

構造強度シミュレーション技術は、材料強度試験技術、強度評価技術とともに構造強度信頼性設計法を形成し、ハードウェア開発に広く活用されている。最近、高温化するエネルギー機器や高集積化する半導体デバイスの開発においては、損傷や欠陥の発生を防止するうえで欠くことのできない技術となっている。材料特性の表現を含めて先進的なモデル化には不確定要素もあり、これらを解明・克服しながら技術進歩が着実に遂げられている。

Stress-strain simulation technology has been widely applied to the development of hardware products from the viewpoint of structural reliability. Generally, the operating temperature of energy systems is increasing for higher plant efficiency, and the level of LSI integration is also rapidly increasing in order to achieve higher performance. It has therefore become more critical to realize structural design methods for high-temperature and submicro-scale materials.

We have been making efforts to develop and verify new simulation models, with the aim of contributing to the development of attractive products with high reliability.

1 まえがき

構造強度シミュレーション技術は、ハードウェアを構成する部材に発生する応力やひずみおよび変形をコンピュータ上で精度良く算出する技術であり、材料強度試験技術、強度評価技術と一体となって構造信頼性設計法を形成する。特に有限要素法に基づく応力シミュレーションは、パネのような弾性体だけでなく複雑な変形挙動をもつ材料から成る大規模な三次元構造にも適用され、形状や材料の信頼性に及ぼす影響を系統的に把握するうえで有効な手段となっている。最近では、エネルギー機器開発はもとより、半導体デバイスの開発でも活用されるようになってきた。

タービンや発電機に代表されるエネルギー機器の開発目標としては、高温化、大型化あるいは軽量化による性能向上に加え、長寿命化や定期点検時の予防保全によるメンテナンス向上が挙げられる。後者は、規制緩和に対応した定期点検方法の合理化にも直結し、従来にも増して関心が高まっている。いずれも、エネルギーを安定供給するためには信頼性確保がまず基本にあり、強度シミュレーションの果たす役割は大きい。

一方、パソコンやメモリに代表される電子機器、半導体デバイスの開発では、高集積化、高機能化、生産コスト低減が追求されている。特に、開発のスピードアップがポイントとなり、従来の電気系シミュレーションに加えて機械系シミュレーションに注目が集まっている。微細構造のさらに応力集中部というごくわずかな領域を対象とした材料損傷を予測・評価するうえで、強度シミュレーションは欠

くことのできない技術となっている。

ここでは、エネルギーと半導体分野を中心に代表的な強度シミュレーション結果を検証試験結果と交えて紹介する。

2 エネルギー機器

2.1 シミュレーションの意義

エネルギー分野では、高効率化に向けて機器が大型化、高温化している。その結果、熱を含む負荷が厳しくなる傾向にあり、構造信頼性の検討がいっそう重要になっている。

強度シミュレーションは、図1に示すように、設計時だ

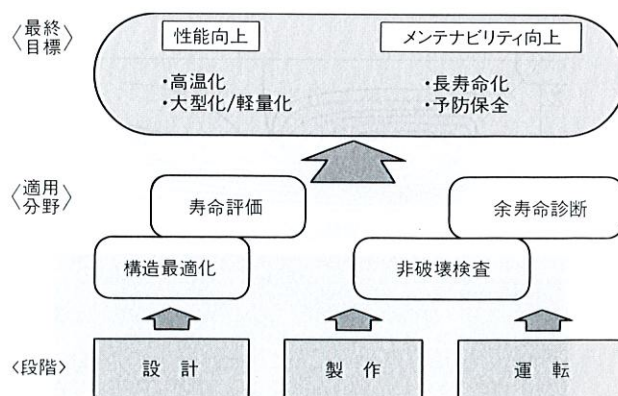


図1. エネルギー機器における強度シミュレーションの適用 構造最適化、寿命評価、余寿命診断などへの応用を通じて機器性能やメンテナンス向上を目指す。

Application of stress simulation to power generation equipment

けでなく運転に至ってもそれぞれの段階で継続的に活用されている。一般にエネルギー機器は、単品性が強く数十年の長期にわたって運転される。先ず、設計段階では構造最適化、寿命評価のために適用され、高性能化と高信頼性化の両立が図られる。製作段階においては加工性などを考えて調整・選択した材料に対して、寿命を再評価するのに用いられる。さらに、運転段階に入っても、余寿命診断を目的に、き裂や材料劣化の損傷予測に対して強度シミュレーションは非破壊検査とともに大きな役割を担っている。

2.2 溶接残留応力のシミュレーション^{(1),(2)}

エネルギー機器の多くは溶接構造である。一般に溶接部には、余盛りなどを含む形状不連続によって応力集中するうえ、溶接施工後の熱処理を行えない場合には残留応力が作用し続ける。残留応力は、強度や寿命にも影響を与えるため、溶接部は予防保全の対象部位になることが多い。

溶接残留応力は、破壊を伴うひずみゲージ法や非破壊のX線測定法によっても実測できるが、構造の内部や表面でも形状の入り組んだ狭隘(あい)部の応力分布を調べるには限界がある。一方、シミュレーションを適用するには、塑性変形と形状変化を伴うため、モデルの妥当性を検証する必要がある。ここでは、軸対称形状の溶接構造について有限要素法に基づく詳細シミュレーションを行い、その結果と実測値を比較検討した。

図2にモデル化とシミュレーションおよび実測結果を示

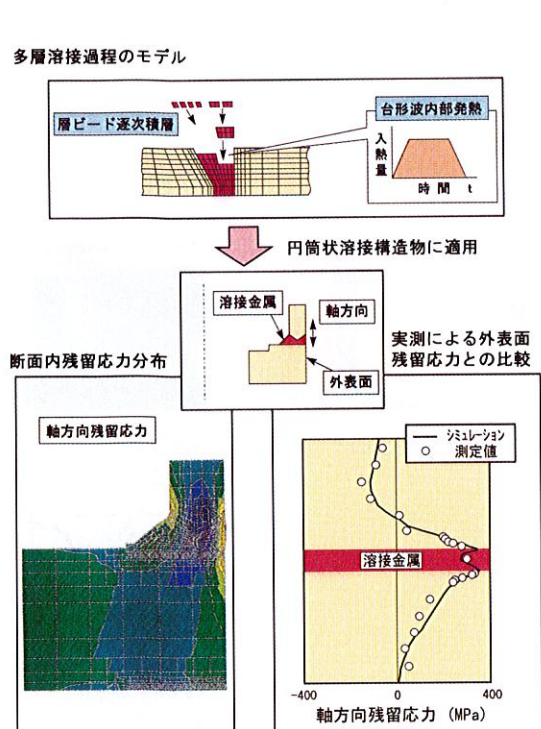


図2. 溶接残留応力分布のシミュレーション 多層溶接過程モデルを円筒溶接構造に適用した例。

Residual stress simulation for welded joints

す。多層溶接過程のモデル化では、各溶接ビードに対応する要素層を逐次積層することで形状変化を取り込み、溶接入熱を台形波で加えて軸対称化した。最終的には、溶融状態のビードの凝固収縮を非定常・弾塑性応力シミュレーションし、溶接部近傍の残留応力を詳細に捕らえた。シミュレーションは、外面の溶接金属周りで実測した複雑な分布も良好に再現しており、手法としての妥当性が検証できた。このシミュレーションは、残留応力を把握する有力なツールであり、溶接変形の低減などを含めてプロセス改善にも応用されている。

2.3 損傷過程のシミュレーション^{(3),(4)}

ガスタービンの構造部材は1,000°Cを超える高温燃焼ガス環境にさらされる。定期的な補修や交換による損傷の予防保全は、運転段階で不可欠な作業となっている。適正な定期点検計画の策定にも、損傷の発生時期とその後の損傷進行をいかに精度良く予測するかが大きな課題となっている。

静翼は、高温環境に置かれる代表的な部位であり、プラントの出力変動により熱応力が繰返し負荷される。図3に損傷過程のシミュレーションの流れと結果を示す。精密鋳造した静翼の金属組織は、不規則なマイクロパターンをもつ。モンテカルロシミュレーションにフラクタル図形の一種であるパーコレーションクラスタを組み合わせ、まずマイクロ組織をモデル化した。平行して有限要素法に基づく三次元の弾塑性シミュレーションを実施し、翼内の熱応力分布を

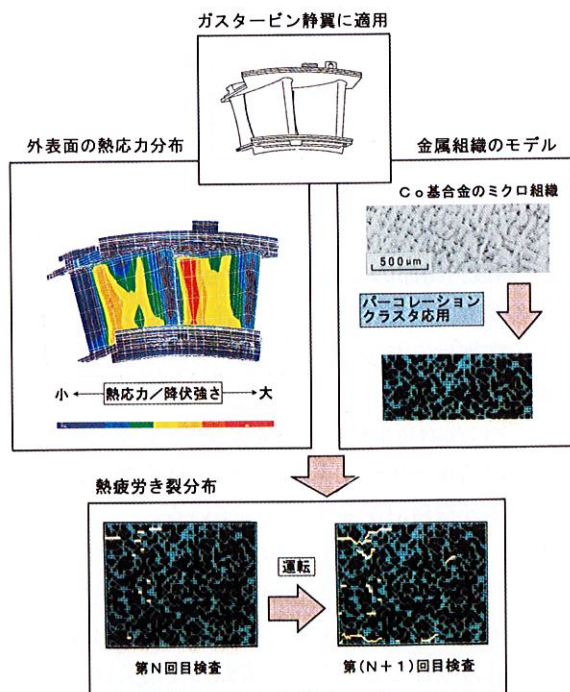


図3. 高温部品の金属組織と損傷分布のシミュレーション 金属組織や損傷過程の統計モデルをガスタービン静翼に適用した例。

Monte Carlo simulation of metal structure and damage distribution for gas turbine components

求めた。そのうえで材料試験から導出した応力・ひずみレベルと損傷進行の関係式を仲立ちに、翼内の熱応力分布とマイクロ組織モデルを組み合わせて損傷過程をシミュレーションした。その結果、 N 回目の定期点検データから次の点検時の状態を予測することができた。疲労き裂の長さ分布などで整理すると、このシミュレーションは、実際の検査データの推移ともよく合致しており、寿命診断や点検計画にも活用されている。

3 半導体デバイス

3.1 シミュレーションの意義

半導体分野では、高集積化が進み、多くの異種材料が小さな空間に閉じ込められるようになってきている。温度変動や化学反応に伴って材料界面に発生する応力は、緩和する空間が制限され、ともすれば欠陥発生に結びつきやすくなっており、構造信頼性の面からの取組みが盛んになっている。

表 1 に機械的な強度面から懸念される不良モードを製造プロセスに沿って示す。強度シミュレーションの意義は、欠陥の発生を予測・評価・防止し、製造を早期に立ち上げ、歩留りを向上させることに集約される。

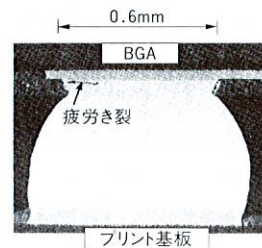
表 1. 半導体製造プロセスと強度関連の不良モード
Mechanical failure mode during semiconductor process

製造プロセス	不良モード
結晶引上げ	結晶欠陥
ウェーハ・デバイス加工	結晶欠陥, 断線, ウェーハ反り
パッケージング	チップ割れ, 樹脂き裂, 内部はく離
回路基板実装	はんだ熱疲労, 基板反り

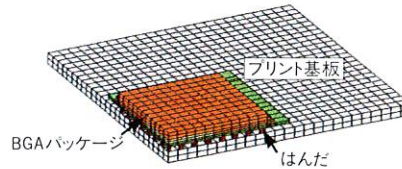
3.2 熱疲労寿命のシミュレーション^{(5),(6),(7)}

最近の多くの半導体パッケージは、プリント回路基板の表面上で微細はんだ接合されて用いられる。このような表面実装法の導入により、わずか数センチ角のパッケージに 1,000 ピンに及ぶ高集積化が可能となっている。反面、従来の貫通型のスルーホール実装に比べ、はんだ接合部の構造信頼性に十分な検討が必要になっている。

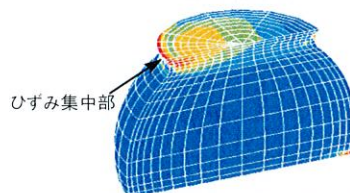
図 4 は、わずか数百 μm 径のボール状のはんだで基板と接合される BGA (Ball Grid Array) パッケージを対象に、熱疲労寿命を予測した結果である。品質保証用の温度サイクル試験を熱負荷条件としており、実際の使用条件に比べて過酷な負荷を加えている。はんだ材の特徴である水あめ状の複雑な変形挙動を考慮し、弾クリープシミュレーションを用いている。まず、全体モデルで加熱・冷却に伴うパッケージと基板の膨張差がはんだ群のひずみに蓄積されるよう



(a) 熱疲労試験後の微細はんだ断面



(b) 全体モデル(1/4セクタ)

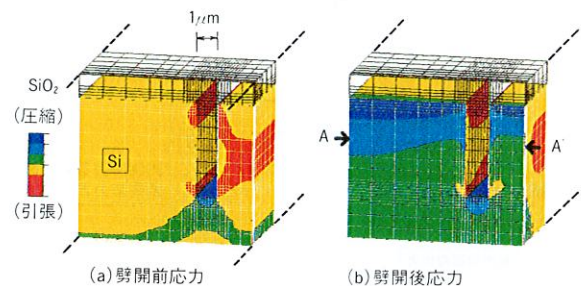


(c) 単体モデル(1/2セクタ)とひずみ分布

図 4. はんだ接合部ひずみ分布のシミュレーション
弾クリープモデルを微細はんだ接合部に適用した例。

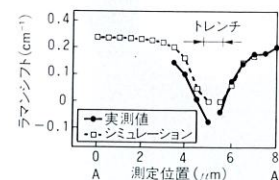
Strain simulation for micro-soldered joints in BGA

すを有限要素法により捕えた。次いでひずみの集中するはんだ接合部について単体モデルを用い、詳細ひずみ分布をシミュレーションした。ひずみの集中するパッケージ側界面のひずみ変動幅とはんだ材の疲労線図から予測した寿命は、実際の試験寿命とよく一致しており、妥当性も検証できた。この手法は、市場における長期寿命の予測にも活用されている。



(a) 劈開前応力

(b) 劈開後応力



(c) 劈開面A-Aに沿ったラマンシフト分布

図 5. 酸化膜付きトレンチ構造のシミュレーション 劈開の効果により応力分布が変化し、この劈開を考慮すると偏光顕微ラマンによる評価とシミュレーションがよく一致する。

Simulation of trench structure with silicon dioxide film

3.3 ラマンシフトと応力のシミュレーション⁽⁸⁾

シリコンウェーハをベースに種々の薄膜の堆(たい)積、エッチングを繰り返し、微細素子構造が作り込まれてLSI製品となる。最近の64 MビットDRAMでは内部構造の代表寸法も0.35 μm を切るようになり、高集積化が進んでいる。界面には、成膜時の昇降温による熱応力に加え、化学反応に伴う応力も重畳し、高い応力が発生しがちである。高温中の応力により単結晶シリコンの格子がずれて転位が発生するとリーク電流源となり、本来の電気的な機能を損なう。

界面における応力集中を捕らえるため、シミュレーションは優れた手段であるが、薄膜物性データやモデル化に不確定要素も残り、顕微ラマン測定による検証が有効である。ウェーハ内部については室温の劈(へき)開面で計測することになり、割った際の応力再配分の影響が懸念される。実際に1 μm 幅のトレンチ(溝)をもつウェーハ表面に酸化膜を堆積しただけの簡素なサンプルを製作して検討した。結果を図5に示す。正面の劈開面では有意な再配分がシミュレーション上でも起こっている。劈開面のシミュレーション結果からラマンシフト量を算出すると顕微ラマンの実測とよく一致した。劈開する以前の高温中シミュレーション結果についても加工プロセスをさかのぼって妥当と推定することができた。

4 あとがき

大型構造物と微細構造物を代表するエネルギー分野と半導体分野においてシミュレーションの高精度化が盛んに進められている。従来扱えなかった複雑な構造や未知の特性をもつ材料についても積極的に取組まれている。紹介した連続体の力学だけでは表現できない数十Åの薄膜や結晶の界面・表面についても原子挙動を考えた分子動力学シミュレーションが適用され⁽⁹⁾、新たな知見が得られている。

生活に身近で安全と密接なPL(Product Liability)法の話

題もあり⁽¹⁰⁾、構造強度シミュレーションの役割は今後ますます大きくなる。

文献

- (1) 上田幸雄, 他: 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌 42, 6, p.61 (1973)
- (2) Y. Smith, et al: Modeling of welding residual stresses, Welding and Joining Processes, ASME PED-51, p.29 (1991)
- (3) 藤山一成, 他: 高温破壊のコンピュータシミュレーション, 材料, 45, 1, pp.137-142 (1996)
- (4) 高安秀樹: フラクタル, p.89, 朝倉書店, (1986)
- (5) 向井 稔, 他: はんだパンプ接合部の界面近傍における熱疲労寿命予測, 機械学会講演論文集 95-1, pp.504-505 (1995)
- (6) 川上 崇: 半導体デバイス実装工程と疲労寿命設計, 機械学会誌, 925, pp.981-985 (1995)
- (7) M. Mukai, et al: Fatigue Life Estimation of Solder Joints in SMT-PGA Packages, to be printed to ASME's J. of Electronic Packaging
- (8) A. Yagishita, et al: Effects of Cleavage on Local Cross-sectional Stress Distribution in Trench Isolation Structure, International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.34-36 (1996)
- (9) 泉 聡志, 他: シリコン弾性定数の原子論, 材料学会 第2回分子動力学シンポジウム, pp.68-71 (1996)
- (10) 村上敬宜: 製造物責任法とこれからの強度設計, 機械学会誌, 925, pp.986-990 (1995)



川上 崇 Takashi Kawakami, D.Eng.

研究開発センター 機械・エネルギー研究所主任研究員, 工博。半導体デバイス, エネルギー機器の構造信頼性評価法の開発に従事。

Energy and Mechanical Research Labs.



鈴木 謙一 Ken'ichi Suzuki, D.Eng.

重電技術研究所 金属材料・強度技術開発部グループ長, 工博。原子力機器, 重電機器の材料強度研究および寿命評価技術の開発に従事。

Heavy Apparatus Engineering Lab.



牛久 幸広 Yukihiko Ushiku

マイクロエレクトロニクス技術研究所 プロセス技術研究所主査。フロントエンドプロセスの技術開発に従事。

ULSI Process Engineering Lab.