

# 非線形動的構造解析ソフトウェア LS-DYNAの高速化への取り組み

## Fujitsu's Activities in Improving Performance of LS-DYNA Nonlinear Finite Element Analysis Software

● 金堂剣史郎

### あらまし

LS-DYNAは世界の多くの自動車会社で利用されている非線形動的構造解析ソフトウェアである。LS-DYNAでは解析モデルの詳細化に伴い計算時間が増大してきており、高速化が強く望まれている。富士通はLS-DYNAを開発している米国Livermore Software Technology Corporation(LSTC社)のパートナーとして、ハイパフォーマンスコンピューティング向けにLS-DYNAの並列版に関して開発支援を行っている。富士通が販売している並列版LS-DYNAはOpenMPによるSMP版、MPIによるMPP版、SMP版とMPP版の組合せによるHybrid版の3種類があり、現在はスーパーコンピュータ「京」向けに大規模並列に適したHybrid版の高速化を実施している。

本稿では、Hybrid版LS-DYNAの大規模並列性能を紹介し、さらにハードウェアバリアの使用や計算負荷の可視化を利用したロードバランスの改善による高速化の方法と効果を紹介する。

### Abstract

The LS-DYNA nonlinear finite element analysis software package developed for structural analysis by the Livermore Software Technology Corporation (LSTC) is widely used by the automobile, aerospace, construction, military, manufacturing, and bioengineering industries. Fujitsu has been a partner with LSTC since 1996, supporting customers in Japan. A common application of LS-DYNA is car crash simulation. One way to improve the accuracy of the simulation results is to increase the number of elements in the analytical model. However, this increases the amount of computation, resulting in longer computation times, which goes against user expectations of quicker job turnaround when using high-performance computing systems. We report Fujitsu's activities in supporting higher speeds in a hybrid version of LS-DYNA applicable to large-scale parallel processing on the K computer and in improving the performance of the LS-DYNA package for car crash simulation.

## ま え が き

LS-DYNA<sup>(1)</sup> は 米 国 のLivermore Software Technology Corporation (LSTC社) が開発・販売している非線形動的構造解析ソフトウェアである。構造物の大変形挙動を時系列に解析できることが大きな特徴である。主要な利用分野に自動車の衝突解析があり、世界中の自動車会社で広く利用されている。自動車会社は製品の安全性を評価するために、自動車が物体に衝突した際の自動車の変形具合や乗客のダメージなどをLS-DYNAを使って解析している。

富士通は1996年以来、LS-DYNAの販売代理店として国内での販売・サポートを行っており、また、LSTC社のパートナーとしてハイパフォーマンスコンピューティング向けにLS-DYNAの並列版に関して開発支援を行っている。富士通が販売している並列版は次の3種類である。

- (1) SMP版：共有メモリ型並列計算機用（OpenMPによるスレッド並列手法）
- (2) MPP版：分散メモリ型並列計算機用（MPIによるプロセス並列手法）
- (3) Hybrid版：SMP版とMPP版の組合せ

今後ますます増大する計算規模に対応するために、現在は大規模並列に適したHybrid版の更なる高速化に向けて技術支援を行っている。

本稿では、自動車衝突解析を対象として、Hybrid版を中心にLS-DYNAの高速化に関する富士通の取り組みを紹介する。

## 自動車衝突解析の現状と課題

新型車を製品化するためには、数多くの衝突安全に関する規制をクリアする必要がある。高価な試作車を使った衝突実験を多数繰り返すのは、多額の開発費を要するだけでなく、試作車の製作・改良や実験に時間を要するため、非効率である。そこで、自動車会社は、計算機を用いた自動車衝突解析を活用することで試作車の削減や開発期間の短縮を図っている。自動車衝突解析の解析精度が高まるほど試作車による実験回数や開発期間を減らすことができるため、自動車会社にとって解析精度の向上は非常に重要である。解析精度を高める主な方法はLS-DYNAの改良や解析モデルの詳細化などがあるが、本稿では解析モデルの詳細化のみ取り上げる。以下に、詳細化の例を示す。

細化などがあるが、本稿では解析モデルの詳細化のみ取り上げる。以下に、詳細化の例を示す。

### (1) 障壁（バリア）モデルの詳細化

自動車の衝突実験に利用されるアルミハニカム材で作られた障壁のモデル化を直方体的なソリッド要素から、長方形的なシェル要素に変更する事例がトヨタテクニカルディベロップメント（株）の小島らにより報告されている。<sup>(2)</sup> この報告によると、アルミハニカム材の巨視的な特性を模擬するソリッド要素によるモデル化では、変形しても歪エネルギーが生じないアワーグラスモードという非適切な変形が生じ、これが実験値と解析値との差異を引き起こすと推測されている。シェル要素で詳細にモデル化すると、計算時間は約1.4倍長くなるが、アワーグラスモードを大幅に低減でき、実験値により近い解析結果が得られることが報告されている。

また、LSTC社が提供している障壁モデルでも、シェル要素モデルはソリッド要素モデルに比べて詳細にモデル化されている。ただし、要素数は約3倍増えている。<sup>(3)</sup>

すなわち、ソリッド要素からシェル要素への変更は、モデルの詳細化によって解析精度は高まるが、要素数の増加およびそれに伴う計算量の増大につながる。

### (2) 人体モデルの詳細化

トヨタ自動車（株）が開発を進めている人体モデル「THUMS」のVersion 4<sup>(4)</sup>では、従来モデル化していなかった人体の内臓まで詳細にモデル化している。これにより、自動車の衝突による人体内部のダメージも評価可能となっている。モデルの情報量は、従来の約14倍になっている。結果として計算量も増加する。

上記の二つの事例から分かるように、一般に、解析精度を高めようとするとき計算量が増加する。詳細な理論は割愛するが、LS-DYNAのような陽解法プログラムの場合、要素数と $\Delta t$ （時間ステップ幅）で計算量が決まり、自動車モデルの要素数が100万から1000万に増加する場合は、計算量は約27倍増加する。<sup>(5)</sup> このような計算量の増加に対応するために、LSTC社と富士通は協力して並列計算による計算の高速化に取り組んでいる。

1990年代後半から2000年前半にかけては4～16

並列程度を実行するSMP版が主流であった。以後、数10～100並列程度を実行するMPP版が主流となっている。しかし、今後もモデルの詳細化が進み、計算量が増加するに伴い更なる並列数の増加が必要と考えられることから、並列数の増加がプロセス間の通信のオーバーヘッドに直結するMPP版だけでは、現実的な時間で解析することが困難になると思われる。このため、SMP版とMPP版を組み合わせたHybrid版を開発し、今後の更なる高速化の要求について対応を進めている。

以上のような理由から富士通は、現在Hybrid版の高速化に取り組んでいるが、Hybrid版以外の高速化についても検討を行っている。次章でこれらの取り組みについて具体的に説明する。

### LS-DYNAの高速化の取り組み

LS-DYNAの高速化に関する富士通の主な取り組みであるHybrid版の高速化、ハードウェアバリエーションによるHybrid版の更なる高速化、可視化を利用した

計算のロードバランスの改善について説明する。

### ● Hybrid版の高速化

Hybrid版は、MPP版に対し通信量と通信回数を大幅に削減できる。Web公開されている200万要素の自動車衝突モデル<sup>(6)</sup>を使用したときのHybrid版とMPP版の通信量と通信回数を調査した。Hybrid版は1プロセスあたり4スレッドが動作する設定で検証を行った。すなわち、Hybrid版256並列の場合は、64プロセス×4スレッド並列となる。一方、MPP版256並列の場合は、256プロセスが動作する。

図-1はHybrid版とMPP版の全プロセスの通信量を比較したグラフである。256並列実行の場合、Hybrid版はMPP版の約1/3、1024並列実行では約1/2になっている。図-2はHybrid版とMPP版の全プロセスの通信回数を比較したグラフである。256並列実行と1024並列実行ともにHybrid版の通信回数はMPP版の1/5以下に減少している。<sup>(7)</sup>

次に、Hybrid版とMPP版の計算性能について説明する。

図-3は、Hybrid版とMPP版の経過時間（計算時間＋通信時間）である。200万要素の自動車衝突モデルで物理時間120 msの現象の計算を行った。計測環境は次のとおりである。

- ・場所：名古屋大学情報基盤センター<sup>(8)</sup>
- ・ハードウェア：Fujitsu HX600
- ・OS：Red Hat Enterprise Linux4
- ・インターコネクト：InfiniBand DDR（2 Gバイト/秒）×4
- ・プロセッサ：Opteron 8380（2.5 GHz）Quadcore
- ・ノード数（コア数）：160ノード（2560コア）

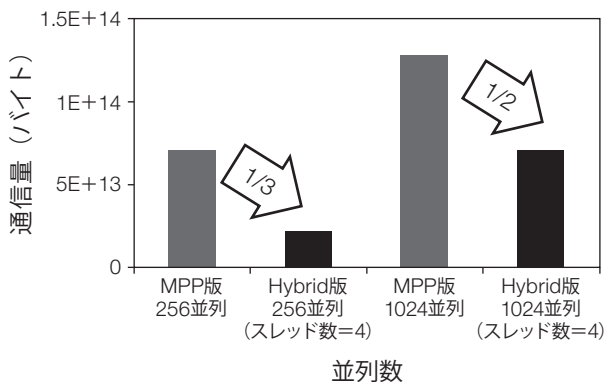


図-1 200万要素モデルの通信量

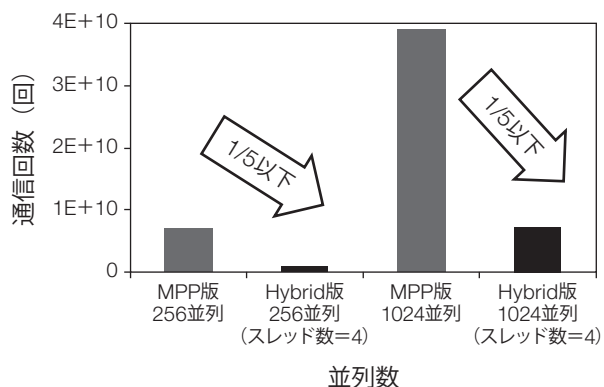


図-2 200万要素モデルの通信回数

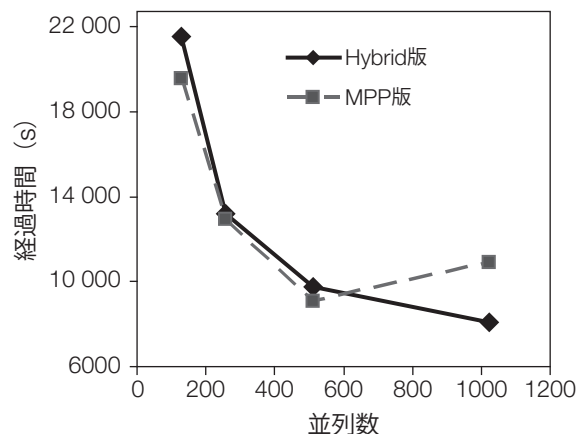


図-3 Hybrid版とMPP版の性能値

128並列の比較では、MPP版の方が速く、256並列と512並列でも若干MPP版が高速であるが、1024並列ではHybrid版が有利となる。Hybrid版は128～512並列でMPP版より性能が低いが、1024並列を超える高並列実行で効果が確認できた。

富士通は、LS-DYNA Hybrid版の1000並列を超える大規模並列での高速化に向けて、LSTC社と共同で改善に取り組んでいる。現在、富士通のソフトウェア製品Parallelnavi<sup>(9)</sup>を使い性能分析用の情報を採取し、プロセス並列とスレッド並列の両方の観点から改善を進めている。

プロセス並列に関しては、スケーラビリティの妥当性の評価、通信サイズやMPI通信パターンの分析、大規模並列に適した領域分割処理（計算領域をプロセス並列数に対応して分割する処理）の検討などを行っている。

スレッド並列に関しては、LS-DYNAでコストが高い要素計算フェーズ、接触計算フェーズ、剛体計算フェーズに分類して、コストの高いサブルーチンに計測用タイマを埋め込み、計測値の妥当性を評価し、改善余地があれば改善の検討を行っている。

#### ● ハードウェアバリアによるHybrid版の更なる高速化

富士通のハイエンドテクニカルコンピューティングサーバFX1のCPU「SPARC64 VII」やスーパーコンピュータ「京」<sup>(注)</sup>のCPU「SPARC64 VIIIfx」は、CPU内のコア間のスレッド同期を高速に行うハードウェアバリア機能を備えている。富士通のコンパイラ技術と組み合わせることで、Hybrid並列のコア間のスレッド並列処理のオーバーヘッドを低減する仕組み「VISIMPACT (Virtual Single Processor by Integrated Multi-core Parallel Architecture)」<sup>(11)</sup>が利用できる。ハードウェアバリア機構は、コア数に依存せず一定の時間でスレッド間の同期を高速に処理することができるので、ソフトウェアでメモリデータのロック処理を利用した同期処理と比較しスレッド間の同期処理が約10倍高速になる。

図-4は、名古屋大学情報基盤センターとのLS-DYNAによる大規模並列実行の高速化に向けた共

同研究の結果である。大規模な並列数で性能比較をするために、1000万要素という実用的なモデルを用い性能評価を行った。衝突による変形が進んだ物理時間120 msぐらいまで計算して性能比較を行うのが理想的であるが、測定パターン数が多いこと、それぞれの測定時間が長いことなどの理由により物理時間10 msまでの計算で性能を比較した。計測環境は次のとおりである。

- ・場所：名古屋大学情報基盤センター
- ・ハードウェア：Fujitsu FX1<sup>(12)</sup>
- ・OS：Open Solaris
- ・インターコネクト：InfiniBand DDR (2 Gバイト/秒) ×1
- ・プロセッサ：SPARC64 VII (2.5 GHz) Quadcore
- ・ノード数 (コア数)：768ノード (3072コア)

MPP版とHybrid並列版 (VISIMPACT不使用) とHybrid版 (VISIMPACT使用) の性能比較を行った。MPP版に関しては、図-3と同じ傾向であり、並列数が増えていくと性能が頭打ちとなり、1024並列以上の高並列では性能が低下している。Hybrid並列版でVISIMPACT使用の有無の比較では、512並列では同程度の性能だが、1024並列で約2割、1536並列で約3割、2048並列では約4割の効果が確認できた。グラフの傾きから考えて、更に並列数を増やしてもVISIMPACT使用による性能向上が期待できる。

今回は、FX1でVISIMPACTの効果を検証した。FX1は4コア/CPUであり、1プロセスあたりのスレッド並列数を4としたが、現在LS-DYNA Hybrid版の移植、検証作業を進めているスーパーコン

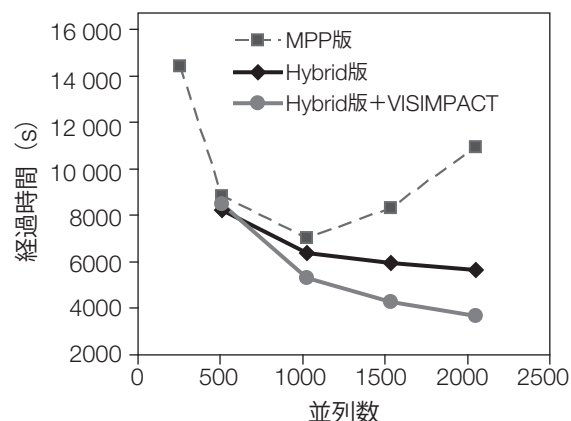


図-4 1000万要素モデル(10 ms)経過時間

(注) 理化学研究所が2010年7月に決定したスーパーコンピュータの愛称。<sup>(10)</sup>

ピュータ「京」は、8コア/CPUであるため、1プロセスあたりのスレッド並列数を8として動作させることができる。より少ないプロセス数で並列計算が可能なので、VISIMPACT使用による性能向上が期待できる。

### ● 計算のロードバランスの改善

ロードバランスは性能向上に関する重要な要因の一つである。

LS-DYNAのプロセス並列手法は、前処理（領域分割処理）として、全計算領域をプロセス並列数で分割する。例えば、2台の車体が衝突する自動車衝突解析を32プロセス並列で計算する実行は、全計算領域（2台の車体）を32の領域に分割して、各プロセスが異なる一つの領域を計算する。各プロセスのロードバランスを均等にすることで、プロセス間の計算処理の待ち時間を短縮でき高速化が図れる。

各プロセスのロードバランスは、Parallelnaviの可視化の機能を利用して確認することができる。ここでは本機能を用いて200万要素の大規模自動車衝突モデルを32プロセスで実行する場合の高速化の事例を説明する。

LS-DYNAの前処理である領域分割では、各プロセスが処理する要素数が均等になるよう分割を行うが、前処理の段階では、物体の変形を予測することができないため、接触計算に関する考慮ができない。このため、あるプロセスに接触計算が集中すると、そのプロセスの計算負荷が高くなりロードバランスが悪化する。接触計算の負荷を均等にするためには、利用者が解析モデル作成時に工夫を行う必要がある。

Parallelnaviによる60 ms時点の接触計算のロードバランスを可視化した結果を図-5 (a) に示す。なお、図中の経過時間はツールの起動からの経過

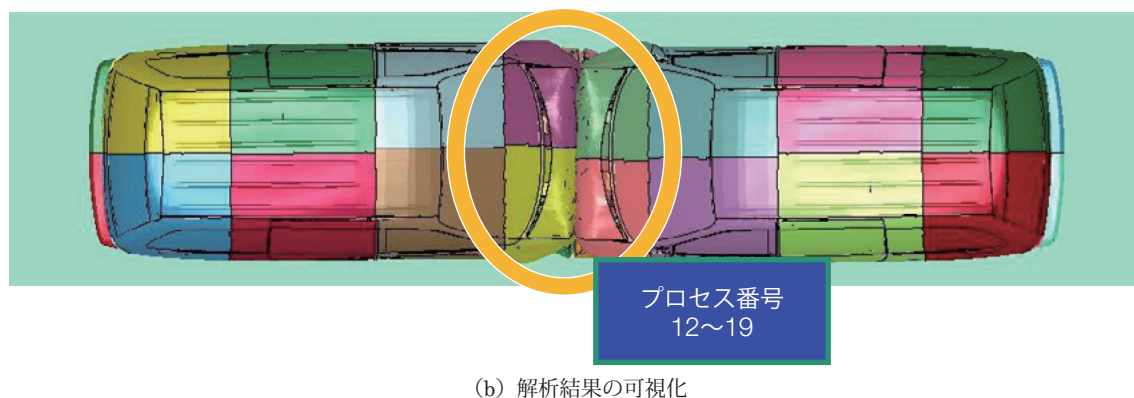
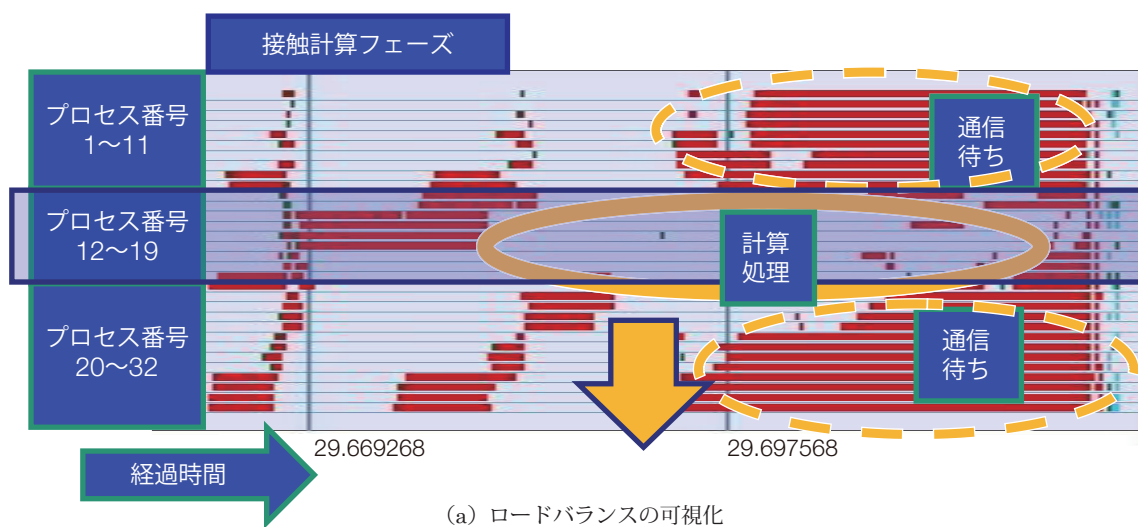


図-5 自動車衝突モデル(60 ms)の可視化

時間であり、シミュレーションの物理時間と異なる。縦軸がプロセス番号、横軸が経過時間を示す。横一列が各プロセスの計算処理、通信処理、通信待ち状態を示す。また、この例では、通信処理の割合は小さく、図の通信待ちは通信待ちと通信処理を含む。プロセス番号12～19の丸で囲った部分が計算処理である。ほぼ同じ時間帯でのプロセス番号1～11と20～32は、通信待ちが多い。このことから、プロセス12～19の負荷が高く、プロセス番号1～11と20～32の負荷が低くなっており、ロードバランスが悪いことが一目で分かる。

図-5 (b) は、図-5 (a) と同じ物理時間の自動車の衝突の様子をLS-DYNAのポストプロセッサで表示したものである。各プロセスは、車が上下左右に区切られている四角形の各領域の処理を行う。丸で囲った部分が、負荷が高かったプロセス番号12～19の処理に該当する。この箇所は、衝突による変形が進んでおり、要素の変形や接触判定の計算負荷が高い。図-5 (a) と図-5 (b) を組み合わせて利用することで、負荷が高いプロセスを探し出すことができる。

ロードインバランスの改善には、モデルの分割領域を工夫することが有効である。高速化のために、プロセス番号12～19の計算負荷を分散させるために、車の進行方向に分割し、複雑な部品が集

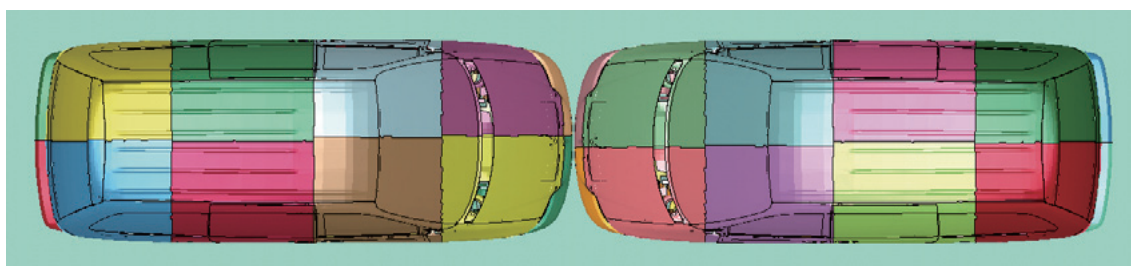
まっているエンジンルーム内の接触計算の量が均等になるように分割を行った。デフォルトの領域分割と車の進行方向の領域分割の結果を図-6の(a)と(b)に示す。(b)の分割は、進行方向に32分割している。各プロセスは、細長い長方形の一領域内の処理を行う。計算速度に関しては、車の進行方向の領域分割は、デフォルト分割より接触計算フェーズで約1.2倍、経過時間比で約1.1倍高速化された。

複数の新車の開発で自動車衝突解析を行うことを考えると1割の改善であっても、その効果は大きい。

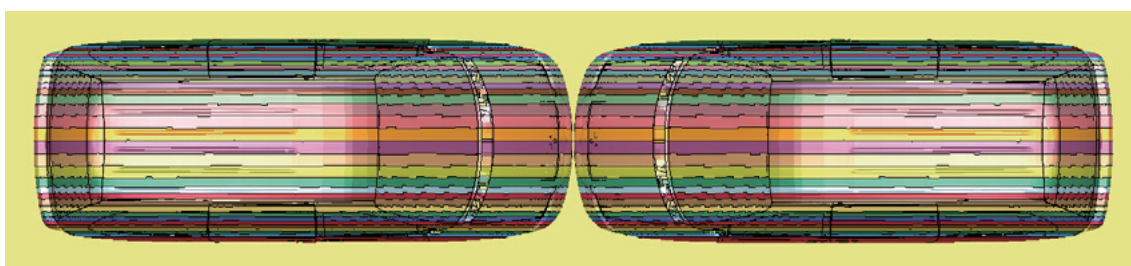
性能改善の効果は、モデルの規模、モデル定義、領域分割のロードバランスの状況、並列数などによって大きく左右される。今回は説明の都合上、小規模なモデルを例としたが、実用モデルにおいても同等あるいはそれを上回る効果が得られている。

#### 今後の課題

上記で示したように現在のところHybrid版は、MPP版に対し常に高速とは言えないが、大規模な計算になるほどその効果が得られる。今後、Hybrid版の利用を広げていくために、以下の課題に取り組んでいく。



(a) デフォルト分割



(b) 進行方向の領域分割

図-6 32並列用の領域分割における接触計算の比較

## (1) 128並列規模での高速化

128並列規模では、MPP版の方が高速であるため、詳細分析により原因を調べ、この規模の並列数でもMPP版に勝るよう改善を行う。

## (2) 1万並列以上の大規模並列の検証

LS-DYNAの自動車衝突解析では、これまでほとんど実績のない1万並列以上の超高並列で短時間で解析できることを目指し、スーパーコンピュータ「京」向けに高速化を実施している。1万並列の超大規模並列では、Hybrid版を用いても通信処理の影響が大きくなるので、ソルバの改善だけではなく、解析モデル作成の観点からも通信量を低減する方策などを検討していく。

## む す び

本稿では、Hybrid版の効果を中心に富士通のLS-DYNAの高速化の取り組みを紹介した。自動車衝突の解析モデルの詳細化が進み、大規模なモデルを用いた解析を高速に処理するにはHybrid版が有効であること、更にほかの高速化の方法としてハードウェアバリアの使用や計算負荷の可視化を利用したロードバランスの改善について紹介した。

FX1機での計測においては、名古屋大学情報基盤センター様に多大なご支援、ご協力を頂きました。深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Livermore Software Technology Corporation : 非線形動的構造解析ソフトウェアLS-DYNA.  
<http://www.lstc.com/>
- (2) 小島茂樹ほか：シェル要素を用いたIIHS側面衝突用MDBモデルの開発. 社団法人 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.16-07, p.7-12 (2007).  
<http://www.toyota-td.jp/tech-info/cae/pdf/29.pdf>
- (3) J. Hallquist : Recent Developments in LS-DYNA. 7<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference.  
<http://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/A-I-01.pdf>
- (4) トヨタ自動車：バーチャル人体モデル“THUMS”を進化.

[http://www2.toyota.co.jp/jp/news/10/05/nt10\\_0509.html](http://www2.toyota.co.jp/jp/news/10/05/nt10_0509.html)

- (5) 金堂剣史郎ほか：LS-DYNAによる自動車の大規模衝突解析. *FUJITSU*, Vol.59, No.5, p.570-575 (2008).  
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol59-5/paper09.pdf>
- (6) Top Crunch : 200万要素の自動車衝突モデル.  
<http://www.topcrunch.org/>
- (7) K. Kondo : The Performance of Car Crash Simulation by LS-DYNA Hybrid Parallel Version on Fujitsu FX1. 11<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference 2010, I8-41-46, June 2006.  
<http://www.dynalook.com/international-conf-2010/Automotive-3-5.pdf>
- (8) 名古屋大学情報基盤センター.  
<http://www2.itc.nagoya-u.ac.jp/>
- (9) 田中 稔ほか：PRIMEPOWER向け並列プログラム開発・運用環境：Parallelnavi. *FUJITSU*, Vol.52, No.1, p.94-99 (2001).  
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol52-1/paper20.pdf>
- (10) 富士通：京コンピュータ.  
<http://jp.fujitsu.com/about/tech/k/whatis/processor/>
- (11) 青木正樹：スーパーコンピュータ向けCPU SPARC64 VIIIfxについて. SS研2009年度科学技術計算分科会 講演資料.  
<http://www.ssken.gr.jp/MAINSITE/download/newsletter/2009/20091125-sci-2/lecture-4/ppt.pdf>
- (12) 富士通：HPC ハイエンドテクニカルコンピューティングサーバFX1.  
<http://jp.fujitsu.com/solutions/hpc/products/fx1.html>

## 著者紹介



## 金堂剣史郎 (こんどう けんしろう)

TCソリューション事業本部計算科学ソリューション統括部 所属  
現在、LS-DYNAの技術サポートに従事。