

製品開発及び製造プロセスの効率化に向けた設計の仕組み構築とシミュレーション技術の活用

Design and Simulation Technologies to Improve Efficiency of Product Development and Manufacturing

中川 泰忠 NAKAGAWA Yasutada

モノづくりにおいて競争力を確保し続けるには、設計や製造などのプロセス効率化によるコストの低減、及びコスト増加の要因となる品質・性能未達や、作業遅延、追加仕様発生などの撲滅が求められる。また、新製品を早期投入して売上高や利益を確保していくことも必要になる。

このような環境下で、東芝グループは、コストや効率を考慮した設計の仕組みを構築して対応している。また、設計から、据え付け、保守作業に至るまでの、製品ライフサイクル全般における生産性の向上と、革新的な工法を開発するために、シミュレーション技術の開発と適用を推進している。

To constantly ensure the competitiveness of products, it is necessary to decrease product costs by improving efficiency in the design and manufacturing processes, as well as to suppress a variety of factors that increase costs including the deterioration of quality and performance, delays in design and development processes, and the addition of specifications. The rapid introduction of new products is also required to secure sales and profits.

The Toshiba Group has responded to these needs by developing design approaches that take high efficiency and low cost into consideration. Furthermore, through the development and application of various simulation technologies, we are promoting the improvement of productivity and innovation of development processes throughout the entire life cycle of a product from the design phase to the installation and maintenance stages.

1. まえがき

製品の設計や製造などのプロセスの効率化によるコスト低減や、コスト増加要因となる品質・性能未達、作業遅延、追加仕様発生などの撲滅が、経営においてキャッシュを増加する上で求められる。これに加え、新製品の早期投入による売上高や利益の増加も重要と考えられる。これらを目指して、東芝グループは、コストや効率を考慮した設計の仕組みを構築して対応している。更に、設計から据え付けや保守作業まで、製品ライフサイクル全般での生産性の向上と、革新的な工法を開発を目指し、シミュレーション技術を開発・適用している。

2. 設計

2.1 設計への取り組み

東芝グループは、様々なモノづくりを対象に、コストや効率を考慮した設計の仕組み構築に取り組んでいる(図1)。ここでは、製品企画や設計方針を判断する基準となるコストエンジニアリングや、設計そのものを効率化する設計手法、ノ

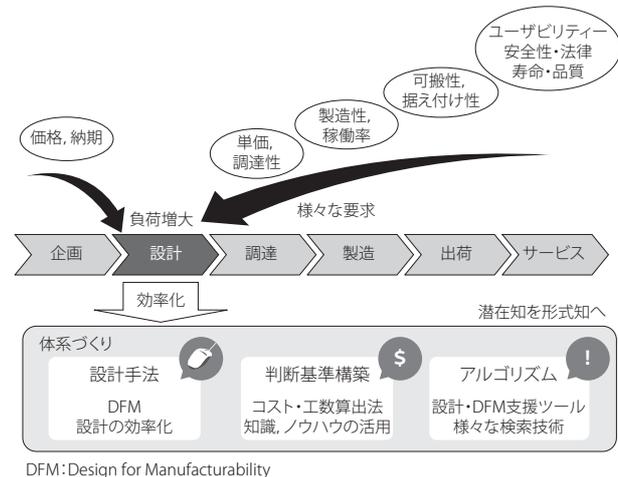


図1. コストや効率を考慮した製品設計

製品企画や設計方針を判断する基準となるコストエンジニアリングや、検索技術、設計を効率化する手法などを用いている。

Product design in consideration of cost and efficiency

ウハウ、知識を集約判断する様々な検索技術、高速化技術を用いている。特に、サービス部門から来る様々な要求へ

の対応で設計の負荷が増大することから、設計が効率化するように体系づくりをしている。

2.2 テキスト機械学習⁽¹⁾

製品設計では、過去の設計事例や、使用部品、不具合事例などの検索に時間を要する場合がある。特に、高度な機能を持つ製品では、関連する情報が多くのテキスト(文書)に存在しているので、必要な情報を探すのに時間が掛かる。このように、検索時間の短縮に加えて情報が見付からないために発生する後戻りの抑制も解決すべき課題となっているが、大量の文書や、失敗/優良事例集、論文などを読み解いて活用するには限界がある。そこで、機械学習を利用し、短時間かつ自動で、膨大な文書から単語間や文章との関連性を取得し、その関係を可視化する技術を開発した(図2)。

この環境を使用し、情報や知識を抽出して可視化した例が、図3である。用意された数十のパワーポイントファイルを学習に使用して連鎖的検索を実施したところ、現象名から関連性の高い部品や要因を10分以内で抽出できた。

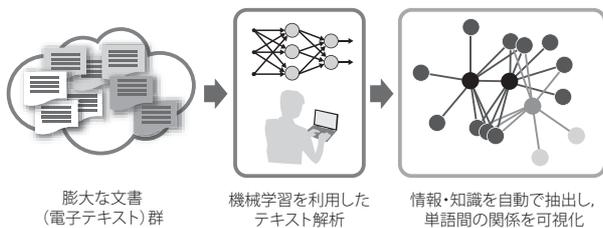


図2. テキスト解析による情報・知識の自動抽出

膨大な文書群から、情報や知識を抽出して関係性を可視化する。

Automatic extraction of information and knowledge by text analysis

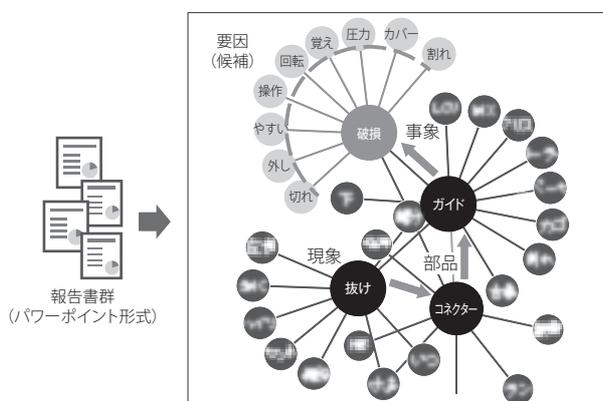


図3. 報告書からの知識抽出例

現象を起点に、関連性の高い部品や要点を短時間で抽出でき、生産の各フェーズでの知識獲得に広く活用できる。

Example of knowledge extraction from reports

この技術は、開発設計、調達、生産だけでなく、物流や、保守、営業などの各フェーズでの知識獲得に広く活用でき、業務効率・生産性向上に寄与できる。

2.3 設計リスクの抽出⁽²⁾

設計を効率化する観点からは、故障などのリスクを早期に検討することが重要である。このための手法として、潜在的故障を体系的に分析するFMEA (Failure Mode and Effect Analysis) がある。また、製品の変化点に着目し、そのリスクを検討するDRBFM (Design Review Based on Failure Mode) も有効な手法である。しかし、近年では、製品構造が複雑化するとともに、開発する技術の専任化が進んでいるため、開発リスクを体系的に漏れなく抽出することが、より重要になってきている。

製品全体を俯瞰(ふかん)してリスクを抽出するために、“技術ばらし⁽³⁾”を適用した。技術ばらしでは、製品に求められる要件と製品を実現するための要素を、上位概念からロジックツリーにより細分化する。そして、両者の関係をひも付けることで、複雑に絡み合う要件と要素の関係を可視化する。東芝は、この手法を発展させて、リスクを媒介して製品仕様と製造工程を構成部品に関係付けた。この一連の関係性を製品全体でまとめた技術ばらしツリーを作成することで、製品に内在するリスクを全て抽出することができる。また一部の部品や寸法など、設計変更により生じるリスクも把握できる。

例として、図4の半導体製品について、図5に示すような、技術ばらしツリーを作成した。これを用いて、接合材を変更して電気抵抗を低減させた場合のリスク抽出について説明する。

まず、接合材に関するリスクを抽出すると、電気抵抗以外に、熱抵抗上昇や、接合材の破断、製造工程中の未接合、などのリスクがあることが分かる。そして、それぞれのリスクは放熱性の低下、信頼性の低下、ダイマウント工程の

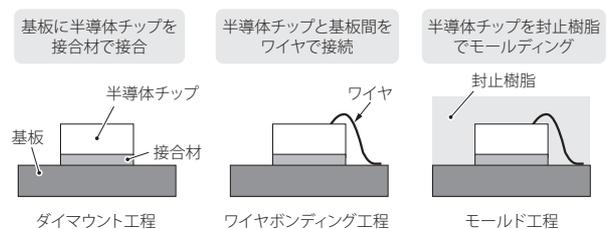


図4. 半導体製品の構成部品と製造工程

インテグラル型の典型的な製造工程による半導体製品を、適用事例として用いた。

Components and manufacturing processes for semiconductor product

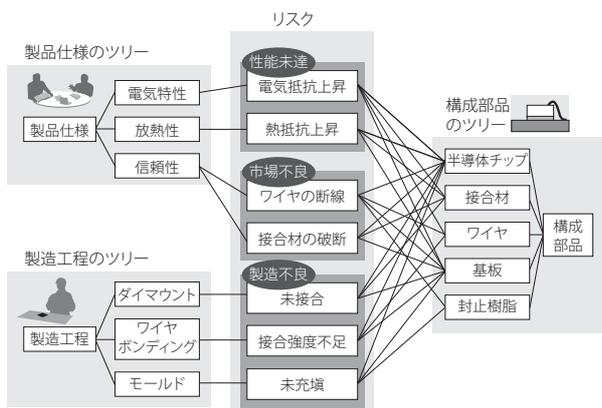


図5. 技術ばらしツリー

全ての構成部品の製品仕様と製造工程について、リスクを介して関係付けることで、設計リスクを抽出できる。

Technology breakdown tree

製造不良につながる事が予想できる。このように、技術ばらしツリーを用いることで、製品全体を俯瞰しながら、リスクを短時間に抽出できる。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーションの領域

東芝グループは、製品設計にとどまらず、工程設計から、ライン設計、据え付け、保守作業に至るまでの、製品ライフサイクル全般で生産性を向上するとともに、革新的な工法を開発するために、シミュレーション技術を開発し、適用している。概略を図6に示す。

製品設計では、モーターの電磁界シミュレーションやLED（発光ダイオード）の放熱シミュレーションをはじめとした物理シミュレーションを実施している。一方、効率的な製造ラインを設計するためには、人やモノの挙動シミュレーションも適用している。また、金属3D（3次元）プリンターのような、革新的な工法の開発では、シミュレーション手法の開発も併せて実施している。これら以外にも、超音波探傷のような検査評価や、屋外機器の据え付けのような加工、組み立て以降のプロセスなどにもシミュレーションが適用できる。

3.2 分子動力学・有限要素法を用いた半導体デバイスの微細パターン座屈解析

ここでは、革新的な工法にシミュレーションを適用する事例として、微細な半導体デバイスのエッチングを取り上げる⁽⁴⁾。

半導体デバイスの製造工程では、大容量化と低コスト化を目的としてパターンの微細化が進行している。微細化に伴って構造強度が低下するので、加工工程で発生した圧縮内部応力によって生じる、微細パターンの座屈変形が問題の一つとなっている（図7）。そこで、古典分子動力学法と有限要素法を組み合わせ、微細パターンの座屈現象を解析する手法を開発した。

まず、エッチング時のアモルファスシリコン（a-Si）の表面酸化に伴う応力発生を、古典分子動力学法で解析する。表面酸化のシミュレーション結果を図8に示す。衝突する酸素原子によるa-Siの表面酸化に伴い、約2 GPaの圧縮応力が発生することが明らかとなった。次に、微細パターンの加工工程を模擬した有限要素法モデルを作成し、古典分子動力

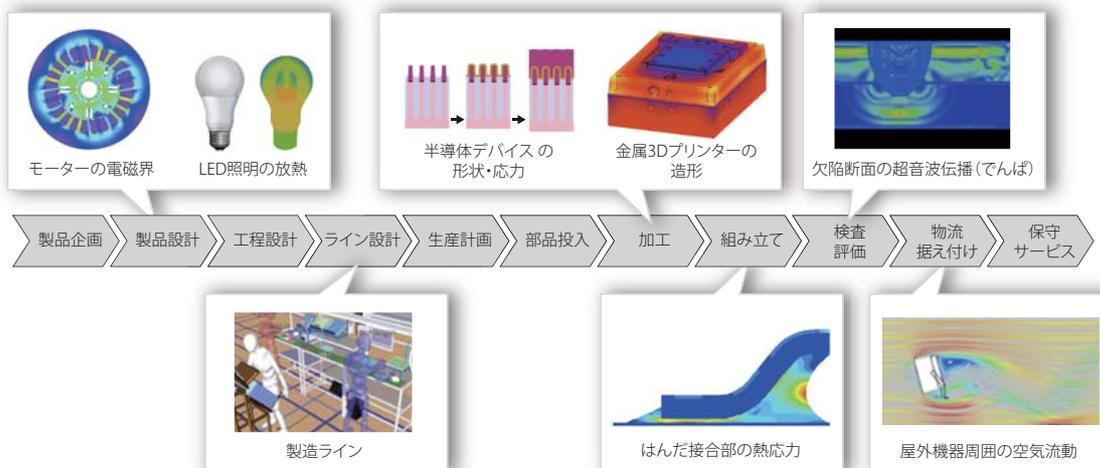


図6. シミュレーション技術の適用範囲

製品設計から、工程設計や、ライン設計、据え付け、保守作業までの製品ライフサイクル全般で、シミュレーション技術を開発し、適用している。

Applicability of simulation technologies

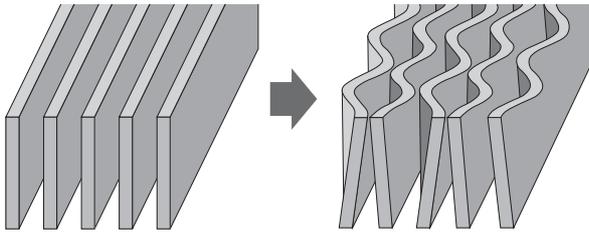


図7. 微細パターンの座屈変形

加工工程で圧縮内部応力が発生し、微細パターンが座屈する場合がある。

Buckling deformation of minute patterns

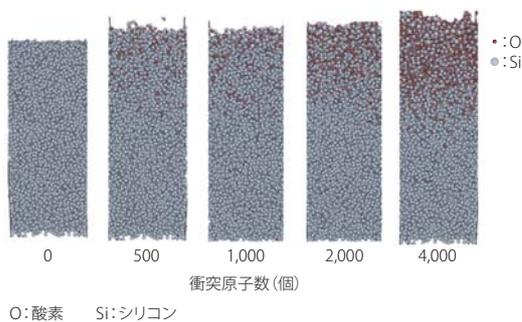


図8. a-Si表面酸化時における応力発生シミュレーション結果

エッチング時のa-Siの表面酸化に伴う応力発生を、古典分子動力学法を用いて解析する。

Results of simulation of surface oxidation processes of amorphous silicon

学法から得られた酸化膜厚と表面応力を反映させた線形座屈解析を行う。これにより、パターンの形状が座屈強度に与える影響などを評価できる。

3.3 AMにおける造形物の残留応力・変形解析

革新的な工法にシミュレーションを適用するもう一つの事例として、金属3Dプリンターを取り上げる。3Dプリンティングは、3D CADデータに従って材料を付加・結合させることで、3Dの物体を製造するので、AM (Additive manufacturing: 付加製造) とも呼ばれる。AMは、型や後加工なしで、複雑な3D形状の物体を製造できる。また、型を必要としないので、コストと製造リードタイムを削減できる。

パウダーベッドフュージョン方式AMの概要を図9に示す。この方式では、以下に示すように、金属粉層の特定の領域にレーザーや電子ビームで熱エネルギーを与える。

- (1) 金属粉を厚さ約50 μm の層状に置く。
- (2) 金属粉層の、製造する物体の3D CADデータの断面に対応する領域にレーザーを照射して焼結する。

この工程(1)と(2)を、3D形状の物体全体の製造が完了するまで繰り返す。完了後に焼結しなかった金属粉を除去する。

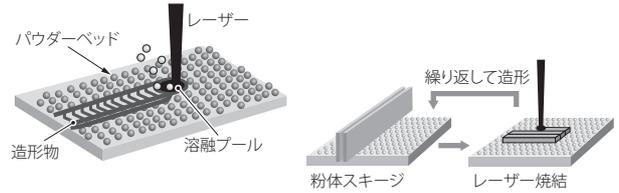


図9. パウダーベッドフュージョン方式AM

金属粉層の特定の領域にレーザーや電子ビームで熱エネルギーを与えて焼結し、3D形状の物体を製造する。

Additive manufacturing (AM) by powder bed fusion method

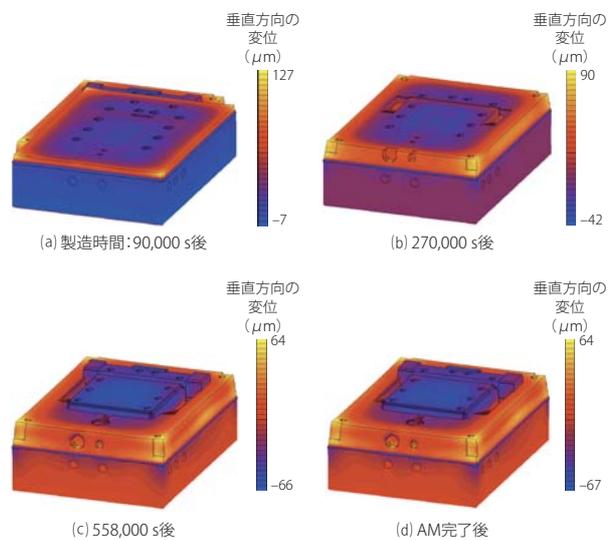


図10. 金型製作時の変形と垂直方向の変位分布の解析結果

金型の上部は、熱応力で下に向かって凸に変形し、変形の傾向はプロセス後も保持される。

Results of simulation of deformation and distribution of vertical displacement at time of production of mold

この方式では、内部に自由な中空構造を持った部品を造形することもできる。一方、熱応力による変形が造形プロセス中に発生して残留するという課題がある。

当社は、このパウダーベッドフュージョン方式AMの造形プロセスに対するシミュレーション手法を開発した⁽⁵⁾。シミュレーション結果を図10に示す。プロセス中では、金型上面は下に向かって凸に変形し、プロセス後も保持される。これは、上部の方が下部よりも温度が高く、膨張した状態で造形されるので、温度降下とともに上部の方がより収縮するためである。

シミュレーションと同じ条件で造形した金型(図11)の形状を接触式3D形状測定機で測定した。金型上面は、下に凸で変形しており、変形の傾向はシミュレーションと一致し



図11. AMで造形した金型

3D形状測定機で測定した変形の傾向は、シミュレーションと一致した。

Mold manufactured by AM

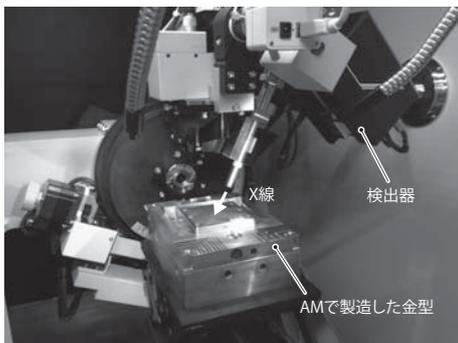


図12. 残留応力の測定システム

金型表面における残留応力をX線回折で測定した。

Residual stress measurement system

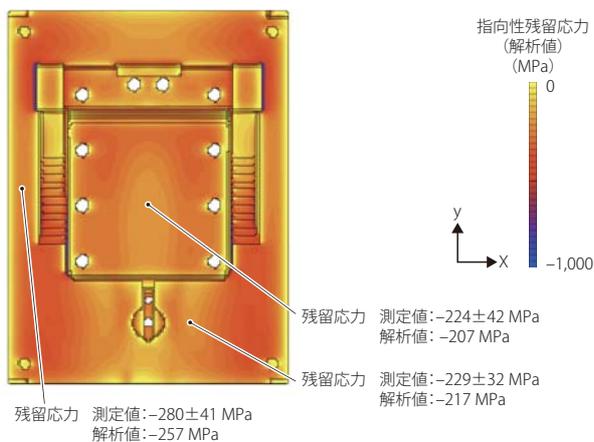


図13. 残留応力に関する解析結果の検証

X線回折による実測値と解析値はほぼ一致した。このシミュレーションを利用することで、残留応力を低減する構造設計ができる。

Verification of results of calculation of residual stresses on mold surface

た。また、実験における下に凸の変形量 $35 \mu\text{m}$ に対し、シミュレーションでの変形量は $37 \mu\text{m}$ であった。更に、金型表面における残留応力をX線回折で測定した(図12)。解析値と実測値との比較を図13に示す。X線回折による実測値は、ある幅を持って振れているが、解析値はそのレンジ内にあり、ほぼ一致した。したがって、このシミュレーションモデルを利用すれば、残留応力を低減する造形品の構造設計が可能である。

4. あとがき

ここでは、東芝グループで構築しているコストや効率を考慮した設計の取り組みとして、その概要、テキスト機械学習、及び技術ばらしによる設計リスク抽出などについて述べた。また、設計から、据え付け、保守作業に至るまでの、製品ライフサイクル全般での生産性向上にシミュレーションを適用している取り組みを述べるとともに、革新的な工法を開発するためにシミュレーション技術を開発し、適用した事例として、半導体デバイスの微細パターン座屈解析と金属3Dプリンターについて説明した。

東芝グループは、今後も、製品開発や製造プロセスなどの効率化に向け、設計及びシミュレーション技術を高度化していく。

文献

- 池田弘行. 機械学習を用いた文章データの解析・可視化技術. 東芝レビュー. 2017, 72, 5, p.68-69. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/05/72_05pdf/r01.pdf>. (参照 2017-11-21).
- 西内秀夫, 井上道信. 半導体製品の開発効率を向上させる開発リスク管理手法. 東芝レビュー. 2017, 72, 4, 2017, p.69-72. <http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/04/72_04pdf/f02.pdf>. (参照 2017-09-25).
- 電通国際情報サービス. "iQUAVIS 開発の見える化<ツール>". 電通国際情報サービス. <<http://www.isid-industry.jp/products/detail/0000000517>>. (参照 2017-09-25).
- 興石健二, ほか. "分子動力学・有限要素法を用いた半導体デバイスの微細パターン座屈解析". 第64回応用物理学会春季学術講演会. 横浜, 2017-03, 応用物理学会, 2017, 16p-E206-12.
- Nakagawa, Y. "FEM Analysis of Additive Manufacturing by Powder Bed Fusion Method". Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century: LEM21. Kyoto, 2015-10, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015, 1802-1 - 1802-4.



中川 泰忠 NAKAGAWA Yasutada, D.Eng.

研究開発本部
生産技術センター
博士(工学) 日本機械学会会員 技術士(機械部門)
Corporate Manufacturing Engineering Center