

匠の技に挑戦する溶接シミュレーション



技術解説

村川 英一*

Challenge to Replace Skills of Mister by Welding Simulation

Key Words : Welding, Simulation, Distortion, Residual stress, Cracking, Finite Element Method, Inherent strain

1. はじめに

私たちの研究室が属する接合科学研究所は、1972年に設立された溶接工学研究所を前身とし、1996年には基礎研究の一層の充実と新技術分野への展開を図るため改組を行い現在に至っています。研究所は3大部門および1研究センターから構成され、その中の1講座である数理解析学分野が私たちの研究室になります。研究分野は数値溶接力学であり溶接による変形、応力、割れの問題について力学の視点から研究を行っています。教育の面では、工学研究科地球総合工学専攻の協力講座として船舶海洋工学部門の学生の教育を担当しています。スタッフは、教授1名、准教授2名、特任教授を含め非常勤研究員6名で構成されており、いささか大所帯となっています。

2. 研究紹介

2.1 キーワード

私たちの研究をいくつかのキーワードで現しますと、(1) 非線形、(2) 有限要素法、(3) 固有ひずみ、(4) 表面生成/消滅、(5) 熟練技能ということになります。

溶接は金属をつなぎ合わせる方法として非常に優

れており、溶接なくしては船や自動車をはじめとしてほとんどの工業製品を造ることができません。このように広く普及している技術ですが、溶接で注意しておかなければならない問題があります。それは、変形、応力、割れの問題です。金属の部材を溶接しますと変形や応力が発生します。溶接は金属を溶融・凝固・冷却して部材を接合する技術ですから、現象は熱と力学がからんだ時間経過に従って複雑に変化する非線形問題となります。このような非線形問題の計算法として有力な方法が第2のキーワードの有限要素法です。

これに対して、複雑な現象の時間経過をあえて見ないで、結果のみに注目しようとした逆の発想が固有ひずみです。これを簡単に説明しますと、溶接の結果生じる全ひずみはその生成プロセスにより、弾性ひずみ、塑性ひずみ、クリープひずみなどの和に分けられます。すなわち

$$\begin{aligned} \text{全ひずみ} &= \text{弾性ひずみ} \\ &+ \text{塑性ひずみ} + \text{クリープひずみ} \quad (1) \end{aligned}$$

なお、全ひずみは本質的に変形前後の長さの変化率ですから変形そのものを表します。また、弾性ひずみは応力に直接対応します。一方、塑性ひずみおよびクリープひずみはともに非可逆ひずみです。したがって、式(1)は次のように書き換えることができます。

$$\begin{aligned} \text{全ひずみ(変形)} - \text{弾性ひずみ(応力)} \\ &= \text{塑性ひずみ} + \text{クリープひずみ} \\ &= \text{固有ひずみ} \quad (2) \end{aligned}$$

この式は、左辺の変形と応力は、右辺の非可逆ひずみにより決まるということを示唆しています。さらに、塑性ひずみやクリープひずみなどの非可逆ひずみの和を固有ひずみと定義すると、第3のキーワードである固有ひずみが分れば溶接変形と残留応力が簡単に計算できることとなります。



* Hidekazu MURAKAWA

1951年3月生
大阪大学大学院・工学研究科・博士後期課程
現在、大阪大学接合科学研究所機能評価研究部門数理解析学分野 教授
Ph.D.(ジョージア州立工科大学、1978年)
数値溶接力学
TEL : 06-6879-8645
FAX : 06-6879-8645
E-mail : murakawa@jwri.osaka-u.ac.jp

また、溶接は金属を接合する手段ですが、溶接条件の選択が不適切だと、さまざまな形態の溶接割れが発生します。従って、溶接力学では、接合と割れ(分離)という全く逆のプロセスを取扱うことになります。そこで、接合と割れの問題を統一的にモデル化するために、接合は表面の消滅であり、割れの発生は新しい表面の生成であると考え表面の生成/消滅という概念を提案しています。

最後に熟練技能ですが、ゆがみが無く精度の良い製品を造るためには溶接組立の各段階での変形を予測する必要があります。しかし、前述のように問題が本質的に非線形であり、直線で外挿するような単純な計算で予測することができないため、どうしても匠の経験と勘に頼らざるを得ないのが生産現場の現状ではないでしょうか。少子高齢化の流れを考えると、熟練技能から脱却し、理論的な予測に基づくもの造りの実現が緊急の課題であり、これに対する

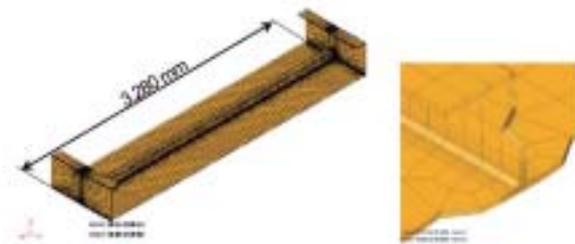
私たちの取組の幾つかを以下に紹介します。

2.2 溶接変形の詳細なシミュレーション

船や橋などの構造物は図1のように板材と縦横の骨材を組合せた構造が基本となります。このような板骨構造で発生する溶接変形を非線形問題として有限要素法を用いて計算した例を紹介します。溶接変形の計算では、まず溶接トーチの移動にともなう温度の変化を計算します。計算結果を示したものが図2です。ここで得られた温度を入力データとしてたわみを計算した結果が図3で、計算により実験とほぼ同等の情報を得ることができます。

2.3 大型構造物の溶接組立変形予測

前述の詳細なシミュレーションでは、溶接開始から完了までの全過程を正直に計算しますから、図4のような大きな構造物に発生する変形の計算には膨大な計算時間が必要になります。そこで実用的な方法として考えられたものが固有ひずみを用いた計算です。固有ひずみは溶接の結果、溶接部に生じた局所的なひずみですから、これを構造物の全ての溶接部に貼り付けて変形を計算すれば、大きな構造物で



(a) 全体図 (b) 溶接部の拡大図
図1 計算モデルの有限要素メッシュ分割



(a) 全体図 (b) 溶接部の拡大図
図2 溶接中の温度分布

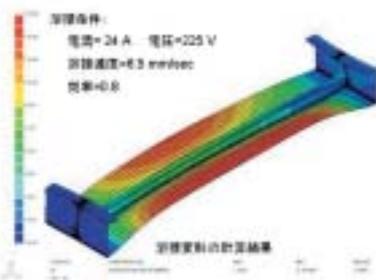


図3 溶接後のたわみ分布

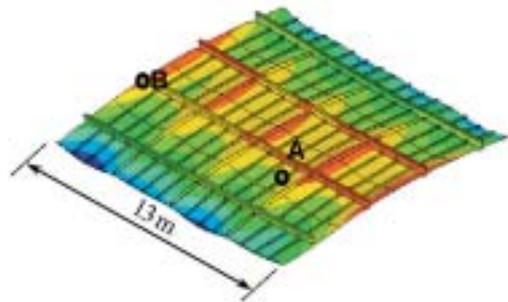
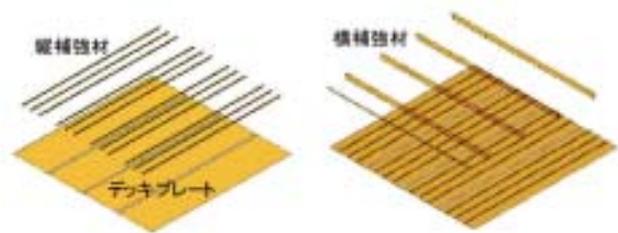


図4 大型板骨構造の溶接組立



(a) 縦補強材の溶接 (b) 横補強材の溶接

図5 板骨構造の溶接組立順序

あっても全体の溶接変形を短時間の計算で得ることが出来ます。なお、このような大型の構造物は図5のように、縦補強材と横補強材を順次板材に溶接することにより製作されますので、例えば図5のように縦補強材を溶接した後に横補強材を溶接する工程に注目すると、4枚のデッキプレートに縦補強材を溶接した際に生じた変形のために次に取付ける横補強材との間にギャップが生じます。もちろん実施工では、溶接の前にこのギャップを許容値以下に矯正する仮付け(部材間の接合)が行われますので、この工程を計算で表現するために表面生成/消滅という概念を使います。この例では、部材の仮付け、溶接という工程を38回繰り返し組立が完了しますので、工程の進行に従って変化するたわみを図4に示されたA点およびB点について示したものが図7です。図から、B点のたわみは主として横補強材の溶接段階で生じることが分ります。

2.4 船のブロック搭載シミュレーション

造船所を見学された経験をお持ちの方もおられると思います。ドックで建造中の船の大きさには圧倒

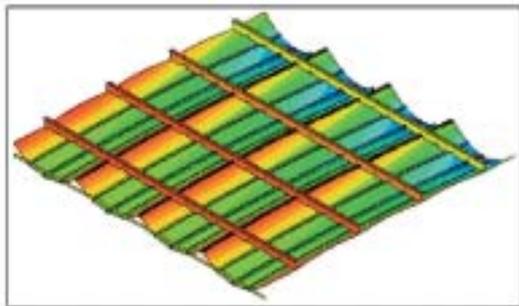


図6 縦補強材溶接後の変形

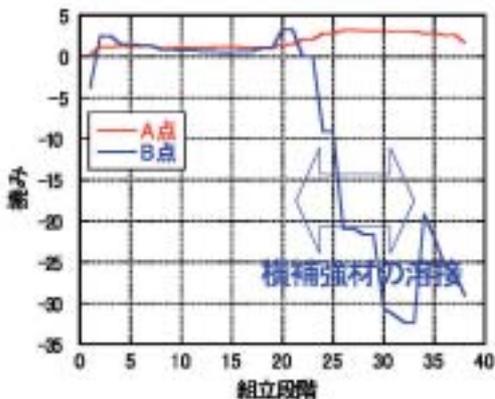


図7 溶接組立の進行にともなう変形量の変化

されますが、船の造り方はまるで積木細工のように簡単に見えます。図8は全長が約100mの船をブロックすなわち積木の単位で色分けしたものです。これらのブロックを図9のように下から積上げて行くと船が完成するわけですが、単純にブロックを積み重ねると図10のように船首と船尾が反り上がった船が出来上がってしまいます。この原因もブロックをつなぐ際の溶接による溶接部の収縮です。溶接によりわずかですが歪んだブロックの上に新しいブロックを積上げますから、歪みとブロック間のずれが累積し、結果として船首尾が反り上がったCoking upの状態になります。これを防ぐために、船を支える盤木を予め船首尾が下がるように設定した状態で建造を始めればブロック搭載完了時にまっすぐな船が完成するわけですが、そのさじ加減は熟練さんの経験と勘に頼っているのが現状です。私たち研究

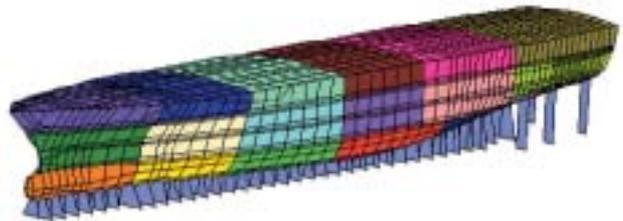


図8 船体のブロック分割図



(a) ブロック搭載の初期段階



(b) ブロック搭載の中間段階

図9 ブロック搭載の経過と変形



図10 ブロック搭載完了時の縦反り変形

室で開発した溶接組立シミュレーションプログラムはそのような熟練さんの勘を理論的な予測に置き換えるために開発されたものです。

ここでは、構造物の溶接組立における変形を中心に研究を紹介しましたが、このほか原子炉压力容器の溶接部における残留応力を固有ひずみ法を用いて計測する研究や溶接割れやき裂進展を表面の生成としてシミュレーションする研究も行っています。

3. もうひとつの顔

私たちの研究室は国際連携溶接計算科学研究拠点という顔も持っています。この拠点は名誉教授の上田幸雄先生が1970年代に世界に先駆けて確立された数値溶接力学をさらに発展・普及させることを目的に接合科学研究所の中に設置されたものです。

ご承知のように、日本のものづくりは経済・社会のグローバル化の中で大きな変革期を迎えており、経験や熟練技能者に頼らない新しいものづくり、すなわち理論的予測に基づく生産技術が求められています。このようなニーズに応えるとともに接合科学研究所の世界的な地位を維持するためには、基礎研究のさらなる充実と人材の育成が不可欠であり、本研究拠点はこの目的を果たすために2007年に設立されました。研究拠点のスタッフは、数理解析学分野の常勤教員3名と招聘教授および招聘准教授の計5名で構成されています。

基礎研究としては実構造物を対象とした大規模高速溶接シミュレーション法の開発を進めており、応用研究としては実用溶接シミュレーションソフトJWRIANの開発、溶接変形・残留応力データベースの構築などを行っています。また、技術教育・人材育成に関しては出版(技術者のための溶接変形と残留応力攻略マニュアル、産報出版)ならびに講演会や若手研究者、技術者を対象とした溶接変形・残留応力シミュレーション実習セミナーを毎年開催しています。さらに、国際交流の一環として、中国の清華大学や哈爾濱工業大学において集中講義を実施し

ており、昨年11月に大阪で開催した“Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation”をはじめ様々な国際シンポジウムを主催あるいは共催しています。

4. おわりに

ナノやバイオといった先端分野ではありませんが、溶接はもの造りに必須の技術です。日本の生産技術の国際的な競争力を維持するためには溶接に関わる基盤技術の絶え間ない深化が必要であり、私たちの研究室は数値溶接力学を産業界に普及させることを通して理論予測に基づく溶接技術の実現に貢献したいと考えています。

接合科学研究所:

<http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/index.jsp>

数理解析学分野:

http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/research/research03_1.html

国際連携溶接計算科学研究拠点:

http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/research/research07_1.html



写真1 集中講義を終えて清華大学機械工学科の先生方との記念写真