

特集：金属の割れ、ぜい化と水素の動き

低温割れとその評価方法および対策

株式会社神戸製鋼所
石田 雅俊

1. はじめに

近年、構造物の大型化に伴い、使用鋼板の板厚の増大、高張力鋼の適用拡大が進んでいる。一方で、板厚の増大・高張力鋼の適用は溶接金属あるいは溶接熱影響部（HAZ）の低温割れに対する感受性を著しく高めることから、溶接施工上の熱管理は非常に重要である。本稿では、低温割れを評価する試験方法を紹介するとともに、溶接プロセスにより低温割れ感受性を緩和するアプローチについても紹介する。

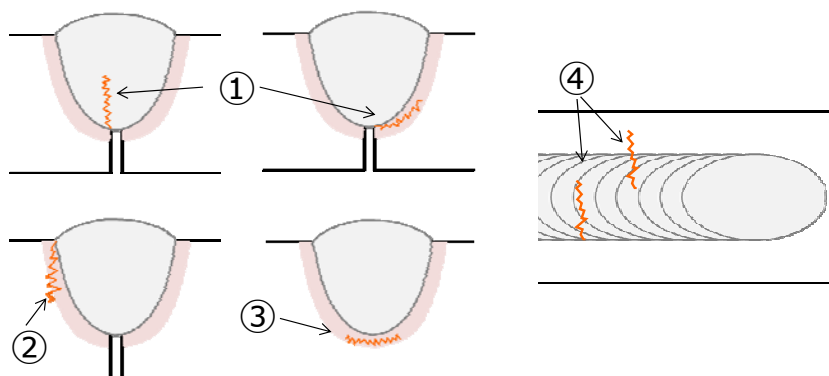
2. 低温割れとは¹⁾

低温割れは、溶接後に溶接金属や HAZ が約 300℃以下に温度低下した後に発生する。溶接終了後、数日経過して割れが発生する場合もあり、遅れ割れとも呼ばれている。低温割れの詳細については、

【WE-COM マガジン第 11 号 浪速博士の溶接がってん】「低温割れって何?の巻」

(http://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_11/index.jsp) をご参照頂きたい。

低温割れには発生位置、形態により様々な呼称がある。代表的なものを図 1 に示す。



呼称	発生位置*	定義 (JIS Z 3001による)
①ルート割れ	W, H	溶接のルートの切欠きによる応力集中部分から生じる割れ
②止端割れ	H	溶接の止端から発生する割れ
③ビード下割れ	H	ビードの下側に発生する割れ
④ビード横割れ	W, H, B	溶接線に対して直角方向に生じる割れ

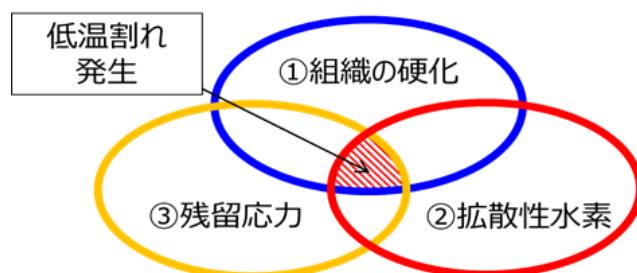
*W: 溶接金属, H: 熱影響部(HAZ), B: 母材

図 1 低温割れの代表例

低温割れが発生するかどうかは、①溶接部の硬化組織 ②溶接部の拡散性水素量 ③拘束応力 の3つの要因によって決まる。即ち、溶接によって HAZ または溶接金属に生じた硬くてもろい組織に、同じく溶接で導入された水素が拡散・集積し、引張残留応力によって水素ぜい性破壊を起こす、というものである。

よって低温割れの防止には、上記3つの要因のうちの少なくとも1つの影響を除去または低減することが有効である。表1に一般的な低温割れ防止対策を示す。

表1 一般的な低温割れ防止対策



低温割れの3要素	対策
①組織の硬化防止	<ul style="list-style-type: none"> 炭素当量 (C_{eq}) や割れ感受性組成 (P_{CM}) の低い鋼材、溶接材料の選定 小入熱溶接の制限 熱管理 (予熱・直後熱の実施、パス間温度管理)
②拡散性水素の低減	<ul style="list-style-type: none"> 拡散性水素量の少ない溶接材料、溶接施工法の採用 開先表面の水分、油、錆、塗料の除去 熱管理 (予熱・直後熱の実施、パス間温度管理)
③残留応力の低減 (応力集中の防止)	<ul style="list-style-type: none"> 継手形状および開先形状の検討 溶接順序の適正化 板厚の低減 応力除去焼鈍の検討 止端部の平滑化

低温割れを防止するための最も一般的な手法は、熱管理 (予熱・直後熱の実施およびパス間温度管理) である。それは表1に示した通り、予熱・パス間温度の適正化は拡散性水素量の減少 (溶接部の水素の拡散速度を高め、冷却過程での水素放出を促進する) とともに硬化防止 (過大な冷却速度を避けることで、冷却過程でのマルテンサイトなどの硬化組織発生を抑制する) にも効果的だからである。よって古くから、適切な熱管理条件の選定のため、または現実的な熱管理条件で低温割れを起こしにくい鋼材・溶接材料開発のため、様々な低温割れ評価方法が考案されてきた。次項では、その代表的な試験方法を紹介する。

3. 低温割れ試験方法²⁾

2016年に日本溶接協会 溶接材料部会 調査第4分科会が国内のファブリケータ、研究機関、材料メーカーなどを対象に実施した「溶接関連割れ試験方法の使用状況」に関するアンケート結果³⁾より、使用頻度の高かった低温割れ試験方法を表2にまとめる。利用率の高いものを見ると JIS 規格化された試験が多いが、窓形拘束溶接割れ試験のように公的規格化されていない試験方法も多く使用されている。以下、利用率の高いものに絞って概説する。詳細な試験方法については各該当規格をご参照頂きたい。

表 2 低温割れ試験方法に関するアンケート結果

試験方法	JIS	積層	利用件数*1
y 形溶接割れ試験	Z 3158	単層	52
U形溶接割れ試験	Z 3157	単層	20
窓形拘束溶接割れ試験	-	多層*2	10
すみ肉溶接継手試験	-	単層*3	8
重ね継手溶接割れ試験	Z 3154	単層	4
H形拘束溶接割れ試験	Z 3159	多層	4
その他	-	-	8

*1: 全161件の内、低温割れ、または低温割れ+高温割れの両方を評価する目的での利用件数

*2: サブマージアーク溶接の1パス割れ試験（U形溶接割れ試験の代替）として使用される場合もある

*3: 日本海事協会 鋼船規則 M編に規定されている方法の場合

3.1 y 形溶接割れ試験（JIS Z 3158）⁴⁾

図 3 に示すように、斜め y 開先を設けた拘束ビード付きの試験板に下向姿勢でルート部に 1 層 1 パス溶接を行い、溶接後 48 時間経過後に割れの観察を行う。割れの評価は、試験溶接部の 5 断面からマクロ試験片を採取し、必要に応じて研磨・腐食を行った後、断面割れ率およびルート割れ率を算出する。図 4 は割れが確認された断面の一例である。一般的にこの試験方法は、あらかじめ試験板を何条件かで予熱しておき、割れが発生しない最低の予熱温度を実験的に決定することで材料の割れ感受性を相対評価する目的で使用されることが多い。

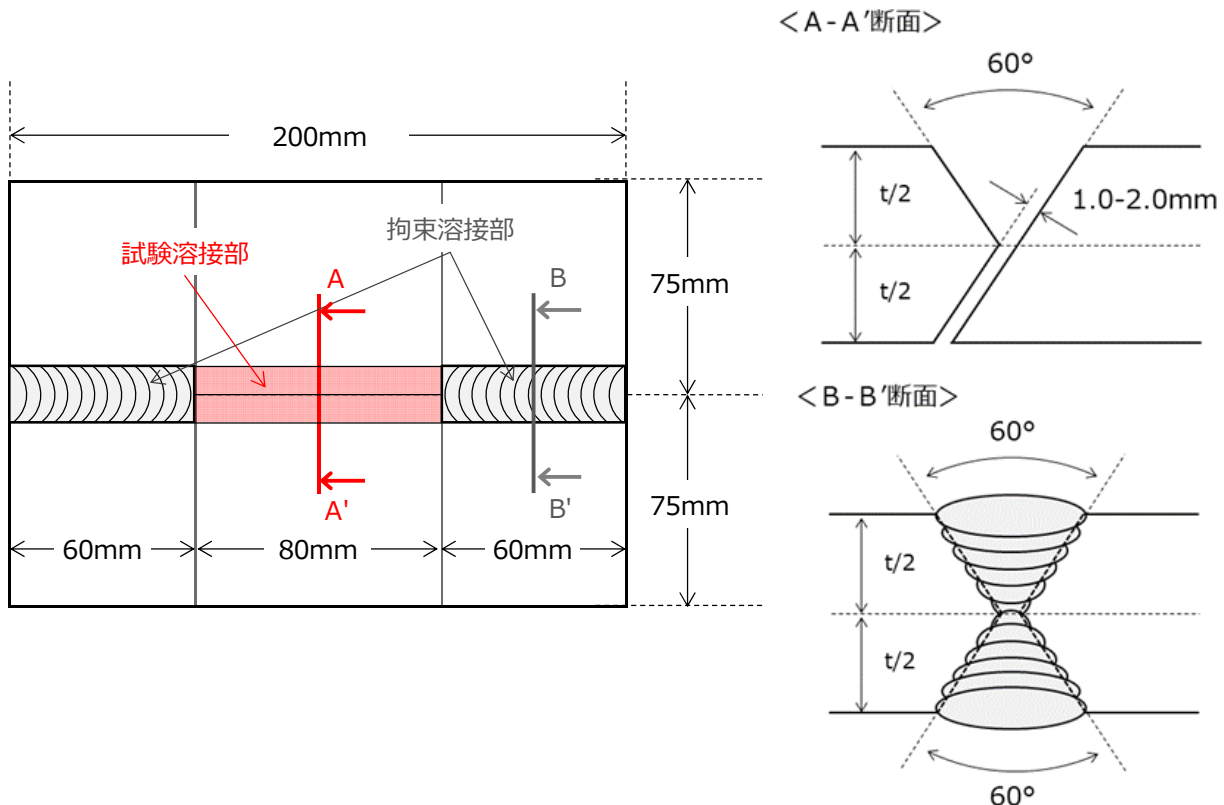


図 3 y 形溶接割れ試験の試験板形状

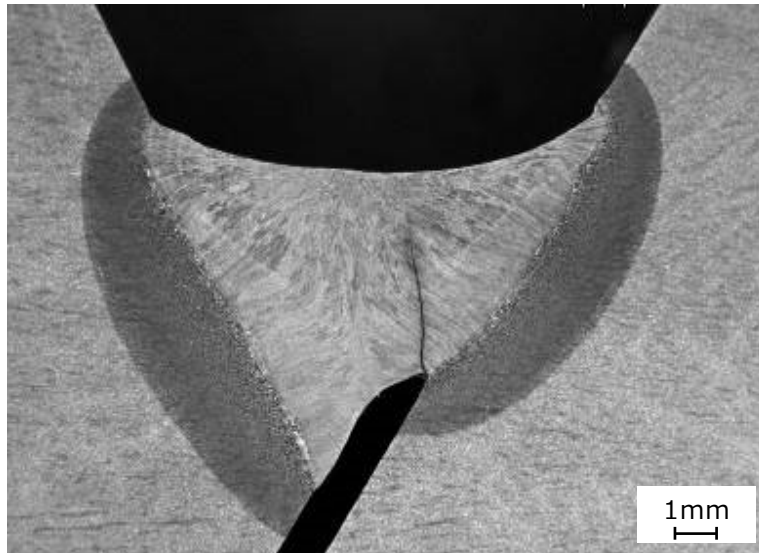


図4 y形溶接割れ試験の割れ発生部における断面マクロ写真（一例）

なお、この試験方法は旧国鉄の鉄道技術研究所により考案された、いわゆる「鉄研式割れ試験」（スリット形溶接割れ試験：JIS Z 3151、現在は廃止済み）を発展させたものとされている。初期には溶接金属の高温割れの調査目的で使用されていたが、高張力鋼の適用が進むにつれ主に鋼材の溶接性（低温割れ感受性）を調査する目的で使用されるようになった経緯がある。

3.2 U形溶接割れ試験（JIS Z 3157）⁵⁾

図5に示すように、終始端にドリル穴付きのU開先を設けた試験板に、下向姿勢でルート部に1層1パス溶接を行い、溶接後48時間経過後に割れの観察を行う。割れの評価は、通常、磁粉探傷試験（MT）または浸透探傷試験（PT）により表面割れ率を算出した後、y形溶接割れ試験同様に5断面で断面割れ率およびルート割れ率を算出する（5断面の検査に代えて、割れ破面を着色後、試験体を破断させて評価する方法もJISに規定されている）。図6は割れが確認された断面の一例である。開先溶接の中で最も応力が集中する初層溶接を模擬した試験としてy形溶接割れ試験が鋼材・溶接金属を含めた溶接部全体の割れ評価に用いられるのに対し、U形溶接割れ試験は溶接金属単体の割れ感受性を調査する目的で使用されることが多い。

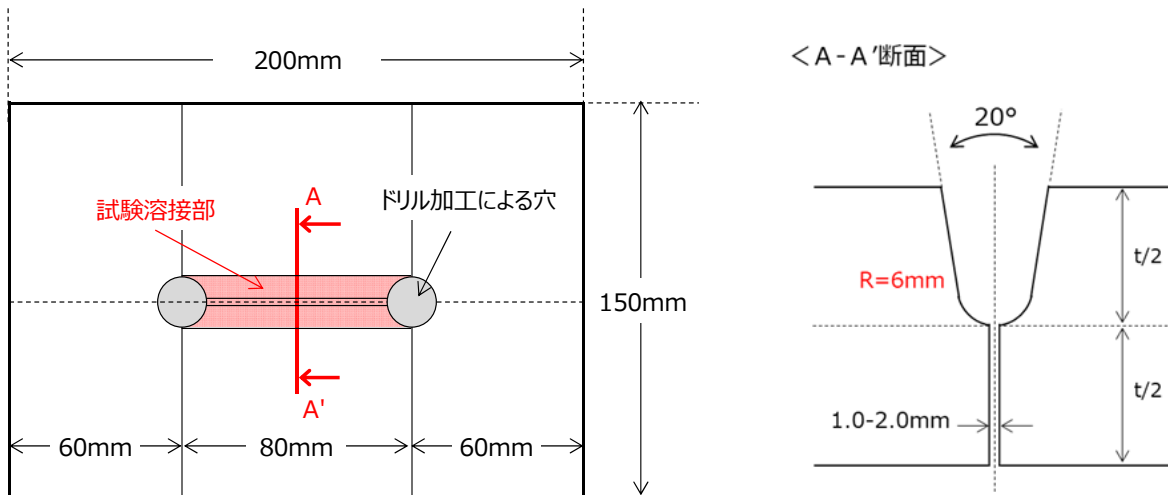


図5 U形溶接割れ試験の試験板形状

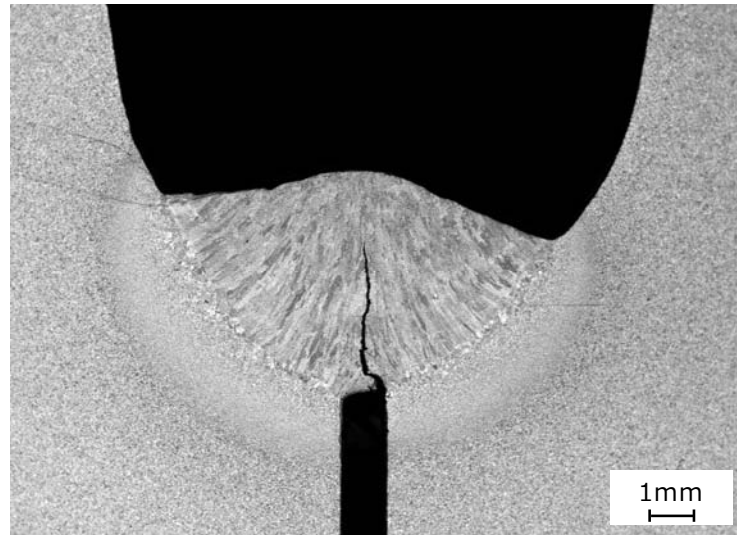


図 6 U 形溶接割れ試験の割れ発生部における断面マクロ写真（一例）

なお、この試験方法は AWS B4.0 にも規定されている Lehigh Restraint Test（日本での通称：リーハイ割れ試験）を一部改良したものである。元となったリーハイ割れ試験が試験板に設けたスリット長さの変更により拘束度合いを変化させて行うのに対し、こちらは y 形溶接割れ試験同様、予熱温度を変化させて行うことで割れ感受性を相対評価するという違いがある。

3.3 窓形拘束溶接割れ試験（該当 JIS 無し）⁶⁾

米国の US スチール社製 HT80 級（780MPa 級）高張力鋼の低温割れ評価方法として Arnold が開発したもの（試験板形状を図 7 に示す）が始まりとされるが、2020 年現在、国内外を含めて公的試験規格が存在しない。従って、実施工の条件に応じて試験板形状などを変化させて試験に使用されているのが実態である。図 8 に試験板形状の一例を示す。任意の開先形状の試験板を、厚板で作った巨大な拘束板の窓形開口部に拘束溶接し、実際の施工条件に準じた溶接（通常、所定のパス間温度を維持したまま）を行い、数日間放置後に拘束板から取り外して割れの検出を行う。割れの検査は、例えば試験体表面の割れを磁粉探傷試験（MT）、試験体内部の割れを超音波探傷試験（UT）で調査した後、ごく微小な横割れを確認する必要がある場合は、深さ方向に 1~2mm ピッチで研削し、都度 MT により割れの有無を調査する、といった方法で行う。主に溶接継手の横割れ感受性の調査に適用される。

y 形溶接割れ試験・U 形溶接割れ試験が 1 層 1 パスでの評価方法であるのに対し、本試験方法は多層盛りで行うのが一般的である（図 9：y 形溶接割れ試験および U 形溶接割れ試験に適さないサブマージアーク溶接に対する初層の割れ試験として採用されることもある）。試験体製作に多大な労力を要する一方、より実施工に近い横割れ防止条件が求められることが特徴である。

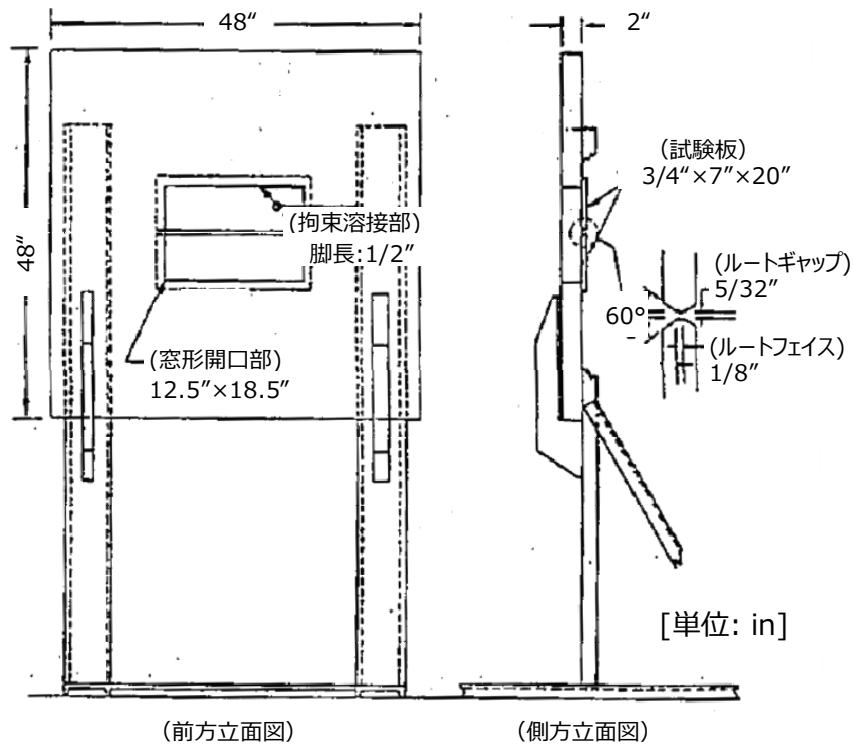
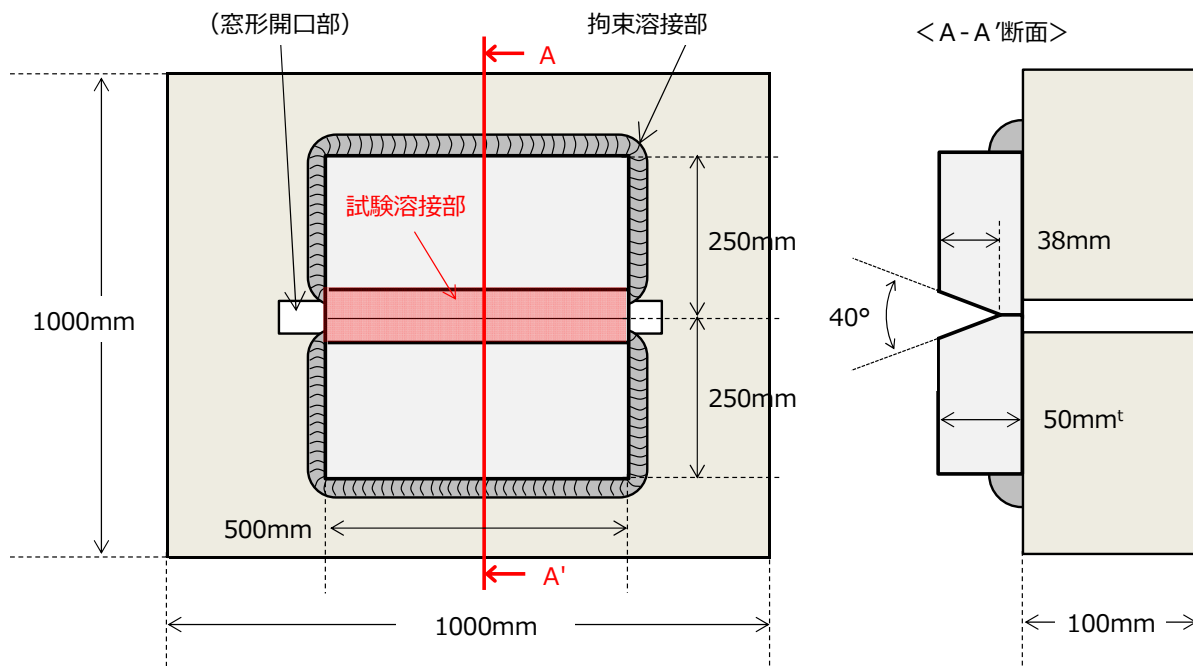


図7 Arnold が実施した窓形拘束溶接割れ試験の試験板形状



※試験規格が無く寸法は決まっていないため、数値はあくまで一例

図8 窓形拘束溶接割れ試験の試験板形状の一例

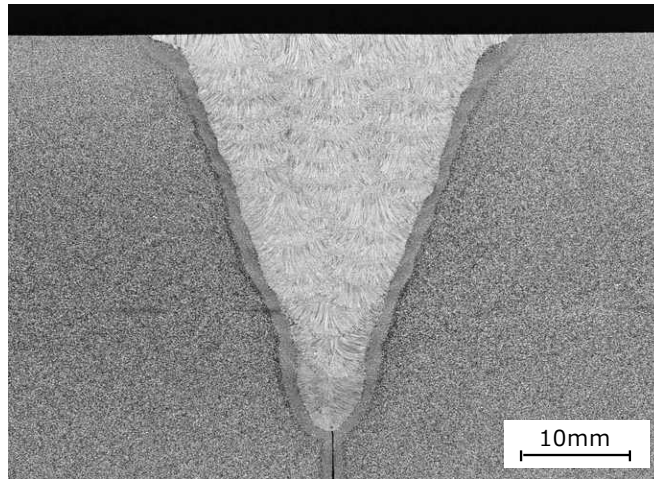


図9 窓形拘束溶接割れ試験の断面マクロ写真（一例、余盛除去後）

3.4 すみ肉溶接継手試験（該当 JIS 無し）⁷⁾

試験方法が日本海事協会（NK）鋼船規則検査要領 M 編に規定されており、高張力鋼用非低水素系溶接棒を使用する際の承認試験となっている。図 10 に示す形状の試験板に予熱を行わず片側 1 パスずつ水平すみ肉溶接を行い、溶接後 48 時間経過後に MT または PT による表面割れ観察を行った後、試験溶接部の 3 断面からマクロ試験片を採取し断面割れの観察を行う。主に止端割れ、ルート割れ、ラメラテアの試験方法として使用されている。

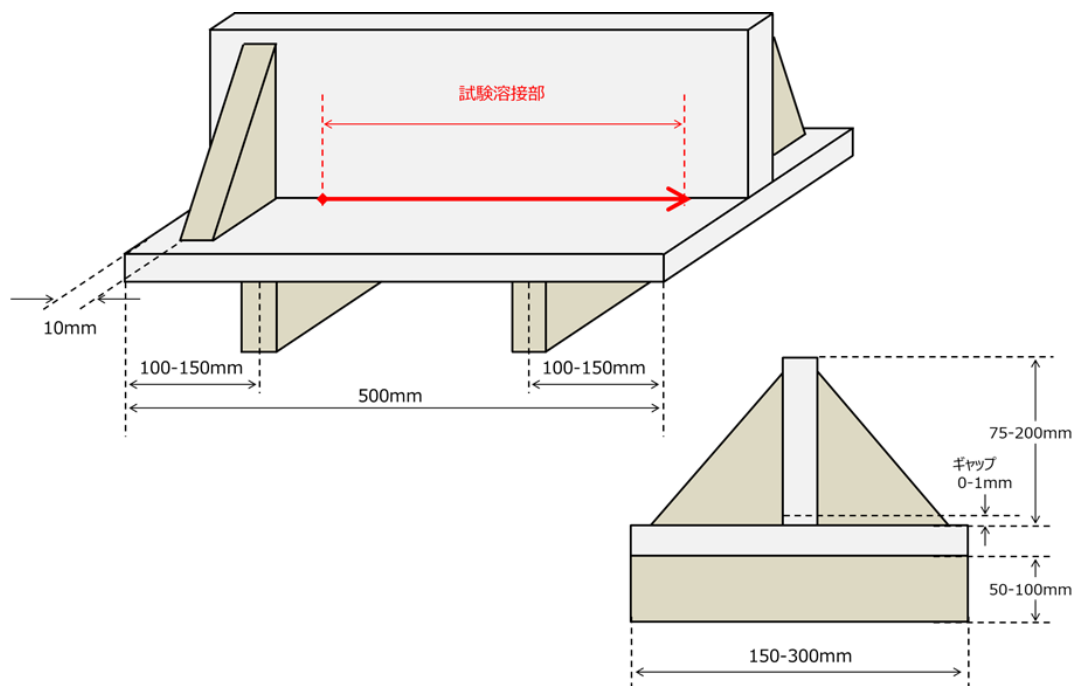


図 10 NK 鋼船規則 検査要領 M 編 M4 M4.3 に準拠したすみ肉溶接継手試験の試験板形状

本試験は、本来の NK 鋼船規則の規定から外れて、多層盛りのすみ肉溶接割れ試験として利用されることもある。その場合、予熱・パス間温度は実施工に準じたものとし、また立板側は実施工に合わせて開先をとることも多い。実施工を模した多層溶接試験としては、突合せ継手は窓形拘束溶接割れ試験で、すみ肉継手は多層すみ肉溶接継手試験で評価するのが適当であると考えられる。

以上、主な低温割れ試験方法について概説したが、これらの試験方法で得られた割れ停止予熱温度と実構造物におけるそれとは必ずしも一致しない場合がある。そのような差異が生じる理由としては、

例えば予熱の均一性（割れ試験体は概ね均一に予熱されるのに対し、実構造物は局部加熱であることが多く、見かけ上の予熱温度は同じでも実際の冷却速度は異なる可能性がある）や、拘束度の差などが考えられる。いずれにせよ、実構造物において、選定した施工条件での溶接継手部の非破壊検査による確認は必須である。

4. 低水素化に向けた取り組み

ここまで述べたように、低温割れ防止のために各種試験方法により適切な熱管理条件を抽出することは重要であるが、一方で熱管理は溶接施工の能率向上を阻害する要因でもあるため、低温割れ感受性を高める要因の一つである拡散性水素を低減することが望まれている。図11にサブマージアーク溶接法による多層溶接金属の低温割れに及ぼす拡散性水素量と溶接金属強度の影響⁸⁾を示すが、拡散性水素量を低く抑えるほど割れ停止予熱・パス間温度を低下させることができ、さらに強度が高くなるほどその傾向が顕著であることが分かる。溶接材料面から拡散性水素を低減するアプローチとしては、①初期保有水分量の低減および難吸湿化 ②アーク雰囲気中の水素分圧低下の2つが挙げられる。これらについては古くから材料設計・生産技術の両面から様々な検討がなされており、例えば①については含有水分を抑えた原料の適用、粘結剤・焼成条件・粉碎条件の選択など、②については炭酸塩などのガス発生剤やフッ化物原料の適正化などが挙げられる。このような材料面からの取り組みに加え、さらに最近ではガスシールドアーク溶接において、施工面からの取り組みとして溶接ワイヤから溶接金属への水素の移行を抑制する革新的な溶接プロセス⁹⁾（以下、低水素プロセスと呼ぶ）が提案されており、以下に紹介する。

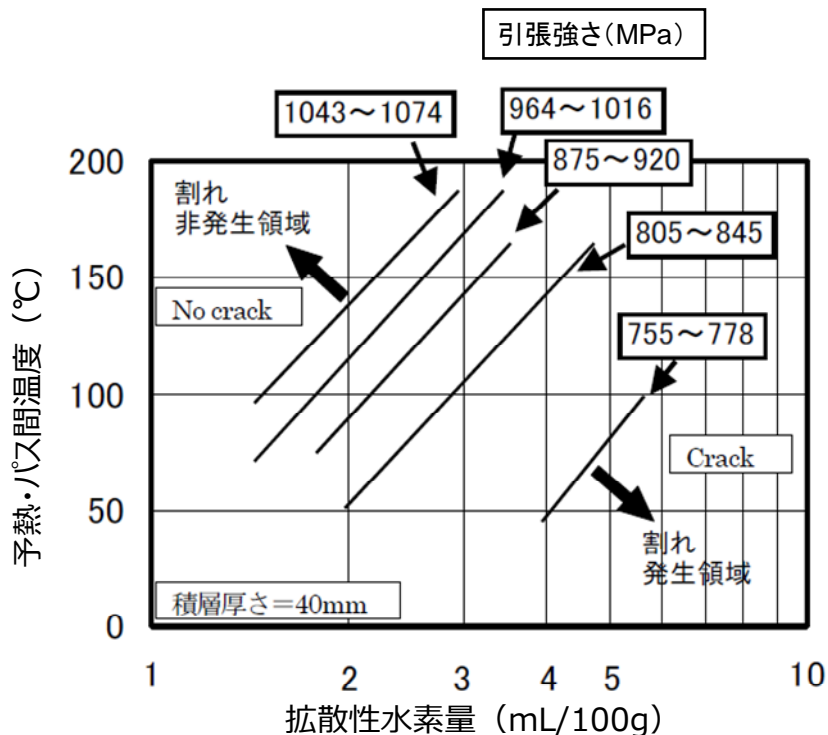


図11 高張力鋼用 SAW 溶接金属における拡散性水素量と割れ停止限界予熱・パス間温度の関係

低水素プロセスは、図12に示すような、コンタクトチップとシールドノズルの間に設けられた吸引ノズルから、シールドガスの一部を吸引する2重ノズル式トーチシステムを用いて行う溶接法である。コンタクトチップと母材間で溶接電流によるジュール発熱およびアーク熱により溶接ワイヤが加熱されることで、熱エネルギーによってワイヤから水素源が遊離すると考えられるため、遊離水素源

を含むワイヤ近傍のガスを吸引ノズルから排出することによりアーク雰囲気中に侵入する水素量を低減し、溶接金属への水素吸収を抑制する機構である。ガスシールドアーク溶接における溶接ワイヤに起因する水素源として、(1)ワイヤ表面潤滑剤、(2)FCW のフラックス初期保有水分、(3)FCW 製造後の吸収水分、の3種が挙げられるが、これら3種の水素源のそれぞれに対して、以下の通り低水素プロセスの有効性が確認されている。

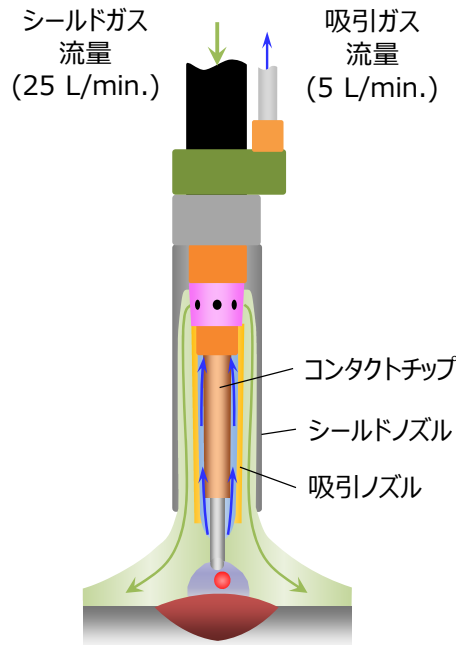


図 12 低水素プロセスに使用される特殊トーチの模式図

(1) ワイヤ表面潤滑剤への有効性

図 13 に、潤滑剤としてワイヤ表面に塗布した油の付着量が異なるソリッドワイヤ (JIS Z 3312 YGW11) を用いて従来溶接法と低水素プロセスで拡散性水素量 (測定方法: JIS Z 3118 準拠) を比較した結果を示す。低水素化プロセスの適用により表面油量に関わらず拡散性水素量が低位に抑えられており、本プロセスが表面潤滑剤の無害化に非常に有効であることが分かる。

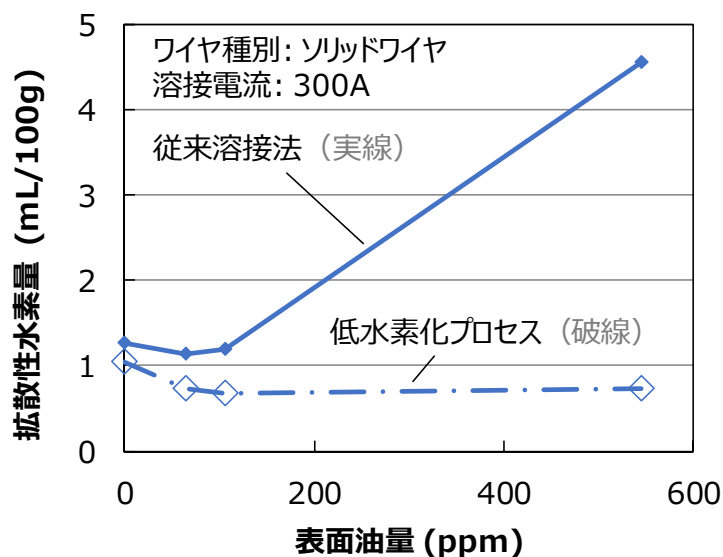


図 13 表面潤滑剤に対する低水素プロセスの有効性

(2) FCW のフラックス初期水分への有効性

保有水分量の異なるフラックスを調整し、このフラックスを用いた FCW (JIS Z 3313 T49J0T1-1) を供試した。FCW の構造は、シームレス (かしめ無し) とシーム有り (かしめ有り) の両方とし、拡散性水素量を比較した結果を図 14 に示す。従来溶接法と低水素プロセスを比較すると、シームレスワイヤではその低減効果が 0.5~1mL/100g と小さく、初期水分の低減効果が小さいと言える。一方、シーム有りワイヤでは、低減効果が 3~4mL/100g と大きく、低水素プロセスを用いることで初期水分の多くを無害化出来ることが分かる。このシームの有無により生じる拡散性水素低減挙動の差は、コンタクトチップ-母材間でワイヤが加熱された際に、シームレスワイヤではフラックス中の水分が離脱するルートが塞がれて排出されないのに対し、シーム有りワイヤでは容易にワイヤ外部に離脱することが出来るため、効率良く吸引されてアーク雰囲気の水素分圧が低下するためと考えられる。

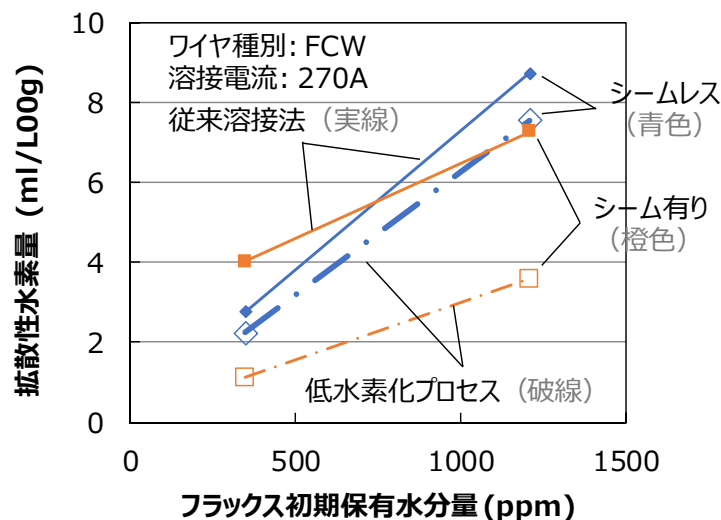


図 14 フラックス初期保有水分に対する低水素プロセスの有効性

(3) FCW 製造後の吸収水分への有効性

80℃の恒温炉で 3 時間乾燥後、30℃×80%RH の恒温恒湿槽で強制吸湿させた 2 種 (JIS Z 3313 T49J0T1-1, T556T1-1) のシーム有り FCW 溶接し、従来溶接法と低水素プロセスによる拡散性水素量を比較した。吸湿時間と拡散性水素量の関係を図 15 に示す。低水素プロセスでは、吸湿時間が経過してもほぼ一定の拡散性水素量を示した。製造後の吸収水分は容易に離脱する付着水が多いものと考えられ、従って低水素プロセスが非常に有効に作用すると考えられる。

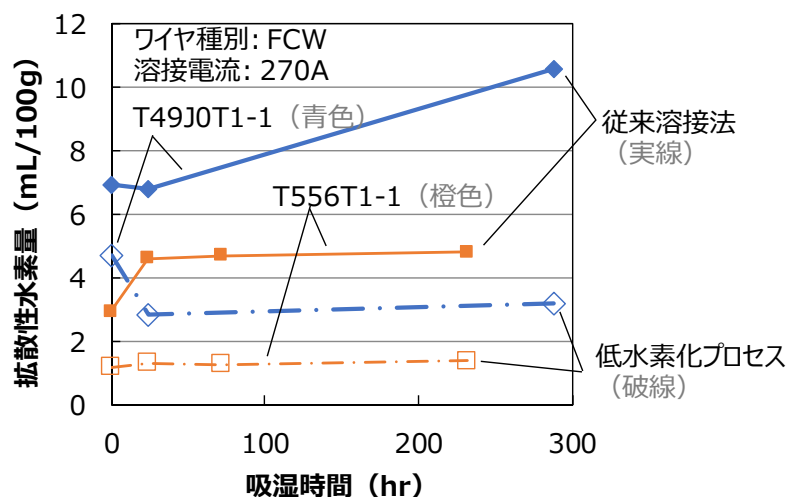


図 15 FCW 製造後の吸収水分に対する低水素プロセスの有効性

上記の結果から、適用される溶接ワイヤの種類によっては、低水素化プロセスの採用により溶接ワイヤに依存することなく水素の管理を制御できる可能性が期待される。本プロセスは未だ実験段階ではあるものの、施工面から安定的に低水素溶接金属を得る方法として有望と考えられ、今後設備の取り扱い性などの習熟が進むことで、将来的な高張力鋼の溶接における熱管理軽減策となることを期待したい。

5. おわりに

本稿では低温割れの評価試験方法、および溶接材料・施工面から低温割れ感受性を緩和する手法について紹介を行った。本稿が読者の皆様にとって溶接品質や施工管理の向上の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 糟谷：溶接学会誌 Vol.70 (2001), No.6, p.650-658
- 2) 溶接の研究 No.29 (1989), 第4編
- 3) 溶接の研究 No.56 (2017), 第3編
- 4) JIS Z 3158: 2016 y 形溶接割れ試験方法
- 5) JIS Z 3157: 1993 U 形溶接割れ試験方法
- 6) Arnold, P.C.: Welding Journal Vol.36 (1957), No.8, p.373-381
- 7) 日本海事協会 鋼船規則検査要領 M 編 M4 M4.3
- 8) 奥田ら: IIW No. II -1072-86 (1986)
- 9) 迎井、丸山、鈴木：溶接学会論文集 第36巻 (2018), 第1号, p.86-93

<略歴>

石田 雅俊 (いしだ まさとし)

2012年3月 京都大学 大学院 工学研究科 材料工学専攻 修士課程 修了

2012年4月 株式会社神戸製鋼所 入社

現在に至る