

スーパーコンピュータによる自動車の衝突解析

Large Scale Car Crashworthiness Calculations by Supercomputer

スーパーコンピュータの性能向上と有限要素法による衝突計算用ソフトウェアの進歩により、自動車の衝突計算が実用段階に入ってきた。今回使用した衝突計算用プログラムDYNA 3 Dは、時間積分に陽解法を採用した非線形動的有限要素法プログラムで、立体要素、シェル要素、ビーム要素を含み、各種の材料特性を扱うことができる。このDYNA 3 Dを用いて自動車の前面衝突や後面衝突、またバンパーの衝突シミュレーションを行い、実験結果と良い対応を示す結果を得た。この衝突計算が自動車の設計開発のための有効な手法となり得ることがわかった。

下 牧 和 則* *Kazunori Shimomaki*

五十嵐 将** *Masaru Igarashi*

1 緒 言

近年、衝突解析がスーパーコンピュータの利用拡大と衝突計算用ソフトウェアの登場によって、各分野で行われるようになってきた^{1)~4)}。その分野の一つとして、自動車の衝突解析が挙げられる。鈴木自動車工業株式会社と日立製作所はこの数年間、自動車の車体構造設計手法の向上の一環として、有限要素法コードDYNA 3 D⁵⁾を用いて自動車の衝突計算を行い、計算手法の基本的な有用性を確認してきた。しかし、衝突実験の代替としての衝突計算の実用性、および、自動車の構造設計に十分にフィードバックするための正確で豊富な情報量を衝突計算から得るという命題に対しては、今後とも衝突解析のソフトウェア、およびハードウェア両面での絶え間ない改良が必要と考えられる。

鈴木自動車工業株式会社と日立製作所はDYNA 3 Dを用いた最初の車体全体の衝突計算を行った後、二つの領域、すなわち(1)衝突計算の精度向上、(2)衝突計算の適用範囲の拡大、に主眼を置いてきた。本稿では、(1)については、プログラムの最近の改良点とそれに適合する計算モデルについて、また(2)については、このプログラムを使用した計算結果例について述べる。

2 ソフトウェアおよび計算モデルの改良

ここで使用した有限要素法コードDYNA 3 Dは、時間積分に陽解法を採用した非線形動的有限要素法プログラムである。要素タイプとしては、4～8節点立体要素、三角形および四角形シェル要素、梁(りょう)要素があり、各種の材料特性を取り扱うことができる。

DYNA 3 Dを用いて行った最初の車体の大規模衝突計算で

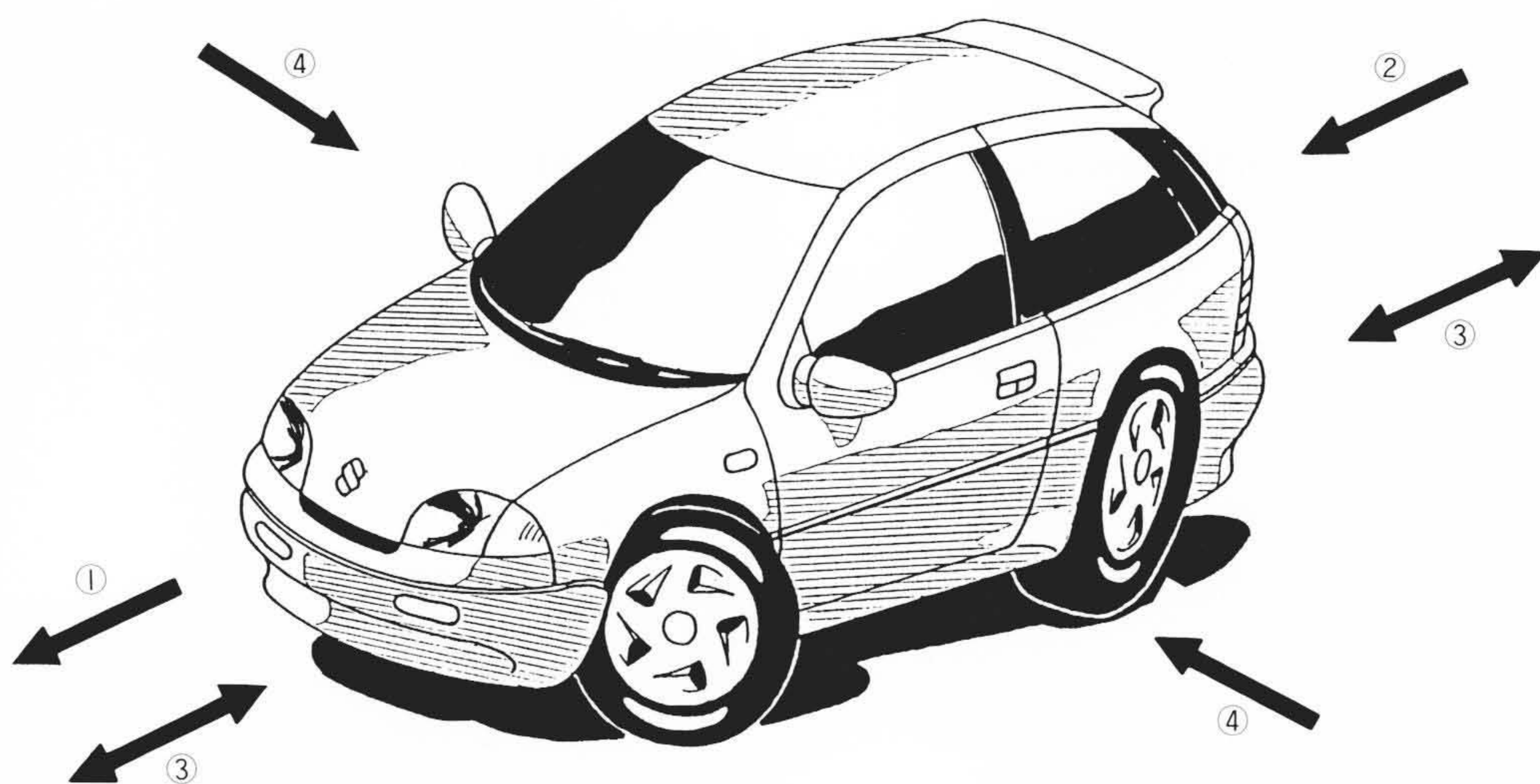
の難点は、主に長時間の計算時間を必要としたこと、およびこの種の衝突計算に適した計算モデルに関して十分な検討がなされていなかった点にあったと考えている。

計算時間に関しては、自動車の車体のような薄板構造物のモデル化に使用されるシェル要素について、計算精度に重きを置いたHughes-Liu要素と、むしろ計算速度に重きを置いたBelytschko-Tsay要素を目的に応じて使い分けできるようになった。実際に、この二つの要素を車体の大規模衝突計算に用いて比較したところ、計算速度比は約1対2.3であった。また、両者での計算精度の差はあまりみられなかった。

また、複雑な構造物になればなるほど、衝突によってその構造が複雑に変形座屈し、構成要素が互いに接触するようになる。自動車の前面衝突のような場合には、各パネルが座屈し互いに接触するようになるだけでなく、エンジンプロックがダッシュパネルに衝突したり、また前輪がフェンダーに衝突するなどの二次衝突の取り扱いなど、接触現象の計算が重要となる。この接触計算の取り扱いの容易さは、DYNA 3 Dの特徴の一つであり、接触する可能性のある部分の各メッシュを接触面として指定するだけでよい。しかし、この接触計算は、かなりの計算時間を必要とし計算が不安定になりやすかった。そこで、計算速度を向上させるために、この部分を全面的にベクトル化し、同時に接触面での計算の安定性を向上させるように改善した。

ハードウェアに関連した面からは、コンピュータ自体の高速化とともに、スーパーコンピュータ(ベクトルプロセッサ)により適合するように、プログラムを修正することも計算時間の短縮に効果がある。

* 鈴木自動車工業株式会社 実験部第4グループ ** 鈴木自動車工業株式会社 実験部第4グループ 工学博士



注：①（前面衝突）、②（後面衝突）、③（バンパー衝突）、④（側面衝突）

図1 自動車の衝突計算が適用可能な項目 衝突計算を適用することが可能と思われる項目を示す。

一方、計算モデルについては、自動車のような複雑な構造物を有限要素でモデル化(メッシュ分割)する場合、衝突計算そのものが経験の少ない分野であるために、どのようなモデルやメッシュ分割が衝突計算に適しているのか、この数年間は模索の時代であったと言えよう。衝突計算に適したモデルとは、計算時間や計算機容量などの制約の中で、計算目的に応じた精度が得られるモデルと定義づけられる。この意味で薄板パネルとスポット溶接で構成される車体部分では、スポット溶接部分やフランジ部分、また作業孔やビード部分の取り扱いについて、また衝突時には主に剛体として作用するエンジンブロックや、その他タイヤなどのサスペンション部品のモデル化には十分注意を払う必要がある。

3 最近の適用例

自動車の衝突計算例としては、自動車の前方にある固定壁へ、ある速度、例えば50 km/hで衝突する、いわゆる前面衝突のシミュレーション、および重さ約1,800 kgの移動壁(追突する車両を想定)が、ある速度で静止している車両の後方から衝突する後面衝突のシミュレーションが挙げられる。自動車の衝突事故の形態は、決して前方への衝突や後方からの追突だけではない。斜め前方および後方、そして側面からの衝突など、あらゆる方向からの衝突が発生する。また、比較的低速度での衝突もあり、この場合には車体前後に取り付けられたバンパーの性能によって、衝突時の車両の損傷具合が左右される。いずれの場合にも乗員を保護する車体構造や設計方法を見いだしていくこと、そしてそのための道具を準備することが衝突計算を行う目的と言える。

自動車の衝突計算が可能と思われる項目を図1に示す。それは、

- (1) 固定壁への前面衝突
- (2) 移動壁の後方からの追突
- (3) 低速度でのバンパー衝突
- (4) 側面からの衝突

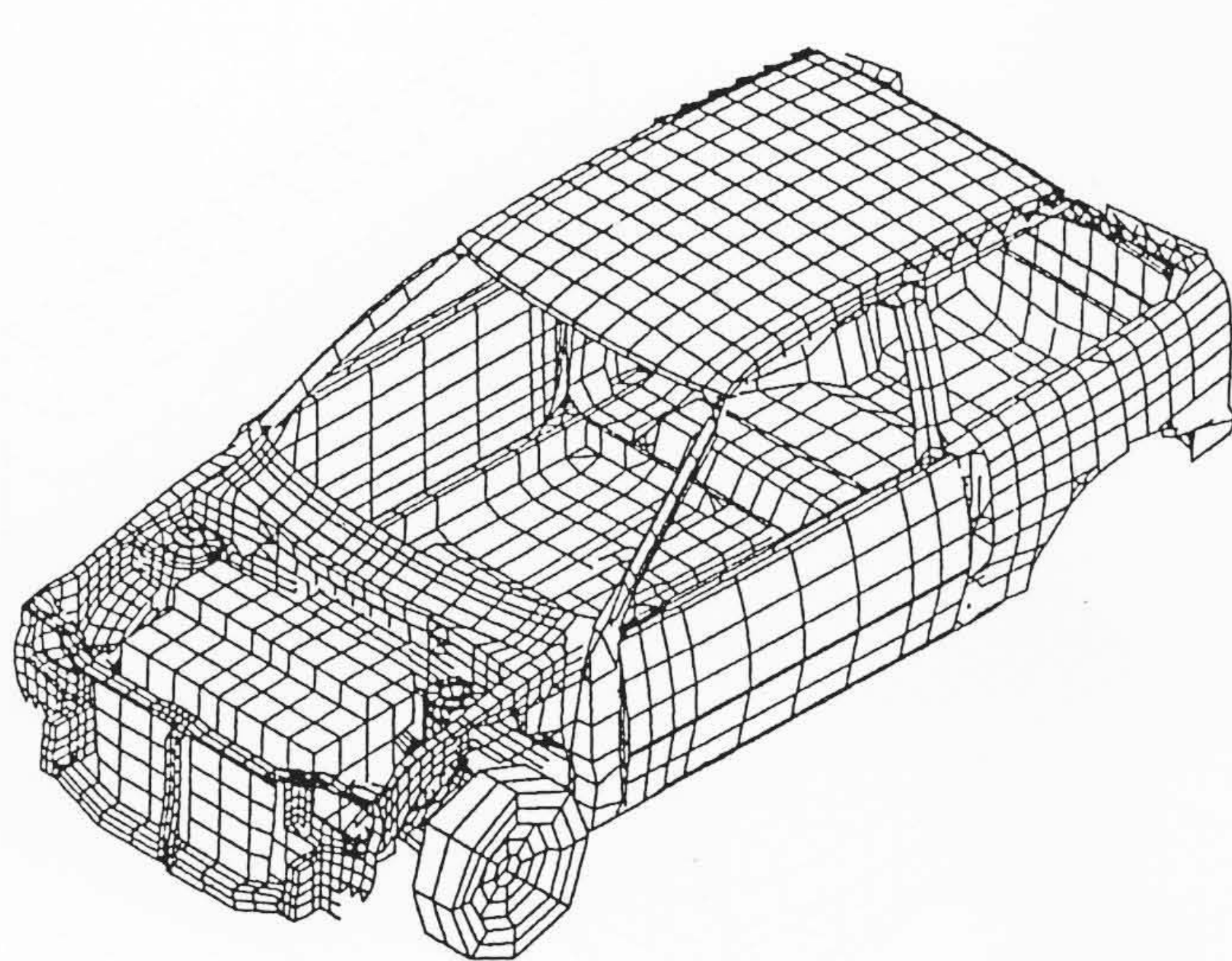
などであり、以下に個々の具体的な計算例を述べる。

3.1 前面衝突解析

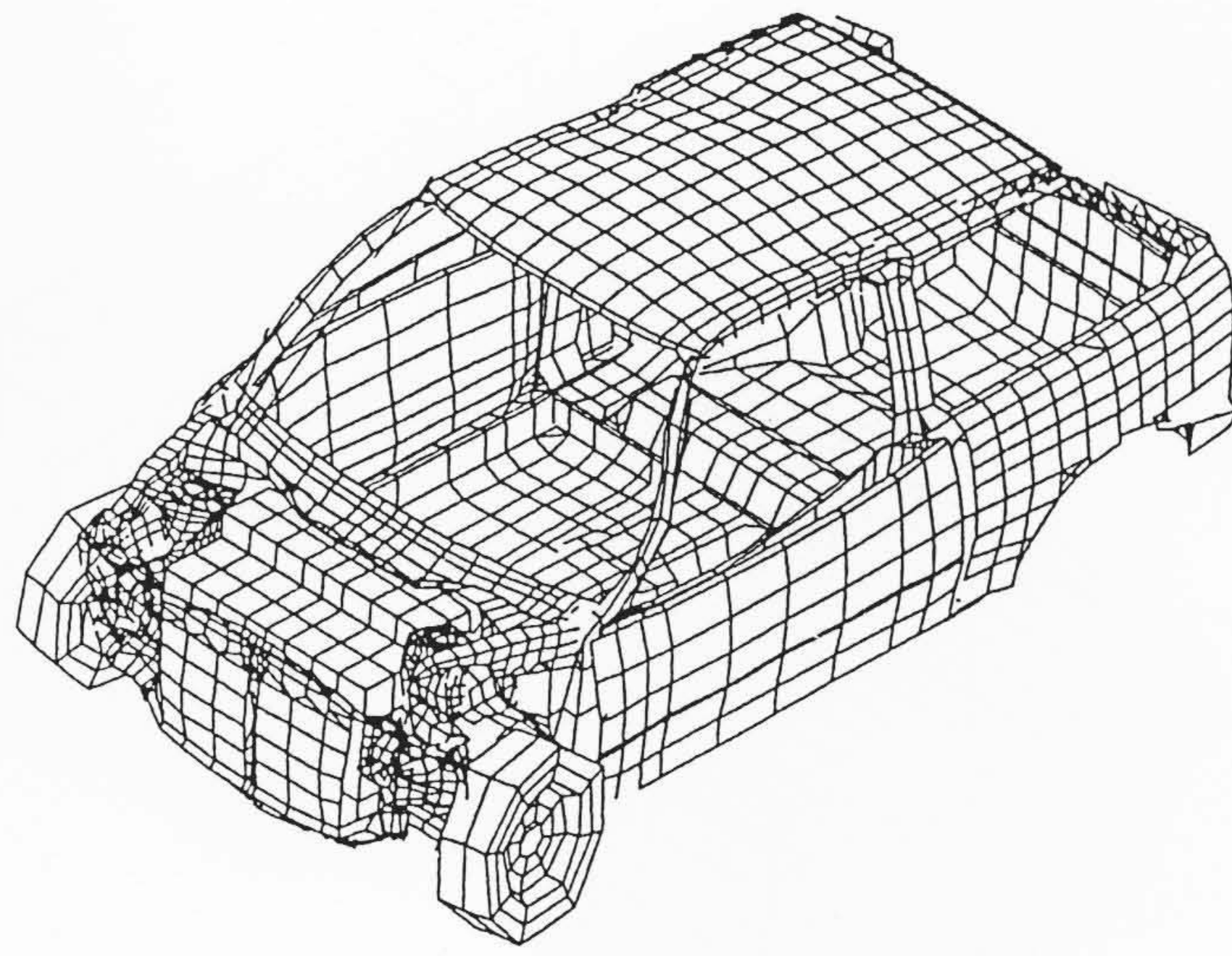
自動車の前面衝突では、衝突時の乗員の保護が重要な問題となる。乗員の傷害に影響を及ぼす要因は多岐にわたっているが、車体に関しては衝突時の特性が最も大きな要因になる。すなわち、車室部分の変形を抑えるために、いかにして衝突時に車両の持っていたエネルギーを車体前部で吸収できるかによる。

小型車が50 km/hの速度で固定壁に衝突した場合の計算例を図2に示す。同図(b)は衝突瞬間から0.05秒後の車体の変形様相を示したもので、この車両の場合には、この時点で車体の変形はほぼ終了している。計算モデルは、節点数約3,100、要素数約3,400で車体を左右対称と考えて片側半分だけモデル化してある。エンジンブロックについては、ほぼ剛体として扱っている。なお、計算時間はスーパーコンピュータHITAC S810/5を使用して、0.05秒までの計算で約6時間であった。

車体の時間履歴に対する変位、速度および加速度の変化を図3～5に示す。これらの図から明らかなように、衝突瞬間から0.03秒までは計算値と実験値はほぼ一致している。それ以後については多少ずれてくるが、傾向的にはよく対応している。このずれの原因としては、今回計算に使用した有限要素法モデルのメッシュ分割が車体前部に比べて、衝突の後半に変形がでてくるフロア部分や、ドアのメッシュ分割がかなり粗かったことなどが考えられる。



(a) 変形前の要素分割



(b) 50 msでの変形

図2 前面衝突の計算例 50 km/hの速度で固定壁に衝突した場合の、衝突前と衝突後50 ms時の車体変形様相を示す。

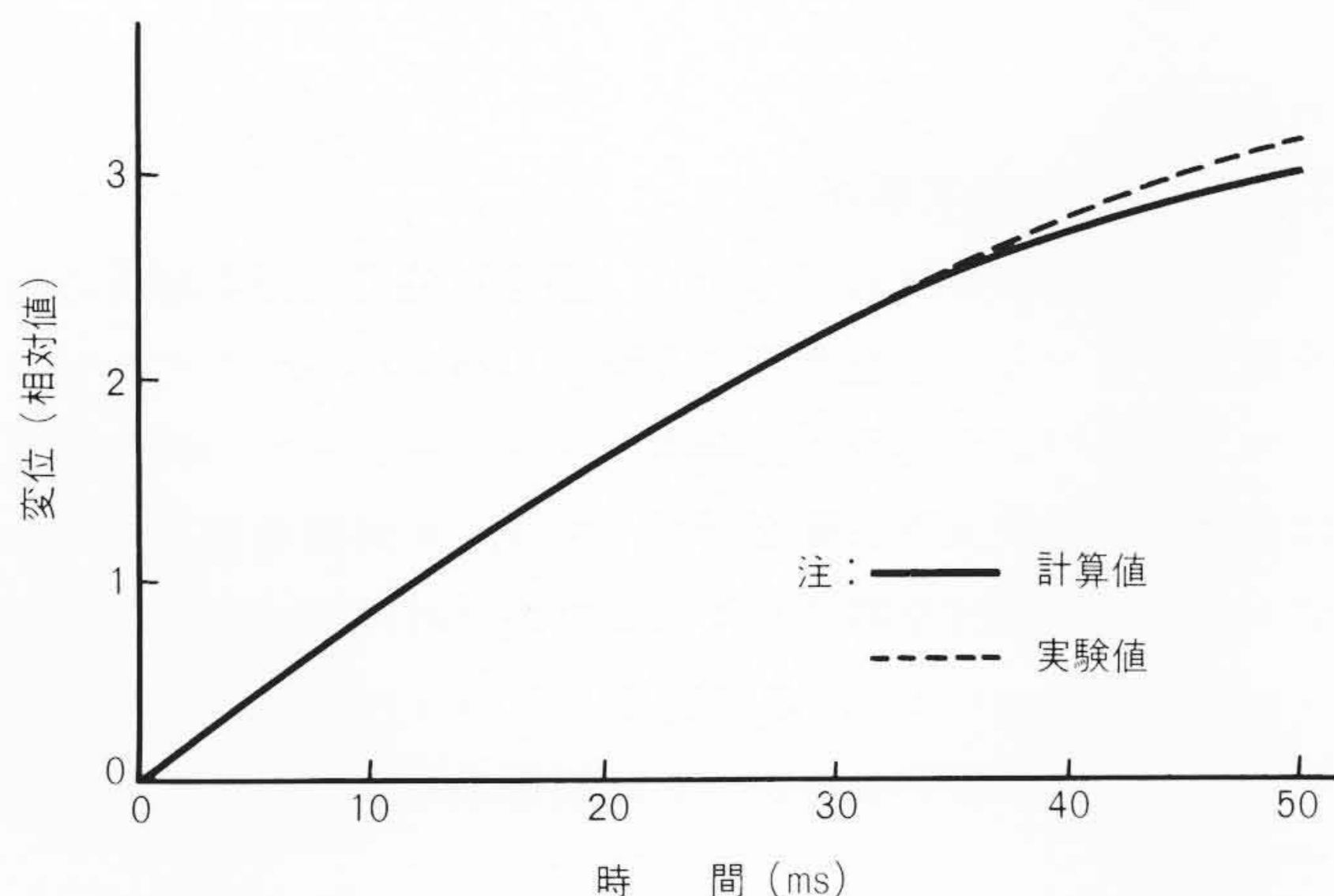


図3 車体の変位，時間履歴曲線 前面衝突時の車体の時間履歴に対する変位の変化の，計算と実験の比較を示す。

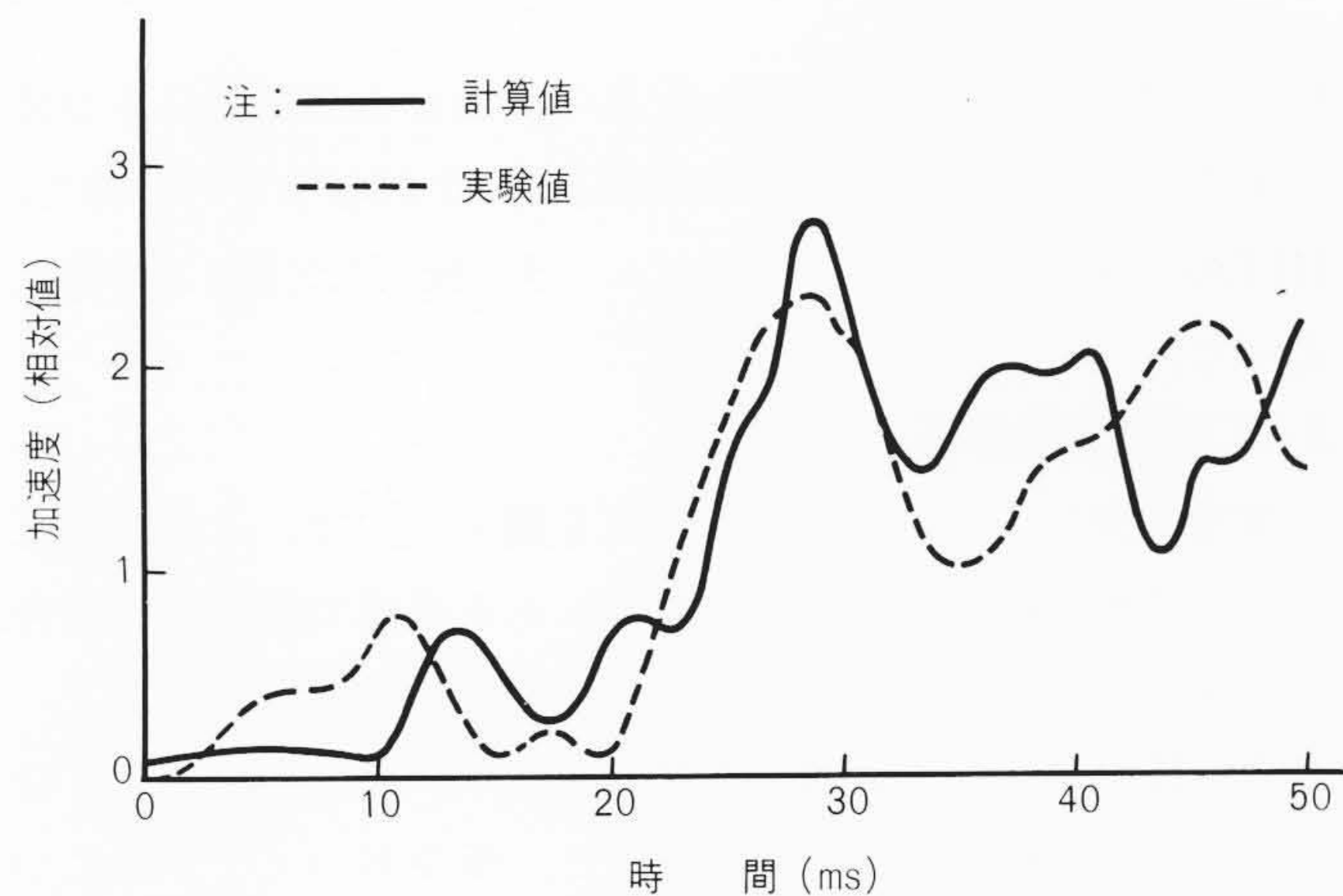


図5 車体の加速度，時間履歴曲線 前面衝突時の車体の時間履歴に対する加速度の変化の，計算と実験の比較を示す。

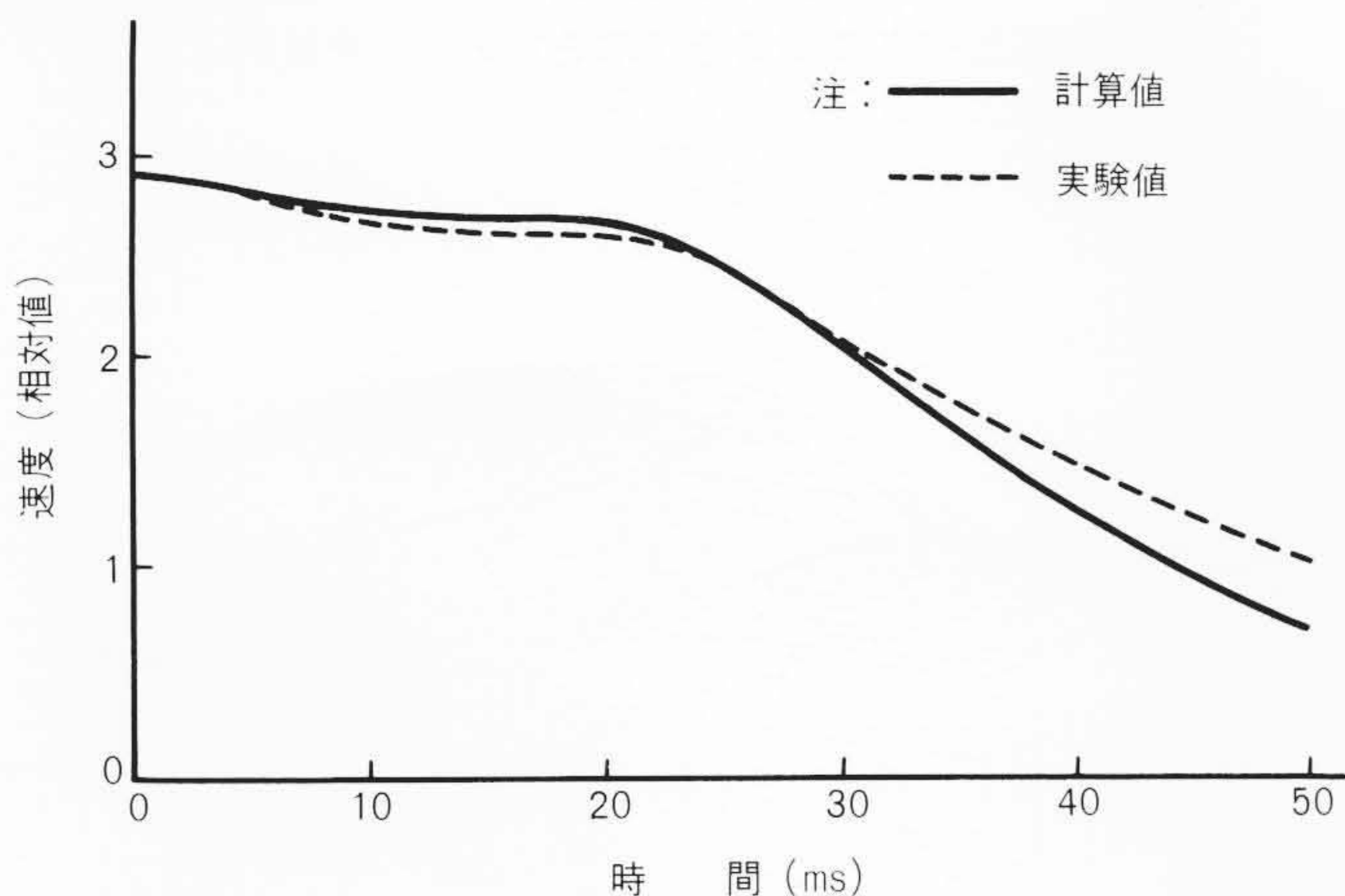


図4 車体の速度，時間履歴曲線 前面衝突時の車体の時間履歴に対する速度の変化の，計算と実験の比較を示す。

3.2 後面衝突解析

後面衝突では、車体の衝突特性を評価する場合、衝突時のエネルギー吸収特性だけでなく、例えば、燃料タンクの保護のために車体後部の変形モードにも注意を払う必要がある。

移動壁(この場合には剛体)が50 km/hの速度で静止している車両の後方から追突するシミュレーション結果を図6に示す。計算モデルは、要素数を少なくして計算時間の短縮を図るために、ダッシュパネルから前方の部分はメッシュ分割を行わず、重量分だけをダッシュパネルに付加して補正している。同図(b)に衝突後0.05秒後の車体の変形様相を示す。この時点で車体は移動壁と同程度の速度で動き出しており、車体変形はほぼ終了している。リヤサスペンション部品や燃料タンクなどもモデル化することにより、リヤフロアなどの変形もかなり実験結果と一致している。燃料タンク保護の面から、燃

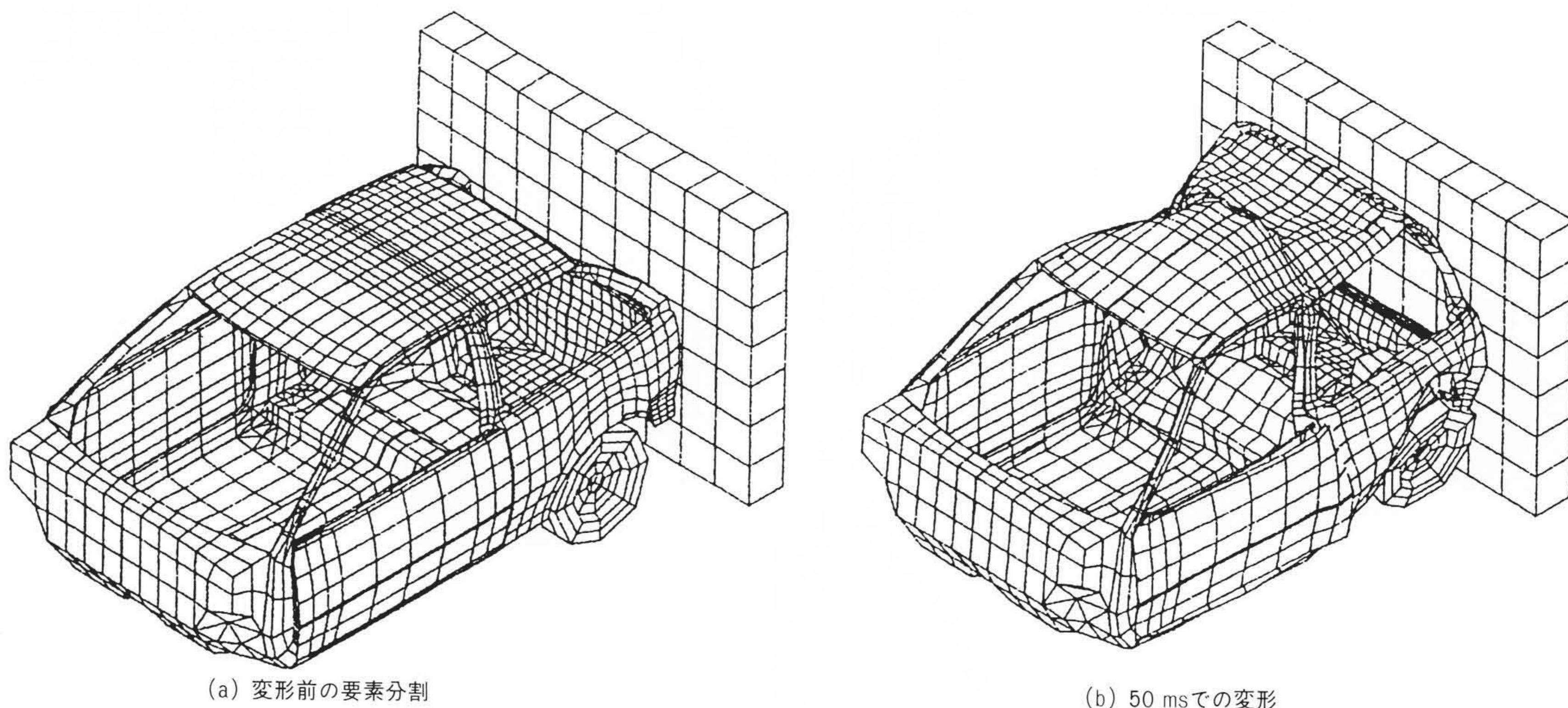


図6 後面衝突の計算例 車体の後面に剛体壁が衝突した場合の、衝突前と衝突後50 ms時の車体変形様相を示す。

料タンクや部材などの適切な配置の検討および評価に十分使用することができる。この計算時間は0.05秒までの計算で、HITAC S810/5スーパーコンピュータを使用して約1.5時間であった。

3.3 側面衝突解析

側面衝突シミュレーションの例を図7に示す。これは静止している車両に、別の車が真横からある速度で衝突した場合の計算である。このような計算では車両の対称性は使えず、車体全体をメッシュ分割する必要がある、モデルが大きくなるために計算時間が長くなる。また、衝突車のモデル化についても剛体として取り扱うことはできないが、被衝突車と同じように細かくメッシュ分割するのはむだであり、粗いメッシュで適切な剛性が得られるようにくふうする必要がある。また、今回の計算ではモデル化されていないが、側面衝突の場合には、座席などの艭(ぎ)装部品の影響も大きく、どのようなモデル化が適切であるのか今後検討を進めていく必要がある。

ある。

3.4 バンパー衝突解析

車体全体の衝突計算ではなく、部品単位での衝突解析の例を最後に述べる。小型車用の5マイルバンパー※)のテストの一つであるペンデュラム衝突のシミュレーションの例を図8に示す。ペンデュラム衝突テストでは、車両質量相当のペンデュラム(振り子)を静止した車両に取り付けたバンパーに、5 mph (mile per hour) の速度でいろいろの方向から衝突させ、バンパーの変形量を調べ車体損傷の有無を評価するものである。

この例では、薄板鋼板から成る箱型断面のメンバーをシェ

※) 5マイルバンパー：車が時速5マイルの速度で衝突した場合に、バンパーシステムだけで衝突エネルギーを吸収し、車体部分には変形などの損傷を及ぼさないことを目的としたバンパーを言う。

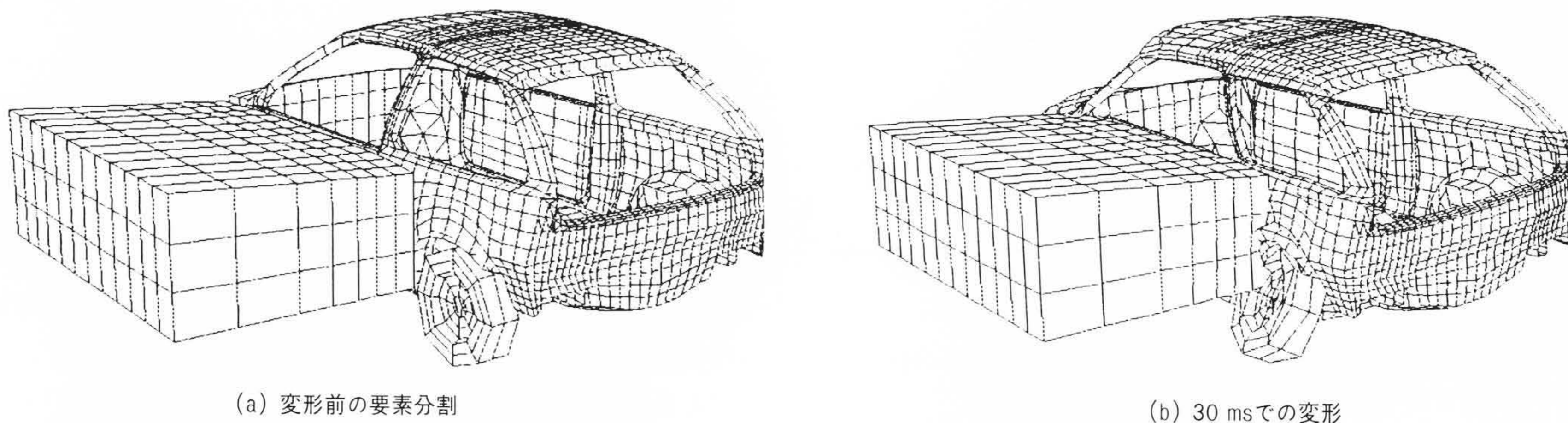


図7 側面衝突の計算例 静止している車両に、別の車両が真横から衝突した場合のシミュレーション結果を示す。

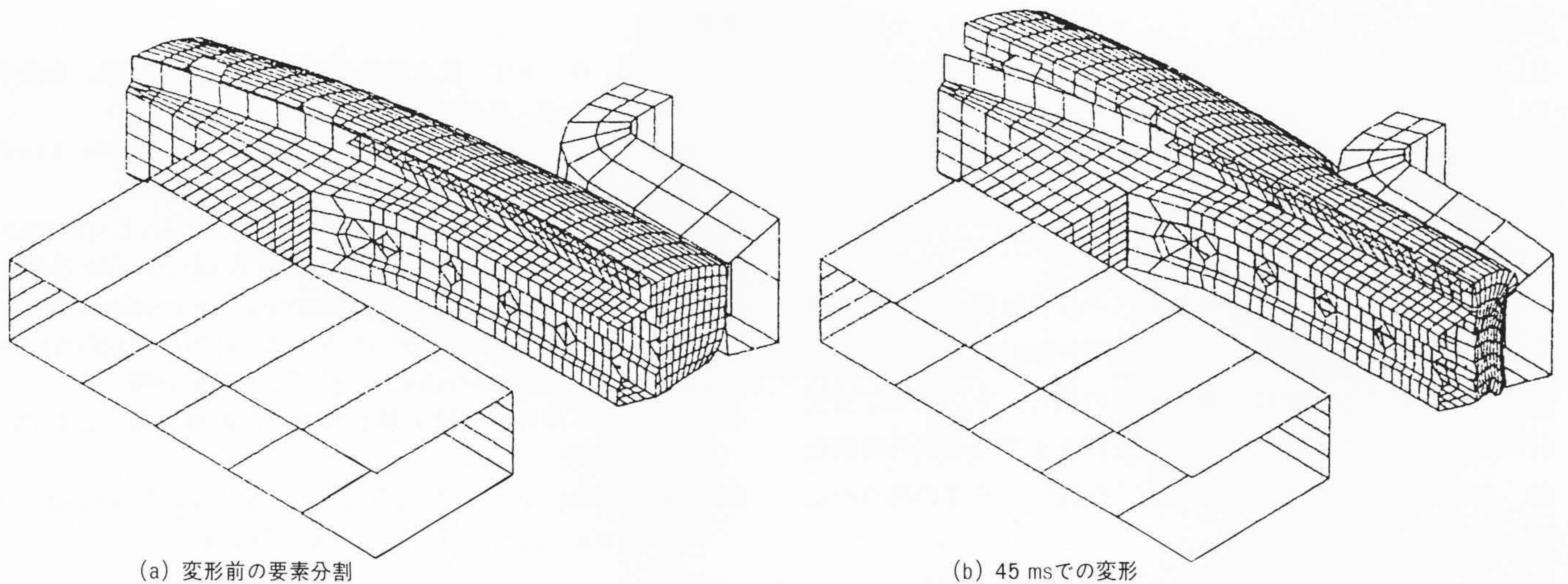


図8 バンパーの衝突計算例 バンパーのペンデュラム衝突の計算例で、対称性を利用して片側半分だけモデル化している。

ル要素で、その前面に厚さ100 mm程度のポリプロピレンの発泡材を立体要素でモデル化してバンパーの基本構造とし、前方中央から、ほぼ剛体のペンデュラムを5 mphの速度で衝突させている。計算モデルは対称性を利用して片側半分だけモデル化している。衝突後0.045秒後のバンパーの変形様相を図8(b)に示す。この時点での変形が最も大きく、これ以後バンパーは移動しながら発泡材部分の変形は戻っていく。バンパー前面での変位量とバンパーに加わる荷重の、実験値と計算結果の比較を図9、10に示す。荷重は計算値のほうが多少大きくなっているが、傾向的には一致している。この計算に要したCPU時間は、衝突から0.06秒まででHITAC S-810/5スーパーコンピュータを使用して約5時間であった。

4 結 言

有限要素法コードとスーパーコンピュータの進歩と相まっ

て、車両が衝突したときの変形様相を詳細に解析できるようになってきた。解析用の有限要素法モデル作成に関しても、CADデータの利用によってかなり容易に製作できるようになった。実際の自動車の設計でも、図面検討の段階で衝突計算を実施することによって車両の衝突特性を予測検討が行われるようになってきている。しかし、現在衝突実験で得られている情報の質と量を、このシミュレーション計算から得るようにするためには、車両の細部にわたるモデル化の技術や、また逆に部材の特性を損なうことなく粗くモデル化する技術の確立が必要である。そして、実際の設計開発の中でこの衝突計算結果をタイミングよく設計にフィードバックしていくには、いっそうの時間短縮を図る必要がある。

一方、計算結果の後処理の点では、スーパーコンピュータを使用している膨大な量の計算結果を、いかにして理解しやすい形に加工するかという問題がある。後処理の一つに最近急

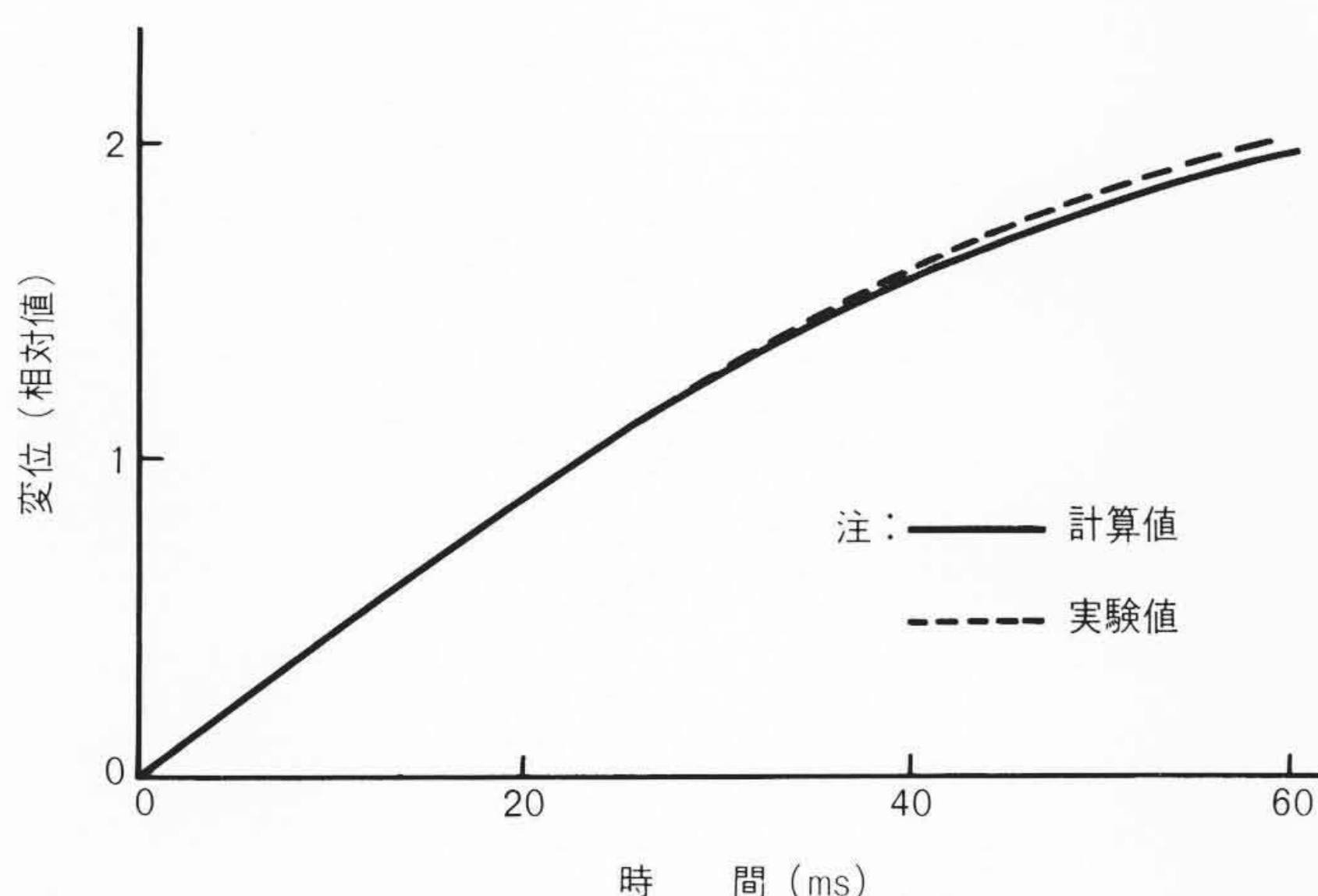


図9 バンパー変位の時間履歴曲線 バンパー前面での変位の計算値と実験値の比較を示す。

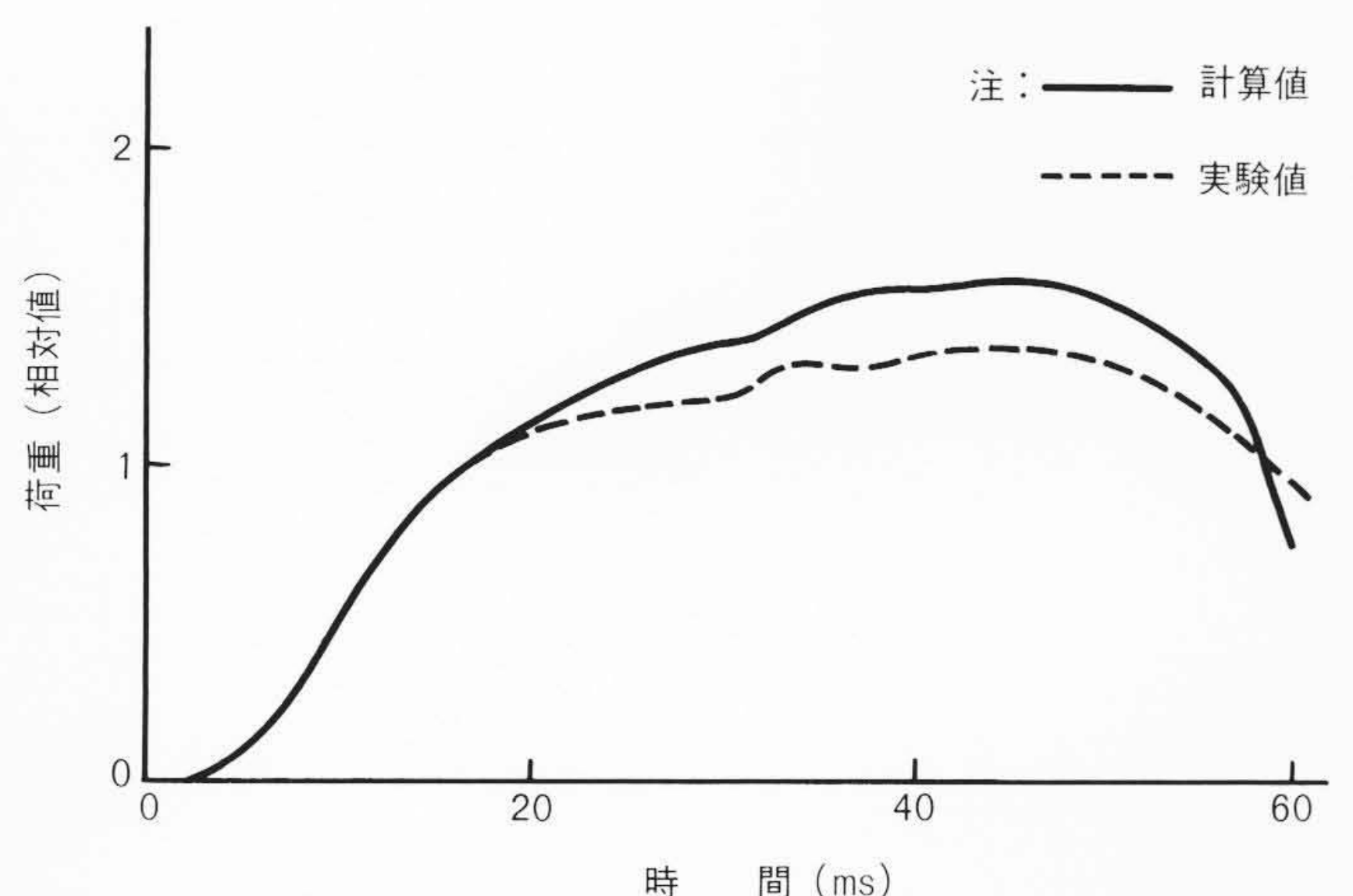


図10 バンパー荷重の時間履歴曲線 バンパーに加わる荷重の計算値と実験の比較で、傾向的には一致している。

速に進歩しているグラフィックワークステーションを使用したCRT画面上での衝突計算結果のアニメーション表示がある。アニメーション表示にすることで、衝突時の変形の時間的な変化がわかり衝突変形の理解を助ける。また、衝突実験からは得られにくかった車体内部の変形の様子なども容易に調べることができるようになる。

有限要素法データ作成から計算、そして結果のポスト処理を含めた衝突解析システムとして実際の設計業務の中で有効に活用していくためには、適用範囲の拡大、そして単に衝突計算の時間短縮だけでなく、結果を得るまでの全体の時間短縮、さらには計算精度の向上など、今後いっそうの努力が必要と考えている。

参考文献

- 1) 五十嵐, 外: 車体の衝突解析へのDYNA 3 Dの応用, 自動車技術, Vol.40, No.11(1986)
- 2) A.J. Regan, et al.: Nonlinear Finite Element Crash Analysis of a Minivan, ICCEM86-Tokyo(1986)
- 3) J.F. Chemail, et al.: Numerical Techniques Experimental Validation and Crashworthiness Analysis with Supercomputer for Automotive Industries, Proceedings of the International Conference on Supercomputer Applications in the Automotive Industry, pp.127~145(1986)
- 4) 桜井, 外: 乗用車の衝突解析技術, 自動車技術, Vol.42, No.10(1988)
- 5) J.O. Hallquist: DYNA3D User's Manual, University of California, LLNL, UCID-19592, Rev.4