連続体力学とPISCESコード

片山 雅英

1. 連続体力学の概念

周知のように，われわれが日常経験する物質の基本状態には固体・液体・気体の3つが存在し，それらは原子・分子から構成され，それらの間には原子・分子間力といった Newton 力学では説明できない力が働いている．したがって，物質の挙動を捉えようとするとき，剛体・質点といった理想的状態を仮定した Newton 力学だけでは不十分であることは明らかである．原子間に仮想的バネの存在を仮定する初歩的な物性論的議論は，物質が圧縮•膨張に対して応力と歪の間に Hooke の法則が成り立つ領域(弾性域)を経て，線形性を失う領域（塑性域）に至り，過度の外力に対してついには破壊するという現象を良く説明できる．しかし，連続体力学ではこのような物質の微細構造を無視して連続性を仮定するかわりに，空間依存性をもった内部応力の存在の仮定のもとに，Newton の運動方程式および諸々の保存則の式を立てる．さらにそれぞれの物質の特性を規定する係数値(物性値)を含んだ構成方程式あるいは状態方程式によって，物質の物性に応じた計算が行なわれる．

2. Lagrange 表示と Euler 表示

連続体の運動を記述するには2つの代表的な方法がある．すなわち，物質とともに座標値が空間を動いてゆく Lagrange の方法と，座標は空間に固定され，物質がその上を移動してゆく Euler の方法である．ここで紹介する PISCES のような有限差分法コードでは，空間を有限の区間（mesh）に分割し，その区間では諸量が一定であると仮定する．この方法によれば，Lagrange および Euler の方法はそれぞれ図1，図2のように模式的に示される．図から明らかなように，Lagrange の方法では物質が大変形を起こす場合，特に廻り込み等の現象をともなう場合には，mesh がつぶれ計算の続行が不可能になる．一方，Euler の方法では，このような不都合が起こらないかわりに以下のような制約がある．

- mesh の大きさの範囲内では物質境界が不明確である．（図2では1つの cell 内にあたかも境界が存在するかのように描かれているが，物質境界に相当する cell 内では，どこに物質が存在するかはわからない．）
- cell 内の物質等の出入収支を計算するため誤差を生じやすい．
- 物質の履歴がわからない．
- 処理(計算)時間がかかる．

3. PISCES コードの構成と有用性

PISCES は連続体の挙動を解析するために米国の Physics International（現 PISCES INTERNATIONAL）社によって開発された有限

かたやま まさひで センチュリ・リサーチ・センタ

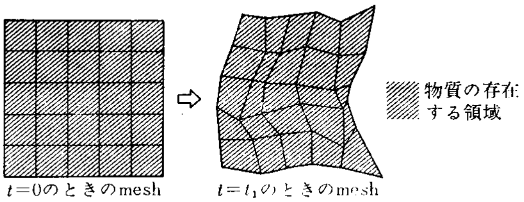

図 1 Lagrangeの方法によるmeshおよび物質の変化

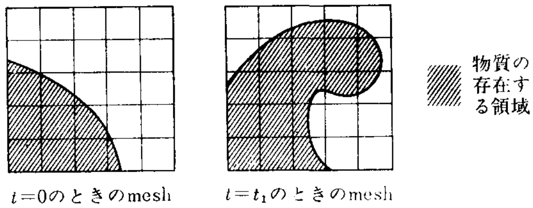

図 2 Eulerの方法によるmeshおよび物質の変化

差分法コンピュータコードである．PISCESは次のような主要プログラム群から構成されている．

i） 2DELK[1],[2] …軸対称・平板体系の2次元問題解析用プログラム

ii） 3DE[3] …………Cartesian座標系の3次元問題解析用プログラム

iii） DDPLOT ……時刻歴編集および分布図(profile) 編集プログラム

iv） TRIPLOT ……3DE用図形編集プログラム

v） PIPLOT………プロッタおよびグラフィック処理用プログラム

ここでiii)～v)は計算結果整理用のプログラムであり，実際の解析プログラムはi), ii)のみである．2DELKのほうはEuler系（E系）とLagrange系(L系)の両方の解析が可能であるが，現状では3DEのほうはE系の解に限られている．以後，より広範な適用範囲をもつ2DELKについて述べる．

差分法は大きく陽解法と陰解法に分けられるがPISCESは前者を採用している．陽解法の特徴は，物質のもつ速度がその音速と比べてもそれほど小さくない，あるいは音速以上の速度をもつような非常に急激な変化をともなう現象の解析に適していることである．

2DELKは次の4つのprocessorをもつ．

- Lagrange系(L系)　①Lagrange Processor
　②Shell processor
　③Rigid processor
- Euler系(E系)　④Euler processor

②と③のprocessorは物質と座標値がともに動くというL系の属性をもつが，①にそれぞれshell理論[4]の仮定，剛体の仮定を付与したもので，簡易計算ルーチンであるということができる．

次に，2DELKの主な特長を挙げる．

i）L系とE系の相互作用が扱える．

ii）L系同士の相互作用をmeshを結合させることなしにも行なえ，L系同士境界面での滑り，gapが計算できる．

iii）構成方程式・状態方程式等をユーザーが任意に定義でき．しかも，2DELK本体で計算された変数のほとんどすべてを参照することができる．

vi）rezoning（meshの切り直し）およびre-startランが行なえる．

v）その他，爆発・熱伝導・2相流等の問題のための特殊な初期条件および境界条件が扱える．

4. 解 析 例

以上に述べた2DELKを実際の問題に適用する段階で問題となる1つにコンピュータの計算時間と記憶容量の問題がある．2DELKのようなコードの適用は，超LSI素子ICメモリを使用した，いわゆる第四世代コンピュータ，ことに最近のCRAY-1シリーズ・CYBER200シリーズといったスーパーコンピュータの出現によって，ますます現実的かつ有意義になったと言える．

以下に，2DELKをわが社のCRAY-1を使って実行した解析例を4つ紹介する．

(A) 鋼材のアルミニウム円柱への侵徹解析

本解析は円環状のストッパーで拘束されたアルミニウム円柱への鋼材の侵徹現象を模擬したものである．体系(図3)は軸対称で，アルミニウムに

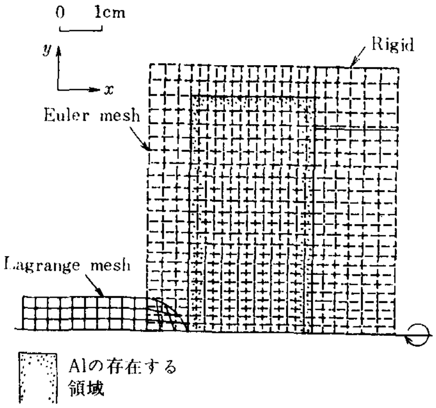

図 3 Fe-Al 侵徹問題の mesh 図および Al 存在領域

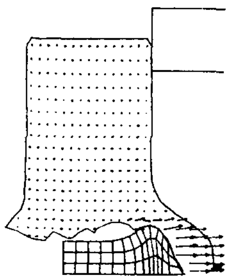

図 4 Al-Fe 侵徹問題の現象図 $t=60(\mu sec)$ (矢印は速度ベクトルを表わす)

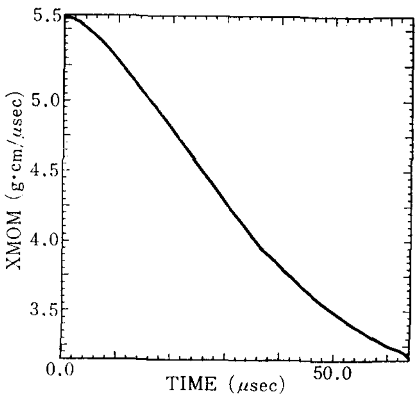

図 5 Al-Fe 侵徹問題　鉄の x 方向運動量履歴

は Euler，鋼材には Lagrange，ストッパーには Rigid の各 processor を適用している．Euler mesh のみ破線で表示しているが，アルミニウムの変形を予想して初期の物質存在域よりも大きく切ってある．L系 mesh の表面にはE系との相互作用面を設けてある．鋼材の初速度は 1000m/s, ストッパーの質量は無限大である．アルミニウム，鋼材ともに材料モデルは Von Mises の降伏モデル，状態方程式は級数近似を用いている．図4が 60μs における現象図，図5が鋼材の x 方向の全運動量履歴を表わしている．本解析では，64μs まで現象を進めたが，CRAY-1 の cp-time は 280s, メモリは 260kwords を要した．(1word=64bits)

(B) TNT爆発解析

平板体系の正方形鋼製容器の中に水が充塡されており，その中心部に置かれた 5g/cm・depth の TNT 火薬が爆発する問題である(図6参照)．水と TNT は Euler，鉄には Lagrange の processor を用いている．(A)と同じく Euler mesh は容器の変形を予想して，初期の物質存在域より大きく切ってある．Lagrange mesh の内側には Euler 物質との相互作用面を設けている．TNT は JWL[5]の状態方程式を用い，爆轟波の伝搬速度は 6930m/s を仮定している．水は −25bar で spall するものとし，状態方程式は級数近似を用いている．鋼は(A)と同様に扱った．図7に 50μs における現象図を示す．図8は中心部の圧力履歴，図9は 20μs の $x=0$cm の平面の圧力分布図である．本解析は定性的理解のための簡易解析ということで，Euler mesh を粗く切った．そのため，TNT の Chapman-Jouguet の圧力値 0.21Mbar の30%程度までしか達成できていない．しかし，表1に示すように，同じ PISCES

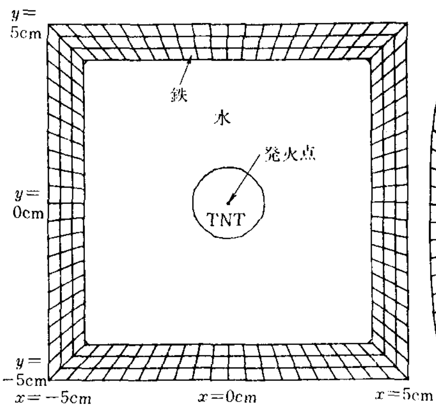

図 6 TNT 爆発解析　初期の Lagrange mesh と火薬領域

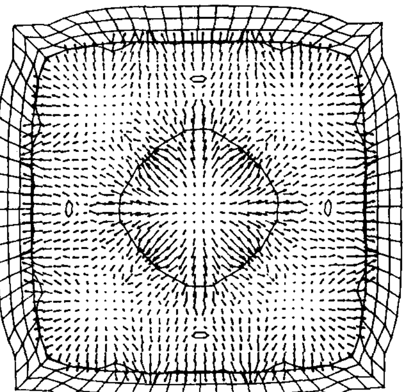

図 7 TNT 爆発解析　$t=50(\mu sec)$ における現象図

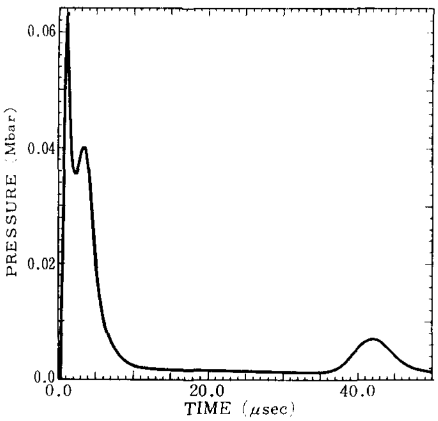

図 8 TNT 爆発解析 中心点における圧力履歴

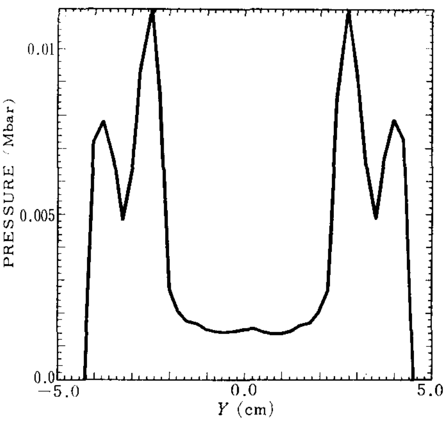

図 9 $x=0$cm の断面における $t=20\mu$s のときの圧力分布図

表 1 PISCES による Chapman-Jouguet 圧力の達成率

Proce-ssor	zone 数	C-J 圧力達成率（%）
Lag-range	20	96
	40	100
Euler	20	72
	40	81

で初期の火薬領域の mesh を細かく切ることにより，ほぼC-J圧力を達成できることが確認されている[6]．本解析は，50μs まで現象を進めるのに，CRAY-1 で 320s の cp-time，295kwords のメモリを要した．

(C) 鉛—ステンレス容器の落下解析

図10は shell のステンレスに覆われた Lagrange の鉛製容器を 10m の高さから落下させた時の解析の mesh 図である．shell と Lagrange の mesh 境界には mesh を結合することなく相互作用を行なうことのできる境界条件を設定している．ステンレスと鉛には，ともに多点近似の応力—歪関係を適用し，歪速度依存性も考慮している．図11が 3.5ms 後の現象図である．本解析の解析

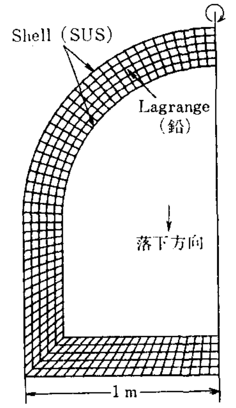

図10 鉛—SUS 容器落下解析 初期の mesh 図

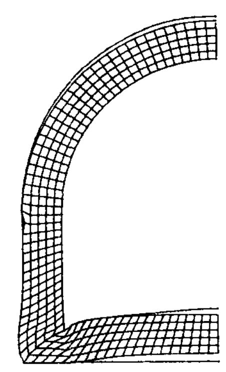

図11 鉛—SUS 容器落下解析 $t=3.5$(msec) における現象図

時間は3.5ms，CRAY-1 の cp-time は 110s，メモリは 265kwords を要した．

(D) HCDA 解析

高速増殖炉（FBR）の安全性研究の一テーマである HCDA（仮想的炉心崩壊事故）時の炉容器の評価にも PISCES が有用である．この場合にも炉容器を軸対称として 2DELK を適用できる．

さて，わが国における FBR の開発機関である動力炉・核燃料開発事業団（動燃）では，炉容器健全性立証の一環としてスケールモデルによる一連の実験を行なっている．実験では液体 Na 冷却材のかわりに水を用い，HCDA 時の放出エネルギーを低爆速火薬[7]で模擬している．ここに示す結果例は，その実験の一部を 2DELK で解析したものである．この解析は，前の 3 つの例に比べてかなり複雑なモデル化を余儀なくされており，その詳細についてここで述べる余裕はないが，主な特徴だけを以下に挙げる．

- 低爆速火薬の燃焼自身も模擬している．
- L系とE系の相互作用面の設定に無理がなく，構造物・流体の変形に対しても不都合を生じないように工夫されている．

図12が 7ms における現象図，図13に図12に示したA点における圧力履歴図，図14は支持板より上部の炉容器の 7ms 時における歪分布図である．本解析は，現象時間 7ms に対して CRAY-1 の

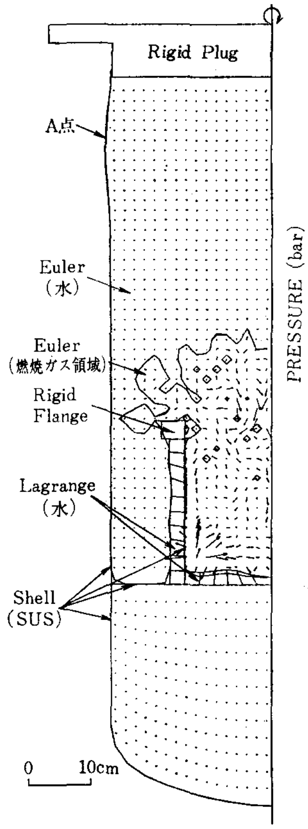

図12 HCDA 解析 $t=7$(msec)における現象図

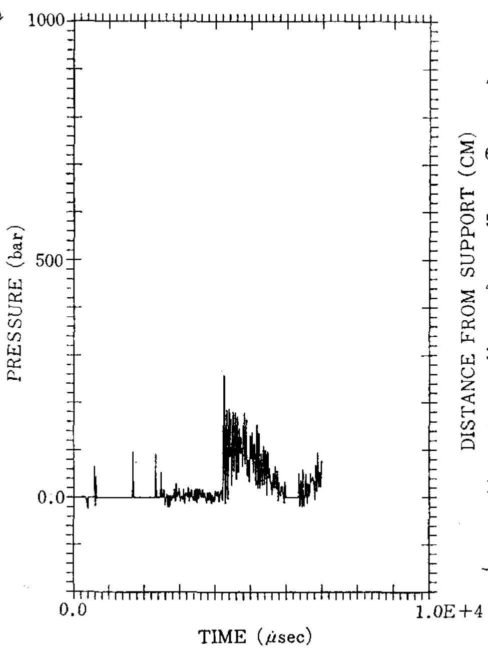

図13 HCDA 解析A点における圧力履歴

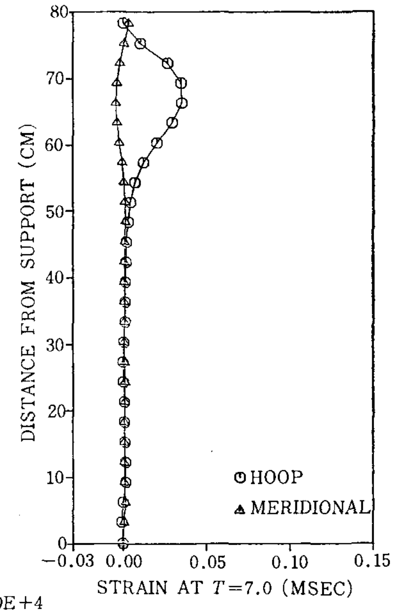

図14 HCDA 解析 炉容器歪分布図

cp-time を 2600s，メモリを 290kwords 要した．

5. 今後の展望

本稿では，2次元解析を中心に述べてきたが，3DE による3次元解析も徐々に行なわれ成果を上げている．現状では Euler 系だけという制約があり，適用分野が限定されているが，近い将来，Lagrange 系の組入れが予定されており，本格的な3次元問題への適用が期待される．

一方，3次元解析にはかなりの演算速度と記憶容量を必要とするが，近年の加速度的な計算機処理能力の向上からみれば，数年後に今のスーパーコンピュータの数十倍の処理能力をもつ機種の出現は十分予想される．これら，3次元現象解析のためのソフトウェアとハードウェアという車の両輪の完成は，真に有意義でかつ経済的な解析のための有力な武器となることは確実である．

〔謝辞〕 4.の解析例の1つとして HCDA の解析結果の掲載を快諾していただいた動燃 FBR 開発本部の吉江伸二氏に心からの謝意を表したい．

参考文献

[1] M.Trigg et al.: PISCES 2DKEL User's Manual revision C, Physics International Co., (1981)
[2] S. Hancock: PISCES 2DELK Finite Difference Equations TCAM76-2, Physics International Co., (1976)
[3] M. Trigg et al.: PISCES 3DE User's Manual version 1, Physics International Co., (1981)
[4] M. Cowler: PISCES 2DELK Shell Processor PI/MSC/377/7, Physics International Co., (1978)
[5] E. Lee et al.: Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products, UCRL-50422, Lawrence Radiation Laboratory (1968)
[6] H. Hancock: Note on the performance of the Standard Burn Logic in PISCES TN-8111/HE, (1981)
[7] 構造機器耐衝撃専門委員会：原型炉低爆速耐衝撃試験，(財)原子力安全研究協会，(1975)