

レ型開先継手完全溶け込み溶接における高温割れ解析

大阪大学大学院
大阪府立大学大学院
小松製作所
大阪府立大学大学院

前田 新太郎
○稲津 晶大
本藤 裕佑, 蘭 韋明
浅田 毅, 小野 数彦
柴原 正和

Solidification Cracking Analysis on Full Penetration Welding in Single Bevel Groove.

by Shintaro MAEDA, Akihiro INATSU, Yusuke HONDO, Weiming LAN, Tsuyoshi ASADA,
Kazuhiko ONO and Masakazu SHIBAHARA

1. 緒 言

溶接時には、対象とする材料や溶接条件によって、Fig.1 に示す様な凝固割れと呼ばれる溶接欠陥が、溶接金属の表面あるいは内部に生じる場合がある。しかしながら、全施工条件に効果的な防止策はなく、未だ凝固割れ問題は解決されていないのが現状である。凝固割れの検査には、超音波や X 線を用いた非破壊検査が一般に実施され、凝固割れの補修には時間と費用を必要とするため、凝固割れを事前に予測し、その防止策について検討することは重要であると言える。

凝固割れの予測・防止方法について検討する上で、凝固割れの発生メカニズムについて検討するのが重要である。凝固割れ発生メカニズムに関する既往の研究は、大きく分けて 2 つに分類される。一つは、主に実験的手法を研究の基盤として材料組成や材料組織が凝固割れに及ぼす影響について検討する冶金学的見地に立った研究であり、もう一つは有限要素法を用いた熱弾塑性解析を基盤として凝固割れに影響を及ぼす溶接過程の過渡の力学現象について検討する力学的見地に立った研究である。

冶金学的研究としては、古くは 1947 年に Singer ら¹⁾によって、凝固割れの発生を段階的に区分して割れ発生評価をすることが妥当であるという考え方が示された。また、1952 年に Pellini ら²⁾によって、凝固割れは高温で凝固収縮によって蓄積されたひずみがある限界値に達した際に生じる現象である、という凝固割れ発生機構理論が提案された。そして、1973 年に、仙田、松田ら³⁾により、高温割れの発生機構に関して、高温域における固液共存領域である BTR(Brittleness Temperature Range, 高温脆性温度領域)と延性曲線を用いた概念が示され、また、溶接材料の凝固割れ感受性の試験法として、Trans-Varstraint 試験が提案され、現在でも多くの研究がなされている⁴⁾。一方で、力学的研究としては、1970 年代に、佐藤・上田ら⁵⁾により、FEM 解析を用いて、片面自動溶接における変形と割れに関する検討が行われた事例が代表的であるが、冶金学的研究に比べ研究事例が少ないのが現状である。

しかしながら、凝固割れは冶金学的因子と力学的因子の相互作用によって生じる現象であることから、両因子を統合して考えることでより高度な凝固割れの解析が可能になると考えられる。そこで、本研究では、冶金学的因子である BTR 温度域とデンドライト会合角度および力学的因子である高温ひずみが考慮可能な凝固割れ解析手法を提案し、本手法を用いてレ型開先完全溶け込み溶接時に溶接速度が凝固割れ発生に及ぼす影響について検討することで、その妥当性について検証した。



Fig. 1 Photo of Hot Crack.

2. レ型開先完全溶け込み溶接において発生する凝固割れ

2.1 解析モデルおよび解析条件

本節では建設機械のブーム部の角継手部を模擬した実験試験片を対象としたレ型開先完全溶け込み溶接時に発生する凝固割れに及ぼす諸因子の影響について検討するために、実験を実施した。Fig. 2に本研究に用いた試験片の寸法、また、Fig. 3に試験片の実際の写真を示す。長さ30 mm、板厚16 mm、幅75 mmの鋼板2枚に対し、ルートギャップ1 mm、ルートフェイス1 mmで完全溶け込み溶接を行った。開先は開先角度 45° のレ型開先とし、始端部と終端部に板厚16 mm、幅50 mm、高さ75 mmの拘束板を隅肉溶接で取り付け、溶接部裏側に長さ30 mmの仮付けを行った。溶接速度400 mm/min、500 mm/min、600 mm/min、700 mm/min、800 mm/minの5種類について、それぞれ3ケースずつ実験を行った。詳細な条件についてTable 1に示す。

2.2 実験結果および溶接速度が凝固割れに及ぼす影響

前節で示した条件で溶接した結果、溶接金属内部に割れが発生した。長手方向に進展した割れ発生の分布を調べるために開先の中心面上、すなわち水平から 22.5° の断面において切断した断面マクロをTable 2に示す。同図は長手方向の割れ分布を表したもので、溶接開始位置から30~130 mmの断面を示している。同表より、溶接速度が比較的大きい

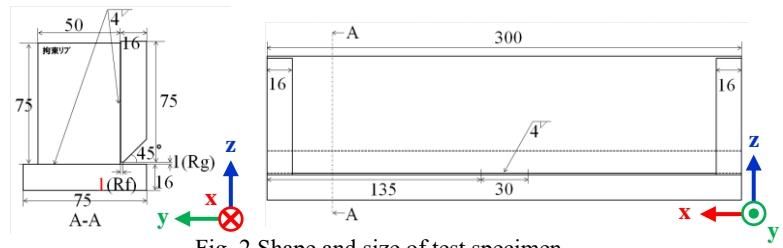


Fig. 2 Shape and size of test specimen.

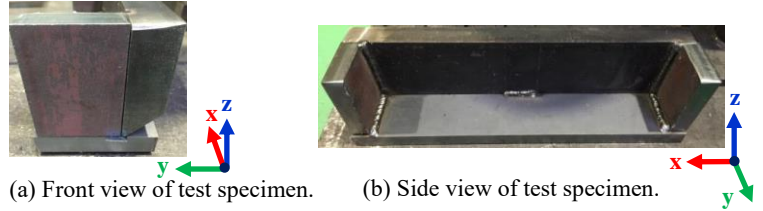


Fig. 3 Photo of test specimen.

Table 1 Welding condition for experiments.

Case No.	Current [A]	Voltage [V]	Welding speed [mm/min]	Heat input [kJ/mm]
1	290	25.1	400	1.092
2	288	25.1		1.084
3	294	25.1		1.107
4	319	29.1	500	1.114
5	317	29.1		1.107
6	324	29.1		1.130
7	349	32.1	600	1.120
8	347	32.1		1.114
9	351	32.1		1.127
10	387	32.7	700	1.085
11	390	32.7		1.093
12	382	32.8		1.072
13	424	35.9	800	1.142
14	423	35.9		1.139
15	418	35.9		1.125

Table 2 Macrostructures of welded joints in welding direction.

Welding speed [mm/min]	x = 30~55 mm	x = 55~80 mm	x = 80~105 mm	x = 105~130 mm
400				
600				
800				

Table 3 Cross-sectional macrostructures of welded joints.

Welding speed [mm/min]	Micro-photograph of cross section				
	x = 20 mm	x = 130 mm	x = 150 mm	x = 170 mm	x = 280 mm
400					
500					
600					
700					
800					

Table 4 Cracking occurrence part in welding direction.

Welding speed [mm/min]	Case number	Crack part
400	1	
	2	
	3	
500	1	
	2	
	3	
600	1	
	2	
	3	
700	1	
	2	
	3	
800	1	
	2	
	3	

800mm/min において連続的な凝固割れの発生が確認できる。

また溶接開始位置から 20 mm, 130 mm, 150 mm, 170 mm および 280 mm の位置における断面マクロを溶接速度ごとにまとめたものを Table 3 に示す。始端側および終端側において、デンドライト会合部における大きな凝固割れが確認できる。

次に、各条件で溶接した試験体について X 線検査を行い、割れ発生の手方向の分布を示したものを Table 4 で示す。赤色で示された部分は割れが発生した領域であり、白色で残された部分は割れが発生していない領域を示す。Table 4 より、仮付け前後において凝固割れの発生が確認できる。これは、トーチの進行と共に変形しようとする開先部が仮付けによって拘束されていたのが、仮付けが溶けた瞬間に解放され、それに伴い仮付け後方部に面内回転変形が生じるためと考えられる。一方で、仮付け部においては割れが発生していないことが確認できる。この理由としては、デンドライト会合角度の影響が考えられる（デンドライト会合角度については次章にて詳しく説明する）。なお、ケースごとに凝固割れ発生位置が異なるのは、電流・電圧およびワイヤ供給速度の不安定性、またそれに伴う溶融プール形状の変化等、様々な因子の影響が考えられる。同表より、溶接速度の変化に伴い、割れの発生度合いが変化していることが確認でき、今回実験した条件では 600 mm/min の場合に最も割れが発生しやすくなっていることが確認できる。

3. 高温割れ解析理論

凝固割れは、BTR 内で生じたひずみに起因して発生すると考えられるため、本研究では FEM 熱弾塑性解析を用いて、過渡の温度場・応力場の計算を行い、溶融から凝固までの過程を逐次解析する。本研究では、大規模熱弾塑性解析が可能な理想化陽解法 FEM⁽⁶⁻⁸⁾を用いて解析を実施した。本章では、この理想化陽解法 FEM を用いた凝固割れ解析手法について概説する。

3. 1 BTR 塑性ひずみ増分

凝固割れ発生メカニズムを Fig. 4 に示す。凝固割れは、融点直下の固液共存温度領域である高温脆化温度域（Brittle Temperature Range : 以下 BTR と称す）において、冷却過程に生じたひずみの増分値が、ある限界値に達したときに割れが発生すると考えられている。全ひずみ $\{\epsilon\}$ は式(1)に示すように、弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ 、塑性ひずみ $\{\epsilon^p\}$ 、熱ひずみ $\{\epsilon^T\}$ の和の形で表される。

$$\{\Delta\epsilon\} = \{\Delta\epsilon^e\} + \{\Delta\epsilon^p\} + \{\Delta\epsilon^T\} \quad (1)$$

ここで、凝固割れは融点付近で材料の延性が低下する高温域での現象であるため、弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ は無視できるほど小さな値であると考えられる。また、熱ひずみ $\{\epsilon^T\}$ はダメージを評価するひずみとは考えにくい。従って、全ひずみ $\{\epsilon\}$ のうち塑性ひずみ $\{\epsilon^p\}$ のみが割れ発生 of 支配的な因子と考えられる。

そこで本研究では、移動熱源を用いた FEM 熱弾塑性解析法を用いて、Fig. 5 に示すように、冷却過程において予め指定された液相線温度と固相線温度の温度幅を示す BTR 内で発生する塑性ひずみ $\{\epsilon_{BTR}^p\}$ の増分を BTR 塑性ひずみ増分 $\{\Delta\epsilon_{BTR}^p\}$ と定義し、割れ発生指標と考える。

3. 2 BTR 温度勾配ベクトル

冷却過程における最終凝固位置でのデンドライト会合角度が凝固割れ発生に影響を及ぼすことが経験的に

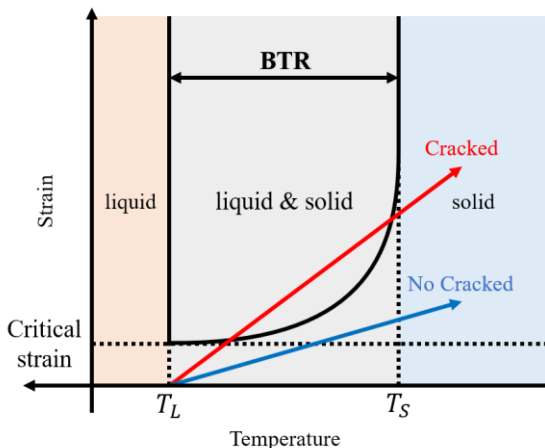


Fig. 4 Schematic illustration of hot cracking occurrence.

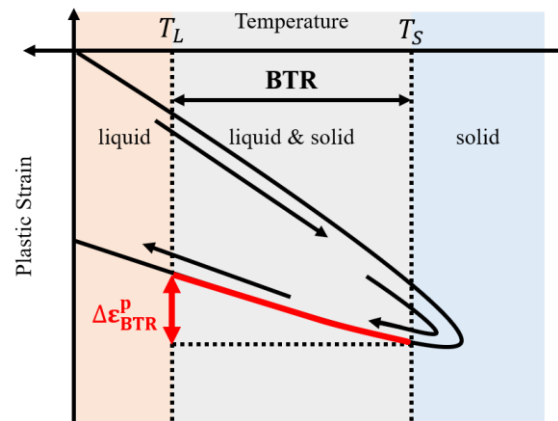


Fig. 5 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling.

知られており、会合角度が小さい（水平に近い角度で会合する）場合に凝固割れが発生するケース⁹⁾が確認されている。これは、デンドライトの会合角度が不純物の偏析量や残留液相の残留量に影響を及ぼすために生じる冶金的な要因によるものと考えられる。一方で、溶接金属の凝固成長方向は、凝固初期を除いて、温度場に依存することが知られている。溶融金属の凝固は、溶融境界のごく近傍を除けばデンドライト凝固であり、その成長方向は凝固相の結晶構造により規定されると考えられており、デンドライトの成長方向とデンドライト先端部における最大温度勾配方向が一致する場合、柱状晶の成長速度は最大となり、逆に、不一致が大きいほど凝固が遅れる。つまり最大温度勾配方向との一致が大きいものは優先的に成長し、不一致の大きい方向へのデンドライトの成長は淘汰される¹⁰⁾。そこで、次章においては凝固過程におけるデンドライト成長方向を最大温度勾配ベクトル方向と近似して考えることで溶融金属中のデンドライト会合位置および会合角度について検討する。デンドライトの成長方向と最大温度勾配方向を模式的に Fig. 6 に示す。ここでは、冷却過程において、温度が液相線温度を下回り、BTR 内に遷移した際の温度勾配ベクトルの方向を指し、この時の温度勾配ベクトル BTR 温度勾配ベクトルと定義する。

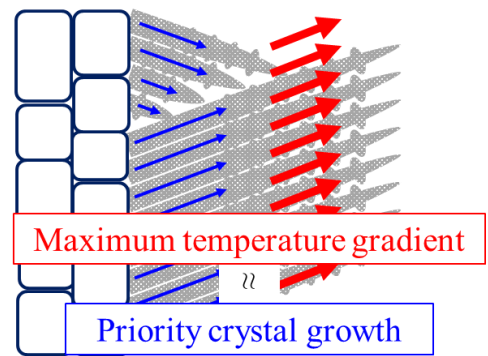


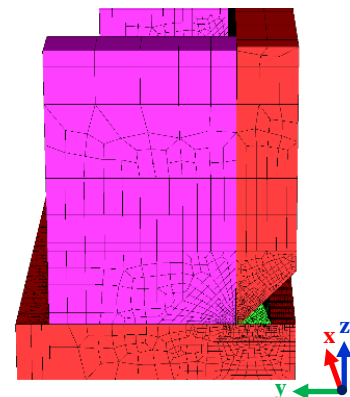
Fig. 6 Schematic illustration of Priority growth direction and Max. temperature gradient.

4. レ型開先完全溶け込み溶接時の高温割れ解析

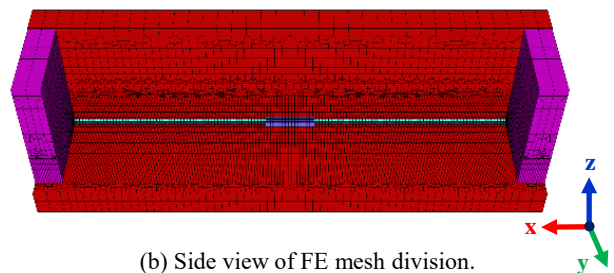
4. 1 解析モデルおよび解析条件

本章では、第 2 章にて実験的に検討を行ったレ型開先完全溶け込み溶接に対し、前章にて説明した凝固割れ解析法を適用し、実験結果と解析結果を比較することで本凝固割れ解析法の妥当性を検証した。

Fig. 7 に、解析で用いた要素分割図を示す。各部の寸法は Fig. 2 で示した試験体の寸法と同じとした。解析モデルの節点数は 308,106、要素数は 288,108 である。また、解析で用いた材料定数 (SM490A) の温度依存性を Fig. 8 に示す。実験条件に基づき、解析においては電圧を 32V とし、入熱量を 1.120 kJ/mm で一定と仮定した。溶接速度は 400 mm/min, 500 mm/min, 600 mm/min, 700 mm/min, 800 mm/min の 5 種類について解析を行った。BTR を 1350~1450°C として解析を実施した。



(a) Front view of FE mesh division.



(b) Side view of FE mesh division.

Fig. 7 FE mesh division.

4. 2 FEM 熱伝導解析結果

熱伝導解析より算出された溶け込み形状と実験結果の断面マクロ画像より確認できる溶け込み形状の比較を Table 5 に示す。同表より、熱伝導解析によって算出される溶け込み形状が、実際の溶接時に発生する溶け込み形状と概ね良好に一致している事が確認できる。Table 5 の下段における白色点線は断面マクロ画像より確認されるデンドライト会合位置を示し、青色実線は熱伝導解析結果より算出される BTR 温度勾配ベクトルから近似的に求まるデンドライト会合位置を示す。同表より実験と解析のデンドライト会合位置を比較すると、

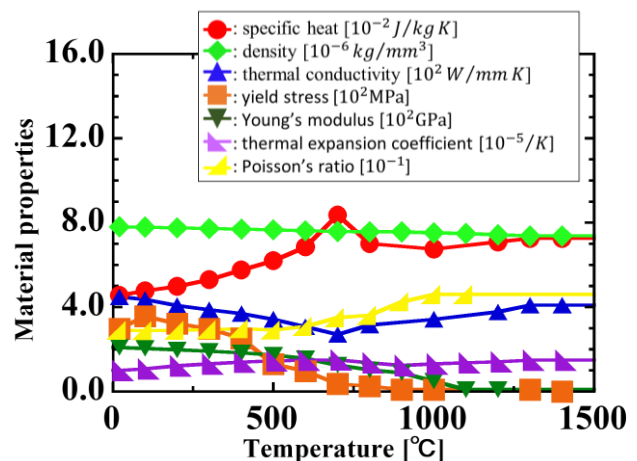


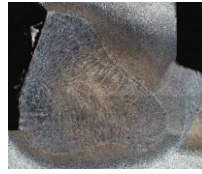

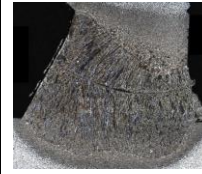
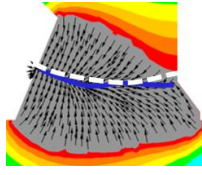
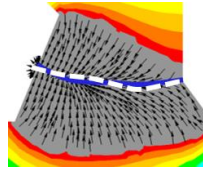
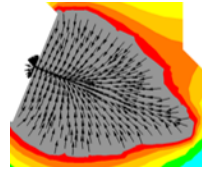
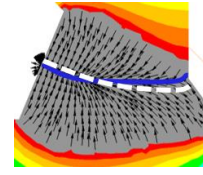
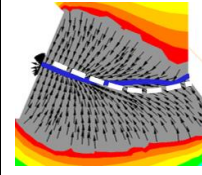


Fig. 8 Material properties of SM490A.

Table 5 Comparison with penetration shape between experiment and analysis.

500 [mm/min]	x = 20 mm	x = 130 mm	x = 150 mm	x = 170 mm	x = 280 mm
Experimental results					
Analysis results					

両者は概ね良好に一致している事が確認できる。

また熱伝導解析により得られた溶接池の長さおよび幅を溶接速度ごとに実験結果と比較したものを Fig. 9 に示す。同図により、溶接池の長さおよび幅は熱伝導解析において良好に再現されていると言える。

以上より、熱伝導解析により得られた溶け込み形状および BTR 温度勾配ベクトルを用いたデンドライト会合位置は妥当であると言える。

4. 3 FEM 熱弾塑性解析結果

FEM 熱弾塑性解析より算出された、溶接速度 600 mm/min のときの、溶接開始位置から 20 mm での yz 断面における BTR 塑性ひずみ増分の分布図を Fig. 9 に示す。同図において白色点線で示されているデンドライト会合位置において高い引張のひずみが生じており、高温割れが発生しやすいと推察される。次にデンドライト会合部であり BTR 温度勾配ベクトル会合角度が 150° 程度の点における BTR 塑性ひずみ分布を Fig. 10 に示す。同図より仮付け前後部で BTR 塑性ひずみ増分は高い値を取る一方で、仮付け部においては他の部位に比べて低い値を示すといった傾向を示している。また、溶接速度が比較的大きい、700 mm/min、600 mm/min の場合に大きい値をとり、溶接速度が比較的小さい 400 mm/min、500 mm/min の場合に比較的小さい値をとることが分かる。同図と Table 4 に示した実験における凝固割れ発生位置の傾向を比

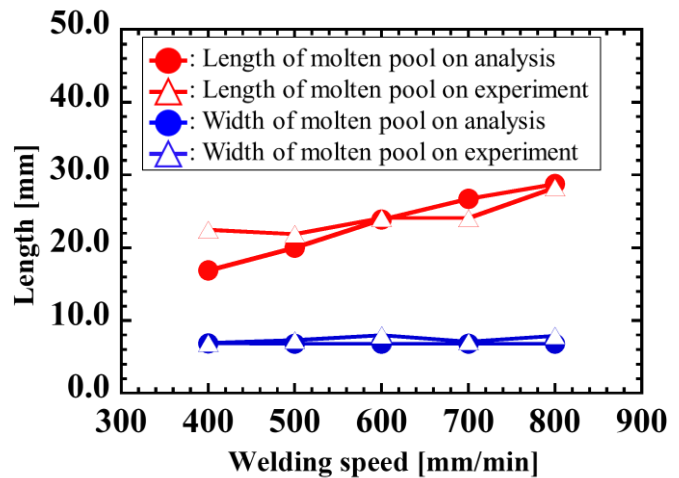


Fig. 9 Comparison of length and width of molten pool between experimental and analysis results.

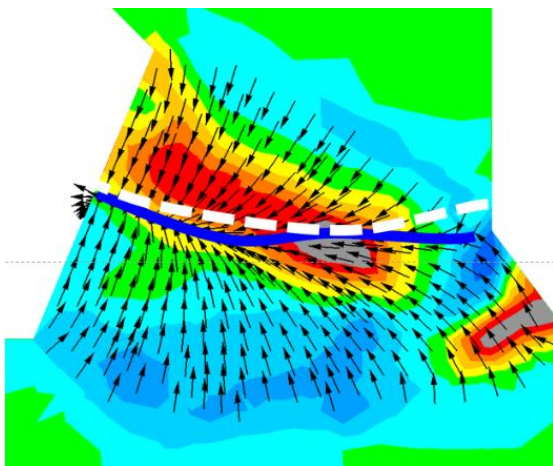


Fig. 9 Distribution of plastic strain increment in BTR and temperature gradient vector in BTR.

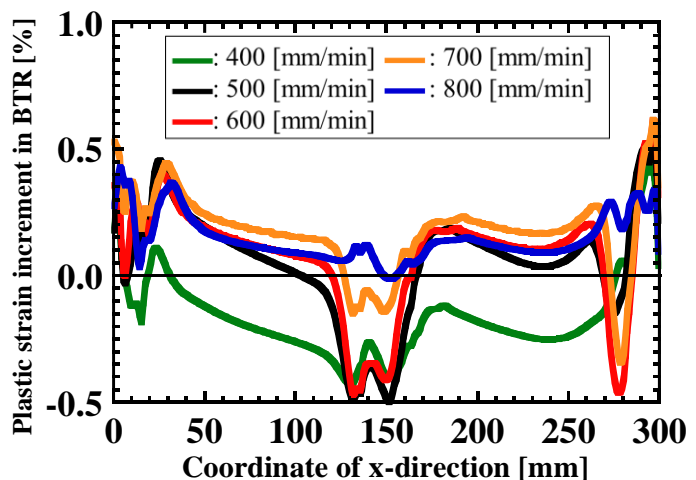


Fig. 10 Plastic strain increment in BTR.

較することにより、BTR 塑性ひずみ増分の大小傾向が実験における割れ発生分布と定性的に良く一致していることが確認できる。このことから、凝固割れ解析法における BTR 塑性ひずみ増分による割れ評価は妥当であると言える。

5. 結 言

本研究では、建設機械のブーム部の角継手部を模擬した実験試験片を対象としたレ型開先完全溶け込み溶接時に発生する凝固割れに及ぼす溶接速度の影響について実験的に検討を行った。また著者らが提案している凝固割れ解析法を適用し、実験結果と比較することにより、その妥当性について検証した。以下に本研究において得られた知見を示す。

- 1) レ形開先完全溶け込み溶接を行い、断面マクロ試験、X線検査を実施した結果、仮付け前後において凝固割れの発生が確認でき、その一方で、仮付け部においては割れが発生していないことが分かった。
- 2) 溶接速度 400 mm/min, 500 mm/min, 600 mm/min, 700 mm/min, 800 mm/min のそれぞれについて1)と同様に検討を行った結果、溶接速度が 600 mm/min の場合において最も多く割れが発生し、400 mm/min の場合においては割れが発生しないことが確認された。
- 3) レ形開先完全溶け込み溶接に対し凝固割れ解析を実施し、解析結果と実験結果を比較した結果、断面マクロより確認されるデンドライト成長方向と BTR 温度勾配ベクトルの方向が良く一致することが確認された。
- 4) 実験と BTR 温度勾配ベクトルより推定されるデンドライト会合部における BTR 塑性ひずみ増分の大小傾向が概ね良好に一致している事が確認され、本解析手法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) A.R.E. Singer et S.A. Cottrell: Properties of the Aluminium-Silicon Alloys at Temperatures in the Region of the Solidus, Journal Inst. Metals. Vol 73 (1947), pp.33-54.
- 2) W.S. Pellini: Foundry, vol. 80 (1952), pp.124-133, 192, 194, 196, 199.
- 3) Fukuhisa Matsuda, Hiroji Nakagawa, Yue-Chang Zhang, Setsuji Minehisa, Nobuharu Sakabata, Akio Ejima, Kiyohiko Nohara : Behaviors of Hot Cracking and Its Dependency on Chemical Composition : Ductility-dip Cracking in Weld Metal of Fe-36% Ni Alloy, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, vol.3, No.3 (1985), pp. 532-538.
- 4) Tomoya Watanabe, Ryosuke Kimura, Takashi Nakazawa, Hiroyuki Chiba, Sohei Tanaka, Toru Ueki, Takanari Toriyama, Makoto Yoshida : Development of the theories of solidification cracking and measuring methods for mechanical properties of solid-liquid coexistence alloys(From the 1950s to the 1970s), Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 8 (2008), pp. 395-405.
- 5) Kunihiko SATOH, Yukio UEDA, Toshio YADA, Ryoichi KAMIDHIKA, Toyoo MAEDA and Yuchol KIM : Studies on Deformations and Cracking in One Sided Welding (1st Report), Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.136 (1974) pp. 441-458.
- 6) Satoshi Kon, Masayuki Yamamoto, Kazuki Ikushima, Masakazu Shibahara, Masaharu Komura, Yasuo Yamashita : Study on Solidification Crack Under FCB Welding Using Idealized Explicit FEM, Preprints of the National Meeting of JWS (2004), pp. 180-181.
- 7) Kazuki Ikushima, Shinsuke Itoh, Masakazu Shibahara: Development of Parallelized Explicit FEM Using GPU, Quarterly Journal of The Japan Welding Society Vol.31 (2013), pp. 23-32.
- 8) Masakazu Shibahara, Kazuki Ikushima, Shinsuke Itoh, Koji Masaoka: GPU : Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, Quarterly Journal of The Japan Welding Society Vol.29 (2011), pp. 1-9.
- 9) Tsuyoshi Miwa, Kei Yamazaki, Tomokazu Morimoto, Kensuke Nishihara, Hiroyuki Takeda, Shintaro Maeda, Yusuke Hondo, Kazuki Ikushima, Masakazu Shibahara : Investigation of Hot Cracking Prevention on Automatic Welding Process for Butt Joint (Part 1), Preprints of the National Meeting of JWS (2018), pp. 48-49.
- 10) Gunji Koki : Introduction to Solidification of Metals (III), Tetsu-to-Hagané Vol.80 (1994), No.6, pp. N266-N280.