

小特集

並列処理・陰解法に基づく大規模非線形衝撃解析

秋 葉 博*・柴 田 良 教*

ABSTRACT The commercial structural analysis code ADVANC has a function of large scale nonlinear impact analysis based on parallel processing and the implicit method. A numerical result of drop impact analysis of a mobile phone by ADVANC on IBM Blue Gene/L has been selected as one of the finalists of the Gordon Bell prize at SC06. An example of verification of the nonlinear impact analysis in ADVANC is described in comparison to a drop test and a result of LS-DYNA for a simple model.

1. はじめに

ご存知の方もおいでかもしれないが、当社ではADVENTUREプロジェクト¹⁾(1996年～2002年)に基づいた並列処理構造解析コードADVANC(エー・ディー・ブイ・シー)を開発、商用化している²⁾。

計算力学・シミュレーションが現業現場で活躍しているCAD, CAEといった分野では、海外製ソフトウェアの寡占状態が長く続いている。簡単には動きそうにない寡占状態を作っているのは、たとえば構造解析では、MSC.Nastran, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYSといった、高い知名度と多くのユーザを持つ汎用ソフトウェアである。これらは、長い歴史と高度で熟成された機能を有している。この分野で新たな汎用ソフトウェアを開発し、ユーザを獲得していくのは容易なことではない。単に有限要素法コードを作るだけならば、古典的な分野であることもあり、優れた教科書も数多く出版されているので、できないことはないだろう。ADVENTUREのようなお手本とすべきフリーソフトもある。しかし、機能は汎用ソフトには簡単には追いつけない。たとえ作ったとしても、検証をどうするかの問題がある。ユーザには上に挙げたソフトの長い使用経験、ノウハウと蓄積された膨大なデータ——解析モデルや評価結果——がある。開発者は、新しく作った機能はこれらと整合するのか、ABAQUSと同等な結果が出るのかなどといった問いに答えなければならない。検証に要する時間は、開発に要する時間の数倍を要す

るだろう。また、商用コードは商業的に成り立っていないかなくてはならないので、さまざまなプロモーションを通じて顧客を獲得していく必要がある。顧客の獲得は開発よりも難しいかもしれない。

しかし、一方では、並列化という新しいコンピュータの技術革新に、有力なシミュレーションソフトウェアが追いついていないという現実もある。古い時代のコンピュータハードウェア、OS、コンパイラなどに基づいて作られた巨大で複雑なコードは、並列化のための書き直しを容易には許さない。CAE分野の、計算負荷が大きくて本当は並列化による恩恵を最も受けてほしいソフトウェアたちの、並列化の状況にはなかなか困難なものがある。実際、CAE分野の商用コードが可能な並列ノード数(またはプロセッサ数)は、4, 8, せいぜい16といったところだろう。HPC(High Performance Computing)の分野では、並列コンピュータのノード数(またはプロセッサ数)は年毎に多くなり、世界最上位のクラスでは数千から数万になっているし、ベンチマークLINPACKを使った最速の浮動小数点演算性能の記録は、IBM BlueGene/L(TOP500 1位、ローレンスリバモア研究所)の65536ノード、131072プロセッサが出した280 TFLOPS(テラフロップス)に達している³⁾。数年後には確実にペタフロップスの時代になる。ハイエンドマシン以外でも、PCのコストパフォーマンスが数年前と比べて飛躍的に伸びたため、並列コンピュータはごく身近なものになった。このようなダイナミックな動きと比べ、現実のCAEのパフォーマンスは取り残され、ほとんど進歩が見られないといってもよいかもしれない。

並列処理は、ADVENTUREプロジェクトが始まった当時は研究レベルとはいわないまでも、実用からは遠

Large Scale Nonlinear Impact Analysis Based on Parallel Processing and Implicit Method. By Hiroshi Akiba and Yoshinori Shibata (Allied Engineering Corporation).

*(株)アライドエンジニアリング

かった。「PC クラスタ」は、大学や研究所では地道に使われていたが、信頼性も貧弱で民間企業からはほとんど相手にされていなかった。今はしかし、「PC クラスタ」という言葉さえも廃れ、並列処理はすでにメインストリームである。「PC クラスタ」の技術を受け継いだ、Xeon や Opteron プロセッサを持ち、Linux を OS とする並列コンピュータが企業で標準的なインフラになっている。

新しい技術には逆風も吹く。ADVENTURE プロジェクトが始まった当時は、大規模解析などは不要といった声をずいぶん聞いた。しかし今はもう、大規模解析でなくてはできないせっぱ詰まった問題が現実にあるし、今後も解析現場で扱われる問題の自由度は大きくなり続けるだろう。現実には解析の現場で1千万自由度を超えるような解析も行われている。大規模解析へのユーザのニーズは確実にある。

大規模解析には、並列処理なくしては対応できない。プロセッサの64ビット化が進んだので、メモリ空間は大きく取れるようになったが、コンピュータの性能を引き出すには並列処理が不可欠である。上に述べた、技術上の膠着状態あるいはマーケットの寡占状態は、並列性能で切り崩すことは可能かもしれない。もし、既存の汎用ソフトウェアではできない解析ができるならば、

当社、東大、慶応大、IBM、東芝、ニイウスは共同で、ADVC による携帯電話の落下衝撃解析を IBM BlueGene/L (TOP500 2位、IBM ワトソン研究所、8ラック、8192 ノード、16384 プロセッサコア)で行い、その結果を述べた論文が HPC 分野では世界最大の会議、SC06 (Super Computing 2006)⁴⁾において、HPC 分野では最も権威ある賞、ゴードンベル賞のファイナリストに選ばれた⁵⁾。SC06 は 2006 年 11 月 11 日から 17 日まで、フロリダ・タンパで行われ、受賞の可否は会議の場で決まる。最終論文はサブミット済みで、論文には、BlueGene/L 4ラック (BlueGene/L 1ラックは1024 ノードなので4096 ノード、各ノードはデュアルコアなので8192 プロセッサコア)を用いて1億4200万自由度の携帯電話の2.4ミリ秒の落下解析が538 GFLOPS、12.1時間で解けたと書かれている⁶⁾。しかし、ゴードンベル賞では、ファイナリストに選ばれた後も、会議の場まで、パフォーマンスのチューニングをしてもよいことになっている。この記事の締め切り間際になって、同じ携帯電話をより詳細にモデル化した3億500万自由度モデルの解析に成功した。本結果をもってしても受賞できるかどうかは不明だが、いずれにしても、この

原稿が活字になっているところには決まっている。仮に受賞を逃し、ファイナリストで終わったとしても、それなりのインパクトはあるはずである。このような解析は既存の汎用ソフトウェアでは絶対に不可能だから。

大規模解析は、携帯電話を始めとする工業製品の設計における大きな技術革新をもたらす可能性がある。製品のサイクルが早いエレクトロニクス製品では、短い設計工期の中で実験に代った設計を行うことも多いが(デザイン・バイ・テスト)、数ヶ月の設計工期の中で、もし、半月程度でCADモデル作成後のメッシュ生成から結果表示までのシミュレーションができるようになれば、シミュレーションに基づいた設計(デザイン・バイ・シミュレーション)が可能になるかもしれない。

2. ADVC の CGCG 法アルゴリズム

ADVC に実装されている新しいCGCG法アルゴリズムについてごく簡単に触れる。CGCG法は領域分割法の一種である。領域分割法については、本誌に4回にわたって連載された記事に詳しく述べた^{8~11)}。もともとの領域分割法は部分構造合成法の反復版といったもので、領域分割に基づいた並列化はできるが、分割数が少ない場合には逐次処理と比べてメリットはない。単に並列化するだけでは既存の速いソルバに負けてしまう。

Mandelは領域分割法に革命的な手法をもたらし、それをBDD (Balancing Domain Decomposition)法と名づけた¹²⁾。BDD法では、ノイマン前処理という領域分割法用の前処理において、ノイマン型境界条件しか課せられない分割領域に生ずる、不定運動(Mandelは浮遊運動、floating motionと呼んだ)をもたらす分割領域の自由度を、分割領域のグローバルな剛体運動を取り入れることで別に扱う。これにより、BDD法は2階層のマルチグリッド法として働き、領域分割法は劇的に速くなった。

しかし、分割領域内部に適用される直接法は重く、剛体運動を抜き去る射影操作も計算コストを増大させる。ADVCのソルバとして開発されたCGCG法では、分割領域内部を直接法で解く操作をやめてしまい、解空間全域にシンプルでグローバルな処理が少ない分並列効率の高い並列CG法(普通のCG法を並列化しただけのもの)を適用することで、BDDを上回るパフォーマンスを出すことに成功した。CGCG法の詳細は文献6)、13)に述べられている。

3. ADVCによる落下衝撃解析

3.1 概要

ゴードンベル賞ファイナリスト論文は携帯電話の落下衝撃解析だが、その検証の一事例としての、ADVCによる落下衝撃解析について述べる。

本解析で強調したいのはADVCの陰解法による落下衝撃解析である。陽解法は計算時間幅 Δt のメッシュ依存性が強く、メッシュが細かくなると Δt を小さく取らなければならないし、計算時間の節約のために Δt を大きく取ろうとすると、メッシュをよい品質で均等に大きく取らなければならない。これは、解析モデルを作る際の大きな足かせとなり、解析の現場では大きな負担となる。CADモデルがあっても、これを解析するためのモデルの単純化に多くの、たとえば1ヶ月単位の時間がかかるし、解析もコンピュータを、場合によりこれも1ヶ月単位の長時間の占有を強いられることもある。

もし陰解法で高速に解ける道があるのなら、この問題は一挙に解決するかもしれない。複雑なモデルは4面体自動メッシュで切ればよい。ただし、もちろん陰解法でも計算に要求される時間分解能を超えるような時間刻みは取ることはできないし、およそどんな問題でも何かの答えを出す陽解法にメリットもある。

本解析は、すでに公表されている実験およびLS-DYNAの解析と両者の比較結果を参照して行った⁷⁾。モデルは図1に示すような単純なモデルだが、文献7)では詳細な検討が行われていることが、本解析を行う上では大きかった。LS-DYNAには陰解法のオプションもある¹⁴⁾が、文献7)では標準的な陽解法が用いられている。

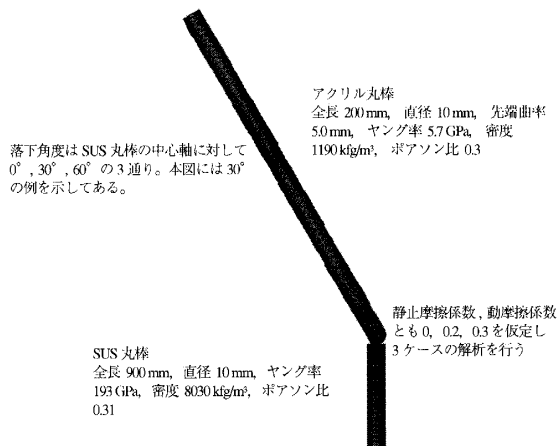


図1 解析モデルと解析条件

3.2 解析モデルと解析条件

解析モデルを図1に示す。SUSの丸棒にアクリルの丸棒が落下して衝突する。SUS丸棒は固定されており、アクリル丸棒はSUS丸棒の垂直軸に対して0°, 30°, 60°の角度で、高さ10cmの位置から落下する。SUS丸棒は直径10mm、全長900mm、ヤング率、ポアソン比、質量密度はそれぞれ193GPa, 0.31, 8030kg/m³、アクリル丸棒は直径10mm、全長200mm、下端部の曲率5mm、ヤング率、ポアソン比、質量密度はそれぞれ5.7GPa, 0.3, 1190 kg/m³である。

解析は落下角度0°の場合は1/4対称、30°, 60°の場合は1/2対称の設定で行う。要素は6面体1次要素(一部縮退6面体)で、落下角度0°の場合27万節点、81万自由度、30°, 60°の場合は52万節点、156万自由度である。接触条件には、SUS丸棒の上端面をマスタ、アクリル丸棒の下端面をスレーブに取り、摩擦係数は0(完全すべり)、0.2, 0.4の3種類を考える。文献7)では、実験結果に基づいて、摩擦係数は0.2と推定されている。

LS-DYNAの接触解析には、ペナルティ法とソフトコンストレイント法があるが、本解析ではソフトコンストレイント法が用いられている。ADVCでは、Updated Lagrangeanに基づく幾何学的非線形オプションが指定されている。ADVCの6面体1次要素には、体積歪みに関する選択的次數低減積分が用いられている。 Δt の設定には、LS-DYNA, ADVCともに自動刻みオプションが指定されている。

3.3 解析結果

落下角度0°, 30°, 60°の場合の解析結果をそれぞれ図2, 図3, 図4に示す。横軸は時間、縦軸は接触反力(解析結果から得られる接触圧力と接触面の面積をかけて総和したもの)である。

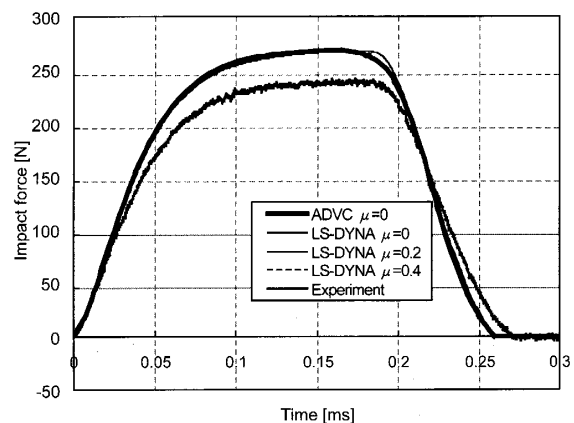


図2 落下角度0°の場合の解析結果

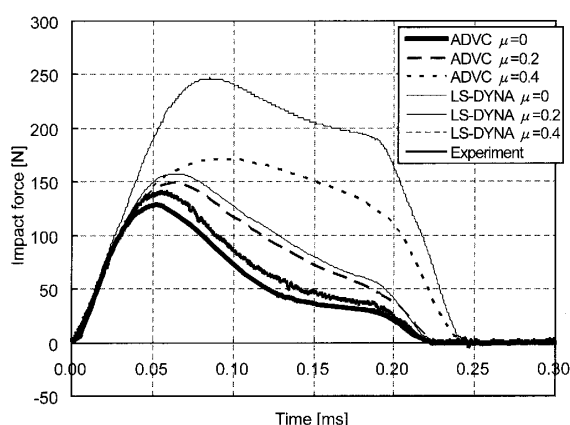


図3 落下角度 30° の場合の解析結果

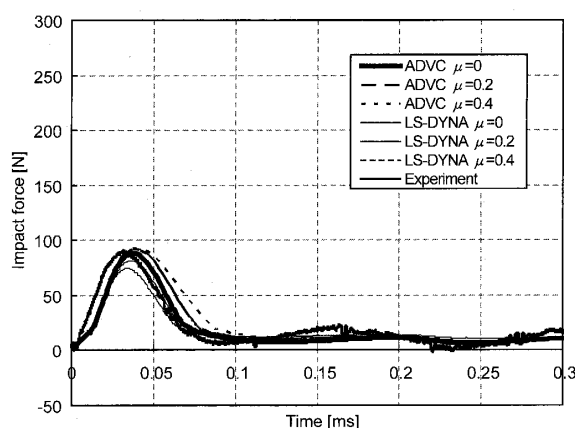


図4 落下角度 60° の場合の解析結果

落下角度 0° の場合はすべり方向の力が生じないため、解析上は摩擦係数 0 (完全すべり)、0.2、0.4 の結果は一致するはずである。図 2 の LS-DYNA の結果では完全に重なっている。このケースでは、ADVC は完全すべりの場合しか計算していない。LS-DYNA と ADVC の結果はほぼ一致しているが、0.19 秒付近でわずかな差異が見られるが、これは、LS-DYNA と ADVC の時間刻みの違いによるものと思われる。実験との比較は文献 7) でも言及されているが、十分に一致しているといっていよう。

落下角度 30° の場合、摩擦係数 0 の完全滑り状態では、LS-DYNA と ADVC の結果はほぼ完全に一致しているが、摩擦係数 0.2 の場合、ADVC の結果は LS-DYNA よりわずかに実験結果に近い方に下側にずれている。これは、ADVC と LS-DYNA の摩擦のモデル化が異なるためと思われる。摩擦係数 0.4 の場合、摩擦によるすべりの抑制のため、LS-DYNA、ADVC とともに大きな反

力が生じており、実験結果とは離れる。

落下角度 60° の場合、摩擦係数によらずすべりが生じており、このため接触反力は小さく、実験結果とも近い結果が出ている。落下角度 0°、30° と同様、完全滑り状態では、LS-DYNA と ADVC の結果はほぼ完全に一致する。この問題設定では、直感的には摩擦係数が大きいほど反力は大きくなるものと考えられるが、落下角度 60° の場合、LS-DYNA の結果は、摩擦係数が大きいほど反力が小さくなるという、逆の結果が出ている。これも ADVC と LS-DYNA の摩擦のモデル化が異なるためと思われる。

LS-DYNA、ADVC の結果とも、摩擦モデルの妥当性、メッシュの細かさの解析結果への影響など検討すべき事柄は残っているが、このような前提の下で、ADVC の落下衝撃解析は妥当な結果を与えることがわかる。

LS-DYNA の解析は UNIX 機 (IBM Power4 1.3GHz) で行われた。落下角度 60° (1/2 モデル) の計算は、解析対象時間 0.6 ミリ秒、初期計算時間刻み 2.10^{-8} 秒 (2.10^{-5} ミリ秒)、計算所要時間は約 35 時間だった。一方、ADVC の解析は Pentium4 クラスタの 8 ノードを用いて行い、解析対象時間 0.3 ミリ秒、自動時間刻みによって取られた時間ステップは 60 ~ 120 ステップで、計算所要時間は約 4 時間だった。LS-DYNA で取られた実際の時間刻みは不明のため正確な比較はできないが、ADVC で取られた時間刻みは、LS-DYNA で取られたものより非常に大きいはずである。

解析モデルが小さいので (30°、60° モデルで 52 万節点、156 万自由度)、ADVC のパフォーマンスは LS-DYNA と比べて際立った優位性は出ていないが、大規模になればなるほど、差は大きくなるはずである。

4. まとめ

ADVC の落下衝撃解析の検証について述べた。本計算例では、ADVC は LS-DYNA と実験結果によく一致した。はじめに述べた携帯電話の落下衝撃解析は、このような検証解析に基づいて行われたものである。

検証例はごく小さな問題で、既存の汎用ソフトウェアでも十分に解析できるものだが、ゴードンベル賞ファイナリスト論文や、あるいは終わったばかりの 3 億自由度といった問題は、現在のところ、既存ソフトウェアではまず扱えない。

今後も、新しいシミュレーション技術が、技術革新をリードする原動力となるのは疑いないだろう。そこで使われであろう一つのツール ADVC が、動きそうに

ない商用シミュレーションコードのHPCにおける技術的な膠着状態と、マーケットの寡占状態を動かすきっかけを作ればと、筆者は思っている。

最後に、本稿をまとめるにあたり、株式会社東芝・研究開発センター 大森隆広氏, 同 川上崇氏, 東京工業大学 井上裕嗣助教授には, 文献7)に述べられている実験, 解析などの詳細についてご教示いただきました。ここに謝意を表します。

(著者注記)本稿で述べたゴードンベル賞については, 残念ながら受賞を逃し, ファイナリストに留まった。

参 考 文 献

- 1) <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>, ADVENTURE プロジェクトウェブサイト
- 2) <http://www.alde.co.jp/>, アライドエンジニアリングウェブサイト
- 3) <http://www.top500.org/>, TOP500 ウェブサイト
- 4) <http://sc06.supercomp.org/>, SC06 ウェブサイト
- 5) http://sc06.supercomp.org/schedule/event_detail.php?evid=5056, ゴードンベル賞ファイナリストアナウンスウェブサイト
- 6) H. Akiba, T. Ohyama, Y. Shibata, K. Yuyama, Y. Katai, R. Takeuchi, T. Hoshino, S. Yoshimura, H. Noguchi, M. Gupta, J. A. Gunnels, V. Austel, Y. Sabharwal, R. Garg, S. Kato, T. Kawakami, S. Todokoro, J. Ikeda: Large Scale Drop Impact Analysis of Mobile Phone Using ADVIC on Blue Gene/L, Proceedings of SC06 (2006.11)
- 7) T. Omori, H. Inoue, N. Kawamura, M. Mukai, K. Kishimoto, T. Kawakami: Evaluation of Drop Impact Load for Portable Electronic Components, 7th International Conference on Electronics Materials and Packaging, 262/267 (2005)
- 8) 秋葉博, 鈴木正文, 大山知信: 領域分割法入門 第1回 並列処理と領域分割法, シミュレーション, **22-2**, 111/117 (2003.6)
- 9) 秋葉博, 鈴木正文, 大山知信: 領域分割法入門 第2回 有限要素法と領域分割法, シミュレーション, **22-3**, 174/181 (2003.9)
- 10) 秋葉博, 鈴木正文, 大山知信: 領域分割法入門 第3回 領域分割法の高速化 (1), シミュレーション, **22-4**, 261/270 (2003.12)
- 11) 秋葉博, 鈴木正文, 大山知信: 領域分割法入門 第4回 領域分割法の高速化 (2), シミュレーション, **23-1**, 48/55 (2004.3)
- 12) J. Mandel: Balancing Domain Decomposition, Communications on Numerical Methods in Engineering, **9**, 233/341 (1993)
- 13) 鈴木正文, 大山知信, 秋葉博, 野口裕久, 吉村忍: 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, 1010/1017 (2002.7)
- 14) <http://www.lstc.com/>, LS-DYNA 開発元 LSTC 社ウェブサイト