

塑性加工のための高精度有限要素解析 プログラムの開発とその応用

浜 孝之*

1. はじめに

近年の地球環境問題から、輸送機器による CO₂ 排出量の削減が喫緊の課題となっている。輸送機器の軽量化を促進させるため、高張力鋼板やアルミニウム合金板およびマグネシウム (Mg) 合金板といった低密度材の利用や、液圧を利用した加工技術による部品形状の最適化などが検討されている。これらの新しい素材や加工技術を有効活用して輸送機器の軽量化を実現するためには、多くの成形ノウハウを蓄積することが不可欠であるが、それには多くの時間と労力を伴う。一方、成形に関する技術的課題の解決には、有限要素法 (FEM) 解析の活用が有効であるが、FEM 解析技術自体が新しい素材や加工技術へ十分に対応できていない場合が多いのが現状である。そこで筆者らは、その時々ニーズに合わせて、輸送機器の軽量化の促進に資する新素材/新塑性加工法を対象とした、高精度かつ革新的な塑性加工/塑性変形解析プログラムの開発と、実験と解析を駆使した変形特性の解明を目的として、本研究課題に取り組んできた。本研究の主な成果は、(1)液圧成形のための FEM 解析プログラムの開発と成形特性の解明、(2) 塑性加工の FEM 解析のための革新的接触解析技術の開発、(3) 六方晶金属を対象とした結晶塑性解析プログラムの開発と変形メカニズムの解明、の三つのテーマに大別される。次章以降では各テーマで得られた成果の概要を紹介する。

2 液圧成形のための FEM 解析プログラムの開発と成形特性の解明

この研究は、複雑形状部品の一体成形を可能とするチューブハイドロフォーミング (THF) および対向液圧成形 (SHF) を対象として、その成形過程を高精度に予測できる FEM 解析プログラムの開発と成形特性の解明を目的とした。まず、理化学研究所で開発された板材成形 FEM 解析プログラム ITAS3D に対して、液圧負荷アルゴリズムおよび液圧を考慮した新しい接触判定アルゴリズムを導入することで、THF 解析プログラムを開発した¹⁾。続いて、開発したプログラムを用いて自動車用実部品の成形解析を行い、成形中に生じる割れの発生メカニズムを明らかにした²⁾。さらに、本部品に対して液圧を振動させる成形法 (ハンマリング法) を適用すると上述の割れ発生を抑制できるメカニズムを、解析により明らかにした³⁾。以上の研究に

対して、平成 16 年度新進賞を受賞している。そこで本稿では、それ以降の成果に焦点を当てて紹介する。

THF により大きな拡張を与えるためには、液圧と軸方向押込みの適切な制御が重要である。先行研究⁴⁾により、液圧をある程度高めた後に軸押込みを与える「液圧先行型」が、最も大きな拡張を実現できる経路であることが報告されていたが、そのメカニズムは明らかではなかった。そこで筆者らは、FEM 解析によりそのメカニズムを検討した。その結果、液圧を先行して与えることで、軸押込み開始後の座屈発生を抑制するとともに周方向引張と軸方向圧縮の理想的な二軸応力場が得られやすいことが、大きな拡張をもたらす要因であることを明らかにした(図 1)⁵⁾。

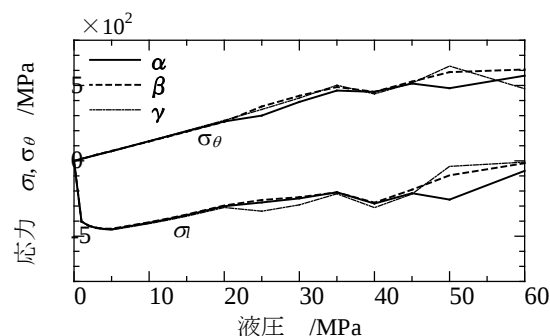


図 1. 液圧先行型経路を用いた場合の型張出し成形時の長手方向応力 (σ_l) および周方向応力 (σ_θ) の推移⁵⁾。
図中の α , β , γ は、応力推移を追跡した部位を示す。

続いて筆者らは、(株)アミノ殿との共同研究として、これまで開発してきた THF 解析プログラムの SHF への拡張を行った。SHF では、成形が進行して板材が液圧室へ流入するに伴い、液圧が作用する領域が徐々に拡大する。そこで、この現象を巧みに考慮した新しい液圧負荷モデルを提案し、FEM 解析プログラムに組み込んだ。対向液圧による長円筒深絞り成形の実験と解析を行ったところ、提案したモデルを用いることで板厚ひずみ分布の予測精度向上を実現した(図 2)⁶⁾。また、通常のプレス成形による結果と比較することで、通常のプレス成形と SHF で最大減肉部位が大きく異なるメカニズムを明らかにした。

SHF では、成形中に液圧室内の圧力媒体がダイ面上へ流出することで、フランジ部の摩擦が低減されて材料流入が促進される効果がある (摩擦低減効果)。したがって、圧力媒体流出を伴う SHF の成形性を高精度に予測するためには、成形中の圧力媒体の流出開始条件や圧力媒体流出時の摩擦変化を明らかにし、また FEM 解析でもその特性を考

原稿受付 平成 29 年 7 月 日

*京都大学大学院エネルギー科学研究科

〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

E-mail: hama@energy.kyoto-u.ac.jp

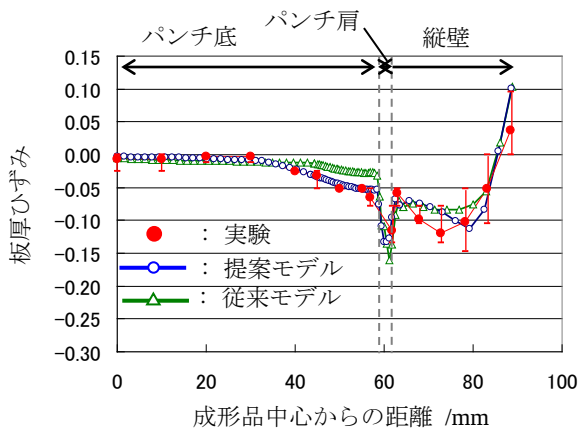


図2. 長円筒深絞り SHF 成形部品の板厚ひずみ分布⁹⁾.

慮することが不可欠である．そこで筆者らは，圧力媒体流出のモデル化を目的として，圧力媒体の流出に伴う諸特性を実験的に検討した．角筒絞り成形を対象としたこの一連の実験では，ダイ面上の各部位に圧力センサを取り付けることで，成形中の圧力媒体流出に伴うダイ面上の圧力推移を調査した．その結果，加工力（パンチ力＋ブランクホルダ力）よりも圧力媒体による押し上げ力が上回ったときに圧力媒体は流出し始めること，またダイ面上の非線形な圧力分布とその推移を明らかにした(図 3)^{7,9)}．一方，圧力媒体の流出量が一定量以上になると，SHF の成形性はほとんど変化しないことを実証した⁹⁾．これは言い換えれば，ダイ面上の圧力分布と摩擦状態は必ずしも一対一対応しないことを示す．現在は，これまでの実験から得られた基礎的知見に基づいて圧力媒体流出のモデル化を進めることで，FEM 解析プログラムのさらなる汎用化，高機能化，そして高精度化の達成を目指している．

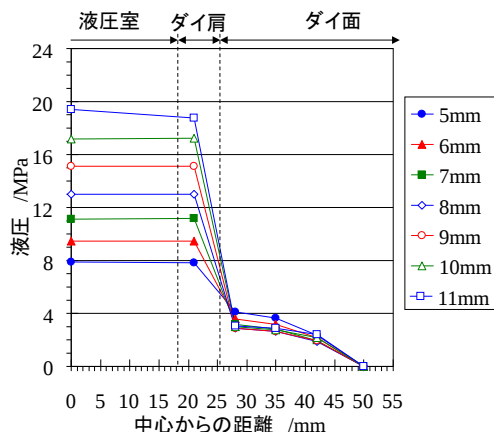


図3. 角筒絞り SHF 成形中の圧力媒体流出に伴うダイ面上液圧分布の一例⁹⁾．凡例はパンチストロークを表す．

3 塑性加工の FEM 解析のための革新的接触解析技術の開発

通常 FEM 解析では，工具モデルも有限要素メッシュにより離散化される．この表現方法は，本来は滑らかな曲面である工具表面を多面体で近似することを意味し，形状精度の著しい低下を招く．またこの低い形状精度は，FEM 解析精度の低下を招く可能性がある．この問題に対して過去の研究では，工具形状の「滑らかさ」の向上を目的とした

研究が多数行われてきたのに対して，工具の「形状精度」を向上させることを目的とした研究は筆者らの知る限り行われてこなかった．一方，Nagata¹⁰⁾により，有限要素メッシュで離散化された形状を離散化前の形状へ高精度に復元する形状表現技術（Nagata パッチ）が提案された．Nagata パッチを離散化された工具モデルに適用することで，工具形状精度の向上とそれに伴う FEM 解析精度の向上が期待される．そこで筆者らは，Nagata パッチで記述された工具曲面と被加工材モデルの接触問題を数学的に定式化した全く新しい接触解析技術を開発し，板材成形 FEM 解析プログラム STAMP3D に組み込んだ¹¹⁾．

まず，角筒絞りや引張曲げの工具を対象として，離散化された工具モデルに対して Nagata パッチを適用した．その結果，工具モデルは離散化前の工具形状にナノオーダーまで復元できることが示された(図 4)¹²⁾．この形状精度は，従来の多面体近似による方法では現実的には実現不可能である．続いて，メッシュ分割の異なる二つの工具モデルを用いて高張力鋼板の引張曲げ成形解析を行ったところ，つぎの知見が得られた^{13,14)}．①多面体近似工具を用いた場合，工具メッシュの分割数や形状によって成形品のスプリングバック後形状が大きく異なる場合がある(図 5(a))．これは，板材がダイ肩を通過する時の経路が，工具モデルによって異なるためである．②Nagata パッチ工具を用いた場合，工具モデルによらず，成形品のスプリングバック後形状はほぼ一致する(図 5(b))．これは，Nagata パッチにより工具表面が離散化前の形状へ高精度に復元されたため，工具モデルによらず同一の変形経路を辿ったためである．③新日鐵(株)殿（当時）との共同研究により，ブランクホルダ力とスプリングバック後の縦壁曲率の関係を実験結果と比較したところ，Nagata パッチ工具を用いた解析では，工具モデルによらず実験に近い結果が得られた．以上より，開発した接触解析技術を用いることで，工具のメッシュ分割に影響されない信頼性の高い解析を遂行できることが示された．

さらに，開発した接触解析技術を用いて角筒絞り成形解析を行った¹²⁾．詳細な結果は省略するが，ここで得られた知見をまとめると，以下ようになる．①スプリングバック解析に比べて，角筒絞り成形解析では，工具モデルが解析結果に及ぼす影響は比較的小さい．②言い換えると，Nagata パッチ工具を適用することで，メッシュ分割数を著しく小さくしても解析精度を維持することができ，計算上の大きなメリットとなりうる．

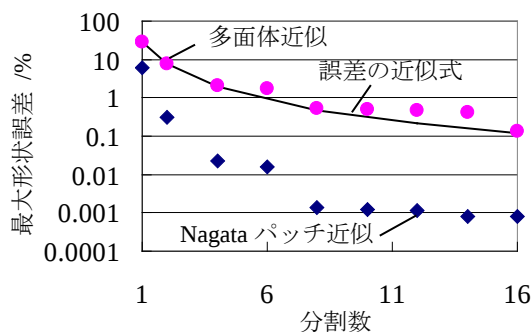


図4. 角筒絞り成形金型のダイ肩部における要素分割数と最大形状誤差の関係¹²⁾．

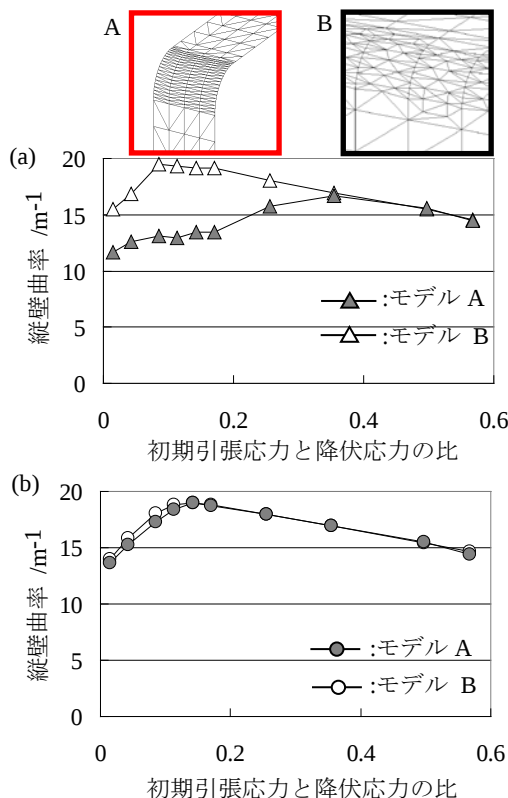


図5. 引張曲げ成形におけるスプリングバック後の縦壁曲率と初期張力の関係¹³⁾. (a)多面体近似工具, (b)Nagataパッチ工具.

本手法の特長は、入力情報や解析手順などを従来の手法から変更することなく、工具形状精度を著しく向上できる点である。そのため利便性が非常に高いと考える。

4 六方晶金属を対象とした結晶塑性解析プログラムの開発と変形メカニズムの解明

4.1 結晶塑性モデルの開発

Mg合金や純チタン(Ti)などの六方晶金属は、強い面内異方性や引張-圧縮の非対称性を示すなど、加工が困難な材料であることが知られている。この巨視的な変形異方性は、強い結晶異方性に起因することが知られているが、その詳細な変形特性や変形メカニズムは十分明らかにされていない。そこで筆者らは、結晶レベルの微視的な変形に基づいて巨視的な塑性変形特性を予測できる結晶塑性モデルに注目して、Mg合金板および純Ti板における塑性変形挙動を高精度に記述できる結晶塑性FEM解析モデルの開発と、解析と実験を駆使した塑性変形メカニズムの解明に取り組んでいる。本課題は、筆者が現在最も精力的に取り組んでいるテーマである。

六方晶金属では数種類のすべり系が活動し、またその臨界分解せん断応力や加工硬化はすべり系の種類によって大きく異なる。したがって、解析に先立って多くの材料パラメータを同定する必要がある。また六方晶金属では、すべり系だけでなく変形に極性を持つ双晶系の活動も塑性変形に大きな影響を及ぼす。筆者らが研究に着手した当時、双晶系の活動を結晶塑性解析の枠組みでモデル化した事例はいくつか報告されていたが、反転負荷に伴う双晶の回復

(detwinning)に関するモデリングはほとんど研究されていなかった。そこで、まずはMg合金圧延板を対象として、(a)実験観察に基づく実用的な双晶回復モデルの開発¹⁵⁾、および(b)それぞれのすべり系および双晶系の特徴を的確に反映させたパラメータ同定法の提案¹⁶⁾の二つの課題に取り組んだ。その結果、反転負荷を含む種々の負荷経路における加工硬化挙動や集合組織の発展を、高精度に予測することに世界に先駆けて成功した。また開発したプログラムを用いて、Mg合金板の変形特性を体系的に明らかにしてきた。次節では、その成果の一例を紹介する。

4.2 Mg合金圧延板の変形挙動予測

4.2.1 除荷時の非線形挙動 Mg合金圧延板では除荷中に顕著に非線形な応力-ひずみ関係を示すメカニズムを検討した。図6のように、引張後の除荷時に生じる非線形挙動を解析で良好に予測できた¹⁷⁾。また解析結果から、除荷時の非線形挙動は、すべり系によって臨界分解せん断応力が著しく異なることに起因して、巨視的な除荷中であっても微視的には最も臨界分解せん断応力の小さい底面すべり系が活動するために生じることを明らかにした。

続いて、圧縮後の除荷時挙動について研究することで、引張後より強い非線形挙動を示すメカニズムを以下のように明らかにした^{18,19)}。すなわち、Mg合金圧延板では強い底面集合組織が形成されていることに起因して、圧縮中には双晶が活発に活動する。そのため、除荷時には底面すべり系だけでなく双晶回復も活動し、その結果、引張後の除荷に比べてさらに強い非線形挙動が生じる。

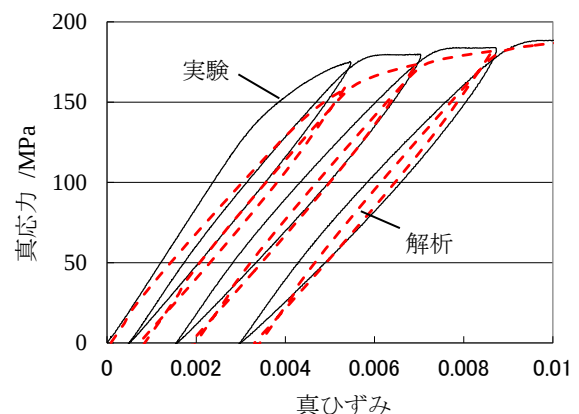


図6. Mg合金板における引張-除荷時の応力-ひずみ線図¹⁷⁾.

4.2.2 二段階負荷時の変形挙動 双晶の形成および回復が塑性変形挙動に大きな影響を及ぼす六方晶金属では、ひずみ経路が変化するとその変形挙動はさらに複雑化すると考えられる。そこで、二段階負荷に着目してその塑性変形挙動を検討した¹⁶⁾。実験では、まず大型の試験片に対して予ひずみを与え、その後予ひずみ材から種々の方向へ小型の試験片を切り出して引張変形を与えた。なおこの実験では、東京農工大学の桑原研究室より譲渡いただいた二軸試験機²⁰⁾にクシ歯ジグ²¹⁾を取り付けることで、一次経路における大型試験片の面内圧縮試験を実現した。

一例として、一次経路で6%の予圧縮を与えた試験片に対して二次経路で種々の方向へ10%の引張変形を与えた場

合の応力-ひずみ曲線を図7に示す。反転負荷に相当する負荷角度 $\theta=0^\circ$ の条件では、引張時にS字状の曲線が生じるのに対して、負荷角度 θ が大きくなるにつれてS字の程度は弱まり、 60° 以上ではほとんど見られない。このように、予圧縮を与えることで面内異方性の極めて強い塑性変形挙動が生じる。図8に、二次経路前後の(0001)極点図を示す。負荷角度 θ によって、集合組織の発展が大きく異なる。以上の結果は、解析でも良好に予測できている。解析結果より、負荷角度 θ によって双晶回復の活動が大きく異なることが、面内異方性をもたらす要因であることが明らかになった。それに対して一次経路で6%の予引張を与えた場合は、結果は省略するが、二次経路における面内異方性は処女材の結果と大きく変わらなかった。解析結果から、予ひずみ条件によるこのような変形様式の大きな違いは、

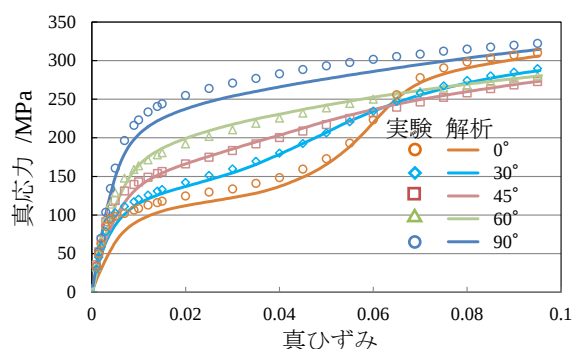


図7. 圧延方向へ6%の予圧縮を受けたMg合金板の引張変形時の応力-ひずみ線図¹⁶⁾。凡例の角度は、一次経路(圧延方向)と二次経路のなす角度 θ を表す。

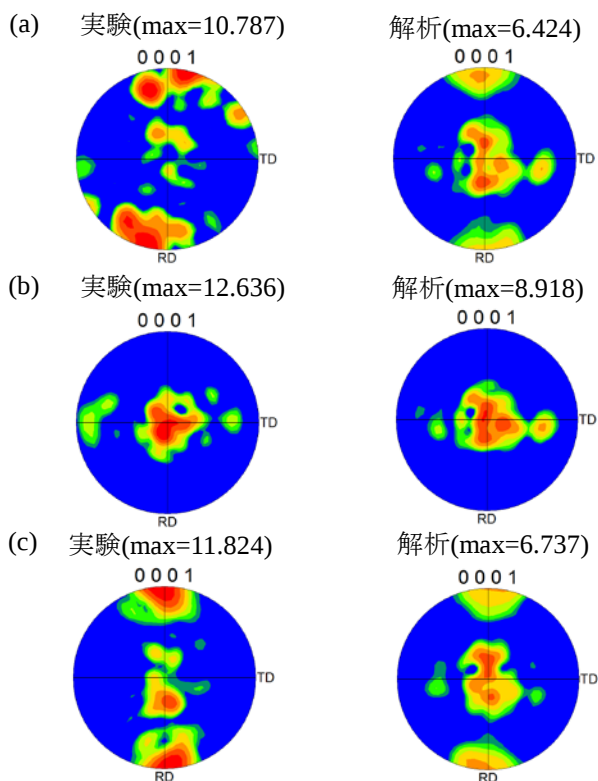


図8. 予圧縮材における二次経路前後の極点図¹⁶⁾。(a) 二次経路負荷前、(b) $\theta=0^\circ$ で二次経路負荷後、(c) $\theta=90^\circ$ で二次経路負荷後。

一次経路における双晶活動度の違いに起因することが明らかとなった。

なお結果は省略するが、Mg合金板についてはこの他にも、等塑性仕事面発展の予測²²⁾やランダム方位を持つ鋳造板の変形挙動などの予測²³⁾にも成功している。

4.3 純Ti圧延板の変形挙動予測

続いて、Mg合金板を対象として開発した結晶塑性モデルを、純Ti圧延板にも適用できるように拡張を行った²⁴⁾。解析で用いるモデルはMg合金の場合とほぼ同じであり、ここで行った拡張は主として、(a)純Tiで活動しうるすべり系および双晶系を新たに導入することと、(b)純Ti圧延板を対象とした新しいパラメータ同定法を提案することの二つである。

図9(a)に、単調負荷時の応力-ひずみ曲線を示す²⁴⁾。Mg合金板に比べて、顕著な面内異方性が見られる^{25,26)}が、この傾向は結晶塑性解析により良好に予測できている。結果は省略するが、引張時の r 値発展における面内異方性も、解析により良好に予測できている。

図9(b)に、予ひずみ5%で反転負荷を行った時の応力-ひずみ曲線を示す²⁴⁾。圧縮から引張へ反転した場合には、Mg合金板と同様に反転後にわずかなS字状の曲線が生じるのに対して、引張から圧縮へ反転した場合にはそのような傾向は見られない。以上の傾向は、結晶塑性解析でも良好に予測できている。詳細は省略するが、圧縮から引張への反転の場合に見られるS字状曲線は、Mg合金板の場合と同様に双晶回復に起因することが示されている。

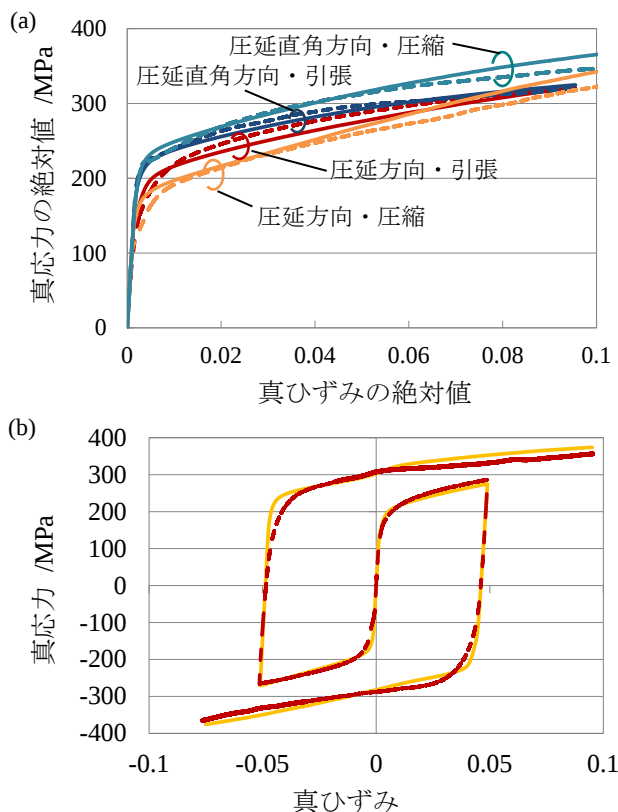


図9. 純Ti圧延板における応力-ひずみ線図²⁴⁾。(a) 単調負荷、(b) 圧延方向への反転負荷。実線は解析、破線は実験の結果を示す。

図 10 に、純 Ti 圧延板における等塑性仕事面の解析結果を示す²⁴⁾。初期では、圧延方向に比べて圧延直角方向の応力が高く、強い非対称性が見られる。一方、その後の塑性変形の進行に伴って、無次元化等塑性仕事面は急速に収縮し、ひずみ 8.5%ではほぼ対称的な曲面に帰着している。この傾向は、実験結果²⁷⁾を良好に再現している。解析結果から、初期の強い非対称性は、応力比によって支配的に活動するすべり系が異なることが要因であることが明らかにされている。

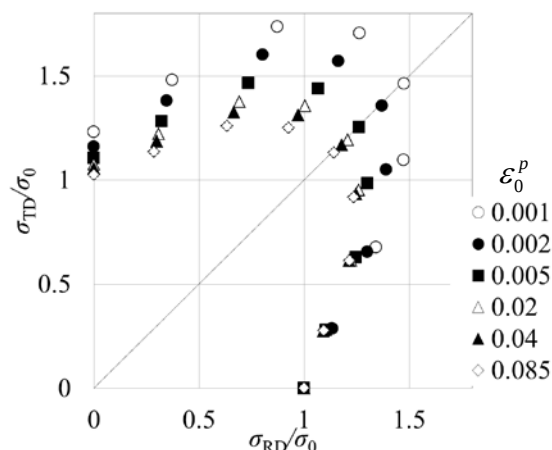


図 10. 純 Ti 板における等塑性仕事面の予測結果²⁴⁾。 ϵ_0^p は一軸引張時のひずみを表す。 σ_0 は圧延方向へ一軸引張時の応力、 σ_{RD} および σ_{TD} はそれぞれ圧延方向および圧延直角方向の応力を表す。

5 おわりに

筆者らのこれまでの研究は、各テーマで完結した内容にとどまっており、開発された技術や得られた知見を横断的に連携させるには至っていない。今後は、それぞれの要素技術を有機的に結びつけた応用的な研究も進めていきたい。

近年の解析技術と計算機能力の急速な発展により、FEM 解析技術は成熟の域に入っていることは間違いない。しかしながら、これまで示してきたように、新しい素材や加工技術を開発し、その適用の幅を拡げていくには、解析技術も間断なく発展し続けることが重要である。その実現には多くの技術的課題を解決する必要があるが、今後も着実に研究を進めることで、将来的な塑性加工技術力の向上と地球環境問題の解決に微力ながら貢献していきたい。

本研究を遂行するにあたり、これまで数多くの方々および機関から有形無形のご支援を賜りました。特に、早稲田大学名誉教授の浅川基男博士、京都大学教授の宅田裕彦博士、理化学研究所の牧野内昭武博士および Cristian Teodosiu 博士には、多岐に亘りご指導ご鞭撻をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。また、研究上の実務は京都大学宅田研究室の学生諸氏の協力に依るところが大きく、深く感謝します。

参考文献

- 1) 浜孝之・浅川基男・淵沢定克・牧野内昭武：塑性と加工，**43**-492(2002)，35-39。
- 2) Hama, T., Asakawa, M., & Makinouchi, A.: J. Mater. Process. Technol., **150**-1/2 (2004), 10-17.
- 3) Hama, T., Asakawa, M., Fukihar, H., & Makinouchi, A.: ISIJ Int., **44**-1 (2004), 123-128.
- 4) 吉田亨・水村正昭・栗山幸久：日本塑性加工学会シミュレーション統合システム分科会資料集第 28 号，(2000)，9-21。
- 5) Hama, T., Ohkubo, T., Kurisu, K., Fujimoto, H. & Takuda, H.: J. Mater. Process. Technol., **177** (2006), 676-679.
- 6) Hama, T., Hatakeyama, T., Asakawa, M., Amino, H., Makinouchi, A., Fujimoto, H. & Takuda, H.: Finite Elem. Anal. Des., **43** (2007), 234-246.
- 7) Hama, T., Kurisu, K., Matsushima, K., Fujimoto, H. & Takuda, H.: ISIJ Int., **49**-2 (2009), 239-246.
- 8) Hama, T., Matsushima, K., Kitajima, T., Fujimoto, H. & Takuda, H.: ISIJ Int., **49**-11 (2009), 1736-1743.
- 9) Hama, T., Kitajima, T., Nishimura, Y., Fujimoto, H., & Takuda, H.: Mater. Trans., **53** (2012), 826-832.
- 10) Nagata, T.: Comput. Aided Geom. Des., **22** (2005), 327-347.
- 11) 浜孝之・高村正人・牧野内昭武・Cristian TEODOSIU・宅田裕彦：日本機械学会論文集 A，**72**-714(2006)，60-67。
- 12) 浜孝之・高村正人・牧野内昭武・Cristian Teodosiu・宅田裕彦：塑性と加工，**48**-552(2007)，61-65。
- 13) Hama, T., Nagata, T., Teodosiu, C., Makinouchi, A. & Takuda, H.: Int. J. Mech. Sci., **50** (2008), 175-192.
- 14) Hama, T., Isogai, E., Yoshida, T., & Takuda, H.: Steel Res. Int., **81**-9 (2010), Spl. Ed. 2010, 753-756.
- 15) Hama, T., & Takuda, H.: Steel Res. Int., Spl. issue, (2012), 1115-1118.
- 16) Hama, T., Tanaka, Y., Uratani, M., & Takuda, H.: Int. J. Plast., **82**(2016), 283-304.
- 17) Hama, T., & Takuda, H.: Int. J. Plast., **27**(2011), 1072-1092.
- 18) Hama, T., Kitamura, N., & Takuda, H.: Mater. Sci. Eng. A, **583** (2013), 232-241.
- 19) Hama, T., Ochi, K., Kitamura, N., Fujimoto, H., & Takuda, H.: Steel Res. Int., Spl. Ed., (2011), 1054-1059.
- 20) Kuwabara, T., Ikeda, S., & Kuroda, T.: J. Mater. Process. Technol., **80-81**(1998), 517-523.
- 21) Kuwabara, T., Morita, Y., Miyashita, Y., & Takahashi, S.: Proc. 5th Int. Symp. Plast. Its Current Appl., (1995), 841-844.
- 22) Hama, T., & Takuda, H.: Comput. Mater. Sci., **51** (2012), 156-164.
- 23) Hama, T., Mayama, T., & Takuda, H.: The Romanian J. Tech. Sci.-Appl. Mech., **60** (2015).
- 24) Hama, T., Kobuki, A., & Takuda, H.: Int. J. Plast., **91** (2017), 77-108.
- 25) Hama, T., Nagao, H., Kobuki, A., Fujimoto, H., & Takuda, H.: Mater. Sci. Eng. A, **620** (2015), 390-398.
- 26) Yi, N., Hama, T., Kobuki, A., Fujimoto, H., & Takuda, H.: Mater. Sci. Eng. A, **655** (2016), 70-85.
- 27) 伊敷万太郎・桑原利彦・山口誠・前田恭志・林田康宏・逸見義男：日本機械学会論文集 A，**75**-752(2009)，491-500。