OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	MARCによる圧延の弾塑性有限要素解析
Author(s)	宇都宮, 裕; 齋藤, 好弘
Citation	大阪大学大型計算機センターニュース. 1998, 108, p. 87-97
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/66272
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

ＭＡＲＣによる圧延の弾塑性有限要素解析

大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻
宇都宮　裕・斎藤好弘
E-mail: uts@mat.eng.osaka-u.ac.jp

１．はじめに

近年の計算機ハードウェアとソフトウェアの大幅な進歩により，複雑な物理現象も計算機上であたかも現実であるかのようにシミュレーションできるようになっている．大阪大学においては1997年に大型計算機センターにスーパーコンピュータSX-4が設置されるとともに，学内LANであるODINSの拡充とともなって，このような大規模な数値シミュレーションを行う環境が飛躍的に改善されてきている．従来，工学の分野ではこの種の数値シミュレーションは，俗に「計算屋」と呼ばれる研究者の分野と考えられ，他のいわゆる「実験屋」や「理論屋」の研究者や技術者が足を踏み入れるには，数値計算法，プログラミング，計算機ハードウェアなどの高度な知識が要求され，しきいが高かった．著者は今回，SX-4のモニターとして汎用有限要素法解析ソトウェアMARC[1]を使用させて頂いたが，市販のソフトウェアを用いれば特別なプログラミングは必要ではなく，またユーザ・インターフェイスもかなり改善されてきており，そのしきいはかなり低くなってきている．そこで本稿ではこれまでに数値シミュレーションに縁のなかった他の一般ユーザにもMARCの機能を知って使って頂けるように，まずその概要と，大阪大学計算機センターにおける使用法を簡単に説明する．さらにどのような解析が可能であるかを知って頂くための解析事例として，著者が行った圧延加工の弾塑性解析の結果を紹介する．

２．ＭＡＲＣとＭＥＮＴＡＴの概要

MARCは P.V.Marcal により開発されたプログラム[2]にもとづき，MARC Analysis Research Corp. で開発されている商用の汎用有限要素解析プログラムである．MENTAT[3]はその標準のプリポストシステム，すなわちモデル化や要素分割などのプリ処理および計算結果の可視化などのポスト処理を行うためのソフトウェアである．なお，現在SX-4にインストールされているMARCのバージョンはK6.2である．

MARCは特に非線形分野の解析機能に優れており，線形，大変形，座屈，弾塑性，動的非線形，破壊，境界非線形，熱伝導，連成解析などの各種解析が可能である．本稿でその全ての機能を紹介することは不可能であるので，対象を大変形の弾塑性解析に限定させて頂く．その他の分野についてはマニュアル[1]（計算機センターデバック室に常備），文献[4,5]などを参照されたい．またマーク社のホームページ（http://www.marc.co.jp）にはMARCを用いた研究論文がリストアップされており，参考にすることができる．また特筆すべきMARCの特長として豊富なユーザーサブルーチンが定義できることが挙げられる．ユーザーサブルーチンの作成の詳細は Volume D に記載されている．研究目的でアプリケーションを用いる場合，対象とする部分，例えば構成式のみに修正を加え，他の部分はブラックボックスとするといった使い方には，有益な機能である．

３．ＭＡＲＣとＭＥＮＴＡＴの利用法

現在，大阪大学計算機センターでは，MARCはSX-4(ccsx4.center.osaka-u.ac.jp，IPアドレス：133.1.69.10)に，MENTATはグラフィックワークステーションindigo2 (ccindigo01.center.osaka-u.ac.jp，133.1.4.112) にそれぞれインストールされている．したがって，研究室や自宅から使用する場合，これらの計算機に telnet でログインして使用することになる．このときパスが通っていない場合は，所定のパス[7]を設定する必要がある．ただし，大阪大学の計算機センターではネットワークファイルシステム(NFS)が採用されており，indigo2とSX-4の間でファイルを転送する必要はない．

解析モデルの作成

初めてMARCを使用して解析を行う場合，マニュアルを参照しつつ，入力データを作成することは，コマンド数も多く困難である．しかしながら予め雛形（テンプレート）として用いることのできるデモンストレーション用のデータファイルが数多く用意されているので，それらを参照すると便利である．それらのファイルの詳しい説明はマニュアルEにあり，ファイル自身はディレクトリ /usr/local/appli/marck62/demo に収められているので，それをコピーして動作の確認やデータの修正を行うことができる．また同ディレクトリにはユーザ定義サブルーチンのテンプレートもおかれている．もちろんMENTATを用いてメッシュ分割などのプリ処理を行うこともできる．MENTAT を使用するには，上述のワークステーションIndigo2にログインし，コマンド mentat を入力する．ただし，シリコングラッフィクス社製以外のＸ端末を使用しているときには mentatX と入力する．MENTATの使用法を短時間でマスターしたい方には文献[8]が参考になる．ポスト処理にMENTATを使用する場合，MARCの実行によって得られた*.t19ファイルをMENTATで開くことにより，計算結果を可視化することができる．

MARCの使用法

SX-4にログインし，marck62とタイプする．このときの実行画面を**図１**に示す．ここでMARCを実行するための必要最低限の入力項目について説明する．(1)には解析するデータファイルのファイル名を入力する．(2)は解析に組み込んで使用するユーザー定義のサブルーチンがある場合，そのファイル名を入力する．ただし，ユーザーサブルーチンを組み込み使用する場合，コンパイル後の実行ファイル（テンポラリ・ファイル）が作成されるため，それを十分に格納できるだけのディレクトリ容量が必要である．(3)にはジョブをforegroundで実行するか background で実行するかを指定する．

ジョブの投入

SX-4にももちろんNQSを利用してMARCのジョブを投入することができる．ジョブの投入，確認，キャンセルにはそれぞれ qsub, qstatr, qdel がそれぞれ使用できる．**図２**にバッチジョブの投入の例を示した．**図(a)**では testjob というジョブをSX-4のジョブクラス p4 に投入している．現在のところ，ジョブクラス（制限値）は，会話型，p4，p8，p16，p32，p64 に分けられており，例えば p4 の制限値は，演算時間８時間，主記憶容量2GB，CPU数４などとなっている[9]．**図(b)**は(a)で投

```
ccsx4/usr1/f61253<151>%marck62

MARC K6.2 nec version
-----------------------------
Program name          : marck62
Job ID                : datafile                (1)
User subroutine name  :                         (2)
Restart file job ID   :
Substructure file ID  :
Post file job ID      :
Save generated module: no
Run job in queue      : background              (3)
```

図１　ＭＡＲＣの実行画面

```
ccsx4/usr1/f61253<152>%qsub -q p4 testjob
```

(a) バッチジョブの投入コマンド

```
marck62 -jid datafile -v no -b no
```

(b) 投入するバッチファイル testjob の内容

図２　SX-4へのMARCバッチジョブの投入

入する testjob の内容であり，-jid の後の datafile は解析するデータファイルの名前であり，-v no は実行時に確認しないことを，-b no はジョブをフォアグラウンドで実行することを指定している．

4．圧延加工とその解析

圧延加工は回転する２本のロール間に材料を通して，その厚さを減少させ，目的とする形状に成形する塑性加工法である．鉄鋼材料をはじめとしてほとんどの金属材料は複数回の圧延加工によって成形されており，産業上の役割は極めて重要である．圧延加工の解析には従来，主として初等解析法が用いられてきたが，最近は剛塑性有限要素法（例えば，文献[11-13]）が一般的に用いられている[10]．圧延加工ではロールバイトの入口での降伏すなわち弾性から塑性への遷移と，出口での塑性から弾性への除荷が連続的におきるため弾塑性問題である．しかしながら剛塑性有限要素法では弾性変形を無視しているので予変形域やロールバイト出口の除荷された材料が正確に考慮されておらず，したがってピーニング効果や弾性復元，残留応力を正確に求めるには問題があると考えられる．一方，弾塑性有限要素法はよりこれらの正確な取り扱いが可能である反面，解析時間が長いためこれまで一般には用いられていなかった．

5．ＭＡＲＣによる圧延の弾塑性有限要素解析

ここで紹介する解析事例は厚さ13mm，長さ128mmのばね鋼の径450mmロールによる熱間圧延である．ロールは剛体と仮定し，その周速は30m/minである．材料は弾－完全塑性体とし，ヤング率は21000 kgf/mm^2，ポアソン比は 0.321，降伏応力は 25kgf/mm^2 と仮定した．ロールと材料間の摩擦は固着摩擦とするが，収束計算を効率的に行うため，Kobayashiの提案[14]に従って，わずかに速度依存性をもたせてある．圧下率 r は 30%，40%，50% と変化させた．なお座標系は，圧延方向逆向きに x 軸を，板厚方向に y 軸をとる．

計算は大変形理論（更新ラグランジェ法）に基づく非定常解析により行った．解析対象は上下対称であるので，上半分についてのみ解析を行い，圧延が容易に開始するように，予め材料先端を先付けして先端付近の節点をロールに接触させた状態から計算を開始し，定常域に達するまで解析を行った．用いた要素は三次元の８節点６面体選択低減積分要素（全552要素）あるが，幅広がりがないものと仮定し，z 軸方向を拘束して平面ひずみ問題とした場合の結果を以下に示す．

図３は計算増分（Inc.）の増加にともなう圧延の進行を示したものである．解析は十分に定常状態に到達するまで行ったが，全体の解析時間は SX-4 を用いて，シングル CPU で約９時間であった．定常状態におけるロールバイト付近の格子の変形の拡大図を図４に示す．破線が最小ロールギャップの位置である．圧延前に板面に対して垂直であった線素はせん断変形を受け，圧延方向に倒れている．この現象は付加的せん断変形と呼ばれるが，板の表面に近いほど大きく，また圧下率が高いほど顕著に現れている．この傾向は定性的には異材挿入法による実験結果[15]と一致している．

解析で得られた圧下率 40% の場合の相当応力，相当ひずみ分布，相当ひずみ速度の分布を図５に示す．降伏応力が 25kgf/mm^2 であるので，図の黄色の部分がほぼ塑性域に対応しており，それ以外の部分が弾性域である．予変形域では弾性体はくさび状をなしており，板表面から塑性変形が開始されることがわかる．一方，ロールバイト通過後は除荷されるが残留応力が存在することがわかる．

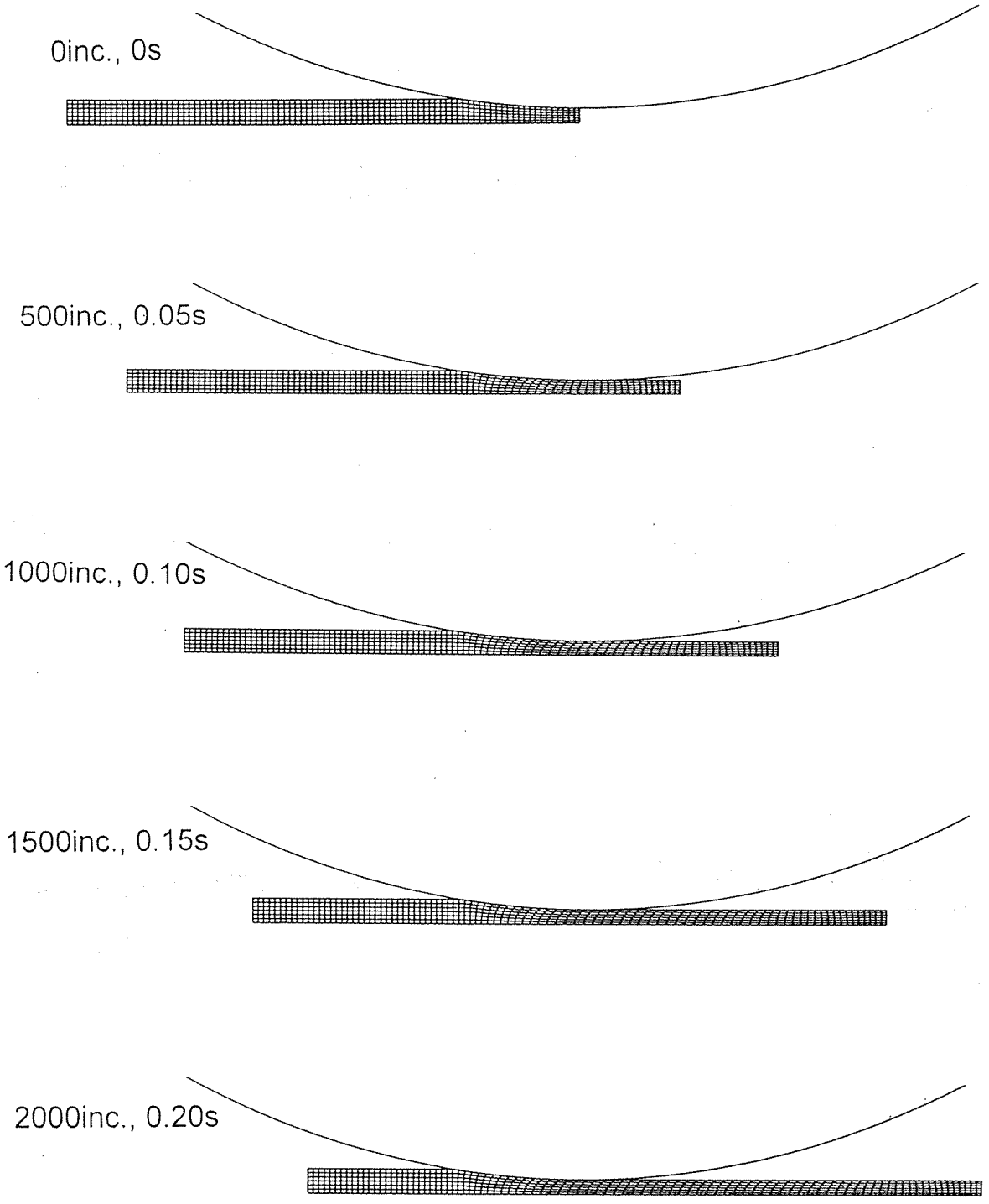


図３　計算増分にともなう圧延の進行
（r=40%）

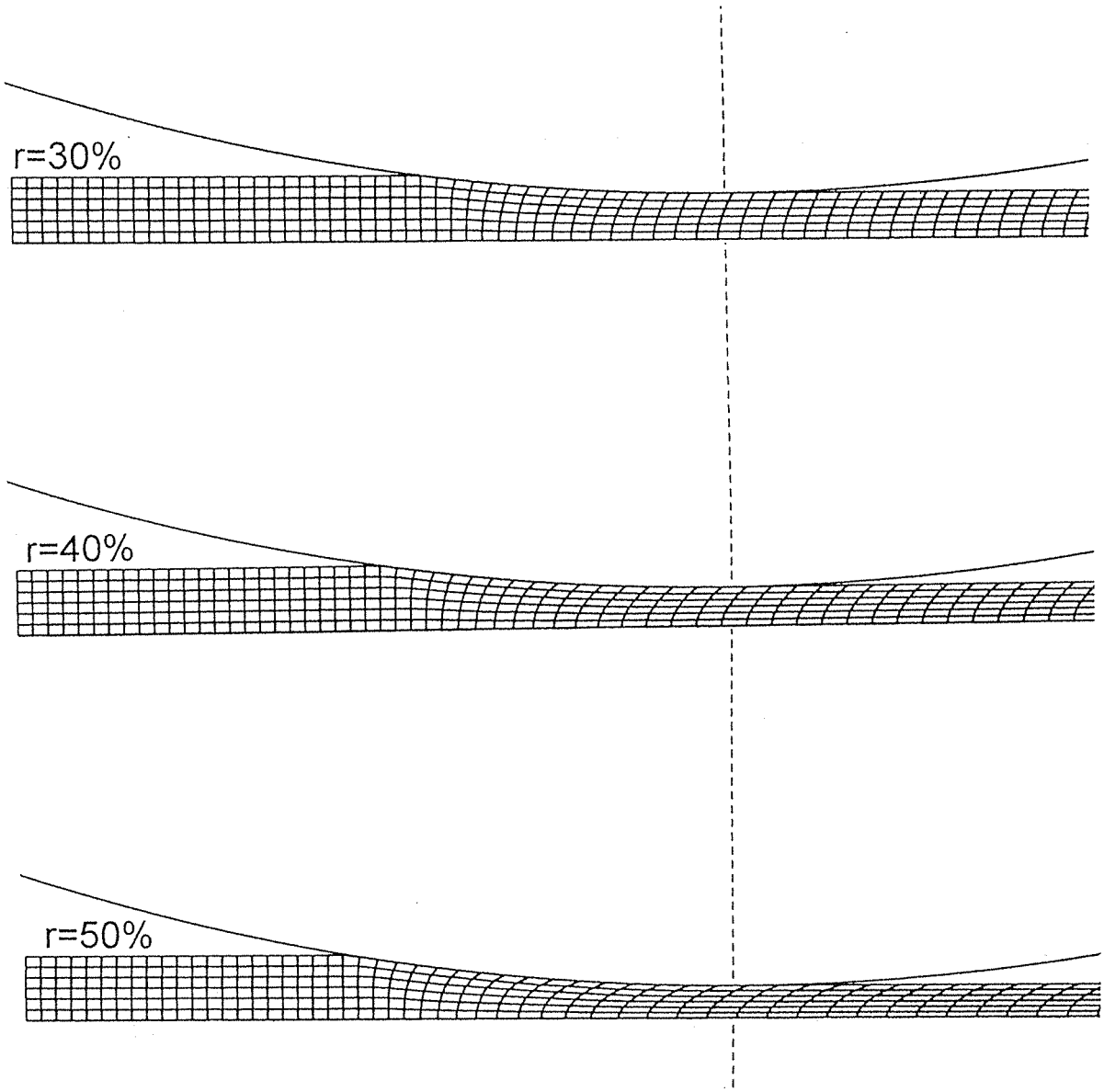


図４　ロールバイト付近の格子の変形

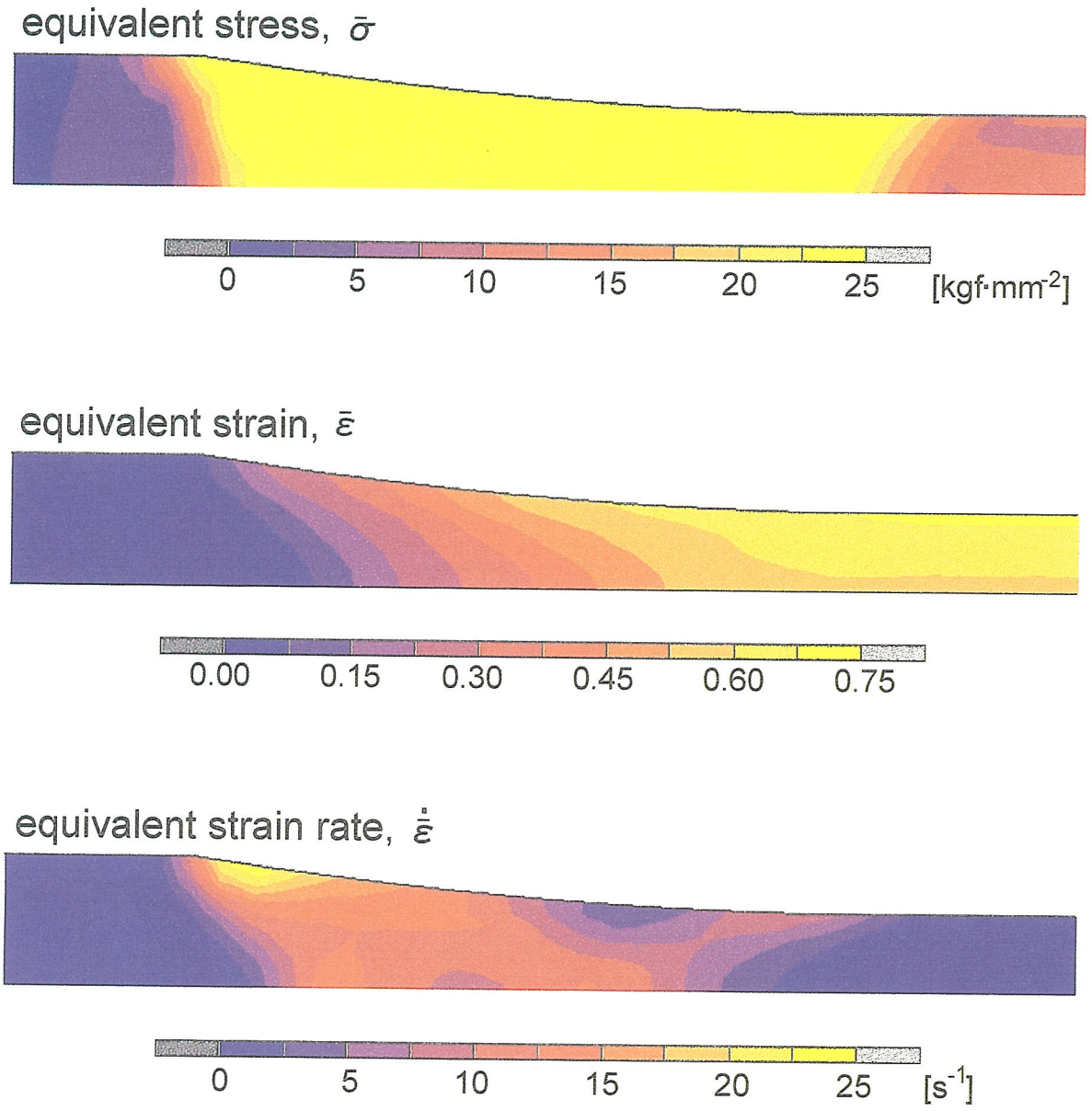


図５　相当応力，相当ひずみ，相当ひずみ速度の分布
（r=40%）

相当ひずみについては，表面に近いほどせん断ひずみが大きいため大きくなるが，ロールバイトを通過するにつれて単調に増加している．相当ひずみ速度はロールバイト入口で速度が急変されるため，その部分にピークが存在する．また中立点付近では，非塑性くさびが存在するために，その部分の相当ひずみ速度は低く，V字型の分布を呈している．

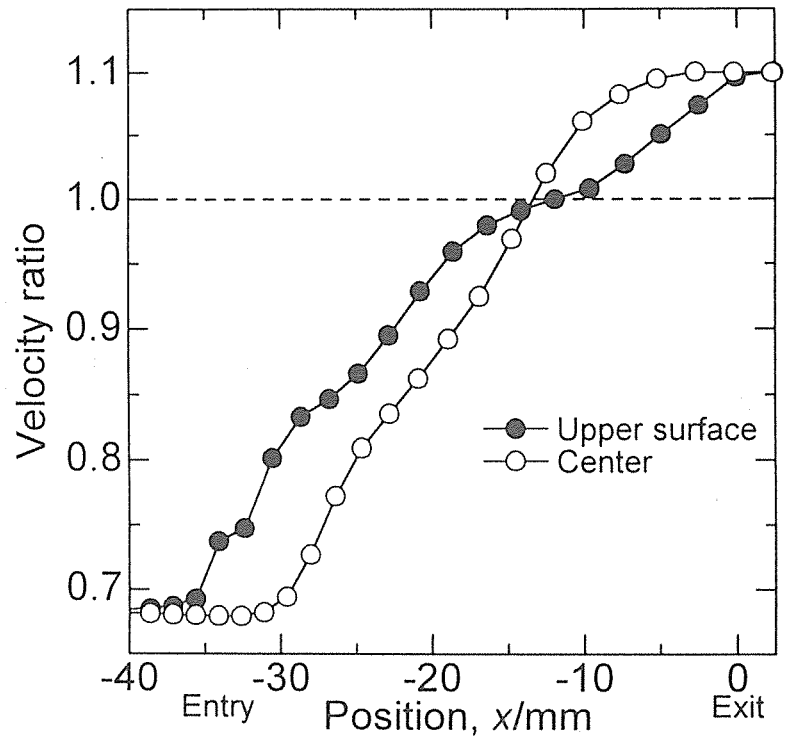
図6(a)は材料の速度比をプロットしたものである．ここで材料の速度比は対称軸上または材料上表面の節点速度とロール周速の比で定義してある．横軸は長手方向の位置で零が最小ロールギャップの位置を，その符号は下流側を正にとっている．上表面から塑性変形が開始されるため，中心の節点よりも上流側で速度比は上昇し始めるが，両者は速度比が1，すなわち中立点付近では一致し，ロールバイト出口付近では逆に，中心の速度が表面より大きく，また出口では定常変形であるため両者の値は一致している．図6(b)は(a)と対応するロール面圧およびロール表面でのせん断応力の分布をプロットしたものである．ロール面圧は入口付近と中立点付近の2カ所でピークをとっている．図中にはスラブ法による理論解であるSimsの式[16]を実線であわせて示してあるが，ロールバイト入口付近を除いて，計算結果はこの実線とよく一致している．また入口付近のピークは予変形域の材料，すなわち弾性くさびによる拘束で生じるピーニングピークと呼ばれるものである．ピーニングピークについては，幅が板厚より狭い工具による押込みの場合の圧力で近似した斎藤の式[17]を一点鎖線でプロットしてあるが，これについても計算結果とよく一致している．せん断応力については絶対値はせん断降伏応力k（単軸降伏応力／$\sqrt{3}$＝14.4kgf/mm^2）にほぼ等しく，ちょうど中立点付近で逆転している．

図7は圧延荷重の圧下率依存性を示したものである．図中には計算結果(EPFEM)とともに，Simsの式に基づいた近似式である志田の式[18]とピーニングを考慮した斎藤の式[17]もプロットしてある．計算結果は斎藤の式とかなりの精度で一致しており，本解析の精度が再確認された．

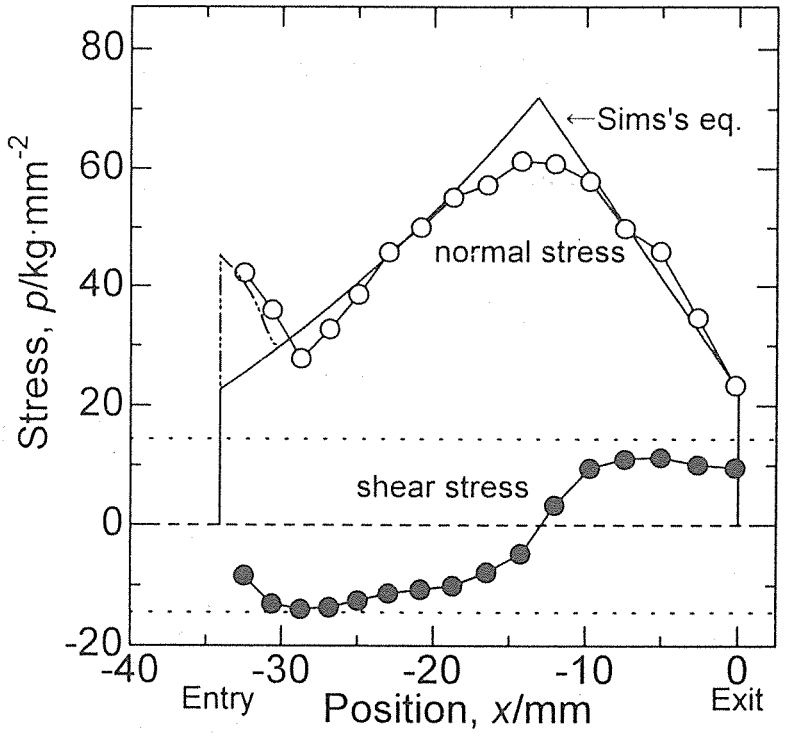
図8は長手方向の残留応力σ_xの分布を示したものある．圧下率 30% の場合は表面に大きな圧縮の残留応力が生じているが，圧下率の増加につれて減少している．これらの傾向は実験結果と定性的には対応しているが[19]，その絶対値の精度については，接触や収束判定の許容量などの影響も無視できないため，今後さらなる検討が必要であると考えている．

6．おわりに

本解析事例ではスーパーコンピュータ SX-4 を用いても9時間という長時間を要した．これは圧延加工は連続加工であるため，ロールギャップの上流と下流で弾－塑性遷移が連続的起き，また材料表面の節点のロールへの接触と離脱が起きるので，高い解析精度を失わないためには，計算増分を小さくせざるを得なかったためである．しかしながら，それによって従来，正確には取り扱うことができなかったピーニングピークや残留応力を求めることができた．この解析はシングル CPU で行われており，SX-4では最大 64 CPU までの並列化が可能であるので，並列化により計算時間は1時間以内になるものと期待される．実際，MARC においても最近リリースされた version K7 では領域分割法による並列化の機能が大幅に強化されている．ここで紹介した事例のように，これまでFEMによる大規模計算のように原理的には可能であるが，実用的には不可能であると考えられてきた大規模のシミュレーションが容易に実行できる環境が整ってきている．また大阪大学学内LANであるODINSも整備されつつあり，ネットワークを経由してのこのようなシミュレーションはますます活発



(a) 速度の分布



(b) 圧延圧力およびせん断応力の分布

図６　速度，圧延圧力およびせん断応力の分布（r=40%）

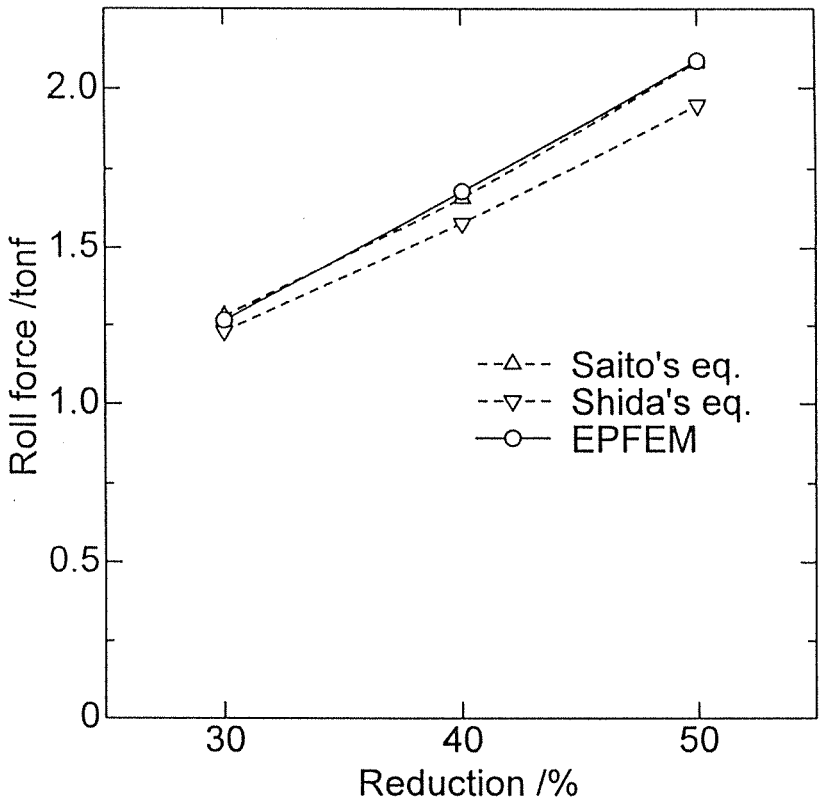


図７　圧延荷重に及ぼす圧下率の影響

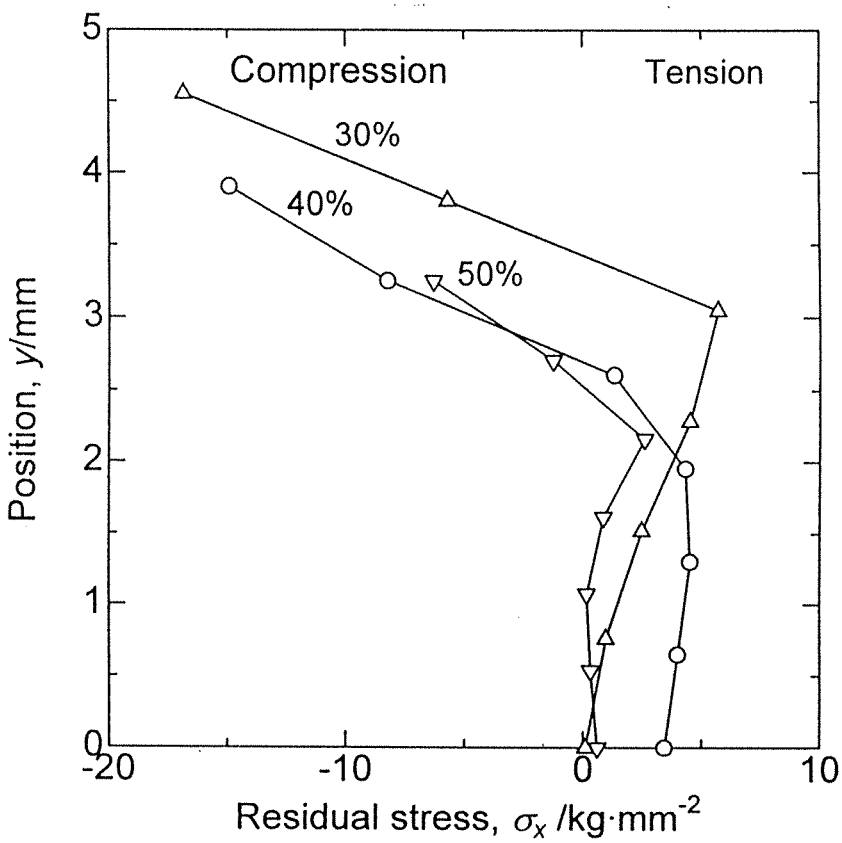


図８　残留応力分布に及ぼす圧下率の影響

になるであろう．MARCの様な市販のソフトウェアを利用する限り，プログラミングなどの予備知識はもはや必要ではないため，これまで「実験屋」や「理論屋」であった研究者，技術者にとっても，数値シミュレーションが比較や考察のための有力なツールとなることは間違いないものと思われる．なお，SX-4の有限要素法のアプリケーションとしてはMARCのほかに動的陽解法にもとづいたLS-DYNA[20]もインストールされており，利用できることを付け加えておく．

最後に，卒業研究として解析を行ってくれた中村明博君と有益なご助言を頂いた日本発条（株）の綾田倫彦氏に深甚なる謝意を表します．また日頃，いろいろな点でお世話になっている大型計算機センター，日本マーク（株）カスタマーサポート部，メーリングリストsxusersの皆様方に謝意を表します．

参考文献

1) MARC Analysis Research Corp.: MARC User's Manual, Vol. A - E, 1994.
2) P.V.Marcal and I.P.King: Int. J. Mech. Sci., 9(1967), pp.143-155.
3) MARC Analysis Research Corp.: MARC MENTAT II, User's Guide, 1996.
4) 日本マーク（株）：大阪大学大型計算機センターニュース，**26**-4(1997), p.72.
5) 栗田　哲：ＳＥＮＡＣ，**27**-4(1994), p.25.
7) 大阪大学大型計算機センターニュース，**27**-1(1997), p.25.
8) 日本マーク（株）マーケティングセールス部：MENTAT II Touch and Try V2.3
（大阪大学計算機センター利用者講習会テキスト，1996）
9) 大阪大学計算機センターニュース，**26**-4(1997), p.9
10) P.Hartley, C.E.N.Sturgess, C.Liu and G.W.Rowe: International Materials Review, **34**-1(1989), p.19.
11) 森謙一郎，塑性と加工，**31**-350(1990), pp.304-310.
12) 柳本　潤，塑性と加工，**37**-421(1996), pp.171-176.
13) M.Pietrzyk and J.G.Lenard, Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process, (1991), Springer-Verlag, p.97.
14) S.Kobayashi, S.I.Oh and T.Altan, Metal Forming and Finite-Element Method, (1989), Oxford Univ. Press, p.123.
15) T.Sakai, Y.Saito, K.Hirano and K.Kato: Trans. ISIJ, **28**(1988), p.1028.
16) R.B.Sims, Proc. Instn. Mech. Engr., **168**(1954), p.191.
17) 斎藤好弘，塑性と加工，**11**-117(1970), p.736.
18) 志田　茂，塑性と加工，**7**-67(1966), p.424.
19) 米谷　茂，今居克哉，能登谷久公，日本金属学会誌，**54**-10(1990), p.1120.
20) 戸倉　直，大阪大学計算機センターニュース，**26**-4(1997), p.85.