

[特別寄稿]

大規模応力シミュレーションによる モバイル機器の強度設計

Structural Design of Mobile Electronic Products Using Large-Scale Stress Simulation

川上 崇

■ KAWAKAMI Takashi

吉村 忍

■ YOSHIMURA Shinobu

秋葉 博

■ AKIBA Hiroshi

ハードウェア製品の信頼性を支える機械的な強度設計において、従来の数値応力シミュレーションに比べて数けた大きな規模の問題が取り扱えるようになってきた。

今回、われわれは、応力シミュレーションコード ADVC™(注1) (1)を携帯電話の落下衝撃シミュレーションに用いて、かつてない大きな並列プロセスでの計算に成功した。大規模応力シミュレーションは、強度設計の精度アップに加え、形状モデル作りの省力化やスピードアップを可能にし、今後の“モノづくり”に大きな変革をもたらすことが期待される。

Structural integrity design is of great importance to ensure the reliability of hardware products, and a large-scale stress simulation technology has recently become available for this purpose.

We have performed drop impact analysis of a fully assembled model of a cellular phone using ADVC™, which is a commercial parallel structural analysis code based on the ADVENTURE system, and verified very good performance. In addition to improving the accuracy of structural integrity design, this large-scale stress simulation is expected to save labor and shorten the process of stress analysis for the structural design of hardware products.

1 まえがき

ハードウェア製品にとって機械的な強度は、信頼性の要であり、機械的強度設計は、安心で安全な社会を実現するうえで大きな役割を担っている。また、設計精度の向上や開発期間の短縮のため、試作や実験に先立って、計算機による数値シミュレーションが日常の設計業務のなかでも行われるようになってきている。特に強度設計においては、有限要素法に基づく応力シミュレーションが広く取り入れられている。

ソフトウェア製品に目を移すと、産業界において活用されている応力シミュレーションコード(注2)は、その市場を欧米のコードに席卷されている。その結果、日本のモノづくりに欠かせない応力シミュレーションの技術開発が受身になってしまっている。また、欧米のコードは数十年の歴史に裏打ちされた実績を持つ一方、過去の技術に縛られ、最近の計算機技術や計算科学技術(Computational Science and Engineering)の進歩を、必ずしもタイムリーに取り込めていないように思われる。

このような背景の下、日本においても国家プロジェクトの一環として、最新技術を盛り込んだ応力シミュレーションコードが開発され(注2) (3)、一部は産業界で活用され始めている。ここで

は、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業 ADVENTURE プロジェクトの成果として無料公開されている ADVENTURE システム、及び ADVENTURE システムをベースにした商用コード ADVC™ の開発経緯とともに、携帯電話の落下衝撃シミュレーションに適用した事例(4)について述べる。

2 大規模応力シミュレーション

大きな自由度を持つ自然系や人工物系などの複雑かつ非線形なふるまいを理解し、予測し、設計することは、理学や工学の諸分野において極めて重要である。こうした一連のタスクを、基本法則から出発して行うには、計算機による大規模計算が不可欠であり、問題に応じたアーキテクチャやアルゴリズムの研究、及び実用性を重視したソフトウェア基盤の開発が必要である。様々な理工学上の現象を高速計算機によって解明しようとする分野は、計算科学と呼ばれている。

気候変動や地殻変動のような地球規模の現象をシミュレーションするために、例えば1億自由度を超えるメッシュを用いた大規模シミュレーションが必要であるというのは、ある意味で自明であろう。これは、自然現象が持つスケールの広がりや複雑性ゆえに、精度の観点から時空間分解要求(すなわち数値シミュレーション規模)に事実上制限がないことに由来する。したがって、自然現象の解明を基本命題とする理学の世界では、徹底的に精度(真実)を追求すると、必要な計算規模は無限に増大することになる。

(注1) ADVCは、(株)アライドエンジニアリングの商標。

(注2) いろいろな形状や材料から構成される構造物に生じる応力を、エネルギー原理に基づく有限要素法を用い、計算機上で数値シミュレーションするソフトウェア。

一方、工学の世界ではどうであろうか。工学の世界も理学同様に、様々な自然現象（物理・化学現象）を対象とする。ただし、工学においては、多くの場合に“与えられた条件や制約のもとで最大の効果を生むような解を得ること”が基本命題となる。別のことばで言えば、“妥協点を探る”ことである。このため、工学の現場においては、利用可能な計算機による数値シミュレーションの時空間分解能と規模に制約があり、その制約を超えることがなかなか困難なときには、制約の範囲内で仮定に基づいて得られた数値シミュレーション結果と、専門エンジニアの持つ“経験的知識”（安全率の導入、工学的な判断、経験則など）を活用して人工物が設計され、社会に供給されてきた。

しかしながら、このような状況もしだいに変わろうとしている。対象となる人工物がしだいに複雑となり、一方で、より高度で効率的な設計法やメンテナンス法が求められるようになってくると、実験に基づく実証や経験的な知識に頼った設計が困難になり、設計における数値シミュレーションの役割が増してくる。その結果、計算精度ひいては計算規模の追求が必須のものとなってくる。

3 ADVENTURE システム^{(2), (5)}

これまでは、固体の変形及び熱や流れなど、各種力学現象を定量的に評価することを目的として、欧米を中心に汎用計算力学ソフトウェアが多数開発されてきた。これらのソフトウェアは、今や産業界において欠くことのできない基盤技術となっている。

しかしながら、一昔前の逐次処理計算機を前提として開発されたために、現在の数百～数千個、場合によっては数万個のプロセッサから構成される超並列計算機の上では、極めて低い並列化効率しか得られない傾向にある。その結果、計算機のピーク性能が超並列技術の採用によって向上しても、それに対応できないソフトウェアのままでは、せいぜい数百万自由度クラスのモデルによるシミュレーションが限界となってしまう。

1億自由度クラスのモデルについては、メッシュを生成することも難しく（プレ処理の課題）、もしメッシュを生成できたとしてもシミュレーションすることができない（メイン処理の課題）。もしシミュレーションできたとしても、シミュレーション結果のデータ量が膨大となり、可視化などのポスト処理ができない（ポスト処理の課題）といった多くの課題を抱えている。

これらの課題を克服するため、ADVENTURE プロジェクトでは、21世紀初頭の汎用計算力学システムの目標を次のように定めた。

- (1) 1千万～1億自由度クラスのモデルを用いて、詳細な丸ごとシミュレーションが自在に行えること。
- (2) 数百～数万個のプロセッサから構成される超並列計算機環境においても、高い並列性能が得られること。

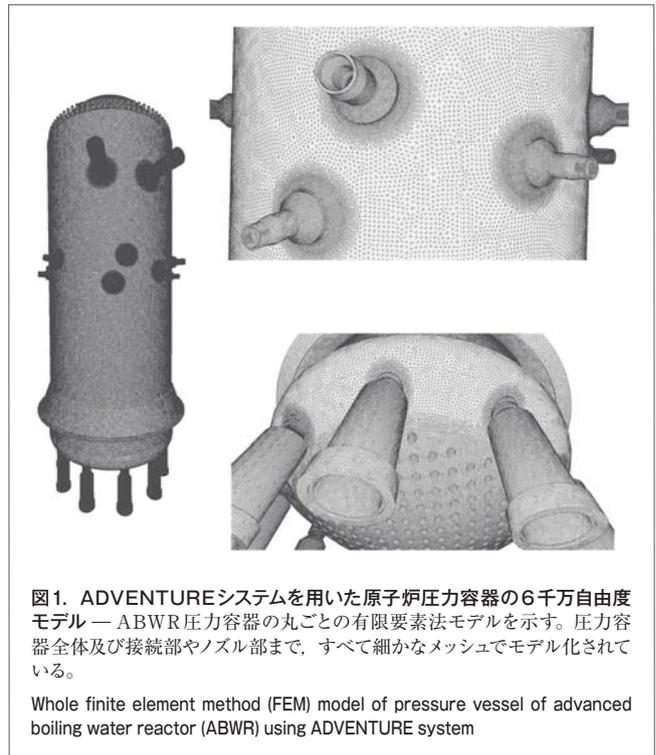


図1. ADVENTUREシステムを用いた原子炉圧力容器の6千万自由度モデル — ABWR圧力容器の丸ごとの有限要素法モデルを示す。圧力容器全体及び接続部やノズル部まで、すべて細かなメッシュでモデル化されている。

Whole finite element method (FEM) model of pressure vessel of advanced boiling water reactor (ABWR) using ADVENTURE system

- (3) PC（パソコン）クラスタから超並列計算機まで、多様な並列分散環境へ容易に移植可能であること。
- (4) 並列分散環境において、単一現象のシミュレーションはもちろん、連成現象シミュレーションや設計を柔軟かつ効率的に行えること。
- (5) 新しい知見の導入などの改良や保守が容易であること。

以上の目標を達成するために、最先端の高性能計算（HPC：High Performance Computing）技術とコンピューティング技術を駆使してADVENTUREシステムを作り上げた。ADVENTUREシステムを用い、改良型沸騰水型原子炉（ABWR）の圧力容器につき丸ごとの応力シミュレーションを行った⁽⁶⁾。

6千万自由度クラスの四面体の2次要素モデルを図1に示す。接続部やノズル部までがすべて十分に細かいメッシュでモデル化されており、炉容器全体の挙動から各部の詳細な挙動までを、同じモデルで同時に精密に計算できる。

このモデルを用いて一つのノズル端部に圧縮強制変位を与えた静的応力シミュレーションの結果を図2に示す。変形は500倍に拡大してある。図2より胴部全体が変形し、その影響が周辺のノズル結合部にも現れていることがわかる。従来のシミュレーションではノズルを一つ取り出し、胴部との接続箇所に固定境界条件を付加したシミュレーションが行われるために、ノズル部に生じる応力値が過大に評価されてしまう。しかし、図2に見られるように、実際には胴部全体も変形するため、その分、応力が緩和される効果が示された。



図2. ノズル反力を受ける原子炉圧力容器の静的応力シミュレーション
— 上部のノズルから反力を受ける圧力容器の応力分布を示す。変形は500倍に拡大している。

Stresses in pressure vessel under reaction force from nozzle

4 ADVC™システム⁽³⁾

並列計算機のプロセッサ数は年ごとに多くなり、世界最上位クラスの超並列計算機では数千から数万個に達している。一方、古い時代のハードウェア、基本ソフトウェア (OS)、及びコンパイラ^(注3)などに基づいて作られた巨大で複雑な応力シミュレーションコードは、並列化のための書直しを容易には許さない。実際、従来の商用シミュレーションコードで可能な並列プロセス数は、4、8、せいぜい16と思われ、並列処理という計算機の技術革新に必ずしも追いついていないように見える。

大規模シミュレーションには、並列処理でなければ対応できない。商用の並列処理応力シミュレーションコードADVC™は、並列計算機環境を前提とするADVENTUREシステムをベースとし、新たにCGCG法という独自の計算処理アルゴリズムを搭載している^{(7)、(8)}。CGCG法の搭載により、計算の収束性やメモリの効率を飛躍的に向上させることができた。また、材料非線形、幾何学的非線形、静的、動的、及びこれらの組み合わせの問題にも対応している。プレ処理とポスト処理システムについても、各種のCADファイルからメッシュを効率的に生成でき、数億自由度クラスのモデルも扱えるなど、汎用の応力シミュレーションコードに生まれ変わっている。

2003年から現在までに行ったADVC™によるいくつかのシミュレーションの事例を表1に示す。1番目の事例を除き、当時のほかの商用コードでは計算することすら難しかった。

(注3) プログラミング言語で書かれたプログラムを、コンピュータが実行可能な機械語のプログラムに変換するソフトウェア。

表1. ADVCシステムのシミュレーション事例

Case studies of application of ADVC™ system to industrial products

対象モデル	計算機	計算時間	比較
110万自由度V4エンジン 圧入、組付け、熱荷重、 爆発解析	Pentium® ^(注4) 4 3 GHz 16プロセス	11 min	商用コードA Origin® ^(注7) 3800 60h
850万自由度 V8フルモデルエンジン 非定常熱弾塑性解析	Itanium® ^(注5) 2 900 MHz 20プロセス	9 h	なし
6千万自由度実用機械部品 静的解析	Itanium® ^(注5) 2 15プロセス	1.5 h	なし
3億5百万自由度携帯電話 落下衝撃解析	IBM Blue Gene® ^(注6) /L 8292プロセス	34 h	なし

5 携帯電話の落下衝撃シミュレーション

情報通信機器の機械的な強度信頼性設計の重要性が増している。特に、モバイル化に伴い、耐衝撃強度が設計の一つのポイントとなっている。筐体(きょうたい)には実装回路基板や液晶パネル及びバッテリーなど、数多くの部品が高い密度で組み込まれており、落下衝突時には、機器全体が変形しながら、個々の部品にも衝撃応力が発生し、ときには破損に至ることがある。

製品サイクルの速い情報通信機器においては、試作段階に至ってから不具合が見つかって開発が後戻りすることは、取り返しのつかない遅れになりかねない。このために、設計段階において、計算機シミュレーションにより徹底的に検討することが望まれている。しかしながら、落下衝撃のような複雑な現象を応力シミュレーションをするには、十~数cmオーダーの機器全体の変形挙動と、内部部品の接合端部のμmオーダーの領域に発生する応力集中を、精度よく再現する必要がある。このために、応力シミュレーションの規模が大きくなりすぎて、設計段階における検討を阻んできた。

われわれは、IBM社ワトソン研究所の協力のもと、ADVC™を用いて携帯電話の落下衝撃シミュレーションを行い、SC06 (Super Computing 2006, 正式名称: the international conference of high performance computing, networking, storage and analysis) でゴードンベル賞ファイナリスト⁽⁴⁾に、また、2007年度の日本機械学会賞(技術)⁽⁹⁾にも選ばれた。シミュレーションのポイントは、CADデータをほぼそのまま読み込み、3億5百万自由度とこれまでに例を見ないほどの巨大なモデルを短い期間で構築した点、大型部品だけでなく設計のボトルネックにもなる小型のチップ部品まで198個の部品をモ

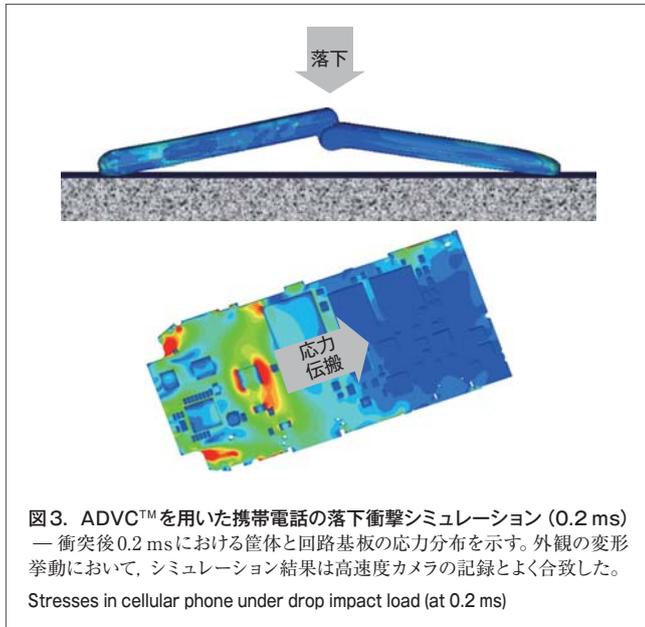
(注4)、(注5) Pentium, Itaniumは、米国又はその他の国における米国 Intel Corporation又は子会社の登録商標又は商標。

(注6) Blue Geneは、International Business Machines Corporationの登録商標。

(注7) Originは、Silicon Graphics, Inc.の登録商標。

デル化した点、計算時間幅がメッシュサイズ依存性の少ない陰解法による動的シミュレーションを行っている点、IBM Blue Gene™/L8ラック、8192ノード8192プロセスという、かつてない大きな並列プロセスでの計算に成功した点などである。

シミュレーションの対象時間は約0.2 ms、計算時間は約34 hで、結果の一例を図3に示す。シミュレーション結果は、



実際に二つ折りの携帯電話を開口状態で水平落下させ、外観の変形挙動を高速度カメラで記録した結果とよく合致した。

更に、シミュレーションには、実装が高密度であり、また、速い過渡現象であるために実測が難しい、筐体内部の変形・ひずみや応力の状況を手に取るように把握できる利点があることが示された。

また、従来の応力シミュレーションコードでは規模の制約から、CADデータにある形状情報を専門のエンジニアが簡略化してモデルを作るために膨大な労力を要していた。それに対し、大規模応力シミュレーションを用いることで、CADデータの簡略化作業が大幅に少なくなり、エンジニアが本来の創案や設計に注力することを助けてくれる効果も示せた。

今回は世界最上位クラスの計算機を用いて大規模応力シミュレーションの適用性を調べることができたが、実際の設計現場で使える計算機でもメッシュの粗密を工夫することでほぼ同等の効果が得られる。

6 あとがき

大規模応力シミュレーションは、機械的な強度設計の精度とスピードを同時に向上するもので、国産ソフトウェアがモノづくりに大きな変革をもたらすものと期待される。

数値シミュレーションのコード開発に完成というものはなく、多くの人々が使っていくことで機能向上が図られる。これからは、大規模応力シミュレーションがモノづくりと一対の技術となって、日本の強みに育っていつてくれることを願ってやまない。

文献

- (株)アライドエンジニアリング. “ADVCの概要”. 〈<http://www.alde.co.jp/advc/index.html>〉, (参照2008-06-10).
- ADVENTURE プロジェクト “設計用大規模計算力学システム開発プロジェクト”. 〈<http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>〉, (参照2008-06-10).
- RSS21プロジェクト. “革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発”. 〈<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/index.html>〉, (参照2008-06-10).
- Akiba, H., et al. Large Scale Drop Impact Analysis of Mobile Phone Using ADVC on Blue Gene/L. Proc. of SC06. 2006.
- Yoshimura, S., et al. Advanced General-purpose Computational Mechanics System for Large Scale Analysis and Design. Journal of Computational and Applied Mathematics. 149, 2002, p.279-296.
- Ogino, M., et al. Seismic Response Analysis of Full Scale Nuclear Vessel Model with ADVENTURE System on the Earth Simulator. Journal of the Earth Simulator. 2, 2005, p.41-54.
- 鈴木正文, ほか. 大規模有限要素解析のための高速頑健な並列ソルバCGCG法の開発. 日本機械学会論文集A編. 653, 2002, p.1010-1017.
- 秋葉 博. “大規模並列構造解析のためのCG CG法とその背景”. 日本機械学会第20回計算力学講演会講演論文集. No. 07-36, 2007, p.177-178.
- 秋葉 博, ほか. 並列処理による汎用大規模構造解析システムの開発と実用化. 日本機械学会誌. 111, 1074, 2008, p.379.



川上 崇 KAWAKAMI Takashi, D.Eng.

富山県立大学 工学部 機械システム工学科教授, 工博。材料力学分野。電子情報機器, 電子・半導体デバイス, 自動車部品の強度信頼性設計法の開発。日本機械学会フェロー。(元 (株)東芝 研究開発センター)
Toyama Prefectural University



吉村 忍 YOSHIMURA Shinobu, D.Eng.

東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻教授, 工博。知的シミュレーションの開発と工学分野, 社会環境分野への応用。日本計算力学連合副会長, 日本機械学会フェロー。
University of Tokyo



秋葉 博 AKIBA Hiroshi, D.Eng.

(株)アライドエンジニアリング社長, 工博。構造解析システムの開発。日本応用数学会評議員, 日本機械学会, 日本計算工学会, 日本シミュレーション学会会員。
Allied Engineering Corp.