

製造分野におけるデジタルエンジニアリングの活用

Application of Simulation to Manufacturing Technology

鴨 和 彦 藤 谷 泰 之 下 昌 幸 郎
藤 原 直 之 田 房 正 宏 石 井 建



製品の生産を支える当社製造技術の分野でも、製品機能・性能の向上、製品品質の安定、新製品開発期間の短縮、納期短縮を目指し、IT技術を活用したデジタルエンジニアリングの積極的な取り組みを実施している。今回はその最新適用事例として(1)凝固解析シミュレーションの一方方向凝固鋳造翼への適用、(2)溶接変形シミュレーションの橋梁への適用、(3)成形加工シミュレーションのガスタービン部品への適用、(4)製造計画シミュレーションの新設工場、生産ラインの適正化の4例を紹介する。

1. はじめに

製品の生産を支える当社製造技術の分野でも、製品機能・性能の向上、製品品質の安定、新製品開発期間の短縮、納期短縮を目指し、IT技術を活用したデジタルエンジニアリングの積極的な取り組みを実施している。今回は製造部門におけるデジタルエンジニアリング技術の最新適用事例として(1)凝固結晶成長解析シミュレーションの一方方向凝固鋳造翼への適用、(2)弾性解析を用いた溶接変形シミュレーションの橋梁への適用、(3)弾塑性解析を用いた成形加工シミュレーションのガスタービン部品への適用、(4)バーチャルファクトリーシミュレーションによる新設工場、生産ラインの適正化の4例を紹介する。

2. 一方方向凝固鋳造翼シミュレーション技術

2.1 対象製品と開発背景

ガスタービンの動翼は高温の過酷な条件で使用されており、非常に高い信頼性が要求される。さらに発電効率の向上を目指し使用温度の高温化が進み、最近では高度な製造技術が必要とする一方方向凝固による鋳造動翼が主流になっている。図1にガスタービンの動翼と参考に航空機エンジンの動翼を示す。ガスタービンの動翼は大型であることから、一方方向凝固鋳造時の温度制御が難しく、異結晶の発生や偏析(フレックス)等の欠陥防止による翼の品質安定と歩留まりの向上が大きな課題である。また鋳造時に考慮すべき因子が多いため、適正な鋳造条件を求めるためには多大な時間と費用を要する。このため一方方向凝固動翼に凝固解析シミュレーション技術を適用するための技術の開発を進めている。

2.2 一方方向凝固解析シミュレーション技術

図2は一方方向凝固翼の凝固解析モデルの例である。生産性を向上するために、同時に4枚の動翼を鋳造する条件をモデリングしている。このシミュレーションにより、最適な鋳型形状、動翼内部の温度分布、鋳造引下げ速度等を系統的に変



図1 発電用と航空用のガスタービン動翼
(一方方向凝固翼)

化させ、異結晶や偏析欠陥を防止するための最適条件を求めることができる⁽¹⁾。

異結晶の成長の予測に関しては、凝固結晶の組織と方位を確率論的計算手法で予測する方法を開発した⁽²⁾。本解析の適用例を図3に示す。同図より不適正な凝固条件では凝固途中での異結晶発生が再現可能なことが分かる。また偏析欠陥の防止のため、その主原因といわれている液相-固相間の対流をシミュレーションの中に組み込んでいる。

今後動翼の開発時に本シミュレーション技術を活用し、開発期間の短縮と量産品の品質及び歩留まり向上に貢献していく。また、鋳型や中子の割れ、変形も寸法精度確保には重要であり、今回開発したシミュレーション技術に鋳型、中子の応力解析、強度・変形評価の評価機能を追加し、より一層の解析精度の向上を図っていく。

3. 溶接変形シミュレーション

3.1 対象製品と開発背景

橋梁は、図4に示すように①鋼床版(上フランジ)・下

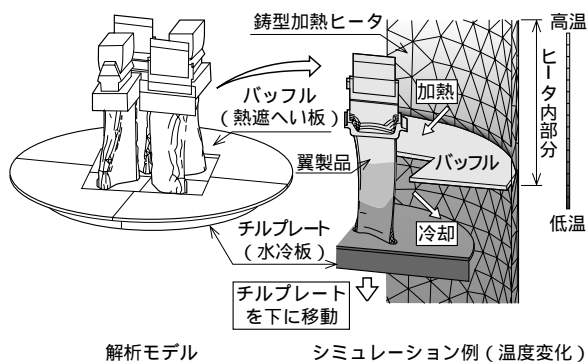


図2 一方向凝固翼の鋳造シミュレーション例 実際の鋳造状態を忠実に再現した解析モデルとふく射解析による温度解析の状況を示している。



図3 結晶成長解析例 翼端から翼根にかけて結晶方位ごとに色が異なる結晶核が柱状晶へ選択成長していく様子が分かる。

フランジ，② ウェブ，③ 横リブ・ダイヤフラムを製作し，それらを組み立てた鋼床版箱桁（主桁ブロック）及び鋼床版箱桁（側床版ブロック）を組み合わせることで製作される．この製作過程では，多用されるT型継手のすみ肉溶接により変形が発生することから，溶接後には変形修正作業を伴うことが多く，コスト・工程の増加を要している．この溶接時の変形を精度良くシミュレーションする手法があれば，変形修正を工数の低減に大きく寄与することができる．溶接変形の予測手法としては通常熱弾塑性解析が考えられるが，熱弾塑性解析は膨大な解析時間が必要なため大型構造物の変形予測には実用的ではない．そこで，まず小型試験体で熱弾塑性解析により溶接で生じる固有ひずみ⁽³⁾を求め，データベース化する．そして大型構造物に対しては溶接部にこの固有ひずみを与え，計算時間の短い弾性解析による変形量をシミュレーションする方法を橋梁部品の変形量予測に適用した．

3.2 熱弾塑性解析による溶接変形のデータベース化

溶接変形は，基本的に3種類の溶接変形⁽⁴⁾（縦収縮，横収縮，角変形）が考えられ，溶接熱により溶接部のごく近傍に発生する固有ひずみが原因となって発生する．

実験を行わずに効率的に変形量を求めるために，T継手について板厚と溶接条件を変化させて熱弾塑性解析を行い，溶接変形量（縦収縮量，横収縮量，角変形量）を板厚 h 及び溶接入熱 Q で整理したデータベースを作成し，そのデータベースから固有ひずみを導出した．

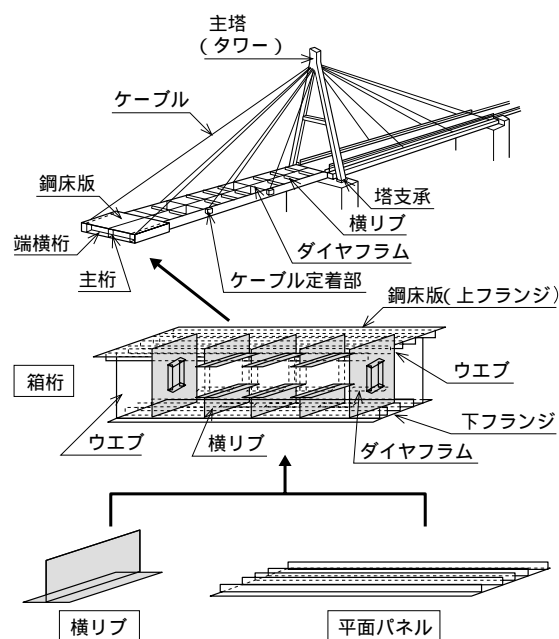
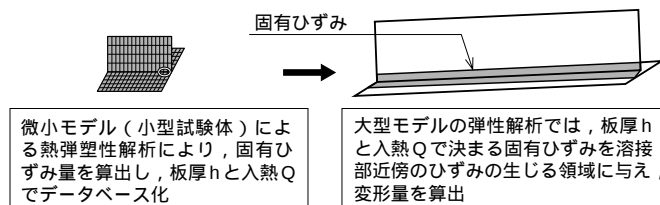


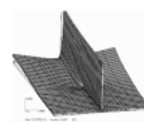
図4 橋梁箱桁製作過程



(a) 固有ひずみデータベースを利用した大型モデルの変形解析

	実測値	解析値
縦収縮 (mm)	0.39	0.38
横収縮 (mm)	0.20	0.25

	実測値	解析値
縦収縮 (mm)	2.0	2.7
縦曲がり (mm)	7.0	6.2



(b) 小型試験体熱弾塑性解析例
（全長400mm，高さ200mm）



(c) 大型モデル（横リブ）弾性解析例
（全長5500mm，高さ650mm）

図5 固有ひずみを利用した大型部材の変形解析 熱弾塑性解析によりデータベース化した固有ひずみを汎用構造解析コード（NASTRAN）に入力することにより大型部材の変形量が短時間で計算できる。

これにより，従来のように小型試験板を実際に溶接してひずみを測定する必要はなく，図5に示すように熱弾塑性解析により作成した溶接変形データベースから得られる固有ひずみを汎用構造解析（弾性解析）で作成した大型モデルに与えることにより，非常に効率的に変形を予測することが可能である．

3.3 適用例

前節で求めた固有ひずみデータベースを用いて，溶接入熱 12.5 kJ/cm ，板厚 13 mm の橋梁部品である横リブの変形予測を汎用構造解析コードを用いて実施した．

解析による変形及び実測値と解析値を比較した結果を図5に示す．横リブ製作過程において特に問題となる縦曲がり量及び縦収縮量は $\pm 1 \text{ mm}$ 以内の誤差で予測できている．

今後大型かつ部品点数の多い製品の適用について、精度検証を行いつつ検討を行っていく。

4. 燃焼器尾筒成形へのシミュレーション技術

4.1 対象製品と開発背景

ガスタービンの部品である燃焼器尾筒は図6に示す筒状の形状をしており、プレス成形した上半面と下半面の2つの部品を溶接により接合することで製作されている。

燃焼器尾筒の特徴は、素材として冷却用の溝を有する板を使用していることである。冷却溝を有することで、均一材での曲げ変形挙動とは異なり、スプリングバック及び成形限界が異なる。このことから、プレス成形時には通常材料と比べ成形精度の確保が難しく、割れ等の不具合が発生しやすい。また、設計要求により冷却溝の位置が指定されており、プレス成形を見越して溝位置を素材展開形状に反映することが必要である。

以上の特徴を有することから従来の方法でスプリングバック、成形限界及び成形後の溝位置を予測するには、多くの繰り返し実験が必要である。

そこで本研究では、燃焼器尾筒の成形を対象に、スプリングバック及び成形限界を考慮した金型設計及び溝位置のずれを考慮した素材展開形状の設計に適用できる、新しいプレス成形シミュレーション技術の開発を行った。

4.2 二次元解析（溝を有する板での曲げスプリングバック及び成形限界予測）

これまでの曲げ解析では均一材を対象とし、燃焼器尾筒のような溝を有する板の曲げ解析を行った事例はなかった。そこで、冷却溝を有する板にて、尾筒の曲げ半径部分をモデル化し、材料降伏後の強度変化を考慮した移動硬化則⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた材料モデルでの解析技術の開発を行い、折り曲げ試験に

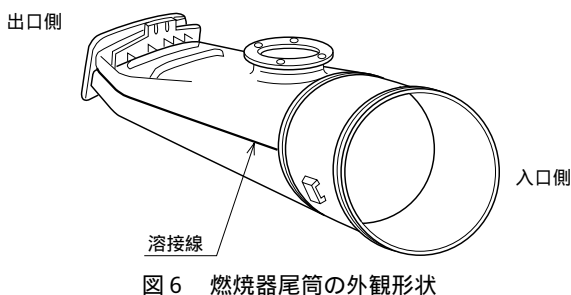
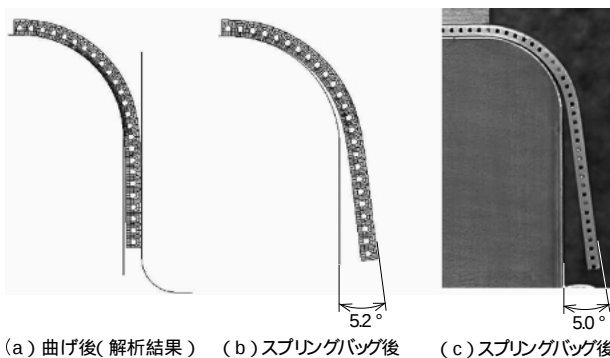


図6 燃焼器尾筒の外観形状



(a) 曲げ後(解析結果) (b) スプリングバック後 (c) スプリングバック後

図7 簡単な曲げモデルでの結果 二次元モデルでのスプリングバック量の解析結果と現物とがよく一致している。

て検証を行った。図7に折り曲げ試験状況と解析状況を示す。解析条件を検討することで、実験値に対しスプリングバック量を1°以内の精度で予測できることが確認できた。また、板厚方向のひずみから、割れ等の不具合の判定を行えることが確認でき、金型設計にも反映できる。

4.3 三次元解析（成形後の溝位置予測）

成形後の溝位置を数値解析によりあらかじめ予測し、溝位置を考慮した素材展開形状を決定することができれば、成形試験の省略による開発期間の短縮が可能となる。そこで、図8に示すような溝の部分の剛性を低下させ、かつ溝方向の異方性を考慮したモデルを考案し、解析を行った。

図9に解析結果と実機成形結果を示す。溝の部分の剛性を低下させたモデルを用いることで、変形を模擬できることが確認でき、溝位置予測のツールとして適用できるめどを得た。

今後、設計段階にて成形シミュレーションを実施し、それらの結果を金型設計及び素材展開形状の決定に反映する計画である。

5. 製造計画シミュレーション

5.1 開発背景

製品の信頼性向上につなげるためには、生産計画段階で製造品質・納期及びコストを評価し、必要な打ち手を早めに打つことが重要である。そこで製造計画のシミュレーション技術として、生産現場の加工設備、揚重設備、作業員、製品及び作業場所をデジタルモデルに置き換え、コンピュータ上の仮想工場（バーチャルファクトリ）上で生産を実施し、最適生産条件を求めた。これより、製造準備段階におけるコスト削減、手戻り最少化、日程管理精度の向上、工程間口スの削減、在庫最小化を行うことが可能となる⁽⁷⁾。

5.2 製造計画シミュレーションの適用事例

5.2.1 ガスタービン製造工場への適用

ガスタービンブレードの動翼及び静翼を製造する工場を新設するに当たり、設備導入に対する生産性の検証を実施した。工場のシミュレーション実行画面例を図10に示す。目標生

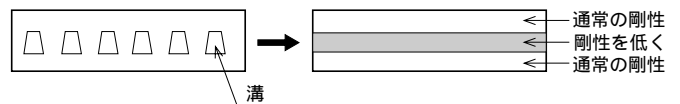
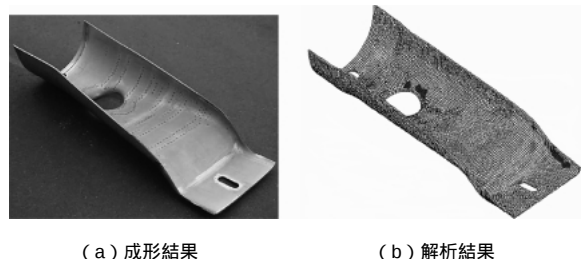


図8 溝部分の剛性を低下させたモデル 溝による空間分、板厚中央での剛性を低下させる。



(a) 成形結果

(b) 解析結果

図9 実機成形結果と三次元解析結果 複雑な三次元成形を模擬できている。

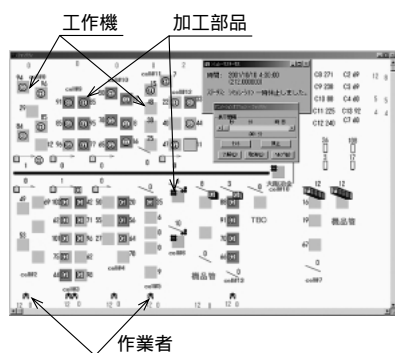


図10 タービン部品工場のモデリング例 部品工場の工作機配置と加工部品，作業者を模擬．

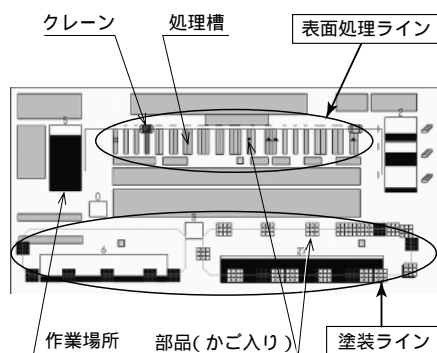


図11 民間飛行機外板表面処理ラインのモデリング例 表面処理・塗装ラインの各工程と部品を模擬．



図12 エンジンクランクケース工場のモデリング例 自動搬送装置，加工機械と部品を模擬．

産量を確保するための設備構成の検討，加工機械，作業者などのボトルネックの把握を行った．

その結果，ボトルネックとなっているマシンについては増設を行い，最低限必要な設備台数を決定することで，目標生産台数を確保することができた⁽⁸⁾．

5.2.2 航空機外板表面処理工場への適用

工場新設に当たり，表面処理ラインの設備構成を立案するためのシミュレーション検討を実施した．工場のシミュレーション実行画面例を図11に示す．この表面処理ラインでは，部品を薬品の入った処理槽に浸漬して表面を溶かして板厚を制御しており，品質の確保のため処理槽ごとで部品を浸漬する最大時間が定義されている．その時間を超えないようにするための設備構成の最適化検討，及び部品投入順序について検討した．

その結果，シミュレーション前に比べクレーンを1台増設して，最適な部品投入順序を考慮することにより，目標生産台数の確保を可能とし，全処理時間を8%短縮できた．

5.2.3 エンジンクランクケース製造ラインへの適用

エンジンクランクケースの増産のため生産効率の良い設備構成，生産条件の提案のためのシミュレーション検討を実施した．シミュレーション実行画面例を図12に示す．加工部材種別ごとの使用機械の適正化によるライン内マシン稼働率の平準化，ボトルネックとなっていた治工具数を増やすことで生産性向上を図った．

その結果，月間の生産台数が40%増加した．また，AGV (Automated Guided Vehicle：無人搬送車) の追加を行うことで更に生産台数を6%増加させることが可能となった．

5.2.4 今後の展開

これ迄の製造計画シミュレーションの適用は，新規稼働設備等工場の生産ラインの一部に利用してきた．今後，工場の全設備へ適用範囲の拡大を図ることで，より高品質な製品を効率良く生産することに寄与していく．

6. ま と め

製造技術の分野でのデジタルイノベーションの積極的な取り組みとして，各種シミュレーション技術の適用を紹介した．鋳造，溶接，成形加工分野でのシミュレーション技術の適用，さらには製造計画シミュレーション技術の適用により，製品

を効率よく生産することが可能となり，製品の性能向上，品質の安定に大きく寄与している．

今後は，各種シミュレーション技術で精度向上を図るとともに，より簡易に適用できるような機能を充実させることで，適用製品の拡大を図っていく．

参 考 文 献

- (1) 佐近淑郎，第1回“革新的鋳造シミュレーション技術”シンポジウム講演集(2001)p.6～11
- (2) 大平竜也ほか，日本機械学会論文集(B編)68巻(2002)p.183～188
- (3) 藤本二男，固有ひずみの概念による溶接残留応力及び溶接変形の解析法，溶接学会誌 vol.39 No.4(1970)p.236～252
- (4) 鄧徳安，曲面薄板構造物の溶接組立におけるギャップ及び目違いを考慮した変形予測，大阪大学学位請求論文(2002)
- (5) 上森ほか，スプリングバック解析におけるパウシンガー効果の適切なモデル化の重要性，塑性と加工 Vol.43 No.498(2002)p.639
- (6) 日本塑性加工学会編，材料加工の計算力学，コロナ社(1997)
- (7) 藤田憲ほか，バーチャルファクトリ利用による工場支援システム，日本機械学会1999年度年次大会論文集(I)p.381～382
- (8) 藤田憲ほか，製造計画シミュレーション技術の開発，溶接学会全国大会講演概要 第72集(2003)p.180～181



鴨和彦
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー主席 工博



藤谷泰之
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー



下畠幸郎
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー



藤原直之
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー



田房正宏
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー



石井建
技術本部
高砂研究所
製造技術開発センタ
ー