実用講座

溶接高温割れ*

篠崎 賢二**

Hot Cracking in Weld Zone*

by SHINOZAKI Kenji**

キーワード

凝固割れ, 液化割れ, 延性低下割れ, 高温割れ, 高温割れ試験方法, 溶接金属, HAZ, Ni基超合金, Fe基超合金

1. はじめに

溶接金属および熱影響部に起こる溶接割れは, その発生時期から 200~300℃ を境に高温割れと低温割れに分類されている。高温割れは, 結晶粒界で起こり, また, 高温で発生するため, 割れ面は酸化が著しい。一方, 低温割れは粒内, 粒界の区別なく起こり, 表面の酸化は少ない。高温割れは, さらに, 後述するように固相線温度以上と以下で起こる割れに分類される。

高温割れが発生しやすい材料として, 炭素鋼, 低合金鋼, オーステナイト系ステンレス鋼, Al 合金, Ni 基及び Fe 基超合金等が挙げられる。本誌の実用講座で, 小川¹⁾や山中²⁾らによりステンレス鋼における高温割れや電子ビーム溶接時の高温割れに関する解説がすでになされている。そこで, 本稿では主として Ni 基及び Fe 基超合金に関する高温割れに関して, 最近の研究結果を交えて解説する。

2. 高温割れの分類

母材及び溶接金属では図 1 に示すように, 液相線温度 (T_L) と固相線温度 (T_S) の範囲で一般的に, 極めて延性が低くなる。また, 材料によって, さらに低温になるにつれ再び延性が低下する温度領域が存在する。前者の温度領域を凝固脆性温度領域 (BTR: Brittleness Temperature Range), 後者を延性低下温度領域 (DTR: Ductility-dip Temperature Range) と呼ぶ。

Hemsworth³⁾は, 高温割れを表 1 のように分類している。すなわち, BTR で粒界の偏析膜に原因するタイプ I の偏析割れと固相線以下で粒界移動が最も活発化する温度範囲である DTR において新結晶粒界の延性低下により起こるタイプ II の延性低下割れである。前者には, 溶接金属に起こる凝固割れと HAZ または多層溶接金属部の液化割

図1 金属材料の高温延性曲線

表1 高温割れの分類

れ, 後者にも溶接金属と HAZ または多層溶接金属部の延性低下割れがある。

3. 高温割れ発生機構

3.1 凝固割れ

溶接金属が凝固する際, 溶質元素の平衡分配係数 (k_0) が 1 より小さい場合, 最終凝固段階では, 溶質元素の濃化が起こり, 凝固温度が低下する。この段階で液相が膜状に残留すると, 凝固収縮がこの液膜に対する引張ひずみとして作用するため, 凝固割れが発生すると考えられている。すなわち, 凝固割れは, 材料の凝固中に液膜の挙動に起因した低延性特性と溶接中に起こる変形挙動との組み合わせによって発生すると言える。これを原理的

*原稿受付 平成14年7月1日

**正 員 広島大学大学院 Member, Hiroshima University

に示したのが図2である。(a)は溶接ビード表面外観の模式図であり、図中の T_s は凝固完了の固相線とその間に大部分が凝固する公称固相線温度がある。 T_L ~ T_s 間では液相と固相が共存した状態であり、凝固成長する結晶粒を液膜が包んだ状態と考えられる。(b)では、 T_L ~ T_s 間で割れ発生までの限界変位値の変化を示す延性曲線ならびに凝固中の実変位曲線を示している。延性曲線と変位曲線①、②、③の関係からみてもわかるように、曲線③は延性曲線と交差しないので割れは発生せず凝固が完了する。しかし①では温度 T_s で交差するので、この温度で割れが発生し、溶接アークの移動とともに割れは進展する。この割れの発生、進展状況を(c)に示す。また曲線②は割れ発生時の変位曲線の勾配を θ_c とすれば、その $\tan \theta_c$ はこの材料の凝固割れに対する限界変位速度を示すことになり、BTR、 ε_{BTRmin} とともに材料の凝固割れ感受性を示す値となる。BTR及び ε_{BTRmin} の大きさは、それぞれ凝固温度及び残留融液の性状に、また、付加される歪の大きさ及び温度に対する変化量は、溶接条件、継手の拘束条件などに依存する。

図2 凝固割れ発生機構の説明図

3.2 液化割れ

液化割れは、母材もしくは多層溶接金属のHAZ（前層ビードが後層ビードにより再加熱を受けた部分）の結晶粒界で発生し、凝固割れと同様、図2を用いて割れ発生機構を定性的に説明できる。凝固割れと同様に、BTR及び ε_{BTRmin} の大きさは、それぞれ液化した粒界部の凝固温度⁹⁾及び粒界液化部の性状に、また、付加される歪の大きさ及び温度に対する変化量は、溶接条件、継手の拘束条件などに依存する。

粒界液化の原因は、母相中の炭化物や金属間化合物とマトリックスとの共晶融解に起因する場合、不純物元素の粒界偏析に起因する場合、さらに溶接金属からHAZの粒界へ溶質元素が拡散することに起因する場合が考えられている⁹⁾。

3.3 延性低下割れ

延性低下割れは、液化割れと同様に母材もしくは多層溶接金属のHAZの結晶粒界で発生すると言われている。図1を用いれば、延性低下割れは、溶接熱サイクルにより高温部に材料固有の高温延性を越える曲線(2)のような歪が付加される場合に発生すると言え、この割れには、液相は関与していない。DTRが広くかつ ε_{BTRmin} が低くなれば、液化割れにつながって、割れが進展する場合もある。粒界の延性低下には、不純物元素の偏析、析出物及び転位等の挙動が影響を及ぼすと言われている。

4. 高温割れ感受性の評価方法

高温割れは母材および溶接材料の材質、母材の寸法・形状、溶接法、溶接条件、継手・開先形状、拘束状態などの多くの要因によってその発生状況が異なるため、実験室的な割れ試験で実際の施工時に発生する割れを再現するためには適切な割れ試験法を選定する必要がある。

高温割れ試験法には、その目的が材料の評価判定を行うためのものと、実際の溶接構造物を作るための実用試験として用いられるものとに大別される。前者の判定試験は、①母材の割れ感受性の判定、②溶接材料の割れ感受性の判定に分けられる。後者の実用試験は、①溶接施工条件の選定、②事故原因の調査と対策に分けられる。

表2 各種高温割れ試験方法の特徴

負荷方式	試験方法	評価部位	長 所	短 所	参考文献
外部負荷	トランス	溶接金属	・再現性が良好 ・得られるパラメータの物理的意味が明確	・試験装置が必要 ・実施工との対応が不明確	6,9
	ロング	HAZ			
	スポット	HAZ			
	ティガマジグ試験	溶接金属 HAZ	・再現性が良好 ・薄板の割れ感受性が評価できる	・試験装置が必要 ・実施工との対応が不明確	6,9
	ミノ(MISO)法	溶接金属	・再現性が良好 ・凝固脆性温度領域が直接的に得られる	・試験装置が大型	7
	拘束緩和式U型高温割れ試験	溶接金属 HAZ	・簡便 ・変形と力を同時に負荷できる	・割れの測定が面倒 ・試験治具の設計が難しい	8
	高温延性試験	HAZ	・得られるパラメータの物理的意味が明確	・試験装置が大型 ・実施工との対応が不明確	9
自拘束	フィスコ試験	溶接金属	・簡便 ・拘束状態を変化できる	・実施工との対応が不明確	10
	ホールクロフト試験	溶接金属	・簡便 ・変形状態を変化できる	・実施工との対応が不明確	9
	サークルパッチ割れ試験	溶接金属	・簡便	・実施工との対応が不明確	11
	フィッシュバンド試験	多層盛溶接金属	・比較の実施工の肉盛溶接部の割れを再現できる	・割れの測定が面倒	12

表2⁶⁻¹²⁾に比較的良好に使われる高温割れ試験方法、評価部位、長所及び短所を示す。試験方法は、外部負荷方式と自拘束方式に大別される。表に示すように、ほとんどの試験方法は、判定試験用であり、実用試験となっていない。各試験方法の詳細は参考文献を参照していただきたい。

5. Ni 基及び Fe 基超合金の高温割れとその防止策

5.1 凝固割れ

Ni 基及び Fe 基超合金は、母相がγ単相であるため、本質的に溶融溶接部には凝固割れが発生しやすい。凝固割れ感受性に影響を及ぼす不純物元素として P, S, Si 等が挙げられる。さらに Ni 基及び Fe 基超合金の中でも使用頻度の高い In. 625, In. 718, In. 706, Cap. 20Cb-3, Inc. 903, 907, 909 などは Nb を多く含んでいる。Nb は NbC, γ''相 (Ni₃Nb), Laves 相を形成する元素である。このような合金では最終凝固部に γ/NbC や γ/Laves などの共晶が晶出しやすく、これらが低融点であるため凝固割れを起こしやすく、また、C 及び Si は凝固割れを助長する¹³⁻¹⁶⁾。さらに、これらの合金と炭素鋼¹⁷⁾、ステンレス鋼¹⁸⁾との異材溶接では、希釈により凝固割れ感受性が異なる。Dupont らによれば Ni-20%Cr-11%Fe, Fe-20%Cr-33%Ni 系の合金系において、Ni 基超合金では 0.052%, Fe 基超合金では 0.12% 以上の C 濃度にすれば、凝固割れ感受性を低下できるとしている¹⁹⁾。

凝固割れ感受性を予測する方法として、Thermo-Calc を併用した溶接凝固解析を行い、実用 Ni 基合金 8 種類の BTR の計算がなされ、図3²⁰⁾に示すように実測 BTR との比較がなされている。相関係数 0.8 で比較的良好に BTR が予測されている。さらに、1000 種類の仮想の Ni 基超合金について BTR が計算され、BTR と化学組成との間に (1) 式のような関係式が得られ、相関係数 0.94 程度で、BTR が予測されている。

$$BTR_{\gamma} = -49.1 - 5.9Al + 672B + 227C + 0.53Co + 2.24Cr$$

図3 凝固解析により計算した実用Ni基超合金のBTRと実測値したBTRとの比較

$$+ 3.78Fe + 26.0Mn + 7.15Mo + 58.7Nb + 1154P + 755S + 77.6Si + 37.8Ti + 0.98W + 392Zr \cdots \cdots (1)$$

5.2 液化割れ

In. 718 鍛造及び鑄造合金, Inc. 903, Inc. 907, Inc. 909, Inc. 800, Has. XR-II, A286 などの合金で液化割れの発生が指摘されている。

Ni 基及び Fe 基超合金の液化割れ感受性には、MC, M₂₃C₆, M₆C, Laves 相などの生成相と γ 相との組成的液化による粒界液化現象が大きく影響を及ぼすが、形成された液相の凝固温度をさらに低下させる原因として不純物元素、微量元素の影響がある。In. 718 鑄造合金における液化割れ感受性に及ぼす B, C, S, Fe, Nb の影響を系統的に調べた結果、図4²¹⁾に示すように、B がもっとも影響を及ぼすことが指摘されている。さらに、Huang ら²²⁾、中尾ら²³⁾も B が液化割れ感受性を増大させることを指摘している。その他、液化割れ感受性に影響を及ぼす元素として、In. 718 の鑄造合金では、さらに S^{23, 24)}や C²⁵⁾が、また、他の合金では、Si¹⁹⁾や P²⁶⁾などが挙げられている。

多層溶接金属における液化割れ感受性に及ぼす P, Si, S の影響を系統的に調べるため、70%Ni-Cr-Fe三元系合金の Cr 及び Fe 量並びに P, Si, S 量を系統的に変化させ、再加熱溶接金属の液化割れ感受性を評価した結果、Cr 量に関係なく、P, Si, S 量の増加とともに、液化割れ感受性が増加することが明らかとなっている²⁷⁾。総じてこれらの元素は、Ni 基及び Fe 基超合金において平衡分配係数が小さく融点を下げる効果があり、凝固割れ感受性を高める元素であるが、液化割れにも同様に悪影響を及ぼすことが伺える。

液化割れを防止するには、材料学的方法としては、(1) 粒界液化の防止、(2) 粒界液化量の低減、(3) 液化粒界の凝固温度低下の防止などが考えられる。

(1) の対策として、In. 718 鍛造合金では、δ 相を析出させることが提案されている²⁸⁾。これは、加熱過程で δ 相が固溶することにより NbC の周辺に Nb が富化するため、NbC と γ 相との組成的液化が遅れることにより、液化割れ

図4 鑄造 In. 718 の液化割れ感受性の及ぼす各種元素の影響 (図中のデータは30合金の平均値)

が起こりにくくなることを狙った方法である。また、Inc. 903では、生成相をあらかじめ局部溶融させ、生成相及び結晶粒径を局部的に微細にし、粒界液化を防止している²⁹⁾。また、In. 718鋳造合金では、均質化熱処理によりLaves相を固溶させることにより、液化割れ感受性を改善している²⁰⁾。

(2) の対策として、結晶粒径の微細化があげられる。結晶粒径の微細化は、粒界の液相量を少なくするのに有効である。図5³⁰⁾に示すように、In. 718鍛造⁸⁾及び鋳造合金³¹⁾において、結晶粒径の微細化により液化割れ感受性が低下することが明らかにされている。

(3) の対策としては、不純物元素の調整などが考えられる。

液化割れには力学的な因子も大きく影響を及ぼす。しかし、これに関しては、ほとんど定量的な取り組みがなされていない。著者らは、In. 718のレーザ溶接において、図6⁸⁾のようにネールヘッド状の溶け込み形状を領域分けした場合、首下部、領域2で液化割れが発生しやすいことを指摘し、溶接中のこの領域の高温塑性歪をFEMにより解析した。図7³²⁾はIn. 718の溶融境界部がピーク温度に到達した直後の高温主塑性歪量(ϵ_{p1})、これに直交する高温塑性歪量(ϵ_{p2})並びに板厚方向の高温塑性歪量(ϵ_{py})のビード表面から裏面にかけての変化を示している。この図より、領域2において高温塑性歪が多くなることから、力学的にこの領域で割れが発生しやすいこと

図5 鍛造 In. 718 の液化割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響

図6 鍛造 In. 718 のレーザ溶接ビード断面における液化割れ発生位置の分布

を指摘している。また、レーザ溶接入熱を変化させた場合の領域2における高温塑性歪を解析した結果、図8³³⁾に示すように、割れ発生の有無を左右する限界の歪が存在することを明らかにしている。

5.3 延性低下割れ

中尾らは70%Ni-Cr-Fe合金にP、Si及びSを系統的に添加し、再加熱溶接金属の延性低下割れ感受性を検討している^{27, 34)}。そして、延性低下割れにはSが最も悪影響を及ぼし、図9²⁷⁾に示すようにCr量が0及び20%では10%の場合に比して延性低下割れ感受性に及ぼすSの影響が大きいことを明らかにしている。この理由は、Cr量に対する粒界炭化物、Sの粒界偏析、高温延性、硬さの変化を調べ、10%CrでSの粒界偏析が最も少なくなることであると説明している。さらに、Ni-30%Cr-10%Fe系合金の多層溶接金属においても再加熱部で延性低下割れの発生が見られ、この原因の一つとして、Sの粒界偏析が指摘されている^{35, 36)}。

図7 鍛造 In. 718 の溶融境界部がピーク温度に到達した直後の主塑性歪量(ϵ_{p1})、これに直交する塑性歪量(ϵ_{p2})並びに板厚方向の塑性歪量(ϵ_{py})のビード表面から裏面にかけての変化

図8 鍛造 In. 718 の溶融境界部がピーク温度に到達した直後の主塑性歪量(ϵ_{p1})の最大値(図7参照)とレーザ溶接入熱との関係

*: 第1ビードで凝固割れが発生

図9 70 Ni-Cr-Fe 三元系合金の再加熱溶接金属部の延性低下割れ感受性に及ぼすP, Si及びSの影響

6. おわりに

高温割れの発生機構あるは、割れに影響を及ぼす元素に関しては多くの研究がなされており、ある程度明らかになっているが、割れ発生の予測はまだ十分とは言えない。今後は力学的因子も考慮した割れ発生の予測が必要と考えられる。

また、近年、レーザ溶接の発展が著しいが、これの溶接部における高温割れ感受性を評価する適切な試験法がない。電子ビーム溶接も含めた、ビーム溶接部の適切な高温割れ試験法の開発も重要と考えられる。

参考文献

- 小川：溶接割れ防止へのアプローチ (1) - 高温割れ防止のポイント, 本誌, 60-3 (1991), 188-193
- 山中, 清水：電子ビーム溶接の実際 - 割れ防止法 -, 本誌, 63-3 (1994), 146-149
- B. Hemsworth et al.: Metal Const. & British Weld. J., 1-2 (1969), 5
- 中尾, 篠崎, 佐平：割れ発生機構の検討 - Hastelloy XR-II の溶接熱影響部の高温割れにおよぼすボロンの影響 (第1報), 講概, 44 (1989-4), 222-223
- J. C. Lippold, W. A. Baeslack III, I. Varol: Heat-Affected Zone Liquation Cracking in Austenitic and Duplex Stainless Steels, Weld. J., 71-1 (1992), 1 s-14 s
- 日本鉄鋼協会編, 「鉄鋼便覧」, 丸善 (1979), 559-563
- 松田, 中川, 富田, 甲元, 本田：急速引張割れ試験による凝固割れ発生・伝播時の限界ひずみの測定 - 動的直接観察測定法 (MISO 法) による溶接凝固割れ現象の解明 (第2報) -, 本会論文集, 6-3 (1988), 401-405
- 篠崎, 羅, 有吉, 黒木, 白井：拘束緩和式 U 型高温割れ試験による各種合金の高温割れ感受性の比較 - Ni 基耐熱超合金のレーザ溶接性に関する研究 (第2報), 本会論文集, 17-2 (1999), 286-293
- (社)溶接学会 溶接冶金研究委員会編, 「溶接冶金 (レビュー) 上」 (1978), 126-133
- 日本規格協会：JIS Z 3155 「C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法」
- 応和俊雄, 浜崎正信, 「溶接・接合用語活用事典」, 産報出版 (1989), 71
- C. D. Lundin, C. P. D. Chou: Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Weld metals, WRC Bulletin 289, 24
- M. J. Cieslak, T. J. Headley, R. B. Frank: The Welding Metallurgy of Custom Age 625 PLUS Alloy, Weld. J., 68-12 (1989), 473 s-482 s
- M. J. Cieslak: The Welding and Solidification Metallurgy of

- Alloy 625, Weld. J., 70-2 (1991), 49 s-56 s
- 堤, 湊, 小西, 杉野：インコネル系溶接金属の凝固割れ感受性に及ぼすSi, Moの影響, 講概, 37 (1985-10), 184-185
- S.C.Ernst, W.A.Baeslack, J.C.Lippold: Weldability of High-Strength, Low-Expansion Superalloys, Weld. J., 68-10 (1989), 418 s-430 s
- J. N. DuPont: Solidification of an Alloy 625 Weld Overlay, Metallurgical and Materials Transactions A, 27A-11 (1996), 3612-3620
- R. A. Patterson, J. O. Milewski: GTA Weld Cracking - Alloy 625 to 304 L, Weld. J., 64-8 (1985), 227 s-231 s
- J. N. DuPont, C. V. Robino, A. R. Marder: Solidification and Weldability of Nb-Bearing Superalloys, Weld. J., 77-10 (1998), 417 s-431 s
- 篠崎, 黒木, 細見：Ni 基耐熱超合金溶接金属の凝固脆性温度領域に関する化学組成式の導出, 第157回溶接冶金研究委員会資料, WM-1719-99, 1999年
- T. J. Kelly: Elemental Effects on Cast 718 Weldability, Weld. J., 68-2 (1989), 44 s-51 s
- Xiao. Huang, M. C. Chaturvedi, N. L. Richards: Effect of Homogenization Heat Treatment on the Microstructure and Heat-Affected Zone Microfissuring Welded Cast Alloy 718, Metallurgical and Materials Transactions A, 27 A-3 (1996), 785-790
- R. G. Thompson, J. R. Dobbs, E. Mayo: The Effect of Heat Treatment on Microfissuring in Alloy 718, Weld. J., 65-11 (1986), 299 s-304 s
- 西本, 禹, 田中, 白井：HAZ 割れ感受性に及ぼす均質化熱処理の影響, 本会論文集, 17-4 (1999), 543-552
- R. G. Thompson, D. E. Mayo, B. Radhakrishnan: The Relationship between Carbon Content, Microstructure, and Intergranular Liquation Cracking in Cast Nickel Alloy 718, Metallurgical Transactions A, 22 A-2 (1991), 557-567
- J. C. Lippold: An Investigation of Heat-Affected Zone Hot Cracking in Alloy 800, Weld. J., 62-1 (1983), 1 s-11 s
- 中尾, 篠崎, 小川, 櫻井：Ni 基多層盛溶接金属中のマイクロ割れの破面解析, 本会論文集, 11-1 (1993), 102-107
- B. Radhakrishnan, R. G. Thompson: The Effect of Weld Heat-Affected Zone (HAZ) Liquation Kinetics on the Hot Cracking Susceptibility of Alloy 718, Metallurgical Transactions A, 24 A-6 (1993), 1409-1422
- N. L. Richards, R. Nakkalil, M. C. Chaturvedi: The Influence of Electron-Beam Welding Parameters on Heat-Affected Zone Microfissuring in INCOLOY 903, Metallurgical and Materials Transactions A, 25 A-8 (1994), 1733-1745
- R. G. Thompson, J. J. Cassimus, E. Mayo, J. R. Dobbs: The Relationship Between Grain Size and Microfissuring in Alloy 718, Weld. J., 64-4 (1985), 91 s-96 s
- 西本, 禹, 田中, 白井：HAZ 割れ感受性に及ぼす結晶粒径の影響, 本会論文集, 17-4 (1999), 534-542
- 篠崎, 羅：Ni 基耐熱超合金レーザ溶接部の溶接割れ現象とその割れ発生機構, 本誌, 68-7 (1999), 516-520
- 篠崎, 黒木, 吉原, 羅, 白井：溶接熱影響部における温度および高温ひずみ分布の解析 - Ni 基耐熱超合金のレーザ溶接性に関する研究 (第5報) -, 本会論文集, 19-3 (2001), 556-563
- 中尾, 篠崎, 小川, 櫻井：Ni-Cr-Fe 三元系合金の再熱溶接金属の延性低下割れ感受性に及ぼすCr及びSの影響, 本会論文集, 11-1 (1993), 108-113
- 中尾, 篠崎, 山中, 松永：マイクロ割れ感受性に及ぼす不純物元素の影響 - Ni 基超合金の多層盛溶接金属におけるマイクロ割れの研究 (第1報) -, 講概, 54 (1994-4), 70-71
- 中尾, 西本, 才田, 篠崎, 山中, 松永：再熱溶接金属における高温延性低下挙動 - Ni 基超合金の多層盛溶接金属におけるマイクロ割れの研究 (第2報) -, 講概, 56 (1995-4), 182-183