

流体解析を応用した溶接部移動熱源の高速伝熱解析

High Speed Thermal Analysis on Moving Heat Source using CFD code

(株) 東芝	内田 憲	Ken UCHIDA	Non-Member
(株) 東芝	角谷 利恵	Rie SUMIYA	Non-Member
(株) 東芝	室伏 正	Tadashi MUROFUSHI	Non-Member
(株) 東芝	神保 雅一	Masakazu Jimbo	Non-Member

Abstract This paper presents steady-state Eulerian thermal analysis of welds using moving coordinates that has been reported as computationally very efficient method. This method requires much less CPU time than conventional Lagrangian method in which heat source moves in computational domain. This kind of Eulerian analysis can be done conveniently by using computational fluid dynamics code. To show the availability of this method, it is applied to a groove weld of a core shroud in a boiling water reactor, with Goldak heat source model applied. Temperature histories from numerical results agree well with measured results.

Keywords: weld, thermal analysis, steady-state, Eulerian, moving coordinates
E-mail: ken2.uchida@toshiba.co.jp

1. 緒言

溶接部の残留応力評価は、移動熱源である溶接トーチからの入熱による構造物内部の非定常温度分布を求める伝熱解析と、その結果に基づいた熱弾塑性応力解析とに大別できる。特に前者の解析は応力や歪みの影響をほとんど受けないため、後者に対して独立に行うことが多い。

従来、移動熱源である溶接トーチの伝熱問題は、熱源が解析領域中を移動する非定常解析として扱われてきた。しかし、非定常解析は多大な計算時間と計算機の記憶容量を必要とするため、特に数十パスの開先溶接を対象として3次元解析を行うような場合、計算時間だけで2～3箇月を要することになり現実的でない。このため、溶接線に直交する2次元断面内の伝熱解析[1]が良く用いられてきた。しかし、このような解析では溶接線方向の熱流を無視することになるため、信頼性確保のため、溶接条件によっては試験による較正等が必要となる。

筆者らは、移動座標系を適用することにより上記3次元伝熱解析を定常解析に帰着させ大幅に計算時間を短縮できる手法[2, 3, 4]に注目し、流体解析技術を使用することにより簡便にこのような解析が可能であることを確認したので報告する。また、原子炉炉心シュラウドの

溶接モックアップ試験を対象に良好な解析結果が得られることを確認した事例を紹介する。

2. 解析手法

移動熱源である溶接トーチの位置を基準とした移動座標系を用いる[2,3,4]。解くべき方程式としては、通常の伝熱方程式に対して移流項が加わった以下の形となる。

$$\rho \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) h \right\} - \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) - q = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ ：密度、 h ：比エンタルピー、 t ：時刻、 k ：熱伝導率、 T ：温度、である。 q は発熱密度であり、入熱モデルにより分布が与えられる。 \vec{u} は移流速度であり、注目点における熱源との相対速度ベクトルを与える。軸対称形状の溶接体で周方向溶接の場合は相対旋回方向速度ベクトルとなる。

(1)式は非圧縮流体のエネルギー輸送方程式として知られている。溶接体が形状不変の流体であると考えれば、前記の相対速度ベクトルを移流速として与え、また、流入・流出境界条件と熱源の設定を行うことにより溶接の伝熱解析が可能となる。

3. 検証試験[5]

軸対称形状である原子炉炉心シュラウドの溶接モックアップ試験を対象とし、周方向開先溶接の一つのパスを選択した。開先部の軸対称断面図を温度評価点の位置と共に図1に示す。曲率半径は約2.8mである。溶接体の材料はSUS316Lであり、TIG溶接を用いる。溶接条件は以下の通り：

- ・ 電流/電圧： 300A/10-11 V (DC)
- ・ 溶接速度： 107mm/min

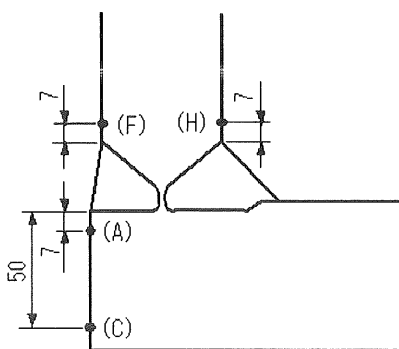


Fig. 1 Section of groove weld

2. 解析条件

解析に用いる物性値は、望月ら[6]により測定されたSUS316LとSUS304の温度依存の値をベースに、熔融部の対流による伝熱促進効果を考慮するため融点以上の熱伝導率を4倍にした[7]ものを用いる。入熱モデルとしてはGoldak(1984)による二楕円体体積発熱密度分布モデル[1]を適用する。溶接体の表面境界条件として、輻射および自然対流による放熱を考慮する。

4. 解析結果

計算セル数が約25万の熱源付近に十分に格子を集中させた格子モデルを用い、IBM Power4, 1.3GHzのCPU1個を使用して、僅か1時間程度で収束解が得られた。収束解から求めた図1の4点における温度履歴を測定値と共に図2に示す。マーク有が解析値で、マーク無が測定値を示す。両者は良好に一致していることがわかる。

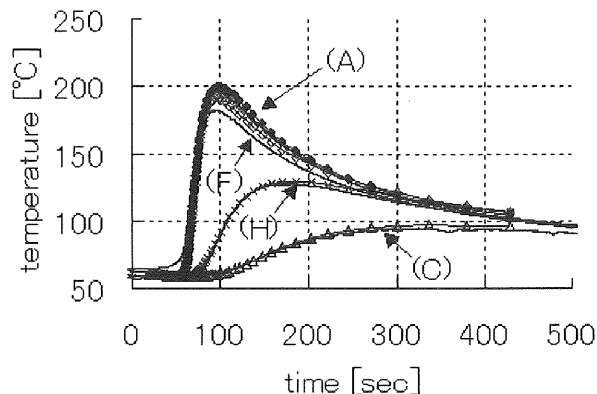


Fig. 2 Temperature history

5. 結言

溶接時の移動熱源による伝熱現象は移動座標系を用いることにより高効率な定常解析に帰着させることができること、および流体解析技術を用いるとこのような解析を簡便・高精度に行うことができ、有用であることを示した。

参考文献

- [1] Goldak, J., Chakravarti, A., et al., 1984, "A new finite element model for welding heat sources," Metallurgical Transactions B, 15B, pp. 299-305.
- [2] Gu, M., Goldak, J., and Hughes, E., 1993, "Steady state thermal analysis of welds with filler metal addition," Canadian Metallurgical Quarterly, 32, (1), pp. 49-55.
- [3] Goldak, J., and Gu, M., 1995, "Computational weld mechanics of the steady state," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 2, Ed. H. Cerjak, The Institute of Metals, pp. 207-225.
- [4] Chen, X., Becker, M., and Meekisho, L., 1998, "Welding analysis in moving coordinates," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4, Ed. H. Cerjak, pp. 396-410.
- [5] Uchida, K., et al., 2005, "Proc. 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference," (July, 2005, Denver, CO, USA), PVP2005-71208.
- [6] 望月ら, 1994, "厚板を貫通する配管の溶接による残留応力発生機構の検討", 溶接学会論文集, 12, (4), pp. 561-567.
- [7] Goldak, J., Bibby, J., et al., 1986, "Computer modeling of heat flow in welds," Metallurgical Transactions B, v.17B, pp. 587-600.