

棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システムの開発

柳本 潤*・木内 学*・宮澤 英之*²・浅川 基男*³

User-friendly 3D FEM Simulation System for Bar and Wire Rod Rolling Processes

Jun YANAGIMOTO, Manabu KIUCHI, Hideyuki MIYAZAWA and Motoo ASAKAWA

Synopsis : A new user-friendly three-dimensional simulation system for bar and wire rod rolling processes has been developed. A graphical user interface specially designed for rolling engineers is coupled with strategic FE simulator for rolling process CORMILL. This simulation system enables them to make accurate prediction of load and deformation characteristics of bars and wires under rolling. The effects of roll profiles as well as cross-sectional temperature distributions to width spreads are validated by comparing numerical results obtained by this system and experimental measurement. After four years' developing project organized by ISIJ, this system is now being installed in bar and wire rod rolling industries. A new R&D activities in bar and wire rod rolling will be promoted as the developed system can be easily operated by rolling engineer without special knowledge for non-linear FEM.

Key words : rigid-plastic FEM; bar rolling; wire rod rolling; graphical user interface.

1. 緒言

棒鋼・線材圧延時の被圧延材には複雑な3次元変形が生じるため、初等解析法に基づく各種の2次元理論や幅広がり式の運用が可能な板圧延に比べ、変形特性、負荷特性の定量的な把握ははるかに困難である。従来この分野においては、篠倉¹⁾、斉藤²⁾による幅広がり式・負荷特性式が提示され利用されてきたが、圧延条件やロール形状などのプロセス条件の設定は、多くの場合、一部専門技術者の経験則、実測値、実験式、簡易計算式を用いている状況にあった。1990年代初頭より開始された、圧延加工の3次元FEM解析システムの開発に関する研究は、コンピュータの急速な発達も伴って、変形・負荷特性の解明に大きな成果を上げており、圧延加工プロセス設計・孔型設計における重要なツールとして認識されつつある。現在、圧延加工を3次元FEM解析するにあたっての技術的課題はほぼ克服されており、実生産現場での利用が進められつつある。棒線材圧延のFEM解析は、従来圧延理論の適用が困難であったこの分野において、数値解析技術を援用した「現代圧延数値解析技術」として、今後、圧延プロセス設計・孔型設計に大きく寄与することが期待されている。

圧延を対象としたFEM解析技術は、他の分野のFEM解析と同様、1) プログラム開発者本人が直面している技術課題解決のためのツール、としての開発に始まり、2) プログラム開発者以外の専門技術者がプロセス設計等のため

に利用できるツール、といった段階に現在至っている。ところが、棒線材圧延の分野で強まっている高寸法精度要求、材料改質・材質制御要求などに数値解析技術を援用した「現代圧延数値解析技術」が答えるためには、より進んだ段階、すなわち、3) 工場技術スタッフが現場において日常的な開発業務の中に利用できる「電卓」のごときツール、として整備され、実生産現場に広く普及することが望まれている。しかしながら、3次元大変形問題を取り扱う必然性から、圧延プロセスのFEM解析は、高度な計算力学手法である非線形有限要素法 (Non-linear FEM) を利用しなければならず、そのため、圧延加工の3次元FEM解析システムの多くは、特定の専門技術者・研究者にその操作をゆだねざるを得ない状況にある。実生産現場の技術者がFEM解析システムを「電卓」を使用するがごとく日常の業務に生かせるようにするためには、FEM解析システムを操作する上での専門性を極力排除し、馴染みの良い操作環境を提供することが不可欠である。

本報では、現場で利用できるFEM解析システムを目指し、平成7年度より4年間にわたって活動した「棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システムの開発」研究会（日本鉄鋼協会）により開発された、「棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システム」について報告する。また、開発したシステムの解析事例による妥当性の検討およびより高精度の解析を行う方法についての考察も行う。

平成11年12月8日受付 平成12年4月3日受理 (Received on Dec. 8, 1999; Accepted on Apr. 3, 2000)

* 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi Minato-ku Tokyo 106-8558)

*2 早稲田大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Science & Engineering, Waseda University)

*3 早稲田大学理工学部 (School of Science & Engineering, Waseda University)

2. 棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システムの構成

2.1 基本コンセプト

現在、数多くの市販商用FEMコードが市販されており、工学の広範囲な問題の解明に利用されている。特に動的陽解法に基づく商用コードには、1) 計算時間が短い、2) 大規模モデルの解析に適している、3) 接触問題の解析に強い、4) 陽解法であるため収束不良による計算停止が無い、などの特徴があり、塑性加工を主たる対象とした解析システムが市販され、特に板材成形の分野での適用が積極的にはかられている。商用コードには、さらに汎用性が高い、優れたGraphical User Interfaceを備えている、などの特徴がある反面、こと塑性加工への適用に限定する限りにおいては、塑性加工技術者・研究者によって開発されたコードに比べ精度が劣るとされている。そのため塑性加工技術者・研究者が開発したコードを利用した高精度な解析への期待は高いが、これらのコードは一般にFORTRAN等のグラフィカルな環境を構築するのが困難なプログラム言語によりコーディングされており、プリ・ポストプロセスの操作環境が未整備である。プリ・ポストプロセスの操作性の善し悪しが、操作者にかかる負担を左右するため、操作者は解析結果の精度を多少は犠牲にしても、操作性の優れたシステムを選択する傾向が強いことは否めない事実である。すなわち、塑性加工技術者・研究者が開発した高精度解析コードの普及を阻んでいる大きな要因は、システムの使いにくさであると言える。

従って、国内にて塑性加工技術者・研究者により数多く開発されている塑性加工FEM解析コードは、プリ・ポストプロセスの操作環境を向上させることにより、FEM解析の知識が無い技術者の使用を可能とするよう今後改良が図られなければならない。すなわち圧延を対象としたFEM解析コード(例えばCORMILL)は、プリ・ポストプロセスを圧延技術者に対してカスタマイズしGraphical User Interface(以下、単にGUIと称する)として整備することにより、工場技術スタッフが現場の日常的な開発業務の中で、軽い負担により操作できるシステムとして再構築されなければならない。幸いにして圧延加工の場合、定常状態での塑性流れが主たる解析対象となるため、非定常変形を対象とした商用コードと比較して、塑性加工技術者・研究者により開発されてきた定常流れFEM解析コードは、現状では、計算時間・計算精度の両面で優位にたっている。従って、User-friendlyな圧延加工FEM解析システム開発の意義は高く、この様なシステムは今後ますます厳しくなる寸法精度要求、材質要求に応えた圧延技術開発の場で、基盤ツールとして盛んに利用されていくことが期待されている。

以上のことを踏まえつつ、誰もが手軽に利用できる棒線

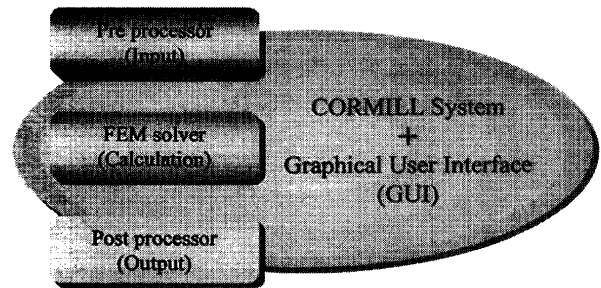


Fig. 1. Structure of user-friendly 3D FEM simulation system for bar and wire rod rolling processes.

材圧延3次元FEM解析システムが具備すべき機能を分析すると、以下の3点に集約できる。

(1) ユーザーが何を入力すれば良いかを直感的に把握できるように、操作環境にGUIを採用し、必要な情報を常に視覚的な形で表示すること。

(2) 入力データは圧延プロセス条件を規定する必要最低限なもの、すなわち日常圧延技術者が共通言語として使用しているものに限定し、この様にして選別された入出力項目を利用しつつデータの入出力を簡略化すること。

(3) 非線形FEM解析を行うのに必要な、収束条件、収束判定条件などのパラメータをデフォルト値として与えることにより、操作者(圧延技術者)がこの様なパラメータに介入する必要性をなくすこと。

2.2 システムの概要

本システムはWindows系OS(Windows NT, Windows 95/98)を搭載したパソコンで動作し、剛塑性FEMに基づく3次元汎用圧延解析コードCORMILL³⁻⁵⁾と、棒線圧延解析専用GUIを基本要素としている。

本システムはFig. 1に示すとおり、データの入力を行うプリプロセッサ、解析を実行するFEMソルバー、結果を出力するポストプロセッサのすべての役割を、1台のパソコンで行うことのできるスタンドアロン型システムである。なお、Pentium Pro 200MHz搭載のパソコンによる計算時間は、400~500要素程度の標準的なモデルで約15分~60分程である。

GUIプログラムの構成と解析の流れをFig. 2に示す。GUIは、(1)計算データ管理プログラム、(2)入力データ作成・計算実行プログラム、(3)計算結果表示プログラムにより構成されている。すべてのGUIプログラムはVisual C++によりWindowsプラットフォーム上で開発されており、CORMILLと相互にリンクさせることにより、入力-計算-出力の流れをスムーズに行うことができるインターフェースを提供している。それぞれのプログラムの具体的な役割については、以後に詳しく説明する。

本システムにて使用するFEMソルバーCORMILLは薄板熱間圧延、棒鋼線材圧延、形鋼圧延、管圧延への適用が可能であり、現在までに10,000を越える計算事例、10を越える事業所での使用実績がある。CORMILLは、ロール

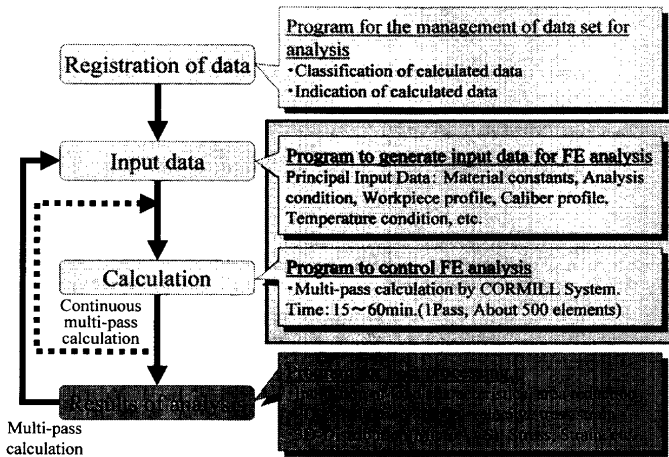


Fig. 2. Block diagram of data management and analysis.

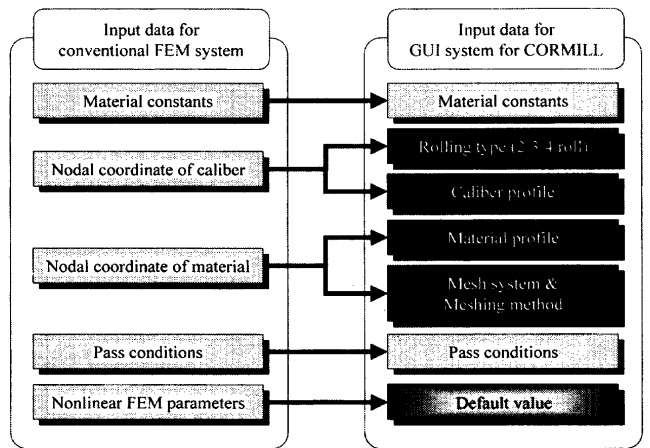


Fig. 3. Comparison of input data structure between conventional FEM system and user-friendly FEM simulation system.

変形を連成した板材圧延解析から完全非対称異形鋼圧延に至るまでの解析機能を有しているが、本システムは、棒鋼・線材圧延のもっとも基本的なものに対象を絞り、システムを構築している。具体的には、

- 1) 対称圧延（ミル形式：2ロール／3ロール／4ロール）
- 2) 孔型形状は棒鋼・線材圧延にて使用される基本的なものに限定
- 3) 温度分布は入口面で既知
- 4) 多パス圧延時のスタンド間張力は既知
- 5) ロールの弾性変形は考慮しない

との前提条件をもとに、定常・剛塑性変形領域での応力・ひずみ、ならびに変形・負荷特性の解明を行うことを目的としている。

2.3 データ入力・計算実行プログラムの構成

データ入力・計算実行プログラムは、データの入力操作と入力したデータの画像表示および CORMILL による FEM 計算の制御を行うプログラムである。FEM 解析システムの使いやすさを最も左右するのがまさにこの部分であり、本システムの開発に当たっては、研究会に参加した各社の棒線材圧延技術者との議論を重ね、数回にわたるテスト使用の結果をフィードバックしつつ修正を加え、できるだけ孔型／工程設計業務に携わる技術者に馴染みの良い用語、記号、図示となるよう配慮しつつ作成した。Fig. 3 に、一般的な汎用圧延解析システムと、開発したシステムとの入力項目の比較を示す。本システムでは、非線形計算に必要な収束条件等の、非線形 FEM 解析の知識が必要な項目については、現在までの CORMILL による豊富な計算事例により決定した棒線材圧延に最適な値をデフォルト値として与えている。また、内部要素分割や孔型形状分布についても極力自動化を行い、ユーザーの負担を低減している。

Fig. 4 はこのプログラムのメイン画面である。画面左側に文字・数値情報として、画面右側に断面プロフィール画像として、入力データを表示する機能を有している。これ

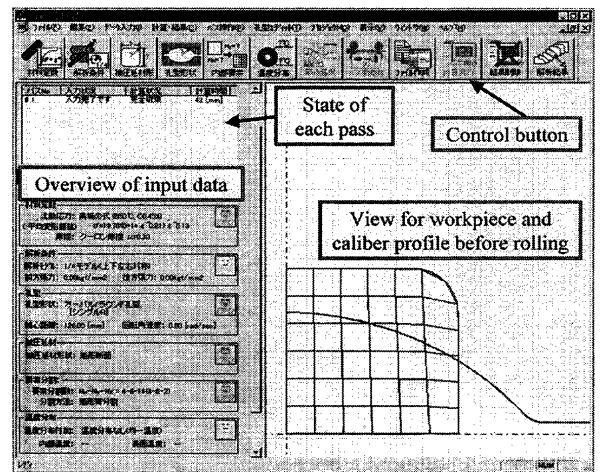


Fig. 4. Main window of input data generator.

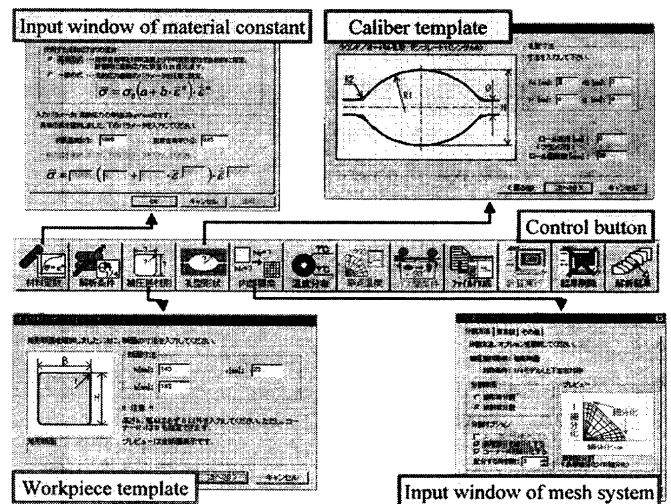


Fig. 5. Sub-windows to input data for analysis.

により、ユーザーはデータの入力状況、入力したデータの正当性を容易に把握することができる。実際のデータの入力操作は、各項目ごとに設けられた入力ウィンドウを画面上部の操作ボタンにより呼び出すことで行うことができる

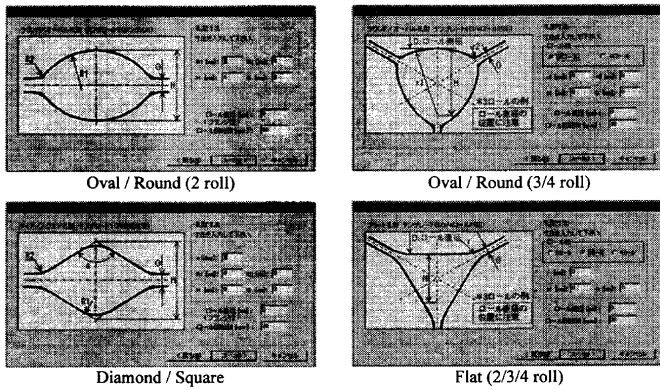


Fig. 6. Template for roll profile.

(Fig. 5 参照)。以下に Fig. 5 に示した入力ウィンドウにおける入力操作の例を示す。

(1) 材料定数ウィンドウ

材料定数として、流動応力、摩擦条件を指定する。流動応力は流動応力曲線のパラメータを直接指定する方法のほか、材料温度、炭素含有率を入力することにより、美坂の式⁹⁾をもとに換算した流動応力曲線を自動的に指定することも可能である。

(2) 孔型形状入力ウィンドウ

従来型のGUIが未整備のシステムでは、孔型形状の入力は最も手間がかかる作業である。棒線圧延は圧延方式がある程度パターン化されているため、各圧延方式において利用されている孔型形状を研究会にて抽出した結果をもとに、Fig. 6 に示すようなテンプレートによる孔型形状の入力を可能とした。ユーザーは図面情報を直接指定するだけで孔型形状を入力することができる。

(3) 被圧延材形状入力ウィンドウ／内部要素生成ウィンドウ

孔型形状と並び、被圧延材節点座標の入力は手間がかかるだけでなく、最適な要素分割を行うためには若干のFEMに関する知識が必要である。本システムでは、被圧延材形状入力ウィンドウ（孔型形状と同様にテンプレート化されている）により被圧延の外形をまず指定し、その後内部要素生成ウィンドウで内部要素の分割方法を指定することにより、FEM解析に必要な節点座標をシステムが自動的に生成する。

2.4 結果表示プログラムの構成

通常のFEM解析システムでは、ユーザーが市販のグラフィックソフトやポストプロセッサを操作して計算結果を可視化する。しかし、可視化ソフトを利用して変形状、応力・ひずみ、圧下力、トルク、減面率等の、必要な数値情報を自在に取り出すことは容易では無い。本システムでは、ユーザーが、計算後すぐに解析結果を参照できるように、計算結果表示プログラムを構成した。ここでは、計算結果の可視化処理はすべて自動化されている。

結果表示プログラムは、以下の項目を自動的に出力する

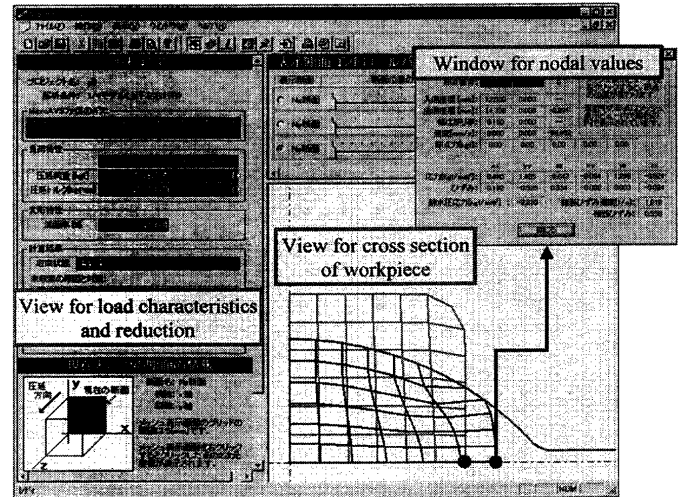


Fig. 7. Main window of output data viewer.

機能を有している。

- (1) 2次元変形状（任意断面）
- (2) 負荷特性（圧延荷重、圧延トルク）
- (3) 減面率
- (4) 節点情報

画面構成をFig. 7に示す。メイン画面左側には、負荷特性、減面率が表示される。右側のウィンドウには、上部コントロールパネルを操作することにより、任意の方向・位置の断面形状が表示（圧延方向の断面については孔型プロフィールおよび入側断面も同時に表示）される。さらに、同ウィンドウでは、孔型との接触面については別色表示され、接触領域を視覚的に把握することが可能である。これらの機能により、大局的な計算結果を即座に把握することができる。

また、大局的なデータだけでなく、局所的な応力・ひずみ等のデータも孔型・工程設計にとっては重要な要素である。このプログラムでは、右側のウィンドウで表示されている被圧延材の節点を選択することにより、節点の座標、応力、ひずみ等を自由に参照することができる。この機能を利用することにより、被圧延材の自由表面の幅広がり、算出などを容易に行うことができる。さらに、市販ポストプロセッサとのリンクにより、必要に応じて、Fig. 8 に示すような3次元グラフィックスによる応力・ひずみ分布を表示することも可能である。

2.5 解析データ管理プログラムの詳細

本システムはパソコン上で動作するが、事業所でのパソコンは複数のユーザーにより利用される場合が多く、1台のパソコン、複数のユーザーによる解析が日常的に行われることが想定される。この場合、プリ処理・ポスト処理の操作環境に加え、計算結果の整理、保管、分類が重要であり、そのための操作性の向上も重要な要素となる。

解析データ管理プログラム（以下プロジェクトマネージャ）は、解析データの管理・分類を支援し、マルチユー

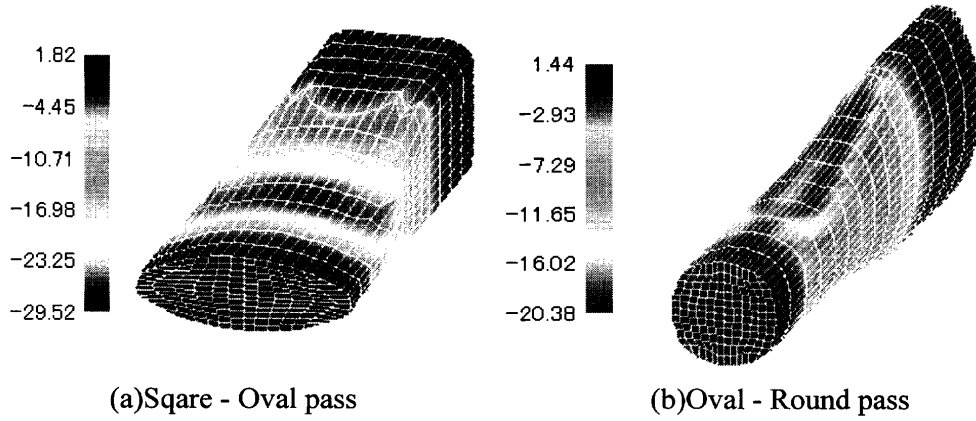


Fig. 8. Three-dimensional distributions of rolling pressure.

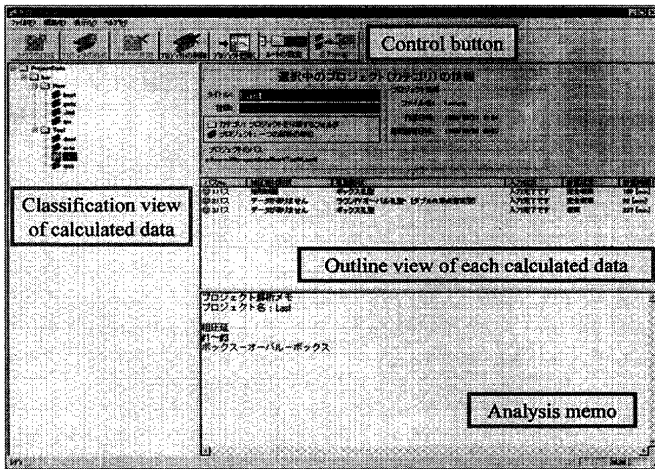


Fig. 9. Main window of management program of data set.

ザーに対応することを目的とするプログラムである。通常の3次元FEM解析システムでは、1ケースの解析ごとに多数の入出力ファイル进行处理しなければならない。従来の入出力ファイルは無論、コンピュータに直接アクセスすることで操作・管理できるが、そのためにはファイル・ディレクトリといったコンピュータの知識が不可欠である。

本システムでは、1ケースの解析に生じる多数のファイルを「プロジェクト」と称する仮想的な解析データ集合として扱うことにより、ユーザーのファイルの直接操作を不要にしている。プロジェクトマネージャは、このプロジェクトを種類（カテゴリー）別に分類し、各プロジェクトのデータ状態を閲覧する機能を有している。

Fig. 9 にプロジェクトマネージャの画面構成を示す。画面左側は、プロジェクトの分類状況を示している。ユーザーはツリー上の任意の位置にカテゴリーを作成し、その下にプロジェクトを作成することにより、任意の系統別に解析データを分類保存することが可能である。また、画面上的プロジェクトをマウスで選択すると、画面右側にその情報として、各パスの被圧延材・孔型形状、データの入力・計算状況等が表示される。この機能により、過去に計算したデータを、すべてのユーザーが自由に閲覧することができる。

Table 1. Input data for calculated spread ratio under various grooves.

Roll diameter / mm	100
Initial stock size / mm	$\phi 14, \square 14$
Rolling speed / rpm	50
Front & Back tensions / MPa	0
Friction coefficient μ	0.30, 0.32, 0.35
Mesh system	Nx-Ny-Nz=6-6-14
Stock temperature / °C	1050
Flow stress / MPa	Misaka's formula $\bar{\sigma} = 104 \cdot 1E^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.13}$

3. 各種孔型の変形解析

以下に本システムを実際に適用し、その特性や妥当性、評価を行い、より高精度な解析を行う方法について考察した。代表的な孔型圧延方式である Square-Flat（矩形接触）、Round-Oval, Square-Diamond（凸形接触）、Square-Oval（凹形接触）における熱間圧延実験と本解析結果を比較することにした。実験データは斎藤ら⁷⁾の熱間圧延実験を参考とし、その圧延をもとにした計算条件を Table 1 に示す。

Fig.10 に本システムによる解析と実験結果の幅広がり率の比較を示す。解析結果は凸型接触、凹型接触などの孔型との接触領域の違いにかかわらず、種々の圧延方式においてもほぼ妥当な結果を与えていることがわかる。強いて言えば、Square-Oval（凹形接触）方式において計算では幅広がり率が過小評価されており、この圧延方式については計算結果の利用には若干の注意を必要とする。

4. 断面内温度分布を考慮した解析

本システムでは断面内の温度分布を考慮した解析を行うことも可能である。そこで、温度分布が変形特性に与える影響について考察した。主な計算条件を Table 2 に示す。温度分布としては表面温度降下を仮定した。すなわち、内部温度を 1000°C とし、表層節点の温度を 1000°C（均一）、900°C, 800°C と変化させて計算した。各表面温度における幅広がり率の解析結果を Fig.11 に示す。

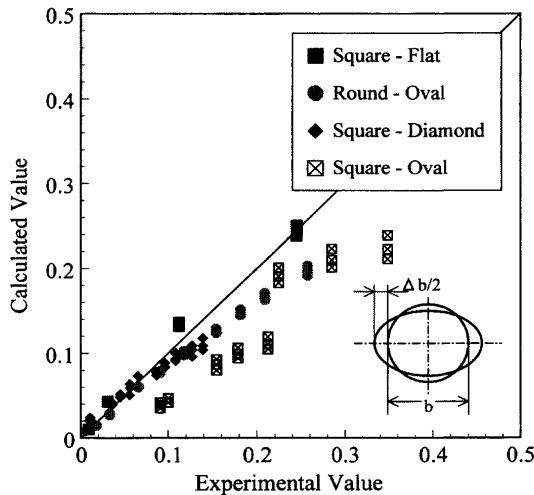


Fig. 10. Comparison of spread ratio $\Delta b/b$ between experimental and calculated values.

Table 2. Input data for calculated spread ratio considering temperature distribution.

Rolling type	Round - Oval
Roll diameter /mm	104
Initial bar diameter /mm	11.6
True reduction /%	22.2
Rolling speed /rpm	70
Front & Back tensions /MPa	0
Friction coefficient μ	0.30
Mesh system	Nx-Ny-Nz=6-6-14
Stock temperature T /°C	Surface 1000, 900, 800 Inner 1000
Flow stress /MPa	Misaka's formula $\bar{\sigma} = 104 \cdot 1e^{-0.21} \bar{\epsilon}^{0.13}$

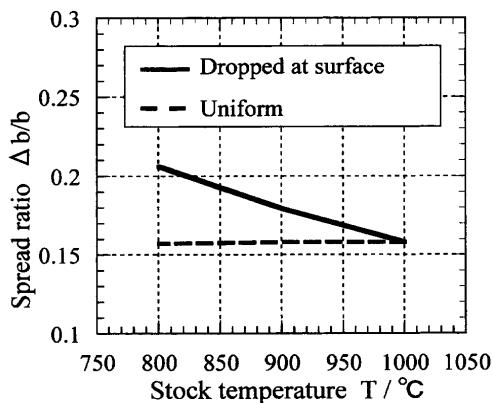


Fig. 11. Relationship between spread ratio and cross-sectional temperature distribution.

計算による幅がりは均一温度の時よりも表面の温度が中心部より降下すると大きくなることを示している。これは現場で「表面温度が下がると充満気味になる」との観察結果が、連続圧延中の変形抵抗の増大によるギャップ開度変化に起因しているのみならず、断面内温度分布による幅がりの増加にも影響されていることを示唆している。なお、後者については、既に温度連成解析⁸⁾によっても確認されている。

さらに、Fig.12 に示した各均一材料温度における炭素鋼のフラット圧延実験の幅がり率の実測結果は⁹⁾、温度変

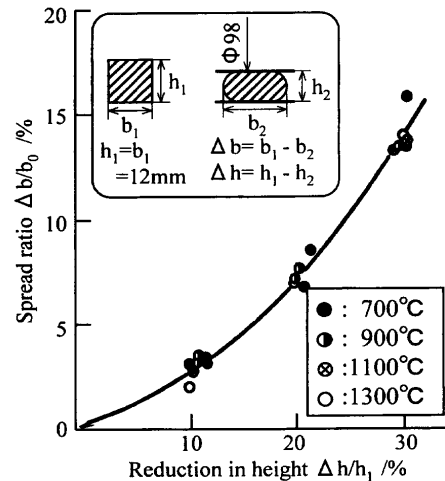


Fig. 12. Change in spread ratio with the elevated temperature which is uniform in cross-section.

化による幅変動の差異があまりないことを示しており、本システムの解析結果とよく一致している。

5. 結言

「棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システムの開発」研究会により開発されたシステムの内容を紹介した。本システムは、実生産現場における孔型設計・プロセス設計用ツールとして世界で初めて実用化された、棒線材圧延専用の3次元FEM解析システムである。今後の課題としては、形鋼など、棒線材圧延以外の圧延への対応、そして実生産現場で問題となっている主に材料にかかわる現象（自由表面疵、結晶粒粗大化等）の解析機能の追加、といった点が考えられる。

なお、開発されたシステムは、国内鉄鋼メーカ共有の資産として日本鉄鋼協会に供託されており、国内線材ミルへの移転が開始されている。本システムの開発にご協力頂いたNKK、住友金属工業、愛知製鋼、新日本製鐵、神戸製鋼所の各社に深く感謝致します。

文 献:

- 1) K.Shinokura and A.Katsuyama: Proc. of 29th Japanese Joint Conference for Technology of Plasticity, Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1978), 109.
- 2) Y.Saito, Y.Takahashi, M.Moriga and K.Kato: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **24** (1983), 1070.
- 3) J.Yanagimoto: *Seisan-Kenkyu*, **43** (1991) 11, 512.
- 4) J.Yanagimoto: *Seisan-Kenkyu*, **49** (1997) 9, 414.
- 5) J.Yanagimoto, M.Kiuchi and Y.Inoue: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **34** (1993) 384, 75.
- 6) Y.Misaka and T.Yoshino: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **8** (1967) 79, 414.
- 7) Y.Saito, M.Moriga, S.Kato, S.Uchida and K.Kato: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976) 14, 1833.
- 8) K.Seki, K.Yamada, S.Hamauzu, M.Kiuchi and J.Yanagimoto: Proc. Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1999), 185.
- 9) M.Asakawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **20** (1979) 225, 949.