

粒子法を用いた溶接施工時の 高精度温度場評価に向けた検討

Study for Evaluation of Temperature Field during Welding using Particle Method

大阪大学大学院工学研究科	越智 申久	Nobuhisa OCHI	Non-Member
大阪大学大学院工学研究科	岡野 成威	Shigetaka OKANO	Non-Member
大阪大学大学院工学研究科	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member

Considering the effect of the complex phenomena during the welding, for example thermal deformation, phase transformation, residual stress, etc, is important when the welding process is used. All of the effects are caused by heat input and conduction during the welding. Therefore, evaluating the heat input and conduction properties during the welding is so important in order to understand and control the phenomena. However, the weld pool has a fluid flow with thermal conduction, a free surface, and an interface between liquid metal and solid metal. The dropped metal also supplies a free surface. These kinds of analysis are difficult to simulate using the grid method. In this study, Moving Particle Simulation (MPS), which represents the fluid flow as moving particles and can more easily evaluate the fluid flow and thermal conduction with a free surface than grid methods, is used the analysis. As a result, the thermal conduction analysis during the welding considering the thermal conduction and the fluid flow with a free surface in the weld pool, is performed.

Keywords: Particle method, MPS, thermal conduction analysis, hybrid method, GPU

1. はじめに

溶接は接合部材を急加熱・急冷し、それにより材料を溶融・一体化させるプロセスであり、施工時の熱によって、熱変形や残留応力、相変態等の冶金的性質の変化など、継手性能の劣化に影響を与える様々の重要な物理現象が生じる¹⁾。そのため、溶接の適用時には、施工時の熱に起因する様々な影響を十分に考慮することが求められており、これらを制御・評価するうえで溶接時の入熱・熱拡散過程の適切な把握は重要である。

従来から、実験や数値解析による溶接中の母材の温度場に関する検討が積極的に行われているが、溶接に関係する物理現象のすべてを考慮した数値解析を行うことは難しく、一般に、溶接現象を数値解析で取り扱う際には、種々の仮定を設けることで溶接現象を比較的検討しやすい形態に落とし込むことが多い。特に、溶融ワイヤの滴下に伴う溶融池形成過程は、自由表面、固液界面を伴う移流、熱輸送現象の複雑な相互作用であり、数値解析上の困難さから、あまり積極的な検討が行われていないのが現状である。しかし、溶接施工時の温度場・履歴の把

握・評価を詳細に行っていくうえで、自由表面、固液界面を伴う移流、熱輸送現象の複雑な相互作用を、溶接継手全体の温度場とともに統一的に解析することは今後ますます重要となってくると考えられる。

ここで、MPS (Moving Particle Simulation) 法²⁾ や SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{3,4)} に代表される粒子法は、自由表面や界面の大変形を伴う流体を比較的容易に解析することが可能な解析手法であり、このような計算問題に対する有力な手法であると考えられる。そこで本研究では、粒子法を用いた溶接時の高精度温度場評価に向けた基礎検討として、従来までは解析が困難であった溶融ワイヤの滴下-溶融池・ビード形成過程の自由表面を伴う移流、熱輸送現象を、溶接継手全体の温度場とともに統一的に解析した。

2. 解析手法

2.1 概要

MPS 粒子法では、以下に示す重み関数を用いて粒子間距離に対して相互作用の重み付けを行い、各種微分演算

子モデルで離散化を行う。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (1)$$

ただし r_e : 影響半径

ここで、本研究では粒子法のうち、並列化が容易であり大規模計算向けの計算手法である MPS 陽解法⁽⁵⁾を用いた。ここで、本解析では、以下に示す非圧縮性流体の支配方程式より粒子の移流を計算する一方で温度計算も行い、溶接中の母材への入熱、熱拡散過程の解析を行う。

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla P + \vec{f} \quad (2)$$

ただし ρ : 密度, v : 速度, μ : 粘性係数, P : 圧力, f : 外力

さらに、並列化が容易である MPS 陽解法⁽⁶⁾の特性を生かすべく、GPU (CUDA 5.0)⁽⁶⁾を用いて並列化を行っており、将来的な大規模計算への適用性を確保している。ここで、MPS 陽解法では圧力を求める際に以下で示す式(3)を、勾配モデルとして式(4)を用いており、音速 c の値はマッハ数が 0.2 以下となるように定める⁽⁷⁾。

$$P_i = c^2 \frac{\rho_0}{n_0} (n_i - n_0) \quad (3)$$

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{2d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{P_i + P_j}{2} \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

ただし n_0 : 初期粒子数密度, d : 次元数

また、熔融金属の表面張力は、表面粒子の表面張力係数と曲率より以下の式(5)より求められ、式(2)の外力項に与えられる。また、表面粒子は式(6)で $\beta = 0.97$ を満たす粒子とする⁽²⁾。

$$f_i^s = \sigma \kappa \delta \vec{n} \quad (5)$$

$$n_i < \beta n_0 \quad (6)$$

ただし、 σ : 表面張力係数, κ : 表面の曲率, δ : デルタ関数, \vec{n} : 表面の法線ベクトル

2.2 温度解析手法

温度解析には、溶接時における非線形な材料物性を考慮した、以下に示す2つの式を用いて解析を行う。

$$\frac{Dh}{Dt} = k \nabla^2 T \quad (7)$$

$$h = \int c dT \quad (8)$$

ただし、 c : 比熱, k : 熱伝導率, T : 温度, h : エンタルピ

解析に際しては、式(7)右辺を以下に示す MPS のラプラシアンモデルで陽的に離散化を行う一方で、式(8)から求められた $T-h$ 曲線と式(7)を併用することで、単位ステップごとにエンタルピを温度へと変換し、計算を順次進める。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (9)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} [|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2 w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)]}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \quad (10)$$

また、溶接中の加熱・冷却過程における半溶融帯 (mushy zone) が流体挙動に与える影響については、今回は以下で示す式(11)を用いて粒子 i の本来の速度 v に液相率 β を掛けた速度を v_i として簡易的に考慮している⁽⁸⁾。

$$\vec{v}_i = \gamma \cdot \vec{v} \quad (11)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & (h_L < h) \\ (h - h_S)/(h_L - h_S) & (h_S \leq h \leq h_L) \\ 0 & (h < h_S) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 h_S は完全固相時のエンタルピー、 h_L は完全液相時のエンタルピーを表す。

3. 溶融金属滴下中の溶接部近傍を対象とした温度解析

Fig. 1に示すように、V開先を有する場合について温度解析を行い、滴下される溶融金属が溶接部近傍の温度場に与える過程を計算した。各粒子の初期温度は300Kであり、Fig. 1のAで示す粒子には 15 J/mm^3 の熱量が均等に与えられており、このときの温度は約2700Kである。

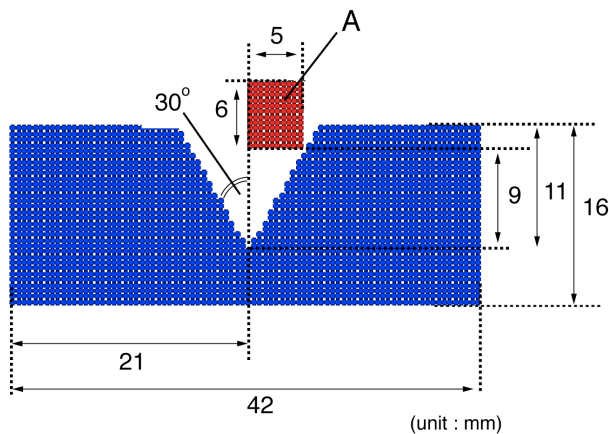


Fig. 1 Analysis domain.

Table 1 Analysis condition.

Number of particles	2688
Time step [s]	$\min(0.2 l_0/v_{\max}, 0.5rl_0^2/m, 0.45rcl_0^2/l)$
Particle spacing [m]	0.50×10^{-3}
Gravity [m/s^2]	9.8
Initial temperature [K]	300
Melting point [K]	1773

解析対象は16 mm厚の高張力鋼板を想定しており、解析領域は2次元とし、板幅方向を42 mmまでに限定した範囲で設定した。また、材料の物性値には温度依存性を考慮した値を与えている。そのほかの主な解析条件は、Table 1

に示す通りである。

解析結果はFig. 2に示す通りであり、本数値解析手法を用いて溶融金属の母材への滴下や流動、熱拡散に伴う凝固を適切に表現することができているといえる。また、最高到達温度分布はFig. 3に示すようになり、溶融金属滴下位置に沿って非対称な分布を示している。本数値解析では、あえて中心より僅かにずれた位置から溶融金属を滴下しており、このような場合に生じる非対称な移流・熱輸送を良好に計算できているといえる。

以上のように、粒子法を用いた本数値解析手法によって、溶接中の複雑な熱輸送・熱拡散過程を考慮した溶接中の温度場解析をすることができた。

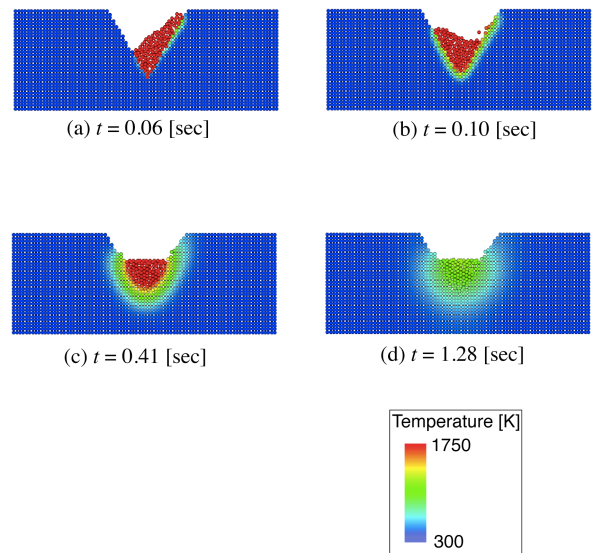


Fig. 2 Analytical result.

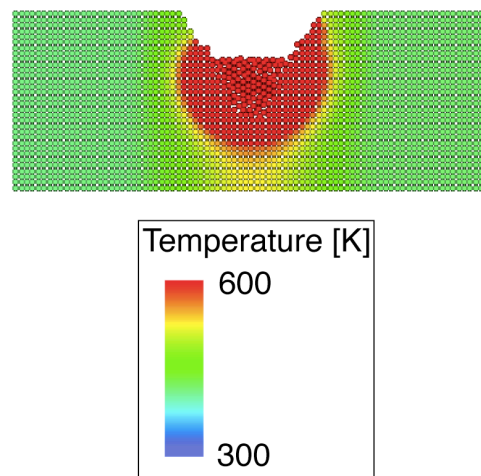


Fig. 3 Tmax distribution.

3. 粒子-格子連成解析手法を用いた

3次元温度解析

3.1 概要

より現実に即した溶接施工時の温度場解析を行うためには、溶融池形成過程に関する3次元的な移流・熱輸送過程を溶接継手全体とともに統一的に解くことが求められる。しかし、粒子法は計算時に各粒子について自身の影響半径内の数十粒子との間で計算を行う必要があり、3次元計算では影響半径内の粒子数がさらに数百程度まで増加するため、格子法に基づく計算手法よりも膨大な解析コストが要求される。この解析コストは、特に3次元化に際して大きな問題となる。

そこで本解析では3次元計算を行うにあたって、粒子法と格子法の連成解析手法を用いている⁹⁾。本連成解析手法はFig. 4に示す通りであり、粒子領域と格子要素領域の連結部にそれぞれ境界粒子、境界要素を配置し、単位ステップごとにそれらを互いに更新することで、溶融部近傍の領域の温度を粒子法で、それ以外の領域の温度を格子法で計算する。

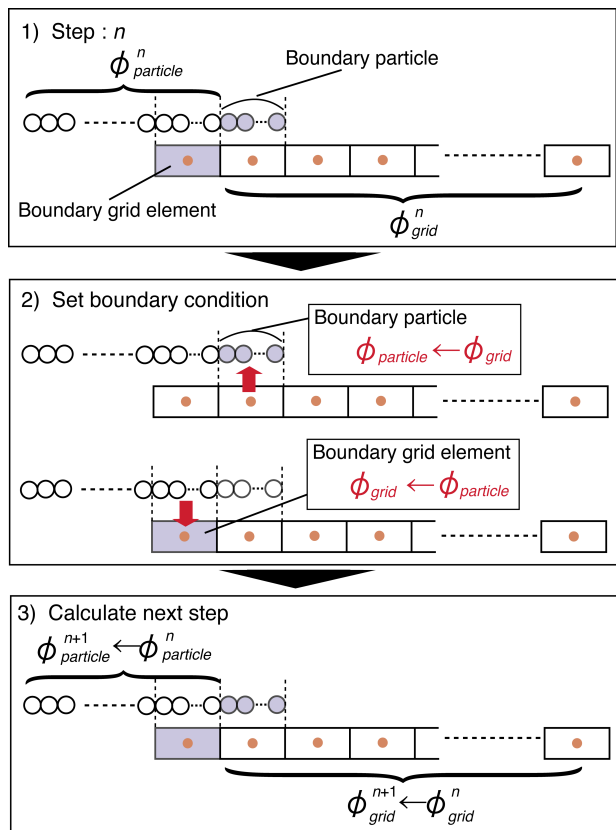


Fig. 4 Integration method.

3.2 解析条件

例として、母材板厚 16.5mm、板幅 200mm、長さ 150mm の V 開先溶接継手の場合について解析した場合について示す。ここで、入熱として Fig. 5 に示すように、開先上方より熱を持った溶融金属を順次滴下することで解析を進めている。

このサイズの3次元領域を粒子のみを用いて解析した場合、粒子サイズが 0.5mm であれば、約 470 万程度の粒子が必要となるが、粒子-格子連成解析手法を適用した場合、解析コストを粒子数約 25 万、格子要素数約 5 万程度まで削減することができる。さらに、すべての計算プロセスを GPU で並列化した場合、この程度の規模であれば、数時間程度で計算が可能である。

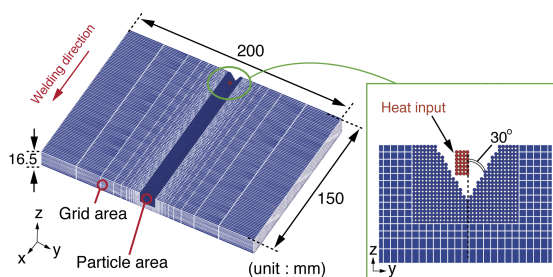
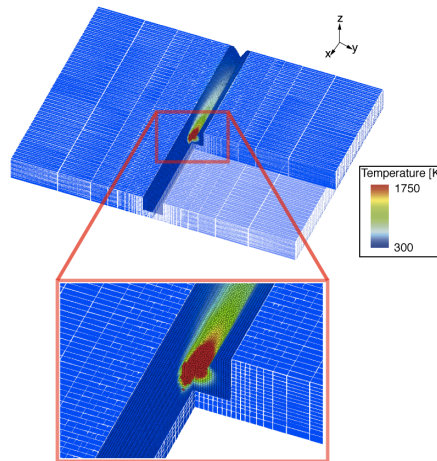


Fig. 5 Analysis domain.

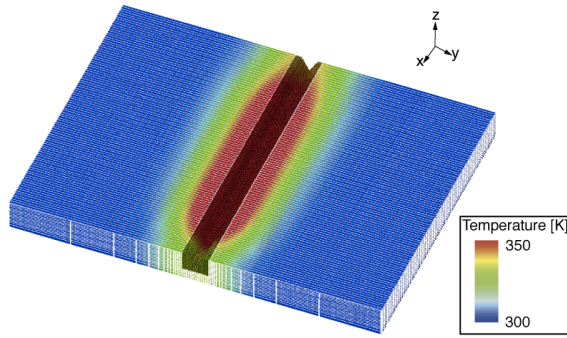
3.2 解析結果

解析結果として、溶接中と溶接後の温度分布を Fig. 6 に示す。本解析では、Fig. 6 (a) に示すように溶融する領域に粒子を配置しており、溶融池の熱流体計算はすべて粒子のみで行われている。また、Fig. 6 (b) より、粒子-格子要素間で適切に熱が伝達されていることが確認できる。



(a) During welding

Fig. 6 Temperature distribution.



(b) After welding
Fig. 6 Continued.

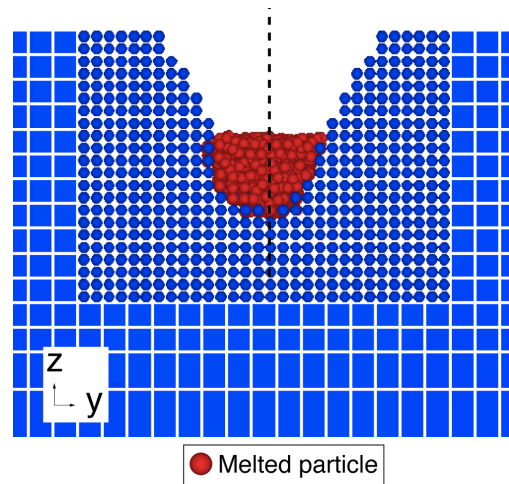


Fig. 8 Penetration shape.

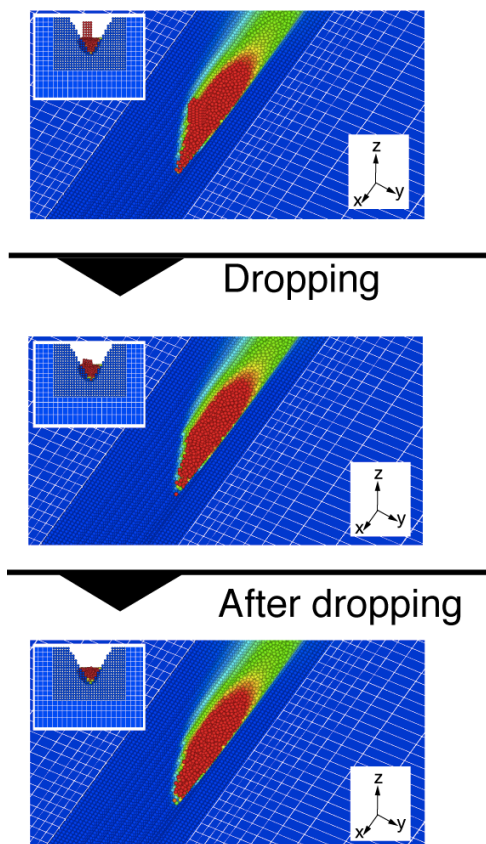


Fig. 7 Dropping process during welding.

また、溶融金属滴下時のようすは Fig. 7 に示すようになり、順次滴下される溶融金属により生じる 3 次元的な移流熱輸送・熱拡散過程により、溶融プールが形成されていることが確認できる。ここで、溶接後の母材中央付近の断面における、融点以上に加熱された領域を示すと Fig. 8 のようになり、滴下位置をずらしたことにより、非対称な溶込み領域が生じていることが確認できた。

以上のように、粒子法を用いた溶接温度場解析によって、従来までは困難であった溶接中の溶融金属の滴下、溶融池形成過程等を詳細に考慮した溶接温度場の数値シミュレーションが可能になった。

6. まとめ

本研究では、粒子法を用いた溶接時の高精度温度場評価に向けた基礎検討として、従来までは解析が困難であった溶融ワイヤの滴下、自由表面や固液界面を伴う移流、熱輸送現象を考慮した溶接温度場の解析を行った。また、GPU 並列化、粒子-格子連成解法を適用した大規模 3 次元解析を行い、溶融池形成過程を含む移流熱輸送現象を溶接継手全体の温度場とともに統一的に解析した。今後、GPU のハードウェア性能の向上や、入力（入熱）条件の適切なモデル化により、本数値解析手法が溶接施工時の温度場を評価する有力な手法となることが期待できる。

参考文献

- [1] 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 溶接力学とその応用, 朝倉書店, 1965
- [2] 越塚誠一, 粒子法, 丸善, 2005
- [3] L. B. Lucy, Numerical approach to testing the fusion hypothesis, *Astronomical J.* 82, pp. 1013-1024, 1977
- [4] 越塚誠一, 粒子法シミュレーション, 培風社, 2008
- [5] 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫, 自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集 No. 20100013, 2010

- [6] CUDA
<http://www.nvidia.co.jp/object/cuda-jp.html>
- [7] 大地雅俊, 山田祥徳, 越塚誠一, 酒井幹夫, MPS 陽解法における圧力計算の検証, 日本計算工学会論文集. No. 20110002, 2011
- [8] V.R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 30, pp. 1709-1719, 1987
- [9] 越智 申久, 岡野 成威, 望月 正人, MPS 陽解法と格子法の連成による溶接プロセスの数値シミュレーション, 日本計算工学会論文集. No. 20130005, 2013
(平成 25 年 6 月 20 日)