

圧延加工の3次元数値解析技術の現状

木内 学*

Present Status of Three-dimensional Numerical Analysis of Rolling Processes

Manabu KIUCHI

Key words : sheet rolling ; shape rollong ; tube rolling ; numerical analysis ; finite element method ; slab method.

1. はじめに

近年、塑性加工各分野における解析技術、特に、被加工材の変形・流動を対象とする数値解析技術の進歩には目覚ましいものがある。それらの成果は、(1)製造ライン・加工工程・加工機械・工具・制御システム等の効率的な計画並びに設計の推進、(2)適切な操業条件の選択と製造ラインの安定化・高効率化の実現、(3)製品欠陥等各種問題の原因究明の迅速化および有効な対応策の探索、などに広く活用され大きな効果を挙げている。

圧延加工の分野においても、板材、棒・線材、型材、管材等の製造の場で、有限要素法や上界法をはじめとする種々の解析理論や計算技術の応用が急速に進みつつある。特に(1)圧延中の被加工材の変形挙動の解明、(2)圧延後の製品の形状・寸法精度の予測、(3)ロールに加わる弾性変形の把握とその影響の評価、(4)製品内の残留応力の推定、などが広範囲に行われ、それらの結果を利用して、(i)パススケジュールやロールプロフィールあるいはロール孔形の最適設計、(ii)新しい圧延機あるいは圧延システムの開発、更には(iii)製品品質のつくり込み、等が各所で進められている。

本稿では、発展を続ける圧延加工の解析技術のうち特に3次元数値解析技術の現状と今後への課題について概説する。

2. 板材圧延の3次元数値解析

板材圧延時の被圧延材の変形挙動の解析技術は、von KármánやOrowanによる数学モデルの提案以降¹⁾、ロールギャップ内の被圧延材の平面ひずみ変形を仮定するいわゆる2次元圧延理論に基づいて発展してきた。しかしながら、この2次元圧延理論(2次元スラブ法)を単純に適用するの

みでは、圧延後の板形状の予測やその制御技術の開発等高度化する技術ニーズに応えられないため、被圧延材を幅方向に分割し、各領域にそれぞれ2次元圧延理論を適用し、圧延荷重や圧下率あるいは圧延後の板厚等の幅方向にみた変化を検討しようとするいわゆる分割モデルを用いた擬3次元解析が行われるようになった²⁾。この方法は、被圧延材の初期板厚分布やロールクラウン・ロール設定間隙等に関する与えられた条件を用い、まずロールの弾性変形を無視して、(1)各分割領域について接触弧に沿う圧延圧力分布を求め、(2)これより計算される単位幅当りの圧延荷重の幅方向分布を用いてロールの扁平変形およびたわみ変形を計算し、(3)その結果より幅方向にみた圧下率の違いを補正して幅方向各位置での圧力分布を計算しなおし、(4)更にこの結果より再びロールの弾性変形を計算して圧下率分布を修正し、という(1)~(4)の手順を繰り返して、(5)幅方向にみた圧下率分布と圧延荷重分布に関する収束解を求め、これらを通して、(6)圧延後の板材の3次元形状を予測しようとする方法である。この擬3次元解析法は、以下に示す各解析法が開発されるまで、板材圧延の解析技術の主流を占め、操業技術や機械設備などの発展に大きく貢献してきた。

1970年代に入り、圧延加工の分野にも有限要素法の導入が始まり、その成果が期待されたが³⁾、被圧延材の3次元変形挙動を扱う数値解析理論そのものと関連する諸問題について十分検討が進んでいなかったこと、およびコンピュータの能力が絶対的に不足していたこともあって、平面ひずみ条件下の2次元圧延の解析の域を脱することは容易ではなく、被圧延材の3次元変形の解析の実現にはなお多くの時を要することとなった。

板材圧延の3次元変形解析への有限要素法の適用が当初予想された程順調に進まない状況の下で、1980年代初め、戸澤らにより、拡張スラブ法による板材圧延の3次元解析

平成4年7月21日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 21, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼解説)

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

法が提案された³⁾。この方法は、(1)従来のスラブ法と同様、板厚方向にみた変形の一様性は仮定するものの、(2)被圧延材の幅方向への流れ、いわゆる、幅張り現象をも考慮した上で、(3)微小スラブ要素に作用する圧延方向・幅方向の釣合方程式を導き、(4)降伏条件、(5)塑性流動則、(6)幅方向流れに関する全体的な力の釣合条件、(7)ロールギャップ入口・出口における圧延方向の応力および力の釣合条件、更に(8)ロールギャップ内における塑性変形と入側・出側における弾性変形との適合条件、等を巧みに組み合わせ、数式モデルと計算手順を構築し、長手方向のみならず幅方向にも分布する圧延圧力分布や幅方向への流れ量を直接的に算出することを可能としたものである。更に、戸澤らは、これらの結果とロールの弾性変形解析とを組み合わせ、両者の適合を図りつつ解析を進めることにより、圧延後の板材の3次元形状の予測までも実行可能とし⁴⁾、実用性の高い板材圧延の3次元数値解析技術およびその応用技術への突破口を開いた。この解析手法は、現在もなお、有効な手法として各所で利用されている。

1980年代後半から1990年代初めにかけて、有限要素法の応用技術は飛躍的に発達し、3次元剛塑性有限要素法（以下3D剛塑性FEM）による板材圧延の数値解析が様々な角度から試みられるようになり、実用に供し得る成果が得られるようになった^{5)~11)}（図1参照）。3D剛塑性FEMによる解析の主たる目的は、(1)エッジドロップを含む圧延後の板形状（クラウン）の詳細且つ正確な予測であり、(2)特に様々な圧延条件が板形状に与える影響を正確に把握すること、更に、(3)板形状の制御機能の高度化を目指して考案され開発された各種の圧延機および圧延ロール¹²⁾の機能を解明し、それらの最適設計および使用条件の体系的整理等を実現すること、等にあるが、これらの目的は次第に達成されつつある。

例えば山田らは⁶⁾⁸⁾、ロールの弾性変形解析システムと3D剛塑性FEMとを結合し、汎用性の高い3次元圧延解析システムを構築し、これを用いて多段圧延機による薄板圧延について系統的な解析を行い、圧延後の板クラウンに与える圧延条件の影響を詳細に調べ、ワークロールを小径化することによりエッジドロップを低減できることなどを示している。また柳本・中村らは¹¹⁾、極小径ワークロールを導入した新形式熱間圧延機の開発に際して、ワークロールの水平面内でのベンディングが被圧延材の幅方向流れに影響を与え、ひいてはエッジドロップの低減に有効であることを、3D剛塑性FEMとスラブ法とを組合わせた複合要素法による解析を通して明らかにし、上記圧延機の開発に有効な指針を与えた。但し、ここで言う複合要素法とは、(1)被圧延材を圧延方向に複数のスラブ要素に分割し、(2)各スラブ要素に作用する力の釣合条件式を導き、(3)要素内に発生する圧延方向ひずみ速度の一様性を仮定し、(4)上記(2)、(3)と与えられた境界条件下での各要素の変形を3

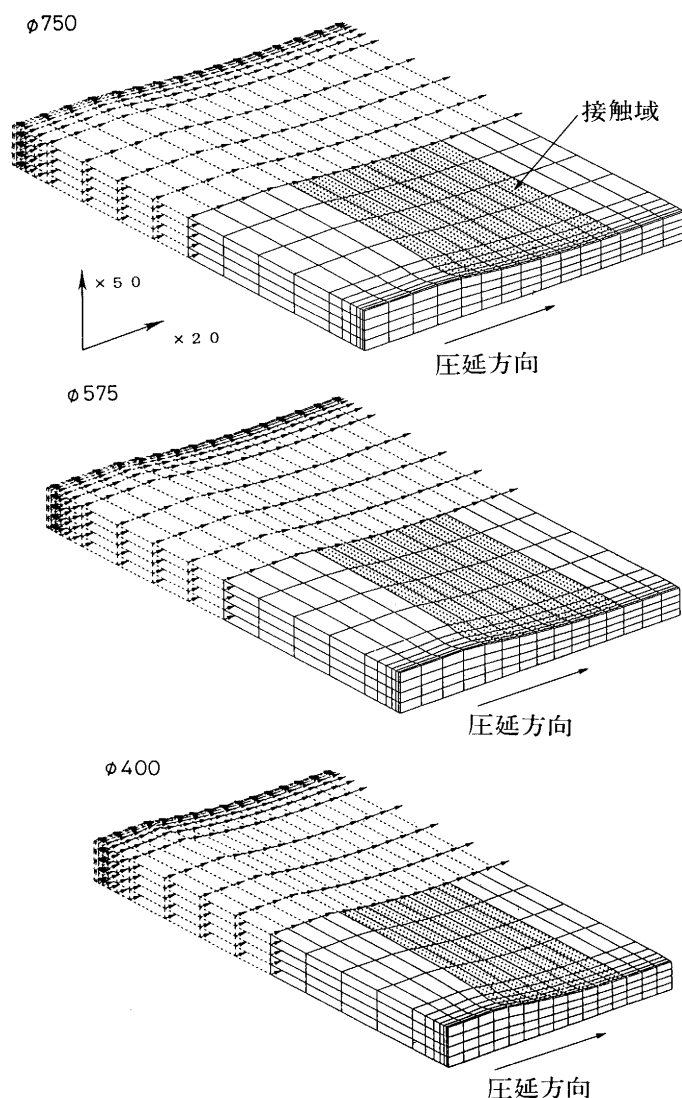


図1 板材圧延の解析事例

D剛塑性FEMを用いて解析することにより、被圧延材の3次元変形挙動を近似的に解析しようとする方法である。更に、佐々木・柳本らは⁹⁾、被圧延材の塑性変形を対象とする3D剛塑性FEMとワークロールの弾性変形を対象とする3D弾性FEMとを組合わけて構築した圧延加工汎用解析システムを用いて、熱間圧延時の板クラウンの変化を詳細に解析し、実測値との対比を通して、実用に供し得るレベルの精度を有する圧延板材の形状予測が可能であることを報告している。

薄板の冷間圧延では、ロール出口近傍での弾性回復等被圧延材の弾性変形挙動の影響が無視できない場合もあり、3次元弾塑性有限要素法（以下、3D弾塑性FEM）の適用の必要性も指摘されている。しかしながら、3D弾塑性FEMの適用は、3D剛塑性FEMの場合に比して格段に難しく、簡便に使用し得る実用性の高い解析手段となるためには、今後検討を要する問題が幾つか残されている。但し、各種塑性加工の2次元変形解析の分野では、2D弾塑性FEMを用いた詳細な解析事例が報告されるようになり¹³⁾、圧延加工

を含む 3 次元解析の分野にも弾塑性FEMの適用は遠からず行われるようになると予想される。

ところで、圧延板材の形状（クラウン）を予測するためには、被圧延材の塑性変形のみならず、ロールの弾性変形および熱的変形の解析も不可欠である。ロールの弾性変形の解析手法としては、(1)いわゆる弾性梁の曲げ理論と分割モデルを用いたワークロール・バックアップロールの軸芯たわみ変形の解析結果¹⁴⁾¹⁵⁾と、(2)集中荷重による半無限体の局部弾性変形理論¹⁶⁾あるいは 2 D弾性FEMや 2 D境界要素法¹⁷⁾を用いて導かれた被圧延材に接するワークロール表面の偏平変形およびワークロール・バックアップロール間の接触変形、とを組み合わせることが広く行われてきた。近年、3 D弾性FEMを用いてワークロールの偏平変形をより正確に予測しようとする試みも始まっているが¹¹⁾、ワークロール・バックアップロールあるいは中間ロールを合わせたロールシステム全体の 3 次元弾性変形挙動を 3 D弾性FEMを用いて直接解析することについては、未だ問題も多く、試みられてはいない。

板材圧延に関連してこれまで採用されてきた 3 次元数値解析手法の組み合わせは、熱間圧延・冷間圧延を問わず、被圧延材の塑性変形解析には拡張スラブ法あるいは 3 D剛塑性FEMを、ロールの弾性変形解析には分割モデルを導入した曲げ理論と偏平変形式、又は同じく曲げ理論・偏平変形式と 3 D弾性FEMを、用いる場合に大別できるが、このような被圧延材の塑性変形とロールの弾性変形との適合を考慮しつつ解析を進めるいわゆる連成解析に関する近年の解析事例をまとめて表 1 に示す¹⁸⁾。

3. 棒・線・形材圧延の 3 次元数値解析

棒・線・形材圧延においては、通常、ロールの弾性変形が製品の寸法精度に与える影響は軽微であり無視できると考えられる。そこで解析の目的はもっぱら被圧延材の 3 次元塑性変形挙動の解明に集約され、ロールギャップにおける被圧延材の 3 次元弾性・塑性流動の詳細や圧延圧力分布の把握あるいは製品の形状・寸法に関する諸問題の検討を可能とする解析技術が求められてきた。これまで、棒・線・

形材圧延時の被圧延材の 3 次元変形解析に関しては、実質的なスラブ法の適用事例は無く、ごく一部のエネルギー法に基づく解析モデルの提案¹⁹⁾²⁰⁾を除けば、使用されている解析手法は全て 3 D剛塑性FEMである。

3 D剛塑性FEMの適用に際しては、板材圧延に比して幾何学的に複雑になる被圧延材とロール表面との接触および剥離の判定、および空間的に複雑となる流線の定常流れへの収束のさせ方、が大きな問題になる。しかしながら、棒・線・形材圧延に対して現時点で要求されている解析精度、特に製品寸法に関する予測精度は板材圧延の場合に比しておおむね 1 桁低いので、板材圧延よりも解析が著しく難しい場合と比較的容易な場合とがある。一般に、(1)被圧延材の圧延後（出口）の断面形状と初期（入口）断面形状との違いが大きい場合、(2)ロールギャップ内の被圧延材に自由表面が多く残されている場合、(3)更に被圧延材に対してロールによる（半径方向）圧縮変形ばかりでなく、曲げ変形が大きく加わる場合、などに解析が困難となり精度の高い結果を得るのが難しくなる傾向がある。

ところで、棒・線・形材圧延への 3 D剛塑性FEMの適用は、棒・線材圧延のラウンド→オーバルパスなど、被圧延材が比較的単純な断面形状を有する場合の解析から始まり²¹⁾²²⁾、アングル材等各種形材の圧延工程²³⁾²⁴⁾、H形鋼のユニバーサル圧延工程^{25)~27)}、あるいは 3 ロールによる棒・線材の圧延工程の解析²⁸⁾²⁹⁾等へと拡大してきた。これらの解析に用いられた 3 D剛塑性FEMは、8 節点 6 面体要素を用い、要素数は 400~700 程度、1 パス当りの計算時間は計算機的能力その他の計算条件にもよるが 20 分~120 分程度であり、かつてその利用には膨大な計算時間を要すると考えられていた 3 D剛塑性FEMも、現在ではごく普通の解析手法として広く利用されるようになってきた³⁰⁾³¹⁾（図 2、3 参照）。

解析手法としてはほぼ確立された観のある 3 D剛塑性FEMは、棒・線・形材圧延の孔形設計・圧延工程設計の分野にも組込まれつつあり、現行の圧延工程の有力な評価手段や診断方法としても活用されている。一方、特定の製品分野については、この解析手段により、各種の条件下での圧延工程を体系的且つ網羅的に解析し、その結果を整理して実用的なデータベースを構築し²⁸⁾、それを用いてパススケジュー

表 1 板材圧延の 3 次元数値解析手法の構成事例¹⁸⁾

	ワークロールのたわみ変形解析	ワークロール～被圧延材間の偏平変形解析	被圧延材の 3 次元変形解析
戸澤ほか ³⁾ (1982)	分割モデル	半無限体式	3 次元スラブ法
渋谷ほか ⁵⁾ (1982)	——	修正半無限体式	近似 3 次元剛塑性FEM (圧縮特性法)
山田ほか ⁶⁾ (1990)	分割モデル	修正半無限体式	3 次元剛塑性FEM (圧縮特性法)
豊島ほか ⁷⁾ (1990)	分割モデル	半無限体式	3 次元剛塑性FEM (ペナルティー法)
柳本ほか ¹¹⁾ (1990)	分割モデル	3 次元弾性FEM	3 次元剛塑性FEM (ラグランジュ乗数法)

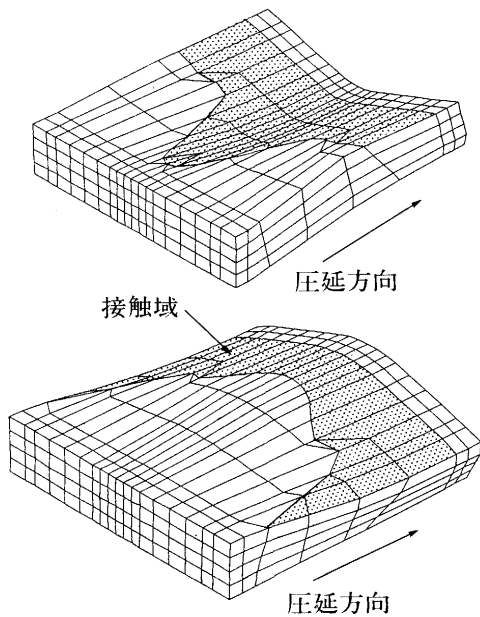


図2 形材圧延の解析事例

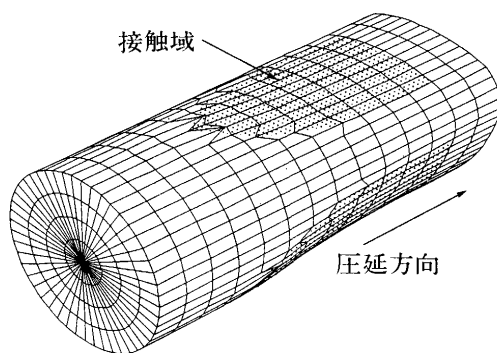


図3 線材圧延の解析事例

ールの最適化や実作業条件の決定を行う試みや、そのようにして蓄積したデータとエキスパートシステムあるいはニューラルネットワーク理論等とを組合わせて、孔形やパススケジュールの設計をより効率的に行う試みなども始まっている³²⁾。いずれにせよ、3D剛塑性FEMは、既に、この分野の要素技術として不可欠になっており、その利用なくしては、今後の技術の革新に対応できないと言えよう。

しかしながら、3D剛塑性FEMをロール孔形やパススケジュールの設計現場におけるツールとして利用するためには、計算に要する時間が長すぎるという問題が依然として残されている。即ち、現実解析を必要とする製品断面形状が複雑化するにしたがって、必要な要素数が増え、接触判定や定常変形の判定が繁雑になり、結果的に計算時間の増大を招くことになる。そのため、利用者が文字通り会話形式で解析の実行と結果の引出しを行い得るような解析手段あるいは解析システムを開発することは、依然として極めて重要な技術的課題である。このような要求に応えるために、棒・線・形材のいわゆる孔形圧延を対象とする、簡

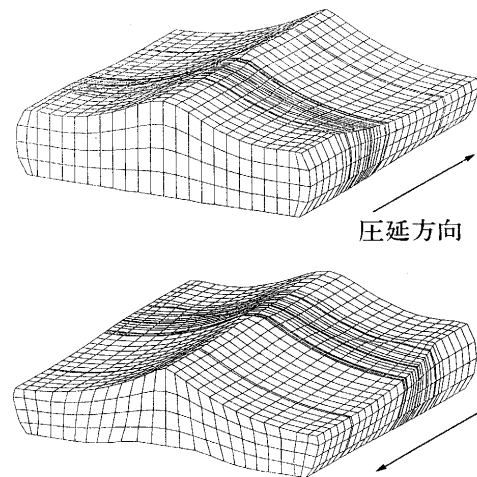


図4 複合要素法による解析事例(1)

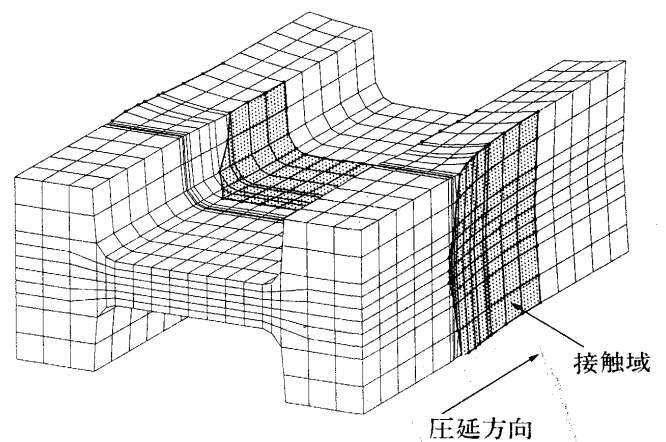


図5 複合要素法による解析事例(2)

易的な3次元解析の手法として、ロールギャップ内の被加工材の変形を複数の段階に分け、各段階をロール孔形による圧縮加工としてとらえ、これを3D剛塑性FEMを用いて解析するという考え方を基本とする(1)複合要素法²⁴⁾33)34)、(2)一般化平面ひずみ法³⁵⁾、(3)変形モード法³⁶⁾などが提案されている。これらの方法では計算時間の大幅な短縮が期待できるので、データの作成等の利用手続きの簡略化について検討を進め、上記の要求を満足し得る設計用ツールとして整備していくことが望まれる(図4、5参照)。

4. 管材圧延の3次元数値解析

圧延各分野の中で、管材圧延の3次元数値解析は最も遅れており、報告事例も少ない。これは、(1)被圧延材並びにロールおよびプラグ・マンドレル等の幾何学的関係が複雑であり、3次元変形解析に要する要素数が必然的に増すこと、(2)ロールと被圧延材との接触判定等が繁雑であること、(3)ロールギャップ内で被加工材各点が描く空間的

軌跡すなわち流線が3次元的に複雑となり、定常流れの条件を満足させることが難しいこと、などによると考えられる。そのため、これまでに報告されている3次元解析の事例は、管材圧延の中でも幾何学的関係が比較的単純なマンドレル圧延³⁷⁾およびレデューシング圧延³⁸⁾を対象とする数例に過ぎない。いずれの場合にも、3D剛塑性FEMが用いられており、この分野でも3D剛塑性FEMが極めて有効な解析手法としてほぼ確立されたと言えよう。レデューシング圧延に関する解析事例は既述の一般化平面ひずみ法によるものではあるが、その結果はパススケジュールの設計や操業条件の選択に十分利用できるものであり、今後、より広範囲の解析の実行を通して、体系的なデータの整備が行われていくものと考えられる。

5. 3次元数値解析技術の課題

上述の動向からもわかるように、今後とも、3D剛塑性FEMが、厚板・薄板、棒・線材・形材、管材等の熱間・冷間を含む様々な圧延加工について、被圧延材の3次元塑性変形挙動を総合的に解明し得る機能性の高い解析手法として広く用いられていくものと考えられる。併せて、薄板の冷間圧延の解析には、3D弾塑性FEMの導入も検討されていくであろう。

3D剛塑性FEMおよび3D弾塑性FEMの理論構成については、過去20年余りの間、多くの研究がなされ、その一般的定式化はほぼ完了した状況にある。しかしながら、具体的な数値解析の実行に伴う問題が依然として残されており、今後、これらの解析手法を多岐にわたる設計・製造の現場において有効かつ簡便な手法として定着させるためには、その応用技術について更なる検討を進める必要がある。以下、そのような問題点と残された課題について述べる。

5・1 解析対象領域・初期条件・境界条件

通常の板材圧延あるいは丸棒・丸線・丸管の圧延の場合のように、被圧延材およびロールの断面形状が対称性を有し単純である場合には、解析対象領域にかかわる主たる問題は、ロール入側における予変形域の拡大、その予変形量、弾性変形をも考慮したロールと被圧延材との接触開始点(線)並びに接触終了点(線)、等の適切な取扱い方に関するものである。他方、異形棒・異形線材や形材の圧延の如く、ロール孔形および被圧延材断面の上下・左右の対称性が保持されていない場合には、単なる予変形域や接触判定の問題以前に、被圧延材の空間的位置や進入方向に関する幾何学的・力学的条件の取扱いに関して十分検討する必要がある。

被圧延材先端がロールに噛みこまれ、非定常変形が進行し、次第に定常変形状態に収束していく過程を逐一解析すれば、上述の問題の多くは解明できることになる。しかしながら、一般に、非定常変形の解析は定常変形の解析に比して多くの時間を要し、多種多様な圧延工程の解析に際し

て、このような非定常変形解析をその都度実行することは容易ではない。

一般論としては、予変形域内に発生するひずみや応力の分布は、ロールギャップ内の被圧延材の変形挙動に大きな影響を与えるので、それらを的確に把握することは重要であり、そのためには、十分な大きさの予変形域を設定しておく必要がある。また、圧延終了後の領域からの拘束がロールギャップ内の被圧延材の変形に与える影響を考慮するために、ロール出側にも適切な大きさの解析対象領域を設定しておくことが望ましい。後述する要素への分割との関係から言えば、(1)板圧延の場合には被圧延材の厚さの、(2)形材圧延の場合にはそのフランジ寸法等代表的な外寸法の、(3)棒・線・管材圧延の場合にはその直径の2～3倍相当の長さの領域あるいは相当する要素数を予変形領域として設定しておくことが望ましい。しかしながら、予変形域の変形量そのものは、ロールギャップ内における被圧延材の変形に比して極めて小さいのが普通であり、解析の際に、この変形量の小ささが収束解を得難くする原因ともなる。それ故、この問題を解決するために、予変形域の変形量の評価方法についての特別の工夫が求められる場合もある。

境界条件のうち、ロール入側・出側における被圧延材の速度および被圧延材に作用する前・後方張力(または圧縮力)についての条件は比較的把握し易く、通常、入側・出側の被圧延材横断面上での圧延方向速度の1様分布性や、所定の前・後方張力を与えることにより数値解析は可能となる。しかしながら現実の圧延加工の解析を実行する場合には、不明確な境界条件が幾つかある。ロールの空間的位置に対する被圧延材の流入高さあるいは流入角についても不明確な場合が多い。多くの実圧延の場合、ロールギャップの上下方向中心と入側の被圧延材の厚さ方向中心とはずれており、また、その流入方向は微小とはいえ水平面から傾いているのが普通である。例えば、厚板圧延の場合、このようなずれが被圧延材の変形挙動に影響を与え、いわゆる非対称変形を誘発し、ロール出側における大きなそりの発生を招く結果となる。それ故、このような入側の境界条件の処理の仕方について、今後、より詳細な検討が求められる。

付言すれば、解析手法およびその結果の妥当性・有用性を評価する場合、気が付かぬままに、現実とは異なる境界条件の下での解析結果と実測値との比較に基づいて議論が行われ、間違った評価が下されることが多くある。解析手法の如何を問わず、それらを活用するためには、初期条件・境界条件についての正しい情報・知識を得ることが極めて重要であることは論を待たない。

5・2 初期分割・初期流線

これまで、3D剛塑性FEMによる圧延加工解析に用いられてきた要素は、いわゆる8節点6面体アイソパラメトリ

ック要素であり、鍛造加工の分野で利用が検討されている4節点4面体要素などを含む他の3次元要素を用いた事例は報告されていない。これは、(1)圧延加工の場合、被加工材の形状が、その断面形状の如何によらず圧延方向に長く、6面体要素の組合わせてその全体形状を表現し易いこと、(2)6面体要素を用いた分割は直感的に理解し易く、多数の節点の幾何学的位置関係を把握し易いこと、(3)各要素の変形が基本的には圧延方向への延伸変形であること、などによると考えられる。

但し、要素への分割の容易さと分割された結果の適切さとは必ずしも一致しない。定常変形の解析では、通常、要素への分割に際して、初期値としての流線を想定し、この流線上に要素の節点を配することが行われるが、この初期流線の与え方にはこれまでのところルール化された有効な方法はなく、試行錯誤に依っているのが実状である。初期流線およびそれらに沿う要素への分割が適切でないため、収束解が求まらなくなる場合も多い。今後、3D剛塑性FEMを定常圧延解析に効果的に活用していくためには、様々な圧延工程について、初期流線の適切な与え方を系統的に検討し、何等かの定式化またはルールを見出すことが求められる。

用いるべき要素の数の問題は、得られる解析精度に関連する問題であることは勿論であるが、実際には計算時間・コストにかかわる問題として議論されることが多い。これまで報告されている圧延加工の3次元数値解析の事例では、殆どの場合、要素数は400~700の範囲であり、これによる計算時間は1パス当り、メインフレームを用いる場合には10分~60分、ワークステーションでは2~4時間程度と言われている。計算時間そのものは、コンピュータの発達と共に、更に大幅に短縮される可能性があり、本質的な問題とはならないようにも思われる。しかしながら、解析対象も、実圧延に伴う問題が増すにつれ、次第に高度化しており、望ましい要素数もそれに応じて増大し、より多くの計算時間を必要とする結果となっている。それ故、各方面から期待されている程には、計算時間の目立った短縮に結び付いていないのが現状である。例えば、薄板圧延時の形状制御技術としてHCミル・PCミル・WSミル・VCロール・CVCロール等の利用技術が急速に進展しているが、これらのミルやロールによる形状修正効果を的確に把握し評価するためには、被圧延材の微小な幅方向流れをも正確に解析する必要がある。そのためには、接触開始点(線)や接触終了点(線)の幅方向にみた微小な変化等を含めて、被圧延材の変形の幅方向にみた相違を極めて精度良く解析することが不可欠であり、それに対応し得る細かな要素分割が求められる。

いずれにせよ、今後、解析を求められる問題の高度化とともに、必要とされる要素数は少なくとも8節点6面体要素で1600~2400程度(板材圧延の場合、長手(圧延)方向

20分割×幅方向20分割×厚さ方向4~6分割)にまで増大することが予想される。この程度の要素を用いて現状と同程度の計算時間内に結果を得るためには、計算機の演算速度は現行の20~40倍程度になることが必要となろう。

5・3 構成方程式・摩擦モデル式

被圧延材がひずみ速度依存性を有する剛塑性体であると考えるときに構成方程式については、既に、Misesの降伏関数を塑性ポテンシャルとする構成式(流動則)をはじめ、Hillの降伏関数やその他の応力の二次形式で表された降伏関数より異方性をも考慮しつつ導かれる構成式に至るまで、種々提案されており、既に、各構成式の特性の検討や一般的定型化はほぼ完了していると言える。但し、それらの構成式を運用するに際しては、応力やひずみの具体的計算方法に十分注意を払う必要がある。

例えば、3D剛塑性FEMの解析精度を高めるために、構成式に関連して多くの時間を費して検討されてきた問題として、変形過程における各応力成分のひずみ・ひずみ速度およびひずみ径路への依存性、更にその応力とひずみの時間的・空間的变化あるいは変化量の定義に関する問題がある。被加工材内部の応力状態およびひずみ状態は加工の進行とともに時々刻々変化しており、加えて、被加工材の空間的移動や回転が発生しているため、応力・ひずみあるいはそれらの変化挙動(速度)を客観性(objectivity)のある形で把握し表現するためには、それらの定義を的確且つ詳細に行う必要がある。増分論に基づく数値解析においては、思わぬ誤差の累積が最終結果の精度を劣化させることがあるので注意を要する。

摩擦モデルは、従来より様々な角度より検討され、多くの議論を集めているが、基本的には、(1)クーロン摩擦モデル、(2)固着摩擦状態を含む定摩擦モデル、(3)両者の考え方を部分的に合成した混合摩擦モデル、の3種類があり、種々の状況下でその特徴を考慮しつつ使用されている。

このうち、定摩擦モデルは最も簡明な近似に基づいており、被圧延材に作用する摩擦力が圧延圧力に依存せず定まるとしているため、効率的な解析の実行にとって都合がよく、板材圧延の3次元解析にも用いられている。しかしながら、摩擦定数の値そのものについては不明な点が多く、当然のことながら、圧延条件により影響されるため、予めその値を適切に選ぶことが難しいという難点がある。

一方、クーロン摩擦モデルでは、被圧延材に加わる摩擦力は、未知量であるロール面圧に依存するとして導入されるため、解析を効率的に行わんとする場合に不利となる。例えば、被圧延材とロール表面との接触開始位置の厳密な算出に際して、接触あるいは非接触の判定を難しくする、などの影響を与える。

ところで、今後、板材圧延の分野で求められる解析手法は、ロールプロファイルや圧延条件の微細な変化に対応して発生する被圧延材の流動や板形状の微小な変化をのがさず

に把握し得るものでなければならぬが、そのためには、解析の各段階での精度を出来得る限り高める必要がある。この様な要求に応えるために、クーロン摩擦モデルにおける摩擦係数 μ および定摩擦モデルの摩擦定数 m について、様々な圧延条件に対応する値を蓄積し、一般的に利用し得るデータとして整備する必要がある。

3D剛塑性FEMによる解析を実行するに当たって、被圧延材の非圧縮性の条件の導入の仕方も得られる解の特性に微妙な影響を与える。一般にLagrange乗数法による解は、非圧縮性の条件を厳しく満足する解であることから、微小な塑性流動の解明を要する板材圧延の解析等には最も望ましい方法といえることができる。

一方、ペナルティ法は圧延加工の3次元解析の分野でもこれまで広く用いられてきたが、微小な変形・流動の追跡を必要とする場合には、ペナルティ数の与え方と汎関数の最小値の判定には相応の注意を要する。更に、圧縮特性法も、ペナルティ法に比較して簡便であり、且つ汎関数を最小化する可容速度を容易に探索し易いことから、広く用いられているが、ペナルティ法と同様、要求される解の精度とのかねあいを事前に十分検討する必要がある。

5・4 接触判定・流線の修正

被圧延材の先・後端の非定常変形挙動の解析の場合を除いて、通常の圧延加工の解析では、定常流れ条件を満足する必要があるが、流線の修正を繰り返し、収束解を求める努力が払われる。異形材の圧延時にみられるように、ロール孔形や被圧延材断面の幾何学的関係が複雑になると、流線の3次元(空間的)形状も複雑化し、解析の過程で修正を繰り返すとは言え、その方法が適切でないと、収束解が得られなくなる。

3D剛塑性FEMによる解析では、解析の各段階で当初想定した流線上に節点を配した要素分割を用いて有限要素解析を行い、その結果得られる節点速度より流線を修正し、その流線を用いて再び同様な解析を繰り返し、流線の修正量および接触領域に関する修正量などが一定限界以下になったときに、解は収束したと判断する。その際、各段階で得られた節点速度をそのまま用いて流線を修正することが必ずしも適切ではなく、適当な補正を行うことが望ましい場合がある。この補正の仕方については、今のところ、一般化された手法・ルールは無く、様々な圧延工程・圧延条件について経験則を整理し蓄積していくことが求められている。

同様な意味で、既に指摘したように、解析を開始するに際しての初期流線の与え方は極めて重要であり、初期流線が適切であれば、解析途中での流線の修正方法に多少の問題があっても収束解を得易い反面、初期流線が不適切であると、収束解を得ることが極めて困難となる。特に、異形材の圧延の際に多くみられるように、被圧延材とロールとの接触が局部的且つ偏っており、更に上ロールと下ロール

では接触位置が異なる場合などでは、被圧延材に加わる変形は、ロールによる圧縮変形だけではなく、幅方向・長手方向の曲げ変形も大きな割合を占め、且つ局部的な幅張り等も発生するため、初期流線の想定はもちろん、その修正についても非常に見通しを立て難くなる場合が多い。残念ながら、初期流線の与え方についても一般化された手法やルールはなく、様々な解析事例を通して有効な知見を収集する努力が必要である。

流線の修正は、被圧延材とロールとの接触開始点あるいは接触領域の修正を伴う。特に、接触開始点の修正は、ロールギャップ内の被圧延材の変形に大きな影響を与えるので、その修正方法の適否は収束解の得やすさに密接に結び付いている。通常、3D剛塑性FEM解析では、接触開始点および終了点は、分割節点と一致させる必要があるため、接触開始点および終了点の修正が要素への分割や要素形状のバランスを悪化させ、このことがその近傍での流線の収束性を損う場合もある。最も注意すべきは、接触判定ということから、被圧延材の表面上の接点位置あるいは流線の修正のみに目を奪われ、その内部の節点位置・流線の修正方法に対する配慮を欠くことのないようにすることである。

6. 結言

本稿では、圧延加工の3次元数値解析技術の現状と問題点について述べた。その広範且つ効率的な応用を実現するためには、解決すべき問題が幾つか残されているものの、3D剛塑性FEMに代表される3次元数値解析技術は、今や必須の要素技術となり、このような解析技術の活用なくしては、今後の圧延技術の革新は難しいと言える。技術進化が激しい現在においては、短時間に多数の数値実験の実行を可能とする理論および解析技術の効果的な利用能力の有無が、技術競争の勝敗を左右する場面が増しており、この傾向は今後ますます強くなると思われる。理論的予測や解析結果が実測値と必ずしも一致しないことをもって、理論や解析技術の不完全さが指摘されることが多いが、そのような評価を急ぐあまり、それらが有する大きな潜在能力を見誤ってはならない。理論や解析技術の持つ可能性を活用し得るか否かは、一方で、利用者たる我々の努力と工夫にもかかっているのである。

文 献

- 1) T. von Karman: Z. Ang. Math. und Mech., **5** (1925), p.139
- 2) K.N. Shohet and N.A. Townsend: J. Iron Steel Inst., **206** (1968) 11, p.1088
- 3) 戸澤康寿, 石川孝司, 岩田徳利: 塑性と加工, **23** (1982), p.1181
- 4) 湯川伸樹, 石川孝司, 戸澤康寿: 塑性と加工, **28** (1987), p.251
- 5) 渋谷聡, 直井孝之, 二階堂英幸, 柴田克己: 第33回塑性加工連合講演会, (1982), p.147
- 6) 山田健二, 小川 茂, 阿高松男, 菊間敏夫: 第41回塑性加工連合講演会, (1990), p.63
- 7) 豊島史郎, 池田昌則: 第41回塑性加工連合講演会, (1990), p.71

- 8) 山田健二, 小川 茂, 阿高松男:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.323
- 9) 佐々木保, 柳本 潤, 河野輝雄, 木内 学:平成3年春季塑性加工講演会, (1991), p.157
- 10) 柳本 潤, 木内 学, 中村 充, 倉橋隆郎:塑性と加工, **32** (1991), p.1000
- 11) 柳本 潤, 木内 学:塑性と加工, **32** (1991), p.1007
- 12) 阿高松男:塑性と加工, **32** (1991), p.410
- 13) M.Gotoh and Y.Shibata:J.Materials Processing Technology, **27** (1991), p.193
- 14) M.D.Stone and R.Gray:Iron Steel Eng.,(1965)Aug., p.83
- 15) 塩崎宏行:塑性と加工, **9** (1968), p.315
- 16) 戸澤康寿, 上田雅信:塑性と加工, **11** (1970), p.29
- 17) 馬曉鵬, 木原諄二, 相澤龍彦:昭和62年春季塑性加工講演会, (1987), p.67
- 18) 柳本 潤:塑性と加工, **33** (1992), p.13
- 19) 加藤和典:塑性と加工, **27** (1985), p.97
- 20) 小森和武, 加藤和典:塑性と加工, **31** (1990), p.357
- 21) 森謙一郎, 小坂田宏造:日本機械学会論文集(A), **56** (1990), p.268
- 22) 柳本 潤, 木内 学:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.413
- 23) 柳本 潤, 木内 学, 井上幸雄:平成4年度塑性加工春季講演会, (1992), p.717
- 24) N. Kim, S. Kobayashi and T. Altan:Int.J.Machine,Tools and Manufacture, **31** (1991), p.553
- 25) 井田真樹, 山田健二, 林 慎也, 浜渦修一, 藤本 武:平成2年春季塑性加工講演会, (1990), p.61
- 26) 林 慎也, 井田真樹, 藤本 武, 山田健二, 浜渦修一:材料とプロセス, **4** (1991), p.1434
- 27) 木内 学, 柳本 潤:材料とプロセス, **4** (1991), p.1438
- 28) 木内 学, 柳本 潤, 井上幸雄:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.425
- 29) 中村 充, 柳本 潤, 乙部厚志, 木内 学, 野口幸雄:第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.433
- 30) 二階堂英幸, 林 宏行, 侍留 誠, 瀬戸恒雄, 直井孝之:塑性と加工, **31** (1990), p.378
- 31) 梶原哲雄, 大森舜二, 荒谷博史, 小川幸保:平成2年春季塑性加工講演会, (1990), p.73
- 32) 森謙一郎, 相蘭岳生, 小坂田宏造:材料とプロセス, **4** (1991), p.1442
- 33) 木内 学, 柳本 潤, 園田 徹, 田中誠一:塑性と加工, **31** (1990), p.182
- 34) 柳本 潤, 木内 学:塑性と加工, **31** (1990), p.384
- 35) 葛 紀夫, 白石光信, 小林 剛:平成2年春季塑性加工講演会, (1990), p.65
- 36) 辛 平, 木原諄二, 相沢龍彦:塑性と加工, **31** (1990), p.372
- 37) 山田将之, 山田健夫, 小坂田宏造, 岡田達夫:第41回塑性加工連合講演会, (1990), p.343
- 38) 森謙一郎, 三原 豊, 曾谷保博, 秋田真次:塑性と加工, **32** (1991), p.1262