

(論文)

理想化陽解法FEMによる片面突合せ溶接時の高温割れおよび変形解析

三輪剛士*1・山崎 圭*1 (工学博士)・西原健作*2・柴原正和*3 (工学博士)

Analysis of Hot Crack and Welding Deformation during One-side Butt Welding Using Idealized Explicit FEM

Tsuyoshi MIWA・Dr. Kei YAMAZAKI・Kensaku NISHIHARA・Dr. Masakazu SHIBAHARA

要旨

本稿では、理想化陽解法FEMを用いた片面突合せ溶接時の高温割れ解析事例および溶接変形解析を報告した。高温割れ解析では、BTR内で発生する塑性ひずみの増分値および温度勾配（こうばい）ベクトルを高温割れ発生指標として評価し、これらを溶接実験結果と比較することにより、本解析手法による高温割れ発生予測の妥当性と有効性を検討した。また、変形解析では、片面サブマージアーク溶接法（FCBTM法）および片面ハイブリッドタンデムマグ溶接法（HT-MAGTM法）に対して実構造物サイズレベルの検討を行った。本解析手法を適用することにより、これまで困難であった大規模解析であっても高速かつ高精度に変形予測できることを示した。

Abstract

This paper reports on the analyses by idealized explicit FEM of hot crack and welding deformation during one-side butt welding. In the hot crack analysis, the incremental value of the plastic strain generated in the brittle temperature range (BTR) and the temperature gradient vector have been evaluated as the occurrence index of hot cracks. By comparing these with the results of welding experimentation, the validity and effectiveness of the hot crack occurrence forecast by this analysis method have been examined. In the deformation analysis, the actual structure size level has been examined for one-side submerged arc welding (FCBTM method) and one-side tandem welding (HT-MAGTM method). It has been shown that the application of these analysis methods has enabled deformation forecast at high speed and with high accuracy even in large-scale analyses, which hitherto have been difficult.

検索用キーワード

高温割れ, 片面溶接, タンデム溶接, 理想化陽解法, 熱弾塑性解析, 変形解析, FEM, HT-MAG

まえがき = 近年、実用構造物の力学解析には数値シミュレーション手法が広く活用されており、とくに有限要素法（以下、FEMという）は、設計・生産の幅広い分野に導入が進められている。しかし、溶接力学解析への適用については、その適用範囲が溶接継手近傍に限られる場合が多く、大規模解析への適用例は少ない。これは溶接が移動熱源による非線形過渡現象であることに起因している。現状、3次元応力・変形挙動を精度良くシミュレートするためには静的陰解法FEMを用いるのが一般的である。しかし、この手法では、解析規模が大きくなるとメモリ使用量および解析時間が問題となる。また、溶接時の高温割れを解析するためには、高温部の変位・ひずみ挙動を小さな時間増分・温度増分を用いて正確に解析する必要があり、溶接継手のみならず溶接構造までを解析対象とする場合は、必然的に解析時間が膨大となる。

本稿では、高速かつ省メモリで解析できる理想化陽解法FEMを大規模力学解析に適用し、溶接時の高温割れや実構造物を対象とした溶接変形の解析に本手法が有効であることを示した。

1. 理想化陽解法FEMを用いた高温割れ解析手法

1.1 理想化陽解法FEMによる溶接力学解析

FEM熱弾塑性解析手法を大規模・高速化した理想化陽解法FEMの解析手法について説明する。従来の溶接力学解析では、慣性力や減衰力の影響は小さいと考え、静的陰解法FEMを用いて解く方法がほとんどである。

$$[M] \{ \ddot{u} \}_i + [C] \{ \dot{u} \}_i + [K] \{ u \}_i = [F]_i, \dots \dots \dots (1)$$

すなわち、運動方程式（1）における第1項（慣性項）と第2項（減衰項）の影響は無視できる程度に小さい準静的な現象であると仮定し、増分型で記述された全体剛性方程式 $[K] \{ u \}_i = [F]_i$ を解くものである。いっぽう、理想化陽解法FEMでは、外力として熱伝導解析により得られた温度増分を用い、この温度増分による荷重を式（1）に与える。解析速度を高めるために最適化された質量マトリックス $[M]$ 、減衰マトリックス $[C]$ を用いて式（1）を解くことにより、つぎのステップにおける変位を求める。理想化陽解法FEMでは変位の計算を動的陽解法FEMの計算ステップ、すなわち式（1）を解くことによって計算を進める。計算ステップを進めること

*1 溶接事業部門 技術センター *2 コベルコ溶接テクノ 技術調査部 *3 大阪府立大学 工学研究科

により変位が一定値に収束していき、得られた変位が静的平衡状態、すなわち、 $[K] \{u\}_i = [F]_i$ を満たすまでこれを繰り返す。静的平衡状態が得られた後は、つぎの温度ステップにおける変位の計算へと移る。このように、荷重ステップにおける変位の計算を疑似的な動的問題ととらえ、疑似的な時間ステップに分割して解析を進める。なお、静的陰解法FEMでは、系全体での剛性方程式を解く必要があるため、大規模解析においては各計算ステップにおける計算量が膨大となる。いっぽう、この理想化陽解法FEMでは、計算ステップを分割して解析を進めることから全体剛性方程式を解く必要がなく、各計算ステップにおける計算量は静的陰解法FEMに比べてはるかに小さくなる。したがって、計算するステップ数自体は増加しても全体として計算の高速化、省メモリ化が可能となる¹⁾。また、理想化陽解法FEMは、熱弾塑性解析において静的陰解法FEMで得られる解と同等の状態に達するまで動的陽解法FEMを用いて時間ステップを進めるため、従来手法とほぼ同等の解析精度を実現し²⁾、なおかつ、従来手法に比べて大規模な解析が可能となる³⁾。

1.2 高温割れ解析手法の概要

高温割れ発生メカニズムの概要を図1に示す。一般的に金属材料では、液相線温度と固相線温度の間で延性が極めて低くなる凝固脆性温度域 (Brittle Temperature Range, 以下BTRという) が存在する。高温割れは溶接金属の凝固過程において、延性の乏しいBTR内で大きなひずみが生じた場合に発生すると考えられており、割れが発生する最小のひずみを限界ひずみと定義し、BTR内において溶接金属に作用するひずみと高温延性曲線によって割れの発生を評価するという考え方が提案されている⁴⁾。

そこで本稿では、図2に示すように、理想化陽解法FEM解析の冷却過程において、材料組成に応じて解析前に指定した液相線温度と固相線温度間のBTR内で発生する塑性ひずみの増分をBTR塑性ひずみ増分と定義し、これを高温割れの発生指標と考え、割れに及ぼす諸因子の影響について検討した。

また、溶接金属の最終凝固部付近の凝固形態は、耐高温割れ性に大きく影響し、結晶同士の会合角度が小さく、突合せ凝固 (正面衝突凝固) する場合は、割れを助長する不純物偏析線が出現することが実験的に確認されている⁵⁾。なお、凝固の初期を除くと、溶接金属の凝固成長方向は、おおよそ最大温度勾配の方向と一致すると考えられる。そこで本稿では、溶接金属の凝固成長方向を考慮するために、熱伝導解析から得られる温度勾配ベクトルから、簡易的に凝固成長の方向を決定する手法を提案した。すなわち、冷却過程において液相線温度を通過し、BTR内に遷移した際の温度勾配ベクトルをBTR温度勾配ベクトルと定義し、この温度勾配ベクトルの向きを凝固成長方向と仮定することにより、図3に示すように、最終凝固域において柱状晶同士が会合する位置での温度勾配ベクトルと溶接線に対して垂直な方向となす角度 (以下、柱状晶成長角度という) を評価した。

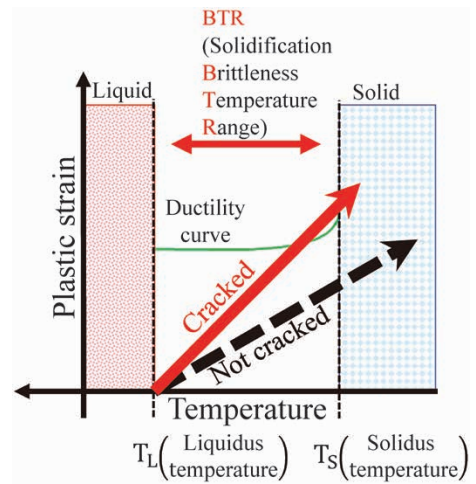


図1 高温割れ発生のメカニズム
Fig.1 Mechanism of hot crack

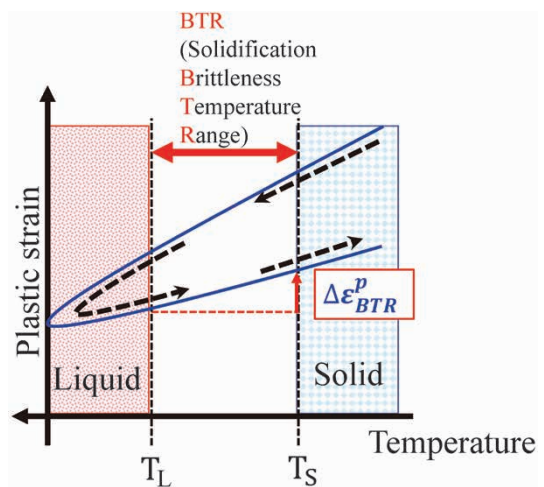
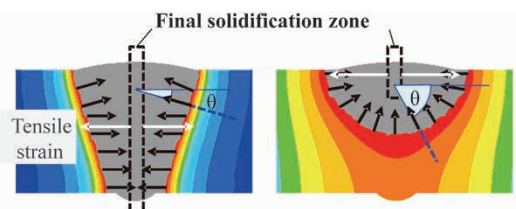


図2 冷却時におけるBTR塑性ひずみ増分
Fig.2 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling



→ : Dendrite growth direction ≡ Temperature gradient in BTR
θ: Angular of dendrite growth

図3 BTR温度勾配ベクトル
Fig.3 Schematic illustration of BTR temperature gradient vector

2. 片面タンデム溶接法における高温割れ解析

造船における板継工程において、溶接の自動化・高効率化を実現する片面タンデム溶接法を対象とし、高温割れを加速させる実験と実験を模擬する理想化陽解法FEMによる解析結果を示す。

2.1 片面タンデム溶接法における割れ試験方法

供試鋼板にJIS G 3106 SM490Aを用い、小型簡易自動溶接台車により下向姿勢による片面初層溶接を行った。試験板形状を図4、試験条件を表1、施工法の模式図を図5に示す。なお、図4中①、②、③の点については2.3節で説明する。始末端および溶接線中央部に高さ

5 mm × 長さ50 mmの面内仮付けを施し、溶融池の安定化と高溶着化のために、開先内に開先充填用カットワイヤ (FAMILIARCTM注1) M-GRITS, φ1.2 mm × 1.4 mm) を散布し、裏当て材としてFAMILIARCTMFB-B3を溶接線側全線に貼り付けた。ワイヤは両極ともにFlux Cored Wire (以下、FCWという)を用い、先行電極にFAMILIARCTMMX-100E (極性DCEP)、後行電極にFAMILIARCTMDW-1ST (極性DCEN)を用いることによりアーク干渉を抑制した。電極間距離を40 mmとし、板厚を16, 25, 32 mmと変化させ、本溶接部600 mm (始端タブを除く) の高温割れ発生位置や長さをX線透過試験により評価した。

2.2 片面タンデム溶接法における割れ試験結果

高温割れ試験結果を図6に示す。板厚16 mmでは溶接線全長において高温割れは発生しなかった。しかし、板厚25 mmでは溶接線中央に位置する開先の仮付け部近傍において高温割れが発生しており、板厚32 mmにおいては仮付け部以外の箇所にも高温割れが散見された。板厚25 mmにおいて割れが発生した箇所および割れが発生していない箇所の断面マクロ組織写真を図7に示す。高温割れは溶接金属の上方部で発生しており、割れ発生箇所における柱状晶成長角度は小さい。なお、板厚32 mmで発生した高温割れにおいても溶接金属表面

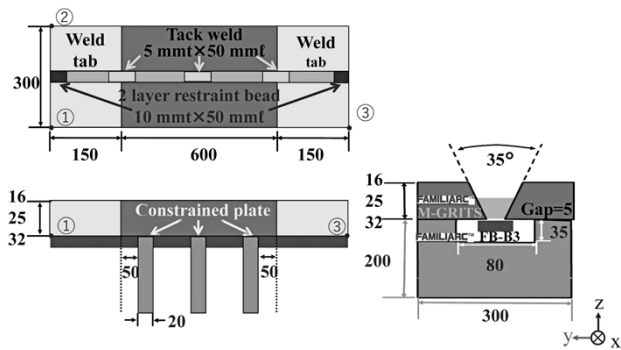


図4 試験板の形状と寸法
Fig.4 Shape and dimensions of test plate

表1 溶接条件
Table 1 Welding conditions

Electrode	Polarity	Wire	Welding current - arc voltage	Electrode distance	Welding speed
Leading	DCEP	FAMILIARC TM MX-100E (φ1.6)	410 A-34 V	40 mm	250 mm/min
Trailing	DCEN	FAMILIARC TM DW-1ST (φ1.4)	240 A-24 V		

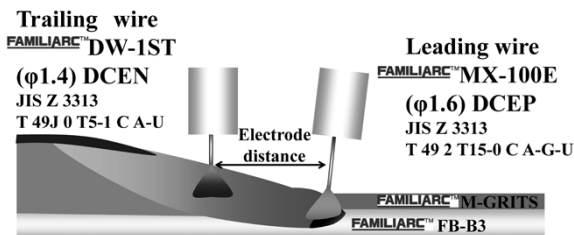


図5 片面初層溶接の模式図
Fig.5 Schematic illustration of one side tandem welding method

からの距離が同一であったことから、本施工条件では板厚25 mm以上の場合、仮付け部近傍かつ溶接金属上方部において高温割れ発生リスクがとくに高いと推定される。

2.3 片面タンデム溶接法を対象とした理想化陽解法 FEMによる高温割れ解析

図4に示す試験体に対して、溶接部近傍断面におけるメッシュ間隔の最小サイズを0.5 mm、溶接線方向のメッシュサイズを1 mmとし、板厚25 mmにおける節点数および要素数を1,122,416および1,059,664とした解析モデルを作成した。解析時間は26 hであった。溶接金属および母材は図8に示すSM490Aの材料定数を用い、BTRを1,350~1,450℃として解析を実施した。境界条件として、図4中の①, ②, ③に示す点の裏面をそれぞれxyz, xz, z方向で拘束した。なお、本解析では凝固潜熱の影響は考慮していない。

解析により得られた溶接金属中央部における柱状晶成長角度を図9に示す。図9には、解析に対応する断面マクロ組織も合わせて示している。板厚16~32 mmでは、裏ビード表面から0~4 mmの領域における柱状晶成長角度は負の値となり、凝固成長方向は溶接金属下部に向かっている。いっぽう、裏ビード表面から4~10 mmの領域では、後行極からの入熱により柱状晶成長角度は正の値となり、凝固成長方向は溶接金属上部に向かっているものの、実験で高温割れが発生した溶接金属の表面近傍(裏ビードから10~14 mmの領域)では柱状晶成長角度の値が小さく、突合せ凝固(正面衝突凝固)を呈している。したがって、上記解析で得られた柱状晶成長角度は、図9に示す断面マクロ組織で確認される溶接金属

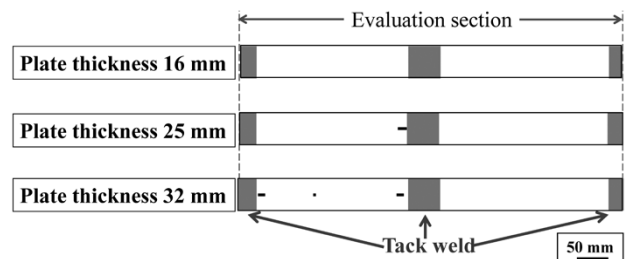


図6 高温割れ試験の結果
Fig.6 Hot crack test results

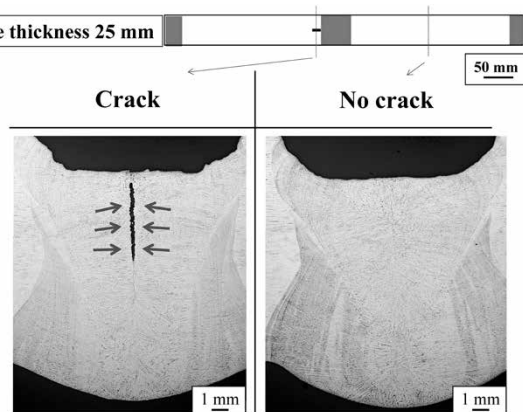


図7 断面マクロ組織
Fig.7 Cross sectional macrostructures

脚注1) FAMILIARCは当社の登録商標である。

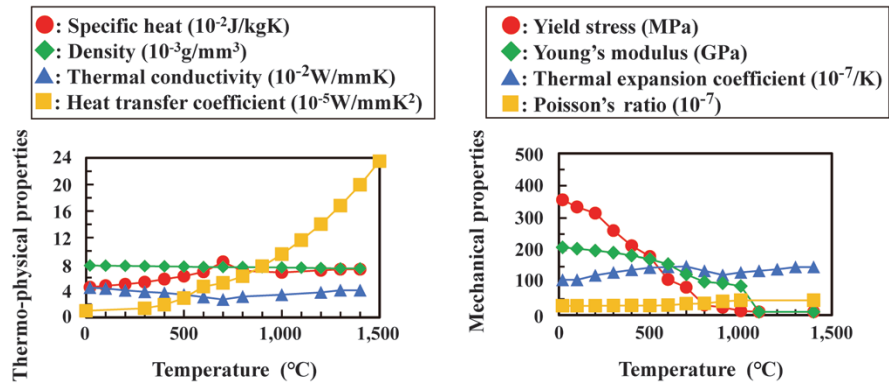


図8 材料定数
Fig.8 Material constants

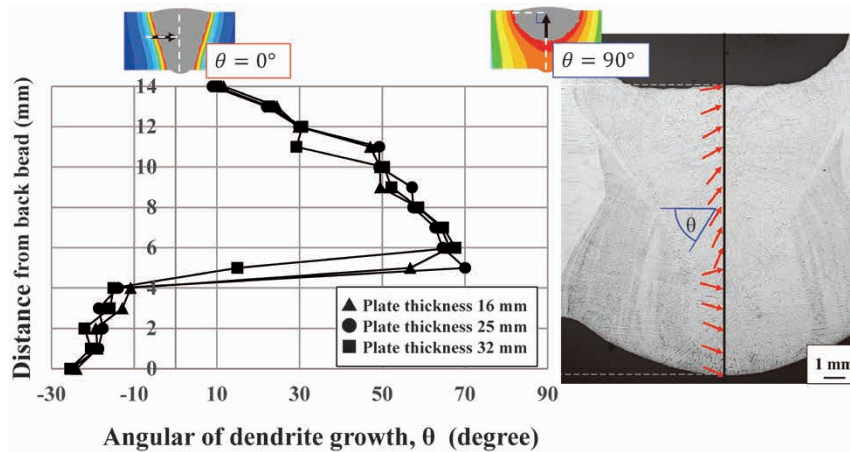


図9 柱状晶成長角度
Fig.9 Angular of dendrite growth

の凝固形態をおおむね表現できていると考えられる。

つぎに、各板厚の溶接線断面におけるBTR塑性ひずみ増分の分布図を図10に示す。板厚16 mmでは溶接線全線にわたり、BTR塑性ひずみ増分が極端に大きくなる箇所は認められないが、板厚25 mmおよび32 mmでは、溶接線中央に配置された仮付け部近傍かつ溶接金属上方部においてBTR塑性ひずみ増分が大きくなっている。

仮付け部断面におけるBTR塑性ひずみ増分の分布およびBTR温度勾配ベクトルの分布を図11に示す(板厚25 mm)。溶接金属上方部におけるBTR塑性ひずみ増分が相対的に大きいことがわかる。また、溶接金属上方部では柱状晶成長角度も小さくなっている。すなわち、高温割れが発生した板厚25 mm以上の仮付け部近傍は、BTR塑性ひずみ増分が大きい領域と柱状晶成長角度が小さい領域が溶接金属上方部で重なっている箇所であり、本解析手法を用いることにより、高温割れ発生リスクが高い箇所を推定できる可能性を示唆している。

2.4 考察

本解析手法で得られた割れ発生部の角変形挙動と割れ発生過程を確認した。熱源移動に伴う仮付け部近傍における評価点温度の変化と、評価点を含む溶接線に垂直な断面における角変形の変遷を図12に示す。図12(a)中の①~⑦に熱源が位置するときの角変形挙動の計算結果を図12(b)、模式図を図12(c)に示す。なお、温度評価点は割れが発生した溶接金属上部表面から2.3 mmの位置、仮付け部端部より10 mm手前の位置とした。板厚

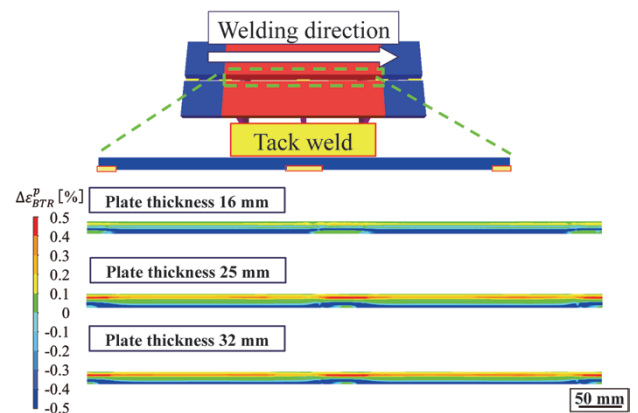


図10 BTR塑性ひずみ増分の分布(溶接線断面)
Fig.10 Distribution of BTR plastic strain increment in longitudinal section

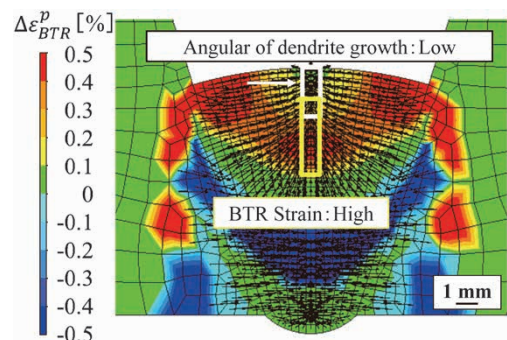
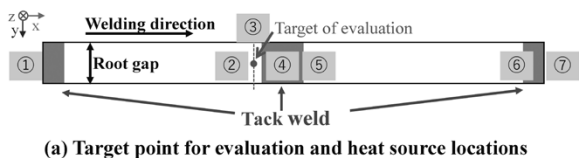
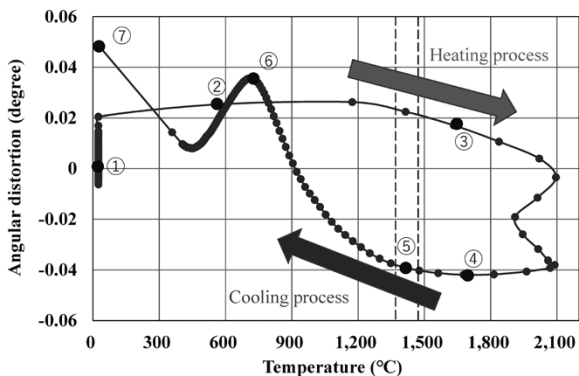


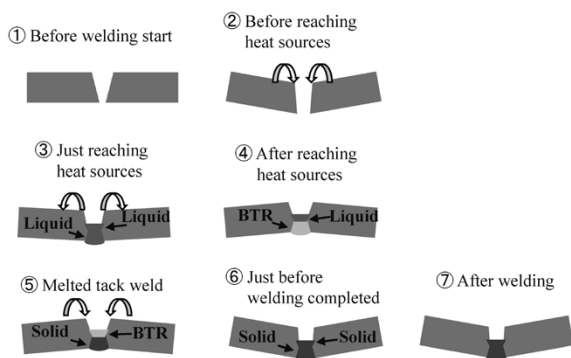
図11 BTR塑性ひずみ増分およびBTR温度勾配ベクトル(仮付け部断面)
Fig.11 Distribution of BTR plastic strain increment and BTR dendrite growth direction in cross section at tack weld



(a) Target point for evaluation and heat source locations



(b) Angular distortion and temperature behavior of near tack weld



(c) Schematic illustrations of angular distortion behavior at each heat source location

図12 仮付け位置近傍の角変形挙動

Fig.12 Angular distortion behavior near tack weld portion

は20 mmとし、溶接線中央を断熱境界面としてy方向を固定した1/2対称モデルを用いた。ここで、①は溶接開始前であり、角変形は生じていない状態である。②は熱源が評価点よりも手前にあり、評価点の断面では既溶接部の角変形影響を受けることになる。ここで、角変形の角度が正の値から増加しているのは母材両端が上昇する挙動を表しており、模式図②に示すように開先角度が狭まる挙動となる。③は熱源が評価点直上に到達した時点を示している。角変形の角度がわずかに低下しているため、開先角度が広がる挙動をとることが確認できる。これは、溶接金属が液相であり、熱源近傍が熱膨張しているためであると考えられる。④は熱源が評価対象断面を通過した後を示している。③から④に至る過程で大きく変形し、角変形の角度が正から負に転じる。溶接金属は先行電極で形成された溶接金属下部から凝固を開始するが、そのときの溶接金属上部は液相であるため周囲の拘束度は小さく、変形への寄与は小さい。その後熱源が前方に移動し、上部が徐々に凝固していくと、既に凝固している下部に拘束されて上部の熱収縮が角変形につながるため、このような大きな変形が生じる。⑤は熱源が仮付け部を通過した後を示しており、評価点がBTRにあることを示している。ここでは、角変形の角

度が上昇傾向にあり、模式図⑤に示すように開先角度が狭まる挙動をとることが確認できる。このとき、評価点には引張方向のひずみが発生する。そして、仮付け部を完全に溶融した瞬間、それまで板の変形を抑制していた仮付けによる拘束が開放され、溶接金属を引き裂く方向にひずみが急速に増大する。その結果、図11に示すように、定常部に比べて仮付け部近傍の溶接金属上部におけるBTR塑性ひずみ増分は大きくなる。また、板厚が大きくなると母材の曲げ剛性の増加が大きくなると考えられる。そのため、板厚16 mmと比較して板厚25 mmおよび32 mmでは溶接線全線にわたって溶接金属上部のBTR塑性ひずみ増分が大きくなり、高温割れが発生するものと考えられる。⑥は溶接終了前を示しており、⑤から⑥にかけて角変形の角度が増加し、負の値から正の値に転じている。したがって、模式図⑥に示すように開先角度が狭まり、V型の角変形となる。⑦は溶接終了後室温まで冷却した状態を示している。⑥の直後に溶接終端の仮付けが溶融し、その瞬間に熱源近傍の膨張変形を抑制していた拘束が開放される。そのため、評価対象断面においてはV型の角変形から開先角度がいったん広がる挙動となる。溶接終了後は溶接金属が収縮するため開先角度が狭まる挙動となり、最終的には⑦に示すような変形状態となる。

このように高温割れの影響因子は多岐にわたり、材料種、溶接入熱条件、電極間距離、開先条件、仮付け状況、鋼材の拘束条件等が複雑に作用している。このため、実験室において高温割れを発生させない適正条件を抽出していたとしても、実際の施工現場では高温割れが発生してしまい、現場で多くの試行錯誤を繰り返すことも少なくない。したがって、前節で紹介したようなシミュレーション手法を用いて実構造物において高温割れ発生リスクのある箇所の事前予測、これを抑制する上で各種影響因子をどのように制御すべきかの施工指針を得ることは、現場での試行錯誤を低減する上で有意義であり、本解析手法は有用なツールになり得ると考えられる。

3. 実構造物を対象とした溶接変形解析事例

造船における板継工程では、片面サブマージアーク溶接法であるFCBTM法²⁾が広く適用されている。FCBTM法は銅板の上に裏当てフラックス(本稿ではFAMILIARCTM PF-I50R)を均一な厚さに敷き、それをエアホースなどにより開先裏面に押し当て、表フラックス(本稿ではFAMILIARCTM PF-I55E)およびワイヤ(本稿ではFAMILIARCTM US-36)を用いて多電極サブマージアーク溶接する片面施工法である。いっぽう、近年、薄板(板厚10 mm程度)での板継工程における溶接変形低減を目的に、2電極ガスシールドアーク溶接法であるHT-MAGTM法³⁾が開発されている⁶⁾。HT-MAGTM法は深溶込み化のために先行極にソリッドワイヤであるFAMILIARCTM MG-50HMを用い、後行極にはビード形

脚注2) FCBは当社の登録商標である。

脚注3) HT-MAGは当社の登録商標である。

状を改善すべくFCWであるFAMILIARC™ MX-50HMを用いる施工法である。本稿では、実構造物を対象とした場合におけるFCB™に対するHT-MAG™の変形量低減効果について、理想化陽解法FEMを用いて解析した事例を紹介する。

変形解析対象ワークを図13に示す。板厚9.5 mmの薄板を溶接長12 mとし、3本の溶接線により板継がなされる15.8 m幅のブロック建造工程を解析した。2, 3本目の溶接パスのスタートは前パスの溶接終了直後とした。なお、溶接金属および母材の材料定数は図8と同様とし、境界条件として図13中の①, ②, ③に示す点の裏面をそれぞれxyz方向, xy方向, z方向で拘束した。解析による溶接金属の断面形状および板厚9 mmにおける溶接後の断面マクロ組織を図14に示す。解析より、1,500℃以上に加熱された領域が溶接金属の断面マクロ組織の形態と同様であることが確認された。また、解析条件を表2に示す。溶接部近傍の断面におけるメッシュ間隔の最小サイズを1.5 mm, 溶接線方向のメッシュサイズを10 mmとした。FCB™の節点数と要素数は1,300,605と905,554であり、HT-MAG™の節点数と要素数は1,257,477と、963,202とした。HT-MAG™の溶接入熱はFCB™の1/3程度であるが、いずれも1パス施工であり、良好な溶込み形状になっている。1本目の溶接パス終了後の板厚方向の変位量を図15, 3本目(最終溶接パス)終了後の板厚方向の変位量を図16に示す。なお、板厚方向

の変位量は溶接前の板裏面を基準点としている。また、計算手法の都合上、1本目の溶接による1, 2枚目の板の変形に追従して未溶着である3, 4枚目の板が変形する。2本目の溶接時も同様である。板全域にわたり、板厚方向の変位量はHT-MAG™が小さい。溶接線中央(X=6000)における角変形量を図17に示す。両施工法ともにV型の角変形となるが、板厚方向の最大値と最小値の差はHT-MAG™で63 mm, FCB™で185 mmであり、HT-MAG™はFCB™の1/3程度である。また、溶接開始部を基準とした縦曲がり変形量を図18に示す。なお、施工法によって溶接金属形状が異なるため、母材中央である3枚目の板中央における縦曲がり変形量を比較した。両施工法は変形方向が異なっており、HT-MAG™は溶接進行方向に進むにつれて下方に沈み込む変形であるが、FCB™では逆に反り上がる変形となる。計算手法の都合から、縦曲がり変形量の比較に対して基準線が固定できないため、X=0における接線からの変位量とした。接線からの最大変位量はHT-MAG™で23 mm, FCB™で82 mmであり、HT-MAG™の縦曲がり最大変位量はFCB™の1/3以下であることが確認できる。

溶接変形は溶接入熱の影響が大きいものの、電極数や電極間距離、開先条件や拘束条件、溶接順序などの因子も変形挙動に影響を与える。本解析手法では、これらを考慮した実大サイズの変形解析(上記の解析2事例)を

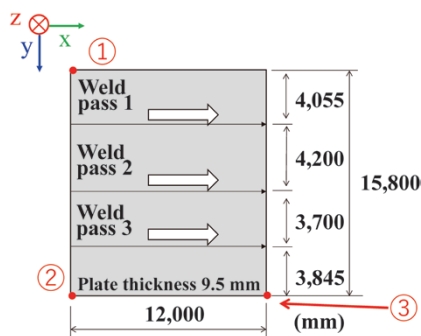


図13 変形解析ワークの形状

Fig.13 Shape and dimensions for deformation analysis

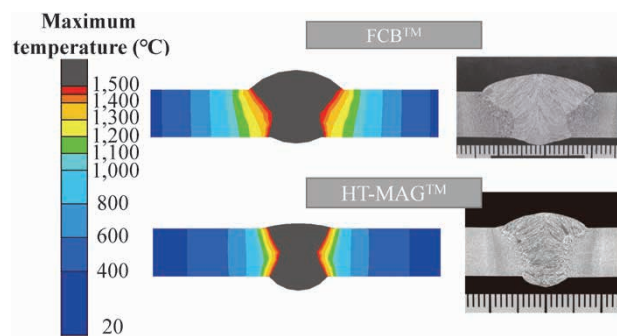


図14 解析による溶接金属断面形状

Fig.14 Cross sectional shape in analysis

表2 FCB™およびHT-MAG™の解析条件
Table 2 Analysis conditions of FCB™ and HT-MAG™

	Leading electrode	Trailing electrode 1	Trailing electrode 2	Welding speed	Total heat input	Number of nodes	Number of elements
FCB™	1020 A-33 V	700 A-40 V	700 A-45 V	800 mm/min	6.99 kJ/mm	1,300,605	905,554
HT-MAG™	460 A-32 V	250 A-28 V	—	600 mm/min	2.14 kJ/mm	1,257,447	963,202

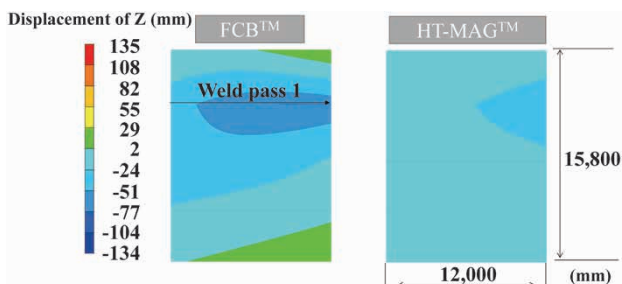


図15 板厚方向変位量(1本目溶接後)

Fig.15 Displacement of thickness direction after first pass welding

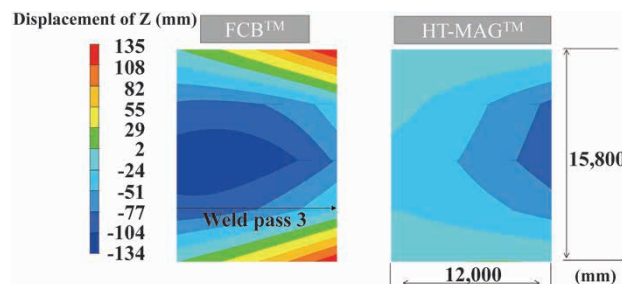


図16 板厚方向変位量(3本目溶接後)

Fig.16 Displacement of thickness direction after third pass welding

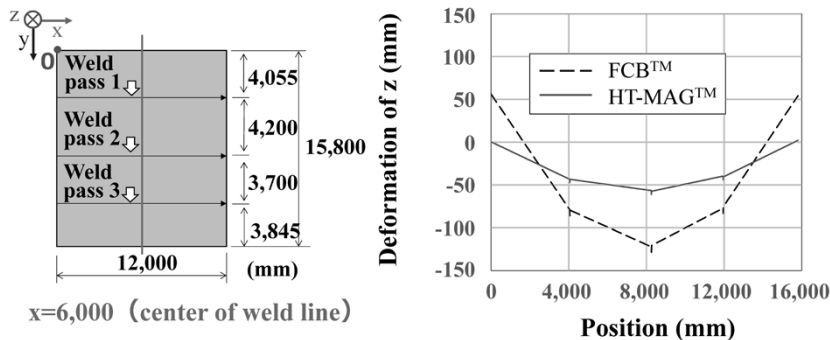


図17 角変形解析結果
Fig.17 Analysis results of angular deformation

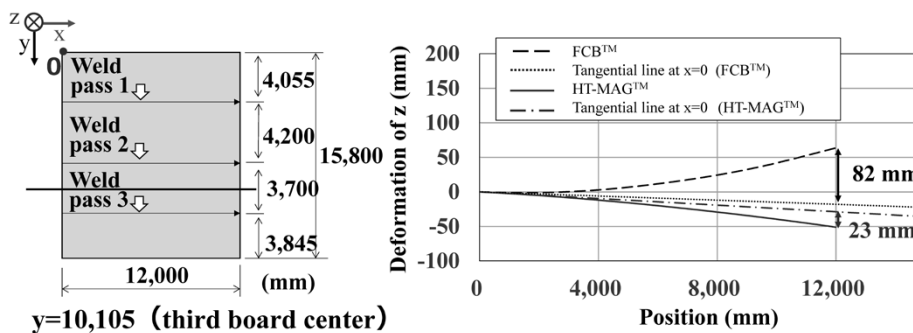


図18 縦曲がり変形解析結果
Fig.18 Analysis results of longitudinal bending deformation

約157hで完了できている。同等のメッシュサイズを適用した静的陰解法FEMでは100倍以上の時間を要すると想定され、これまで困難とされていた大規模構造物の組立溶接解析において、理想化陽解法FEMは非常に効果的な手法であるといえる。

むすび = 理想化陽解法FEMを用いた高温割れ解析および実構造物サイズにおける溶接変形解析手法を報告した。その結果を以下に示す。

- ①高温割れ解析では、BTR内で発生する塑性ひずみの増分値および温度勾配ベクトルを高温割れ発生指標として評価した。溶接実験結果との比較により、本解析手法を適用すると高温割れの発生を予測できる可能性が示唆された。
- ②変形解析では、FCB™法およびHT-MAG™法を用いて、実構造物サイズを対象とした検討を行い、本解析

手法を適用すると従来は困難であった大規模解析であっても高速かつ高精度に変形予測できることを示した。

実験室では確認が困難な溶接問題は多くあるが、本稿で示した解析手法による「予測」、「性能評価」も溶接ソリューションの1つであると考えられる。今後もさまざまな溶接ソリューションを活用して、顧客のものづくりに貢献していきたい。

参考文献

- 1) 柴原正和ほか. 溶接学会誌. 2014, Vol.83, No.7, p.549-554.
- 2) 生島一樹ほか. 溶接学会論文集. 2013, Vol.31, No.1, p.23-32.
- 3) 生島一樹ほか. 溶接学会論文集. 2015, Vol.33, No.1, p.69-81.
- 4) 仙田富男ほか. 溶接学会誌. 1972, Vol.41, No.6, p.709-723.
- 5) 柿崎智紀ほか. 溶接学会平成29年度秋期全国大会講演概要. 2017-9-11/13, 溶接学会, 2017, p.418-419.
- 6) 袁 倚旻. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.1, p.5-10.