パイプライン用鋼管の電子ビーム溶接における凝固割れに及ぼす 不純物元素の影響*

—大径パイプライン継手の全姿勢電子ビーム溶接に関する研究 (第3報)—

古賀 信次**, 犬塚 雅之**, 長谷 浩志**, 岩瀬 敏典**, 榎田 浩***

Influence of Impurity Elements to Hot Crack Occurrence in Electron Beam Welding of Pipeline Steel

—Study on all position electron beam welding of large diameter pipeline joints (Report 3)—

by Shinji KOGA**, Masayuki INUZUKA**, Hiroshi NAGATANI**, Toshinori IWASE**,
and Hiroshi MASUDA***

In this study, the influence of impurity elements to the weld metal crack susceptibility in the electron beam welding of a pipeline steel was investigated. 19 mm thick API 5L-X65 steel plates with different sulfur, silicon and phosphorus content levels were welded and the extent of the weld crack occurrence was compared. As the result of the variance analysis of the experimental data, sulfur was found to be the most harmful element to the crack occurrence. The Auger electron spectroscopy analysis also showed the segregation of sulfur to the fracture surface of the weld cracking.

To clarify the upper limit of the sulfur content for the prevention of the weld cracking, commercially available test pipes with different sulfur contents were welded. As the result, it was confirmed that the sulfur content should be kept no more than 0.002% to prevent the weld cracking in the all position electron beam welding process.

Key Words: electron beam welding, line pipe, welding parameters, weld cracking, impurity element

1. 緒 言

天然ガスパイプライン現地継手への電子ビーム溶接適用の基礎的検討に関し、第1報¹⁾および第2報²⁾では、板厚19 mm、外径762 mmのAPI 5L-X65鋼管を対象として適正電子ビーム溶接条件を選定し、それを用いて全周にわたって良好なビード形状を有する全姿勢連続電子ビーム溶接施工が可能であることを示した。

一方、パイプライン用鋼管の電子ビーム溶接時の問題点として、溶接金属中央部に縦割れが発生することが、Sivryら^{3,4)}によって報告されている。この縦割れの発生には、溶融金属の凝固パターンが大きな影響を与える。これに関して荒田ら⁵⁾は電子ビーム溶接時の凝固界面は一定形状ではなくある周期をもった凝固の遅れ現象が板厚方向に進展することを報告している。また塚本⁶⁾らは凝固の遅れの形成因子について詳細な考察を行い、ビーム孔内にたまった溶

融金属の2次溶融であることを明らかにしている。そして、田村ら⁷⁾、志田ら^{8,9)}、田中ら¹⁰⁾は、溶融池後方の板厚内部でおこるこの凝固の遅れ現象が、鑄物の引け巣的な形態を有する縦割れを誘起することを報告している。

この縦割れの防止には、溶込み断面形状が中膨れ形となって内部に多量の溶融金属を滞留させるアッパーフォーカス（焦点が板表面よりも上方）のビーム収束条件を避けることが有効であることが明らかにされている⁷⁻⁹⁾。しかし本研究で取り扱う水平固定管の全姿勢溶接においては、前報^{1,2)}で述べているように溶接ビード形状の適正化の観点から、上記したような割れ防止のためのビーム収束条件を必ずしもとり得ない。すなわち、たとえば上向姿勢では、裏面のアンダーフィルを防ぐためにアッパーフォーカスのビーム収束条件を用いる必要があり、縦割れ発生の可能性が増加することになる。

この制約条件下で縦割れの発生を安定して防止する方法としては、被溶接材料の化学成分の適正化、特に不純物元素の低減が考えられる。電子ビーム溶接における高温割れと材料成分の関係についてはオーステナイトステンレス鋼においていくつかの報告があり、浦谷¹¹⁾らは304系および316系ステンレス鋼の厚板電子ビーム溶接において不純物成分と高温割れ発生の関係を調査し、(P+S)量を0.045%

*原稿受付 平成11年10月7日

**正 員 川崎重工業㈱ Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

***正 員 ㈱日本ガス協会 Member, The Japan Gas Association

以下に抑えることによって高温割れの防止が可能であることを報告している。また中尾ら¹²⁾は、完全オーステナイト化した SUS316 鋼の凝固割れ感受性を REM 添加により改善した実験結果を報告している。フェライト系鋼については、志田ら¹³⁾が多くの市販鋼種および肉盛溶接金属を用いて溶接われ発生傾向を調査し、鋼材中の C および O 濃度が高いと溶融凝固現象が乱れ縦割れが発生しやすくなることを報告し、また松田ら¹⁴⁾は炭素鋼および Cr-Mo 鋼厚板においてネイルヘッド部に発生する高温割れ防止のためには (P+S) 量を 0.03% 以下にする必要があることを述べている。

これらの諸研究に対し本研究は、低 C のパイプライン用鋼管材料を供試材とし、鋼材中のいくつかの不純物元素と高温割れ（縦割れ）の関係について溶接条件との関連も含めた定量的な検討を加えることによって、全姿勢電子ビーム溶接において割れを防止できる組成を明らかにすることを目的として実施した。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料

本研究は、国内外で天然ガス高圧幹線パイプラインに多用される API 規格の 5L-X65 を対象とした。まず割れに影響を与える元素を絞り込むため、不純物元素として P および S、さらに溶融金属の湯流れ性に影響を与えられられる Si の計 3 元素をそれぞれ 2 水準に变量して組み合わせ、実験計画法による分散分析を行った。なおここでは鋼材の機械的特性に影響の大きい C やその他の微量添加元素は対象から外している。Table 1 中の A1~A8 は供試した試験溶製鋼板で、板厚はいずれも 19 mm である。なお上記 3 元素の变量幅は、現実的な市販鋼種での最大変化幅にほぼ対応している。次に分析結果から最も割れ感受性への影響が大きいと判断された S の含有量が異なる 5 種類の市販

ベースの API 5L-X65 鋼管（板厚 19 mm）に対して溶接試験を行い、割れを安定して防止するための S 量の限界値を求めた。Table 1 の B1~B5 に供試した市販ベース鋼管の化学組成を示す。

2.2 実験方法

実験用の電子銃としては定格最大出力 30 kW（加速電圧 60 kV × ビーム電流 500 mA）の小型可搬型を用い、溶接は真空チャンバー（真空度 $\leq 5 \times 10^{-2}$ Pa）内で行った。縦割れを誘起する凝固の遅れ現象は溶接姿勢に影響を受けないという入江ら¹⁵⁾の報告から、実験では溶接姿勢を下向とした。また全ての溶接はビードオンプレートにより行った。実験に用いた溶接パラメータを Table 2 に示す。加速電圧、ビーム電流は安定した完全溶込み溶接が行える条件で一定とし、高温割れの発生に影響を及ぼすことが報告⁷⁻¹⁰⁾されている溶接速度およびビーム収束条件を変化させた。溶接速度は 600~1000 mm/min. の範囲とし、ビーム収束条件は焦点距離を変化させ荒田¹⁶⁾が提案した ab 値（対物距離/焦点距離）による表示で 0.90~1.10 となるようにした。ビード形状に関して、第 1 報¹⁾で述べた下向姿勢での実験結果より、一部の ab 値ではビード表面にアンダーフィルを生じるものもみられたが、ここでは内部の割れ発生の有無に

Table 2 Welding conditions used for experiment.

Welding position	Flat
Accelerating voltage (kV)	45
Beam current (mA)	360
Welding speed (mm/min.)	600, 800, 1000
Objective distance (mm)	300
Focal distance (mm)	273, 286, 300, 316, 333
ab parameter *	1.10, 1.05, 1.00, 0.95, 0.90

Note : * ab parameter = Objective distance / Focal distance

Table 1 Chemical compositions of material used (mass %).

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Nb	V	Ti
A1	0.09	0.21	1.46	0.011	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	0.025	0.03	0.05	0.02
A2	0.08	0.19	1.54	0.020	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	0.029	0.04	0.05	0.01
A3	0.08	0.18	1.55	0.010	0.004	<0.01	<0.01	<0.01	0.027	0.04	0.05	0.01
A4	0.08	0.19	1.55	0.020	0.003	<0.01	<0.01	<0.01	0.027	0.04	0.05	0.02
A5	0.09	0.28	1.53	0.010	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	0.028	0.04	0.05	0.02
A6	0.08	0.28	1.54	0.021	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	0.029	0.04	0.06	0.02
A7	0.08	0.28	1.54	0.011	0.003	<0.01	<0.01	<0.01	0.029	0.04	0.05	0.02
A8	0.08	0.28	1.57	0.020	0.003	<0.01	<0.01	<0.01	0.028	0.04	0.05	0.01
B1	0.08	0.25	1.52	0.008	0.0010	0.02	0.02	0.01	0.020	0.05	0.05	0.02
B2	0.08	0.24	1.44	0.012	0.0015	0.02	0.03	0.02	0.023	0.03	0.05	0.01
B3	0.08	0.30	1.53	0.012	0.0020	0.02	0.02	0.01	0.030	0.05	0.01	0.02
B4	0.07	0.28	1.57	0.014	0.0030	0.01	0.04	0.01	0.028	0.04	0.04	0.01
B5	0.09	0.28	1.60	0.024	0.0040	0.02	0.03	0.01	0.004	0.05	0.01	0.01

注目するため、若干のアンダーフィルについては無視することとした。

得られた溶接継手は放射線透過試験 (RT) によって縦割れの有無を確認した。割れの有無判定に関しては、溶接終端のクレータ部を除いて長さ 300 mm の溶接線上に一つ以上の割れがみつめられた溶接については、割れありと判定した。また割れ発生を定量的に評価する尺度として、RT フィルム上の縦割れの総長さを測定し溶接長で除した値を割れ率 (Rc) として用いた。

さらに、代表的な割れについて破面のオージェ電子分光分析を実施し、破面上における不純物元素の偏析について調査を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 P, S および Si 変量鋼材の溶接割れ感受性

A1~A8 の各供試材料に対し、溶接条件 (溶接速度, ab 値) を計 12 条件変化させた溶接金属について、RT による縦割れの有無を判定した結果をまとめて Table 3 に示す。同表より、鋼材ごとに割れ感受性に差がみつめられる。割れ感受性の高い鋼材 (A3, A4) ではほとんどの溶接条件で割れが発生しているが、割れ発生数の少ない鋼材 (A2, A5~A8) をみると、割れは ab 値が 1.0 を超えるアッパーフォーカス域でかつ溶接速度が高い領域で発生している。これは、前述の田村他の報告⁷⁻⁹⁾と一致した傾向である。

割れ形態を観察した一例として、供試材 A8 において溶接速度 1000 mm/min., ab 値 1.10 の条件でみられた溶接割れの断面組織を Fig. 1 に示す。割れは溶接金属の中央部において発生しており、開口幅が大きく両端部に丸みを持った引け巣状の空孔欠陥である。これは田村らの報告におけ

る割れの形態と一致する。Fig. 2 には破面の走査型電子顕微鏡による観察結果を示す。同図より、破面には残留融液により滑らかに覆われた樹枝状晶が明瞭にみつめられ、割れが凝固時に発生したことが分かる。さらに Fig. 3 には同破面のオージェ電子分光分析結果を示す。強制破面(a)の

Fig. 1 Cross section of weld crack.

Table 3 Result of weld crack test for materials with different P, S, and Si.

Material No.		A 1				A 2				A 3				A 4			
ab value		0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10
Welding speed (mm/min)	600	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	○	●	●	●
	800	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
	1000	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Material No.		A 5				A 6				A 7				A 8			
ab value		0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10	0.95	1.00	1.05	1.10
Welding speed (mm/min)	600	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	800	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●
	1000	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	●	●

Note / ○:No crack, ●:Crack

Fig. 2 SEM fractography of weld crack.

(a) Mechanically fractured surface (weld metal)

(b) Weld crack surface

Fig. 3 Result of Auger electron spectroscopy analysis of crack surface.

チャートと比較すると、割れ破面(b)ではSのピークがみとめられ、割れ破面上にSが濃化していることが明らかとなった。

3.2 分散分析によるP、SおよびSiの影響判定

次に割れの発生に対するP、S、およびSiの影響について定量的な評価を行うために、実験計画法で行われる分散分析^{17,18)}を行った。これは複数の要因が組み合わされた実験結果から個別要因あるいは要因相互作用の影響に関する有意性を求めるための統計的手法として広く用いられている。Table 4に、3元素の含有量を2水準に変化させた場合の直行配列表を示す。ここでは各鋼材において割れが発生した条件数をデータとして取り扱うこととした。そしてこれを元にして、それぞれの元素単独、及び2元素の相互効果についての分散 (Variance) を計算した。計算結果をTable 5に示す。同表より、P単独、およびP×Si、P×Sの相互作用の分散が非常に低くなっており、凝固割れ感受性に及ぼすこれらの要因の寄与度が小さいことが示されている。そこでこの中から主効果であるP単独を除いたP×Si、P×Sの2要因を誤差要因にプーリングし、Si×P×Sと合わせた3要因を誤差として取扱って、Si、P、Sそれぞれ単独、およびSi×S相互作用の割れ発生に対する寄与度 (F) をそれぞれ計算した。計算結果はTable 5中に示され

Table 4 Orthogonal array for weld crack test.

No.	Si	P	S	Data *
A 1	1	1	1	0
A 2	1	2	1	1
A 3	1	1	2	11
A 4	1	2	2	11
A 5	2	1	1	2
A 6	2	2	1	2
A 7	2	1	2	2
A 8	2	2	2	3
Level	1:0.2% 2:0.3%	1:0.01% 2:0.02%	1:0.001% 2:0.003%	

Note * Number of welds in which cracks were observed

Table 5 Result of variance analysis for weld crack test.

Variation Factors	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Variance	F*	Note
Si	24.5	1	24.5	147.0	
P	0.5	1	0.5	3.0	
S	60.5	1	60.5	363.0	
Si×S	50.0	1	50.0	300.0	
P×Si	0.0	3	0.2	---	Deviation
P×S	0.0				
Si×P×S	0.5				

F : Significance of variation factors to crack susceptibility
F(1, 3 ; 0.05) = 10.1, F(1, 3, 0.01) = 34.1

ているが、これより S 単独は最も F が高く、非的中率を示す数値である危険率が 1 % と割れ発生に対して高い有意性を示している。この有意性の方向 (割れ感受性を高めるか低めるか) については、Table 3 に示した実験結果では高 S 材で割れ条件数が多くなっていることから、S は割れ感受性を大きく高めると言える。一方、Si 単独も F は高く、割れ感受性に対して S 同様危険率 1 % で有意である。ただし Table 3 の実験結果では高 Si 材での割れ条件数は S とは逆に少ないことから、Si は割れ感受性を低下させる効果があると言える。さらに Si と S の相互効果も大きく、高 S でも Si が多い場合割れをある程度抑えられる効果が確認された。反面、P は F が極めて小さく、本実験の範囲内においては割れ感受性に対する寄与度は大きくないことが明らかとなった。

S が割れ感受性を高める作用は凝固時の残留融液の融点を下げて液膜の残存を長引かせることに起因すると考えられるが、Fig. 3 で示したオージェ電子分光分析で破面上に S が濃化されていたことでも、残留融液への S の濃化が裏付けられている。また Si は鋳造において溶融金属の粘性や表面張力を低下させて流動性を高め、引け巣等の欠陥を防止する効果がある¹⁹⁾ が、今回の電子ビーム溶接における凝固割れは一種の引け巣状の空洞欠陥であることから、Si が同様の抑制効果を示した可能性が考えられる。

3.3 溶接割れ感受性におよぼす S 量の影響

以上の実験結果から、API 5L-X65 鋼管の電子ビーム溶接における凝固割れに関して、S が大きく割れ感受性を高める元素であることが確認された。そこで、S 量を 0.001 % ~ 0.004 % の範囲で 5 種類に変化させた市販ベースの API 5L-X65 鋼管 (Table 1 中の B1~B5) を用いて、割れの発生傾向を定量的に調べた。溶接試験では溶接速度を 600 mm/min. および 1000 mm/min. の 2 水準、ab 値を 0.9, 1.0, 1.1 の 3 水準の計 6 条件に変化させて下向姿勢で溶接を行った。Fig. 4 に検出された割れの RT フィルムの一例を示すが、同図より長さ数 mm 程度の縦割れが溶接金属中央部に断続的に形成されている。

各溶接条件の溶接部の RT フィルムから算出した Rc を鋼材中の S 量で整理した結果を Fig. 5 に示す。ここでは、6 種類の溶接条件をパラメータとしている。同図より、溶接条件によって程度の差があるが、いずれの条件でも S 量の増加によって Rc が増加していることがわかる。

溶接条件でみると、まず溶接速度の面からは同一の ab 値では 1000 mm/min. の方が 600 mm/min. より Rc が高い。これは高速化によって溶融池後方の固液共存域が長くなること、また Fig. 6 に模式的に示すように溶融池が長く尾を引いた形となって両側の母材から成長した柱状晶が溶接金属中央で会合する形となりこの部分に液膜を形成しやすくなること等によると考えられる。

つぎに ab 値の影響に関しては、同一溶接速度では ab 値

Fig. 4 Weld cracks detected by radiographic test.

Fig. 5 Relationship between cracking ratio Rc and S content.

Fig. 6 Schematic drawing of solidified grain growth.

が大きくなるほど Rc が高くなっている。これはビーム焦点が板表面上に離れるほど溶込み断面形状が中膨れ状態となり、縦割れを発生させる凝固の遅れ現象が顕著になることによると考えられる。この高速化、アッパーフォーカス化による縦割れ感受性の増大は、3.1で述べた実験結果、また前述の荒田⁵⁾、塚本⁶⁾、田村⁷⁾、および志田⁸⁾らの報告とも一致する傾向である。

溶接割れの防止という観点からみると、溶接速度が600 mm/min. では、S 量を0.002%以下にすると、ab 値が0.9~1.1の間で変化しても割れの発生はみられない。したがって API 5L-X65 鋼管の全姿勢電子ビーム溶接において広い範囲の ab 値を用いる際に溶接割れの発生を防止するためには、鋼材中の S 量を0.002%以下に抑えることが必要であることが明らかになった。

4. 結 言

本研究では、天然ガスパイプライン現地敷設溶接への全姿勢電子ビーム溶接の適用について基礎的に検討する一環として、API 5L-X65 鋼管を供試材料とし、鋼材の組成と溶接割れ感受性との関係について調査した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) API 5L-X65 鋼管の電子ビーム溶接継手に発生する溶接割れは、溶接金属中央部に断続的に形成される引け巣状の凝固割れであり、破面上には S の濃化がみとめられた。
- (2) 鋼材中の P, S, および Si を変量させた試験溶製材を用い電子ビーム溶接金属の割れ発生傾向について分散分析を行った結果、S は割れ感受性を著しく高めること、P は割れ発生にはほとんど影響を及ぼさないこと、さらに Si は割れ抑制効果を持つことが明らかとなった。
- (3) S 含有量を変化させた市販ベースの API 5L-X65 鋼管を用いた溶接試験の結果、全姿勢溶接で用いられる広い範囲の ab 値で割れを防止するためには、S 量を0.002%以下に抑える必要があることが明らかとなった。

謝 辞

本研究は、平成8年度通産省委託研究「幹線パイプライン技術開発事業 超高速溶接技術の開発（電子ビーム溶接）」の一環として実施されたものである。研究の遂行に際しご指導いただいた大阪大学豊田政男教授、同牛尾誠夫教授、金属材料技術研究所入江定宏部長、ならびに(株)日本ガス協会の関係者の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 古賀, 大塚, 長谷, 岩瀬, 栢田; 全姿勢電子ビーム溶接における溶接姿勢と適正溶接条件の関係—大径パイプライン継手の全姿勢電子ビーム溶接に関する研究(第1報)—, 本会論文集, Vol. 18 (2000), No. 2, 214-221.
- 2) 古賀, 大塚, 長谷, 岩瀬, 栢田; 水平固定大径管の全姿勢連続電子ビーム溶接—大径パイプライン継手の全姿勢電子ビーム溶接に関する研究(第2報)—, 本会論文集, Vol. 18 (2000), No. 2, 222-227.
- 3) Sivry, Bonnet; Electron-beam welding of J-curve pipelines, Second International Conference of Pipe Welding (1979), Vol. 1, 11-28.
- 4) Sudreau, Sivry, Anselme; Electron beam weldability for deep sea pipeline, Proceeding of Annual Offshore Technology Conference, Vol. 13 (1981), No. 3, 311-326.
- 5) 荒田, 松田, 田村; 厚板鋼板の深溶込みにおける溶接現象と欠陥について, 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-93-73 (1973).
- 6) 塚本, 入江; 電子ビーム溶接における局所的な凝固の遅れの形成因子—電子ビーム溶接現象に関する研究(第2報)—, 本会論文集, Vol. 8 (1990), No. 2, 15-21.
- 7) 田村, 佐藤; 厚板の電子ビーム溶接部の欠陥に及ぼす溶接速度と焦点位置の影響, 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-120-74 (1974).
- 8) 志田, 岡村, 鈴木, 喜多; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第3報)—厚板電子ビーム溶接部の欠陥発生に及ぼす溶接因子の影響—, 本誌, Vol. 46 (1977), No. 12, 46-51.
- 9) 志田, 岡村, 喜多, 中崎; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第4報)—厚板の下向き深溶込み溶接における縦割れ欠陥の防止—, 本誌, Vol. 48 (1979), No. 7, 38-44.
- 10) 田中, 小菅; 厚鋼板の電子ビーム溶接(第1報)—ビーム特性と炭素鋼板の溶接条件の選定—, 本誌, Vol. 49 (1980), No. 9, 44-52.
- 11) 浦谷, 久利, 下山, 高野; 厚板オーステナイトステンレス鋼の電子ビーム溶接性の研究(第1報), 本会論文集, Vol. 1 (1983), No. 2, 23-31.
- 12) 中尾, 勝; 完全オーステナイト化した SUS316 鋼電子ビーム溶接金属の凝固割れ感受性の改善, 本会論文集, Vol. 4 (1986), No. 2, 115-121.
- 13) 志田, 岡村, 喜多, 蓮井; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第6報)—鋼材の深溶込み電子ビーム溶接部の欠陥発生に及ぼす母材の化学組成の影響—, 本誌, Vol. 49 (1980), No. 7, 440-446.
- 14) 松田, 喜多, 中崎, 坪, 上原, 志田; 炭素鋼および Cr-Mo 鋼の電子ビーム溶接性の研究(第1報), 本会論文集, Vol. 4 (1986), No. 1, 79-83.
- 15) 入江, 塚本; 電子ビーム溶接における縦割れの発生機構—電子ビーム溶接現象に関する研究(第1報)—, 本会論文集, Vol. 6 (1988), No. 4, 21-27.
- 16) 荒田; 電子ビーム熱源の特性とその溶接技術開発に対する展望, 本誌, 41-11 (1972), 1338-1349.
- 17) 中里, 川崎, 平栗, 大滝; 品質管理のための実験計画法テキスト, 日科技連出版社.
- 18) 日本規格協会; 新版品質管理便覧第2版.
- 19) たとえば日本鉄構協会; 鉄構便覧, 第3版 (1982), V 铸造・鍛造・粉末冶金, 137-141.