

=フェライト系ステンレス鋼溶接部の溶接割れとその事例 (4 の 1) =

前話ではフェライト系ステンレス鋼溶接部、溶接金属の粒界割れについて、粗大化し長く伸びたフェライトの結晶粒界で発生する割れに関し、マッピング分析の手法により割れ部先端の粒界近傍を探索し Nb の偏析を見出した。その結果に基づき Nb 量 (%) を抑制した溶接ワイヤを適用し、**粒界ぜい化割れ**を防止することが可能となった事例を紹介させて頂いた。

当時、エキゾーストマニホールド (以下エキマニという) の溶接工程において、エキマニ本体 (SUS442M t 1.5) にセンサーボス (SUS410L) の円周溶接部位に溶接金属凝固割れが見つかった。

当時、フェライト系ステンレス鋼溶接部の割れについては経験に乏しかったため、研究所の力を借りながら種々検討を行い、溶接過程で発生する溶接部割れについて種々知見を得ることができた。

現在市販され、あるいは web 等で公開されている技術図書、資料を参考にして、「凝固割れに関する基礎的な考え方」を最初に整理し以下に記述し、**次話**にて上記の凝固割れ事例について概要を説明します。

1) ステンレス鋼溶接部の凝固割れに関する基礎的な考え方と発生機構 (引用文献等は末尾に記します。)

ア) 凝固割れ*1)

図 201-01 に凝固割れの発生状況を模式的に記す。凝固割れは、凝固の過程で成長してきた柱状晶の境界面において残留する液相が、溶接金属の凝固完了直前において凝固収縮や熱収縮により加わる歪みに抵抗しきれずに開口することで発生する。したがって、残存する液相の融点や量、固相とのぬれ性などが凝固割れに大きく影響する。高温割れといえ、一般にこの割れを意味することが多い。

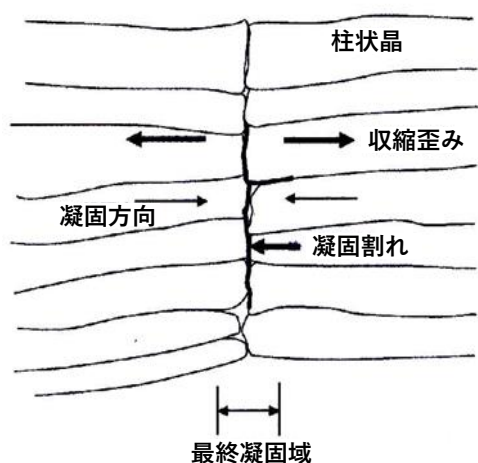
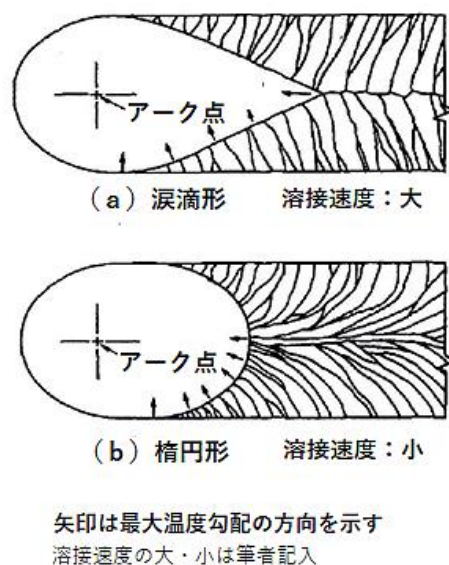


図201-01 溶接高温割れの模式図 (凝固割れ)



矢印は最大温度勾配の方向を示す
溶接速度の大・小は筆者記入

図201-02 溶融池形状と柱状晶形状との関係 (Savage ら)

イ) 溶接金属の凝固現象

アーク熱により溶融状態にある溶接金属は、熱源であるアークが移動して遠ざかるにつれ、いわゆる溶融境界部から凝固を始める。一般に結晶はその容易成長方向が、温度勾配が最大となる方向と一致すると成長を続けやすい。柱状晶の発達状況は、[図 202-02\(a\), \(b\)](#)に示すように溶融池の形状に大きく依存する。溶接速度を早くすると、**涙滴形**となり易いことが知られている。

楕円形の溶融池の方が柱状晶の連続的な成長には都合が悪く、最終凝固位置における偏析を軽減する傾向があるので、凝固割れが生じにくい。楕円形溶融池を得るためには、溶接入熱が過度にならぬ程度に溶接速度を遅くするとよい。

ウ) 溶接過程で発生する凝固割れとその機構*2)

凝固割れは材料の凝固過程の終了期に近い、主として結晶粒界に膜状の液相が存在する段階において、凝固収縮や熱収縮により加わる歪が材料の変形能以上になった場合に発生する。

凝固割れの発生機構を、[図 201-03](#)に示す模式図を用いて説明する。

[図 202-03 \(a\)](#)は溶接金属の表面を示す。凝固は**液相線温度 T L**で開始し、**公称固相線温度 T S**で大部分終了する。実際は合金元素の凝固偏析や不純物元素の偏析が生ずるため、最終凝固域である結晶粒界は、公称固相線 T S では完全に凝固せず、**完全凝固終了温度 T C**で凝固を完了する。

また[同図 \(b\)](#)は、溶接部の材料の変形能を表わす曲線と溶接部に要求される変位を示している。材料の変形能は、公称固相線温度 T L 直下からと完全凝固終了温度 T C の温度範囲で低下する。この温度範囲を**凝固ぜい性温度域 (B T R ; Brittle Temperature Range)**と呼ぶ。

溶接の冷却過程で溶接金属に付加される変位を示す変位曲線のうち、**曲線①**は変形能曲線と交差せず、この場合は割れが発生しない。

変位曲線②は変形能曲線と接しており、割れ発生の限界変位曲線となる。**変位曲線③**では変形能曲線と交差しており、この交点の温度で材料の変形能が外部から要求される変位に追従できなくなり、割れが発生し、熱源の移動にともない割れが低温側へ進展する。

また[同図 \(c\)](#) *3)は、液相線温度 T L から公称固相線温度 T S を経由して完全凝固終了温度 T C に至る固液共存域を**多液量域**、**液膜域**および**液滴域**と区分し、残留融液と固相の状態を分類し凝固割れへの影響について理解を助けている。

凝固ぜい性温度域 (B T R)は溶融池後方の固液共存域でありぜい化特性を示す。なぜならば、**凝固収縮と周辺部の拘束によって生ずる引張応力が溶融池後端の固液共存域に作用するためである。**

材料の凝固割れ感受性*2)は、[図 201-03](#)に示すその発生機構からわかるように、凝固ぜい性温度域が広く、かつ、割れ発生の限界変位曲線の傾きが小さいほど大きくなる。

合金元素では、微量の添加で材料の融点を大幅に低下させる元素が凝固ぜい性温度域を増加させ、割れ感受性を増大させる。

ステンレス鋼の凝固割れに関しては、**P、S および B 等の不純物元素がその感受性を助長することが良く知られている。** **燐 P**や**硫黄 S**は低融点の液膜状共晶を形成する。

例 ; Fe S + Fe 共晶 ; 9 8 8 °C Fe3 P + Fe 共晶 ; 1 0 5 0 °C 参考 ; Fe の融点 ; 1 5 3 4 °C

さらに **S** に富んだ融液は**濡れ性が高い**といわれており、固相と柱状晶間の残留融液との濡れ性が良くなると、融液が膜状に拡がって**凝固割れ感受性を高める。**

以上、関係技術図書・論文・資料等より、溶融池後方の**凝固ぜい化域**とその考え方、それらの**凝固割れ感受性**に関し引用し列記した。

同じステンレス鋼と言ってもオーステナイト系ステンレス鋼の高温割れ、凝固割れ感受性に関する記述は多く、参考までに溶学誌の連載講義*1) より以下に引用する。

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接の際に発生する高温割れは、凝固過程においてP、S、Si、Nbなどの低融点化合物がオーステナイト粒界や柱状晶粒界に偏析するために生ずる。したがって、SUS310のような完全オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属にこれら元素が大量に存在すると高温割れ、特に凝固割れが発生しやすくなる。完全オーステナイト組織の溶接金属にデルタフェライトが約5%存在すると凝固割れが発生しなくなることが経験的に知られている。・・・凝固割れ防止にフェライトが有効な理由として次の3点が挙げられている。

- ①フェライトの方がオーステナイトに比べ、S、Pなどの有害元素の固溶度が高いので**偏析**が軽減される。
- ②オーステナイト単相に比べフェライトが存在すると、液体の**濡れ性**が悪くなるので液膜が広がりにくくなり割れが発生しにくい。
- ③フェライト／オーステナイト**界面が複雑な形状**のまま凝固してオーステナイト粒界となるので割れが伝播しにくくなる。

なお、SUS347系溶接金属の割れ感受性が高いのは、Nbの影響によるものと考えられている。

2) フェライト系ステンレス鋼溶接部の凝固割れの各要因と考え方

上述のようにオーステナイト系に比べフェライト系は粒界からの凝固割れについて偏析、濡れ性などの諸点につき有利な面が強調されている。しかし、フェライト系の弱点の第1は粗粒化による粒界のぜい化を生じやすいことであり、第2はP、S、Cが、特にBTRを拡大させる溶質元素であり、このうちPとSは、最終凝固域でFeやNiと低融点化合物を形成しBTRを一層拡大させる。さらにNbなどの成分元素も高温強度維持の観点から必要とするが粒界に残留しやすくぜい化につながりやすい。

これらの背景をふまえ、本題のフェライト系ステンレス鋼溶接部の溶接過程で発生する高温割れ(凝固割れ)防止について着目すべき諸点を筆者としては以下に推定し列記する。

- ① **溶接ビード外観とクレータ部形状**・・・涙滴形になっていないか。突合せ凝固になっていないか。
- ② **溶接入熱量は適正か**・・・過大・入熱になっていないか。粗粒化の大きな要因。
- ③ **橋渡し溶接**・・・ギャップなし溶接にできないか
- ④ **溶接金属(ワイヤ、母材、ガスおよび溶接条件)** 偏析しやすい元素、割れ発生しやすい元素に着目
母材要因はチェックしているか。Ar+O₂系ガスの適用
- ⑤ **溶接ワイヤの適正化**・・・Cr量アップ、C量ダウンなど Nb量のチェック
- ⑥ **固液共存域に作用する力の推定**・・・凝固収縮、熱収縮と周辺部の拘束による引張応力、溶接部の拘束、当て金&冷却方式など過度な冷却速度は好ましくない。残留応力などへの考慮必要
- ⑦ **シールドガスの完璧化**・・・N量ダウンなど。またバックガスの有無考慮

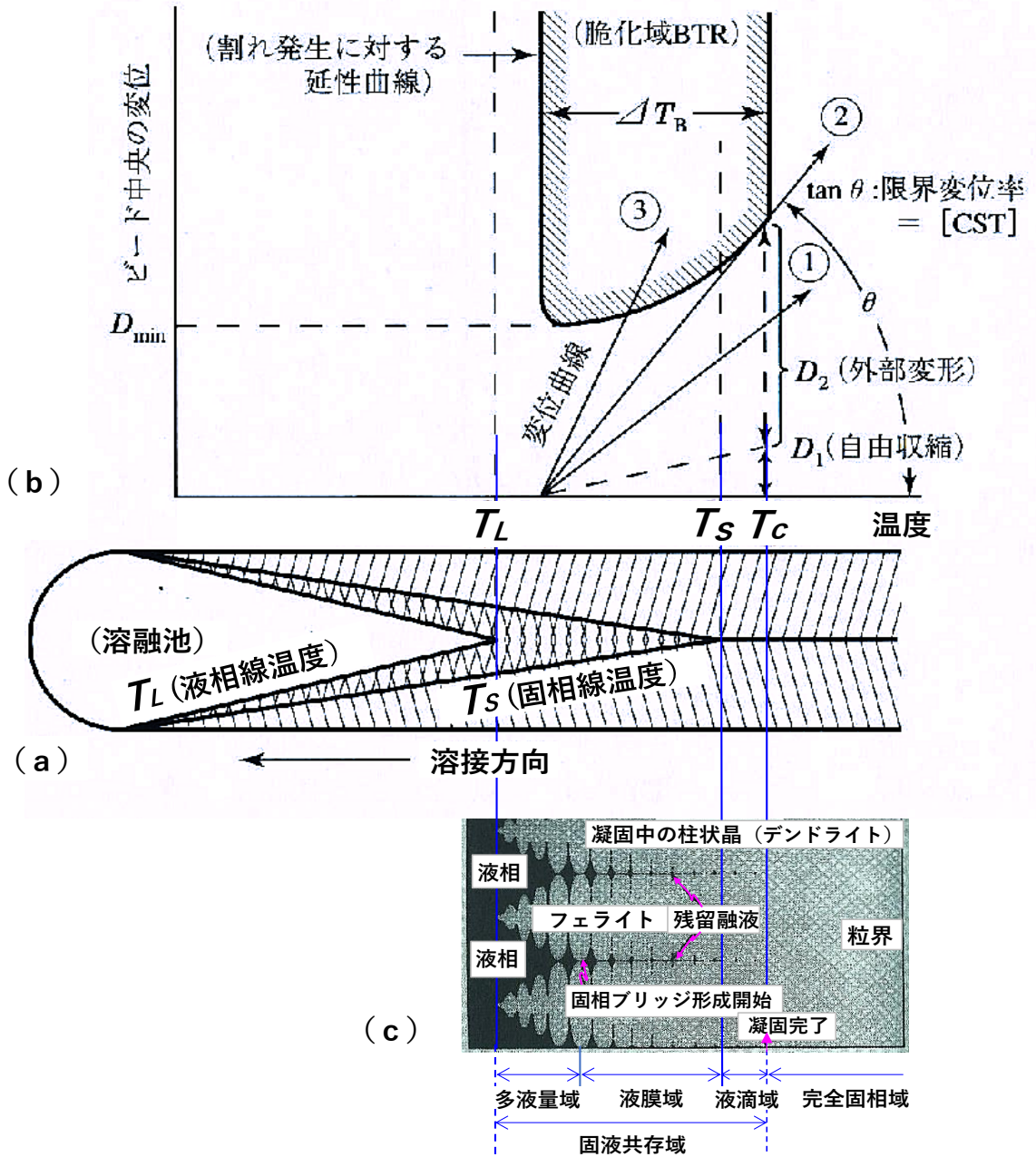


図201-01 ステンレス鋼溶接部の凝固割れ発生機構の説明図

次話では、本話において冒頭に記したエキマニ本体 (SUS442M t1.5) にセンサーボス(SUS410L)の円周溶接部位に生じた溶接金属凝固割れとその対策事例について紹介します。

参考図書、文献；

- * 1) 溶学誌；連載講義 本間弘之氏 溶接高温割れ (昭和 63 年 5 月) p496~499
- * 2) 産報出版；溶接・接合選書 11 ステンレス鋼の溶接 西本和俊ほか著 p84~86
- * 3) Web より；溶接欠陥とその発生機構；大阪大学 接合科学研究所 中田一博氏 平成 24 年 11 月

以上。