

M10 パイプ板継ぎ溶接問題における 3次元溶接高温割れ解析手法の確立

土橋 知幸 (指導教員 柴原・深沢・池田・馬場)

Development of 3D analysis method for Welding Hot Cracking on pipe joint

by Tomoyuki Dobashi

Abstract

In order to avoid the hot cracking, experiments under a variety of conditions are conducted. The influence of various factors on the hot cracking is investigated. The results are generally reflected on the design of the shape and size of the joints or welding conditions etc. However, it is not efficient to examine many cases of the experiments because it costs too much. Therefore, if the experiments can be replaced by the computations, the production efficiency improves greatly. Much information can be obtained as the results of the computations. Thus, authors developed a 3D static implicit finite element method (FEM) for hot cracking using temperature dependent interface element. This method can predict the formation and extension of hot cracking. However it is difficult to analyze large-scale structure by static implicit FEM because of the limitation of the computing time and memory consumption. And it is impossible to apply to pipe joint. Meanwhile, Idealized Explicit FEM exists as an analytical method which can simulate the residual deformation and stress distribution at very short time and low memory consumption. In this study, the authors developed a new analytical method for hot cracking using Idealized Explicit FEM for improvement of computing time and memory consumption.

1. 緒 言

溶接施工においては、材料の選択や条件の選定などが適切でない場合、溶接欠陥が発生する場合があります。問題となっている。溶接欠陥は溶接継手の特性に極めて大きな影響を与えることから、溶接部の性能と健全性を保障するためには、溶接欠陥を制御・防止するための方策が必要不可欠となっている。船舶建造時に用いられているFCB溶接時における大型鋼板の板継ぎ溶接の施工では、始末端部において、溶接欠陥である溶接高温割れが発生しやすい。したがって、施工終了後に超音波やX線など非破壊検査を実施し、欠陥が発見された部分については補修溶接がおこなわれている。

高温割れは溶接施工上において、重大な溶接欠陥の一つであるため、数々の研究がなされている。既往の研究においては冶金学的な立場からのものが多数を占めており、具体的には、含有元素等の冶金学的因子が割れの発生に及ぼす影響や溶け込み形状の影響などについて実験を中心に検討を行い、各種合金の割れ感受性を評価している。しかし、実験では多くの時間と労力を必要とし経済的ではない。得に、配管の周溶接実験ではその経済的問題は顕著である。そこで、配管の周溶接問題に関して、実験的手法を計算的手法に置き換えることができれば、効率やコストが大きく向上し、なおかつ計算結果として多くの情報を得ることができると考えられる。

高温割れに対し計算的に評価を行える手法として柴原らが開発した温度依存型界面要素を用いた静的陰解法FEM3次元溶接高温割れ解析法が挙げられる。利点として

は、BTR(凝固脆性温度領域・Solidification Brittleness Temperature Range)などの冶金学的因子、溶接条件や拘束条件などの力学的因子をパラメータとして、割れ発生後の割れの進展・停止をシミュレートできる点である。しかし、静的陰解法FEMによる高温割れ解析手法では、計算時間・メモリ使用量の制約から、数万要素を超えるような解析モデルへの適用は現実的ではなく、対象とするモデルが単純な板継ぎ溶接問題程度に限られるというのが現状であり、配管の周溶接問題に適用することは不可能であった。また、割れの発生・進展は静的平衡状態を維持しながら安定に進行するとは限らず、状況によっては割れ進展状態が不安定となり現象が動的に移行することがある。このような場合には、もはや静的解析で解を追跡することは不可能であり、動的解析の導入が必要となっていた。

一方、大規模な溶接問題の過渡の応力・変位を非常に短時間かつ、少ないメモリ消費で解析する手法として、理想化用解法FEMが挙げられる。この手法は静的陰解法FEMにおける溶接現象の温度変化に伴う各荷重ステップを動的な問題と捉え、計算時間およびメモリ使用量を大幅に低減できる手法である。理想化用解法FEMを用いることで、80000接点の解析モデルで、計算時間に関しては役12倍の高速化、メモリ使用量に関しては40倍の低減を可能にしている。また、静的陰解法のように荷重増分を1荷重ステップに与えるのではなく、陽解法の最初の数100ステップ程度でスロープ状に与えるため、より安定的に解析を続けることが可能である。

そこで本研究では、理想化陽解法 FEM を用いた 3 次元高温割れ解析手法を開発し、計算速度、メモリ使用量及び解析安定性の向上を図り、配管の周溶接問題に適用可能な解析手法の確立を目的としている。

2. 溶接高温割れ解析理論

2.1 溶接高温割れのモデリング

溶接高温割れは凝固割れと言われ、溶接により加熱された溶融部が凝固・収縮する際に発生すると言われている。本研究では、高温割れの発生を、液相線温度と固相線温度の間の温度域である BTR における界面の結合強度の低下としてとらえ、表面エネルギー γ と界面強度 σ_{cr} の温度依存性により表わすことを考えている。この解析法では、割れ表面間の結合応力 σ_{cr} と新しい表面の生成に必要な表面エネルギー γ の両者をパラメータとして含むポテンシャル関数に基づき導かれた界面要素を用いて、割れ表面の生成をモデル化する。そして、この界面要素を高温割れ進展経路に配置することで、高温割れの発生および進展の解析を行う方法である。したがって、割れが発生あるいは進展するか否かを計算ステップごとに判断する必要はなく、割れは、荷重や変位の増加に従って自然に、しかも表面エネルギーに相当するエネルギーの散逸を伴いながら進展するという点が本解析法の特徴である。なお、高温割れは複雑な物理現象であり、凝固現象をはじめ結晶粒径や粒界への固溶元素の析出、さらには相変態等の多様な影響を一般に受けるが、本研究ではこれらを無視し、パラメータ γ および σ_{cr} は温度のみに依存すると仮定した。

割れの問題は、本質的にバルクとしての材料の変形および界面生成の二つの現象を含んでいる。バルク材の変形特性は、降伏応力やヤング率によって支配されると考えられる。一方、高温割れは粒界割れであり、割れが発生する結晶粒界の特性は、割れ界面強度 σ_{cr} 、表面エネルギー γ 、これらと従属関係にある限界変位 δ_{cr} によって表されると考える。ここで、応力 σ が割れ界面強度 σ_{cr} より大きく($\sigma > \sigma_{cr}$)、限界変位 δ_{cr} 以上の開口変位が生じる時に割れが発生すると考える。一方、高温割れは BTR 内で発生すると考え、BTR と想定した高温域において、降伏応力が界面強度よりも大きくなると仮定する。また、割れの進展についてはき裂進展の場合、単位面積当たり 2γ なる表面エネルギーを消費しながら進展すると考える。以上のような高温割れの特性を温度依存型界面要素の形に理想化し、これを通常の熱弾塑性有限要素法に導入することで、溶接高温割れ解析を可能としている。

2.2 温度依存型界面ポテンシャルエネルギー関数

高温割れ解析において、割れが発生・進展し、新しい表面が形成される時には、表面エネルギー 2γ に相当するエネルギーが消費され、なおかつこれが温度の関数になっていると仮定する。このような性質を示すポテンシャル関数は無数に考えられるが、本研究においては、Lennard-Jones 型ポテンシャル関数を用いた。この場合、単位面積あたりの界面ポテンシャルエネルギー ϕ は次式で表される。

$$\phi(\delta, T) = 2\gamma(T) \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{2n} - 2 \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^n \right\} \quad (1)$$

ここで、 δ は割れの開口量であり、定数 γ 、 n 及び r_0 はポテンシャルを規定するパラメータである。特に、 γ は新しい単位面積の割れ表面を生成するのに必要な表面エネルギーであり、本研究では γ のみが温度依存性を有すると仮定した。

一方、ポテンシャル関数 ϕ の割れ開口量 δ に関する微分 $d\phi/d\delta$ 、すなわち、

$$\sigma = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} = \frac{4\gamma n}{r_0} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{n+1} - \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{2n+1} \right\} \quad (2)$$

は、割れ表面に作用する単位面積あたりの結合力を表わし、

$$\frac{\delta}{r_0} = \left(\frac{2n+1}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3)$$

の時に単位面積あたりの結合力は最大値 σ_{cr} となる。すなわち、

$$\sigma_{cr}(T) = \frac{4\gamma n}{r_0} \left\{ \left(\frac{n+1}{2n+1} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{n+1}{2n+1} \right)^{\frac{2n+1}{n}} \right\} \quad (4)$$

ここで、 σ_{cr} その瞬間の温度における限界強度を表わし、これを割れ界面強度と呼ぶことにする。また、 σ_{cr} を与える変位量 δ を限界変位量 δ_{cr} と呼ぶことにする。

次に、開口変位量 δ と結合応力 σ の関係を Fig.1 に示す。同図に示されるように、 r_0 は寸法パラメータであり、 r_0 が大きい時には、界面が破断する際の開口変位が大きくなることが分かる。さらに、表面エネルギー γ が温度依存性を示すと仮定して、BTR 温度幅を定義したものが Fig.2 である。BTR 温度幅とは、材料が凝固時に脆化する温度域である高温脆化温度域を示し、本研究では、この高温脆化を力学的にとらえ、BTR において材料の降伏応力 σ_Y が界面強度 σ_{cr} より大きく、割れが発生する可能性がある、すなわち $\sigma_Y > \sigma_{cr}$ と仮定した。なお、Fig.2 の場合の BTR 温度幅は、1300°C~1450°C である。

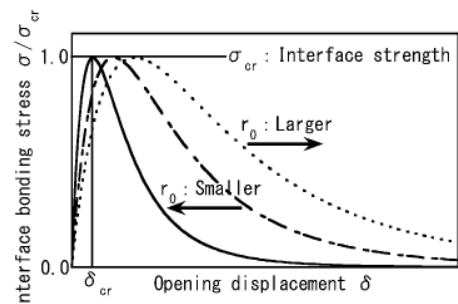


Fig.1 Stress-opening displacement curves of interface element

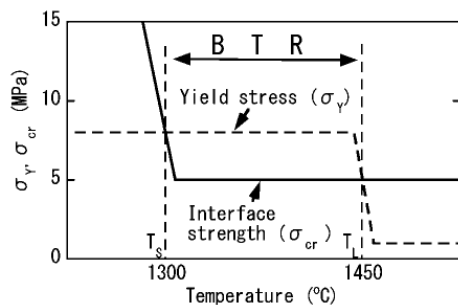


Fig.2 Temperature dependent yield stress σ_Y and critical stress σ_{cr} of interface element

2.3 温度依存型界面要素の荷重ベクトルと剛性行列

本節では温度依存型界面要素の荷重ベクトルと剛性行列の導出について説明する．温度依存型界面要素のポテンシャルエネルギー $U_s^e(u_0)$ は，界面ポテンシャル関数 $\phi(\delta, T)$ の積分として次式で与えられる．

$$U_s^e(u_0, T) = \int \phi(\delta, T) dS^e \quad (5)$$

ここで， $\int dS^e$ は界面要素の面積にわたる積分を表わす．さらに，節点変位，温度，開口変位が Δu_0 ， ΔT ， $\Delta \delta$ 変化した時のポテンシャルエネルギーを $U_s^e(u_0 + \Delta u_0, T + \Delta T)$ とし，これを Δu_0 ， ΔT ，についてテーラー展開すると，次式が得られる．

$$\begin{aligned} U_s^e(u_0 + \Delta u_0, T + \Delta T) &= \int \phi(\delta + \Delta \delta, T + \Delta T) dS^e \\ &= \int \phi dS^e + \int \left[\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial T} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T \Delta T \right] \{\Delta u_0\} dS^e \\ &\quad + \frac{1}{2} \int \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial^2 \delta \partial T} \Delta T \right) \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T \{\Delta u_0\} dS^e + H.O.P \end{aligned} \quad (6)$$

ここで，節点変位増分に関する一次項と二次項をそれぞれ次のようにまとめると，次式が得られる

$$\int \left[\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial T} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T \Delta T \right] \{\Delta u_0\} dS^e = -\{f\}^T \{\Delta u_0\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial^2 \delta \partial T} \Delta T \right) \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T \{\Delta u_0\} dS^e \\ = \frac{1}{2} \{\Delta u_0\}^T [K] \{\Delta u_0\} \end{aligned} \quad (8)$$

よって，温度依存型界面要素の荷重ベクトル $\{f\}$ と剛性行列 $[K]$ は，一次項および二次項の係数として求められる．すなわち，

$$\{f\} = - \int \left[\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial T} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T \Delta T \right] dS^e \quad (9)$$

$$[K] = \int \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial^2 \delta \partial T} \Delta T \right) \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\} \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial u_0} \right\}^T dS^e \quad (10)$$

3. 開発手法の性能評価

3.1 陰解法との比較

開発手法である理想化陽解法FEMによる高温割れ解析法の性能を評価するために，陰解法FEMを用いた高温割れ解析を精度検証の対象とした．解析モデルについては，梨型ビード割れが問題となっている狭開先溶接モデルを用い，両手法の比較を行った．解析に使用したモデルは，板長さ 100[mm]，板幅 50[mm]，板厚 10[mm]の狭開先溶接継手 1/2 モデルとし，総節点数は 7956，総要素数は 6600 である．外部荷重は与えないものとし，入熱条件は電流を 100[A]，電圧を 30[V]，溶接速度を 10[mm/s]，熱効率を 0.7 とし， $x=20$ [mm]の位置から $x=80$ [mm]の位置まで加熱するものと仮定した．また，き裂面の特性を示す界面要素に含まれるパラメータは， $r_0=20$ [μ m]，BTR の温度幅を 1200℃から 1500℃までの 300℃とした．ここで，溶接高温割れは溶接中心面上に発生するので，以上のパラメータをもつ温度依存型界面要素を溶接中心面上に配置した．

Fig.3, Fig.4 はそれぞれ溶接終了時の板幅方向の応力分

布示と変位分布を示しており，(a)・(b)は陰解法 FEM 及び理想化陽解法 FEM による解析結果である．Fig.3, Fig.4 いずれにおいても，陰解法 FEM 及び理想化陽解法 FEM による解析結果が良好に一致していることが確認できる．また，Fig.5 は溶接部中央横断面の y 方向残留応力と y 方向残留変位を示しており，それぞれ良好な一致が確認できる．なお， $x=80$ [mm]の地点に過大な y 方向の残留変位が発生している．この変位は高温割れにより発生すると考えられ，開発手法においても高温割れという現象を解析できていることが確認できる．以上より，応力，変位，高温割れにおいて，開発手法は陰解法と同等の解析精度を有していると考えられる．

3.2 解析安定性についての検討

Table.1 に解析安定性に関して，陰解法と陽解法との比較を行った結果を示す．同表の上段の値は r_0 の値を表しており，開発手法及び従来手法を用いて，解析を行ったとき，解析可能であれば‘○’，解析不可能であれば，‘×’示す．同表より，陰解法では r_0 が小さい時，解析不可能となる傾向にあることがわかる．これは Fig.1 に示した様に， r_0 が小さい程，開口変位量-結合応力の関数の勾配の変化が大きくなり，非線形性が強くなるためと考えられる．また，陰解法では r_0 が 0.025 以下になると，解析不可能となる一方で，陽解法では r_0 が 0.005 の時でも解析可能であることが確認できる．以上の結果より，解析安定性の面からも，開発手法は有用であると考えられる．

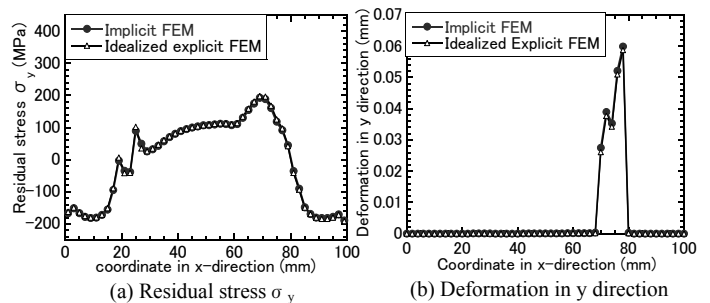
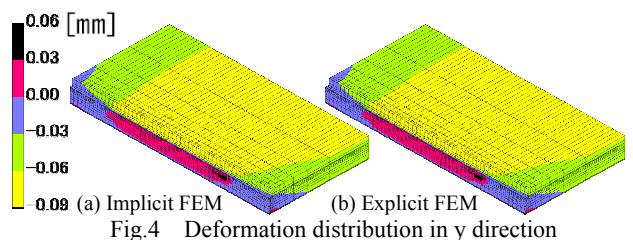
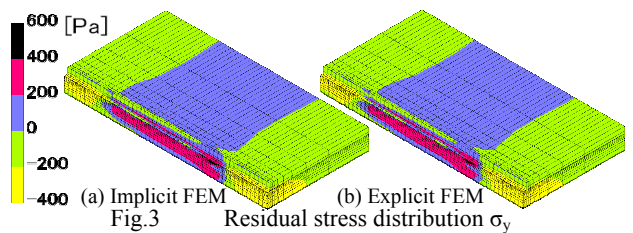


Fig.5 Comparison between Implicit FEM and Explicit FEM

Table1 Stability of computation

r_0	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040
Implicit	×	×	×	×	×	○	○	○
Explicit	○	○	○	○	○	○	○	○

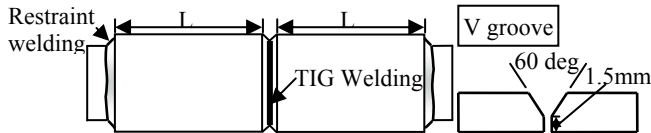


Fig. 6 Schematic illustration of tube restraint weld cracking test.

4. 配管の周溶接問題への適用

4.1 配管周溶接時における拘束高温割れ試験

開発手法と実現象との整合性を検証するために、配管の周溶接を対象とした拘束高温割れ試験を行った。Fig. 6 に拘束高温割れ試験の施工要領を示す。同図は実験装置を模式的に表したものであり、HP 系鋼管を突き合わせて、管内面に挿入した SUS304 製の拘束用の心棒と管端をすみ肉溶接にて拘束して拘束溶接試験体とした。すなわち、HP 系鋼管の軸方向両端は完全に拘束されていることになる。なお、溶接配管寸法は外径 55[mm]とし、ルートフェイス厚さ 1.5[mm]、開先角片側 30°の V 開先を機械加工により施した。そして、試験片の中央の開先部に、Table.1 に示す溶接材料を用いて電流 100[A]、溶接電圧 12[V]、溶接速度[10cm/min]にて TIG 溶接をした。また、高温割れの発生有無の評価は、ビード表面の目視および各試験片から採取した 5 断面につき、500 倍の工学顕微鏡にて割れの有無を観察することにより行った。

拘束高温割れ試験を配管の肉厚を 7[mm]で一定とし、配管長さ L を 25[mm]～590[mm]まで 6 通りに変化させて行った。Fig. 7 に配管長さが 50[mm]の時における溶接終了時の溶接線近傍概観を示す。同図は溶接開始位置からの角度が 0°、90°、180°、270° の 4 箇所の写真を示しており、0° 位置付近に高温割れが発生していることが確認できる。また、その他の配管長さの時にも 0° 位置付近に高温割れが発生することを確認している。この原因として、配管の周溶接では、溶接開始時に過熱された箇所溶接終了時に再度入熱が行われ、より大きな変形が発生するためと考えられる。

4.2 開発手法と拘束高温割れ試験との比較

開発手法を用いて拘束高温割れ試験と同様の条件で解析を行った。Fig. 8 に配管長さが 50[mm]の時の解析結果を示す。解析モデルの要素分割は周方向に 200 分割、肉厚方向に 14 分割、長さ方向に 18 分割であり、要素数は 25200、節点数は 30000 となっており、 r_0 の値は 0.019 とした。なお陰解法では、要素数 20000 を超える配管モデルはバンド幅の影響により解析困難であった。Fig. 8 より、溶接始端部に過大な軸方向変位が発生していることがわかる。この傾向は、高温割れ発生領域の観点から、Fig. 7 に示した高温割れ試験結果と定性的に一致している。

また、Fig. 9 に解析及び実験における配管長さに対する高温割れ感受性依存性を示す。横軸は配管長さ、縦軸は溶接部全長に対する割れが発生した領域の比率を表している。同図より、解析結果と実験結果の間に若干の差異が確認できるものの、解析及び実験共に配管長さが長い程、高温割れ発生領域が狭くなり、配管長さが 300[mm]以上では割れがほとんど発生しなくなることが確認できる。これは、配管の長さが短い程、配管両端の拘束部から溶接部までの距離が短いことになり、拘束が溶接部近傍に及ぼす力が大きくなっているためと考えられる。以上の結果より、開発手法による解析結果は実験結果と定

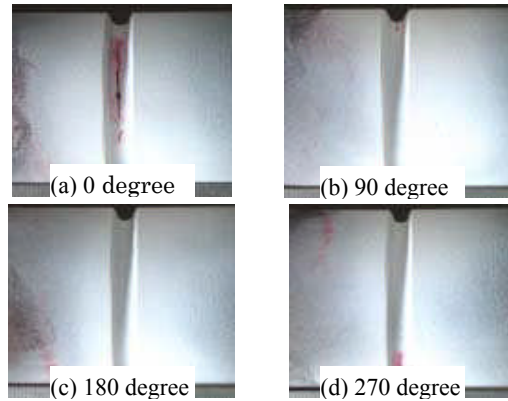


Fig. 7 Result of experiment (tube length = 50mm)

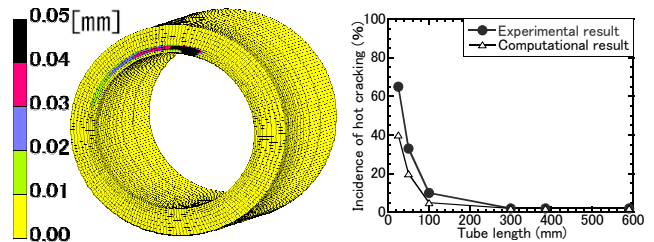


Fig. 8 Result of computation

Fig. 9 Incidence of hot cracking

性的に一致していることを確認した。なお、このモデルで計算時間を約 1 日にまで抑えることが可能であった。

5. 結 言

本研究では、理想化陽解法 FEM を用いた 3 次元高温割れ解析手法を開発し、平板の狭開先溶接問題及び配管の周溶接問題に適用した結果以下の知見を得た。

- 1) 平板の狭開先溶接問題に開発手法を適用したところ、開発手法は陰解法とほぼ同等の精度の解析が可能であることを確認した。
- 2) 配管の周溶接における拘束高温割れ試験を行い、配管の長さが短い程、高温割れの発生領域が広がることを確認した。この傾向は開発手法による解析結果と定性的に一致している。
- 3) 静的陰解法 FEM では解析困難である、要素数が 25200、節点数は 30000 の配管の周溶接モデルに関して、開発手法による計算時間は約 1 日であることを確認した。
- 4) 計算時間、メモリ使用量、解析安定性および実現象との整合性の観点から、開発手法は有用であり、本手法を用いることで、パイプ板継ぎ溶接問題における高温割れの予測シミュレーションを可能とした。

参 考 文 献

- 1) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた高温割れのモデル化と割れ発生予測, 軽金属溶接 41(8) (488) pp.363～373 2003/8 軽金属溶接構造協会
- 2) 生島一樹: 理想化陽解法 FEM による溶接力学解析法の開発, 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集(2009 年 11 月)
- 3) 小薄孝裕, 小川和博: 熱力学データベースと連携した溶接凝固過程でのマイクロ偏析挙動予測モデルの開発—第二報—, 溶接学会全国大会講演概要 85 集