解析とシミュレーションを用いた 技術伝承への取組*

武 市 祥 司**

New Approach to Handing Down of Implicit Knowledge by Analytic Simulation*

by TAKECHI Shoji**

キーワード 溶接変形, 精度管理, 技術伝承, シミュレーション, ナレッジ・マネジメント

1. は じ め に

世界中から高い評価を得てきた「メイド・イン・ジャパン」ブランドを支えてきた要因の一つは、わが国の製造現場の優秀さにある。しかし、製造業を取り巻く昨今の事情から優秀な技能の継承が一層困難になりつつあり、今後のわが国産業の発展に深刻な影響を及ぼす、という懸念の声は1990年代以降しばしば聞かれるようになった。これに呼応して、経済産業省が主導する「デジタル・マイスタープロジェクト」¹⁾をはじめ、卓越した作業者の熟練技能を、IT (Information Technology) を援用して継承する試みが実施されている。また、技能ばかりではなく、技術においても暗黙知 (implicit knowledge) と呼ばれる領域の問題があることが明らかにされ、技術や知識を共有し継承するためナレッジ・マネジメントの重要性がひろく認識されるようになってきている²⁾。

溶接においても、技能分野では、計測技術やITを用いたデジタル化による伝承が開始されつつある³⁾。しかし、技能と技術の境界ともいえる溶接設計や品質管理などの分野においては、伝承の試みはほとんどなされていない。これらの分野では、属人的な知識が非常に重要となっているために十分に体系化されておらず、技能と同様に伝承が大きな問題となっている。そこで、本稿では、特に溶接変形に着目して、溶接変形と関連の大きい精度計画や精度管理の技術を体系化するための筆者の研究を紹介する⁴⁾。

2. 溶 接 変 形

溶接変形および残留応力については、特に日本において、1960年前後から精力的に研究が実施されて大きな成

果を上げている⁵⁻⁹⁾。初期の溶接変形の研究は、溶接条件と溶接変形の関係を実験から明らかにしようとするものであった。1970年代の半ばを過ぎる頃になると、それまでの実験的なアプローチをもとに体系化されつつあった解析的な研究と相俟って、計算機を用いた数値解析が行われ始めた。さらに、1990年代以降の計算機の性能の向上を背景に、現在にいたるまで数値解析による溶接変形の研究は盛んに行われている¹⁰⁻¹⁵⁾。これらの研究は、溶接における力学的な特性の解明、いわば現象の理解や把握を目的に行われていると言える。

一方、設計や生産計画に利用するためには、現象を厳密かつ正確に把握することが常に求められるわけではない。加熱を伴う溶接では、溶接変形は不可避であるため、製品の品質確保や生産性向上の大きな阻害要因になっている。この溶接変形に対して、現実的にどのように対処していけばよいのかの指針を与えることができるような知識や技術が、実際の設計や製造の現場に必要な伝承すべき事項であると考えられる。そこで、本稿では、溶接変形の予測と対処が重要となる精度管理の全体を伝承すべき対象と考える。

3. 溶接変形と精度計画

精度管理では、以下の三点が達成すべき目標である。

- (1) 製品品質の確保
- (2) 損失工数の削減による生産性の向上
- (3) 機械化・自動化の適用拡大

まず、最初の目標の溶接製品の品質とは、継手部位の構造強度と美観のことである。溶接欠陥を発生させないことはもちろんのこと、溶接個所の精度不良から溶接施工不良を誘発し亀裂等の欠陥を発生させることも避けねばならない。二番目の目標は、製造コストの削減である。精度不良から発生する戻り作業・手直し作業など、本来の製造には必要でない作業や付加価値を与えない作業

*原稿受付 平成17年3月7日

**正 員 東京大学 Member, The University of Tokyo

を減らすことにより製造コストの削減が期待できる。三番目の目標では、バラツキが少ない一定の溶接品質を維持し、作業のアウトプットを増大させるためには、自動溶接機械・溶接ロボットの導入は不可欠である。機械やロボットの適用では、一般に人間による作業よりも溶接裕度が少ないことが多い。溶接自動化の適用拡大は、国際的な競争力維持のための課題の一つであり、現在よりも更に一段階高いレベルの精度管理が必要である。

精度計画は、生産計画の一部分であり、工作要領を精度管理の視点から協議・決定するものである。精度計画の代表的な検討事項として以下が挙げられる。

- (1) 各工程の製作許容誤差の決定
- (2) 精度確保の観点からの組立手順の検討
- (3) 精度保持のための拘束治具・補強材の導入の検討
- (4) 伸ばしの設定
- (5) 逆ひずみの設定

上記の「伸ばし」は、溶接による収縮代および調整による切断代などの工作上のマージンである。「逆ひずみ」とは、作業終了後に溶接変形が相殺されるように、あらかじめ変形を勘案して製造する方法である。

精度計画において、生産技術者が過去に積み上げてきた経験と実績が非常に重要となる。しかし、経験を積み上げるボトムアップ型の伝承では、成果を出すまでに比較的長い期間が必要となる。そこで、計算機を用いた数値解析シミュレーションの仮想体験によって、事前に十分に検討を行い、選択肢を絞り込むトップダウン型の方式を併用することにする。従来の実製造によって経験を積んでいくボトムアップ型の継承方式に加えて、この仮想シミュレーションにより計画の影響や有効性を事前に検証するトップダウン型の方式を利用することにより、伝承に必要な期間を大幅に短縮することを目指す(図1)。

また事前検証を十分に実施するトップダウン型の精度管理では、繰り返しの作業が少ない受注生産型の製品を対象とした場合でも、各工程に必要な製作誤差の許容値の設定・割り付けをシミュレーションにより決定することが可能になり、全体としての最適を狙う計画を実施することが容易になる。

4. 精度管理システム

精度計画は、実生産に先立ち全体計画を構想するものであり、いわば「事前の精度管理」と言える。一方、実

図1 新しい精度管理像

際の製造過程におけるインプロセスの精度管理を、「(事前の精度管理)」に対して「事後の精度管理」と呼ぶことにする。そして、精度管理システムは、事前の精度管理を支援する「精度計画システム」と、事後の精度管理システムを支援する「計測管理システム」の二つのサブ・システムから構成される(図2)。本稿では、「精度計画システム」についてのみ紹介する。

精度計画を行うためには、形状精度の予測が必要である。具体的には、一つの作業工程で発生する変形、およびそれらの工程が積み重なり累積される最終的な変形を予測することが必要となる。また、変形予測は、予測に使用するばかりでなく、予期しない精度不具合が生じた際の原因を究明する際の分析の道具としても利用することが可能である。

変形予測により求められた変形値を基に、変形の低減・防止にかかるコストと、変形が後工程に及ぼす影響をコスト試算して、その両者のトレード・オフが精度計画では重要になる。例えば、「変形がこの程度の範囲なら、後工程での作業に支障が無い」「この工程で、程度の精度に収めておかないと後で大変な作業になる。この段階において、精度確保のための作業を一つ付け加えておくことが必要である。そうすることにより、前工程での作業は増えるが、全体として見れば得になる」というような評価を行うためのシミュレーションを行うことが可能になる。

本稿の溶接変形の予測では、縦収縮、横収縮、角変形を対象とする。溶接入熱と変形量の関係から、等価圧縮力と等価曲げモーメントを外力としてHAZ部に与える簡易なモデルを考案した(図3)。

具体的には、入熱量と収縮量には以下の関係があるとする。

図2 精度管理システムの構成

図3 溶接変形のモデル

$$\delta_i = f_{\delta i}(Q) \quad (1)$$

ただし、 δ_i は横収縮量あるいは縦収縮量 (mm)、 Q は溶接入熱 (J/mm³)、 $f_{\delta i}$ は収縮量と溶接入熱の関係を表す関数であり、実験的に求められる。これより、

$$F_i = K_{\delta i} \cdot \delta_i \quad (2)$$

ただし、 F_i は溶接断面の単位面積の等価圧縮力 (N/mm²)、 $K_{\delta i}$ は等価収縮剛性 (N/mm³)である。式 (1) と式 (2) から、

$$F_i = K_{\delta i} \cdot f_{\delta i}(Q) = f_{Fi}(Q) \quad (3)$$

が成立する。すなわち、等価圧縮力は溶接入熱から一意に定まると考える。ただし、 f_{Fi} は等価圧縮力と溶接入熱の関係を表す関数であり、式 (1)～(3) から解析的に求めることができる。

入熱量と等価曲げモーメントの関係も同様にして求めることができる。

$$\theta = f_{\theta}(Q) \quad (4)$$

$$M = K_{\theta} \cdot \theta \quad (5)$$

$$M = K_{\theta} \cdot f_{\theta}(Q) = f_M(Q) \quad (6)$$

ただし、 θ は角変形量 (rad)、 f_{θ} は角変形量と溶接入熱の関係を表す関数であり、実験的に求められる。 M は溶接断面に単位長あたりの等価曲げモーメント (N・mm)、 K_{θ} は等価曲げ剛性 (N・mm/rad)である。 f_M は等価曲げモーメントと溶接入熱の関係で、式 (4)～(6) から解析的に求めることができる。

以上の等価圧縮力と等価曲げモーメントを外力として、線形のFEM (Finite Element Method) 解析を実施して溶接変形量を求める。なお、現象を忠実に再現できる熱弾塑性解析を用いずに線形解析を用いる理由は二つある。まず一番目の理由としては、計算時間と計算コストを低

く抑えることにより、実製品を対象とした解析を容易に行うことに可能になることである。数万～数百万自由度程度の計算でも、組立手順に応じた溶接順序を考慮した変形計算を繰り返すことが可能である。第二番目の理由は、非線形解析である熱弾塑性解析を実施するためには数多くの入力パラメータが必要であり、現実とよく合致する解析結果を得るためには、これらの個々の入力パラメータを調整する必要がある。本手法では、等価圧縮力と等価曲げモーメントを利用することにより、直接的には溶接入熱のみを入力パラメータとするために、現実と合致させる調整は比較的容易である。ただし、溶接変形の発生という複雑な現象を、このように簡易なモデルに置き換えるために切り捨ててしまわざるを得ない部分も多い。例えば、本手法では残留応力を考慮することはできない。本手法のように実益に供する目的でシミュレーションを行う場合には、モデルの精度と経済性のトレードオフから適切なモデル化を行うべきである。

精度計画システムを含む精度管理システムのプロトタイプは、造船のための設計・生産支援システム SODAS (System Of Design and Assembling for Shipbuilding) をベースとして実装している¹⁶⁾。SODASは、設計から製造までを一元的に検討するラピッド・サイクル・シミュレーションという概念 (図4) を提唱している統合システムである。SODASをベースとすることにより、すでに存在する製品情報や製造情報を有効に利用しつつ、精度計画で新たに作成した製品情報や製造情報を、統合システムに付け加えて、実際の製造に役立てることが可能になる。このプロトタイプ・システムを用いて造船の精度管理を行う例を示す。図5は、パネル材を製作する場合、溶接手順に応じた溶接変形が蓄積されていく様子を示している。図6は、船体ブロックについて、最終工程から逆に上流工程に遡る逆シミュレーションを行い、最終形状から部材の最適初期形状を求める例である。なお、図5と図6は、いずれも視覚的に理解しやすいように変形を拡大して表示している。

図4 SODASのラピッド・サイクル・シミュレーション

図5 溶接変形のシミュレーション

図6 溶接変形の逆シミュレーション

5. さ い ご に

溶接変形への対処および精度管理は、40年間以上にわたって取り組まれており、未だに解決していない問題である。製造現場の技能者や技術者の努力により、これまでは凌いでいくことができたが、昨今の製造業を取り巻く情勢により、今後は大きな問題として顕在化してくることが予想される。

本稿では、システム技術を背景とした新しい精度管理のありかたを示した。具体的には、従来の経験に代わり解析技術とシミュレーション技術を援用するとともに、それらの計算機技術を有効に利用する統合システムの枠組を提示した。本研究が、溶接製品の精度管理、およびその技術伝承の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) T. Kojima: Digital Master Project, organ of MTSC Spring 2002, Manufacturing Sci. and Tech. Center, 2 (in Japanese).
- 2) I. Nonaka, H. Takeuchi and K. Umemoto: Chishiki-Souzou - Kigyou (The Knowledge Creating Company), Toyo Keizai Sinpou sha (1996) (in Japanese).
- 3) Skill Digitizer: http://www.toshiba.co.jp/efort/market/skill/index_j.htm (2005) (in Japanese).
- 4) K. Aoyama, T. Nomoto and S. Takechi: Basic Studies on Accuracy Management System for Shipbuilding, 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS'97), Yokohama (1997), Vol.2, 323-338.
- 5) H. Kihara: Gendai-Youseitu-Kougaku, Ohm-sha (1974) (in Japanese).
- 6) M. Watanabe and K. Satoh: Yousetsu-Rikigaku-to-Sono-Ouyou, Asakura Shoten (1965) (in Japanese).
- 7) K. Satoh, Y. Ueda and F. Fujimoto: Yousetu-Henkei/Zanryu Ouryoku (Gendai Yousetsu Gijutu Taikai 3), Sanpou Shuppan (1979) (in Japanese).
- 8) K. Masubuchi: Analysis of Welded Structures - Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences, Pergamon Press, Ltd., Oxford (1980).
- 9) K. Satoh and T. Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformation in Welded Structures Materials, J. JWS, 45-4 (1976), 464-470 (in Japanese).
- 10) T. Nomoto and Y. Fujita: Method of thermal elastic-plastic analysis, Naval Architects and Ocean Engineers, 15 (1977), 120-135.
- 11) Y. Ueda and H. Murakawa: Computational Welding, Proc. of the 6th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 4 (1996), 1-8.
- 12) M. Shibahara and H. Murakawa: Effect of Various Factors on Transverse Shrinkage under Butt Welding, J. The Kansai Soc. of Naval Architects, 230 (1998), 263-272 (in Japanese).
- 13) M. Mochizuki, S. Matsushima, C. Thaulow and M. Toyoda: Fundamental Study on Thermal Stress Generation during Simulated Welding Heat Cycles, Quarterly J. JWS, 23-1 (2005), 103-111 (in Japanese).
- 14) The 237th Research Committee of Shipbuilding Research Assoc. of Japan: Development on High-grade Accuracy Control during Ship-hull Production, The Final Report (2000) (in Japanese).
- 15) K. Nogi et.al: IT-Jidai-ni-okeru-Youseitu-Gijutu-no-Kakuritu, J. JWS, 70-2 (2001), 42-61 (in Japanese).
- 16) S. Takechi, K. Aoyama and T. Nomoto: Q&A Virtual Manufacturing (2), Yousetu-Gijutsu, 51-11 (2003), Sanpou Shuppan, 134-140 (in Japanese).