

狭開先溶接時における梨形ビード割れの解析と 割れを考慮した溶接諸条件最適化システムの構築

正員 柴原 正和* 学生員 旦 越 雄*
Yanming WU** 畝 田 道 雄***
正員 正岡 孝治* 正員 村 川 英 一****

Computational Analysis for Pear-shaped Bead Cracking Under Narrow Gap Welding and
Development of Optimization System for Various Welding Conditions Considering Welding Hot Cracking

by Masakazu Shibahara, *Member* Etsuo Dan, *Student Member*
Yanming Wu, Michio Uneda,
Koji Masaoka, *Member* Hidekazu Murakawa, *Member*

Summary

To achieve high efficiency and cost reduction, large heat input welding such as submerged arc welding (SAW) and metal inert gas arc welding (MIG) using large currents are employed. However, the large heat input given to the weld may produce coarse grains in the HAZ and a reduction of toughness. To avoid these problems, narrow gap welding (NGW) which is effective in reducing heat input and achieving high productivity is often employed. However, the pear-shaped bead cracking may form according to the welding condition in the case of narrow gap welding. Therefore, the welding conditions must be carefully selected to prevent the cracks.

Then, in this study, the influences of the heat input parameters, such as heat input width, heat input depth and the total amount of heat input on the pear-shaped bead crack formation under narrow gap welding are investigated using the Thermal-elastic-plastic FEM with temperature dependent interface element. Furthermore, to find the optimum values of the heat input parameters, the optimization system which can consider the formation of pear-shaped bead cracking is developed. As optimization methods, Complex Method (CM) and Genetic Algorithm (GA) are adopted. Using these methods, the ideal heat input distribution to achieve deeper penetration with small heat input and without cracking can be computed. As a result, the superiority of the welding using narrow gap can be shown in the viewpoint of heat input efficiency.

1. 結 言

近年におけるコンテナ船の大型化は著しく、船体上甲板構造に用いられる高張力鋼板は 50mm を超えるような厚手化の傾向¹⁾にある。また、厚手化を達成するために必要な材料開発技術も進歩し、使用目的に応じた多種多様な新機能材料が開発されている。

一方、このような厚手化の要望に応じる上で溶接法もまた重要な技術の一つである。作業効率を考えると、板厚が大き

い場合においては、溶接パス数の低減が重要な課題となる。それを達成することができる溶接法の一つとして狭開先溶接法^{2,3)}が挙げられる。狭開先溶接法は、狭い開先を用いて小入熱で深い溶け込みを得ることができる溶接法であり、通常の開先を用いる溶接と比べ、溶接パス数を少なくすることが可能であり、溶接変形も低減することができる。また、中村らは、狭開先溶接法におけるワイヤ先端位置やアークの挙動を制御することで、比較的自在に溶け込み形状を制御できる可能

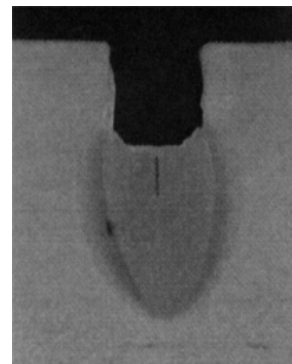


Fig.1 Pear-shaped bead cracking.

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 合肥工業大学

*** 金沢工業大学工学部

**** 大阪大学接合科学研究所

性について報告⁴⁾しており、狭開先溶接法は将来性に期待できる溶接法の一つである。

しかし、狭開先溶接の実施においては、溶接条件によって Fig.1 に示すような高温割れの一つである梨形ビード割れが発生する場合があります。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に深く関係していることが報告^{5,6)}されており、割れが発生しない諸条件について把握することは重要であると言える。そこで本研究では、まず、著者らが開発した温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析⁷⁻⁹⁾を狭開先溶接に適用することで、溶け込み形状や入熱量が梨形ビード割れの発生におよぼす影響について検討を行った。さらに本研究では、制約条件として割れを回避し、なおかつ溶接条件等の設計変数について最適化することができる手法として、溶接諸条件最適化システムを構築した。本システムでは、割れの有無や溶け込み形状等について検討する手法として温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法⁷⁻⁹⁾を採用し、溶接諸条件を最適化する手法としては Complex Method(以下 CM)および遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を採用した。本手法を狭開先溶接時の梨形ビード割れ問題に適用することにより、本システムの有用性について検討した。

2. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法の概要

2.1 溶接高温割れの力学モデル

梨形ビード割れは、溶接により加熱された溶融金属部が凝固・収縮する際に発生すると言われている。そこで、本研究では、梨形ビード割れの発生を解析するために、温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れ解析法⁷⁻⁹⁾(以後、高温割れ解析法と称す)を用いた。この手法では、BTR(高温凝固脆性温度域)における材料の脆化を表面エネルギー γ と界面強度 σ_{cr} の温度依存性を用いて表している。

2.2 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ると仮定した。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。

$$\phi(\delta, T) = 2\gamma(T) \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^6 \right\} \quad (1)$$

ここで、 δ は割れの開口量であり、定数 γ 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

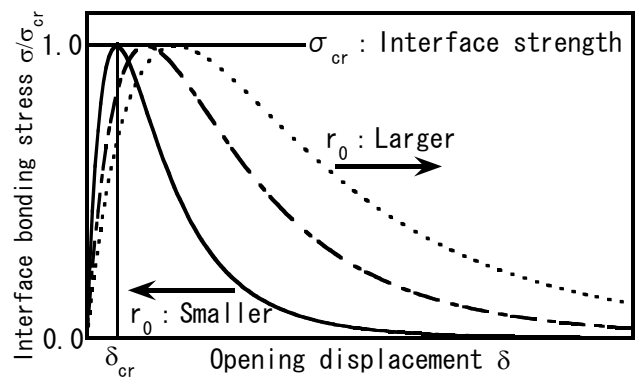


Fig.2 Stress-opening displacement curves of interface element.

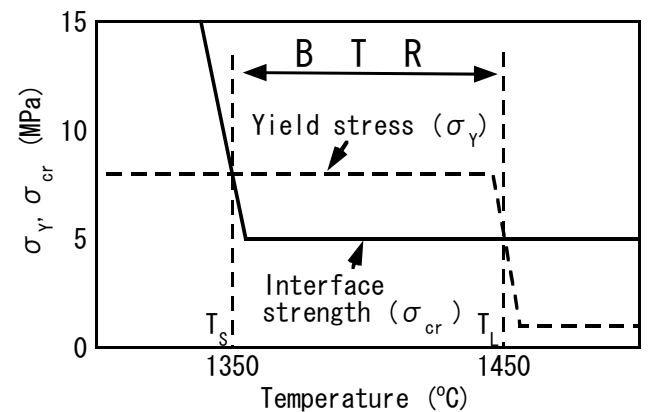


Fig.3 Temperature dependent yield stress σ_Y and critical stress σ_{cr} of interface element.

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。なお、各パラメータの力学的意味に関する説明は、文献⁷⁾に詳しく示されているので、ここでは割愛する。

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

$$\sigma(T) = \frac{\partial \phi(T)}{\partial \delta} = \frac{24\gamma(T)}{r_0} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^7 - \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{13} \right\} \quad (2)$$

は、割れ表面に作用する単位面積あたりの結合力を表わす。また、開口変位 δ と結合応力 σ の関係を Fig.2 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 δ が大きくなる。

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.3 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凝固脆性温度域を示し、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と仮定した。

3. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法による狭開先溶接時の梨形ビード割れ解析

3.1 解析モデル

狭開先溶接時の梨形ビード割れは、溶接中心面上に発生する。よって、Fig.4 に示すように温度依存型界面要素を配置することでその解析が可能となる。また、問題の対称性を考慮し、同図に示すような1/2モデルを用いて解析を実施した。なお、簡単のため、溶接線方向の拘束が十分大きい横断面を解析対象とし、二次元平面ひずみ問題を仮定した。

Fig.5 に梨形ビード形状および開先に関するパラメータを定義する。解析においては、SM490 材を解析対象とし、その材料定数および熱伝達係数の温度依存性を Fig.6 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、割れの発生および進展特性を規定する、温度依存型

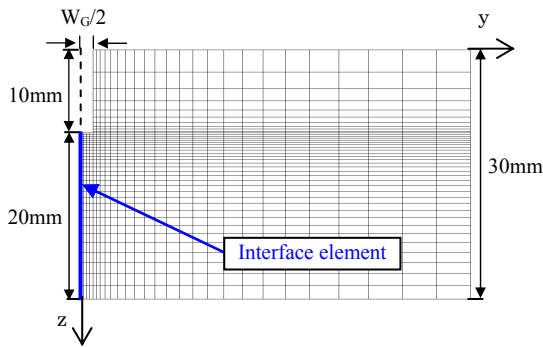


Fig.4 FE mesh divisions.

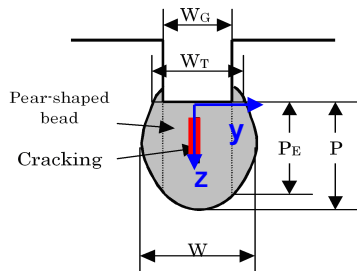


Fig.5 Geometrical parameters of pear-shaped bead cracking.

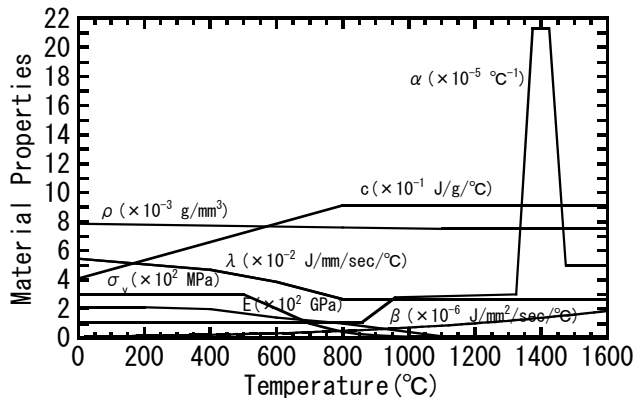


Fig.6 Temperature dependent physical constants.

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 0.07 mm, BTR を 1350-1450 °C と仮定した。また、入熱はガウス分布と仮定し、以下の式で定義する。

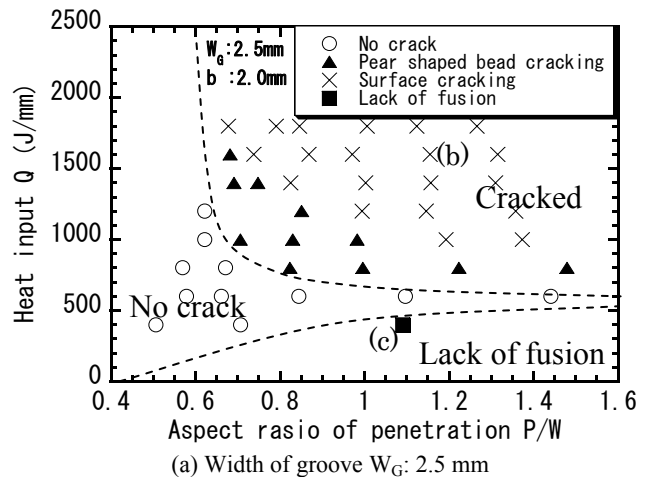
$$q(y,z) = Q \frac{1}{2\pi bc} e^{-\frac{y^2}{2b^2}} e^{-\frac{z^2}{2c^2}} \quad (Z \geq 0) \quad (3)$$

$q(y,z)$: 入熱密度分布, Q : 入熱量

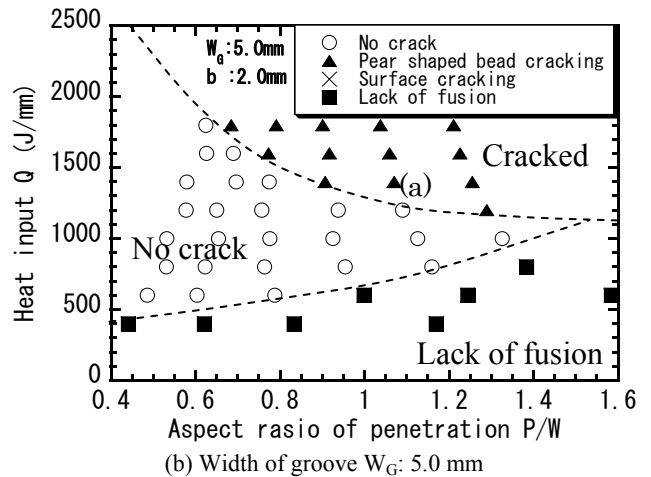
b, c : y, z 方向の入熱分布を定める代表長さ

3.2 入熱量および溶け込み形状のアスペクト比が割れに及ぼす影響

まずは、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について検討を行った。Fig.7 (a), (b)は開先幅 W_G がそれぞれ 2.5mm および 5.0mm、また、入熱分布を定める代表長さである b を $b=2.0\text{mm}$ と仮定した場合における検討結果を示している。なお、解析においては、入熱量 Q と入熱分布を定める代表長さ c を変化させたシリーズ解析を実施した。同図における○印は割れが発生しない条件であり、▲印は Fig.8 (a)に示すような梨形ビード割れが発生する条



(a) Width of groove W_G : 2.5 mm



(b) Width of groove W_G : 5.0 mm

Fig.7 Influence of heat input and penetration shape of weld metal on hot cracking.

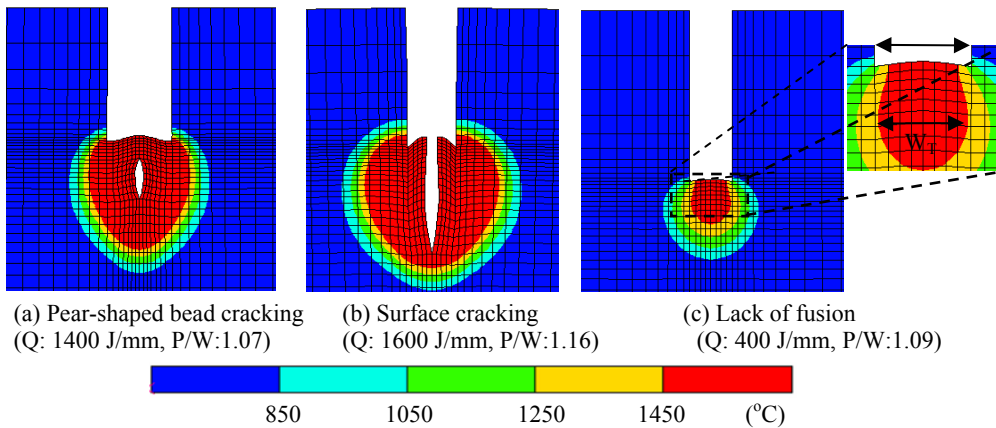


Fig.8 Maximum temperature distribution superposed on deformation with hot cracking.

件を示している。また、図中の×印の条件に関しては、Fig.8 (b)に示すような表面割れが発生する条件を示しており、■印は Fig.8 (c)に示すように開先底における溶け込み幅が開先幅より小さい、すなわち溶け込み不良となる条件を示している。なお、Fig.8 はそれぞれの条件で得られた最高到達温度および完全冷却後における変形図を示している。Fig.7(a), (b)より、入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 P/W が大きい場合に割れが発生し易いことが確認できる。特に開先幅 W_G が 2.5mm の場合には、 $Q=1400$ J/mm 以上の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。さらに、入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 P/W が梨形ビード割れの発生条件よりもさらに大きい場合において、表面割れが発生することが確認できる。また同図より、開先幅が比較的小さい 2.5mm の方が、小さい入熱量 Q でも割れが発生していることが確認できる。

したがって本節で示すように、温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析を狭開先溶接に適用することで、入熱量や入熱分布等の設計変数に対する梨形ビード割れの有無についての検討が可能となることが分かった。次節では、この手法に最適化手法を導入することで、割れが発生しない制約条件の下で最適な設計変数値を得ることができる溶接諸条件最適化システムについて提案し、その有効性について本章で示した狭開先溶接の観点から確認する。

4. 割れを考慮した溶接諸条件最適化システムの構築

中村らは、狭開先溶接法におけるワイヤ先端位置やアークの挙動を制御することで、比較的自在に溶け込み形状を制御できる可能性について報告⁴⁾している。しかしながら、中村らの方法を用いて、低入熱で深い溶け込みが得られるという最適な溶け込み形状およびそれを形成するための溶接条件を決定しようとする場合には、Fig. 7 に示すような数多くの

実験あるいは計算を実施する必要がある。また、現在市販されている PC を用いて 10000 要素程度以上となる三次元熱弾塑性 FEM 解析を実施する必要がある場合には、ある 1 つの溶接条件に対して割れの有無を求める計算をするのに数時間以上の計算時間を要するのが一般的である。よって実用問題のように設計変数が多い場合において、手動で目的関数を最適化することは事

実上不可能であると言える。そこで本章では、より少ない計算回数で最適な溶接諸条件を決定することを目的とし、第 2 章で使用した温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法に対し、新たに最適化手法を導入した溶接諸条件最適化システムを構築した。その概要図を Fig. 9 に示す。なお、複雑な非線形挙動を示す溶接力学問題の最適化を考える場合には、適用する溶接現象および最適化する目的関数に応じて最適化手法を選択する必要があると予想される。そこで本提案システムでは、最適化手法として、比較的単純な最適化問題に対して高速に最適解が得られる Complex Method^{10,11)}(以後、CM)および多様な目的関数形状に対しロバスト性が高い遺伝的アルゴリズム^{12,13)}(以後、GA)の両手法を採用し、最適化解析を実施した。次節では両最適化手法の概要について説明する。

4.1 最適化手法

4.1.1 Complex Method (CM)

Complex Method(CM)^{10,11)}は、多変数で構成される条件点それぞれの条件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最適化手法である。本研究で用いた主な解析手順は以下の通りであり、その概要を模式的に表したのが Fig.10 である。

- ① 条件点集合 \mathbf{X}_i が持つ変数の初期値を、設定範囲内で制約条件を満足するよう乱数を用いて無作為に選択する。本研究では条件点 \mathbf{X}_i を構成する設計変数成分として、入熱量 Q および y, z 方向の入熱分布を定める代表長さ b, c の 3 つを採用した。
- ② 条件点集合 \mathbf{X}_i のすべてにおいて目的関数値 $F(\mathbf{X}_i)$ を求め、 $F(\mathbf{X}_i)$ が最も低い点を \mathbf{X}_R 、2 番目に低い点を \mathbf{X}_G と定義する。
- ③ \mathbf{X}_R を除く条件点集合の重心位置を \mathbf{X}_C とし、 \mathbf{X}_R との延長

線上に、以下の式に従って試行条件点 \mathbf{X}_T を作成する。

$$\mathbf{X}_T = \mathbf{X}_C + a(\mathbf{X}_C - \mathbf{X}_R)$$

なお、本研究では $a=1.3$ と定義した。

- ④ \mathbf{X}_T が制約条件を満足し、かつ $F(\mathbf{X}_C) < F(\mathbf{X}_T)$ となるなら⑤へ、そうでなければ a の値に 0.9 を乗じ再計算する。
- ⑤ \mathbf{X}_R を \mathbf{X}_T に置き換え、新たに条件点集合を作成する。
- ⑥ 上記②から⑤を、条件点 \mathbf{X}_i に含まれる設計変数成分が一定値に収束するまで繰り返す。

4.1.2 遺伝的アルゴリズム (GA)

遺伝的アルゴリズム(GA)は生命の進化の過程を模擬した最適化手法であり、現在では多くの研究者らにより研究・報告^{12,13)}されている。そこで本節では、多種多様な遺伝的アルゴリズム(GA)の中でも特に本研究に採用したもののみについて以下に概要を説明し、その模式図を Fig.11 に示す。

- ① 乱数を用いて設定範囲内の設計変数成分を N 個選び、その数値を 2 ビットに置き換えた遺伝子を作成し、それらを初期条件集団とする。ただし、それぞれの遺伝子は制約条件を満たすものとする。なお、本研究で用いた設計変数成分としては、CM の場合と同様に、入熱量 Q および y, z 方向の入熱分布を定める代表長さ b, c の 3 つを採用した。
- ② 目的関数値の優れた遺伝子を、次世代集団の親として「選択」する。
- ③ 選択した遺伝子をおある確率で「交叉」させ、制約条件を満たす新しい遺伝子を作成する。
- ④ 上記③で作成された遺伝子をおある確率で「突然変異」させ、遺伝子を変化させる。ただし、各遺伝子は制約条件を満足するものとする。(次世代集団の形成。)
- ⑤ 上記②から④を、規定の世代数になるまで繰り返す。

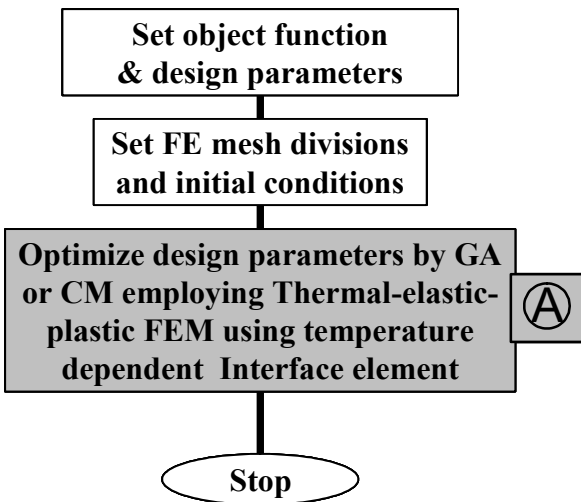


Fig.9 Concept of optimization method used in this study.

なお、②で示される「選択」に「ルーレット選択」、③で示される「交叉」に「一様交叉」、④で示される「突然変異」に「ビット反転」^{12,13)}を採用した。

4.2 解析条件

今回、CM における条件集合の要素数 i を 4 とした。開先幅 W_G は 2.5, 3.2, 4.0, 5.0 mm の 4 通りを仮定し、条件点 X_i の設計変数成分である入熱量 Q および y, z 方向の入熱分布を定める代表長さ b, c の初期値は、それぞれ 100~2000 J/mm および 0.1~10.0 mm の範囲内で乱数を用いて与えた。また、低入熱で深い溶け込み形状を得ることを最適化の目的とし、最適化解析の目的関数としては P_E/Q を採用した。最適化解析の際の制約条件は、割れが発生せず、正常な溶接が完了する以下の①②、および設計変数成分の制約条件である③④とした。

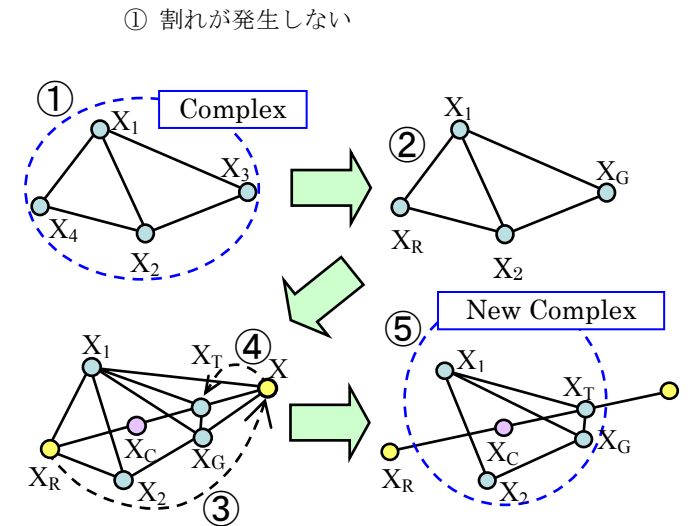


Fig.10 Procedure of Complex Method (CM).

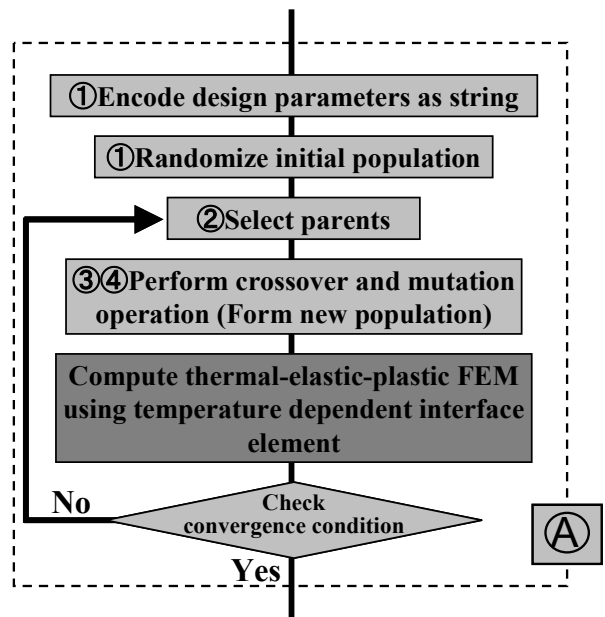


Fig.11 Procedure of Genetic Algorithm (GA).

Table 1 GA parameters.

Generation	100
Population size	10
Bit length of gene	20 for Q 19 for b, c
Rate of crossover	0.50
Probability of mutation	0.03

- ② 開先底部全域が溶融する
- ③ $100 \leq Q \leq 2000$ (J/mm)
- ④ $0.1 \leq b, c \leq 10.0$ (mm)

また、GA で用いた諸パラメータの値は Table 1 に示す通りであり、目的関数および制約条件は、CM の場合と同様とした。なお、CM における終了条件としては、条件点 X_i に含まれる各設計変数成分 Q、b、c のそれぞれの値の変化量がその絶対量の 1/1000 になった時点とし、GA の終了条件は、各遺伝子における目的関数値の最大値がほとんど変化しなくなる 60 世代とした。

4.3 最適化システムの狭開先溶接への適用結果

各開先幅において、Complex Method (CM) および遺伝的アルゴリズム(GA)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 の値が開先幅 W_G の値にほぼ一致していることがわかる。これは、同一の入熱量を用いて目的関数である P_E/Q の値を最大にするためには、できる限り溶け込み幅 W_T の値を小さく抑える必要があることを意味している。さらに、Table 2, 3 において得られた開先幅 W_G 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ることができると言える。また、CM による目的関数値と GA によるそれとがほぼ一致していることが確認できる。

次に、開先幅が 2.5, 5.0 mm の場合において、CM および GA それぞれを用いた場合における収束するまでの P_E/Q の最大値と平均値の履歴を Fig.13 (a), (b) に示す。また、計算時間とほぼ比例関係にあると考えられる高温割れ解析累積回数の履歴を Fig.14 (a), (b) に示す。Fig.13 (a), (b) より、開先幅 2.5 mm の場合、5.0 mm の場合それぞれの P_E/Q の値がほぼ最大値と見なせる $P_E/Q = 8.0$ ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{J}$) および $P_E/Q = 4.2$ ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{J}$) に到達するまでに、Complex Method (CM) は約 20 ステップ程度かかるのに対し遺伝的アルゴリズム(GA)はわずかに数世代しかかかっていないことが分かる。これは、CM における条件集合の要素数 i が 4 個なのに対して GA に

Table 2 Optimization results (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 Optimization results (Genetic Algorithm)

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	850	1.48	4.43	4.11	4.94	1.20	5.80×10^{-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}

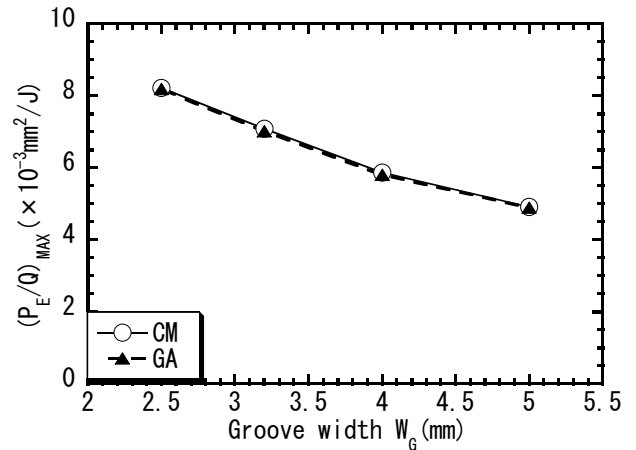


Fig.12 Relationship between groove width and maximum P_E/Q .

における遺伝子の設定個体数が 20 個と多く存在し、初期段階において様々な条件を含んでいるためと考えられる。ただし、Fig.14 (a), (b) に示すとおり、例えば 50 ステップまたは 50 世代計算するための計算時間、すなわち高温割れ解析(Fig.11 中 Thermal-elastic-plastic FEM Using Temperature Dependent Interface Element) の累積計算回数について考えると、Complex method (CM)の方が 1/2 程度になっていることが分かる。この結果は、GA における遺伝子の個体数や CM における Complex の数にも強く依存するが、今回の解析においては、時間コストの点で、CM の方が効率良く最適解に至ったことを意味している。

以上の検討により、今回の解析の結果、CM および GA を用いた解析により、最終的に得られる目的関数値は同程度であった。しかし、計算時間コストに直接的に関係する、界面要素を用いた高温割れ解析累積計算回数の点から考えると、CM の方が有利であると言える。

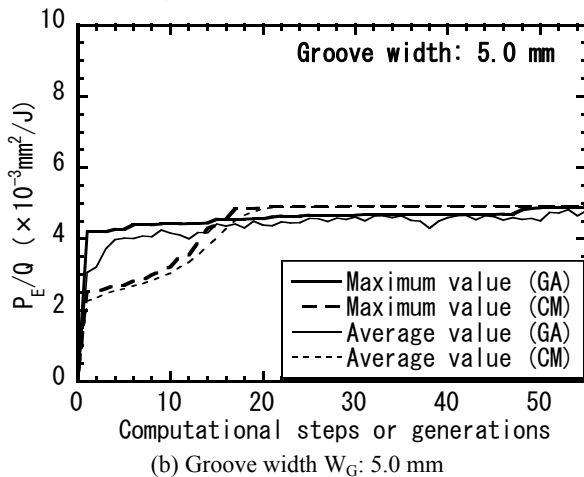
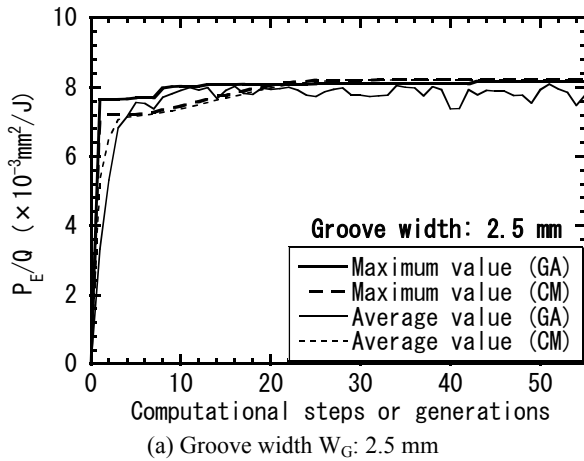


Fig.13 History of P_E/Q until convergence

次に、各開先幅および各入熱量の場合における目的関数 P_E/Q の形状について調べるために、 $W_G=2.5\text{mm}$ と 5.0mm それぞれの場合において、入熱量 Q および入熱分布のパラメータ b, c を変化させたシリーズ解析を実施した。その結果を Fig.15 および Fig.16 に示す。Fig.15(a)に示す図は、開先幅 W_G が 2.5mm 、入熱量 Q が 400 J/mm の場合における目的関数値 P_E/Q の分布を示している。さらに、同図(b)および(c)には、それぞれ $Q=600\text{ J/mm}$ および $Q=800\text{ J/mm}$ の場合における P_E/Q の分布を示している。なお、図中の太線で示される等高線の包絡線は、制約条件を示している。これらの図より、すべての場合において、目的関数 P_E/Q の分布は比較的単純な形状をしていることが確認できる。ただし、その最大値は包絡線上、すなわち、制約条件との境界線上にあることが確認できる。以上のように、目的関数分布が比較的単純な形状をしていたために、CM を用いた場合でも、局所解に陥ることなく最適解を導き出すことができたと考えられる。また、Fig.13 において、収束するまでの計算ステップ数または世代数が比較的小さいのも、目的関数の形状が単純なことに起因すると考えられる。

次に、Fig.15 と同様にして開先幅 $W_G=5.0\text{mm}$ の場合について検討したのが Fig.16 である。同図より、開先幅 $W_G=2.5\text{mm}$

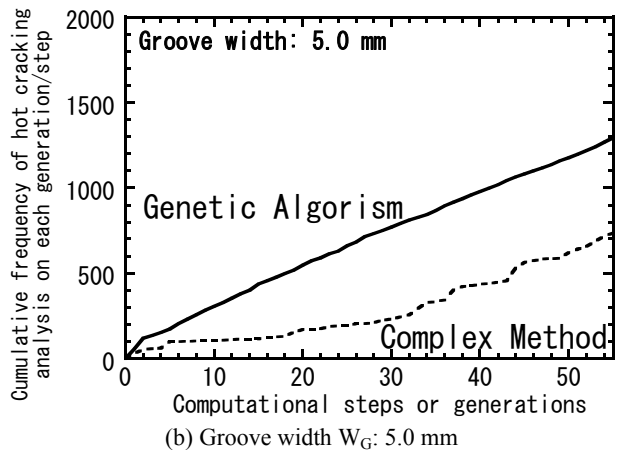
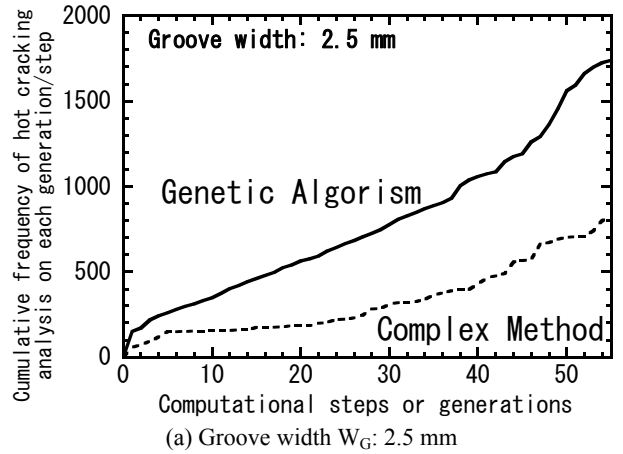


Fig.14 History of the until convergence

の場合に比べ、目的関数値 P_E/Q が小さいことが確認できる。さらに、入熱量が比較的大きい(c) $Q=800\text{ J/mm}$ の場合においては、Fig.16(c)中 \textcircled{A} \textcircled{B} で示されるように目的関数 P_E/Q の分布において2つの極大値が存在することが確認でき、このことは、今回の解析においては、CM を用いた場合においても、局所解に陥ることなく最適解を得ることが出来たことを示している。この理由としては、Fig.16(c)中 \textcircled{A} で示される局所解の周辺の目的関数分布において、目的関数値の小さな部分が存在するため、CM を用いた最適化解析において、その領域を避ける形で最適化経路を辿ったからである。

本研究では、複雑な非線形挙動を示す溶接力学問題において設計変数を最適化するシステムについて提案を行い、その有効性について狭開先溶接時における梨形ビード割れ問題を例に検証を行った。本節で示したように、同システムにおけるCMやGA等の最適化手法はそれぞれに一長一短があり、それらの手法を問題に応じて選択する必要があると考えられるが、実用問題のように設計変数が多い場合においては、手動で設計変数を最適化するのは事実上不可能であるので、その場合には本研究で提案する最適化システムが有用になると考えられ、今後の設計現場での使用が期待される。

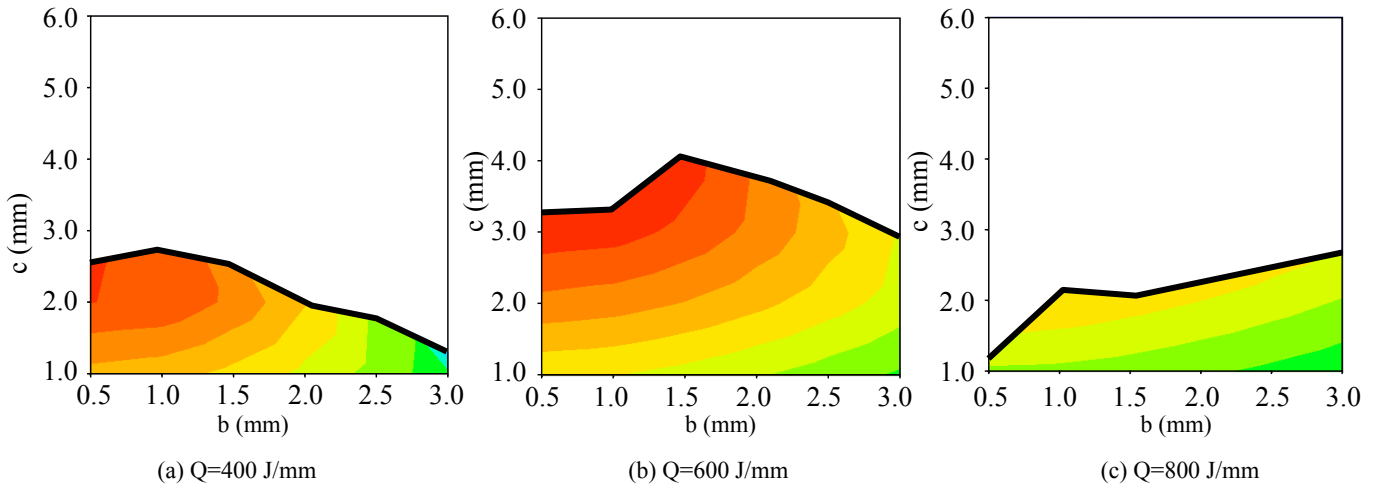


Fig.15 Distribution of P_E/Q ($W_G=2.5$ mm)

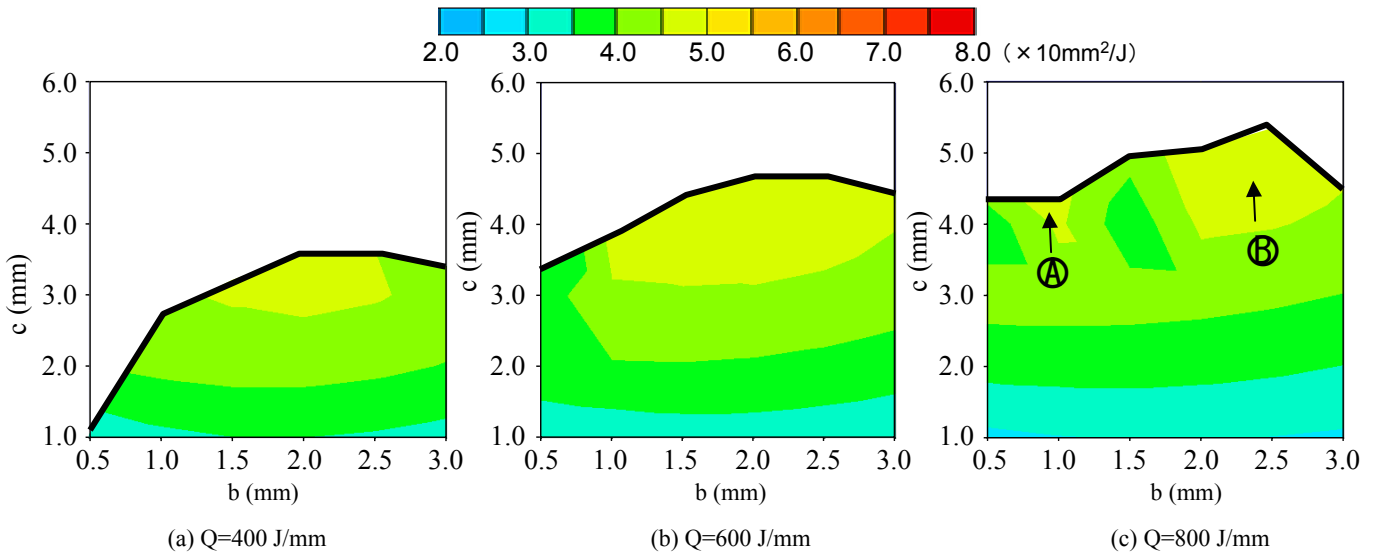


Fig.16 Distribution of P_E/Q ($W_G=5.0$ mm)

結 言

本研究では、温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法により、入熱量や開先幅が狭開先溶接時における梨形ビード割れにおよぼす影響について検討した。さらに、同手法に Complex Method (CM)や遺伝的アルゴリズム(GA)を最適化手法として導入した溶接諸条件最適化システムを構築し、狭開先溶接時における梨形ビード割れ問題を例に最適化解析を実施した結果、以下のような結論を得た。

1. 入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 P/W が大きい場合に、梨形ビード割れが発生し易いことが分かった。
2. 梨形ビード割れの発生条件よりもさらに入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 P/W が大きい場合に、表面割れが発生することを確認した。
3. 梨形ビード割れを防止するという点を考慮すると、開先幅 W_G が狭いほど、効率良く深い溶け込みが得られるこ

とが分かった。

4. 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において、局所解に陥ることなく同程度の目的関数値 P_E/Q を得ることができた。ただし、今回の解析では、計算時間の点から CM の方が有利であると言える。

謝 辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構「平成 18 年度シーズ発掘試験」の補助を受けたことを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 皆川昌紀, 石田浩司, 船津裕二, 今井嗣郎: 大型コンテナ船用大入熱溶接対応降伏強度 390MPa 級鋼板, 新日鉄技報, 第 380 号, pp. 6-8, 2004.

- 2) 都島貞雄, 堀井行彦, 百合岡, 信孝: AC-MIG 狭開先溶接法の 980MPa 級高張力鋼突合せ継手への適用: AC-MIG 溶接技術の開発(第 5 報), 溶接学会論文集, 第 12 巻, 第 1 号, pp. 51-57, 1994.
- 3) 平岡和雄: 狭開先溶接(1)狭開先化のための技術開発のポイント, 溶接技術, 第 52 巻, 第 5 号, pp. 124-129, 2004.
- 4) 中村照美, 平岡和雄: 超狭開先アーク溶接部の硬さ分布特性の数値シミュレーション: 溶接熱サイクルおよび組織分率の数値シミュレーションによる溶接部の硬さ分布特性評価に関する研究(第 1 報), 溶接学会論文集, 第 20 巻, 第 2 号, pp. 246-258, 2002.
- 5) 森幸雄, 益本功: 梨形溶込みビード割れの研究, 溶接学会誌, 第 48 巻, 第 12 号, pp.19-23, 1979.
- 6) 森幸雄, 益本功: 梨形溶込みビード形成の研究, 溶接学会誌, 第 49 巻, 第 1 号, pp. 1041-1047, 1980.
- 7) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 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 (第一報: 温度依存型界面要素の開発), 関西造船協会誌, 第 232 号, pp.135-144, 1999.
- 8) 柴原, 芹澤, 村川, 呉: 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 (第二報: 温度依存型界面要素の定量的モデル化), 関西造船協会誌, 第 233 号, pp.149-155, 2000.
- 9) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 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 (第四報: 溶接横断面内における高温割れの解析), 関西造船協会誌, 第 236 号, pp.229-238, 2001.
- 10) Xiaofeng Zhang, Yinghua Liu, Yanan Zhao and Zhangzhi Cen: Lower bound limit analysis by the symmetric Galerkin boundary element method and the Complex method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, pp.1967-1982, 2002.
- 11) D.Peters, H.Bolte, C. Marschner, O. Nussen and R. Laur: Enhanced optimization algorithms for the development of microsystems, Analog integrated circuits and signal processing, Vol. 32, pp.47-54, 2002.
- 12) 古野弘志, 北村充: DOUBLE HULL TANKER の構造初期計画システムの構築(その 3 遺伝的アルゴリズムによる重量最適化), 西部造船会会報, 第 102 号, pp.381-389, 2001.
- 13) 奥本泰久: 遺伝的アルゴリズムを使った船殻作業の最適化計画, 日本造船学会論文集, 第 182 号, pp.809-814, 1997.