OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 汎用非線形解析ソフトウェアLS-DYNA3Dの機能および応用例 |
| Author(s) | 戸倉, 直 |
| Citation | 大阪大学大型計算機センターニュース. 1997, 103, p. 85-98 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/66197 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

# 汎用非線形解析ソフトウェアＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの機能および応用例

株式会社日本総合研究所
戸倉　直

## １．はじめに

現在では，ハードウェアの進化にともなって，高性能のコンピュータが比較的手軽に使用できる環境が整備されてきている．そのため限られた研究目的のためばかりでなく，一般企業においても通常業務の中で，非線形構造解析は日常的に行なわれるようになっている．これは何といってもハードウェアの価格が過去に比べて相対的に低下しており，予算面での制約が大きく緩和されてきたことが最大の原因であると思われる．このような傾向は，いわゆる大企業ばかりでなく，むしろ中規模以下の企業にとって，より多大な恩恵となっているのではないかと推測される．もともと潜在的にあった数値シミュレーションのニーズとあいまって，ダウンサイジングの波は確実に解析ソフトユーザのすそ野を拡大しているのである．

実際，今日の製造産業はこれまでにない厳しい経営環境におかれており，あらゆる業務において根本的なパラダイムの転換を迫られている．設計・生産部門においても，価格競争力を維持するための製造コストの削減とともに，社会的な要請として，環境面での配慮や，製品使用時の安全性といった要因が，製品開発の基本的な設計思想の中に求められるようになってきている．国際的な展開を図るうえでも，これらの要因はますます無視できないものとなっている．

しかしながら，このような製品設計に考慮すべき様々な社会的拘束条件の中には，互いに両立させるのが困難な問題も多く含まれており，技術者としては一層厳しい極限的な設計・開発が求められている．そのための手段や方法も時代とともに変化してきているのだが，数値シミュレーションの分野で考えると，端的にいってそれは「線形解析から非線形解析へ」ということではないだろうか．

まず製品の設計段階で問題となる事象について，構造解析の応用という立場から考えてみよう．製品の強度評価を行なううえで，従来からの線形解析はいまだに極めて有効である．しかし身のまわりを見回してみても，今日の工業製品は単に金属だけでなく，プラスチック，フォーム材，複合材料，繊維材料，セラミックなど多様な材料が用いられている．これらは材料特性として線形の領域に当てはまらないものも多く，またたとえその変形が弾性範囲であったとしても，もはや微小変形の範疇にとどまらないケースも多い．

次に開発の段階にあっては，製品の材質や使用形態に適した素材と，その加工手段の選択が必要となる．加工方法として一般的に用いられるプレス成形，ロール成形，深絞り，鍛造，押し出し，ブロー成形，鋳造などは本質的に材料のもつ非線形特性を応用したものである．したがってこれらの製造工程のシミュレーションにおいては非線形解析が必須となる．

さらに製品使用時における耐衝撃性や安全性の評価などにも非線形解析による数値シミュレーションが必要となる．

もちろん数値シミュレーションですべてが片づくというわけではないが，実験や経験的なノウハウと数値シミュレーションを併用することで，製品開発にともなう複雑な非線形現象を把握し，製造段階でのトラブルシューティングにも迅速に対応できるのである．

ここで紹介するＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄはこのような非線形現象のシミュレーションを目的として，アメリカで開発されたソフトウェアである．１９７０年代の半ば，アメリカ有数の研究機関のひとつであるローレンス・リバモア国立研究所（ＬＬＮＬ）の小さな一室で，当時若干２０代のひとりの若手研究員が，ＦＯＲＴＲＡＮ言語を用いて，ほとんど独力でわずか数千行のささやかな衝撃解析プログラムを書き上げた．まさにこれが今日，世界で最も有名な非線形解析ソフトウェアのひとつとなったＬＳ－ＤＹ

ＮＡ３Ｄのプロトタイプだったのである．他の分野の多くの著名なソフトウェアと同様に，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄも，コンピュータテクノロジに強い興味を抱いたひとりの天才プログラマによって開発されたわけである．現在ではＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの開発者であるホルキスト博士が設立したソフトウェア開発・コンサルティング会社リバモア・ソフトウェア・テクノロジ社（ＬＳＴＣ）において，ホルキスト博士を中心として各分野に精通した精鋭のスタッフが，精力的にＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの機能拡張にエネルギーを注いでいる．

本稿はＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄを中心とした解析システムの概要を把握して頂くことを目的としている．そのために，まずＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄ最新版の特徴や，理論的背景，機能について概説する．次に入力データの作成→解析の実行→結果の評価という一連の流れを，具体的な事例を示しながら解説する．またその際に使用する汎用プリ・ポストプロセッサＪＶＩＳＩＯＮを紹介する．さらに非線形解析を行なううえでの注意点をまとめる．本稿はＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄによる解析の初心者を対象としているが，数値計算，有限要素法および構造解析に関する基本的な知識は有しているものと想定している．紙数の関係から各項目は基本的な事項の紹介にとどめざるを得ず，解析のエキスパートには少々もの足りないと感じられるかもしれないが，最新版の機能紹介として読んで頂けるものと思う．

## ２．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄとは

ここではＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの多様な機能を幾つかの項目に分類して紹介する．

### 2.1.解法

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの解法の基本となるのは有限要素法に基づく構造解析であり，とくに非線形動解析を目的として設計されている．ここで非線形解析とは

（１）幾何学的非線形（大変形問題）
（２）材料非線形
（３）接触（境界条件非線形）

をともなう現象の解析のことである．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄはこれらの非線形性をすべて考慮しており，これらが重畳した極度の非線形問題にも適用が可能である．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは動的問題に対して，直接積分法により解を求めているが，最大の特徴はこの時間積分に陽解法を用いていることである．陽解法の要点をまとめると次のようになる．解くべきつり合い方程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^{n} + \mathbf{K}\mathbf{u}^{n} = \mathbf{P}^{n} \qquad (1)$$

である．ここでMは質量マトリックス，Ｋは剛性マトリックス，Pは外力ベクトルである．またｕは変位ベクトルであり，‘･’はそれの時間微分を表わしている．添字ｎはｎステップの物理量であることを示す．上式の左辺第１項すなわち慣性項を考慮した解析が動解析であり，考慮しなければ静解析となる．上式においてMとＫは物性値として，Pは荷重条件としてユーザが入力する値であるので既知である．そこで求めるべき量としては$u^n$またはその微係数ということになる．静解析で通常用いられる陰解法によれば，上式を離散化（$\ddot{u}^n$を$u^n$と時間ステップΔｔで書き換える）し，マトリックス演算（直接法または反復法）を行なうことによって未知数$u^n$を求めることになるわけである．ところがMが対角マトリックスであることを利用すると，式（１）は各節点自由度ごとの一次式に分解できることが容易に証明できる．その後陰解法と同様の離散化を行なうことにより，

$$m_i\ddot{u}^n{}_i = P^n{}_i - F^n{}_i \qquad (2)$$

を得る．ここで添字ｉはｉ番目の節点に関する式であることを表わしている．Ｆは節点ｉにかかる内力である．式（２）は形式的にニュートンの運動方程式そのものであり，未知数は加速度となる．節点にかかる荷重を節点質量で除することにより，各節点に対し，自由度ごとの加速度成分が求められる．あとは加速度を積分することにより，速度および変位が求められ，最終的にｎステップにおける系全体の

変形および応力分布が求まることになる．すなわち大規模なマトリックス演算を行なうことなく，連立一次方程式が解かれるわけである．

このように，陽解法は陰解法とは異なり，系のつり合い状態を求めるための収束計算を必要としない．そのために陽解法は陰解法に比べて精度的に劣ると見なされることもあるが，そうではない．不つり合い力は無視されるのではなく，次のステップへ持ち越されるだけであり，計算には考慮されているのである．陽解法のメリットを要約すると，次のようになるだろう．

（1）つり合い状態を求める収束計算が不要なため，収束せずに計算が途中で止まってしまうことが原理的にない．
（2）系の連立方程式を解く際にマトリックス計算を用いないので，少ないメモリ／ディスク容量で大規模なモデルを解くことが可能．

最近は数値モデルをより現実に近づけたいという技術者の要望がますます強くなり，数値解析の面から見ると陰解法で解を求めるのが困難な問題が少なくない．そのためＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの用途はますます広がりつつある．

陽解法を使用する際に注意すべき点は，時間積分を行なうときの時間ステップである．陰解法が汎用ソフトの中で広く用いられてきた理由は，時間ステップの取り方に数値計算上の制約がないということである．すなわちユーザの任意の時間ステップで計算できるわけであるが，これに対して陽解法では，時間に関する数値積分の安定性は時間ステップの大きさΔｔに依存する．つまりΔｔはＣｏｕｒａｎｔ条件とよばれる安定条件

$$\Delta t < \frac{L}{c} \qquad (3)$$

を満たさなければならない．ここでＬはモデルを構成する最小要素の代表的な長さであり，ｃは構造物中の音速（応力波の速度，スチールでは約５２００ｍ／ｓ）である．Ｃｏｕｒａｎｔ条件は，もともと流体解析の世界で，陽解法により時間積分を行なう際に課せられた安定条件であるが，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは物体中の応力波の伝播を解いているため，このような条件が必要となるのである．実際はΔｔはプログラム内でＣｏｕｒａｎｔ条件（３）を満たすように自動設定されるので，通常はユーザーが特にΔｔの設定を意識する必要はない．スチール製の工業製品の有限要素モデル（要素サイズを０．００１ｍ程度と仮定する）を考えると，Δｔは０．１マイクロ秒程度となり，０．１秒間の解析を行なうのに１００万サイクル（ステップ）の計算を処理することになる．このことからもわかるように，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄのような陽解法が解析対象とする物理現象は，せいぜい１秒以内（通常は０．０１～０．１秒のオーダー以下）でなければならない．もちろん原理的には何秒，何分の現象でも計算は可能であるが，そのためには天文学的な計算時間が必要となってしまう．

ここで実際の解析に際しユーザーが留意すべきことは，解析が進行し，要素が変形するにつれて，各ステップ毎にＣｏｕｒａｎｔ条件を満足するようにΔｔが変化することである．もし要素が局部的に過度の変形を受け，極端に小さくなってしまった場合，それに対応してΔｔが小さくなり，数値積分がそれ以上進まなくなってしまうことがある．無駄な解析時間を費やさないためにも，ユーザーは解析が進行している間，計算の状態をモニターし，Δｔの大きさをチェックしていなければならない．これは陰解法ソフトにおいて，各ステップの収束計算の状態を確認するのに相当する．解析の途中経過はファイルまたはディスプレイ上に書き出される．

## 2.2.要素テクノロジー

解析空間の離散化は有限要素法によっており，ソリッド，シェル，ビーム，線形／非線形バネ等の要素が備わっている．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの要素の特徴としては，基本的に要素体積積分の計算にガウスの１点積分を採用していることである．１点積分のメリットは以下の点にある．

・１要素当たりの計算速度が速い．
・大変形に強い．

これにより，要素数の多い大規模なモデルを高速に処理することができ，またＬａｇｒａｎｇｅ要素であっても相当な大変形に追随できるのである．

各要素は１次の形状関数を用いたアイソパラメトリック要素であるが，これはやはり１要素当たりの計算速度を高速化するためと，過度の大変形問題に対して応力や変位の分布を精度良く求めるためには高次要素を用いるよりも，むしろ１次要素により要素分割を細かくした方がよいためである．

要素分割は変形が大きい部分をより細かくすべきであるが，大きな変形を生じる部分を初期の段階で予想するのが難しい問題もよくある．このようなときにはアダプティブ要素が有用である．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄにはアダプティブｈ法にもとづくシェル要素が用意されており，要素が変形した際に，入力された再分割条件に従って，解析の途中で四角形要素を自動的に分割し，解析を続行する．ただしこのまま計算を続けると誤差が蓄積したままとなってしまうので，再分割した形状により前のステップから解析を再実行するオプションが備わっている．

なお構造と流体との連成解析のため，Ｌａｇｒａｎｇｅ要素に加えてＥｕｌｅｒ要素，ＡＬＥ要素も用意されている．

## 2.3.物性タイプ

LS-DYNA3Dは自動車産業，精密機械，プレス，電気，土木，建築等の幅広い業種で使われており，そのため物性材料としても様々なタイプが用意されている．現在９０種類近い物性モデルがあるが，それらをモデル化の対象として想定されている材質にもとづいて，幾つかのグループに分類すると次のようになる．

・鉄，非鉄金属　　・複合材料
・ゴム　　・合成樹脂
・土，コンクリート　　・セラミック
・ガラス　　・発泡材（ポリウレタン等）
・繊維材料　　・流体
・爆薬

またこれらを構成式により分類すると次のようにまとめることができる．

・弾性体　　・弾塑性体
・異方性材料　　・ひずみ速度依存材料
・温度依存弾塑性体　　・粘弾性体
・超塑性体　　・剛体

これらの物性モデルの中には，引っ張り試験のデータを入力すると，最小二乗法によりプログラム内部で自動的に構成式のパラメータを設定する機能をもったタイプもある．

## 2.4.初期条件

よく用いられるものとしては初速度の設定がある．初速度は落下解析や衝突解析の際に，節点ごとに与えるものである．落下解析では落下する高ささえ決めれば地面に接地する瞬間の速度がわかるので，落下物にその速度を初速度として与え，地面に接地する瞬間から解析を行なえばよい．

また応力の初期化の機能は，自重たわみなどで変形した初期応力状態を設定する機能である．各要素ごとに入力データとして応力値を与えるのであるが，注意すべき点は構造物の初期形状を，その応力と整合性のある変形状態として定義しなければならないことである．応力と変位がアンマッチの場合，解が不安定となる．他のソルバーによる静解析の結果を用いてＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄにより動解析を行なう場合に有効な機能である．

## 2.5.境界条件

通常の構造解析に使われる節点自由度に対する拘束条件や対称条件はＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄでも全て使用可能である．ただし静解析と異なる点は，節点自由度の拘束を全く行なわなくても計算できることである．つまり構造物は空間内に完全にフリーな状態にあってもよい．空間内にフリーに置かれた構造物に外力が加われば，ニュートンの運動方程式にしたがって加速度が発生し，構造物が運動していくわけである．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄに特徴的な境界条件としては，応力無反射境界条件がある．先程述べたように，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは応力波の伝播を解いているので，モデルの表面で応力波が反射してくる．ところが地盤など，本質的に無限領域をモデル化したい場合，境界での応力反射をなくす必要がある．このために用いられるのが応力無反射境界である．こ

のほか周期対称性のある構造をモデル化するための周期対称境界条件もある．

## 2.6.拘束条件

節点自由度拘束のほかに２個以上の剛体の自由度を共有させるための拘束条件などが設定できる．

またジョイントとよばれる機能は，ロボットのアームや自動車のサスペンションなどのジョイント機構部を簡略にモデル化するための機能である．

さらに溶接部のモデル化に関してはスポット溶接，すみ肉溶接，つき合わせ溶接が可能であり，これにより２個以上の部材を溶接し，結合した状態のモデル化が行なえる．溶接部は部材を構成する節点の組として定義される．

## 2.7.荷重条件

節点集中荷重，圧力荷重，物体力などの機械荷重ならびに温度荷重がある．温度は構造物に対し，定常または非定常の温度分布を与える．温度分布の与え方はファイルからの入力，熱伝導解析との連成などの方法が用意されている．

## 2.8.接触解析機能

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄがあつかう問題は，ほとんどの場合物体と物体との接触現象を含んでおり，接触解析の精度や計算効率はこれらの問題を解析する際に本質的に重要なものとなる．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄでは接触解析に関し，以下のような機能を有している．

（１）面・面間接触
（２）節点・面間接触
（３）面・辺間接触
（４）辺・辺間接触
（５）スライド（滑りのみ，分離しない）
（６）タイド（剛結）
（７）完全な自動接触判定
（８）パートまたは領域指定による自動接触判定
（９）高速な接触面サーチ法を採用
（10）ペナルティー法による接触計算
（11）コンストレイント法による接触計算
（12）接触面上の接触力分布をグラフィック表示
（13）シングルサーフェイスコンタクト
（14）シェル要素の接触判定に板厚を考慮可能
（15）静まさつ，動まさつ係数
（16）幾何接触体
（17）ドロービード

一口に接触問題といっても様々な問題を含んでいる．通常接触問題といえばソリッドまたはシェル要素どうしの面と面の接触を思い浮かべるが，例えばシェル要素で構成された中空円筒が，軸方向から地面に落下する場合などはシェルの辺と面との接触が想定されなければならない．このような場合をひとつひとつ考えていくと，上の（１）から（４）にあるような，接触の状況に応じた接触ロジックが必要となってくるのである．接触面の定義の方法としては，接触するだろうと思われる領域を明示的に指定する方法や，接触する物体をパート番号で指定する方法などがある．また複雑な形状に対してはどの材料どうしが接触するのかの予測が困難なものもある．その場合は（７）により，接触判定をある程度自動的にプログラムにまかせてしまうやり方も用意されている．

さらに上の（16）幾何接触体とは，平面，球，円筒などの単純な形状を，有限要素を用いることなく幾何学的に定義した剛体の一種であり，これを組み合わせて工具面等を定義することができる．またドロービードについては，金型のメッシュ分割とは独立して任意のラインを節点列で定義することができる．これらの機能により，複雑な接触面形状に対しても以前に比べて容易に安定な解が得られるようになっており，ユーザーにかかるデータ作成の負荷が大幅に軽減されている．

## 2.9.減衰

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの基本的な運動方程式（１）には通常減衰項は含まれていないが，減衰係数を入力することにより構造物の減衰応答を考慮することが可能となる．この場合式（１）は

$$M\ddot{u}^n + C\dot{u}^n + Ku^n = P^n \qquad (4)$$

となる．Ｃが減衰係数マトリックスである．これにより構造減衰の効果が考慮できる．減衰は薄板成形において，加工後のスプリングバック量を求める場

合などに必要となる．ただし陽解法では，Cは対角マトリックスでなければならない．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄのような動解析のソフトで静的なつり合い状態を求める解析手法に動的緩和法がある．これは減衰を用いて系から運動エネルギーを減少させ，収束計算を行なうことにより静的に安定した状態を求める解析法である．自重たわみなどによる応力の初期化計算に用いられる．

## 2.10.破壊のモデル化

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄには破壊現象を模擬するための方法がいくつか用意されている．それらを機能別に分類すると以下のようになる．

（１）物性材料モデル

破壊を考慮した物性タイプに関して，相当応力や相当塑性ひずみにより破壊判定値を与えることにより，実際に発生した応力，ひずみがその判定値を超えた時点で，その要素は破壊したとみなされ，計算から削除される．破壊判定値としてはほかに圧力，主応力，引っ張り・せん断強度，軸力，モーメントなどがある．

（２）イローディング

個々の要素の時間ステップが破壊判定値となる．時間ステップが判定値を下まわった要素は計算から削除されると同時に，接触計算において，削除された要素を除外して接触面が自動的に再定義される．これにより貫通などのシミュレーションが可能となる．要素が過大に変形し，要素の体積が負と判定された場合も削除の対象となる．

（３）スライドインターフェイス

面・面間および節点・面間の接触面定義において，あらかじめ一体化された接触面に許容値を上まわる引っ張り力，せん断力または応力が発生した際に，接触面を切り離す機能である．

（４）タイブレークシェルスライドライン

シェルの辺に対し，タイブレークとよばれる定義をすることにより，板に亀裂が生じるようなシミュレーションが可能となる．破壊の判定値は相当塑性ひずみである．

（５）シェルタイノードセット

タイブレークシェルスライドラインと似ているが，破壊された部分は要素が切り離され，破片となって飛散していく状態が模擬される．切り離された要素は固有の運動量をもってニュートンの運動方程式にしたがい飛散していく（図１）．

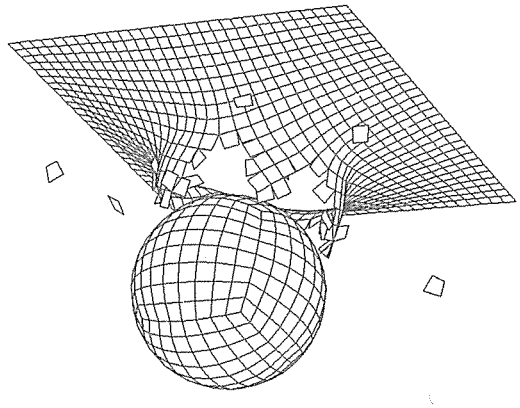


図１鋼球による板の貫通

（６）溶接部

これは溶接部に対する破壊のシミュレーションを行なうための機能である．スポット溶接，すみ肉溶接，つき合わせ溶接部に対し，破壊の判定値として垂直力，せん断力または相当塑性ひずみを定義しておき，部材の変形にともなって実際に発生した内力または相当塑性ひずみが，この判定値を超えた時点で，溶接部が破断したとみなされ，各部材を切り離す．垂直力，せん断力は脆性破壊を，相当塑性ひずみは延性破壊を想定している．

## 2.11.その他の機能

（１）ＡＬＥ法によるリメッシュ

過大に変形した領域に対し，要素のリメッシュを自動的に行ない，計算を継続する方法である．現在ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄに採用されているのは要素のトポロジーを変化させないアダプティブｒ法である．リメッシュの手法としては体積重み法，単純平均法，等ポテンシャル法，アイソパラメトリック法がある．これらを組み合わせて使うことも可能となっている．ＡＬＥ法のリメッシュの例を図２に示す．

（２）マニュアルによるリメッシュ

要素が過大に変形してしまうとそれ以上計算が続行できなくなり，やがては計算エラーとなってしまう．これを避けるために解析を途中で停止させ，要

素をリメッシュして解析を継続する方法がある．リメッシュはプリプロセッサなどを使い，ユーザが行なわなければならない．ただしリメッシュの前後で要素数が変わってもよい．また物理量のリマッピングは新しいメッシュに対しＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄが自動的に行なう．

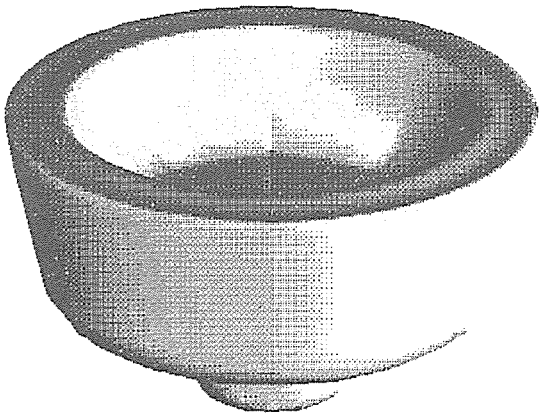


図２　ＡＬＥ法を用いた鍛造解析

（３）アダプティブ要素

基本的に有限要素法による要素分割は，変形が大きい部分をより細かくすべきであるが，大きな変形を生じる部分を初期の段階で予想するのが難しい問題もよくある．このようなときにはアダプティブ要素が有用である．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄにはアダプティブｈ法にもとづくシェル要素が用意されており，要素が変形した際に，人力された再分割条件に従って，解析の途中で四角形要素を自動的に分割し，解析を続行する．ただしこのまま計算を続けると誤差が蓄積したままとなってしまうので，再分割した形状により前のステップから解析を再実行するオプションが備わっている．図３にアダプティブ要素を用いた計算例を示す．

## ３．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの応用

### 3.1.適用分野

これまで見てきたようにＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは多様な機能を備えており，そのために非常に広範な領域に適用可能なソフトウェアである．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの主な解析事例を以下に示す．

（１）自動車
- ・衝突解析
- ・ダミーモデルによる乗員安全解析
- ・エアバッグ展開シミュレーション
- ・バンパー，ルーフピラーの大変形解析

（２）航空・宇宙
- ・エンジンへの鳥の衝突シミュレーション
- ・タービンブレード飛散
- ・宇宙構造物の振動解析

（３）交通
- ・船舶の衝突，座礁
- ・列車の衝突

（４）電気製品
- ・携帯電話等の落下衝撃解析
- ・梱包材の緩衝効果の評価

（５）加工シミュレーション
- ・プレス成形
- ・ロール成形
- ・深絞り
- ・鍛造
- ・ブロー成形

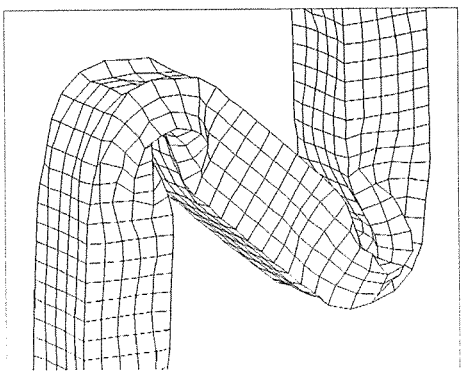
（６）建設・土木
- ・鉄筋コンクリートの耐衝撃解析
- ・地盤，建築物の地震応答解析
- ・ビルの爆破シミュレーション

（７）エネルギー
- ・核燃料容器の輸送安全解析
- ・プラント耐震解析

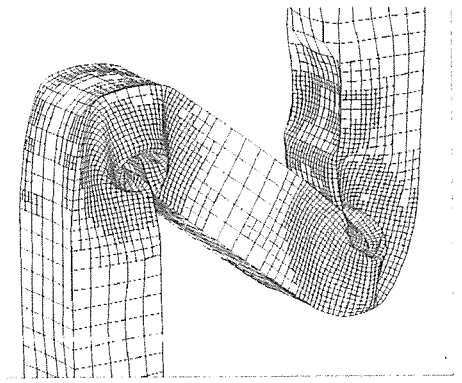
（８）防衛関係
- ・爆破，貫通シミュレーション

このように様々な用途に用いられるＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄではあるが，その中でもとくに使用頻度の高い分野は衝撃解析および塑性加工問題であろう．塑性加工問題は静的な問題としてとらえられるが，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは純粋な静解析の機能をもたないので，厳密には比較的低速な現象に対する動解析の応用ということになる．したがってここでは準静解析とよぶことにする．以下にこれらの分野における使用事例を示す．なお，これらの解析はカタログ公称値１５４ＭＩＰＳ，５７ＭＦＬＯＰＳ，２０１ＳＰ

ＥＣｆｐ９２のＥＷＳ上で行なったものである．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄは計算をすべてインコアで処理するため，解析に必要なだけのメモリを実装しておかなければならない．しかし必要となるメモリ容量は以下の例に示すようにそれほど大きくはない．また解析に必要なディスク容量はユーザーが指定する出力量（出力時間間隔）によって大きく異なるので，モデルサイズのみから単純には推定できない．しかし一般的にいって，かなり大規模なモデルであっても数百ＭＢ程度あれば充分であろう．



アダプティブなし



アダプティブあり

図３　アダプティブ要素使用例（ビームの座屈）

## 3.2.衝撃解析

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄで衝撃解析を行なう場合には入力データとして形状，物性データ，初速度，加速度等が必要となる．さらに接触が生じる領域には接触面の定義が必要となる．また材料によってはひずみ速度依存性を考慮しなければならない場合がある．

ここでは衝撃解析の典型的な応用例として自動車のオフセット衝突を紹介する（図４）．モデルの規模は節点数２４２４４，ソリッド要素数３４０，ビーム要素数１４０，シェル要素数２５３９９，物性数１２４である．ちなみに陽解法では解析時間は要素数に比例し，節点自由度の数はあまり関係しない．また車体の変形によって生じることが予想される部材の接触を計算するために，１６６６４セグメントからなる自動接触判定接触面が車体前部に定義されている．車体は初速度５６ｋｍ／ｈ（３５ｍｐｈ）で剛体壁に衝突している．剛体壁は直方体と半円柱を組み合わせた幾何学的な剛体であるが，可視化のためにダミーのシェル要素が貼られている．また地面にも無限平面の剛体壁が定義されている．解析は車体が前方の空間に固定された剛体壁に接触する瞬間から１００ｍｓまで行なった．解析サイクル数は１１１１０３となり，これから平均的なΔｔは約０．９$\mu$ｓであることがわかる．要したＣＰＵ時間は約５０時間，メモリ容量は約２５ＭＢであった．このような解析ではフロント部の変形モードが正確に再現されているかどうか，加速度履歴が実験値と一致するかどうかなどがポイントとなる．

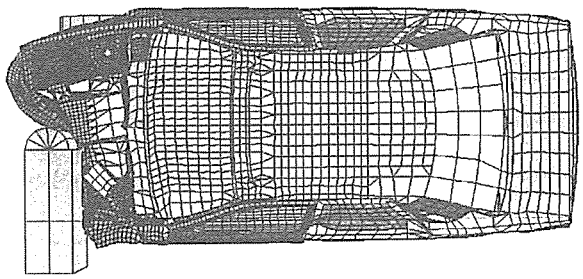


図４　自動車のオフセット衝突解析変形図

## 3.3.準静解析

板成形解析の例を図５に示す．これはブランク材の最終変形形状である．上下の金型およびしわ押さえは省略して表示してある．また実際の解析は対称性を考慮して１／２モデルで行なっているが，図はモデル全体を表示してある．ブランク材は弾塑性体，工具はすべて剛体である．モデルの規模は節点数１３４５９，シェル要素数１２８６９であるが，このうちブランク材の要素数は７６００である（剛

体部分の要素は解析時間にはほとんど影響しない）．解析条件としては，しわ押さえ圧力を加えながら工具に強制変位を与えている．工具を比較的ゆっくり移動させることにより準静的な解析を行なっている．ブランク材と各工具の間に接触面が定義されている．解析サイクル数は４００１０であり，ＣＰＵ時間は約１０時間であった．また使用したメモリ容量は約２０ＭＢである．

なお実際の加工工程が数秒にわたるような場合には，陽解法の原理上実用的な時間内で解を得るのは不可能なので，加工工程を１秒以内に短縮して解析する必要がある．そのためには通常，工具の移動速度を実際より高速に設定して解析を行なう．また静的な問題では慣性項の寄与は小さいという前提のもとに，材料の質量を人工的にコントロールして計算時間を短縮するマススケーリングとよばれる方法もある．

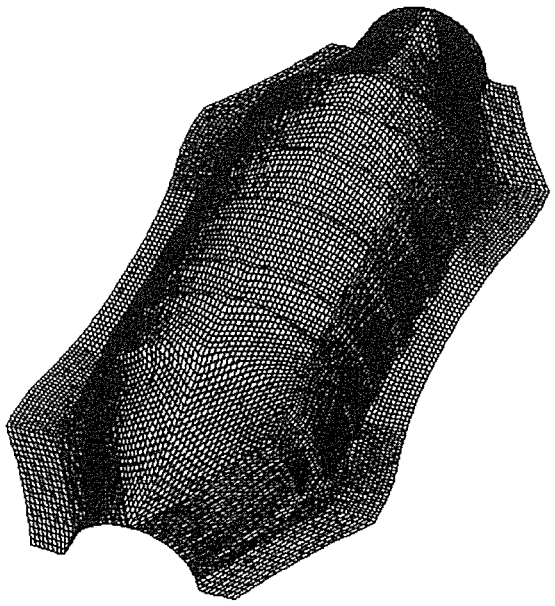


図５　自動車部品のプレス成形解析変形図

## ４．使用方法

これまで見てきたような解析を行なううえでの一般的な手順を以下に示す．

### 4.1.解析対象

まず解こうとする問題の特徴を正確に把握する必要がある．モデル化するうえでポイントとなる点を挙げるとほぼ次のようになるだろう．

（１）線形解析か非線形解析か
（２）静解析か動解析か
（３）解析したい物理現象または加工プロセスの時間スケールはどのくらいか．
（４）要素タイプは何にするか
（５）要素数はどの程度が妥当か
（６）物性タイプとして何を選ぶべきか
（７）必要な境界条件，荷重条件はなにか
（８）接触面の定義は必要か
（９）出力として必要なものは何か

上記の（１），（２）に関して，線形解析または静解析でしかもそれほど大きな変形をしないような問題であれば，ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄよりも静解析専用のソフトを使ったほうが効率がよい．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの解析対象はそれ以外のものである．

### 4.2.データ作成

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの入力データはバージョンアップにともなって多少変化しているが，現在ではキーワードフォーマットとよばれる形式が一般的である．基本的な構成としては，各機能ごとにキーワードが定義されていて，キーワードの後に入力される数値が並んでいる．数値を入力するフィールドは位置が決められていて，とくに指定されない限り１フィールドが１０文字分で構成されており，１ラインに８個のフィールドがある．ＪＶＩＳＩＯＮで作成された入力データの例を付録に示す．これは飛翔物体が鋼板を貫通するシミュレーション（図６）に関するデータであり，一部を省略して掲載してある．付録の中で，１カラム目に‘＊’の着いている文字列がキーワードである．キーワードを参照することにより，おおよそのデータ構成は理解していただけるものと思う．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの入力データの作成はプリ・ポストプロセッサＪＶＩＳＩＯＮにより行なう．ＪＶＩＳＩＯＮは数少ない国産（日本総研製）の汎用プリ・ポストプロセッサであり，ＬＳ－ＤＹＮＡ３ＤだけでなくＮＡＳＴＲＡＮ，ＭＡＲＣ，ＡＢＡＱＵＳといった市販ソフトにも対応している．中でもＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄについては，その入力データのほとんどが作成可能となっている．物性，荷重条件

などの入力メニューはすべてＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄ固有のメニューとなっており，ソルバーとの整合性が保たれている．

ＪＶＩＳＩＯＮによる入力データ作成のオペレーションの概略は次のようになっている．

（1）ＪＶＩＳＩＯＮの起動
（2）簡易CADによる図面作成
（3）節点，要素の生成
（4）各種条件の設定
（5）ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄ入力データの書き出し

まず（1）でＪＶＩＳＩＯＮを立ち上げるとＪＶＩＳＩＯＮのメインメニューが表示される．メインメニューにはプリプロセッサ，ポストプロセッサとその他のツール群を起動するためのボタンが用意されている．プリプロセッサ部はＧＥＯＭＥＴＲＹ，ＣＯＮＤＩＴＩＯＮという機能的に独立したふたつのモジュールで構成されている．このうち（2），（3）はＧＥＯＭＥＴＲＹモジュールで行なう．ＧＥＯＭＥＴＲＹはＥＮＴＩＴＹ　ＩＮＰＵＴモードとＭＯＤＥＬ　ＩＮＰＵＴモードをもち，前者により（2）の作業を，後者により（3）を行なう．このふたつのモードは随時切り替えられる．（4）と（5）はＣＯＮＤＩＴＩＯＮモジュールにより操作する．基本的にＪＶＩＳＩＯＮは標準的なＭｏｔｉｆのＧＵＩを採用しており，マウスによるアイコンやボタンの操作により会話形式でデータが作成できる構造になっている．解析条件設定の際には，必要な項目の入力をユーザにうながすナビゲーション機能も一部採用されている．

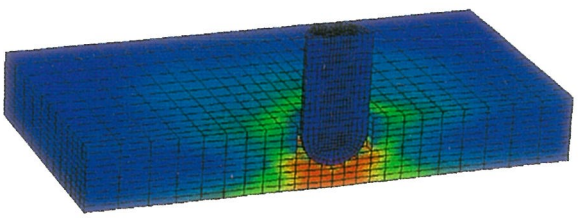


図６　飛翔物体による鋼板の貫通シミュレーション

## 4.3.解析実行

ＪＶＩＳＩＯＮにより作成された入力データはディスク上の任意のディレクトリに置かれる．ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄを実行する際は単にこのデータを実行コマンドで指定しさえすればよい．実行コマンドは非常にシンプルであり以下のようになっている．

ｌｓｄｙｎａ　ｉ＝入力データ

ただし実際の実行の形式はハードウェアのシステム構成によって多少異なる場合があるので，あらかじめ使用するシステムの管理者に確認することが必要である．

## 4.4.後処理

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの実行が終わると以下のようなファイルが作成される．

（1）ｄ３ｈｓｐ
（2）ｄ３ｐｌｏｔ，ｄ３ｐｌｏｔ０１，．．．
（3）ｄ３ｄｕｍｐ０１

このうちｄ３ｈｓｐは入力データのエコーバックや解析結果，エラーメッセージが書かれるＡＳＣＩＩファイルである．ｄ３ｐｌｏｔはモデル全体，つまりすべての節点，要素の結果が書かれた出力ファイルであり，ポストプロセッサによる後処理に用いられるバイナリ形式のファイルである．ｄ３ｄｕｍｐ０１はリスタート計算を行なうのに必要なファイルであり，通常は解析の最終状態が書かれている．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの出力は，節点に関するものとして変位，速度，加速度，要素に関しては応力６成分と相当塑性ひずみ等である．これ以外にオプションとして，接触面における接触力，剛体壁反力，モデル全体または各物性ごとの運動エネルギー，ひずみエネルギーなどの出力が指定できる．また，シェル要素を用いた塑性加工問題などでは板厚の変化を知りたい場合が多い．そのためシェル要素に関しては板厚の出力が指定できる．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの出力は入力データの中で出力インターバルを指定することによって行なう．例えば解析終了時間０．１秒の解析に対し，ｄ３ｐｌｏｔファイルの出力インターバルを０．００２秒と入力することにより０．００２秒おきに５０ステップ分の出力を行なうことになる．高次の振動モード

が問題となるような解析では出力インターバルを充分細かくする必要がある．そうしないと加速度や応力波形のピークがとらえられない可能性があるからである．

後処理はＪＶＩＳＩＯＮのメインメニューからＰＯＳＴモジュールを起動する．ＰＯＳＴモジュールはｄ３ｐｌｏｔファイルを直接読むことができる．ＰＯＳＴモジュールはＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄが計算し，出力したデータはすべて表示可能であるが，それ以外にも主応力，Ｍｉｓｅｓの相当応力等を内部で計算し，表示する機能がある．また簡単にモデルのアニメーション表示を行なうことができ，構造物の変形挙動を直感的にとらえることができる．図７にＪＶＩＳＩＯＮ／ＰＯＳＴの表示例を示す．図中で左上にあるウィンドウがＪＶＩＳＩＯＮメインメニューである．

### 4.5.結果の評価

解析が正常終了したかどうかはｄ３ｈｓｐファイルの最後に表示される．“ＮＯＲＭＡＬ　ＴＥＲＭＩＮＡＴＩＯＮ”の表示があればまずは安心である．“ＥＲＲＯＲ　ＴＥＲＭＩＮＡＴＩＯＮ”となっていたらエラーメッセージにしたがってエラー原因を取り除く必要がある．エラーの原因としては単純な入力データのミスも多い．無駄な解析時間を費やさないためにも入力データのチェックはとくに念入りに行なうべきであろう．チェック項目としては，初速度や荷重の向きが逆になっていないか，接触面を定義し忘れていないか，必要な物理量の出力の指定を忘れていないかなどである．

解析が途中で異常終了してしまうこともある．よくあるのは特定の要素が過大に変形し，潰れてしまうことである．これは大きな荷重を急激に負荷したときや，柔らかい材料に固い材料が急速に衝突する場合などにみられる．異常終了するまでの途中結果はファイルに書かれているはずなので，後処理によりモデルの変形状態を確認し，特定の箇所に変形が集中していないかどうかをチェックする必要がある．

さらに結果の妥当性の検討を行なうことも必要である．非線形解析で得られた結果の評価は難しいが，少なくとも応力やひずみ，変位量等が工学的にみて妥当な値であるかどうかを確認しなければならない．また実験結果との比較により，形状のモデル化や材料物性の定義について検証することも非常に重要である．

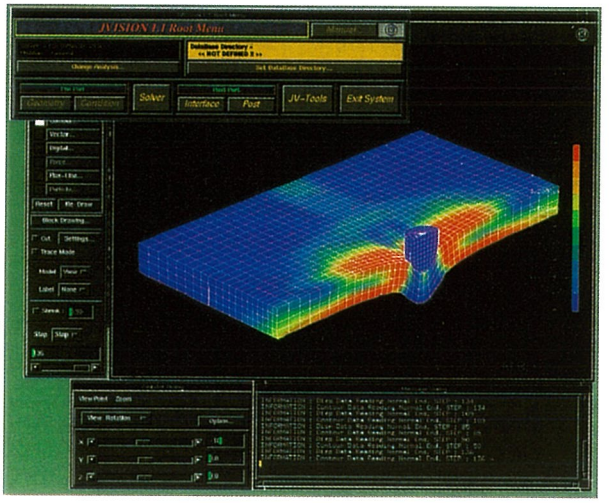



図７　ＪＶＩＳＩＯＮ表示例

## ５．おわりに

本稿では高度に情報化された製造産業におけるコンピュータ利用技術のひとつとしての非線形解析の潜在的なニーズを概観するとともに，非線形解析ソフトＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの機能紹介および使用上の留意点を指摘した．さらに，具体的な解析事例をもとに，解析に必要な入力データや結果の評価のポイント等を示した．

今後このような解析ソフトに求められる点としては，ＧＵＩの拡張による使い易さの改善，高速かつ高精度な解析アルゴリズムの開発，ＣＡＤデータとのリンクによる最適化問題への応用といったことが挙げられる．

ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄの初期バージョン（ＤＹＮＡ３Ｄ）は１９８４年に株式会社日本総合研究所（当時は株式会社日本情報サービス）によって日本国内で初めて商用バージョンとして紹介され，以来今日に至るまで継続的に国内ユーザ向けのリリース，テクニカルサポートが行なわれてきている．現在では最新バージョンとしてＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄ　Ｖ９３６が提供されている．ソフトベンダーとしては，常

にユーザーの立場に立って最新の技術情報を提供し，よりよい製品開発に貢献していきたいと考えている．


参考文献

1）J.O.Hallquist, LS-DYNA3D V936 User's Manual(1995)
2）J.O.Hallquist, LS-DYNA3D Theoretical Manual(1994)
3）戸倉　直，EWS/PCによる衝突・板成形解析の現状と課題，精密工学会誌Vol.62No.10(1996.10)
4）National Crash Analysis Center home page
http://www.ncac.gwu.edu


付録：ＬＳ－ＤＹＮＡ３Ｄ入力データ例

```
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$
*KEYWORD（入力データがキーワードフォーマットであることを宣言する）
$
*TITLE（結果ファイルに出力されるタイトル）
PROJECTILE AND STEEL PLATE IMPACT
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     CONTROL BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*CONTROL_TERMINATION          (Control.8)（解析終了時間の指定）
$   endtim    endcyc     dtmin    endeng    endmas
 0.0080000         0 0.0500000 0.0000000 0.0000000
$
*CONTROL_TIMESTEP             (Control.9)（イローディングオプションの指定）
$   dtinit    tssfac      isdo    tslimt     dt2ms      lctm     erode     msist
 0.0000000 0.0000000         0 0.0000000 0.0000000         0         1         0
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     MATERIAL & PART BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*MAT_RIGID    (Type20)（飛翔体の物性値＝剛体）
$      mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         1 1.000e-08 21000.000 0.3000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$      cmo      con1      con2
 0.0000000
$   lco/a1        a2        a3        v1        v2        v3
 0.0000000
$
*SECTION_SOLID       (Material)（飛翔体の要素タイプの指定＝ソリッド要素）
$    secid    elform       aet
         1         0         0
$
*PART   （飛翔体のパート番号）
projectile
$      pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         1         1         1         0         0         0         0         0
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
```

```
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY   (Type24) (鋼板の物性値＝弾塑性体)
$      mid        ro         e        pr      sigy      etan      eppf      tdel
         2 8.000e-10 21000.000 0.3000000 30.000000 2000.0000 0.0500000 1.000e-09
$        c         p      lcss      lcsr
 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$     eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7      eps8
 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$      es1       es2       es3       es4       es5       es6       es7       es8
 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
*SECTION_SOLID       (Material) (鋼板の要素タイプの指定＝ソリッド要素)
$    secid    elform       aet
         2         0         0
$
*PART   (鋼板のパート番号)
target
$      pid      secid        mid      eosid       hgid       grav     adpopt       tmid
         2          2          2          0          0          0          0          0
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     SET BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*SET_NODE_LIST (初速度を与える節点グループの定義)
         1 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
      3066       3075       3084       3091       3100       3067       3076       3085
      3092       3101       3068       3077       3086       3093       3102       3069
      3078       3087       3094       3103       3070       3079       3088       3095
         :          :          :          :          :          :          :          :
         :          :          :          :          :          :          :          :
         :          :          :          :          :          :          :          :
      4159       4162       4107       4116       4108       4117       4109       4118
      4125       4132       4134       4133       4141       4149       4142       4150
      4154       4151       4155       4160
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     CONTACT                                          (Sec.31) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE                (Sec.31) (接触面の定義)
$      ssid      msid     sstyp     mstyp    sboxid    mboxid       spr       mpr
         1         2         3         3         0         0         0         0
$        fs        fd        dc        vc       vdc    penchk        bt        dt
 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000         0 0.0000000 0.0000000
$       sfs       sfm       sst       mst      sfst      sfmt       fsf       vsf
 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$      isym    erosop      iadi
         0         1         0
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     DATABASE_OPTION                    (Control.22-24) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*DATABASE_GLSTAT                   (Control.22) (モデル全体解析情報出力の指定)
 1.000e-04
$
*DATABASE_MATSUM                   (Control.22) (材料ごとの情報出力の指定)
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
```

```
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
 1.000e-04
$
*DATABASE_RBDOUT                    (Control.24)（剛体に関する計算量出力の指定）
 1.000e-04
$
*DATABASE_RCFORC                    (Control.23)（接触力出力の指定）
 1.000e-04
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     DATABASE_BINARY                   (Control.20) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
$  dt/cycl      lcdt     nobeam      npltc
$
*DATABASE_BINARY_D3PLOT             (Control.20)（結果ファイル出力の指定）
 2.000e-04          0          0          0
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     INITIAL_VELOCITY                (Sec.30) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*INITIAL_VELOCITY                 (Sec.30)（初速度の定義）
$     nsid    nsidex       boxid
$       vx        vy          vz        vxr        vyr        vzr
         1         0           0
 0.0000000 0.0000000-50000.000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     NODE    (Sec.6) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*NODE    (Sec.6)（節点データ）
       1 0.0000000000000 0.0000000000000 0.0000000000000       4       0
       2 17.459625244141 0.0000000000000 0.0000000000000       2       0
       3 36.665210723877 0.0000000000000 0.0000000000000       2       0
       :               :               :               :       :       :
       :               :               :               :       :       :
       :               :               :               :       :       :
    4167 18.569543838501 46.423831939697 310.00000000000       0       0
    4168 9.8058099746704 49.029033660889 310.00000000000       0       0
    4169 0.0000000000000 50.000000000000 310.00000000000       1       0
$
$-------------------------------------------------------------------------------$
$     ELEMENT_SOLID                     (Sec.7) BLOCK
$-------------------------------------------------------------------------------$
$
*ELEMENT_SOLID                      (Sec.7)（要素データ）
$    eid     pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
       1       2     787     788     801     800     956     957     970     969
       2       2     788     789     802     801     957     958     971     970
       3       2     789     790     803     802     958     959     972     971
       :       :       :       :       :       :       :       :       :       :
       :       :       :       :       :       :       :       :       :       :
       :       :       :       :       :       :       :       :       :       :
    3268       1    4094    4092    4097    4098    4163    4161    4166    4167
    3269       1    4095    4094    4098    4099    4164    4163    4167    4168
    3270       1    4096    4095    4099    4100    4165    4164    4168    4169
*END（入力データの最後）
----+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
```