

LS-DYNAによる自動車の大規模衝突解析

Crash Simulation of Large-Number-of-Elements Car Model by LS-DYNA on Highly Parallel Computers

あらまし

計算機シミュレーションによる自動車の衝突解析は、自動車開発の期間短縮とコスト削減に欠かせないツールとなっている。開発期間の更なる短縮のため、解析モデルの作成時間短縮の研究が進められ、短時間で人手を介さずに解析モデルを作成することが可能となりつつある。しかし、人手を介さない解析モデルの作成では、実用レベルの解析精度を得るために、現在自動車会社で利用されている解析モデルの10倍以上に詳細化が必要となり、実用的な時間で解析することはできない。そこで、並列計算機を用いた高並列計算での実用解析の実現可能性について検討した。本稿では、自動車会社における大規模解析の必要性を述べ、非線形動的構造解析ソフトウェアLS-DYNAを利用し、現在自動車会社で利用されている規模の解析モデルを10倍に詳細化させた1000万要素の解析モデルを512並列まで高並列実行させ、その結果知り得た技術情報、高速化の施策および今後の検討課題を述べる。

Abstract

The analysis of car crashes by computer simulation has become an indispensable tool for shortening automobile development time and lowering costs. To shorten development time even further, researchers have endeavored to shorten the time needed for creating analysis models, and it is now becoming possible to create analysis models in a short time without manual work. However, to obtain a practical level of accuracy in analysis when creating an analysis model automatically, one needs a level of detail more than ten times that of analysis models currently being used by automobile companies, but the time taken to perform such an analysis is impractical. To resolve this problem, we investigated the possibility of performing practical analysis by highly parallel computing on a parallel computer.

This paper explains the need for large-number-of-elements crash analysis at automobile companies and describes the highly parallel execution with up to 512 processors of a 10-million-element analysis model using the nonlinear dynamic structured analysis program LS-DYNA. The technical information obtained from these simulations, measures for improving processing speed, and future research issues are presented.



金堂剣史郎 (こんどう けんしろう)
計算科学ソリューション統括部
所属
現在、LS-DYNAの製品サポートに
従事。



牧野光弘 (まきの みつひろ)
テクニカルコンピューティング
ソリューション事業本部 所属
現在、LS-DYNAの製品サポートに
従事。

ま え が き

LS-DYNA^①は米国Livemore Software Technology Corp. (LSTC) 社が開発した非線形動的構造解析ソフトウェアである。陽解法により構造物の大変形挙動を時刻履歴で解析することができ、自動車の衝突解析から携帯電話の落下解析まで幅広い分野で利用されている。富士通は、LS-DYNAの販売代理店であると同時に、LSTC社のパートナーとしてベクトルスーパーコンピュータ版、OpenMP 言語で並列化されたSMP版 (Shared Memory Parallel : 共有メモリを使用した並列処理)、MPI言語で並列化されたMPP版 (Massively Parallel Processing : 分散メモリを使用した並列処理) の製品化に協力してきた。

今日、LS-DYNAの最も重要な適用分野である自動車の衝突解析では、計算機シミュレーションによる自動車の衝突解析を行うことにより試作車の作成台数が削減され、開発コストの削減と開発期間の短縮に貢献している。今後、さらに開発期間の短縮をするためには、つぎの二つの課題が重要となる。

- (1) 解析時間の短縮
- (2) 解析モデルの作成時間の短縮

本稿では、PCクラスタのコストパフォーマンスの急速な向上により高並列処理が利用可能となりつつあることを踏まえ、以下のように現状を紹介し検討課題を述べる。

- ・自動車会社における衝突解析と解析技術の現状
- ・大規模解析モデル作成時間の短縮とその影響
- ・大規模解析モデルの解析時間の評価
- ・大規模解析モデルのシミュレーション高速化
- ・今後の検討課題

自動車会社における衝突解析と解析技術の現状

本章では、自動車会社における衝突解析モデルの規模、LS-DYNAの並列化の現状、利用されているハードウェアについて述べる。

● 解析モデルの規模

国産メーカーは、トヨタ自動車の“GOA”、日産自動車の「ゾーンボディ」など、各社独自の安全基準に基づき、衝突安全性を確保できる車両構造の改良を行っている。交通安全白書の統計情報^②からもシートベルトやエアバッグの安全装置とともに衝突

安全車体構造の効果で、死亡者数の減少が顕著に読み取れる。今後は、負傷した人の傷害レベルを下げようとする研究が行われていくと考えられる。

車両構造の衝突安全性を高めるために計算機シミュレーションにおいて、解析モデルに含める部品点数を増やしたり形状を正しく表現したりするようにしている。そのため、解析モデルの要素数は1980年代後半には1万要素であったのが、1990年代半ばには10万要素^③ 近年では100万要素へと年々大きく増加してきた。このような解析モデルの要素数の増加は、ソフトウェアの改良と計算機の処理能力の向上により可能となった。

● LS-DYNAの並列化

このような解析モデルの要素数の増加に伴い、LS-DYNAは並列処理を導入することにより処理の高速化をしてきた。逐次処理の延長として、ベクトル処理が最初に導入された。単一CPUのベクトル処理では処理能力の向上に限界があったため、並列処理プログラムとして最初に登場したSMP版では複数CPUがメモリを共有する計算機でプログラムの繰返し処理をする部分 (FORTRAN言語のDOループ部分) を並列化した。しかし、この方法では、複数のCPUが共有メモリに同時にアクセスするために、並列度が上がるとメモリからCPUへのデータ供給が間に合わなくなる。そのために、10並列以上では性能の向上は望めない。この問題を解決するために登場したMPP版では、各CPUが専用のメモリを持ち、かつ、CPU間をネットワークで結合した計算機を使用する。計算処理を開始する前に、計算する領域を分割する (以下、領域分割) ことにより、分割されたそれぞれの領域を各CPUが専用のメモリを使用することにより10並列を超えても高い並列性能が得られている。富士通では、スカラ計算機を使ったクラスタ型計算機を拡販するために、LSTC社と協力しMPP版の実用化を進めてきた。1990年中ごろには8万要素の解析モデルをベクトル型スーパーコンピュータで解析し30～40時間、1990年後半には18万要素の解析モデルをSMP型の計算機で80時間程度要していたが、現状は、MPP版の16並列から32並列実行により100万要素の解析モデルを20～40時間で解析が可能となっている^③

● ハードウェア

LS-DYNAにおける衝突解析向けの主要なプラッ

トフォームは、ベクトル機、共有メモリ型スカラ機からPCクラスタへと変わってきている。PCクラスタ（PRIMERGY RX200 S2やRX200 S3など）では、計算機（ノード）間はInfiniBandを使った高速インタコネクタ接続が使用されている。

ある車体の解析モデルでは、RX200 S3（IntelチップのDual Core CPU搭載機をInfiniBand接続）の32並列実行は、ベクトル機VPP5000のベクトル処理実行に対し約200倍のコストパフォーマンスの向上が見られた。今後は、単一CPUの性能向上は鈍化し、CPU内に複数のコアを持つマルチコアCPUの開発が主流になっていくと考えられる。複数コアを効率よく使用できるようになれば、今後は更なるコストパフォーマンス向上が見込める。現状、自動車の衝突解析では1ジョブあたり16並列から32並列が実用的に使用されているが、近い将来、民間企業においても1000コアを超す大規模なPCクラスタシステムが導入され、1ジョブあたり100並列を超える大規模な解析が実用化されるものと考えられる。

大規模解析モデル作成時間の短縮とその影響

開発期間短縮のためには、計算機による解析実行時間の短縮と同時にCAE（Computer Aided Engineering）用の解析モデルの作成時間短縮を考える必要がある。解析モデルの作成は、設計者が手作業で解析モデルに含める部品の形状を正しく表現する必要があり、精度向上のために部品点数が多いと、数箇月の期間を要することになる。近年、解析モデルを作成するソフトウェアの研究が進み、CAE用プレ機能のソフトウェア開発会社であるAltair社⁽⁴⁾やeta社⁽⁵⁾などのBatchmesh⁽⁶⁾機能を利用することで、自動的に解析モデルの作成が可能になりつつある。しかし、解析精度の良い実用レベル解析モデルを手作業によらず自動作成する場合は、以下に説明するように、現在自動車会社が利用している手作業による解析モデルの10倍以上の要素数が必要となる。

P. A. du Boisらの研究⁽⁷⁾では、Batchmeshで作成した解析モデルと手作業で作成した解析モデルの精度比較を行っている。解析モデルは、主に四角形要素により作成されている。10 mm×10 mm、5 mm×5 mm、2 mm×2 mmの四角形要素を使用

した三つの解析モデルを作成して精度比較をした。10 mm×10 mmで作成した四角形要素の場合は、手作業で作成した解析モデルの方が精度が良く、顕著な精度差が見られた。5 mm×5 mmでは精度差は小さくなったが、Batchmeshで作成した解析モデルは実用レベルではない。2 mm×2 mmでは同等の精度が得られている。これは、Batchmeshを使って2 mm×2 mmの四角形要素で解析モデルを作成すれば、手作業で作成した解析モデルと同等の解析精度が実現できることを意味する。

現在使用されている100万要素の解析モデルでは6 mm×6 mmの四角形要素を手作業で作成している。Batchmeshを使用して2 mm×2 mmの四角形要素で作成した場合には要素数は約1000万要素となる。計算量は、要素数と Δt （計算タイムステップ）で決まるために、以下に説明するように、要素数が100万要素から1000万要素に増加すると計算量は27倍増加する。要素数は、四角形なので辺の長さの二乗で計算でき、要素数増加＝ $(6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}) / (2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}) = 9$ 倍増加する。陽解法の解の安定性を決めるクーラン条件⁽⁸⁾により、 Δt の大きさは要素長に反比例する。 $(\Delta t \text{ 減少} = 2 \text{ mm} / 6 \text{ mm} = 1/3)$ 同一時間を計算するためには、四角形要素の辺の長さが6 mmから2 mmになると Δt の繰り返し回数が3倍増加する。この結果、計算量増加は、つぎのようになる。

$$\text{計算量増加} = \text{要素数増加} \times (1/\Delta t \text{ 減少}) = 27$$

現状、PRIMEPOWER HPC2500の32並列で100万要素の計算に20～40時間を要しており、1000万要素では500～1000時間が必要となる。解析モデルの作成時間が短縮できたとしても、解析に長時間かかるのでは実用的ではない。そこで、並列数を上げて27倍高速化が必要となる。ここで、PCクラスタのコストパフォーマンスが向上しているために、メッシュ作成の人件費より計算コストの方が安価になる可能性があることに注意が必要である。

大規模解析モデルの解析時間の評価

現状では、1000万要素の解析モデルを解析した実績はなく、評価データは存在しない。そこで、Caravanの30万要素の公開データ^{(9),(10)}をもとに500

万要素と500万要素の車体が衝突する1000万要素の評価データを作成した。

1000万要素の解析モデルを高並列実行した場合の課題を調べるために、名古屋大学情報連携基盤センター様と共同研究を行った⁽¹⁾

計測環境

(名古屋大学情報連携基盤センター様設置)

ハードウェア：PRIMEPOWER HPC2500

CPU：SPARC64V 2.08 GHz

OS：Solaris9

アプリケーション：LS-DYNA MPP970R6763

入力データ：Caravan1000万要素

(接触定義：SOFT=1)

衝突解析の物理時間120 msを実行するには、Elapsed時間が長すぎる、また、LS-DYNAは時間に関しては同じ計算を繰り返し行っている、物理解析時刻10 msの計測を行い、最終解析時刻120 msの予測をした。その結果、計算時間は64並列で192時間、256並列で70時間、512並列で91時間となり、並列度を256から512並列に上げて、逆に性能低下することが判明した。

1000万要素の解析モデルの並列処理効率のグラフを図-1に示す。横軸は並列数、縦軸は16並列を1とした場合の並列処理効率を示す。LS-DYNAの計算は、要素計算、接触計算、そのほかに分類できる。点線で示すように、要素計算は並列数の増加に伴い性能は向上するが、接触計算は、96並列以上で並列性能が低下している。この結果、Total処理時間は、256並列で理想値16倍に対し10.7倍だが、512

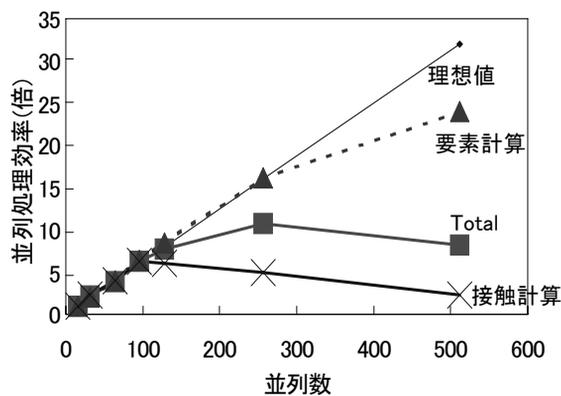


図-1 1000万要素モデルの並列処理効率 (性能改善前)
Fig.1-Parallel-processing efficiency for a 10-million-element model (before performance improvements).

並列で理想値32倍に対し9.2倍と低い効率となっている。このように96並列を超えるような高並列では、接触計算の高速化が重要であることが分かった。

大規模解析モデルのシミュレーション高速化

本章では、大規模解析モデルのシミュレーション高速化について述べる。並列計算の性能に大きく影響を与える要因としては、図-1で述べた接触計算とロードバランスと通信オーバーヘッドがある。以下、これらの性能改善策について説明する。

● 性能改善策

(1) 接触定義方法の最適化

図-1に示したように接触計算処理において並列数の増加とともに接触計算の効率が低下するので、阻害要因を調査した。LS-DYNAにはSOFT=1とSOFT=2と呼ばれる異なる二つの接触処理法がある。SOFT=1は、二つの部品が接触時に、片方を点、他方を面と見なし接触判定を行う。接触判定終了後に点と面を反転させ、再度接触判定処理を行う。SOFT=2は、二つの部品を面と面であると見て接触判定処理を行う。SOFT=1とSOFT=2の並列処理効率の違いを図-2に示す。横軸は並列数、縦軸は16並列を1としたときの並列処理効率である。128並列までは、両者に効率差は見られないが、256並列、512並列では、効率差が大きくなる。SOFT=1は、点と面の接触判定を2度行い、並列度が増えるに従い、同時に小さなメッセージを多数に転送して、それが性能阻害要因になっている。高並列処理では、SOFT=2が効果的であることが分かった。

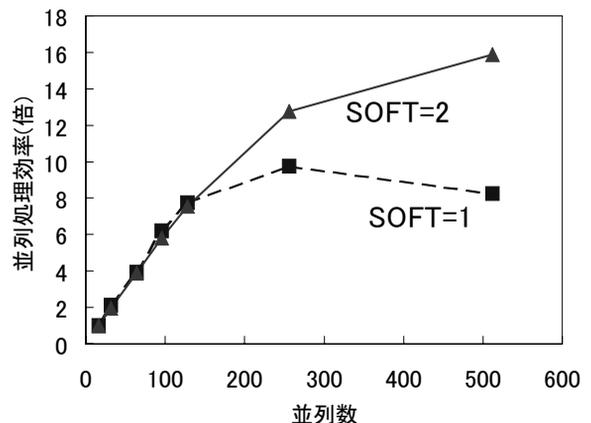


図-2 接触定義の違いによる並列性能効率
Fig.2-Parallel-processing efficiency for two types of contact definitions.

(2) ロードバランスの改善

各CPUで処理する計算量を均等にする事で、各CPU間の処理待ちの時間を少なくできる。LS-DYNAの領域分割は、各CPUで処理する要素数を均等となるように分割しており、接触の計算量を考慮していない。このため、あるCPUに接触計算が集中すると、そのCPUの負荷が増加しロードバランスが悪くなる。そこで、接触計算の負荷を均一にするためには、利用者による設定が必要となる。

デフォルト分割と車の進行方向に領域分割した結果を図-3に示す。様々な領域分割によるテストをした結果、32並列程度までの低並列では、車の進行方向に領域分割する方が効率的であることが分かった。なぜならば、正面衝突の場合には、複雑な部品のあるエンジンルーム内の接触計算の量が均一に分布するためである。そこで、ここでは高並列計算の場合にも、車の進行方向に領域分割することとした。

(3) 通信処理性能の改善

接触計算は、隣り合った境界部分の領域との接触を扱うため、ノード間でデータ転送が必要となる。そこで、高並列時の通信処理の特徴を調べるために、富士通と富士通研究所が作成した通信分析ツールで通信特性を分析した。その結果、LS-DYNAの通信には以下の特性があることが分かった。

- ・集合通信関数MPI_all_to_all()を呼出す回数が多い。MPI_all_to_all()は、1回の命令で $N_{CPU} \times N_{CPU}$ の通信を行うため通信処理コストが大きい。
- ・MPI_Send()/MPI_Recv()などの1対1通信の関数では、1Mバイトを超える大きな通信もあったが、MPI_all_to_all()は1Kバイト未満の通信が、ほぼ100%を占めている。

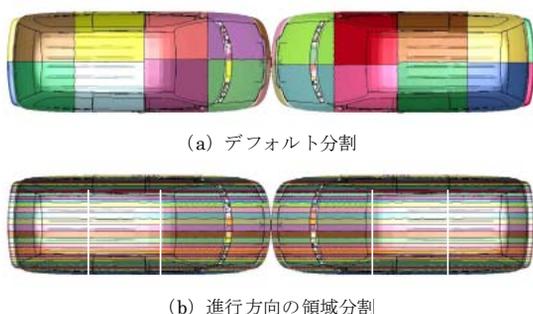


図-3 32並列用の領域分割の比較⁽¹²⁾
Fig.3-Comparison of methods of domain decomposition on 32 processors.

- ・接触計算時は、MPI_all_to_all()の処理で待ちが多い。

富士通MPIライブラリのMPI_all_to_all()を改良して、通信データをまとめて転送するバッファリングを行った。このバッファリングにより、転送回数の削減と1Kバイト未満のデータをまとめて送ることにより通信オーバーヘッドを削減し通信効率の改善を行った。

● 性能改善後の結果

図-4は、1000万要素の解析モデルの並列処理効率のグラフで、横軸は並列数、縦軸は16並列を1とした場合の並列処理効率を示す。接触計算は性能改善前(図-1)で256並列で5倍、512並列で2.5倍程度であったが、性能改善後は、それぞれ10倍強に改善されている。図-5は、性能改善後の物理解析

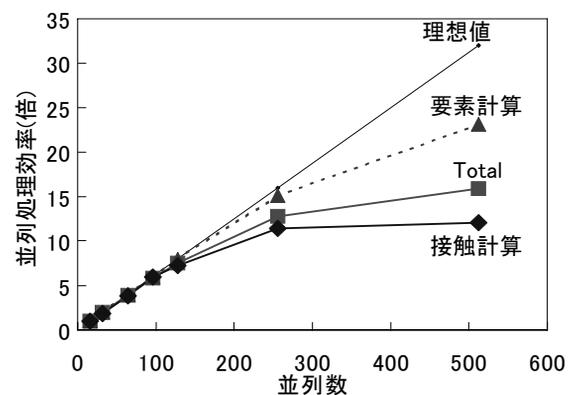


図-4 1000万要素モデルの並列処理効率 (性能改善後)
Fig.4-Parallel-processing efficiency for a 10-million-element model (after performance improvements).

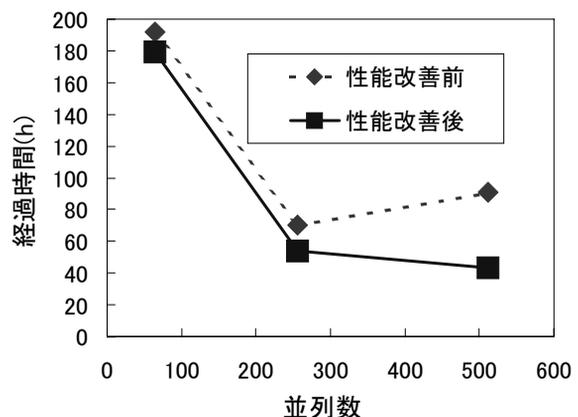


図-5 1000万要素モデル (120 ms) 経過時間予測値
Fig.5-Estimation of elapsed time for a 10-million-element model (120 ms) before and after making performance improvements.

時刻10 msの計測結果をもとに最終解析時刻120 msの予測をした結果である。512並列の場合、解析時間91時間が43時間に短縮され、実用的な時間で解析が実現できるようになった。

今後の検討課題

高並列時の更なるスケーラビリティ向上のため、開発元のLSTC社と以下の取組みを進めており、次期バージョン以降で実現させたい。

(1) フォーストランスデューサ機能

実用の解析モデルでは、多数の接触定義をしているためにロードバランスが悪くなりやすい。それを避けるために接触定義を少なくして必要な接触力を計測する機能。

(2) 接触計算の通信コストを考慮した高並列向け領域分割。

(3) データをまとめて転送することにより InfiniBandの転送性能を有効にできるような最適化。

む す び

本稿では大規模解析モデルを高並列解析するための技術を中心に紹介した。100並列を超える高並列では、SOFT=1, 2の接触処理法の違いやMPI通信処理性能の改善から分かるように、接触計算の通信処理の性能が最も重要であり、1000万要素の解析は、とくに通信の性能改善を行うことで実用的な時間で解析できるめどがついた。

本研究で得られた通信関連の知見を中心にハードウェア、ベーシックソフトウェアの開発にもフィードバックし、将来の大規模計算における高速化を実現していきたい。

実測に当たっては、名古屋大学情報連携基盤センター様には、多大なご支援をいただいたことに対して、深く感謝します。

参考文献

- (1) 非線形動的構造解析ソフトウェアLS-DYNA.
<http://www.LSTC.com>
- (2) 内閣府政策統括官：交通安全白書.
http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h16kou_haku/genkyou/01010101.html
- (3) P. A. Du Bois : Crashworthiness Engineering Course Notes. Livermore Technology Corporation, I.5, January 2004.
- (4) Altair社.
<http://www.altair.com/Default.aspx>
- (5) eta社.
<http://www.eta.com/>
- (6) Dr. J. Seybold et al. : Batchmeshing and CAE Data Management as Key Technologies for Six Sigma Compliant CAE Processes for LS-DYNA Simulations. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm2006.
<http://www.dynamore.de/download/af06/papers/L-I-3.pdf>
- (7) P. A. Du Bois et al. : A Study of Mesh Sensivity for Crash Simulations and Batchmeshed Models. 4th DYNAmore LS-DYNA conference Bamberg 2005I-I-30, October 2005.
- (8) クーラン条件.
http://www.dynamore.de/download/lstc/nov_2001.pdf
- (9) CARAVAN公開データ.
<http://www.topcrunch.org>
- (10) National Crash Analysis Center.
<http://www.ncac.gwu.edu/>
- (11) M. Makino : The Performance of Large Car Model by MPP Version of LS-DYNA on Fujitsu PRIMEPOWER. 9th International LS-DYNA Users Conference 2006I6-4, June 2006.
- (12) National Crash Analysis Center : Benchmark Models.
<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>