究開発は1970年頃に始まる。1970年代半ばには、TiN¹⁾、REM (O,S)-BN²⁾を利用したHAZ組織微細化技術の実用化が報告されている。1980年代には、溶接金属においてTi酸化物を利用した技術が活発に検討され、Ti-B系溶接金属として実用化された³⁻⁵⁾。その後、HAZにおいてもTi酸化物利用した技術が実用化されている⁶⁻⁹⁾。それ以外にも、TiN-MnS¹⁰⁾、Fe₂₃(C,B)₆¹¹⁾、MnAl₂O₄¹²⁻¹⁴⁾、Ca (O,S)¹⁵⁾など、様々な析出物・介在物をIGF核生成サイトとして利用した技術が検討されてきた。

IGFを利用した組織微細化の例として、図1¹⁶⁾にTi酸化物によるHAZ組織微細化を示す。旧オーステナイト粒内に多数のIGFが生成しており、フェライト結晶粒のサイズが非常に小さくなっており、HAZ靱性の向上が期待できる。

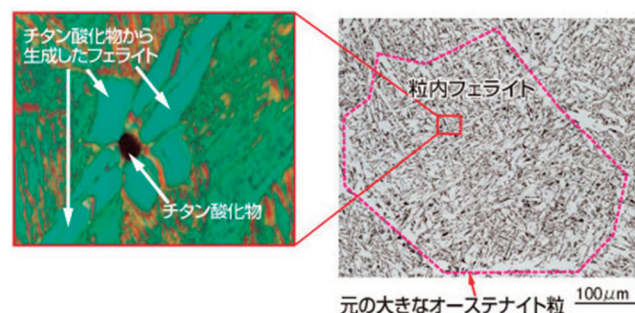


図1 Ti脱酸鋼のHAZ組織とTi酸化物から生成したIGFの観察例¹⁶⁾

2.2 析出物・介在物の制御

上記の検討を通じて、ある特定の析出物・介在物がIGF生成促進に有効であることがわかったが、実用化において重要な点は、狙いの析出物・介在物をいかに作り込むかである。実際の接合性を考えた場合、析出物・介在物の種類だけでなく、それらのサイズ、分散個数密度の制御が重要である。例えば、HAZにおけるTi酸化物利用の場合、鋼板製造段階における脱酸制御が必須であり、Tiによる脱酸が行われている(Ti脱酸鋼)。代表的なTi脱酸鋼の組成¹⁷⁾を見るとAlが30ppm以下であり、このような脱酸制御により鋼板中にTi酸化物を分散させている。Chijiwaら¹⁸⁾は、Ti脱酸鋼におけるTi酸化物個数密度とIGF面積率の関係を調べた。それによると、光学顕微鏡観察における観察視野1mm²中にTi酸化物が5~10個以上存在するとIGF面積率が高くなる(図2)。しかしながら、IGF面積率と酸化物個数の関係は、オーステナイト粒径の影響を受ける。オーステナイト粒径が小さくなるとIGF面積率が減少することが知られている^{19,20)}。これは、IGF生成がオーステナイト粒界から生成するフェライト生成と競合するためである。オーステナイト粒界は、フェライトの核生成サイトとして最も有力なサイトである。析出物・介在物も核生成サイトとして機能するが、核生成の活性化エネルギーで比較すると、粒界での核生成よりも大きいエネルギーが必要と考えられている(図3)。

3 粒内フェライト生成のメカニズム

技術実用化の検討と並行して、析出物・介在物からIGFが生成するメカニズムに関しても多くの研究が続けられている。溶接金属とHAZでは利用する析出物・介在物が異なる場合もあるが、IGF生成メカニズムは共通している。主に検討されているメカニズムは以下の3つである^{17,19,21,22)}。①不均一核生成における界面エネルギー低減、②合金成分拡散層

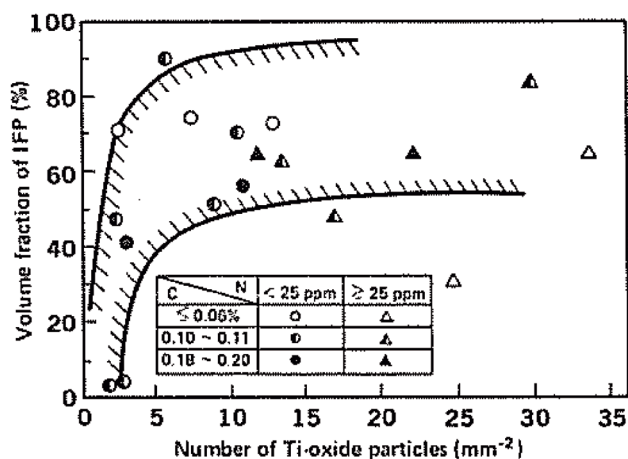


図2 Ti脱酸鋼中のTi酸化物個数とIGF分率の関係¹⁸⁾

(Mn欠乏層) 形成による変態駆動力の増加、③介在物と鋼の熱膨張係数の相違による歪エネルギー生成。特に①、②について活発な検討がなされている。紙面の都合上、ここでは①、②について述べる。

3.1 不均一核生成における界面エネルギー

古典的核生成を考えた場合、どのような析出物・介在物であれ、異相界面としてフェライト変態の不均一核生成サイトとして働くと考えられる。Rickら²³⁾、Thewlisら²⁴⁾は非整合界面を持ち、鋼母相との物質のやり取りが無いinertな介在物を想定し、不均一核生成に必要な自由エネルギーを見積もった。その結果、介在物上での核生成は、オーステナイト粒界上でのそれに比べると大きな自由エネルギーを必要とするが、均一核生成の場合よりはかなり小さなエネルギーであると報告している(図3)。また、介在物のサイズが大きいほど核生成サイトとしての能力が高くなることも指摘している。

上記の検討では、析出物・介在物の種類による核生成サイトとしての能力の違いは考慮されない。ところが実際には、特定の析出物・介在物が優先的にIGF核生成サイトとして機能しているように思われる。析出物・介在物の種類による違いを説明する考え方の一つに、フェライトとの格子整合性による界面エネルギー低減効果がある。

生成するフェライトと析出物・介在物の界面エネルギー σ_{IF} が小さければ、核生成に必要な自由エネルギーはより小さくなる、すなわち核生成サイトとしての能力が高くなると考えられる。 σ_{IF} は化学項と構造項から成ると考えた場合、化学項は相対的に小さいと考えられるため、構造項で議論されることが多い^{25,26)}。すなわち、格子整合性が良く、整合歪やミスフィット転位が少ないほうが界面エネルギーは低くなるため、フェライトとの格子整合性が良好な析出物・介在物が優

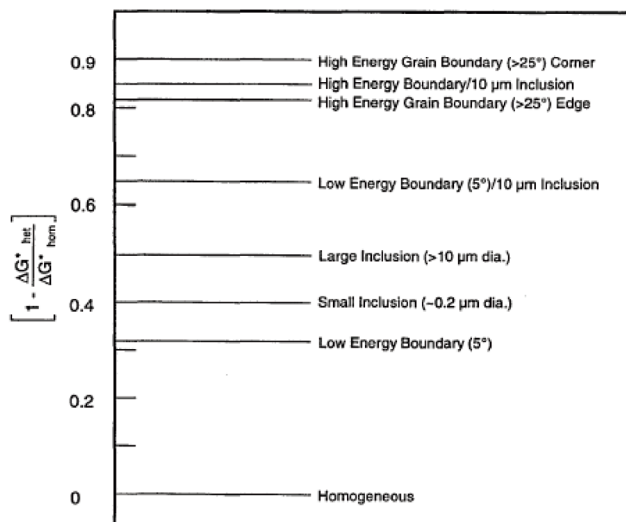


図3 核生成に必要な活性化エネルギーの比較²⁵⁾

先にIGF核生成サイトとして働くと考えられる。

格子整合性が良好な析出物を活用した例として、TiN, TiC, TiO, VC, VN, MgOなどのB1型化合物に関する報告が多数ある^{1,19,25,27-37)}。これらのB1型化合物はIGFの核生成サイトとして機能し、フェライトとBaker-Nutting (B-N)の結晶方位関係を持つことが報告されている^{28-30,32)}。一方、フェライト／オーステナイト界面エネルギーを低くするには、フェライトはオーステナイトとKurdjumov-Sachs (K-S)、あるいはNishiyama-Wasserman (N-W)の結晶方位関係を持つことが知られている^{26,38)}。B1型化合物とB-N方位関係を満足するように生成したフェライトは、一般には、オーステナイトとの方位関係を満足しなくなる。IGFがB1型化合物、オーステナイト母相いずれとの方位関係を優先させるかについて調べた研究がいくつかある。

Furuharaら³⁰⁾は、MnS+V (C, N) 複合介在物から生成するIGFを調査し、フェライトがV (C, N) とB-N方位関係を持った結果、オーステナイトとの方位関係がK-S関係からずれることを報告している。一方で、V (C, N) と特定の方位関係を持たないIGFもかなりの割合で生成すると報告している。これは、フェライト／V (C, N) の界面エネルギーだけを低くするのではなく、フェライト／V (C, N)、フェライト／オーステナイトの二つの界面エネルギーの和が小さくなるようにフェライトの方位が選択された結果と思われる。

冷却速度が速くIGF変態温度が低い場合、IGFの形状は針状(アシキュラーフェライト)となるが、その場合、フェライト／オーステナイト方位関係はK-S関係を満たす傾向がより強くなることが報告されている^{39,40)}。Grongら³¹⁾は、B1型化合物とオーステナイトの方位関係がランダムであると仮定し、IGFがB1型化合物、オーステナイト両方との方位関係を満足する可能性を考察している。K-S、B-N方位関係からの角度のずれを許容することで、両方の方位関係を同時に満たす

ことが一定の確率で起こることを示し、このような条件を満たす析出物が優先的にIGF核生成サイトとして機能するとしている。高田ら⁴¹⁾、上月ら⁴²⁾は、TiOから生成したアシキュラーIGFの結晶方位を精緻に測定し、フェライトとTiOはB-N方位関係を満たすこと、フェライトとオーステナイトは、TiOとの界面近傍ではK-S方位関係から5度程度ずれているが、フェライトが成長するにつれて方位回転し、K-S関係を満たす方位に近づいていくと報告している(図4)。これらの報告はいずれも、B1型化合物上に生成するIGFの結晶方位がB1型化合物の結晶方位に影響を受けることを示唆している。すなわち、フェライト／析出物・介在物の界面エネルギー σ_{IF} が低いことがIGF生成促進の一因子であることを示している。

Fujiyamaら⁴³⁾は、溶接金属中のTiO／アシキュラーフェライト界面を収差補正STEMにより観察している(図5)。HAADF-STEM像でTiO、フェライトの原子列像が明瞭にみられており、界面でのTiO／フェライト方位関係はほぼ正確にB-N方位関係を満たしている。このことから、2つの可能性が考えられる。一つは、高田ら⁴¹⁾、上月ら⁴²⁾の結果と同様に、核生成段階でフェライトがTiOとの方位関係を優先し、オーステナイトとの方位関係はK-S関係からずれているとするものである。この場合、TiOはオーステナイトと特定の方

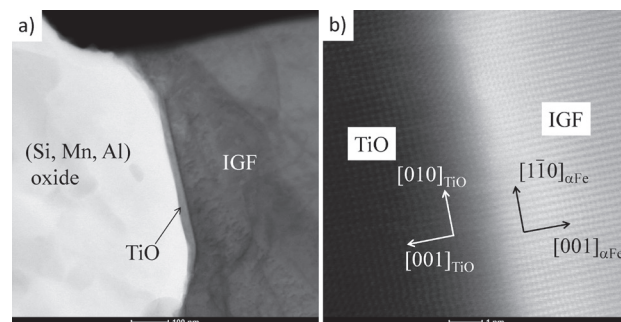


図5 溶接金属中TiO／IGF界面のHAADF-STEM像⁴³⁾

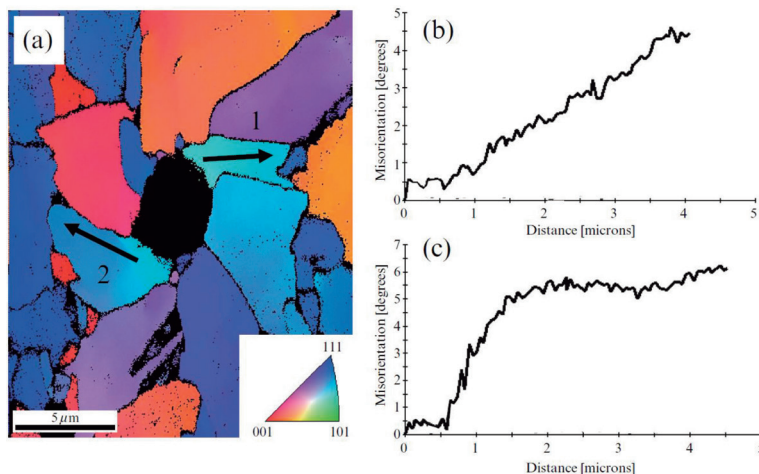


図4 溶接金属中TiO／IGF界面近傍の結晶方位分布⁴¹⁾

位関係を持っていなかったことを想定している。もう一つの可能性は、TiOがオーステナイトと方位関係を有しており、生成するフェライトがTiO、オーステナイト双方と方位関係を満たすとするものである。後者の場合、IGF生成の促進効果は前者ほど強くないと予想される。オーステナイト／析出物・介在物の界面エネルギー σ_{IA} が高いほど、不均一核生成サイトとしての能力が高いと考えられるためである。

Nakoら⁴⁴⁾は、TiO同様、IGFとB-N方位関係を持つ酸化物である MnTi_2O_4 から生成したIGFの結晶方位を詳細に調べ、IGFがオーステナイト、酸化物双方との方位関係(IGF／酸化物：B-N方位関係、IGF／オーステナイト：K-S方位関係)を同時に満たして生成しており、従って、 MnTi_2O_4 はオーステナイトと特定の方位関係を有していたと考察している。どちらの現象が起こっているかは、現段階では必ずしも明確でないように思われる。TiOや MnTi_2O_4 の生成温度、高精度な結晶方位解析などのより詳細な検討が必要である。

格子整合性の評価基準としては、単純に格子定数の比を取るもの^{19,31)}、複数方向の原子間距離の比を平均化するもの^{27,45)}、O格子理論に基づく格子整合度指標⁴⁶⁻⁴⁸⁾などが報告されている。立方晶(111)/六方晶(0001)や、体心立方晶(100)/B1構造(100)のような比較的単純な界面構造の場合で、同じ界面構造で格子定数のみ異なる系で相対比較するのならば、単純な格子定数比での評価でも整合性の良否を議論できる。一般の異相界面の場合、O格子理論などの理論で構造を予測し、ミスフィット転位の自己エネルギーと相互作用エネルギーを考慮すれば界面エネルギー(の構造項)を見積もることができる。

以上は界面エネルギーの構造項のみを議論したものであるが、IGF生成促進効果を定量的に議論するには、化学項の影響も考慮する必要がある。河西ら³⁶⁾は、第一原理計算によりB1型化合物とフェライトの界面エネルギーを計算している。 MgO はTiNよりも格子整合性が良好であるが、界面エネルギーは高く、界面での原子間結合エネルギーの影響が無視できないことを指摘している。

計算機の発達により、第一原理計算による界面エネルギー評価が可能となってきた。しかし、異なる界面構造間で整合性の良否や、界面エネルギーの大小を比較した報告は少ない。例えば、ボロン窒化物(BN)はIGF生成を著しく促進することが報告されているが¹⁹⁾、格子整合性良否に関する議論は少ない。フェライト(bcc)/BN(hcp)はBurgersの方位関係を持つと報告されているが、界面構造は単純ではない⁵⁰⁾。そのような複雑な構造の界面エネルギーを定量評価していくことが今後の課題と思われる。

3.2 Mn欠乏層形成の効果

IGF生成を促進するもう一つの因子としてMn欠乏層形成がある。析出物・介在物の周囲にMn濃度が低い領域が形成されることで、オーステナイトからフェライトへの変態駆動力が増加し、IGF生成が促進されるという考え方である。Mn欠乏層が形成される機構として、MnS析出に伴うものと、Ti酸化物へのMn吸収によるものが提唱されている。

MnSが析出する際、MnS周辺にMnの拡散層が形成される。Sの拡散が速いため、S濃度はMnS／オーステナイト界面でもオーステナイト母相とほぼ同じ濃度になるが、Mn濃度は界面近傍で低くなることが拡散場の計算により示されている。また、実際にTEM-EDS分析によりMnS周辺のMn欠乏層の存在が確認されている⁵¹⁾。

一方、Ti酸化物の周囲にもMn欠乏層が形成されることが確認されている。これは、HAZや溶接金属中で高温からの冷却中に Ti_2O_3 構造のTi酸化物にMnが吸収されるために生じると考えられている⁵²⁻⁵⁷⁾。Greggら⁵⁴⁾は高純度な Ti_2O_3 鉍物粉末と鋼を1200℃ 600s保持の熱処理を施して加圧接合した界面近傍においてEPMAを用いてMn濃度分布を測定し、鋼側にMn欠乏が生じることを確認した。重里ら^{58,59)}、福永ら⁶⁰⁾、Byunら⁶¹⁾は、HAZ組織中のIGF生成起点となっている介在物をTEM観察し、EDS分析により Ti_2O_3 周囲にMn欠乏層が形成されていることを示した(図6)。Seoら^{62,63)}は、溶接金属中の Ti_2O_3 周囲で同様の結果を示している。

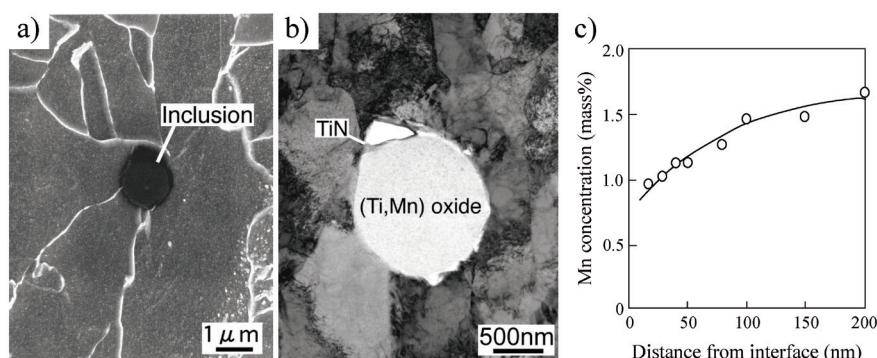


図6 Ti脱酸鋼中 Ti_2O_3 周囲のMn濃度分布⁵⁸⁾

Takamuraら⁵²⁾、山本ら⁵³⁾は、酸化物が陽イオン空孔型であることが、Mn吸収が起こる条件であると指摘している。また、このような酸化物として Ti_2O_3 以外に TiO 、 TiMnO_3 等を挙げている。前節で述べたように、 TiO は溶接金属におけるIGF促進効果が知られており、そのメカニズムとしてフェライトとの良好な格子整合性が指摘されているが^{36,37,41)}、Mn欠乏層形成によるIGF促進の可能性も考えられる。Kosekiら⁶⁴⁾は上述のGreggらと同様の手法を用いて、 TiO がMnを吸収することを示している。Fujiyamaら⁴²⁾は、溶接金属中のアシキュラーIGFの生成起点介在物を収差補正STEMにより詳細に調査し、生成したフェライトが TiO とB-N方位関係を持つことを示すとともに、 TiO ／鋼界面近傍にMn欠乏層が形成されていることを示した(図7)。また、 TiO が存在していてもその周囲にMn欠乏層が形成されないとIGF生成量が少なくなることから、IGF促進には格子整合性効果とMn欠乏効果の両方が影響するとしている。

3.3 IGF生成メカニズムのまとめ

以上のように、IGF生成メカニズムとしては、格子整合性、Mn欠乏層形成による効果の両方が作用していると思われるが、多くの場合、それら二つが重畳しているため、それぞれの効果を分離して、その有効性を定量的に比較した例はまだ少ない。また、それ以外の因子(熱膨張率差に起因する歪、合金元素の粒界偏析・界面偏析の効果など)の影響も無視できない。メカニズムの定量理解は今後の課題である。

メカニズム理解を深めるうえで、第一原理などの計算技術や、変態その場観察などの観察技術は、有用な情報を与えてくれる可能性があり、その活用が期待される。

4 まとめ

析出物・介在物を利用した変態制御技術として、HAZおよ

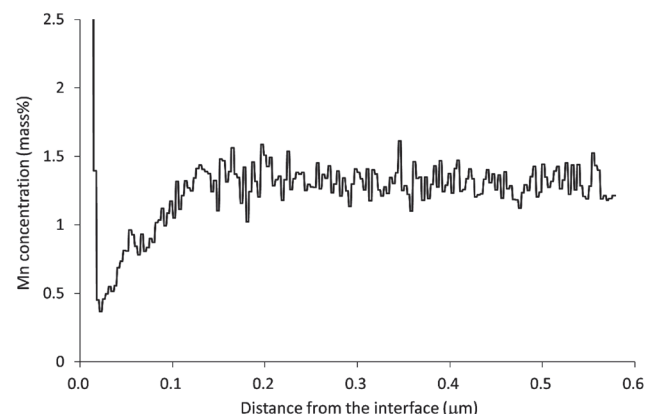


図7 溶接金属中 TiO ／IGF界面のMn濃度分布⁶⁴⁾

び溶接金属における粒内フェライト利用技術について述べた。メカニズムとしては、格子整合性、Mn欠乏層形成による効果が作用していると思われるが、それ以外の因子(熱膨張率差に起因する歪など)については理解がそれほど進んでいない。実用鋼の場合、焼き入れ性、冷却速度、オーステナイト粒径、合金元素の粒界偏析・凝固偏析、結晶方位など、多くの因子が重畳しているため、単純ではない。定量的な理解はこれからである。

工業的にはHAZ、溶接金属では実用化が進んだが、厚鋼板母材への適用はそれほど進んでいない。今後は、TMCPが使えない場合の厚鋼板母材の細粒化技術としての活用が期待される。

参考文献

- 1) 金澤正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研: 鉄と鋼, 61 (1975), 2589.
- 2) 船越督己, 田中智夫, 上田修三, 石川正明, 腰塚典明, 小林邦彦: 鉄と鋼, 63 (1977), 303.
- 3) N.Mori, H.Homma, S.Ohkita and M.Wakabayashi: IIW Doc., IX-1196-81 (1981)
- 4) 森直道, 本間弘之, 若林正邦, 大北茂: 溶接学会誌, 50 (1981), 786.
- 5) 渡辺之, 小嶋敏文: 溶接学会誌, 52 (1983), 223.
- 6) M.Imagunbai, R.Chijiwa, N.Aikawa, M.Nagumo, H.Homma, S.Matsuda and H.Mimura: HSLA Steels'85, (1985), 557.
- 7) H.Homma, S.Ohkita, S.Matsuda and K.Yamamoto: Welding Research Supplement, (1987), 301.
- 8) 大北茂, 若林正邦, 本間弘之, 山本広一, 松田昭一: 製鉄研究, 327 (1987), 9.
- 9) K.Yamamoto, S.Matsuda, T.Haze, R.Chijiwa and H.Mimura: Residual and Unspecified Elements in Steel, ASTM-STP, 1042 (1989), 266.
- 10) Y.Tomita, N.Saito, T.Tsuzuki, Y.Tokunaga and K.Okamoto: ISIJ Int., 34 (1994), 829.
- 11) 大野恭秀, 岡村義弘, 松田昭一, 山本広一, 向井俊夫: 鉄と鋼, 73 (1987), 94.
- 12) A.R.Mills, G.Thewlis and J.A.Whiteman: Mater. Sci. Technol., 3 (1987), 1051.
- 13) G.Thewlis: Mater. Sci. Technol., 10 (1994), 110.
- 14) O.Grong, A.O.Kluken, H.K.Hylund, A.L.Dons and J.Hjelen: Metall. Mater. Trans. A, 26 (1995), 525.
- 15) 中西睦夫, 勝本憲夫, 小溝裕一, 田中聖晃: 溶接学会誌, 52 (1983), 125.
- 16) Nippon Steel Monthly, 170 (2007), 15.
- 17) 植森龍治: ふえらむ, 14 (2009), 34.

- 18) R.Chijiwa, H.Tamehiro, M.Hirai, H.Matsuda and H.Mimura : 7th Int. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 5 (1988), 165.
- 19) 鋼中介在物による組織と材質制御の現状と制御メカニズムの検討, 日本鉄鋼協会編, (1995)
- 20) P.Krauklis, F.J.Barbaro and K.E.Easterling : Proc. Int. Conf. Martensitic Transformations, (1992), 439.
- 21) 間瀬秀里, 栗飯原周二 : まてりあ, 34 (1995), 301.
- 22) 小関敏彦 : 鉄と鋼, 90 (2004), 61.
- 23) R.A.Ricks, P.R.Howell and G.S.Barritte : J. Mater. Sci., 17 (1982) 732.
- 24) G.Thewlis, J.A.Whiteman and D.J.Senogles : Mater. Sci. Technol., 13 (1997), 257.
- 25) 鋼中介在物による変態と組織の制御, 日本鉄鋼協会編, (1998)
- 26) 古原忠 : 鉄と鋼, 89 (2003), 497.
- 27) B.L.Bramfitt : Metall. Trans., 7 (1970), 1987.
- 28) A.R.Mills, G.Thewlis and J.A.Whiteman : Mater. Sci. Technol., 3 (1987), 1051.
- 29) F.Ishikawa, T.Takahashi and T.Ochi : Metall. Mater. Trans. A, 25 (1994), 929.
- 30) T.Furuhara, T.Shinyoshi, G.Miyamoto, J.Yamaguchi, N.Sugita, N.Kimura, N.Takemura and T.Maki : ISIJ Int., 43 (2003), 2028.
- 31) O.Grong, A.O.Kluken, H.K.Nylund, A.L.Dons and J.Hjelen : Metall. Mater. Trans. A, 26 (1995), 525.
- 32) S.Zhang, N.Hattori, M.Enomoto and T.Tarui : ISIJ Int., 36 (1996), 1301.
- 33) Z.Shi, C.Yang, R.Wang, H.Su, F.Chai, J.Chu and Q.Wang : Mater. Sci. Eng. A, 649 (2016), 270.
- 34) Z.Shi, X.Chai, F.Chai, H.Su, T.Pan, Q.Wang, R.Wang and C.Yang : Mater. Lett., 175 (2016), 266.
- 35) J.M.Gregg and H.Bhadeshia : Acta Mater., 45 (1997), 739.
- 36) 河西恵一郎, 李昶準, 南部将一, 井上純哉, 小関敏彦 : 鉄と鋼, 96 (2010), 123.
- 37) 山田知典, 寺崎秀紀, 小溝裕一 : 鉄と鋼, 95 (2009), 65.
- 38) 古原忠 : 鉄と鋼, 89 (2003), 497.
- 39) 宮本吾郎, 古原忠, 牧正志 : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1172.
- 40) 重里元一, 杉山昌章, 栗飯原周二, 植森龍治 : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1173.
- 41) 高田充志, 小溝裕一, 寺崎秀紀, 横田智之, 大井健次, 安田功一 : 溶接学会論文集, 31 (2013), 33.
- 42) 上月渉平, 大井健次, 小溝裕一 : JFE技報, 34 (2014), 50.
- 43) N.Fujiyama and G.Shigesato : Proc. IIW2019, (2019), IX-2673-19.
- 44) H.Nako, H.Hatano, Y.Okazaki, K.Yamashita and M.Otsu : ISIJ Int., 54 (2014), 1690.
- 45) 大橋徹郎, 広本健, 藤井博務, 塗嘉夫, 浅野鋼一 : 鉄と鋼, 62 (1976), 614.
- 46) R.W.Balluffi, A.Brokmann and A.H.King : Acta Metall., 30 (1982), 1453.
- 47) R.C.Ecob and B.Ralph : Acta Metall., 29 (1981), 1037.
- 48) F.Ishikawa, T.Takahashi and T.Ochi : Metall. Mater. Trans. A, 25 (1994), 929.
- 49) T.Koseki, H.Kato, M.Tsutsumi, K.Kasai and J.Inoue : Int. J. Mater. Res., 99 (2008), 347.
- 50) T.Furuhara and H.I.Aaronson : Acta Metall. Mater., 39 (1991), 2857.
- 51) 重里元一, 杉山昌章, 栗飯原周二, 植森龍治, 富田幸男 : 鉄と鋼, 87 (2001), 93.
- 52) J.Takamura and S.Mizoguchi : Proc. 6th Int. Iron and Steel Congress, ISIJ, Tokyo, (1990), 591.
- 53) 山本広一, 長谷川俊永, 高村仁一 : 鉄と鋼, 79(1993), 1169.
- 54) J.M.Gregg and H.K.D.H.Bhadeshia : Acta Metall. Mater., 42 (1994), 3321.
- 55) 大矢好彦, 吉川健, 森田一樹 : 鉄と鋼, 93 (2007), 769.
- 56) 児島明彦, 田中洋一, 栗飯原周二, 植森龍治, 寺田好男, 重里元一 : CAMP-ISIJ, 16 (2003), 1530.
- 57) 重里元一, 杉山昌章, 児島明彦, 篠原康弘, 原卓也, 栗飯原周二, 高濱敬子, 山田淳一 : CAMP-ISIJ, 16 (2003), 1532.
- 58) 重里元一, 杉山昌章, 篠原康浩, 原卓也, 朝日均 : CAMP-ISIJ, 15 (2002), 1138.
- 59) 重里元一 : ふえらむ, 15 (2010), 74.
- 60) K.Fukunaga, R.Chijiwa, Y.Watanabe, A.Kojima, Y.Nagai, N.Mamada, T.Adachi, A.Date, S.Taniguchi, R.Uemori and S.Nishimura : Proceeding of the 29th Int. Conf. OMAE, ASME, NewYork, (2010)
- 61) J.S.Byun, J.H.Shim, Y.W.Cho and D.N.Lee : Acta Mater., 51 (2003), 1593.
- 62) K.Seo, Y.Kim, G.M.Evans, H.J.Kim and C.Lee : Weld World, 59 (2015), 373.
- 63) K.Seo, Y.Kim, H.J.Kim and C.Lee : ISIJ Int., 55 (2015), 1730.
- 64) T.Koseki, H.Kato, M.Tsutsumi, K.Kasai and J.Inoue : Int. J. Mater. Res., 99 (2008), 347.

(2019年12月5日受付)