

技術解説

Technical Review

塑性加工シミュレーションの動向

石川孝司*

Trend of Numerical Simulation in Metal Forming

Takashi Ishikawa

Synopsis

The role of the simulation in the metal forming is to shorten the time and cost of trial and error in the stage of a process design and a die design on a computer. The fast progress in computer makes it possible to analyze complicated problems and non-visible phenomenon can be solved in detail now. Two or more physical phenomena of nonlinear problems, so-called multi-scale or multi-physical problems are also beginning to be tried to simulate. The simulation is an important and effective tool in metal forming. Applications of simulation for prediction of microstructure in hot forging, prediction of ductile fracture and prediction of transcription of roll surface in skin pass rolling are introduced. Trend of numerical simulation in metal forming is described.

1. はじめに

経済・技術のグローバル化による国際的な競争の中で、日本の製造業の競争力を強化し生き残りをはかっていくためには、製品に対するニーズの多様化、新製品開発期間の短縮、環境、省エネルギー対策の強化、低コスト化への追及、熟練技術者不足問題などの今まで以上に困難な課題を解決していかななくてはならない。このような課題を克服して、競争力を高めるための手段として注目され、急速に普及してきたのがIT技術である。とりわけ、新製品の設計から製造までの期間を短縮し、合理的に実行するために数値シミュレーションが注目されている。有限要素法（FEM）をはじめとするコンピュータ支援工学（CAE）ソフトは成形・加工の分野でも2D（2次元）解析から3D（3次元）解析へと実用レベルになりつつあり、鋳造、射出成形、圧延、鍛造、プレス成形、粉末成形、機械加工、熱処理など製造業の広い分野で利用が進んできている。この背景には解析技術および計算機能力の進歩があることはいうまでもない。1940年代終りに電子計算機の時代の幕が開かれて以来、計算機自体の能力の進歩はめざましく、その計算速度は過去50年間、ほぼ10年で100倍

の割合で進歩してきており、50年間で100億倍である。しかも、パソコンレベルのマシンでその演算速度を実現している。Fig.1は塑性加工分野での有限要素シミュレーションの発展の経緯を示したものである。1960年代から1970年代に大学などでFEMの計算プログラムが開発され、最初は2次元定常解析から2次元非定常解析へ、そして3次元解析へと進歩してきた。大学や研究所で開発されたものをベースにして現在では各種の市販のソフトが入手可能であり、数値計算用の大型計算機でなく、工場の片隅に置かれたパソコンで実用計算ができる時代になっている。これを有効に使いこなすかどうかは今後の企業の生き残りに関係するといっても過言ではない。

シミュレーションは、コンピュータ内に作成した数学モデルに、考慮すべき条件を与えたときのモデルの挙動を計算することであるが、上述のコンピュータの飛躍的な進歩は、より大きく複雑な問題をより詳細に解析することを可能とし、粗いモデルでは分からなかった現象も解明できるようになってきた。非線形問題のしかも複数の物理現象を連成して扱う問題（マルチスケール、マルチフィジックス）の解析も試みはじめられている。

2011年11月3日受付

*名古屋大学大学院工学研究科，工博（Dr., Eng., Dept. of Materials Science and Engineering, Nagoya University）

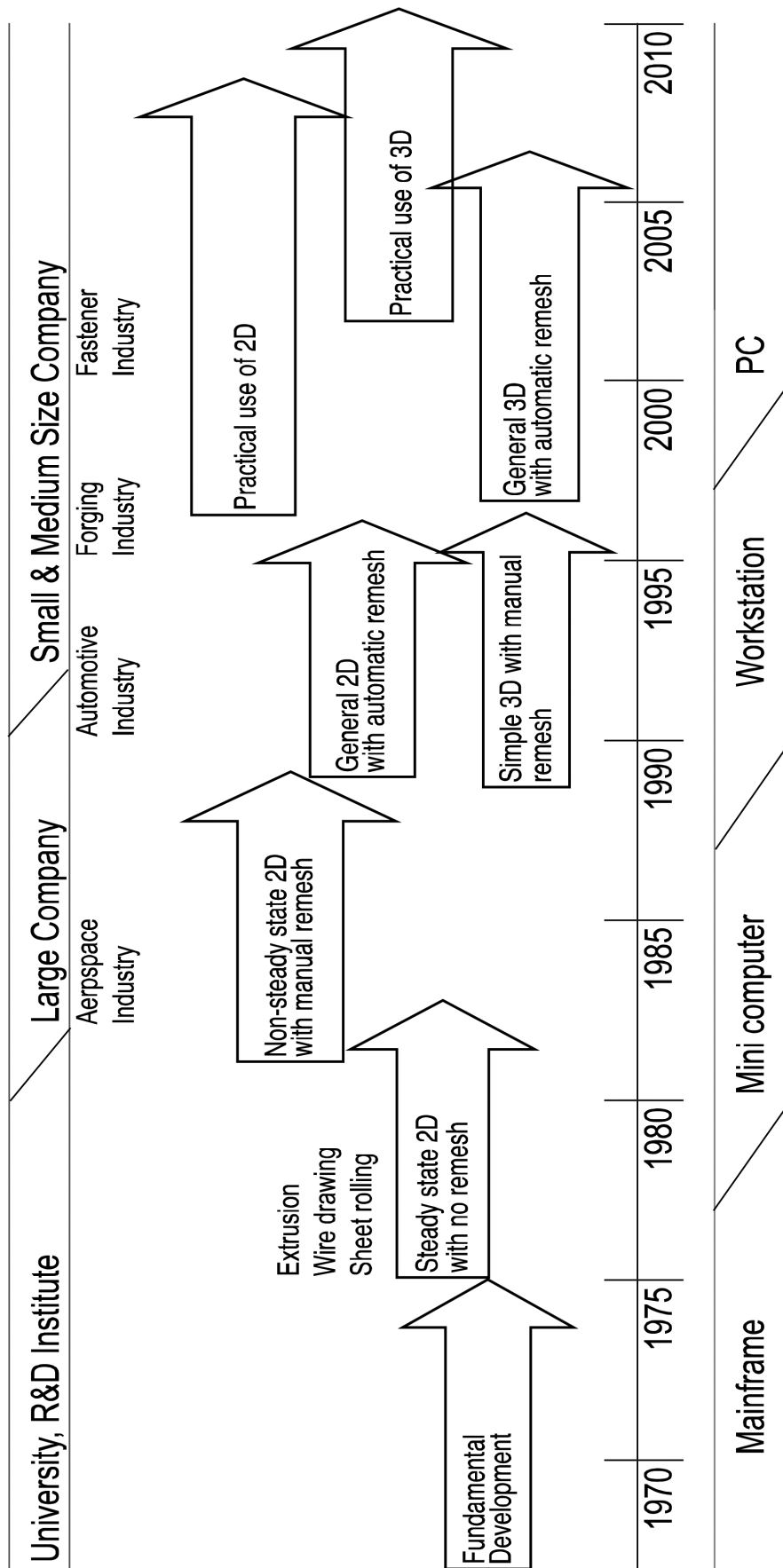


Fig. 1. Advancement of finite element method in metal forming.

2. シミュレーションの役割

塑性加工分野でのシミュレーションの役割は、工程設計、金型設計の段階で条件を絞り込むための試行錯誤を計算機上でを行い、実際の工程修正や金型の修正を最小限におさえ、製作期間、製作コストを大幅に減らすことにある。見えないものを見えるようにできることは非常に有力な武器であり、使い方を誤らなければその導入効果は絶大である。解析対象は、材料流動、応力、ひずみ、温度、成形限界、破壊限界、材質・強度、金型寿命など多岐にわたるが、シミュレーションの担当者は、まず何のために、何が知りたいのかという解析の目的を明確にしておき、その目的にあわせたモデリング、解析規模、解析条件などを決めなければならない。モデリングは、実形状が3次元でも2次元に近似できれば、できるだけ簡単な方がよい。また、出てきた結果をそのまま信じてはいけない。常に実現象や実験結果をみて、それとの整合性、妥当性、精度などに注目することが重要である。もう一つ注意すべきことがある。シミュレーションソフトを導入することで、分からないことがすべて解析でき、新しいプロセスまで生み出せるような錯覚を持つ人がいる。これは大きな誤りで、解析ソフトでは与えられたデータに対する答しか出てこない。どのような解析をして、結果をどう利用し新プロセス創成に結びつけるかは、人間のやる仕事でありこれが最も重要なことである。

ここでは、塑性加工の各種問題に対するシミュレーション適用事例を紹介する。

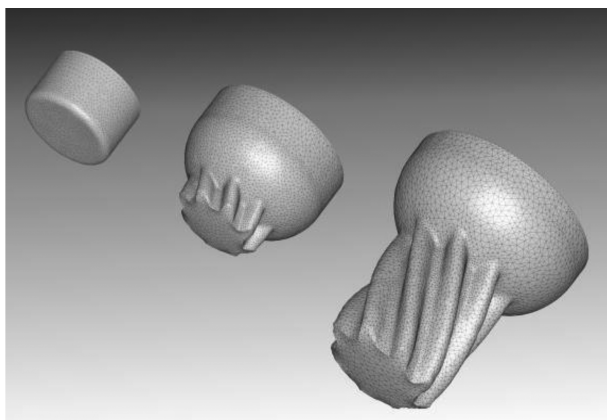


Fig.2. Calculated results of metal flow in forging of helical gear¹⁾.

3. 解析事例

3. 1 材料流動、応力、ひずみの解析

鍛造のプロセスデザイン時に、金型内への材料の流動、特に型隅への材料充満の様子や、金型負荷の検討のため型面圧の可視化に適用される。Fig.2にヘリカルギアの押出し鍛造時の材料流動を解析した例¹⁾を示す。また、Fig.3は実際の鍛造品とシミュレーションから求められた成形過程を比較したもの²⁾である、シミュレーションによって得られたモデル形状は、各段階で鍛造品と良く一致しており、不具合の状態も確認できることがわかる。現在ではこのような3次元解析が数時間で可能である。さらに3次元解析でも複雑な転造やリングローリングの解析も可能になってきている。転造やリングローリングでは、変形領域が被加工材の一部であり、しかも被加工材全体が回転、移動するため、接触やメッシュなどの問題が複雑となる。Fig.4はねじ転造の解析を行い(Fig.4(a))、金型の面圧(Fig.4(b))を検討したもので、面圧の高い部分とFig.4(c)に示した金型の摩耗部との対応を確認することができる。Fig.5にはリングローリングの解析結果を示す。

板成形の解析にも、しわ、割れの予測なども含め3次元レベルで実用的に使用されている。ただ、高張力鋼の成形解析におけるスプリングバックの予測精度が問題となっており、材料の構成式、バウシinger効果のモデル化などの研究が進められている³⁾。

3. 2 組織・材質予測

鉄鋼材料の熱間圧延においては、TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)技術に代表されるように、材質制御技術が積極的に導入され、優れた延性を持った高強度鋼板が製造されている。材質予測技術は、その高張力鋼板の開発に貢献しており、今後ますます期待されている。鍛造の場合には変形が非定常でひずみなどが大きく分布するので、取り扱いが単純ではない。しかし、前述のように熱との連成有限要素解析が実用段階に入りつつある現在では、鍛造加工における材質予測精度も向上していくものと考えられる⁴⁾。材料流動や型への負荷だけを考えるのではなく、加工後の組織、機械的性質もねらいをつけた新たな鍛造の工程設計、プロセス設計手法が完成し、部品全体が均一な、さらに進化して部分的に特性の異なる、いわゆる傾斜特性をもった鍛造品の製造が可能になる。



Fig.3. Calculated results of metal flow in forging of cross joint²⁾.

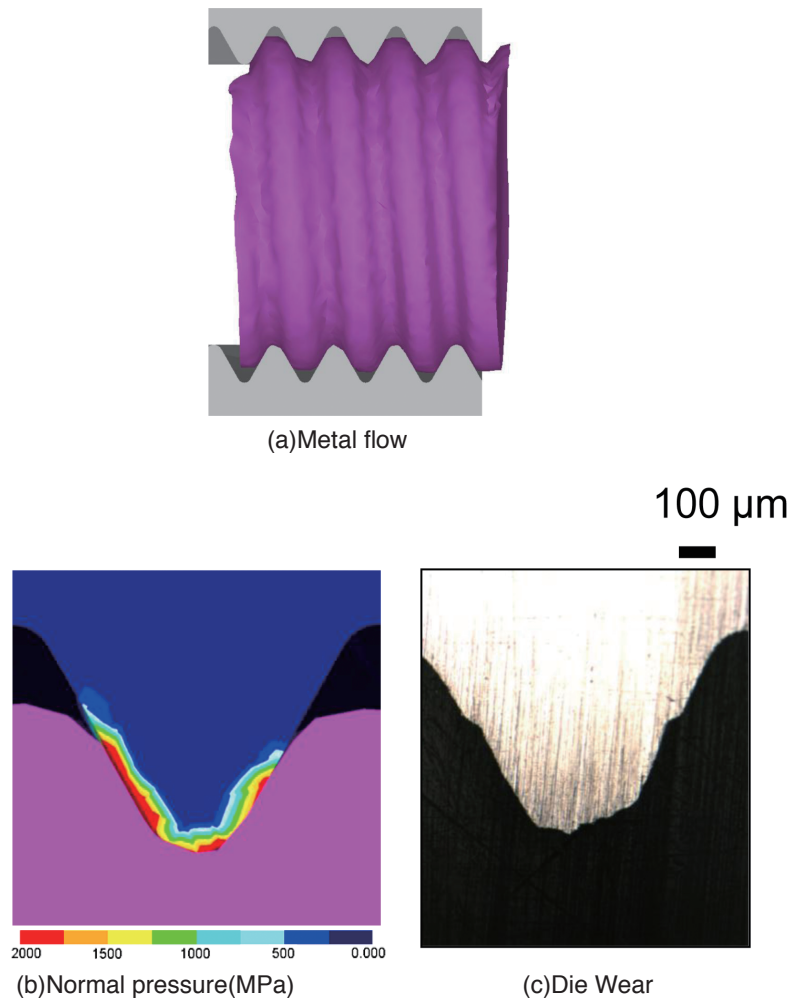


Fig.4. Calculated results of metal flow in thread rolling of screw.

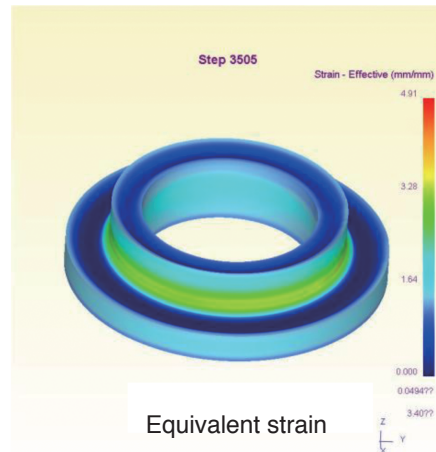
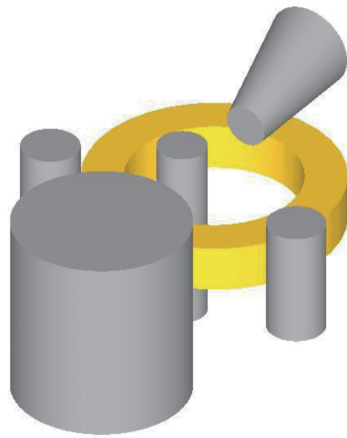


Fig.5. Calculated results of metal flow in ring rolling.

制御鍛造に関する NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）のプロジェクトも進められ、著者らのグループは材質予測のためのバーチャルラボシステム (Virtual Laboratory System; VLS) の開発に関わった。

Fig.6 は材質予測システムの一例⁵⁾である。塑性変形（ひずみ、ひずみ速度）と温度の履歴をもとに再結晶（動的再結晶、静的再結晶、粒成長）、変態、析出などの組織変化を計算し、その組織から機械的性質を計算する。その適用例として、ピレットの加熱時に温度分布を付与して鍛造することで製品に強度分布を創製できることを解析と実験で確認した⁵⁾。VC 非調質鋼を Fig.7(a) に示した温度分布に加熱し、押し出したときの材質・強度の予測結果を Fig.7(b), Fig.7(c) に示す。また、強度について実験との比較を Fig.8 に示す。両者ほぼ一致しており、本システムが鍛造工程設計に使用可能であることがわかる。この種の傾斜機能部品のニーズは多く、今後の成果が期待される。

3. 3 被加工材の延性破壊予測

鍛造における材料の破壊として代表的なものには、すえ込み時の側表面割れや押し出し時のシェブロンクラックなどがある。これらの発生は、鍛造製品の品質の点から必ず防止しなければならず、発生条件やメカニズム解明のため従来から多くの研究が行われており、各種の条件が提案されている。しかし、材料の種類、変形の条件（応力状態、ひずみ状態、温度など）、その履歴などによって破壊の様式が異なるため統一的に破壊条件を表現することが難しく、確立されていないのが

現状である。

破壊予測については大きく分けて積分型破壊条件式を用いる方法とボイド理論に基づく方法に大別される。前者は、材料内の各物体点において加工開始からの応力、ひずみおよびその他の材料パラメータの変化をひずみ履歴に沿って積分し、その値がしきい値である限界ダメージ値を超えた時点を破壊とするものである。後者は、材料内の各物体点において損傷発展式によって空孔体積率を計算し、その値がしきい値を超えた時点を破壊とするものである。こちらは、次節のせん断の解析で例を示す。Cockcroft & Latham の式⁶⁾、大矢根の式⁷⁾、McClintock の式⁸⁾などが積分型破壊条件式の代表的なものである。本手法を用いて破壊予測を行う際には何らかの破壊試験によって事前に限界ダメージ値を求めておく必要がある。FEM でその限界を超えた要素を取り除くか、節点を分離するなどの手法で破壊を表現するのが一般的であるが、まだ検討すべき点が多い。Fig.9 はマンネスマン穿孔圧延のマンドレル先端部のダメージ値を解析したものである⁹⁾。穿孔過程の検討に利用できる。

3. 4 せん断加工の解析

せん断加工の解析に関して破壊条件を導入し、き裂発生および進展を予測し、せん断面長さ、バリ高さ、き裂形状および進展方向などのせん断特性を詳細に検討した例は少ない¹⁰⁾。これは、ポンチやダイスの刃先は基本的にはピン角であるため、刃先近傍の要素の工具への侵入、非常に狭い範囲に変形が集中することによる要素の大きなひずみの発生といった FEM をせん断加工に適用する場合の問題点があり、工具の刃先付

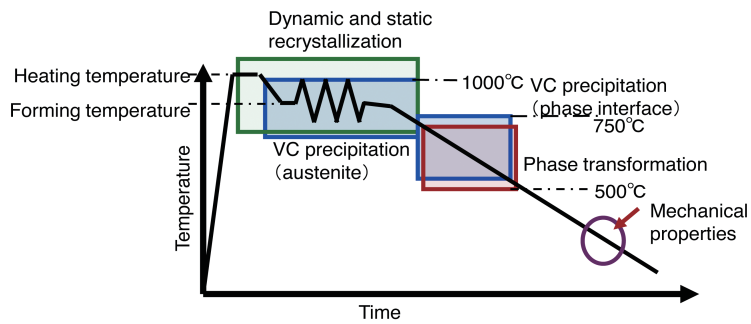


Fig.6. Image chart of VLS modules⁵⁾.

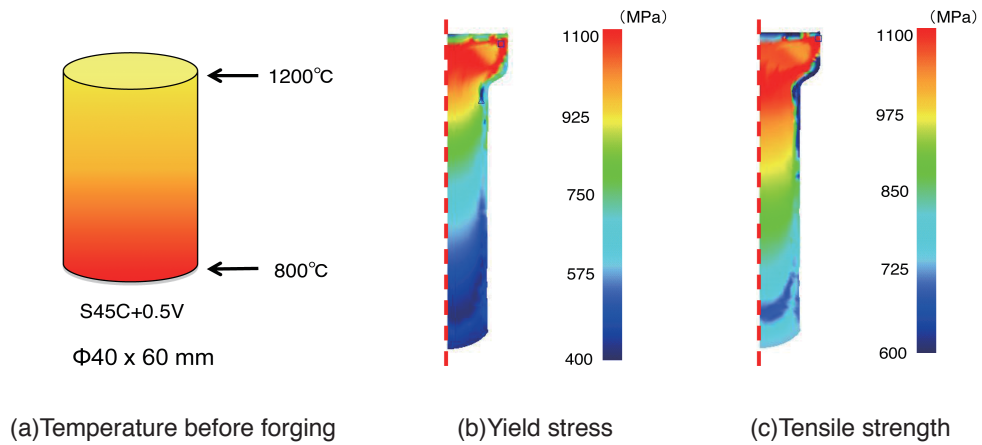


Fig.7. Calculated results of VLS⁵⁾.

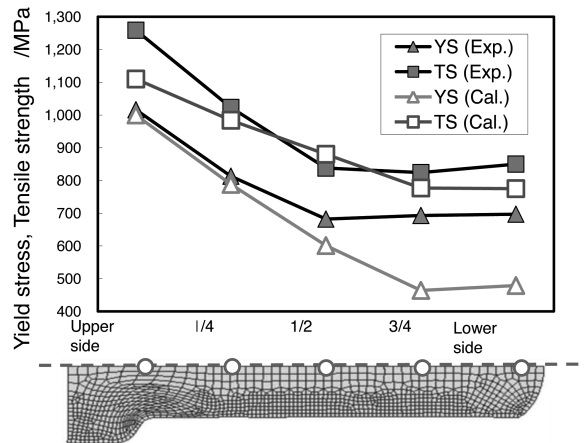


Fig.8. Comparison between calculated and experimental results⁵⁾.

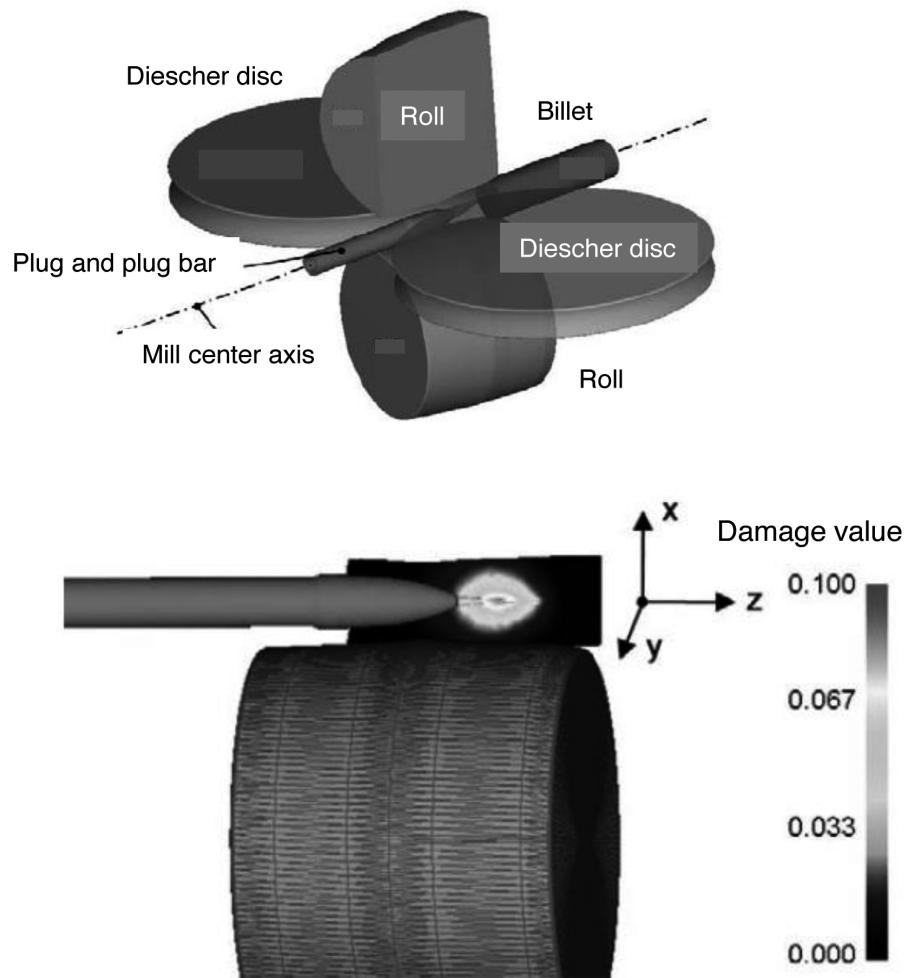


Fig.9. Calculation of damage value in Mannesmann piercing⁹⁾.

近およびせん断域に細かい要素を配置した上でリメッシングを繰り返して変形解析を行う必要がある。また、せん断加工におけるき裂の発生および進展は延性破壊が支配的であるが、変形解析に延性破壊予測を導入する上での問題点として、(1)シミュレーションにおいてき裂をどのように表現するか、(2)延性破壊条件の選定、(3)破壊に関する材料物性値(破壊パラメータ)をどのように決定したら良いか、という点が挙げられる。空孔(ボイド)の影響を考慮した修正 Gurson 型降伏条件式¹¹⁾をシステムに取り入れ、空孔体積率にある値を設定することにより延性破壊条件式として、割れの発生および進展の予測を試みた。このようなボイド理論に基づく定式化によって問題点(1)および(2)を解消してせん断加工の変形解析を可能にし、せん断加工部におけるせん断断面長さ、バリおよびだれに及ぼすクリアランスや材質の影響について検討できるようになった¹²⁾。Fig.10は、刃先近傍でクラックの発生直後の様子について解析と

実験を比較したもので、ほぼ一致しておりバリなどを定量的に予測可能であることを示している。

3. 5 ズーミング法による調質圧延のロール転写解析

ロール表面の粗さ転写の解析は、板の厚さに比べ表面近傍の極めて微小な領域の変形を解析しなければならない。すなわち材料表面付近はマイクロレベルの凹凸に対応できるよう要素の大きさが数 μm という非常に細かい要素分割を必要とするため、通常の解析手法では要素分割数が膨大となり、現実的な時間内で解析を行うことは困難である。そこでマルチスケール解析の一種であるズーミング法を平面ひずみ剛塑性有限要素解析に適用し、板表面の微小領域の詳細な解析が試みられた¹³⁾。Fig.11はショットダルロール相当の表面凹凸のあるロールを用いて圧下率6%で圧延した場合の、材料表面の変形過程の解析結果を示したものである。

ロール表面の微小な凹凸部に材料が充填する様子を見ることができる。

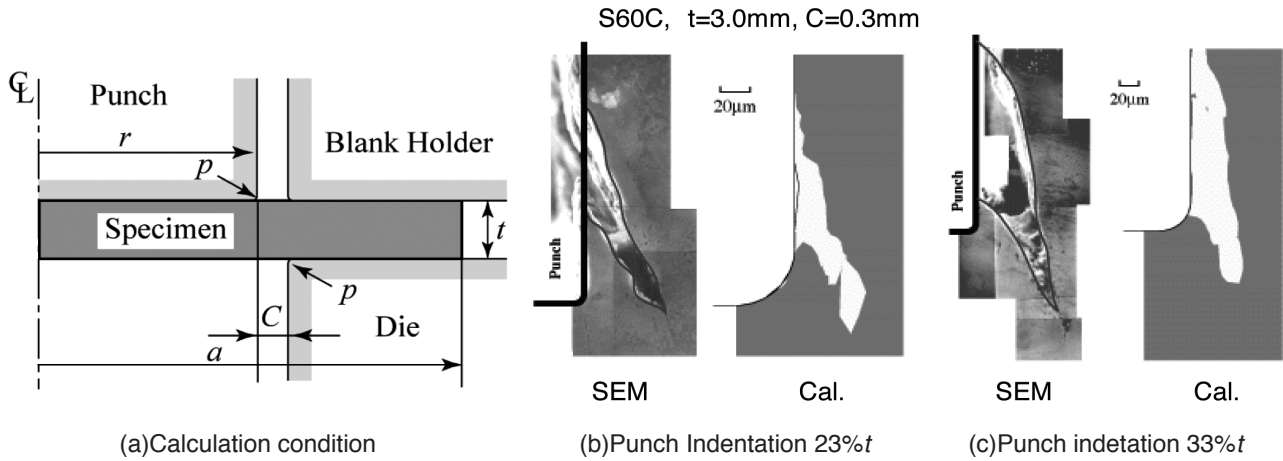


Fig.10. Calculation of shearing process¹²⁾.

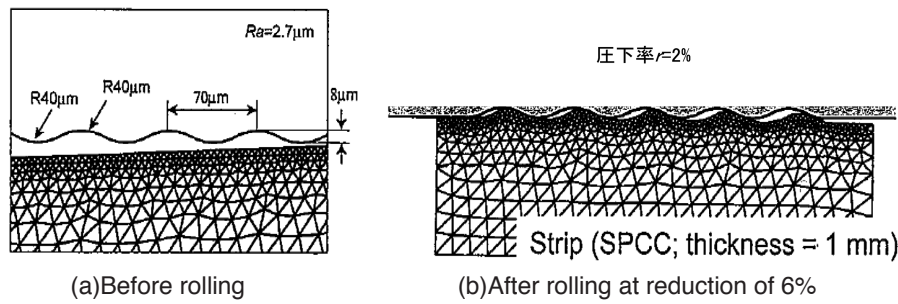


Fig.11. Deformed micro analysis mesh at the exit of roll gap in skin pass rolling¹³⁾.

4. まとめ

現在、塑性加工の分野では有限要素法を主体としたシミュレーションが実用レベルになってきており、研究の道具の一つとして問題解決に使われている。ただ、前述したようにシミュレーションソフトを導入すれば新しいプロセスや工法を創出できるとは思っていない。従来の工程設計や金型設計のエキスパートといわれる人たちは、実際に金型を作って実験をし、多くの試行錯誤をした体験をもとに知識を蓄え、それをもとに新しい製品に挑戦しそれらを実現してきた。このような人材を育成するには、時間もコストも非常にかかり、今後そのような人たちが急激に減少することがわかっている。人材育成は急務である。今後、シミュレーションの精度・信頼性が上がり、使い勝手がよくなれば、コンピュータ上でバーチャルな試行錯誤が可能となり、実験や実際の試行をやらなくてもいろいろな知識の蓄

積が可能となるであろう。金型や加工機械が壊れることがないので、条件設定も冒険ができ、有効ではないかと思われる。著者はそのような形で人材育成の一助に利用できないかと考えている。ただ、実現象、現場を常によく見ることを忘れてはならない。今後、製造業におけるシミュレーション、CAEの重要性はますます増加し、道具としてその利用は拡大していこう。

(文 献)

- 1) <http://www.deform.com/wp-content/uploads/2011/05/3d-brochure.pdf>
- 2) 小坂田宏造, 石川孝司, 小野宗憲, 森下弘一, 安藤弘行編: 精密鍛造, 日刊工業新聞社, (2010).
- 3) F. Yoshida, T. Uemori: Int. J. Mech. Sci., 45 (2003), 1687.
- 4) 石川孝司: 電気製鋼, 66 (1995), 186.
- 5) 野崎康仁, 湯川伸樹, 石川孝司: 平成 23 年度塑性

- 工春季講演会講演論文集 ,(2011), 407.
- 6) M. G. Cockcroft and D. J. Latham: J. Inst. Met., **96** (1968), 33.
 - 7) M. Oyane: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., **75** (1972), 639, 596.
 - 8) F. A. McClintock: Trans. ASME, J. Appl. Mech., **35** (1968), 363.
 - 9) R. KruX, M.Zemko: Steel research int.,(2011), Special Edition,143.
 - 10) E.Taupin, J.Breitling, W.Wu, T. Altan: J. Mater. Process. Technol., **59** (1996), 68.
 - 11) V. Tvergaard : Int. J. Fract., **17** (1981),4, 389.
 - 12) 吉田佳典, 村瀬泰章, 湯川伸樹, 石川孝司: 塑性と加工, **46** (2005),532, 392.
 - 13) 湯川伸樹, 秋山友彦, 吉田佳典, 石川孝司: 鉄と鋼, **94** (2008), 399.