

二相ステンレス鋼溶接部の組織形成と予測



技術解説

平田 弘 征*

Formation and Prediction of Microstructure in Duplex Stainless Steel Weldment

Key Words : Duplex stainless steel, Welding, Microstructure, Kinetics

1. はじめに

現在のステンレス鋼の幅広い工業的利用は、1910年代に欧州ならびに米国でオーステナイト系ステンレス鋼、マルテンサイト系ステンレス鋼およびフェライト系ステンレス鋼の基礎となる鋼が発明、商業化されたことに端を発している。その後、1930年代になり、欧州にてオーステナイト系ステンレス鋼中にフェライトが存在すると耐食性と強度が向上することが確認されたことをきっかけにオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼、いわゆる二相ステンレス鋼が開発された。それ以降、ステン

レス鋼は使用環境や用途に応じ、耐食性や機械的性質、溶接性などの向上が図られ、多種多様な発展を遂げ、家庭用から産業用に至る幅広い用途に広く用いられている。

これらステンレス鋼を溶接構造物として組み立てる場合に留意すべき点はその金属組織によって異なるが、二相ステンレス鋼はオーステナイトとフェライトの混合組織であるため、溶接部において複雑な組織変化が生じ、溶接欠陥の発生や溶接継手の耐食性や機械的性質の低下が生じる。そのため、健全な溶接構造物を得るためには溶接部において生じる組

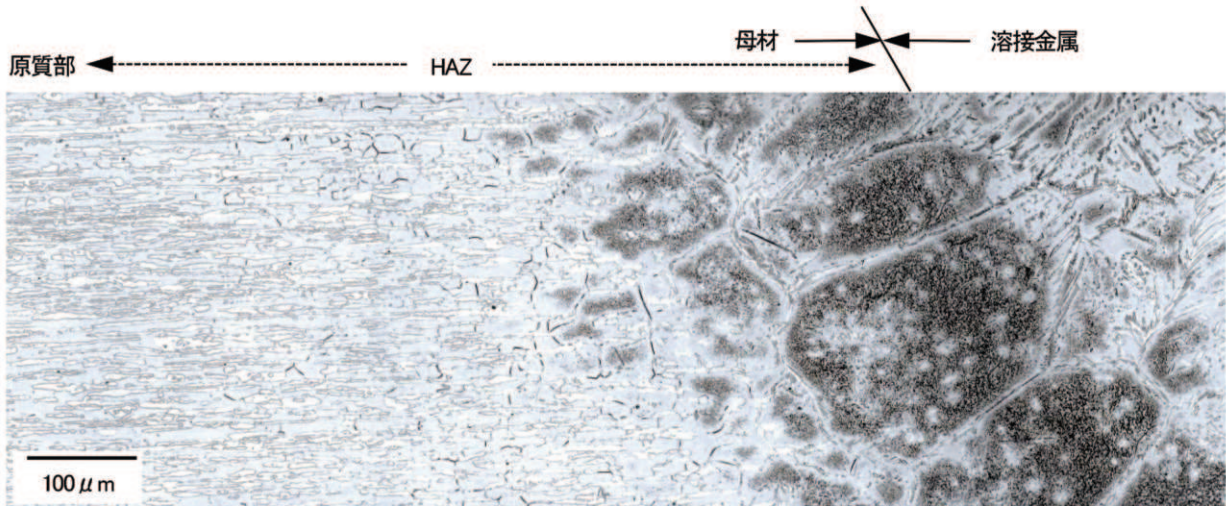


図1 二相ステンレス鋼ビードオンプレート溶接継手のマイクロ組織 (27%Cr-7%Ni-3%Mo-N 鋼)



* Hiroyuki HIRATA

1967年7月生まれ
大阪大学 工学研究科 生産科学専攻
博士後期課程修了 (2002年)
現在、大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授 博士(工学)
専門/溶接冶金
TEL : 06-6879-4495
FAX : 06-6879-4495
E-mail : h-hirata@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

織変化を理解し、それを制御することが重要となる。本稿では、二相ステンレス鋼溶接部における組織変化とそれが溶接継手性能に与える影響について概説するとともに、その予測に関する取り組みを紹介する。

2. 二相ステンレス鋼溶接部における組織変化

二相ステンレス鋼はCr, NiおよびFeを主たる構

成元素とし、その金属組織はフェライト相のマトリックスにオーステナイト相が分散した二相組織となる。さらに、これらの元素に加えて Mo や W, N 等の元素を含有させた様々な鋼が開発されている。これら二相ステンレス鋼は、いずれも使用環境において優れた耐食性や強度特性を得るためにオーステナイト相とフェライト相がおよそ 1:1 となるように化学成分や製造工程の厳密な調整、管理が行われている。

二相ステンレス鋼を溶接した場合、溶接部では組織変化が生じる。一例として、図1に 27%Cr-7%Ni-3%Mo-N 鋼ノンフィラービードオンプレート溶接継手のマイクロ組織を示す。母材（原質部）は、ほぼ同量のフェライト相とオーステナイト相からなる。それに対し、溶融状態から凝固し、室温まで急冷される溶接金属ならびに、溶融線に隣接するフェライト単相となる高温領域まで加熱され急冷される溶接熱影響部（以下 HAZ）では、冷却過程でフェライト相からのオーステナイト相の析出が十分に進行しない。そのため、フェライト相の割合が母材に比べて多くなるとともに、オーステナイト相の存在形態もウィドマンステッテン状へと変化する。それに伴い、これらの領域ではフェライト量が過剰となるため、過飽和の炭素や窒素が冷却過程で炭化物や窒化物として析出しやすくなる。図2は 23%Cr-4%Ni-0.3%Mo-N 鋼の高温 HAZ のフェライト相中に観察された窒化物を一例として示す。また、溶融境界から離れた 700~900°C 近傍に加熱された HAZ では、金属間化合物相である σ 相が析出する場合があります。特に、Cr や Ni, Mo を多量に含有させた鋼において顕在化しやすい。

このような組織変化は溶接継手の使用性能に影響を及ぼす。溶接金属や HAZ のフェライト相率が増加した場合、その割合が 60% を超えると低温じん性が低下する¹⁾。さらに、フェライト相とオーステナイト相のバランスが崩れることに加え、組織変化に伴う Cr, Mo ならびに N の再分配により、フェライト相の耐孔食指数が母材原質部のフェライト相中に比べて低下し、孔食が発生しやすくなる²⁾。また、窒化物や σ 相の析出によっても低温じん性の低下が生じる^{1), 3)}。特に、 σ 相が析出した場合、僅か数%程度の析出でも急激に低温じん性が劣化する。さらに、窒化物が析出した場合、その周囲にクロム欠乏

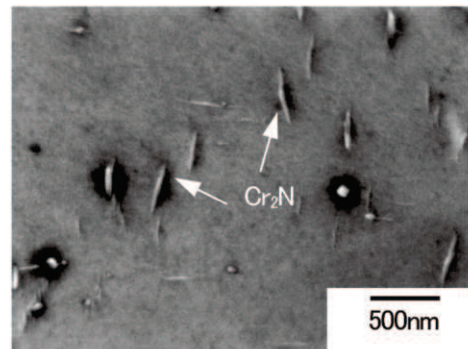


図2 二相ステンレス鋼 HAZ のフェライト相中に析出した窒化物 (23%Cr-4%Ni-0.3%Mo-N 鋼)

域が形成されるため、耐孔食性が低下するとともに、フェライト相とオーステナイト相の境界に析出した場合、粒界腐食の原因⁴⁾となる。同様に、 σ 相が析出すると、耐食性の向上に有効な Cr および Mo が σ 相中に濃化するため、周囲にこれらの元素の欠乏域が形成され、耐孔食性の低下を招く⁵⁾。

上記以外にも、溶接部が使用環境において 300~550°C に一定時間曝されると、フェライト相が高 Cr 相と低 Cr 相に分離するスピノーダル分解や G 相の析出が生じ、いわゆる 475°C 脆化を引き起こす⁶⁾。

以上のように、二相ステンレス鋼の溶接においては、組織変化に伴う溶接継手性能の劣化が生じうる。そのため、母材においてはフェライト相とオーステナイト相のバランスを適正に保つため、オーステナイト相の析出を促進する N を活用⁷⁾する、Mo に代えて W を添加させて σ 相の析出を抑制する⁸⁾など対策が行われている。また、溶接金属においても使用する溶加材の Ni 量を母材に比べて高めるなどの成分設計が行われている。さらに、溶接施工においては溶接入熱範囲やパス間温度の管理が求められるとともに、使用温度に制限が設けられている。

しかしながら、実際の溶接構造物では多層溶接されることから、複数の熱サイクルを受け、複数回の相変態が生じるとともに、析出物の固溶、再析出が起こりうるため、溶接部での組織変化はより複雑となる。そのため、多層溶接における溶接部の組織形成現象を予測し、それを制御しうる溶接条件の選定に活かそうとする試みがなされている。

3. 二相ステンレス鋼溶接部における組織予測

溶接部での組織形成現象の予測には、均熱場における等温過程での材料挙動を解析し、これを非均熱、

非等温過程である溶接時の熱サイクル過程に拡張する手法がとられている。

等温過程, 均熱場での材料挙動の解析には相変態や析出などの進行状況を時間の関数とする速度論が広く用いられる。速度論は, 現象の素過程を考慮せず, 反応全体を一つの速度式を用いて表し, その反応の進行を定量的に評価する手法であり, 鉄鋼材料における変態や析出, 固溶などの諸現象は(1)式もしくは(2)式にそれぞれ示すジョンソン・メール (Johnson-Mehl) 型速度式もしくはオースチン・リケット (Austin-Rickett) 型速度式のいずれかに良く従うことが知られている。

$$y = 1 - \exp\{-(kt)^n\} \quad (1)$$

$$\frac{y}{1-y} = (kt)^n \quad (2)$$

ここで, y : 反応率, t : 時間, k : 変態速度定数, n : 定数である。

(1)および(2)式の両辺の二回対数および一回対数を取ると, それぞれ(3)および(4)式となる。

$$\ln \ln \frac{1}{1-y} = n \ln t + n \ln k \quad (3)$$

$$\ln \frac{y}{1-y} = n \ln t + n \ln k \quad (4)$$

材料中で生じている現象の進行状況を実験により求め, 時間 t と 反応率 y が(3)式と(4)式のいずれにおいて, より良好な直線性を示すかによって, いずれの速度式に適合するかを判断するとともに, 直線の勾配および座標軸との交点から時間指数 n および速度定数 k を求めることができる。なお, 変態速度は温度の影響を受け, 速度定数は一般的に(5)式に示すアレニウス型の式で表される。

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

ここで, T : 温度, Q : 活性化エネルギー, k_0 : 頻度因子 (定数), R : 気体定数である。

さらに, 現象が核生成を伴う場合, 速度定数は核生成の駆動力の効果を表す項を乗じた(6)式の形で表される。

$$k(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{RT}\right) \cdot \exp\left\{-\frac{C}{RT(T_E - T)^2}\right\} \quad (6)$$

ここで, T_E : 変態開始温度, A, B, C : 定数である。一方, 非均熱, 非等温過程である溶接時の熱サイ

クル過程はフィック (Fick) の熱伝導方程式に基づき近似的に求めることができる。そして, 得られた溶接部の温度履歴, 温度場を微小等温過程, 微小等温領域に分割 (時間的, 空間的に離散化) し, この微小区間における反応の進行を等温過程, 均熱場における速度式を用いて計算し, 加算則や増分法を適用して, 溶接熱サイクル過程全体を足し合わせることで溶接部の相変態や析出などの材料挙動を計算し, 組織予測することができる。

このような速度論的手法に基づき, 種々の二相ステンレス鋼多層溶接継手における溶接部のオーステナイト相の分率予測が行われている^{9), 10)}。図3は等温加熱試験により, オーステナイト相の固溶および析出の速度式を実験的に導出し, 熱伝導解析により推定した多層溶接部の熱履歴から増分法により溶接部のオーステナイト相率を予測した結果を示す。図3(a)および(b)より, 各溶接パスにおいて, 溶接金属および溶融線に隣接したHAZではオーステナイト相率が少なく, フェライト相が過剰となるが, 後続の溶接パスの熱サイクルにより, オーステナイト相率が増加する様子が再現されている。さらに, 図3(b)および(c)より, 予測したオーステナイト相率は実際の多層溶接継手において実測したオーステナイト相率と良い対応を示している。さらに, Phase-Field法を用いてオーステナイト相の固溶, 析出の速度式を解析的に導出する方法が試みられ, 補正を加える必要はあるものの解析的手法のみにより, 多層溶接部のオーステナイト相率を予測できる可能性が示されている^{11), 12)}。

同様に, HAZにおける析出物の挙動については, 主に σ 相について検討がなされており, フェライト相とオーステナイト相の比率が異なる溶接部各位置における挙動について検討し, σ 相の析出はオーステナイト相の析出に伴う合金元素の分配が進行し, フェライト相の比率が約50%となった時点から開始し, 初期の相比に関わらず析出速度式は, ほぼ同等であることが示されている¹³⁾。また, 熱力学データに基づく古典的核生成モデルと核の成長の物理モデルを組み合わせることで, 等温保持過程における σ 相の析出速度式を予測する手法が提案されている¹⁴⁾⁻¹⁷⁾。一方, クロム窒化物 (Cr_2N) についても, フェライト単相域からの析出速度式が実験的に導出されている¹⁸⁾。

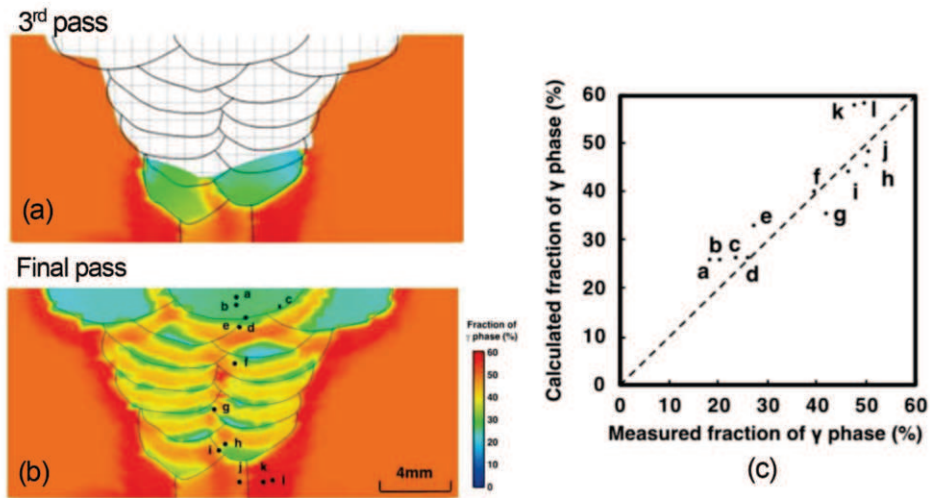


図3 25Cr-7Ni-4Mo-N 二相ステンレス鋼多層溶接継手のオーステナイト相率の予測結果；(a) 3パス目終了後、(b) 最終パス終了後、(c) 予測結果と実験値の比較¹⁴⁾

しかしながら、これら析出物の挙動はオーステナイト相の析出、固溶（フェライト相／オーステナイト相変態）現象とも深く関わっており、多層溶接継手における析出物の予測には、析出物自身の析出、固溶のみならず、フェライト相／オーステナイト相変態を考慮した速度論的取り扱いが必要であり、今後の課題である。

4. おわりに

二相ステンレス鋼の溶接において溶接時に生じる組織変化を理解し、適正な溶接条件を選定することは健全な溶接構造物を得るために欠かすことができない。溶接部の組織予測は、その一助となる技術であり、今後のさらなる検討と高精度化が期待される。

参考文献

- 1) 小川, 神戸製鋼技報, 37-1 (1987), 97
- 2) 例えば, 小川ら, 溶接学会誌, 57-2 (1988), 92
- 3) 例えば, 小溝ら, 溶接学会論文集, 8-2 (1990), 242
- 4) 例えば, 吉岡ら, 溶接学会論文集, 39-3 (2021), 180
- 5) 小川: 二相ステンレス鋼の溶接熱影響部の性

能に及ぼす合金元素の影響と性能改善に関する研究, 大阪大学学位請求論文 (1991)

- 6) 例えば, A.MATEO et al., J. Mater. Sci., 32 (1997), 4533
- 7) 三浦ら, 溶接学会論文集, 7-1 (1989), 94
- 8) 近藤ら, まてりあ, 36-6 (1997), 637
- 9) T.OGURA et al., Mathematical Modelling of Weld Phenomena 12, (2019)12, (2019), 93
- 10) D.Kim et al., Mater. Des., 196 (2020), 109145
- 11) D.Kim et al., Mater. Today Commun., 66 (2021), 101932
- 12) D.Kim et al., J. Adv. Join. Process, 4, 11 (2021), 100067
- 13) S.Yamashita et al., Weld. World, 66 (2022), 351
- 14) 小川ら, 溶接学会論文集, 33-1 (2015), 55
- 15) 小川ら, 溶接学会論文集, 33-1 (2015), 62
- 16) 小薄ら, 溶接学会全国大会講演概要集, 106 (2020), 126
- 17) 山田ら, 溶接学会全国大会講演概要集, 109 (2021), 62
- 18) 向井ら, 溶接学会全国大会講演概要集, 111 (2022), 192