

当社の解析技術の現状と今後の展望

Current State and Future Prospect of Computer Simulation Technology in JSW



吉田 稔*
Minoru Yoshida



岸 恭弘**
Yasuhiro Kishi



鈴木 茂**
Shigeru Suzuki



柳沢 祐介**
Yusuke Yanagisawa



博士(工学) 富山 秀樹***
Dr. Hideki Tomiyama



技術士(機械) 藤後 宏之****
P.E.Jp (Mechanical) Hiroyuki Togo



久保 慶起***
Yoshiaki Kubo



藤 貴洋*
Takahiro Fuji

要 旨

本報告では当社の室蘭製作所、広島製作所、および横浜製作所における解析技術の現状と今後の展望について述べる。当社の解析技術は、室蘭製作所においては鉄鋼材料の製造プロセスに特化した解析を特徴とし、広島製作所においては樹脂流動解析に特化した解析を特徴としている。また3製作所とも、構造、流体、伝熱、機構などの汎用解析ソフトを用いて製品の解析を行っている。これらの解析技術は当社の“ものづくり”を支えるとともに製品コア技術の向上に寄与している。今後の展望としてIoT (Internet of Things), Big Data, AI (Artificial Intelligence) といったデータサイエンスを活用して、解析技術を“ものづくり”だけでなく、顧客にソリューションを提供する“価値づくり”につなげてゆく。

— Synopsis —

This paper describes the current state and future prospect of computer simulation technology in Muroran plant, Hiroshima plant, and Yokohama plant of JSW. In Muroran plant, the simulation technology is specialized for the manufacturing process of steel products, and in Hiroshima plant, is specialized for the resin flow analysis. And in each three plants, general-purpose analysis software such as structural, fluid, heat transfer, mechanism, and so on, are used for the design and the manufacturing of their products. These technologies have supported our “monozukuri” (manufacturing) and improved our core technologies. For the future, with utilizing the data science, such as IoT (Internet of Things), Big Data, AI (Artificial Intelligence), the computer simulation technology will contribute not only for the “monozukuri” but also for “kachizukuri” (value making), by which we can offer the benefit of our customers as the solution.

*: 横浜研究所
Yokohama
Research Laboratory

** : 室蘭研究所
Muroran
Research Laboratory

*** : 広島研究所
Hiroshima
Research Laboratory

**** : 水素事業推進室 広島分室
Hydrogen Business Promotion Office
Hiroshima Branch Office

1. はじめに

本報告における解析技術とは、コンピュータ・シミュレーション、CAE (Computer Aided Engineering) などと同義であり、基礎方程式に基づき数学的にモデル化した種々の現象に対してコンピュータを用いて数値解を求める技術のことをいう。

解析技術の適用による効果は、性能向上、開発期間短縮、コスト低減、トラブル対策、現象理解など多岐にわたる。解析技術は企業の“ものづくり”を支える基盤技術であり、事業活動の根幹である製品のコア技術を向上させるための技術である。

コンピュータ・パワーの増大に伴い、解析技術は大規模化、高度化、多様化しつつある。20年くらい前には不可能であった大規模3Dモデルの解析が可能となり、単一部品からコンポーネント、アセンブリへと、より複雑で大規模なモデルの解析ができるようになった。また、熱、流体、構造などの物理力を連成させて解析するマルチフィジクス解析といった高度な解析も可能になっている。さらに従来の有限要素法だけではなく粒子法、分子動力学といった多様な解析手法が使われるようになってきている。

このような技術の進展により、研究開発、設計、試作、製造、故障予知、安定的な生産維持など、ものづくりのあらゆる場面で解析技術が求められている。

本報告では当社の室蘭製作所、広島製作所、および横浜製作所の3工場における解析技術の現状と今後の展望について述べる。

2. 当社解析技術の概要

図1に当社事業部門の構成と製品群を示す。素形材・エネルギー事業の製品は室蘭製作所において製造している。産業機械事業の製品は、樹脂機械製品とその他機械に分類され、広島製作所と横浜製作所で製造している。

表1に各製作所における解析技術の適用分野を示す。室蘭製作所においては鉄鋼材料の製造プロセスに特化した凝固、鑄造、鍛造、熱処理、溶接などの専用解析ソフトを鑄鍛鋼製品、塔槽製品に適用している。最近の新しい取組としては3.1.3項で後述するように、鋼の熱処理工程における相変態に伴う温度-組織-応力の連成関係を考慮して応力・ひずみを定量的に予測する解析を行っている。また構造、流体、伝熱など汎用解析ソフトを用いて製品の解析を行っている。

広島製作所においては樹脂流動解析に特化した専用解析ソフトを樹脂機械製品に適用している。押出機に関しては1979年に米国ステーブンス工科大学の“Polymer Mixing Study”研究プロジェクトに参加して国際的な交流を進め、当社独自の二軸押出機内の樹脂流動解析技術を開発してきた。射出成形に関しては1988年から2002年の期間、PDC (Plastic Design Center) 共同研究体(三井物産、三井化学、カネカ、デンカ、積水化学、構造計画研究所、プラメディア)に参画して射出成形CAEの実用化を進めてきた。最近の新しい取組としては、粒子法を適用して二軸押出機内での樹脂の熔融可塑化挙動の解析を行っている。また、構造、流体、伝熱、機構などの汎用解析ソフトを用いて機械製品の解析を行っている。

事業	素形材・エネルギー事業		産業機械事業	
工場	室蘭製作所		広島製作所・横浜製作所	
製品	鑄鍛鋼製品 ●発電用一体型ロータシャフト  ●原子炉圧力容器用シェルフランジ ●火力発電用タービンケーシング  ●製鉄用圧延ロール 	鋼板・鉄構製品／風力発電機 ●石油精製用圧力容器  ●クラッド鋼板・鋼管  ●風力発電機 	樹脂機械製品 ●大型造粒機【広島】 ●二軸押出機(TEX)【広島】  ●フィルムシート装置【広島】 ●プラスチック射出成形機【広島】  ●連続多層中空成形機【横浜】 	その他機械 ●エキシマレーザーアニール装置【横浜】  ●マグネシウム合金射出成形機【広島】 ●電管用緩衝器・密着連結器【広島】 ●コンプレッサー【広島】  ●防衛関連機器【広島】 

図1 事業部門の構成と製品群

横浜製作所においては汎用解析ソフトを用いて製品の解析を行っている。また、中空成形機に関する樹脂流動解析は広島研究所と連携して行っている。

表1 各製作所における解析技術の適用分野

室蘭製作所／室蘭研究所		広島製作所／広島研究所		横浜製作所／横浜研究所	
解析技術	適用製品	解析技術	適用製品	解析技術	適用製品
専用解析ソフト プロセス解析 凝固解析 鑄造解析 鍛造解析 熱処理解析 溶接解析	鑄鍛鋼製品 塔槽製品	専用解析ソフト 樹脂流動解析 ・スクリュー解析 ・Tダイ解析 ・成形解析	押出機 フィルムシート成形機 射出成形機 中空成形機 (横浜)	汎用解析ソフト 構造解析 流体解析 伝熱解析 機構解析	レーザー・プラズマ 応用製品 中空成形機
汎用解析ソフト 構造解析 流体解析 伝熱解析	鑄鍛鋼製品 塔槽製品 風力発電機	汎用解析ソフト 構造解析 流体解析 伝熱解析 機構解析	押出機 フィルムシート成形機 射出成形機 圧縮機	電磁界解析 光学設計解析	CVD装置 パントパスフィルタ レーザー 応用製品

3. 各製作所における解析

3.1 室蘭製作所

3.1.1 室蘭製作所における解析技術

室蘭製作所は1907(明治40)年の創業以来、長年にわたって培われた高度な技術を基盤に素材材製造工場として超大型から中小型までの鑄鍛鋼品、石油精製用圧力容器、そして鋼板・鋼管、さらには風力発電機器など、エネルギー分野を中心とした高品質な製品を製造している。これら大型鑄鍛鋼品の製造技術は多くの実験や試作を通じて確立してきたが、経済的、時間的な面で負担が大きいことから、近年は解析シミュレーション技術を幅広く活用している。

図2に代表的な鑄鍛鋼品の製造プロセスと解析技術の適用分野を示す。素材は主に電気炉で溶解し、精錬した後に鑄型に鑄込んで鋼塊とする。その後、液圧プレスで鍛錬することで形状を作り、熱処理と機械加工、製品によっては溶接が行われた後に品質を確認する検査を経て製品化される。当所では製造プロセス毎に製造条件を最適化する解析シミュレーション技術を適用しており、鋼塊を製

造する製鋼工程と鑄造工程では凝固解析と鑄造解析、プレスで成形する鍛錬工程では鍛造解析、加熱・冷却をして機械的性質を調整する熱処理工程では熱処理解析、溶接組立工程では構造解析と溶接解析を実施している。

ここで、近年の解析シミュレーション技術の適用事例を振り返ってみると、凝固・鑄造解析においては市販の鑄造シミュレーションソフトによる湯流れ・凝固解析が行われている。また、大型鋼塊に対応したマクロ偏析シミュレーションソフトを自社開発⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾し、精度の高い偏析予測を可能としており、超大型670トン鋼塊の製造技術確立に大きく貢献した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

鍛造解析ではPCの処理速度向上によって、市販の鍛造シミュレーションソフトの逐次鍛造解析機能を利用することが可能となり、より精度の高い解析を実施することができるようになっている。特に、Ni基超合金は結晶粒の微細化を鍛錬プロセスで行う必要があるが、変形抵抗が高い材料であることから鍛造効果を効率良く付与する方法を開発する必要があり、作業管理方法を含めた鍛造方法が解析シミュレーションと実験から考案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

熱処理解析では従来から市販の有限要素法解析ソフトを用いた熱伝導・構造の連成解析とともに、自社開発した機械的性質の予測プログラムを用いて熱処理条件の検討に利用してきた。最近では相変態を考慮した熱処理残留応力の解析手法の開発⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を行っており、熱処理プロセスの最適化に効果を出している。

溶接構造物である石油精製用圧力容器はASME等の規格に基づいた設計が必要であり、中には図3に示す1,000,000時間の定常運転に対するクリープ解析⁽¹²⁾を行って規格要求を満足する設計が行われている。また、石油精製用機器は高温長時間の稼働による焼戻し脆化や水素脆化などの経年劣化を受け、補修溶接時に溶接熱サイクルによる熱応力によって割れが発生することがある。この

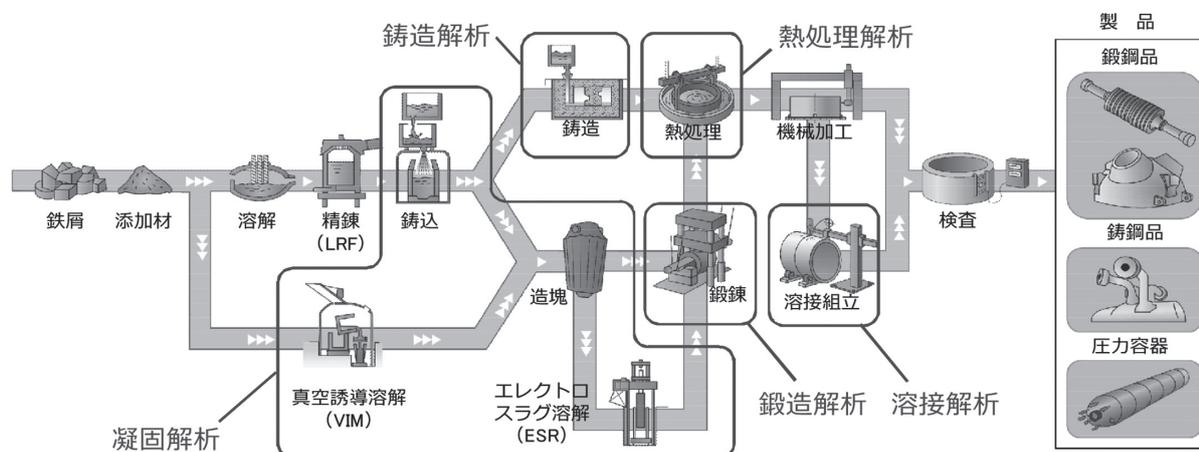


図2 鑄鍛鋼品の製造プロセスと解析シミュレーション技術適用分野

溶接割れを防止するため、溶接解析を活用して補修溶接の管理条件を見いだす研究⁽¹³⁾ ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾も行っている。更に最近では顧客サービス事業の一環として ISI (In Service Inspection) で余寿命評価に資する各種応力解析にも取り組んでいる。

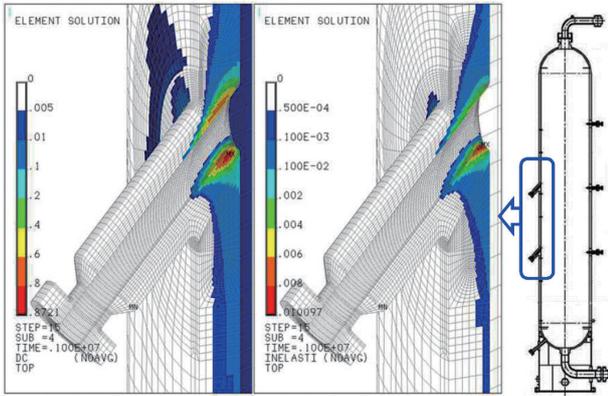


図3 石油精製用圧力容器に対する設計解析例⁽¹²⁾
1,000,000 時間定常運転後の累積クリープ損傷分布 (左)
と累積非弾性ひずみ分布 (右)

鍛鋼品以外では風力発電機器において解析シミュレーションが鋭意活用されており、ブレードの固有振動数解析⁽¹⁶⁾をはじめとして、風向変動を考慮した風況解析⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾や風車周囲の気流を解析して風車を効率的に運転する方法⁽¹⁹⁾ ⁽²⁰⁾の検討に利用している。

3.1.2 凝固解析技術

最新鋭の発電プラントでは、スケールメリットによるさらなる発電効率の向上を目的にタービンロータ軸材など発電機器の大型化が指向されている。しかし、鋼塊の大型化は内部のマクロ偏析や非金属介在物、微小空隙欠陥を不可避的に増加させることから、性状の優れた鋼塊を造るには高度な製造技術を要する。

当所では鋼塊製造条件の検討に市販の凝固解析ソフト ProCast や自社開発のマクロ偏析シミュレーションソフトを活用している。特に、自社開発ソフトは低圧タービンロータ軸材に用いられる 3.5%NiCrMoV 鋼において極めて高いマクロ偏析予測精度を有している。図4に ProCast による鋼塊の凝固途中における温度解析結果を、図5に自社開発ソフトによる鋳込み終了後からの鋼塊縦断面における炭素偏析比分布の時間経過推移を示す。大型鋼塊では、凝固完了までに要する時間が長くなるため、Top 側軸心ではマクロ偏析によって化学成分が濃化することがわかる。

これらの解析シミュレーション技術を活用し、当所では平成 22 年にそれまでの製造限界であった 600 トンを大幅に超える 650 トン鋼塊⁽⁴⁾を、平成 23 年には世界最大サイズとなる 670 トンの鋼塊から一体型低圧タービンロータ軸材

を試作⁽⁵⁾した。写真1に試作した 670 トン鋼塊の外観、表2に 670 トン試作ロータの化学成分を、図6に自社開発ソフトによる成分濃度予測結果を鋼塊の炭素偏析比分布と共にプロットした結果を示す。鋼塊の肌は良好な表面性状であり、凝固時間は事前に行った凝固解析予測と良く一致した。また、チェック分析にて得られた 650 トン鋼塊および 670 トン試作ロータの炭素濃度分布の実績も自社開発ソフトで予測していた分布と良く一致した。特に、鋼塊本体 Top 側の炭素濃化は解析シミュレーションで予測していたように軽微であり、超大型鋼塊においても比較的均質な成分分布が得られた。試作ロータについては非破壊検査や機械的性質等の評価も行い、従来の 600 トン鋼塊製と同等の品質であることを確認している。

世界最大の 670 トン鋼塊製低圧タービンロータ軸材の製造技術を確立したことで、今後、発電プラントにおける発電容量増大への要求に対して、本凝固解析技術は大きく貢献できるものと考えている。

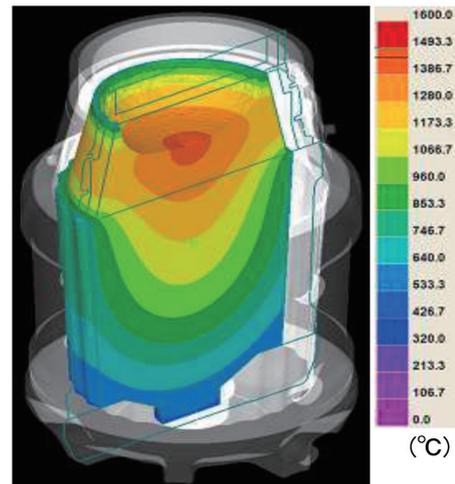


図4 凝固解析結果 (温度分布)

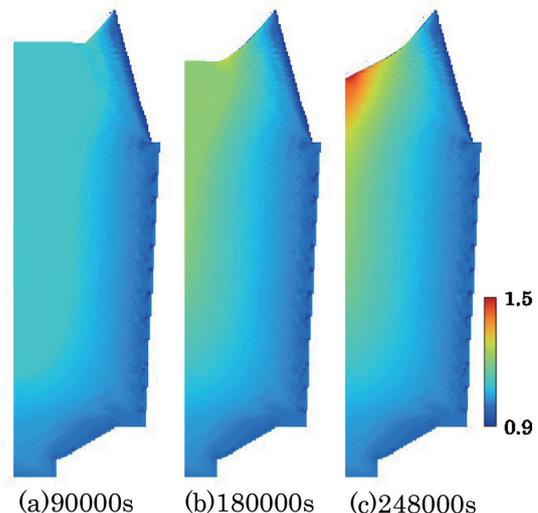


図5 鋼塊縦断面の炭素偏析比分布



写真1 試作した670トン鋼塊の外観

表2 670トン試作ロータの化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.24	0.05	0.33	0.0025	0.0014	3.68	1.74	0.43	0.07

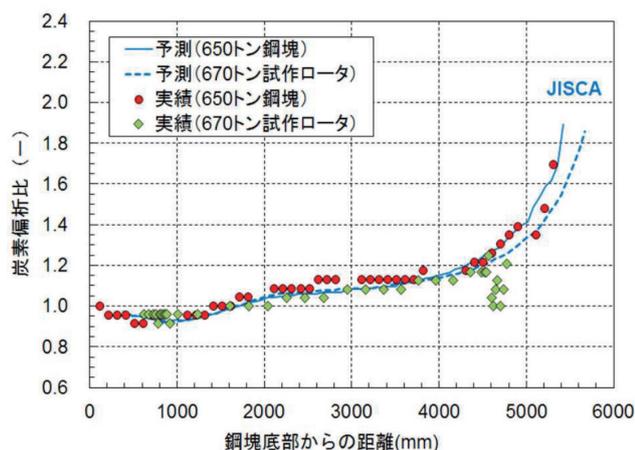


図6 鋼塊中心部の炭素濃度予測と実績

3.1.3 熱処理解析技術

一般的に鋼の熱処理工程では、温度変化に加えて相変態が生じることから、材料内の応力・ひずみ分布は複雑に変化する。この相変態を伴った状態の応力・ひずみを定量的に予測しようとする場合、図7に示す温度-組織-応力の連成関係を考慮した解析を行う必要がある。しかし、汎用の解析シミュレーションソフトでは、鋼種及び冷却条件によって複雑に変化する変態挙動や、各連成挙動を十分に考慮できないものが多い。特に、大型鍛鋼品は質量効果によって加熱・冷却工程が長時間になることから、一般的な機械部品などの小物の焼入れ工程とは現象が大きく異なる。このため、大型鍛鋼品の現象に適した、より高精度な解析手法の構築が課題となっていた。

このような背景から当所では、上記の連成関係を考慮し

た独自の解析コードを開発し、汎用の有限要素法解析ソフトANSYSにユーザーサブルーチンとして組み込んで使用している。本解析手法の特徴を図2に示す。熱伝導解析で得られた温度履歴を用いて構造解析を行うのは従来と同様であるが、相変態の影響を考慮するため、鋼の相分率を内部パラメータとして計算し、それに応じたひずみ変化を個々に求めている。ここで、変態ひずみとは変態膨張・収縮によるひずみ変化を表しており、変態塑性ひずみは、変態時に僅かな応力が作用することで塑性変形が進行する挙動を表している。さらに、大型鍛鋼品は加熱・冷却の時間が長く、熱処理中の応力緩和挙動を無視できない場合が多い。そこで、クリープひずみで応力緩和挙動を考慮できるようにした。これまで、大型鍛鋼品の解析では変態挙動と応力緩和挙動のどちらか一方を考慮した計算が比較的实施されてきたが、これらを同時に考慮しているものは皆無であり、本解析手法の特徴である。

この開発した解析手法を最大胴径約1300mmのNiCrMoV鋼製鍛造軸材に適用した結果の一例を図9に示す。解析は軸材を850℃から室温まで大気中で自然冷却した場合を想定したもので、相変態を考慮する条件を3パターンに変化させて周方向の残留応力分布を比較した。(a)は変態ひずみまで考慮した条件(図8の①~④)であり、残留応力が実際よりも非常に小さく評価されており、部材表面からの割れを検討する場合には危険側の評価となる。(b)は変態塑性ひずみまで考慮した条件(図8の①~⑤)で、部材表面には大きな引張残留応力が生じており、変態塑性を考慮することで応力分布が大きく変化している。さらに(c)は応力緩和挙動まで考慮した条件(図8の①~⑥)の結果であり、部材表面に作用している引張応力が緩和されて、実測値と最もよく一致した結果が得られた。このことから、大型鍛鋼品の熱処理解析では変態塑性と応力緩和挙動を同時に考慮することが重要であることが確認された。

本解析手法を用いることで、大型鍛鋼品の熱処理工程を従来よりも精度良くモデル化することができ、熱処理での応力とひずみをより正確に把握することが可能となった。当所ではこの解析シミュレーション技術を活かし、熱処理プロセス最適化による品質・コストの更なる改善に取り組んでいる。

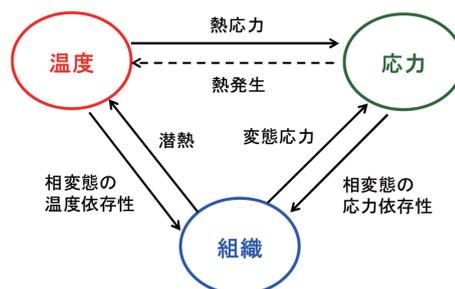


図7 温度-組織-応力の連成

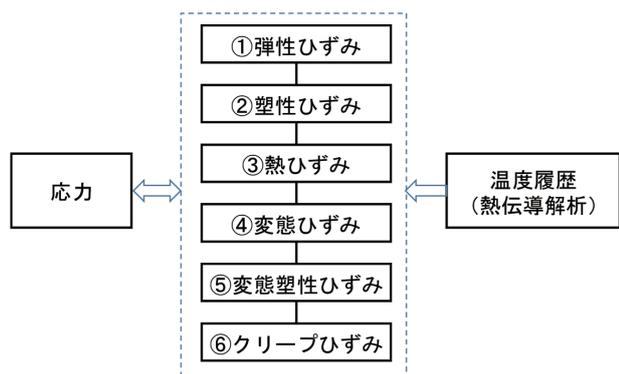


図8 相変態を考慮した熱処理解析

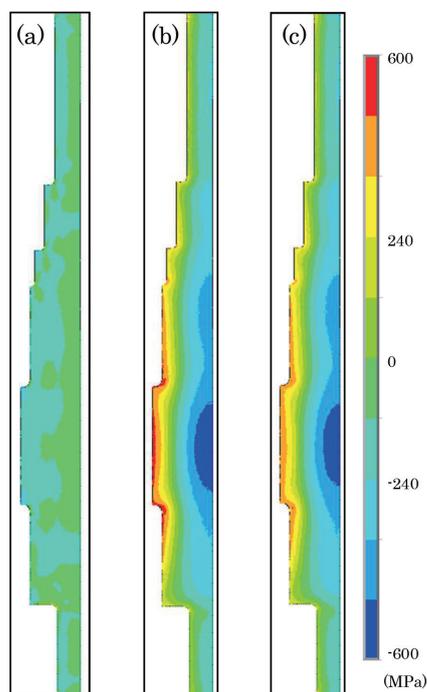


図9 鍛造軸材の周方向残留応力分布
(a) 変態ひずみまで考慮、(b) 変態塑性まで考慮、
(c) 応力緩和まで考慮

3.2 広島製作所

3.2.1 広島製作所における解析技術

広島製作所は1920年の設立以降、一貫して鉄鋼素材を加工し製品化する技術を培ってきた。戦時中までの主力製品であった火砲製造は、現在もお防衛機器の重要部品として製造を続けている。その中で、熱応力シミュレーションを軸とした理論解析を駆使することで設計支援などの活用を推進している。戦後、事業基盤を産業機械へと移行してからは、主にプラスチック成形加工機械の開発と製造が事業の中心となり、1950～70年代は理論式の導出とそれを用いた計算を駆使した設計を行うことで、市場シェアの拡大を達成してきた。1980年代以降はコンピュータの発展に伴う、いわゆる第三次産業革命の波に乗り、樹脂業界では先駆けたコンピュータ・シミュレーションの取り組みを開始した。1990年代からは実業務への活用を推進し、圧縮機などの機械製品も含めた強度問題や振動問題などの不良率低減が図られている。

図10に樹脂製造プロセスの流れと、各種樹脂加工機械の概略を示す。樹脂業界では、1970年代から射出成形の金型内の熔融樹脂流動が着目され、その理論予測技術の開発に注力されていたが、成形加工装置メーカーである当社は理論解析への着手当初からスクリュ回転による樹脂流動予測技術の開発に注力してきた。冒頭に述べたステューブンス工科大学の“Polymer Mixing Study”やPDC共同研究体への参画もその活動のひとつである。熔融樹脂の流動性の難しさは、一般的な低粘度ニュートン流体が示す重力や遠心力などのいわゆる慣性力支配の流動性とは異なり、高い粘性からもたらされる粘性流動が支配的になることにある。そのため、スクリュ回転により生じる高い剪断発熱エネルギーや瞬間的に生じる局所圧力の上昇など、樹脂特有の現象を把握することが樹脂の品質安定性や最適物性の発現への大きな指針となるため、シミュレーションが活用される。

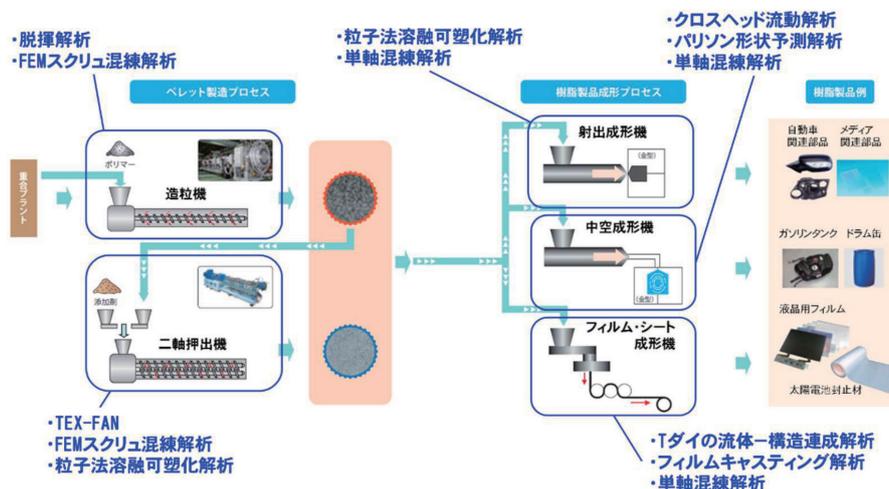


図10 樹脂製造プロセスの流れと各種成形装置

ここで、スクリュ解析技術の開発経緯を述べる。“Polymer Mixing Study”への参画で培ったFAN (Flow Analysis Network)法の解析技術を基に、米Akron大学のProf.Whiteとの交流や九州大学の船津・梶原両教授からの押出理論の教授により、弊社オリジナルソフトウェア“TEX-FAN”を2002年に開発した⁽²¹⁾ ⁽²²⁾ ⁽²³⁾。このソフトウェアは二軸押出機へのオプション付属製品として多くの顧客への納入実績を誇り、コンパウンドプロセスのスクリュ形状検討や樹脂物性の予測を行うために活用されている。その後も現在に至るまで、脱揮解析機能の追加(図11)⁽²⁴⁾や三次元解析機能の追加⁽²⁵⁾など、多くの機能拡張を進めており、現在もお進化を続けているソフトウェアである。

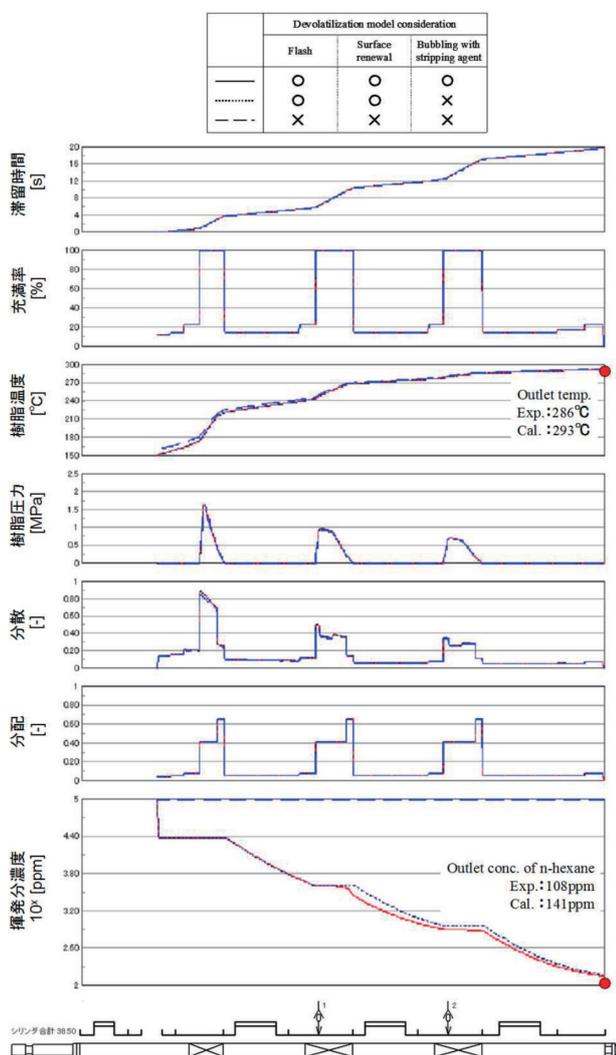


図11 TEX-FANによる脱揮解析事例

FEM型のスクリュ解析は、1990年代の九州大学との共同研究実施当初から完全三次元FEMコードの開発を進めており⁽²⁶⁾ ⁽²⁷⁾、溝つきシリンダ“NIC”⁽²⁸⁾や特殊混練スクリュ“TKD”⁽²⁹⁾など、実験検証だけでは把握が困難な混練メカニズムを詳細に解明することができてい

(20)

る(図12)。現在では汎用ソフトウェアも活用しながら、最適な混練エネルギーを達成可能なスクリュ形状の検討を行うなど、必要とされる混練エネルギー量を数値化し、それをシミュレーションにより検討を進める手段などが図られている。

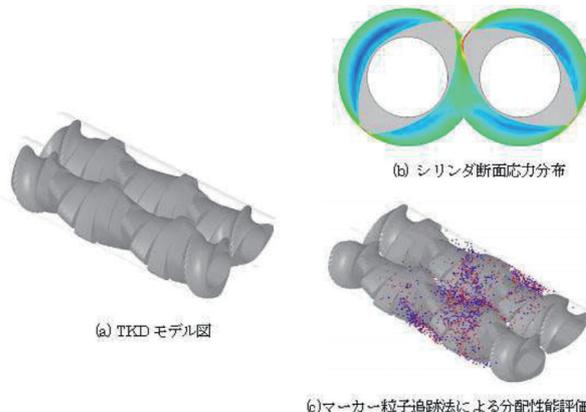


図12 FEM解析によるTKDの混練挙動の予測事例

また、近年では新たな解析手法の構築を目的として粒子法の開発を進めている。粒子法解析を用いると、FEM解析では極めて困難であった3D解析による自由表面問題を解くことが可能である。本格的な開発は2000年代後半から開始し、MPS (Moving Particle Simulation)法による非ニュートン解析⁽³⁰⁾ ⁽³¹⁾、発熱予測、ポリゴン壁考慮⁽³²⁾によるスクリュ解析など順次解析機能の開発を進め、現在では凝固予測や脱揮予測等も可能になっている。さらには、世界的に為し得ていなかった固体樹脂の熔融可塑性モデルの開発に成功し、押出機内の樹脂の固体輸送から熔融可塑性、溶融体輸送の一貫解析が実施できるようになっている(図13)。

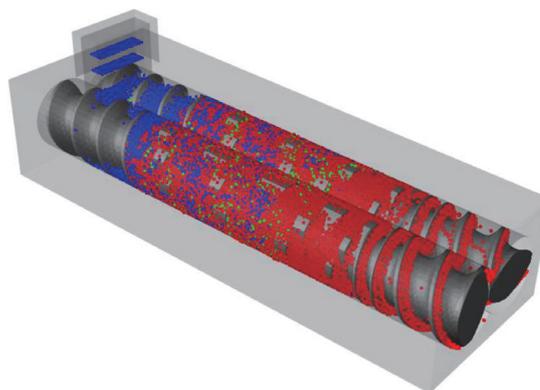


図13 粒子法解析による二軸押出機内の樹脂の熔融可塑性予測事例

解析技術は流動解析だけでなく、構造解析も多く行われている。その多くは機械部品の稼働・変形時に生じる局所応力の予測であるが、過去には静解析で検討がなされていたものが現在では非線形解析などにより複雑な予測がなされており、より高度な設計支援が可能となっている。

3.2.2 機構解析技術

当社が製作する射出成形機、押出機および圧縮機などの製品は、能力向上のために高速高荷重に向う傾向にある。このような運転条件では、機器全体もしくは駆動部品単体の振動増大や、摺動面に掛かる負荷増大が特に懸念される。従って、機器の信頼性と安全性を担保するうえで、事前の動的挙動予測が重要であり、機構解析が担う役割は大きくなっている。

このような背景から当所では、機構解析アプリケーション Adams による質点系の動的挙動解析をベースに、汎用構造解析ソフト ANSYS もしくは Marc による弾性応答を併せて解析することで、予測精度を向上している。

まず、機器全体の振動応答を予測する場合においては、モード重ね合わせ法を併用した機構解析が非常に有効である。具体的には、機器を構成する各部品の動的応答特性を、ANSYS を用いたモード解析から事前に求めておき、Adams の機構解析条件として受け渡すことで、解析精度の向上を図る。図 14 に、当社製のラビリンス式圧縮機が基礎に与える垂直荷重について、解析結果と実測結果を併せて示す。図 14 より垂直荷重に精度良い一致が得られており、機器全体の振動状態を表現できていることが分かる。このような解析は、船用圧縮機が船体構造物に与える荷重などを評価するうえで重要である。

次に、摺動部品などの局所的な接触応力状態を詳細に予測する場合においては、構造 - 機構連成解析が非常に有効である。具体的には、摺動部品の弾性挙動は Marc を用いた構造解析で解き、機器全体の動的挙動は Adams を用いた機構解析で解き、これらを連成させることで摺動部品の接触状態を予測することが可能である。図 14 には

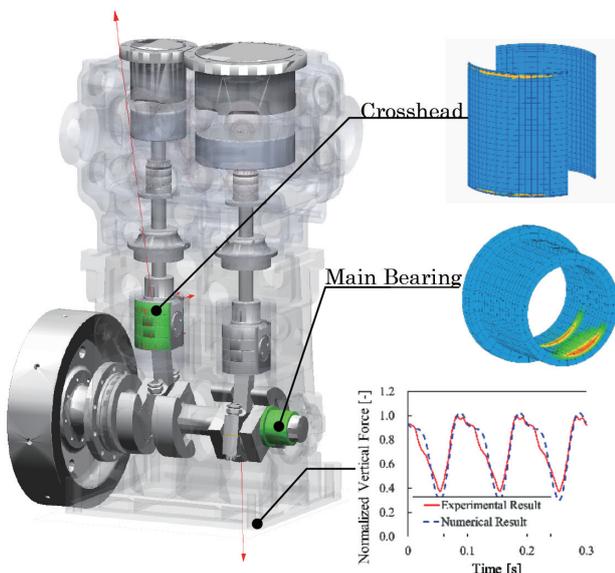


図 14 機構 - 構造連成解析図 (ラビリンス式圧縮機)

クロスヘッドと主軸受けの接触応力状態の解析例をカウンター図で示す。これらの解析結果は実際の部品の損耗部位と精度よい一致を示すことが分かっている。

以上のような弾性挙動を考慮した機構解析を用いることで、当社製品の性能向上に寄与できるものと考えている。

3.2.3 射撃時の薬きょう変形挙動における解析技術

特機事業の主要製品である火砲は、高温、高圧、高速下での過酷使用環境にあるため、計測手段を駆使しても説明が非常に困難な現象が多く存在する。その一つに弾丸射撃時の薬室と薬きょう (図 15) の変形挙動がある。これまで、薬きょうは射撃時の腔圧上昇に伴い内部残留応力が発生し、その後残留応力が開放 (薬きょうが切断) されると外径が拡大すると考えられていた。この考えに基づき、従来の薬室は、腔圧に耐える強度と薬きょうの変形を抑える剛性を有するように設計を行ってきた。しかしながら、最近になって実際の射撃後薬きょうの残留応力は外径が収縮する方向に生じていることが判明しており (図 16)、これは従来の考えとは真逆の挙動である⁽³³⁾。この現象を理論的に解明するため、熱負荷を考慮した腔圧上昇時の応力予測を、連成解析手段を駆使して行っている。

解析は FEM 汎用構造解析コード ANSYS を用い、非定常熱伝導解析と弾塑性応力解析との連成解析を実施する。まず、非定常熱伝導解析を行い薬きょうと薬室の温度上昇の予測を行う。そのデータを弾塑性応力解析の境界条件に与えることで、熱応力を加味した超高压下での応力予測が可能となる。図 17 に薬きょうの解析結果を示す。薬きょうに生じる残留応力は熱負荷にて生じる熱応力が主要因であり、圧力負荷は薬室の剛性によって

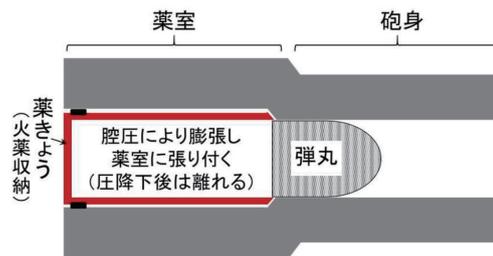


図 15 薬室と薬きょう

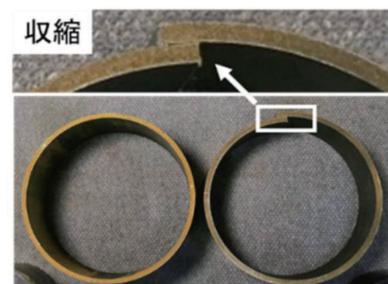


図 16 射撃後の薬きょうの外径収縮の様子

抑制されるため、残留応力にあまり影響を及ぼさないことが判明した⁽³⁴⁾。この結果は、実際の射撃後薬きょう残留応力分布と同様であり、複雑な解析が可能となったことで得られた新たな知見となっている。

この非定常熱伝導解析と弾塑性応力解析との連成手法により、射撃時の計測が不可能な部位の残留応力を含めた変形挙動の予測が可能になってきた。現在は定性的な予測レベルであるため、今後はその定量性を高めるために温度依存性などの詳細な物性値を取得し、さらに解析手段の高度化を進める必要がある。この解析技術の活用により、より詳細な射撃時の挙動解明が可能となり、より精度の高い火砲設計の支援が可能になると期待できる。

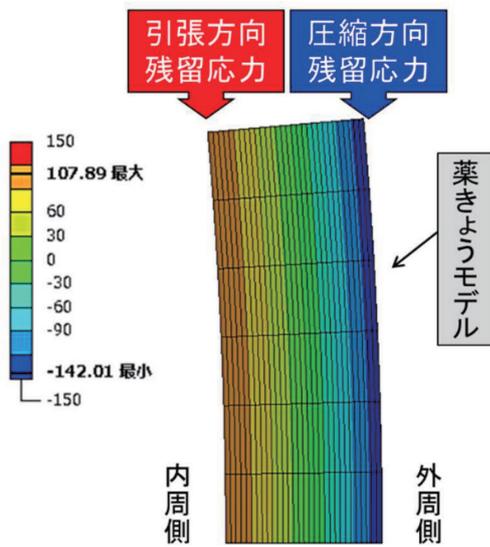


図17 射撃後の薬きょうの残留応力分布図

3.3 横浜製作所

3.3.1 横浜製作所における解析技術

横浜製作所の製品構成は、図18に示すように樹脂加工機械とレーザー・プラズマ関連製品の2つに分類される。樹脂加工機械は、1962年ドイツのカウテックス社から中空成形機の技術導入をして以来、国産化そして独自技術開発へと進展してきた。図18には4種6層の樹脂で構成される自動車用燃料タンクPFT (Plastic Fuel Tank) 製造用の中空成形機を示す。解析技術としては、中空成形工程のシミュレーションおよびスクリュ設計のための樹脂流動解析を広島研究所と連携して行っている。また、汎用解析ソフトを用いて製品設計のための構造解析、伝熱解析などを行っている。

レーザー・プラズマ関連装置は1995年のエキシマレーザーアニール (ELA; Excimer Laser Anneal) 装置の製造開始以来、様々な応用製品を開発・製造している。図18にはプラズマALD (Atomic Layer Deposition: 原子層堆積) 装置の外観を示す。解析としては、チャンバー内での気流解析、基板ステージの熱解析など、汎用の流体、伝熱、構造解析ソフトを使用している。また、レーザー光学系設計のための光学設計解析、およびプラズマ発生装置やバンドパスフィルタの設計のための電磁界解析など汎用解析ソフトを用いて解析している。

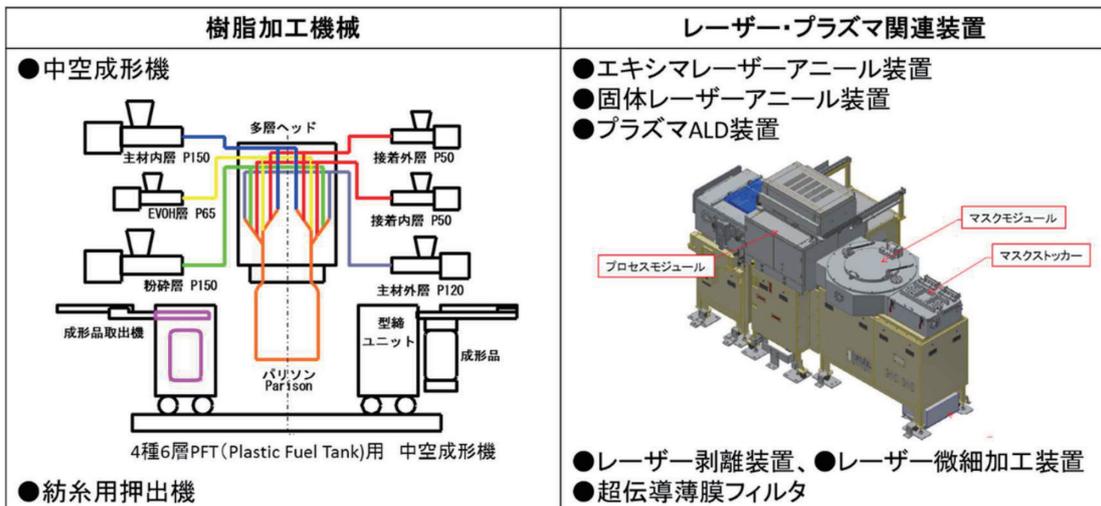


図18 横浜製作所の製品構成

3.3.2 中空成形におけるパリソン成形工程シミュレーション

中空成形は押出機から筒状の溶融樹脂を押し出す工程（パリソン成形工程）、パリソンを金型で挟み込む工程（ピンチオフ工程）、およびパリソン内部に空気を吹き込み、中空品を成形する工程（ブローアップ工程）の3つに大別される。ここではパリソン成形工程における解析事例について紹介する⁽³⁵⁾。

パリソン成形工程ではダイを出た後に樹脂が膨張するダイスウェル現象や樹脂の自重でパリソン自体が伸ばされてしまうドロウダウン現象など、樹脂の粘弾性挙動に起因する予測困難な問題がある。粘弾性挙動を定量的に予測する流体力学は未だ十分には解明されておらず、提案されている粘弾性構成方程式（力と変形の間係を表す数学モデル）の中から流体挙動を比較的良好に予測できるモデルを選択し、それに合わせて実現象を精度良く予測できる解法と評価手法を開発する必要がある。

図19に解析に用いたダイ形状を示す。図20には粘弾性構成方程式としてPPT（Phan-Thien-Tanner）モデルを用いて解析した各ダイ形状によるパリソン形状と温度分布を示す。

Case1の流路が真っすぐなストレートダイでは、ダイから流出後、スウェル（膨れ）がみられた後、その形状を保持したまま下流に流れる。Case2では、スウェルした後パリソ

ン径が小さくなる形状となる。これはダイ出口で流路が拡大しているため応力緩和が起り、ダイから出た後も緩和が進行しスウェルが小さくなるためと考えられる。Case3ではスウェルが下流にいくにつれ大きくなる。これはダイ上流の縮小部での加速流に伴う伸長作用が強くなり、樹脂分子が流れ方向に強く配向されるため、ダイから出たあと分子が定常状態へ復元しようとする作用（第一法線応力差）が強くなるためと考えられる。

これらの解析結果は定性的には妥当であるものの、定量的にパリソン形状を十分予測できるレベルには達していない。しかし、解析により外気の温度条件の影響をある程度予測できるようになったこと、さらに、中空成形機においてパリソンの肉厚を制御するパリソンコントローラを用いた場合の形状予測は良好に行えたことより、パリソン成形工程における複雑な現象の理解が深まり、コア技術の向上につながるものとなった。

3.3.3 レーザー・プラズマ関連製品における解析技術

(1) ELA 装置照射部における酸素濃度低減のための気流解析

ELA装置は、TFT（Thin Film Transistor）フラットパネル用のガラス基板上に形成されたアモルファスSi膜を低温 poly-Si 化するラインビームタイプの結晶化装置である。装置販売当初はG2サイズ（主に370mm×470mm）程のガラス基板に対応した装置サイズであったが、現在ではG6サイズ（主に1850mm×1500mm）に対応した装置を販売している（図21参照）。パネルの大型化に伴ってELA装置のサイズも大型化するとともに、パネルの高精細化・高機能化に加えてOLED（Organic Light Emitting Diode；有機発光ダイオード）パネルやフレキシブルパネルを実現するために高度なレーザー照射技術が求められる。そのため、装置設計時にガラス基板搬送挙動や装置内部の気流挙動、レーザー光学系、装置の振動影響などを検討するために解析技術を取り入れている。

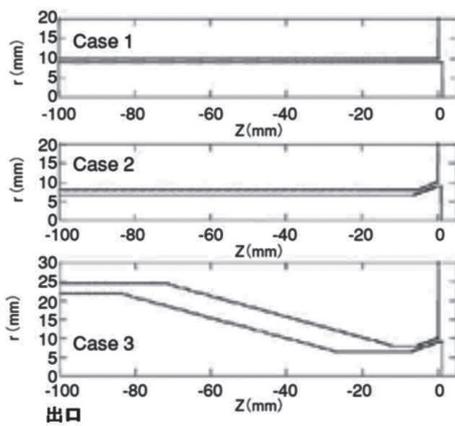


図19 解析に用いたダイ形状

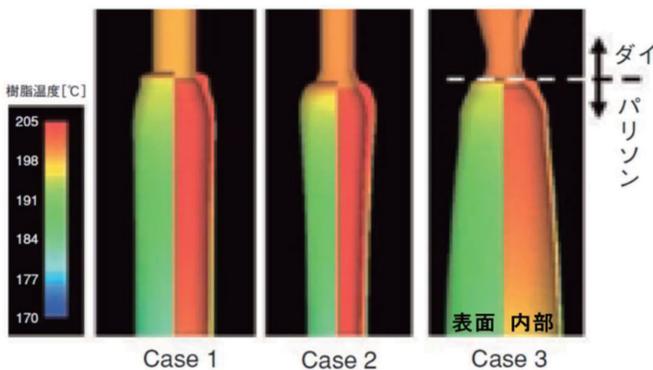


図20 各ダイ形状によるパリソン形状と温度分布

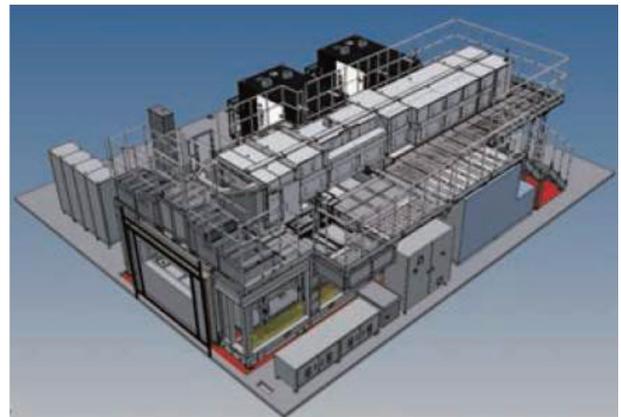


図21 ELA 装置外観

解析事例の一つとして、レーザー照射部における酸素濃度低減検討について述べる。レーザー照射工程を施すため、前工程からガラス基板を受け取って、ガラス基板をステージ上に載せ、ステージを移動させて、ガラス基板の上にエキシマレーザーを照射する。ここで、レーザー照射時に空気中の酸素がSiを酸化するのを防止する必要がある。そのため、図22に示すようにレーザー照射部まわりに不活性ガスを注入して酸素濃度を低減する機構である局所シールボックスを取り付けている。ELA装置の各サイズに対応した局所シールボックスの設計検討のため、汎用解析ソフトANSYSを利用した気流解析を実施している。

レーザー照射部まわりにおけるガラス基板上方の酸素濃度分布を図23に示す。酸素濃度はレーザー照射部周辺で十分に少なくなっていることがわかる。この結果を基に機構を設計して装置に導入したところ、酸素濃度の十分な低減が見られ、解析結果と実測の定量的な一致が見られた。

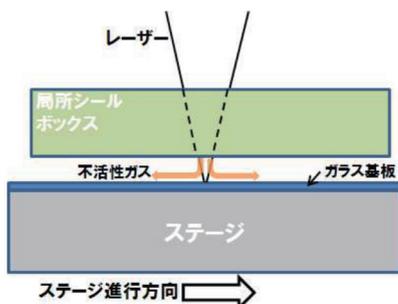


図22 局所シールボックス概要断面

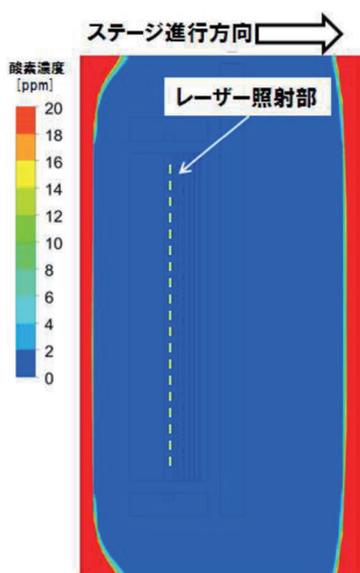


図23 照射部周りの酸素濃度

(2) プラズマ ALD 装置におけるガス流れ解析

近年、OLED は、スマートフォンや大型テレビなどに適用され、その市場は拡大中であるが、その中でもフレキシブル OLED ディスプレイが注目をされている。当社では

(24)

ALD 法によりフレキシブル OLED ディスプレイ封止膜を形成することを目的とし、ALD 装置の開発および販売を行っている。

当社 ALD 装置の特徴の1つは、反応ガスを基板に対して水平方向に供給するラテラルフロー方式を採用している点である(図24参照)。ALD では反応性が高いガスが利用されるため、ガス供給口付近でパーティクルが発生し易い。従って、基板上部にガス供給口が存在するトップフロー方式では基板上に到達するパーティクルが増加する傾向にある。

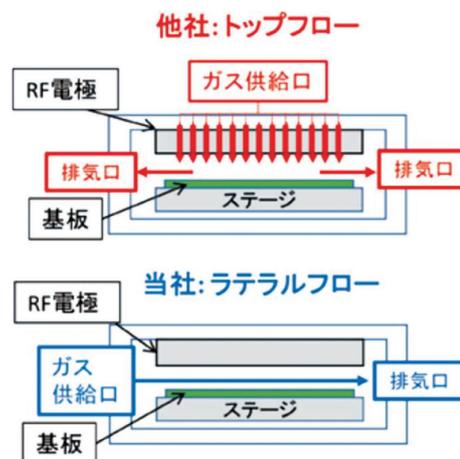


図24 プラズマ ALD 装置の原料ガス供給手法比較

ラテラルフロー方式の欠点はガスの均一供給であるが、ガス濃度の均一性を検討するために汎用流体解析ソフトを用いて行った解析事例を紹介する。

表3に解析条件および解析手順を示す。まず①定常解析において不活性ガスの定常流れ場を解析し、次に②非定常解析1において定常解析結果を初期条件とした不活性ガス流れの中に反応ガスを0.1sec間注入する解析を行い、最後に③非定常解析2において、不活性ガス中での反応ガスの挙動をシミュレートした。

図25に基板ステージ上での反応ガス濃度分布の時間推移を示す。ラテラルフロー方式の特徴である反応ガスが右から左に移動していく挙動が再現されている。ガス供給部、成膜室内の構造、ガス供給量などさまざまなパラメータを変化させた解析により、装置設計およびプロセス条件の最適化に資する情報が得られた。また実験的にも面内の膜厚均一性±3%以内が得られていることを確認している。

表3 解析条件および解析手順

		①定常解析	②非定常解析1	③非定常解析2
Time		—	0~0.1sec	0.1~0.5 sec
初期条件		—	定常解析結果	非定常解析1の結果
ガス供給量	反応ガス	—	Q ₁	—
	不活性ガス	Q ₀	Q ₂	Q ₀

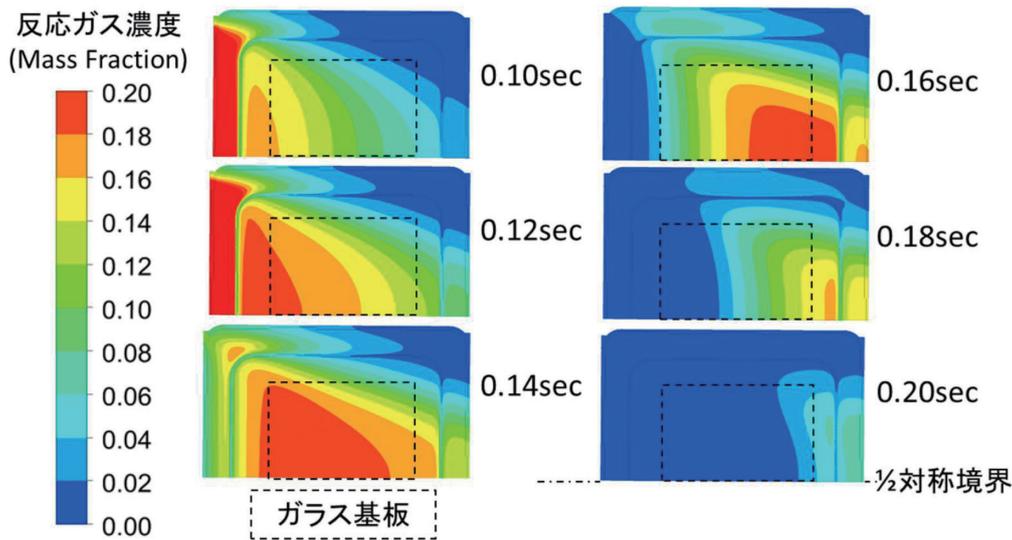


図 25 基板ステージ上での反応ガス濃度分布の推移

4. 今後の展望

(1) ものづくりから価値づくりへ

解析技術は企業の「ものづくり」を支える基盤技術であり、事業活動の根幹である製品のコア技術を向上させるための技術であると述べた。しかし「ものづくり」だけではグローバルな企業競争で生き残ることは困難であり、「価値づくり」が重要であるといわれている。

当社のような生産財製造企業にとっての「価値づくり」については下記の説がある⁽³⁶⁾。

【価値づくり】=【ものづくり】+【競合状況】+【顧客価値基準】

ここで、【顧客価値】=【機能的価値】+【意味的価値】

意味的価値とは製品そのものの価値ではなく、それに伴って顧客企業に固有のソリューションが提供されることによって生まれる。この価値は、顧客とのすり合わせのプロセスの中で創られる。価値ある製品を生産し続けるためにはコア技術を磨くことが必要である。特定の分野での長年の経験で培ったコア技術を使い、意味的価値の高い製品を提案・開発していくことにより付加価値を創出していくことができる。

(2) データサイエンスと解析技術

近年 IoT (Internet of Things), Big Data, AI (Artificial Intelligence) といったデータサイエンスに関連した言葉がブームである。これらは、ものづくり企業にとって顧客にソリューションを提供するためのツールである。現状では、当社の射出成形機集中管理システム NET100⁽³⁷⁾ や押出機制御システム (造粒機制御システム、TEX 専用コントローラ EXANET)⁽³⁸⁾ で収集されたデータは、ユーザ企業の所有物であるとして当社はデータ利用することができない。しかし、経済産業省では『Society 5.0・Connected Industries

を支える「ルールの高度化」⁽³⁹⁾ において「データオーナーシップ」という考え方でユーザ企業とメーカーとのデータ活用に関する「契約ガイドライン」を策定しており、今後メーカーにおいても製品の稼働データを活用できるようになっていくものと考えられる。

データを活用して顧客の利益となるソリューションを提供するためには、製品に生じる現象に対し解析と実験による検証を経て確立したコア技術が必要不可欠である。3.1.1 項で述べた室蘭製作所の ISI (In Service Inspection) における各種応力解析による余寿命評価はソリューション提供の例として挙げられる。広島製作所・横浜製作所の産業機械においては、故障などの不具合に対し解析・実験検証によるメカニズムの解明、定量的な判定値の設定など確立されたコア技術により、IoT によるソリューションの提供ができるようになると思われる。

(3) 解析技術者への期待

当社では各製作所の製品に共通点がほとんどないため、解析技術に関しても直接的に参照・応用できるものは少ない。しかし全社的な解析技術の向上、シナジー効果を期待して全社の解析技術者を集め「解析技術連絡会」を定期的開催している。これは、各製作所における解析事例を紹介することにより構造解析、流体解析といった共通要素技術に関する技術的な議論を通して、社内人脈の形成、相談できる人を知るといった横のつながりを持ち、他製作所の技術内容も含めて広い視野で考える契機となっている。

従来、解析技術者は設計部門や製造部門の後方支援との認識が強かった。しかし今後、解析技術は企業競争力の源泉となっていくので解析技術者は企業の最前線で活躍することが求められる。

参 考 文 献

- (1) 澤田朋樹, 及川勝成, 安斎浩一, 高橋史生, 梶川耕司, 山田人久: 鑄造工学, Vol.81, No.6 (2009), p283-288
- (2) 澤田朋樹, 及川勝成, 安斎浩一, 高橋史生, 梶川耕司, 山田人久: 鑄造工学, Vol.82, No.3 (2010), p142-148
- (3) 澤田朋樹: 日本製鋼所技報, No.64 (2013), p9-14
- (4) 梶川耕司, 鈴木茂, 高橋史生, 山本卓, 鈴木忠, 上田奏, 柴田尚, 吉田一: 日本製鋼所技報, No.63 (2012), p48-53
- (5) 山内隆史, 工藤秀尚, 岸恭弘, 上田奏, 吉田一, 木村公俊, 梶川耕司, 鈴木茂: 日本製鋼所技報, No.64 (2013), p43-49
- (6) 青山明祐, 奥野寛人, 清水章裕, 熊谷保之: 日本製鋼所技報, No.65 (2014), p60-64
- (7) A.Aoyama, A.Shimizu, H.Okuno, Y.Kumagai: 19th International Forgemasters Meeting (2014), p248-252
- (8) 落合朋之, 後藤一則, 佐藤健史, 奥野寛人: 平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), p245-246
- (9) 奥野寛人, 青山明祐, 熊谷保之, 清水章裕: 平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), p247-248
- (10) 柳沢祐介, 小枝日出夫, 佐々木克彦: 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集 (2012),
- (11) 柳沢祐介, 小枝日出夫, 佐々木克彦: 日本機械学会論文論文集, Vol.82, No.834 (2016),
- (12) 安富章忠, 荒島裕信, 嶋木雄二, 茅野林造: 日本製鋼所技報, No.62 (2011), p42-51
- (13) 茅野林造, 森裕章, 西本和俊: 圧力技術, Vol.45, No.4 (2007), p205-213
- (14) 茅野林造, 森裕章, 西本和俊: 圧力技術, Vol.46, No.4 (2008), p228-236
- (15) 茅野林造, 森裕章, 西本和俊: 日本製鋼所技報, No.61 (2010), p36-44
- (16) 武藤厚俊, 長谷川久, 吉田兵吾, 新庄浩幸: 日本製鋼所技報, No.57 (2006), p140-145
- (17) 武藤厚俊, 鈴木潤, 鈴木広幸, 藤田泰宏: 風力エネルギー利用シンポジウム, Vol.34 (2012), p441-444
- (18) 鈴木広幸, 鈴木潤, 藤田泰宏, 武藤厚俊: 風力エネルギー利用シンポジウム, Vol.35 (2013), p228-231
- (19) 武藤厚俊, 鈴木潤, 鈴木広幸, 藤田泰宏: 日本風力エネルギー学会論文論文集, Vol.37, No.3 (2013), p41-46
- (20) 武藤厚俊, 鈴木潤, 鈴木広幸, 藤田泰宏: 日本製鋼所技報, No.65 (2014), p46-52
- (21) 二之宮慎一, 中村和之, 柿崎淳: 日本製鋼所技報, No.50 (1994), p.29
- (22) 二之宮慎一, 中村和之: 日本製鋼所技報, No.53 (1997), p.39
- (23) 富山秀樹, 石橋正通, 井上茂樹: 日本製鋼所技報, No.54 (2004), p.32
- (24) 富山秀樹, 高本誠二, 新谷浩昭, 井上茂樹: 成形加工, Vol.19, No.9 (2007), p.565
- (25) 富山秀樹, 福澤洋平: 日本製鋼所技報, No.67 (2016), p.26
- (26) 梶原稔尚, 中野祥生, 二之宮慎一, 船津和守: 成形加工, Vol.5, No.8, (1993), p. 557
- (27) 二之宮慎一, 中野祥生, 梶原稔尚, 船津和守: 日本製鋼所技報, No.49 (1993), p.20
- (28) Kajiwara, T., Tomiyama, H., Uotani, A., Inoue, S. and Funatsu, K.; Seikei-Kakou, Vol.18, No.11 (2006) p.819-825
- (29) Yasuya Nakayama, Nariyoshi Nishihira, Toshihisa Kajiwara, Hideki Tomiyama, Takahide Takeuchi, Koichi Kimura, Nihon Reoroji Gakkaishi (Journal of the Society of Rheology, Japan), Vol.44, No.5, (2016), p.281
- (30) 富山秀樹, 宗正和美, 安江昭, 重石高志, 室園浩司: 日本製鋼所技報, No.62 (2011), p.81
- (31) 福澤洋平, 富山秀樹, 柴田和也, 越塚誠一: 日本製鋼所技報, No.64 (2013), p22
- (32) 福澤洋平, 富山秀樹, 柴田和也, 越塚誠一: 日本製鋼所技報, No.66 (2015), p57
- (33) 山口宏樹: 弾道学研究, No.21 (2012), pp.39-43
- (34) 久保慶起, 青木寿文, 赤松暎: 防衛技術ジャーナル, Vol.37, No.8, (2017), pp.38-43
- (35) 富山秀樹, 川地隆一, 村田直之, 田上秀一, 家元良幸: 日本製鋼所技報, No.57 (2006), p.24-29
- (36) 延岡健太郎, 「価値づくり経営の論理」, 日本経済新聞出版社, (2011.9.21)
- (37) 小末将吾: 日本製鋼所技報, No.55, (2004), p139-142
- (38) 山澤隆行, 木村嘉隆, 柿崎淳, 兼山政輝, 福島武, 藤原幸雄, 鑑谷敏夫, 井上茂樹: 日本製鋼所技報, No.66 (2015), p20-21
- (39) 産業構造審議会 新産業構造部会 (第 15 回) - 配布資料 http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/015_05_00.pdf