

B322 溶接高温割れを考慮した溶接諸条件最適化システムの開発

旦 越雄 (指導教員: 柴原, 正岡)

1. 緒言

実際の溶接施工では、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¹⁾がある。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証するためには、溶接欠陥を制御・防止するための方策が必要不可欠である。

一方、高効率な溶接法として狭開先溶接法が採用されている。この溶接法は、Fig.1に示すように、I形の狭い開先を用いて厚板の突合せ溶接を行う溶接法であり、通常の開先を用いる溶接と比べ、総入熱量を小さく抑え、かつ溶接パス数も少なくすることができる。しかし、溶接条件によってはFig.2に示すような梨形ビード割れが発生する場合があります、問題となっている。梨形ビード割れの形成は、溶け込み形状の幾何学パラメータP/WやP/W₀に深く関係していることが報告²⁾されている。

そこで本研究では、狭開先溶接を実施した際に発生する梨形ビード割れを対象とし、入熱量や溶け込み形状のアスペクト比 P/W などが梨形ビード割れに及ぼす影響について、温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法³⁾により検討を行った。さらに本手法に対し、最適化手法であるComplex Method(以下CM)と遺伝的アルゴリズム(以下GA)を導入することにより、割れが発生しない最適条件を得るための溶接諸条件最適化システムを開発した。

2. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法³⁾

2.1 溶接高温割れのモデリング

溶接金属部で発生する高温割れは、凝固割れと言われ、

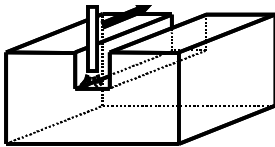


Fig.1 狭開先溶接法

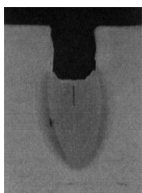


Fig.2 梨形ビード割れ

溶接により形成された溶融部が凝固・収縮する際に発生する。材料学的には結晶粒界に発生する粒界割れの一種であると考

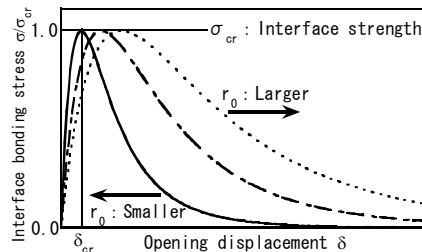


Fig.3 開口変位量と結合応力の関係

えられるため、本研究では、この材料学的現象である結晶粒界の強度低下を力学的にとらえ、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ができる⁴⁾と仮定した。一方、結晶粒のバルクとしての変形特性は、降伏応力やヤング率によって表され、結晶粒界、すなわち界面の特性は、割れ界面強度および表面エネルギーによって表されると考える。また、割れの進展は、き裂進展の場合と同様、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。

本研究で用いた高温割れ解析法は、以上のような高温割れの基本的特性を温度依存型界面要素の形に理想化し、これを熱弾塑性有限要素法に導入したものである。

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、割れにより新しい表面が形成される現象をモデル化するには、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であるようなポテンシャル関数が必要となる。そのような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 ϕ は次式で表される。

$$\phi(\delta, T) = 2\gamma(T) \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^6 \right\}$$

ここで、 δ は割れの開口変位量であり、 ϕ に含まれる定数 γ および r_0 はポテンシャルを規定するパラメーターである。 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、 r_0 は界面ポテンシャル形状を規定する寸法パラメーターである。本研究では、パラメーター γ 、つまり表面エネルギーのみが温度依存性を有すると仮定する。一方、ポテンシャル ϕ の割れ開口変位量 δ に関する微分、すなわち、

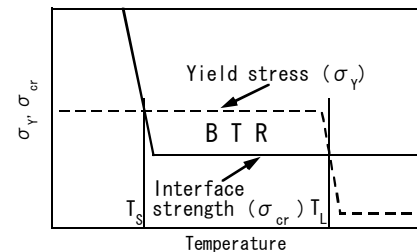


Fig.4 BTR の模式図

$$\sigma(T) = \frac{\partial \phi(T)}{\partial \delta} = \frac{24\gamma(T)}{r_0} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^7 - \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{13} \right\}$$

は、割れ表面に作用する単位面積あたりの結合応力を表わす。この、開口変位量 δ と結合応力 σ の関係を具体的に示した図が、Fig.3である。同図より、寸法パラメータ r_0 が大きき場合には、界面が破断する際の限界開口変位量 δ_σ が大きくなることが分かる。また、同曲線の最大値は $\sigma_\sigma(T)$ と定義され、 γ に比例して変化すると仮定した。ここで、温度上昇に伴う粒界の脆化を力学的に捉え、BTRにおいて $\sigma_Y > \sigma_\sigma$ と定義した。それを模式的に示した図がFig.4である。図中の T_L は液相線温度、 T_S は固相線温度を示している。このような力学的非線形特性を示す界面要素を、割れが発生し進展すると予想される経路に配置することで、高温割れ解析を実現した。

3. 狭開先溶接時の梨形ビード割れ解析

3.1 解析モデル

本研究では、溶接横断面内における梨形ビード割れを解析対象とし、二次元平面ひずみ問題と仮定した。Fig.5に梨形ビードに関するパラメータを示す。また、問題の対称性より、溶接縦断面に対し右側半分をモデル化し、その要素分割図をFig.6に示す。ここで、梨形ビード割れは溶接中心面上に発生するので、温度依存型界面要素を溶接中心面上に配置した。解析対象である材料は、SM490材であり、その材料定数および熱伝達係数の温度依存性をFig.7に示す。ここで、図中の変数は、以下の通りである。

α : 線膨張係数 E : ヤング率 σ_Y : 降伏応力
 c : 比熱 ρ : 密度 λ : 熱伝導係数 β : 熱伝達係数
 さらに、割れ特性を規定する、温度依存型界面要素に含まれるパラメータである寸法パラメータ r_0 を0.07mm、

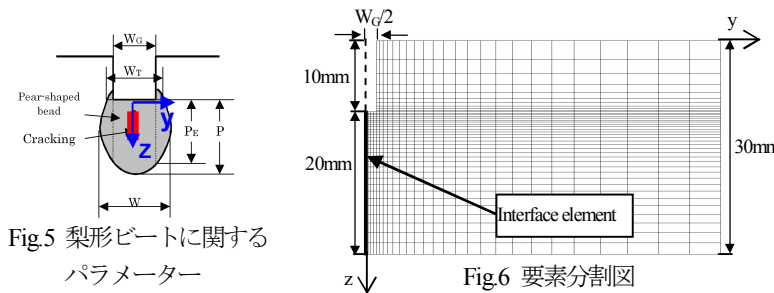


Fig.5 梨形ビードに関するパラメータ

Fig.6 要素分割図

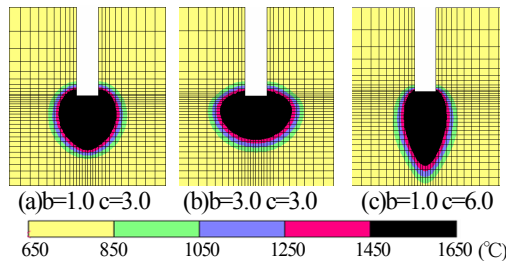


Fig.8 最高到達温度分布

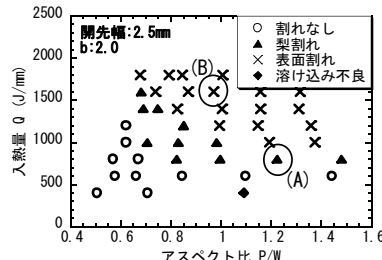


Fig.9 入熱量と溶け込み形状のアスペクト比が割れに及ぼす影響

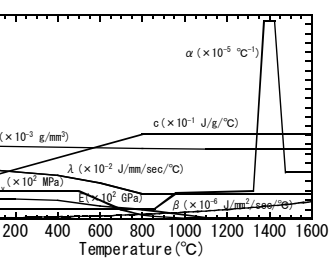


Fig.7 材料定数の温度依存性

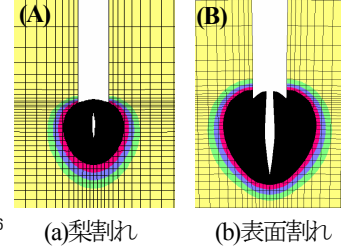


Fig.10 割れ変形図

BTRを1350-1450℃と仮定した。また、入熱はガウス分布と仮定し、以下の式と変数で定義する。

$$q(y,z) = Q \frac{1}{2\pi bc} e^{-\frac{y^2}{2b^2}} e^{-\frac{z^2}{2c^2}} \quad (z \geq 0)$$

$q(y,z)$: 入熱密度分布, Q : 入熱量

b, c : y, z 方向の入熱分布を定める代表長さ

ここで、開先幅 $W_c=2.5(\text{mm})$ および入熱量 $Q=1000(\text{J/mm})$ と仮定し、熱伝導解析を実施した結果、得られた最高到達温度分布をFig.8(a)-(c)に示す。(a)-(c)は、それぞれ入熱分布パラメータ b, c が異なる解析結果である。同図において、最高到達温度が融点である1450度以上の領域は溶け込み形状を示している。

3.2 解析結果

入熱量 Q と溶け込み形状のアスペクト比 P/W が割れに及ぼす影響は大きいとの報告²⁾を基に、本節ではそれらの影響について検討を行った。Fig.9は開先幅が2.5mmにおいて $b=2.0$ とした場合の、入熱量とアスペクト比が割れに及ぼす影響を示す。Fig.10の(a)および(b)は、それぞれFig.9中の(A)および(B)の条件における最高到達温度と完全冷却後における変形図を示したものである。

Fig.9 中における○印は割れが発生しなかった場合、▲印はFig.10(a)に示すような梨形ビード割れが発生した場合、×印はFig.10(b)に示すような割れが表面にまで達している場合を表している。◆印は開先幅より溶け込み幅 W が小さい場合を表しており、実際の溶接では溶け込み不良を意味するものである。

同図より、入熱量およびアスペクト比が大きい場合に割れが発生しやすいことが確認できる。特に $Q=1400(\text{J/mm})$ 以上では、ほぼすべてのケースにおいて割れが発生する結

果となった。また、入熱量およびアスペクト比が梨形ビート割れの発生条件よりもさらに大きい場合に、表面割れが発生することが確認できる。この理由としては、入熱量およびアスペクト比が大きい場合には、表面部付近の熔融池から母材への散熱が相対的に小さく、ビート表面が凝固するまでに時間がかかるため、板の内部で発生した割れが、ビート表面が凝固する前に表面まで貫通するからであると考えられる。

4. 溶接条件の最適化

界面要素を用いた高温割れ解析法に対し、最適化手法として、新たに Complex Method(CM)、遺伝的アルゴリズム(GA)を導入し、割れが発生しない最適な溶接条件を得ることが可能なシステムを開発した。今回、割れが発生しないという制約条件の下で、狭開先溶接の利点である、少ない入熱量で深い溶け込みを得るための最適な溶接条件を得ることを目標に、目的関数の設定を行った。

4.1 最適化手法

本研究で最適化手法として用いた CM と GA の解析手法について、簡単に説明する。

4.1.1 Complex Method(CM)

本手法は、多変数で構成される条件点 X_i の位置を、ある一定の規則に従い移動させることによって、目的関数の値を最大値に漸近させる手法³⁾である。今回 X の設計変数成分を Q, b, c の 3 つとし、条件点数を $i=4$ とした。主な解析手順は以下の通りであり、この模式図を Fig.11 に示す。

- (1) 条件点 X_i が持つ変数の初期値を、制限範囲内で乱数を用いて無作為に選択する。ただし、制約条件を満たすものとする。
- (2) すべての点において目的関数値 $F(X_i)$ を求め、最も低い点を X_R 、2 番目に低い点を X_G と定義する。
- (3) X_R 以外の条件点集合の重心位置を X_C とし、 X_R との延長線上に、 $F(X_G) < F(X_T)$ かつ制約条件を満足させる試行条件点 X_T を求める。
- (4) X_R を X_T に置き換え、新たに条件点集合を作成する。
- (5) (2) から (4) を繰り返し、収束が得られたら計算を終了する。

4.1.2 遺伝的アルゴリズム(GA)

GA とは、生物進化の過程をモデル化したアルゴリズム

である⁴⁾⁵⁾。解の探索には、設計変数を 2 進数などにコード化した遺伝子を用いる。以下に手順の概要を示す。

- (1) 制限範囲内の設計変数値をもつ遺伝子を、乱数を用いて N 個作成し、初期集団を形成する。ただし、制約条件を満たすものとする。
- (2) 次世代集団の親となる遺伝子を「選択」する。
- (3) 選択した遺伝子のある確率で「交叉」させ、制約条件を満たす新しい遺伝子を作成する。
- (4) (3) で作成された遺伝子のある確率で「突然変異」させ、遺伝子を変化させる。ただし、制約条件を満たすものとする。(次世代集団の形成。)
- (5) (2) から (4) を終了条件を満たすまで繰り返す。

ただし、今回の設計変数は Q, b, c の 3 種類であるため、遺伝子も 3 種類作成し、それらから 1 つの目的関数値が定まるようにした。また、「選択」は「ルーレット選択」、「交叉」は「一様交叉」を採用した。

4.2 解析条件

開先幅 W_G は 2.5, 3.2, 4.0, 5.0(mm) の 4 通りを仮定し、Q および b, c の初期値は、それぞれ 100~2000(J/mm) および 0.1~10.0(mm) の範囲で乱数を用いて与えた。最適化する目的関数としては P_E/Q を採用し、制約条件としては以下の 2 点を考慮した。

- ①：割れが発生しない
- ②：開先底が溶融する

また、GA で用いたパラメーターの値は Table 1 に示す通りである。

4.3 最適化計算結果

各開先幅において、CM および GA をそれぞれを用いて計算を行った結果を Table 2, 3 に示す。これらの表より、各開先幅において、溶融している開先底の長さ W_T の値がほぼ開先幅 W_G の値に一致していることがわかる。これは、 P_E/Q の値を最大にするため、与えられた入熱量でできるだけ P_E の長さを大きくするために、幅方向の入熱を抑えた結果であると考えられる。さらに、Table 2, 3 から得られた開先幅と P_E/Q の最大値との関係を Fig.12 に示す。同図より、開先幅が狭いほど P_E/Q の最大値が大きくなることが分かる。この結果より、開先幅が狭いほど効率的に深い溶け込みを得られると言える。

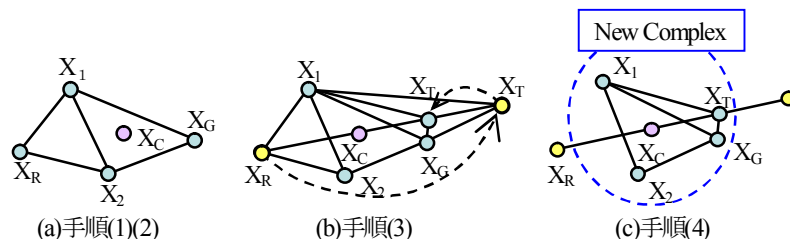


Fig.11 Complex Method の条件点の手順

Table 1 GA のパラメーター

世代数	100
個体数	10
遺伝子長	20(Q), 19(b,c)
交叉率	0.5
突然変異率	0.03

Table 2 最適化計算結果 (Complex Method)

W_G (mm)	Heat input parameters			Size of penetration shape			$(P_E/Q)_{\max}$ (mm^2/J)
	Q (J/mm)	b (mm)	c (mm)	W_T (mm)	P_E (mm)	P_E/W_T	
5.0	1166	2.04	5.33	5.07	5.73	1.13	4.91×10^{-3}
4.0	916	1.51	5.05	4.00	5.37	1.34	5.86×10^{-3}
3.2	689	0.10	4.17	3.20	4.88	1.52	7.08×10^{-3}
2.5	544	0.10	3.95	2.50	4.47	1.79	8.21×10^{-3}

Table 3 最適化計算結果 (GA)

W_G (mm)	Heat input parameters			Size of penetration shape			$(P_E/Q)_{\max}$ (mm^2/J)
	Q (J/mm)	b (mm)	c (mm)	W_T (mm)	P_E (mm)	P_E/W_T	
5.0	1109	2.01	5.05	5.05	5.43	1.08	4.90×10^{-3}
4.0	767	1.34	3.81	4.14	4.38	1.06	5.71×10^{-3}
3.2	649	0.10	3.81	3.23	4.56	1.41	7.02×10^{-3}
2.5	546	0.10	3.81	2.59	4.47	1.73	8.18×10^{-3}

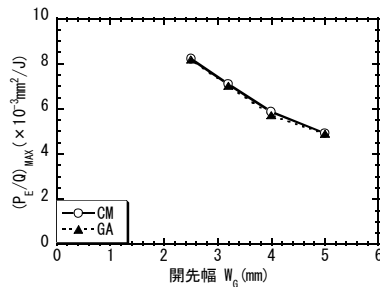
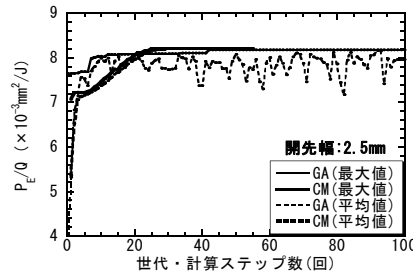
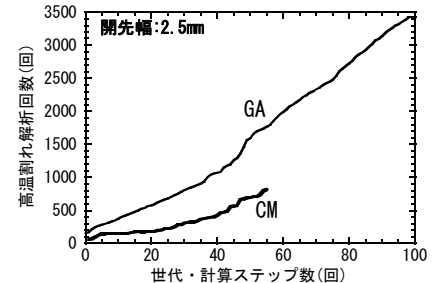
Fig. 12 開先幅と P_E/Q の最大値との関係Fig. 13 収束までの P_E/Q の値の履歴

Fig. 14 収束までの計算回数の履歴

4.4 最適化手法の比較

次に、開先幅が 2.5mm の場合において、CM および GA それぞれにおける収束までの P_E/Q の最大値の履歴と平均値の履歴を Fig. 13 に示す。また、計算時間を検討するための一つの指標である、高温割れ解析回数の履歴を Fig. 14 に示す。

Fig. 13, 14 より、CM に比べ GA のほうが最大値への収束が遅いことが確認できる。この理由として、CM はステップ数が進むにつれて探索範囲が狭まるのに対し、GA は世代が進んでも交叉や突然変位の影響で探索範囲が CM ほど速くは狭まらないことが挙げられる。すなわち、CM に比べて様々な設計変数値と目的関数値を持つ個体が GA には存在するからであると考えられる。また、CM では Fig. 11(b) に示す試行条件点のみにおいて目的関数値を求めるための高温割れ解析を行うが、GA では「交叉」や「突然変異」などのプロセスの計算の際、新しく生成された個体すべてにおいて高温割れ解析を行う必要があり、高温割れ回数が増大することも理由であると考えられる。

Table 3, 4 より、今回の解析条件では、求めた P_E/Q の最大値は、両手法ともほぼ同じ値となった。この理由としては、Q, b, c に対する目的関数 P_E/Q の分布が比較的単純な形状であったため、局所的な解に陥る可能性の高い CM でも十分対応できたためと考えられる。今後、設計現場において、本手法を用いた解析を実施する場合には、材料の特性や継手の幾何学的形状および溶接法の種類などについても考慮する必要があると考えられるため、その場合には、多様性の強い問題に対し柔軟に対応できる GA の方が有利になると考えられる。

5. 結言

温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法と、最適化手法を導入した新しい溶接諸条件最適化システムを構築し、狭開先溶接時の梨形ビート割れ解析に応用した結果、以下のような結論を得た。

1. 入熱量および溶け込み形状が大きい場合に、梨形ビート割れが発生しやすいことが分かった。
2. 開先幅が狭いほど、効率良く深い溶け込みが得られることが確認できた。
3. 今回の解析においては、CM および GA を用いた解析結果の双方から得られる目的関数値は同程度であったが、計算時間の点から CM の方が有利であることを確認した。

6. 参考文献

- 1) 才田一幸・西本和俊：溶接技術者のためのやさしい溶接冶金学，溶接技術，第 54 巻，第 7 号，2006，pp131-134
- 2) 柴原正和，WuYanming，芹澤久，村川英一，伊藤真介，中村照美，平岡和雄：狭開先溶接時の梨形ビート割れの FEM 解析と溶接条件の最適化，溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集，2004
- 3) 柴原正和：界面要素を用いた FEM による溶接高温割れに関する理論的研究（第二章：温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れ解析法の開発），博士論文，平成 13 年度
- 4) 日本機械学会：計算力学ハンドブック(II 差分法・有限体積法・熱流体編)，丸善，2006
- 5) 伊庭斎志：遺伝的アルゴリズムの基礎～GA の謎を解く～，オーム社，1994