

溶接高温割れ発生現象とその防止法



特集
 接合科学研究所
 産学連携シンポジウム

接合科学研究所 信頼性評価・予測システム学分野 准教授 門井浩太氏
 大阪大学接合科学研究所 井上裕滋氏

1. はじめに

溶接過程では、高温割れがしばしば発生し、長年に渡り問題となっている。高温割れは、割れ発生の時期・温度や場所により、凝固割れ、延性低下割れ、液化割れに分類される。材料の種類、溶接条件、拘束状態など様々な要因が重畳する複雑な現象である。

溶接時の凝固割れは、凝固の最終過程において溶質元素の濃化によって固相線温度（凝固完了温度）が低下することで、液相が膜状に残留し、ここに凝固収縮や拘束力に起因した熱ひずみが負荷されることで発生すると考えられている。そのため、割れ発生の防止には、凝固末期の液相挙動の理解が求められる。凝固過程における液相挙動は、図1に示すように、凝固形態・モード、構成元素の種類に依存した凝固相の形態、化学組成や各元素の分配係数等に依存した不純物元素・溶質元素の凝固偏析、第2相の晶出などが挙げられる。そのため、溶接凝固割れが発生しやすいオーステナイト系ステンレス鋼では、不純物元素として含有する硫黄やリンは分配係数が小さいために、偏析しやすく、最終凝固温度を低下、すなわち凝固割れ感受性（割れの発生しやすさ）を増大させる。そのため、これらの元素の含有量の低減や固溶しやすいフェライト相の晶出によって、割れ感受性の低減が図られてきた。しかし、フ

ェライト相の過剰な生成による割れ感受性の増大、フェライト相生成を伴わない凝固時の割れ感受性などは明らかになっておらず、割れ発生挙動の抜本的な理解には至っていない。

そこで本報告では、溶接時の凝固割れ発生現象の理解とその防止法の構築を目的とし、凝固相の形態と凝固割れ感受性の関係、ならびにオーステナイト単相凝固となる化学組成範囲における凝固割れ感受性の明確化について検討した事例について紹介する。

2. 凝固相の形態と凝固割れ感受性の関係

凝固割れ発生の防止には、Sなどの不純物の固溶解限の大きな δ フェライトを数%晶出させることがしばしば行われるが、30%程度以上のフェライト量で凝固割れ感受性が高くなることが広く知られている [1]。しかし、この検討では、供試材のCやSi等の含有量が高く、フェライト量以外の要因による凝固割れ感受性の変化が生じていた可能性が示唆される。そこでフェライト量やC量が凝固割れ感受性に及ぼす影響を系統的に検討した [2]。

Ni量によってフェライト量を変化させ、CやSiを合わせて変化させた試験片を作製した。これらの試験片に対して、凝固割れ感受性評価にしばしば用いられるトランスバレストレイン試験を実施し、割れ長さや凝固脆性温度領域（BTR）を導出するこ

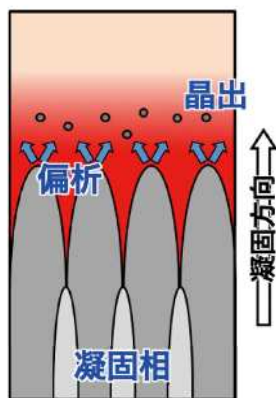


図1 凝固過程の模式図

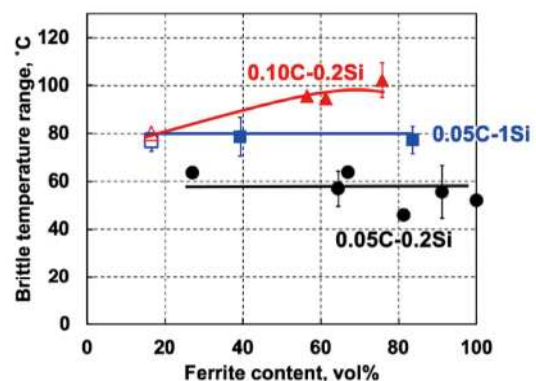


図2 フェライト量とBTRの関係 [2]

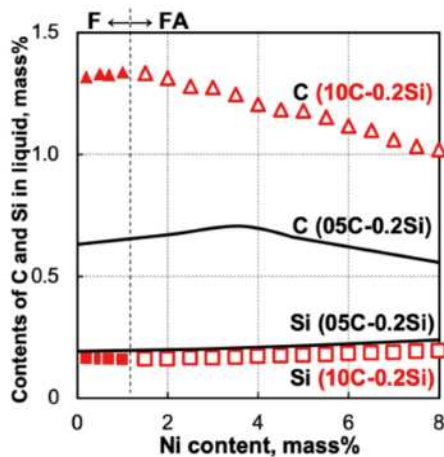


図3 C, Siの凝固偏析に及ぼすNi量の影響 [2]

とで、凝固割れ感受性を評価した。図2にフェライト量とBTRの関係を示す [2]。いずれのC, Si量においても、フェライト量変化に伴うBTR変化はほとんどないことがわかる。加えて、C, Siを含有することによってBTRが増大する。特に、Cの方がその影響は大きい。凝固過程での液相中の元素分配を検討するため、Scheilモデルによる凝固シミュレーションにより、CやSiの凝固偏析に及ぼすNi量の影響を調査した。計算結果を図3に示す [2]。Ni含有に伴う各元素の偏析量の変化は小さいものの、C量の高い試験片の方が、液相中のC濃度が高くなる。Cはフェライト相に対して分配係数が小さく、凝固偏析しやすいことから、凝固末期において液相に濃化し、最終凝固温度を低減させたと考えられる。したがって、凝固割れ感受性はフェライト量には依存せず、C含有量の影響を強く受けることが示唆された。

3. オーステナイト単相域における凝固割れ感受性

ステンレス鋼等を用いた異材溶接では、シェフラー組織図 (図4) を用いて安全域となる化学組成になるように、溶接材料や溶接条件が選択される。特に、高温割れ発生危険領域とされるオーステナイト単相領域やその付近となる組成領域での溶接施工はしばしば避けられている。しかし、異材溶接箇所の増大や使用材料の多様化に伴い、高温割れ発生危険領域となる化学組成範囲での溶接施工が求められている。そこで、オーステナイト単相となる化学組成領域の広範囲に渡った化学組成において、凝固割れ感受性

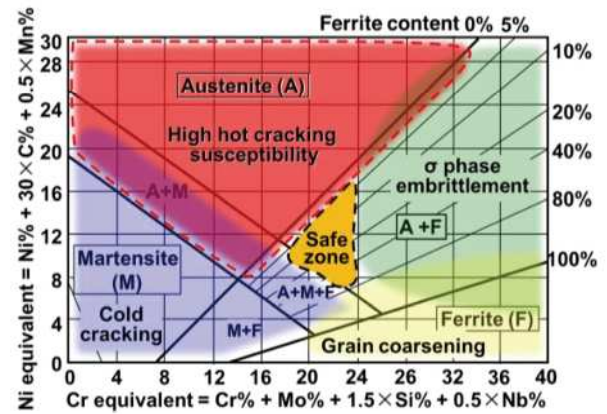


図4 シェフラーの組織図

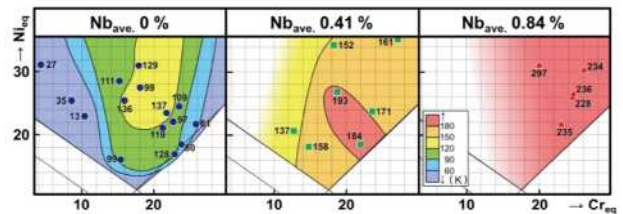


図5 シェフラー組織図中でのBTRの分布 [4]

に対する化学組成の影響を検討した。オーステナイト単相領域内で、Cr当量 ($Cr_{eq} = Cr\% + Mo\% + 1.5 \times Si\% + 0.5Nb\%$), Ni当量 ($Ni_{eq} = Ni\% + 30 \times C\% + 0.5 \times Mn\%$), ならびにNb含有量 (凝固割れ感受性に影響を与えかつ耐食性改善のためにしばしば添加される) を変化させた計27個の試験片に対し、トランスバレストレイン試験を実施し、割れ長さやBTRを求めた。図5にそれぞれのNb量でのBTRをシェフラー組織図内で整理した図を示す [4]。BTRは、Nb 0%では、 Cr_{eq} が16~22, Ni_{eq} が22~30の領域において大きな値を示し、オーステナイト単相領域の辺縁部に向かって低下する。Nb 0.41%では、 Cr_{eq} が19~22, Ni_{eq} が19~27の領域で最も大きな値を示し、Nb 0%に比して高い値を示す。一方、Nb 0.84%では、明瞭な分布傾向は認められないが、Nb 0%やNb 0.41%に比して大きなBTRを示し、最低でも228℃と極めて大きくなる。また、ほぼ同一の Cr_{eq} , Ni_{eq} ($Cr_{eq}=23$, $Ni_{eq}=23$)において、Nbの増大に伴い大きなBTRを示すことがわかる。

全ての試験片の化学組成に対し、Scheilモデルによる凝固シミュレーションにより凝固温度範囲 ΔT を求めたところ、シェフラー組織図内での ΔT と

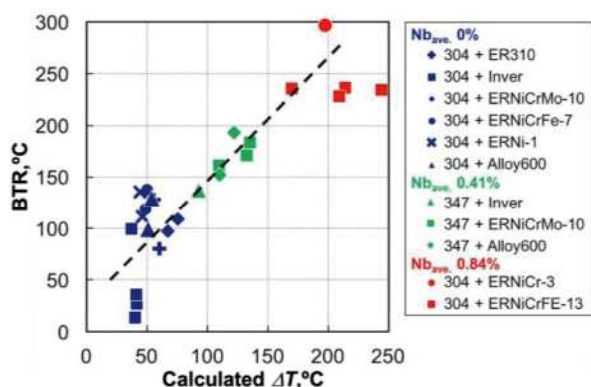


図6 ΔTとBTRの関係 [4]

BTRは同様の分布傾向を示すことがわかった。また、 ΔT とBTRの関係を求めると(図6)、Nb含有量に関わらず、 ΔT とBTRには良好な線形関係(相関係数0.88)が得られる。しかし、 ΔT はBTRに比して約50°C低い値を示す[4]。これは、凝固偏析や第二相の晶出等によるものと考えられる。

以上より、オーステナイト単相領域での凝固割れ感受性は、領域内において割れ感受性の高い範囲が存在し、Nb含有量によって割れ感受性の分布が変化しBTRが増大する。また、含有する元素の組合せや量により凝固割れ感受性の高くなる Cr_{eq} や Ni_{eq} の値が決定されることが示唆された。図5に示した割れ感受性分布図の導出や ΔT の算出(図6)によって、実溶接施工での材料選択や溶接条件を選択することで、凝固割れ発生の防止、割れ感受性の

低減が可能になると示唆される。

4. まとめ

凝固割れ感受性低減を目的とし、凝固相の形態と凝固割れ感受性の関係、ならびにオーステナイト単相域における凝固割れ感受性の明確化について検討した事例について紹介した。しかし、現在においても、溶接過程で生ずる凝固現象は十分に理解されておらず、抜本的な凝固割れ発生防止方法の確立には至っていない。そのため、実験やシミュレーションにより、凝固現象や割れ発生現象の理解、種々の影響因子の明確化など、基礎的知見を積み重ねていくことが重要である。今後も溶接凝固をはじめとした冶金現象に引き続き取り組み、溶接冶金現象の一貫した理解、割れ等の欠陥発生防止や溶接部特性向上のための予測・制御法の確立を目指していく。

参考文献

- [1] V. Kujanpaa, N. Suutala, T. Takalo, T. Moisio: *Welding Research Inter.*, 9 (1979) pp. 55-75.
- [2] S. Ueno, K. Kadoi, S. Tokita, H. Inoue: *Proc. of Visual-JW 2019*, (2049) pp. 273-274.
- [3] A.L. Schaeffler: *Metal Progress*, 56 (1949), p. 680B.
- [4] K. Kadoi, K. Shinozaki: *Metall. Mater. Trans. A*, 48 (2017) pp. 5860-5869.

