

生産技術におけるシミュレーションの役割と設計・製造プロセスの最適化

Simulation Technologies Bringing Innovation to Manufacturing Engineering and Optimization of Design and Manufacturing Processes

中川 泰忠 久保 智彰

■ NAKAGAWA Yasutada ■ KUBO Tomoaki

生産技術において、製品の設計段階で製造性を考慮するDFM (Design for Manufacturability)、更には調達から、輸送、据付け、運用、保守までも考慮する製品設計、すなわちDFX (Design for X) で様々なシミュレーションが用いられている。これはシミュレーションにより製品を仮想的に生産することで、設計・製造プロセスの最適化を論理的かつ効率的に進めることができるためである。

東芝における生産技術では、製造ラインの最適化から、加工、組立て、評価、検査といった製造プロセスの最適化まで、シミュレーションが重要な役割を果たしている。

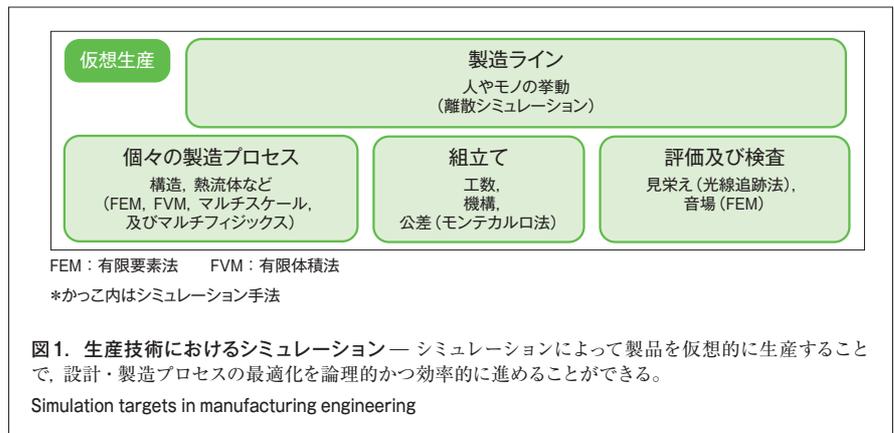
In the field of manufacturing engineering, a variety of simulation technologies are playing a critical role not only in design for manufacturability (DFM) in the product design phase, but also in design for X (DFX) in a broad range of design phases from transportation through to installation, operation, and maintenance of the product. These simulation technologies make it possible to logically and efficiently optimize the design and manufacturing processes through the virtual manufacturing of products.

Toshiba is vigorously promoting the innovation of simulation technologies for manufacturing engineering from production line design to the optimization of manufacturing processes including machining, assembly, evaluation, and inspection.

DFMを支える仮想生産技術

生産技術においては、製品の設計段階で製造性を考慮するDFM (Design for Manufacturability)、更には調達から、輸送、据付け、運用、保守までも考慮する製品設計、すなわちDFX (Design for X) が求められている。東芝は、こうしたなか、製品を仮想的に生産することで、設計・製造プロセスの最適化を論理的かつ効率的に行う取組みを展開している(囲み記事参照)。

生産技術に関するシミュレーションは、図1に示すように、樹脂成形や金属加工のような個々のプロセスだけでなく、部品の組立て、並びに製品の評価及び検査、更に製造ライン全体も対象とする。製造プロセスでは、応力、熱流体、電磁気、光といった物理現象を対象とするが、これらの現象は互いに影響し合う場合もあるので、マルチフィジックスモデルが用いられることが多い。また、製品や製造プロセスに応じて、対象とするスケールがナノメートルオーダーから



メートルオーダーに及ぶため、マルチスケールモデルが用いられる場合もある。更に、製造ラインでは工程を最適化するために、人やモノの挙動もモデル化される。

東芝における生産技術とシミュレーション

当社は生産技術に関して、以下に述べる八つの技術をコア技術として研究開発を進めている。それぞれの技術で

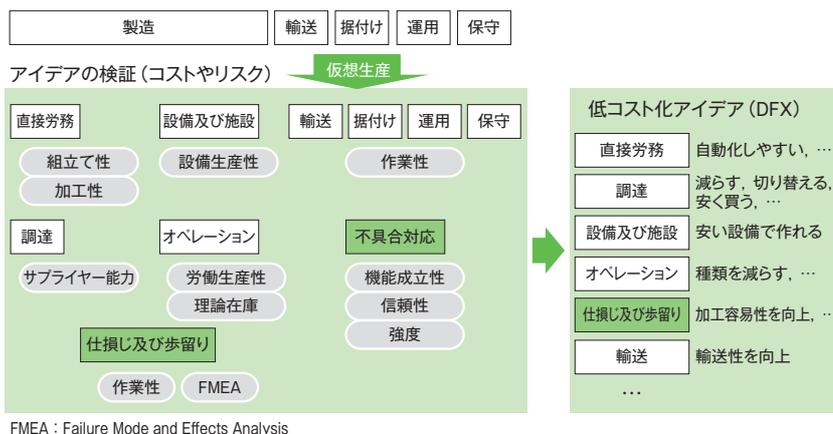
は、シミュレーションが重要な役割を果たしている。

生産エンジニアリング技術

生産エンジニアリング技術は、最適な生産システムを構築し、モノづくりの仕組みを強化することを目的としている。例えば、生産体制をグローバルな視点で最適化するには、ロスの少ない工程及び作業の設計や生産性の高い製造ラインの構築が必要である。当社はこれらを推進するため、図2に示すような製

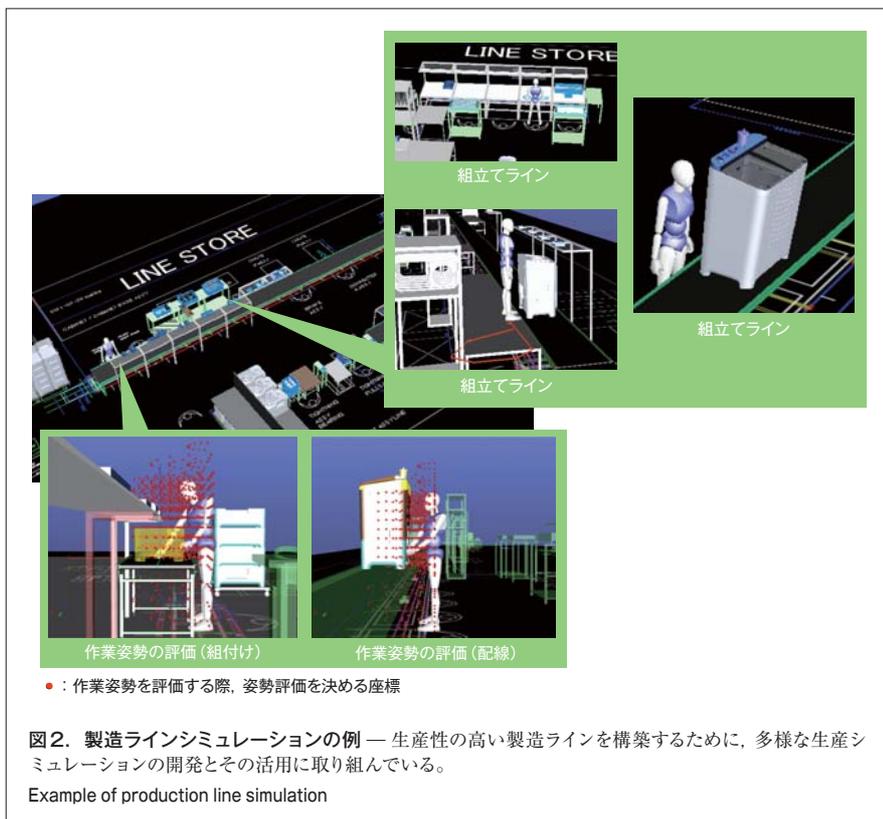
DFXを支える仮想生産技術

製品の設計段階で製造性を考慮するDFM, 更には調達から、輸送、据付け、運用、保守までも考慮する製品設計、すなわちDFXでは、図Aに示すように、製造から保守に至るまでを仮想的に実施することで、これらの段階で生じるコストやリスクを予測して検証する。そして、それらの検証結果から、コストを低減するためのアイデアを創出する。



FMEA : Failure Mode and Effects Analysis

図A. 仮想生産技術の狙い



造ラインシミュレーション, 組立て作業シミュレーション, ラインレイアウトシミュレーションなど多様な生産シミュレーションの開発とその活用に取り組んでいる。

生産シミュレーションによる仮想ライン設計技術の例としては、量産製品の人員配置の適正化、半導体製品の装置稼

働率向上と設備投資の適正化、個別受注製品の工程内搬送と流し化の適正化などがある(この特集のp.8-11参照)。

生産情報システム技術

生産情報システム技術は、生産性と品質の向上を目的としている。当社はこのために、生産計画、進捗の可視化、及び

部材同調を実現する生産管理システムと、品質データの可視化、統計を使った不良要因解析、及び工程制御を行う品質制御システムを開発している。例えば、半導体製品、社会インフラ製品、AV・デジタル機器、及び家電製品に関して、製造現場の大規模データを活用したモノの流れの制御、数理計画などを活用した生産性向上を実現するための生産計画立案アルゴリズムの開発、及びグローバル製造拠点に対する生産管理業務の高度化に取り組んでいる。

特に半導体の生産では、需給や生産の変動に対応しながら、生産数量を高水準に保つ必要がある。また変動に応じて生産計画を変更するには、生産シミュレーションを短時間で実施する必要がある。しかし、既存のシミュレータはロットごとに工程の流れを詳細に計算するので時間が掛かる。そこで、このロットを流体として捉えることで、既存のシミュレータが行っているロットごとの計算を省き、計算速度を向上させたシミュレータを開発した。これにより、計算負荷がロット数に依存しないため、ロット数が多い半導体生産でも高速なシミュレーションを可能にした。当社の半導体生産規模において計算速度を約15倍向上させたことで、月単位の長期シミュレーションも可能になり、ボトルネックと

なる設備の抽出など、生産状況のマクロ的な把握に活用している。

■薄膜プロセス技術

薄膜プロセス技術は、微細化が進む電子デバイス分野、及びエネルギーや環境などの社会インフラ分野における新技術開発や生産性向上を目的としている。このため、原子・分子レベルの現象解析から、新しいナノオーダーの加工技術や、表面・反応制御技術、塗布技術などを研究開発している。

例えば半導体デバイスに関して、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いた線形座屈解析により、微細パターンにおける座屈変形の発生を予測する技術を開発した。微細パターンが内部応力により座屈する不良は、半導体デバイスを微細化するうえで大きな課題となっている。この技術によって、デバイス開発の初期段階で座屈変形の危険が高いプロセスを抽出し、不良低減のための指針を提示することにより、開発コスト低減と歩留り向上に貢献できる⁽¹⁾。

更にTCAD (Technology CAD) 技術を活用して、半導体メモリセルの書込みや消去などの動作による劣化をモデル化し、寿命を予測する信頼性シミュレーション技術を開発した。半導体メモリの劣化要因の一つであるシリコン熱酸化膜の劣化は、主に動作時に膜に印加される電界の強さと、膜を通過する電子の数などによって決まることが知られている。この技術では、メモリセル動作時の電界と電子の数をTCADデバイスシミュレーションによって求め、これらの積算と絶縁膜寿命の関係から、メモリセルの絶縁膜が破壊するまでの動作回数 (寿命) を求める。これにより、メモリセルの構造や寸法の影響を考慮した信頼性予測が可能になった。

■高密度実装技術

当社はまた、電子機器の高性能化と低コスト化を実現するために、CAD/

CAEを連携させた実装、先端プロセス、及びできばえの評価技術の開発にも取り組んでいる。特に、電子機器の小型化、高性能化、及び多機能化を実現するためには、シミュレーション技術を用いた高周波設計、熱設計、及び構造設計、並びに信頼性評価を実施している。

更に当社は、温度依存性を持つLED (発光ダイオード) の発光特性を考慮した熱シミュレーション技術を開発し、LED電球やダウンライトなどの照明製品の性能予測に活用している (同p.12-15参照)。

■光技術

光技術では、半導体リソグラフィプロセスの開発や、照明、光センサなどの製品構造開発、並びにレーザ加工装置や検査装置などの光学機器の研究開発に取り組んでいる。特に、光学設計、リソグラフィ照明解析、波動解析などの技術を用いて、発光素子、光センサ、照明器具などの設計を実施している。例えば、**図3**に示すように、リソグラフィ工程のシミュレーションで回路パターンのレイアウトや光学条件を適正化し、NAND型フラッシュメモリの開発を加速している。

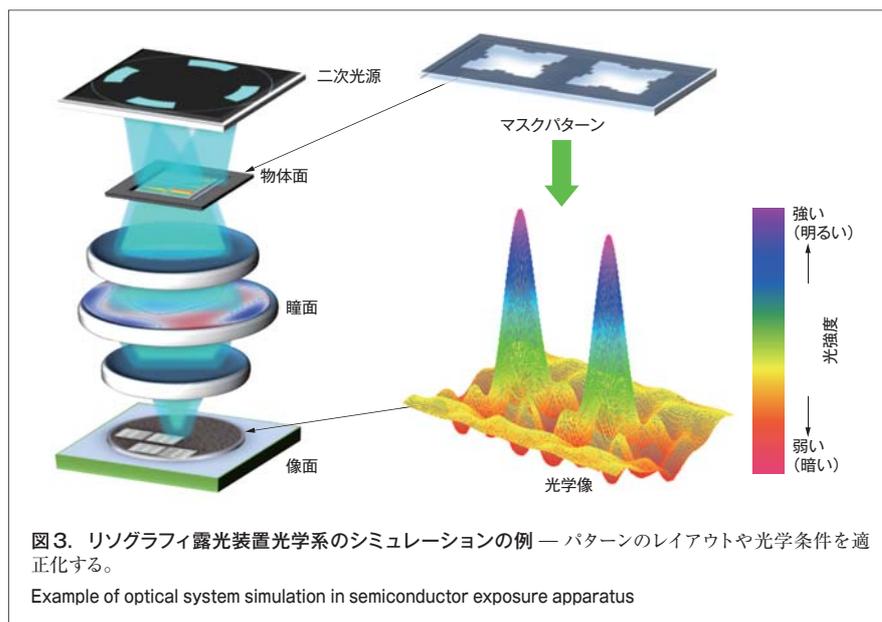
一方、家電製品や照明器具では、完成した製品が人の目にどのように見えるかの“見栄え”も重要な指標となる。当社は、光学シミュレーション技術により、試作前にこれらの見栄えを評価して構造を適正化する技術を開発し活用している (同p.20-23参照)。

また、超音波探傷検査など超音波を使った検査や計測では、検体内部の検査・計測対象からの反射波と他の部位からの反射波の判別が重要であるが、これには熟練を要する。当社は、この課題を解決するために超音波伝搬シミュレーション技術を開発し、溶接部の欠陥検査などに適用している (同p.24-27参照)。

■制御技術

電子機器のEMC (電磁環境適合性) 設計技術と、モータ駆動制御用半導体、省エネ家電や車載・産業製品のモータ及びインバータ、生産設備の制御技術などについても研究開発を進めている。特に、モータやアクチュエータについては、構造解析、磁界解析、熱流体解析などを駆使して、適正な磁気回路設計と放熱設計を実現し、製品の性能向上に寄与している。

当社は更に、空調機などに用いられる



永久磁石同期モータ制御系に対し、仮想インバータと仮想モータからなる検証システムを構築し、制御パラメータを決定できるようにした(同p.28-31参照)。

■メカトロニクス技術

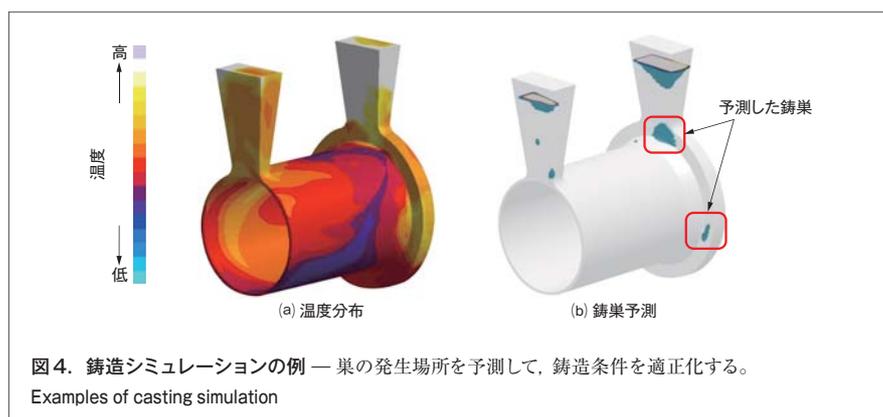
最先端のメカトロニクス技術やシミュレーション技術を駆使して、製品試作品、研究試験機、新たな発想のロボット、生産に必要な設備など、幅広いメカトロニクス機器を開発している。

例えば、ボルト締結部を持つメカトロニクス機器に対して、FEMによるボルトのモデリング手法を開発し、高速化と高精度化を両立させた機械の設計を可能にした⁽²⁾。

■構造設計・製造技術

製造性を考慮した商品の開発及び設計や、設計の自由度を向上させる革新的製造技術を、先端製品の開発に活用している。対象領域は、精密加工、成形、塗装やコーティング、高密度組立てなどである。特に、製品の最適構造、製造プロセスを実現するために、構造、流体、熱伝導などのシミュレーション技術や連成解析手法、及び疲労やクリープなどに対する長期信頼性評価技術を開発している。

構造設計への適用の一例がガス遮断器の機構解析である。変電所などで用いるガス遮断器は、開路動作時に強力なばねによって複雑な操作機構を高速に駆動させる。そのため、実器試験による性能評価だけでは、装置全体の振動によって生じる各部品への負荷を定量的に把握して、強度設計へ反映させるのに時間を要する。そこで、FEMを用いて弾性変形を考慮することで、装置の振動挙動を高精度に予測できる機構解析技術を開発した。また、膨大な計算コストを低減するため、ベアリングの機能だけを抽出するなど、装置の挙動を適切かつ簡略にモデル化する手法を確立した。これらの技術によって、ばね操作機構の開発期間を短縮することが



できた。

また製造プロセス解析の一例が、図4に示す鑄造である。鑄造プロセスでは鑄物内部に巣が発生することが課題になっており、巣の発生を抑制するために鑄造条件を適正化する必要がある。これに対し、アルミニウム合金の金型傾斜鑄造において実験とシミュレーションを実施して、巣の発生場所を比較して鑄造シミュレーションの精度を検証した。その結果、巣の発生場所が精度よく予測できることや、理論的に鑄造条件を適正化できることがわかり、鑄物の高品質化に貢献している⁽³⁾。

当社は更に、屋外機器について、設置場所の瞬間風速の発生頻度を推定するとともに、流体-構造連成解析により強風下での信頼性を評価する技術を開発し、製品設計に活用している(同p.16-19参照)。

DFMのためのシミュレーション定型化

前章では、個々のコア技術に関連したシミュレーション技術とその適用について述べた。ここでは、シミュレーション技術を体系化し定型化してDFMに適用している活動について述べる。

近年のシミュレーションソフトウェアは高機能化が進み、材料物性の非線形性や複数の物理量を連成して解析するマルチフィジックスモデル、多相流や化学反応の解析、異なるスケールの現象

を連成するマルチスケール解析などを行えるようになってきた。しかし、これらの解析手法を実際にDFMに適用する場合には、個々の加工法における物理的な現象をどのように捉えてモデル化し、何を入力データとし、シミュレーション結果をどのように解釈するかが重要になる。

DFMに用いるシミュレーションでは、多様な加工法が対象となる。これらの加工法では、様々な物理量が互いに関連するだけでなく、質量や形状が工程中で変化する場合がある。また、気体、液体、固体といった相状態も変化する場合がある。これらの複雑な現象を取り扱う必要があるため、DFMのためのシミュレーションは、製品使用時の強度解析や放熱解析などと比較して、複雑になる場合が多い。また、強度設計や放熱設計などのための解析について様々な教科書や解説書が発行されているのに対し、DFMのためのシミュレーションについては塑性加工など一部の製造工程に関連した解説書があるだけであり、またその数も少ない。

こうした状況に対し、関連する加工法を質量の増減や相状態などの観点から類型化して、シミュレーション技術を体系化し定型化することで、シミュレーションをDFMに活用している。

各種の加工法をこのような観点で類型化した例を表1に示す。例えば、除去加工や乾燥は、対象の質量が低減する加工法である。一方、射出成形やプレス

表1. 生産技術で用いられる加工法の類型化の例

Example of classification of processing methods used in manufacturing engineering

加工法		質量の増減	被加工物の相状態		
			固体	液体	気体
除去加工	切削	減少	○		
	研磨		○		
	研削		○		
	ドレッシング		○		
乾燥	乾燥		○	○	
成形	射出成形	なし	○	○	
	トランスファ成形		○	○	
	圧縮成形		○	○	
	鋳造		○	○	
	プレス		○		
コーティング	コーティング		○		
攪拌	攪拌		○		
熱処理	熱処理		○		
接合	接着	増加	○	○	
	溶接		○	○	
AM	金属	○	○		
	樹脂	○	○		

のような成形では、対象の質量は変化しないが、形状は変化する。また、近年注目されている付加製造 (AM: Additive Manufacturing)^(注1) は、対象の質量が増加していく加工法に分類される。これらの分類に加えて、対象の相状態が固体、液体、気体、又はこれらのうち複数の状態の組合せなどといった観点からも分類している。加工法をこのような観点から類型化することで、シミュレーション手法との関連付けを実施している。

例えば、対象が固体の場合は構造解析ソフトウェアに用いられるFEM、液体や気体の場合には流体解析ソフトウェアに用いられる有限体積法 (FVM: Finite Volume Method) が適用できる。乾燥、成形、接合などのように複数の相状態が関与する現象では、予測したい現象によってどちらかの相状態を選択したほうがよい場合や、気液二相流や固液二相流といった機能を使うことが適当な場合もある。

また、除去加工の場合には、切削では対象が加工後にどれだけ変形しているかが、研削では対象が加工中に受ける応力で破損するかが、解析する主な内容となる。一方、図5に示す研磨やドレッシング^(注2)では、工具と対象との接触圧力が解析する内容となる。これは、研磨やドレッシングによる加工量が接触圧力に比例するためである。これら除去加工には、構造解析ソフトウェアが適用される。

図6に示す乾燥では、気化物質の拡散や雰囲気気の流れによる輸送を解析する必要があるが、これには、構造及び流体両方の解析ソフトウェアが適用できる。ただし、雰囲気気の流れも同時に解析する場合には、流体解析ソフトウェアを用いる必要がある。

成形の中でも、射出成形、トランス

(注1) CADデータなどをもとに、材料を積み重ねて対象物を作り上げる工法。

(注2) 砥石(といし)の切れ味が目詰まりなどのために低下したとき、砥石の表面を研いで切れ味を回復させる作業。

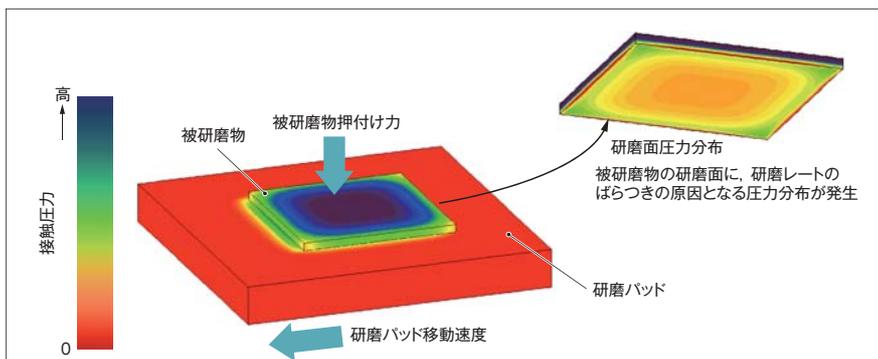


図5. 研磨シミュレーションの例 — 研磨レートを均一化する加工条件や装置設計を決定する。
Example of polishing simulation

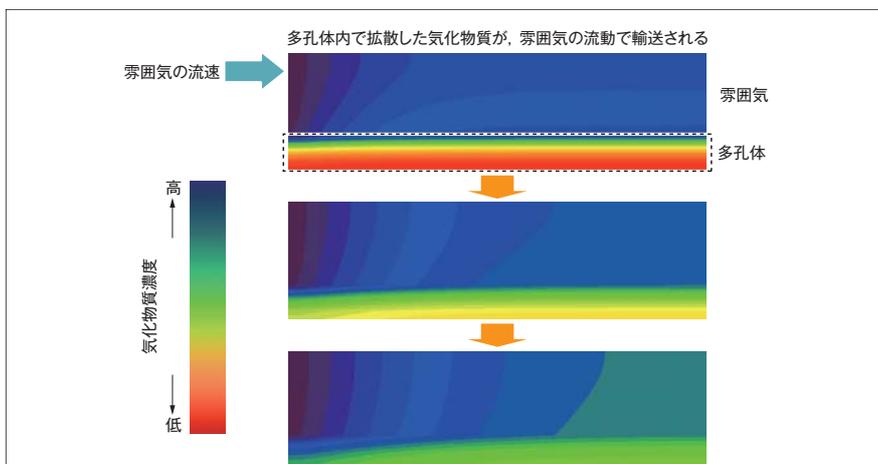
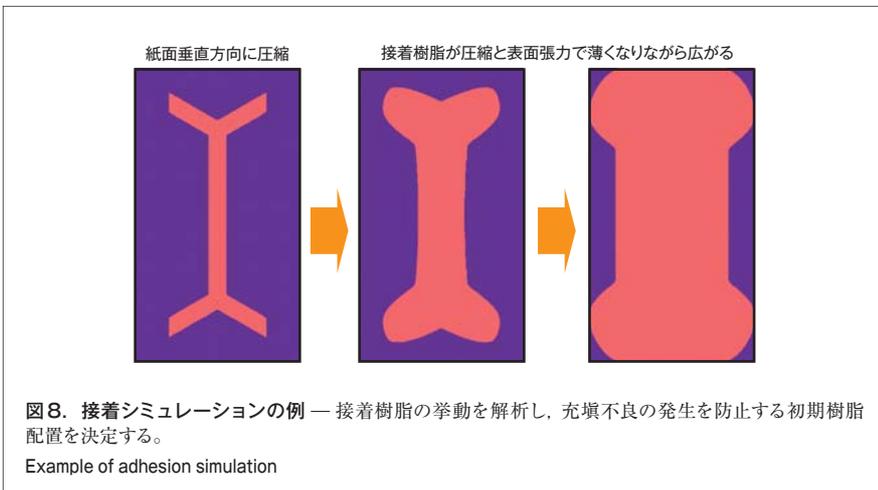
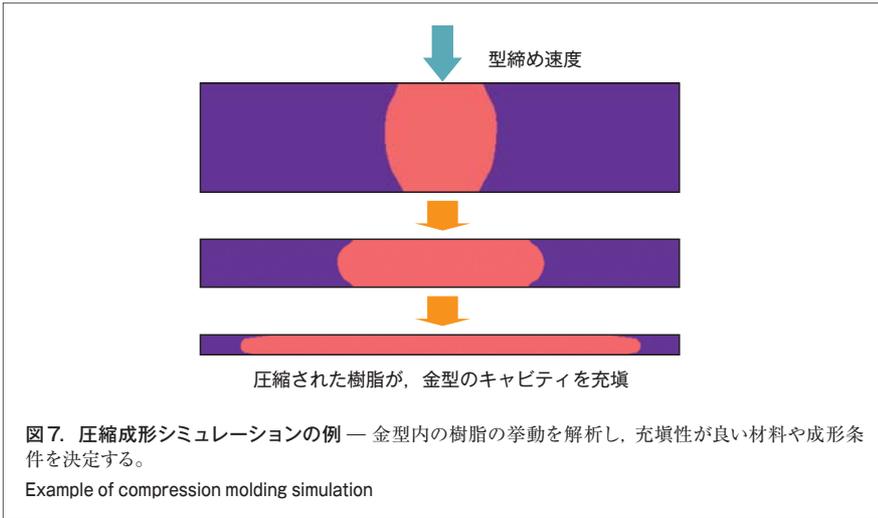


図6. 乾燥シミュレーションの例 — 気化物質の拡散や輸送を解析し、乾燥条件を適正化する。
Example of drying process simulation



ファ成形、及び図7に示す圧縮成形では、金型への充填過程が解析する主な内容となる。これらの解析には、流体解析ソフトウェアが適用できる。また、これらの成形は一般に空気中で行われるので、空気と樹脂の気液二相流解析を行うのが妥当である。成形に用いる樹脂の粘度は、温度やせん断速度の関数になる場合もあるが、これらも入力データとして考慮することができる。

castingについても、型に金属を流し込む工程には、流体解析ソフトウェアが適用できる。充填後の凝固や引けの状態を把握する必要がある場合には、構造解析ソフトウェアが使用できる。また、プレスによる曲げや打抜きにも、構造解析ソフトウェアが使用できる。

コーティングのように雰囲気中に塗液

を放出して膜を形成する場合にも、流体解析ソフトウェアによる気液二相流解析が適用できる。一方、固体粒子を液中で分散させる攪拌(かくはん)には、流体解析ソフトウェアによる固液二相流解析が適用できる。

熱処理では、対象物の熱応力が解析する主な内容になるので、構造解析ソフトウェアが適用できる。対象がシリコンウエーハの場合には、転位発生方向の応力成分を評価することで、転位発生の有無を評価できる。

接着や溶接のように、接合に用いる物質が付加されて被接合物を拘束し、応力や変形が発生する場合にも、構造解析ソフトウェアが適用できる。これらの加工では、加熱又は冷却を伴うことが多いので、温度も連成して解析するこ

とが可能である。接着では、図8に示すように被接着物間に接着剤を充填する過程を解析する場合がある。このような場合には、流体解析ソフトウェアによる気液二相流解析が適用できる。

今後の展望

当社はDFMによる生産性向上を進めている。DFMでは、製品性能の予測や製造成立性が見極めが重要である。シミュレーションはDFMを支える仮想生産を具体化する重要な技術であり、当社は最新の製造技術やシミュレーション手法を反映した技術開発を進めていく。更に、これに加えて調達から、輸送、据付け、運用、保守までシミュレーションを展開し、DFXを推進する。

文献

- (1) 伊藤祥代 他. 半導体デバイスの微細化に対応した応力シミュレーション技術. 東芝レビュー. 67, 6, 2012, p.40 - 43.
- (2) 高橋良一. “接触要素を用いたメカトロ機器の剛性シミュレーション”. 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス. 岐阜, 2013-10, 日本機械学会, 2013, OSI011.
- (3) 田中正幸. 鋳造シミュレーションによる鋳物の高品質化技術. 東芝レビュー. 68, 12, 2013, p.54 - 55.



中川 泰忠
NAKAGAWA Yasutada, D.Eng.

生産技術センター研究主幹, 博士(工学)。
生産技術におけるシミュレーション技術の開発に従事。
日本機械学会, 精密工学会会員。技術士(機械部門)。
Corporate Manufacturing Engineering Center



久保 智彰
KUBO Tomoaki, D.Eng.

生産技術センター技監, 博士(工学)。
DFM, 品質制御, 及びメカトロ機器の技術開発に従事。
計測自動制御学会, 応用物理学会, 日本経営工学会会員。
Corporate Manufacturing Engineering Center