

塑性加工問題に対する計算機シミュレーションの活用

Utilization of Computer Simulation for Problems of Metal Forming

石川 孝司*

ISHIKAWA Takashi

Synopsis: In order to strengthen the competitiveness of Japanese manufacturing industry in the international competition of economy and technology due to globalization, we must solve more difficult issues than ever before, such as diversification of needs for products, shortening of new product development period, strengthening of environmental/energy saving measures, pursuing high added value/low cost and dealing with the problem of lack of skilled engineers. IT technology has gained attention as a means for overcoming such problems and increasing competitiveness, and has rapidly spread. In particular, numerical simulation is being utilized to shorten the time from design to manufacturing of new products and to carry out rational solution of problems. Computer-aided engineering (CAE) such as finite element analysis (FEM) is becoming practical in the field of metal forming from 2D analysis to 3D analysis. Here, some examples of simulation application to various problems of metal forming, such as (1) hot forging for net-shape and net-property, (2) prediction of the dimensional change in cold forging, (3) cold spot forge bonding of dissimilar sheet materials, (4) prediction of internal fracture in cold extrusion, (5) simulation of form rolling, (6) simulation of surface micro-defects in plate and sheet rolling, are selected from the author's previous research and introduced.

Keywords: metal forming; numerical simulation; forging; rolling; finite element method; CAE.

1. はじめに

グローバル化による経済・技術の国際的な競争の中で、日本の製造業の競争力を強化するためには、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、高付加価値化/低コスト化への追及、熟練技術者不足問題への対応等、今まで以上に困難な課題を解決していかなくてはならない。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、問題解決を合理的に実行するために数値シミュレーションの活用が進んでいる。有限要素解析 (FEM) をはじめとするコンピュータ支援工学 (CAE) 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、圧延、鍛造、プレス成形、粉末成形、鋳造、射出成形、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ままでもない。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年の間、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。この関係は、Fig.1¹⁾に示すMooreの法則として知られており、パソコンが一昔前の大型計算機の性能を凌いでいる。Fig.2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。

数値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

原稿受付日：2020年7月21日

* 中部大学工学部機械工学科 教授

象を連成して扱う問題（マルチスケール、マルチフィジクス）の解析も試みはじめられている。

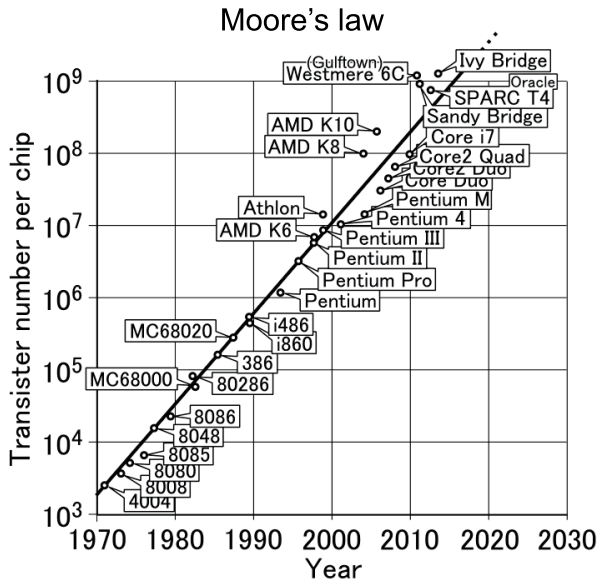


Fig.1 電子計算機の進歩

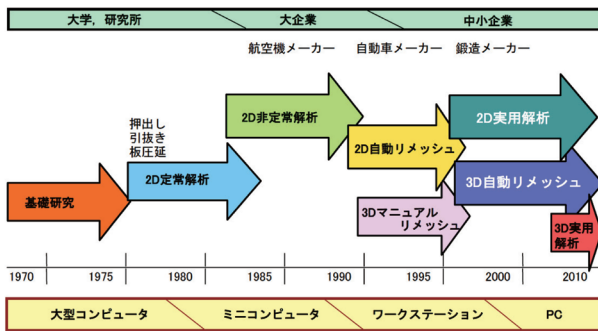


Fig.2 塑性加工分野での有限要素シミュレーションの発展の経緯

2. 数値シミュレーションの役割

塑性加工分野での数値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。常に現場に足を運び実現象や実験結果をみて、それとの整合性、妥当性、精度などを確認することが重要である。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。

3. 解析事例

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著者の今までの研究の中からいくつか抜粋して紹介する。

3.1 制御鍛造における材質予測に関する研究

変形と熱との連成有限要素解析が実用段階に入ってきた現在では、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²⁾。材料流動や金型への負荷だけを考えるのではなく、加工後の製品の組織、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(ネットシェイプ+ネットプロパティ成形技術)。このアイデアは、NEDOプロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」(2007年度~2011年度)に採択され、大学と企業が協力して材質予測モデルの開発と材質予測のためのバーチャルシステムが開発された。Fig.3はその開発した材質予測システム^{3,4)}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。市販の鍛造解析ソフト(DEFORM-2DTM)にユーザーサブルーチンにより各モデルを組み込んでシステム化している。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。被加工材をV添加非調質鋼としてFig.4⁴⁾に示す鍛造工程により製品の強度傾斜を発現させた。高強度を付与したい場所は高温まで加熱してVを十分オーステナイト中に固溶させ、加工後の冷却過程において微細なVCとして析出させる。非強化部は低温加熱としてVのオーステナイト中への固溶量を減少させることにより、VCの析出量を抑える。V添加非調質鋼をFig.5(a)に示した温度分布に加

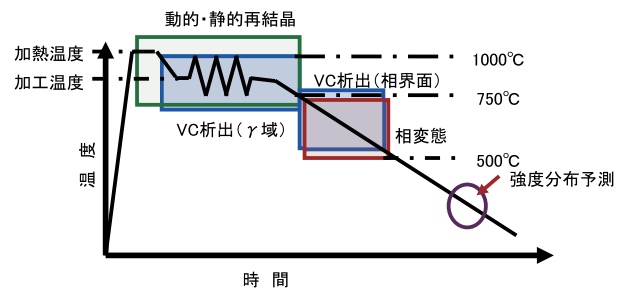


Fig.3 材質予測システム

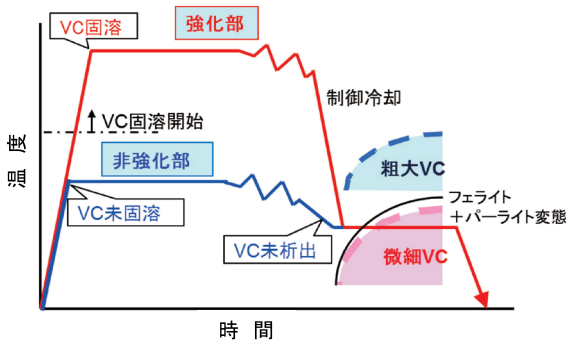


Fig.4 強度傾斜を付与するための鍛造工程例

熱し、押し出したときの材質・強度の予測結果をFig.5(b)、(c)⁵⁾に示す。また、強度について実験との比較をFig.6⁵⁾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。結果より押し出し加工により長手方向に強度が傾斜した製品を製造可能であることがわかった。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。

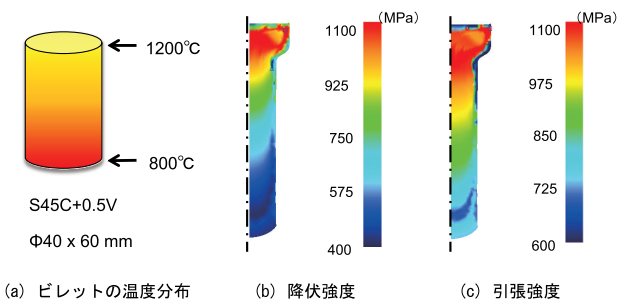


Fig.5 強度傾斜付与のための鍛造工程（解析結果）

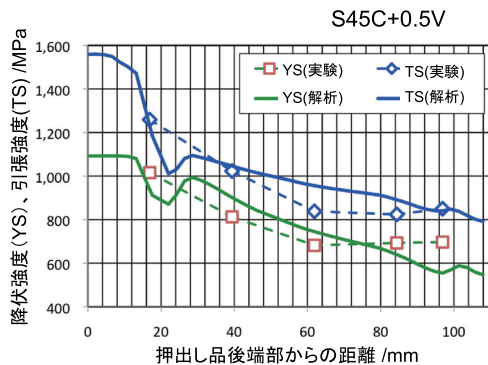


Fig.6 実験と解析の強度分布の比較

3.2 冷間鍛造品の高精度化に関する研究

冷間鍛造は、高速で加工荷重が高いため、加工中に金型は弾性変形し、材料は自己発熱による温度上昇を生ずる。したがって、金型の弾性変形、材料の弾性回復および冷却による熱収縮により加工後の製品は設計寸法通りにはならない。金型製造には、前もってそれを見越した設計が必要であるが、その量はわずかであるので経験に頼っている。

本研究では、それぞれの現象を正確にモデル化し、金型変形量、材料の弾性回復量、熱収縮量を熱・変形連成解析により可能にした。後方押し鍛造により円筒容器を60 spmで成形するときの変形を解析(DEFORM-2DTM)した⁶⁾。Fig.7はパンチ下死点での金型の弾性変形を示したもので、Fig.8はその時のビレットと金型の温度分布である。変形の厳しい円筒底部角部では300°C以上に達していることがわかる。解析結果から、製品の形状への影響が大きい因子は金型の弾性変形で、寸法の絶対値に影響が大きい因子は熱収縮量であることを明らかにした。さらに、サーボプレスを用いてスライドモーションをコントロールすることで弾性変形と熱変形のバランスを制御でき、より高精度鍛造が実現できることを提案した⁷⁾。Fig.9⁷⁾は、サーボプレスを用いて種々のスライドモーションにて冷間後方押し鍛造をしたカップ製品外径を解析(Simufact FormingTM)したもので、解析結果は実測値とよく一致している。結果よりパルスモーションにより寸法精度の良い製品の成形が可能であることが明確である。

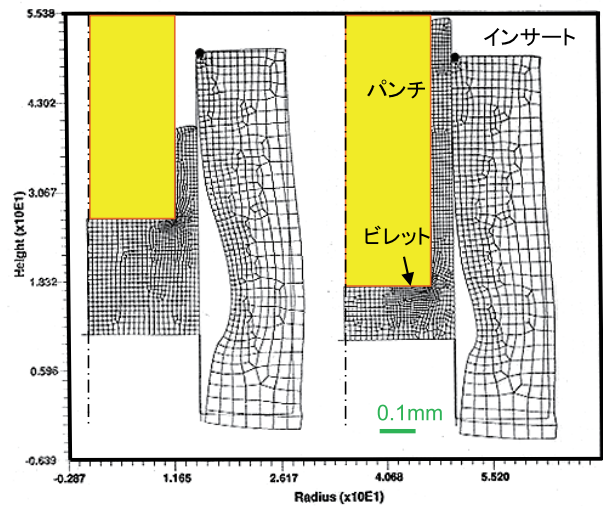


Fig.7 パンチ下死点での金型（インサート）の弾性変形

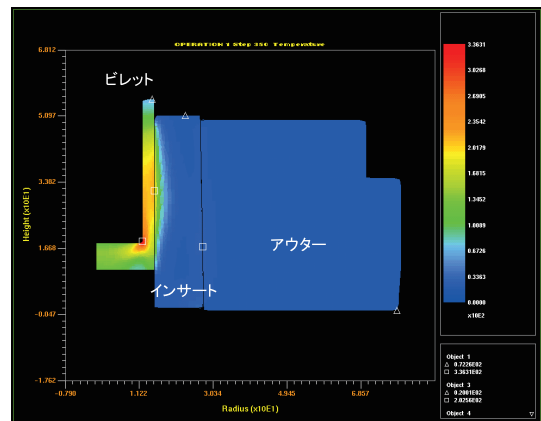


Fig.8 パンチ下死点でのビレットと金型の温度分布

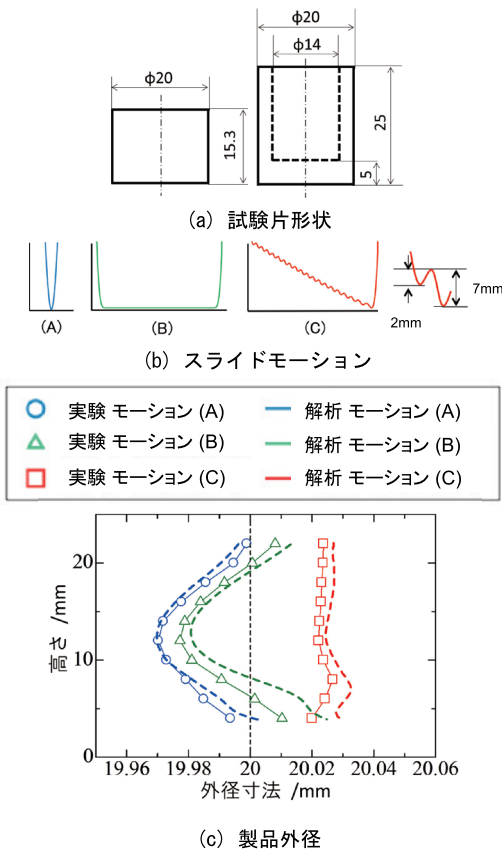


Fig.9 後方押しにおける実験と解析の製品外径の比較

3.3 冷間スポット鍛造接合に関する研究

CO₂排出削減のため部材の軽量化が推進され、適材適所に材料を使い分けられるいわゆるマルチマテリアル構造体が注目されている。強度の必要な箇所に鋼をそうでない箇所にはアルミニウム合金を接合して一体製品にするなど、製品内において異種材料を接合して使用することができれば効率の良い軽量化を達成することができる。これは今後の軽量化のキーテクノロジーである。しかしながらアルミニウムと鋼間の信頼性の高い接合を溶接により実現することは、脆化した金属間化合物相の生成により一般に困難とされている。これに対して摩擦攪拌接合(FSW)やメカニカルクリンチなどの手法が考えられるが、製品形状および寸法に対して自由度が高いとは必ずしも言えず、またコストが高い点も問題となる。これらの問題を解決するために、接合と成形を両立させる凝着現象を利用した冷間スポット鍛造接合法を開発した^{8,9)}。塑性変形により表面に存在する酸化膜や汚染層を破壊し、新生面を創出させて高面圧で接触させることで固相接合を実現させるものである。Fig.10 (a)は接合法の説明図で、上板に高張力鋼、下板にアルミニウム合金をセットして、背圧をかけながら上部からパンチを押し込むことで接合を可能にする¹⁰⁾。接合強度を測定するためJIS十字引張試験を実施した(Fig.10(b))。Fig.11は、接合サンプルの接合部の断面を示したもので、破断は接合界面ではなくアルミの母材側

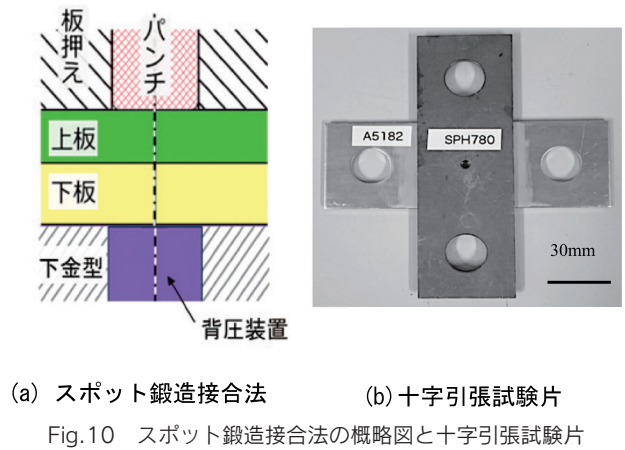


Fig.10 スポット鍛造接合法の概略図と十字引張試験片

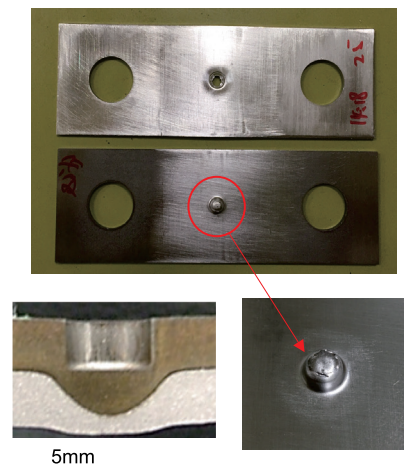


Fig.11 接合部断面観察

で発生しており、接合は強固であった。有限要素解析(DEFORM-2DTM)により、表面拡大比、面圧や背圧などを解析することで接合条件を最適化した。Fig.12は解析モデルであり、上板-下板接触面以外の摩擦係数は $\mu=0.1$ とした。上板-下板間は加工によって塑性変形が進むと部分的に新生面が露出、結合し出すため表面粗さも変化し、

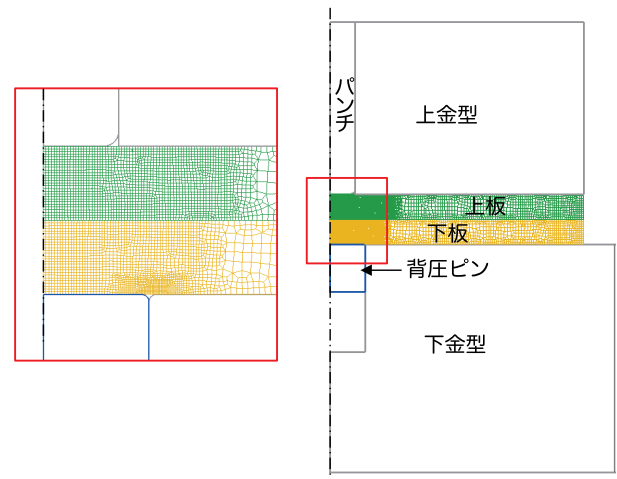
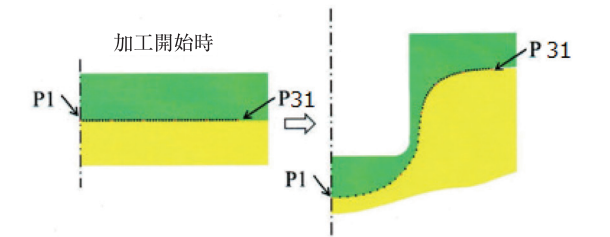
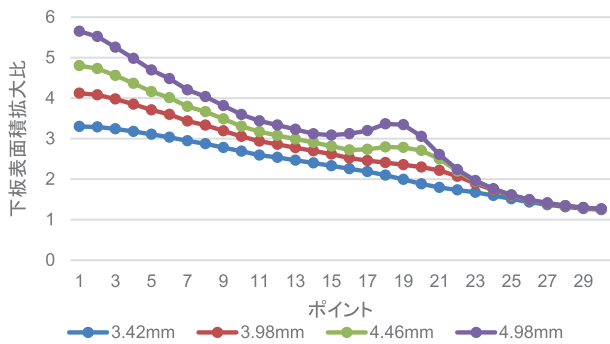


Fig.12 解析モデル(DEFORM-2DTM)

接合部は界面上を滑らなくなる。そのため、加工中の摩擦条件は一定ではないので、上板-下板の境界面の摩擦係数は表面積拡大比の関数を設定した。せん断摩擦係数 m を表面積拡大比 S の関数で $S \leq 2$ で $m=0.55$ 、 $S > 2$ で固着条件 $m=1$ とした。この関数は実形状と解析結果との形状比較により設定し、本解析手法の妥当性も確認済みである。解析結果からポイントトラッキング機能を使用して上下板接触面の表面積拡大比を計算した。Fig.13に結果の一例を示す。各追跡点の下板の表面積拡大比 S [-] と接触面圧 p [MPa] の積を相当応力 σ [MPa] で除して正規化した無次元数を Π ($= Sp/\sigma$) により接合可否を判断できることを示した⁹⁾。本接合法は、炭素鋼とアルミニウム合金の接合だけでなく、銅とアルミニウム合金等の組み合わせでも固相接合を確認しており、部品の軽量化だけでなく電気・電子分野への展開も期待できる。



(a) ポイントトラッキング法



(b) 各ポイントでの表面積拡大比

Fig.13 表面積拡大比の解析結果

3.4 冷間鍛造時の材料の割れ予測

鍛造時の材料の割れはここでは積分型延性破壊条件式を使用した破壊予測の方法について、冷間多段押し出しでの内部割れ(シェブロンクラック)の発生予測に適用した例¹¹⁾を紹介する。

主な積分型延性破壊条件式を以下に示す。

1) Cockcroft & Latham の式

Cockcroft と Latham は、最大垂直応力の変化履歴に沿った積分値が限界ダメージ値に達した時点で破壊を認定するモデルを提案している¹²⁾。

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}$ は相当塑性ひずみ、 σ_{max} および $\bar{\epsilon}_f$ はそれぞれ最大垂直応力および破断時の相当ひずみである。

2) McClintock の式

McClintock は微小空孔の成長について考察を行い、円柱状および楕円体状空孔モデルを用いた空孔成長および合体の理論解析を行った¹³⁾。空孔界面における2つの主応力およびひずみの変化履歴を追跡することによって、空孔生成および成長を判断するモデルを提案した。

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left[\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)\sigma_1 + \sigma_2}{2\bar{\sigma}} \right\} + \frac{3\sigma_1 - \sigma_2}{4\bar{\sigma}} \right] d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

ここで、 n は加工硬化指数、 $\bar{\sigma}$ は相当応力である。

3) 大矢根の式

大矢根らは多孔質体の塑性力学より、密度がある一定値まで低下すると破壊が発生するとして以下の式を提案した¹⁴⁾。

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left\{ 1 + \frac{1}{a} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right\} d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

ここで、 σ_m は平均応力である。また $\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ は応力三軸度であり、応力多軸度を表すパラメータである。

4) Ayada の式

Ayada らは平均垂直応力と相当応力によって表現される破壊条件式を提案した¹⁵⁾。

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (4)$$

ここで挙げた大矢根の式以外はパラメータが一つであるので、一種類の材料試験により限界を決めることができる。

材料定数である限界ダメージ値(積分型延性破壊条件式の右辺の値 C) は、なるべく一般的な試験法で求められるとよいが、JISに規定されている平滑引張試験では、実験における破断直径と解析での直径が一致しない。これは塑性不安定論として塑性力学の分野で議論されている問題であり、くびれの解析に対する古典的構成式の不備^{16,17)}のためと考えられる。そこで、著者らは切欠き引張試験 (Fig.14) によるダメージ値の決定法を提案している¹¹⁾。切欠き引張試験では、変形を切欠き部に集中して

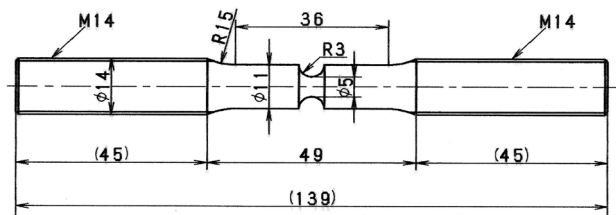


Fig.14 切欠き付丸棒引張試験片

きるので、実験と解析での破断時の直径変化は精度よく一致した。Fig. 15は計算結果(DEFORM-2D™)の一例で、切欠き部のCockroft & Lathamによるダメージ値分布を示す。切欠き部にはくびれを生じ、軸心には最大のダメージ値が発生していることが分かる。実験で破断する時点の軸心部の最大ダメージ値が限界ダメージ値である。

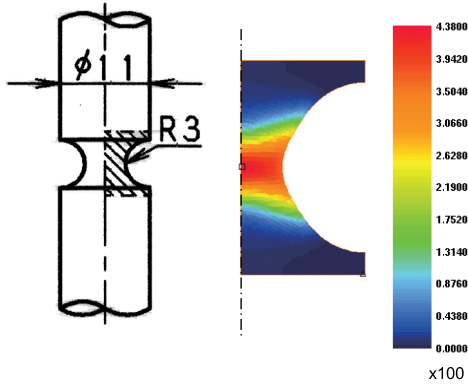


Fig. 15 切欠き付丸棒引張試験片のダメージ値分布

Fig. 16は、焼鈍材3鋼種の切欠き引張試験の解析結果から各鋼種のひずみとCockroft & Latham式によるダメージ値の関係を求めた結果で、各鋼種の右端の点が実験より求めた破壊限界ひずみに相当する。したがって破壊限界ひずみにおけるダメージ値が各鋼種の限界ダメージ値といえることができる。3鋼種の中ではS53Cが最も限界ダメージ値が低く割れ易い。

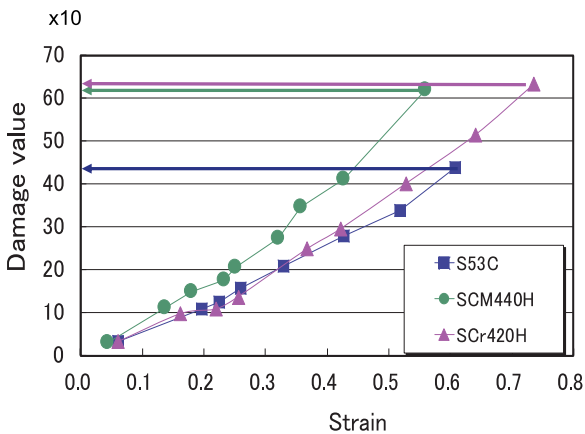


Fig. 16 限界ダメージ値

多段押し出し加工における破壊予測のため、実際の条件と同じ条件で解析を行ない、各鋼種および各工程における最大ダメージ値を求める。ここで紹介する冷間多段押し出し成形は、Fig. 17に示すような7段の前方押し出し加工を行なうもので、各段の断面減少率は、第1段が60%、第2段～7段は8%の加工を順次繰り返して行なった。トータルの断面減少率としては75.6%に達する。また、各工程のダイス半角はすべて30°である。

Fig. 18は、多段押し出しのシミュレーション結果の一例で、Cockroft & Lathamの式を用いた場合のダメージ分布



	Billet	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Reduction in area (%)		60	8	8	8	8	8	8
Total reduction (%)		60	62.9	65.8	68.6	71.1	73.4	75.6

Fig. 17 多段押し出し後の試験片

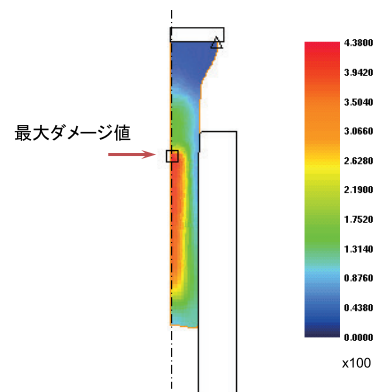


Fig. 18 7段押し出し後のダメージ値の分布

を示す。押し出し加工された軸心部には、最大のダメージが発生していることが分かる。多段押し出し加工では、このような分布が工程を追うごとに累積されていく。Fig. 19は、各鋼種における第7工程まで加工した時の軸心部に発生した最大のダメージ値と、先の切欠き試験より求めた限界ダメージ値を比較したものである。第7工程まで加工するとS53Cのダメージ値は限界値を超えており、割れ発生状態にある。実際に実験で割れの観察をしたところ、S53Cの第7工程まで成形したものに、Fig. 20に示すような微小内部割れが光学顕微鏡観察により確認された。しかし、その他の鋼種においては、内部割れは観察されなかった。したがってCockroft & Lathamの式の予測値が多段押し出し実験と一致したことになる。以上より、多段押し出しに

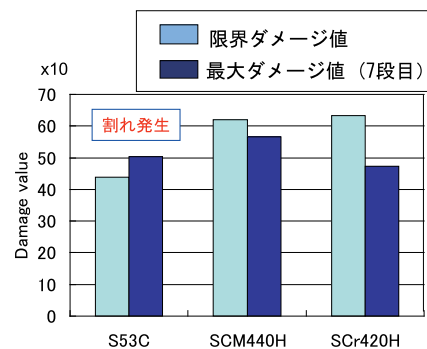


Fig. 19 7段押し出し後の限界ダメージ値と最大ダメージ値

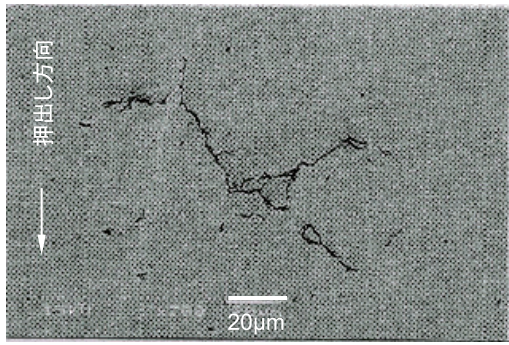


Fig.20 7段階押し出し後の試験片中心部の割れ(S53C)

おける内部割れの予測は、切欠き引張試験とCockroft & Lathamの式により可能であるといえる。

3.5 転造ダイスの応力解析

一般的な平ダイス式ねじ転造加工へ有限要素解析の適用を試みた¹⁸⁾。平ダイス式転造は成形中に素材全体が移動しながら塑性変形を生じさせるので、(1)加工中の材料の変形挙動は三次元的であり複雑である、(2)材料自身が固定されず工具材料間の摩擦により材料が回転しながら変形する、(3)塑性変形をしている領域が材料のごく一部である、などの特徴がある。したがって有限要素解析を行う際の条件設定が難しく時間もかかる。そのため転造加工の有限要素解析が行われた例は少ない。本研究では、有限要素解析によりねじ転造加工時の材料の変形挙動およびダイス摩耗のメカニズムの解明を目的とし、ダイスに加わる負荷の傾向を調査した。

1) 解析方法

ダイス形状はM6ねじ成形用ダイスと同形状とし、ブランク材は直径5.27 mmの円柱形モデルを解析に適用した。ブランク材は簡略化のためねじ頭部分は除き、試験片長さは解析時間との兼ね合いからねじ山を4個成形する4 mmとし、ダイスリード角は $3^{\circ}27'$ とした。

平ダイス式転造では移動ダイスが平行に往復運動しているところに素材がかみ込まれて成形されるが、解析ではかみ込みを表現することは難しいため、圧縮過程と平行移動過程の2段階に分けて解析を行った (Fig.21)。転造加工のシミュレーションはワークを弾塑性体、ダイスを解析対象としない剛体として行い、その解析結果から調査したい加工中のある瞬間を取り出し、そこでダイスを弾性体として被加工物の応力をダイスに転写するという方法を採用した。この方法により解析時間を短縮させた。その他の解析条件は以下の通りである。

- ・解析コード DEFORM-3D
- ・ワーク材料 SWCH10 要素数45,000
- ・ダイス材料 SKD11 要素数80,000
- ・変形抵抗式 Ludwikの式 ($\sigma = F \epsilon^n + Y$)
- ・ダイス-ワーク間摩擦条件 せん断摩擦 $m = 0.4$

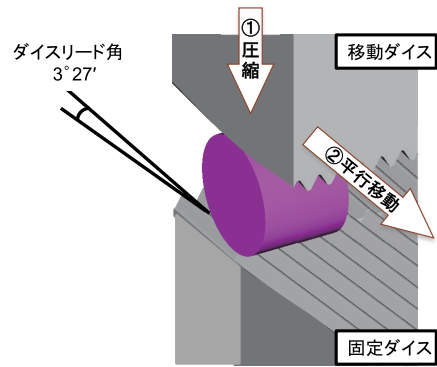


Fig.21 転造加工の解析方法

2) 解析結果

Fig.22は、ダイスの移動による素材の変形過程を示したもので、ダイス内に材料が充満していく様子わかる。ダイスに押し込まれたワークが材料流動により拘束面とは逆の面に向かって大きく傾いて変形する。このため面圧分布も加工が進むにつれダイス突起の片面に偏っている。これは、ねじ先端の加工で発生する歯こぼれ現象 (チップング) の原因となる現象である。Fig.23に、(a) 使用済みダイスの表面写真、(b) ダイス歯先部の面圧分布、(c) ダイス歯先部の摩耗状態を示す。固定ダイスの食いつき部付近およびそれに対応する移動ダイスの中央部で摩耗が激しい。Fig.23 (b) の面圧分布断面図を見ると、面圧はダイス歯先先端および歯先の両側面で高い値を示していることがわかる。Fig.23 (c) のダイス断面写真と解析結果を比較すると面圧の高い部分で摩耗が進行していることがわかる。以上から、ダイスにリード角を付け実際の加工条件に近づけた3次元有限要素解析により、転造における変形状態が解析できダイス摩耗箇所の予測ができた。

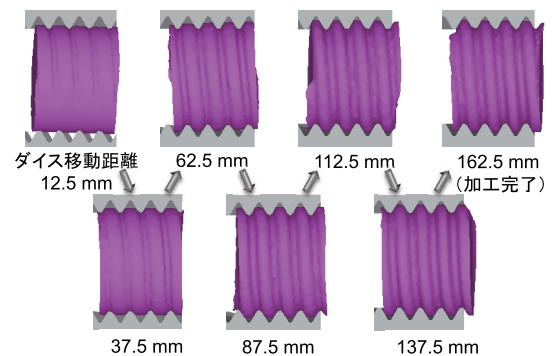


Fig.22 解析結果 (転造過程)

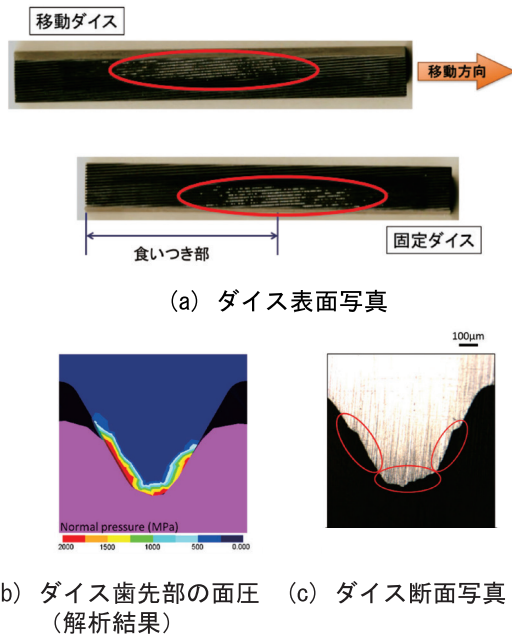


Fig.23 使用済みダイスの写真と解析結果との比較

3.6 圧延板の表面疵に関する研究

熱間圧延を施した鋼板の表面には種々の形状を持つ表面疵が現れる場合がある。これらの疵は鋼板の品質を損なうばかりではなく、製品の製造過程においては、材料の破断や割れを引き起こす原因にもなり、効率的な圧延作業の妨げとなるため、作業現場では表面疵を発生させないよう努力がなされている^{19,20)}。しかし、現段階では表面疵の発生を完全に防止することは困難である。

鋼板に発生する表面疵の形状は発生要因などにより種々であり、発生後に幾重にも圧延加工が施されることで、圧延後の疵は様々な形状を呈することになる。このことは圧延後の疵形状と圧延前の疵形状を正確に対応づけられることができれば、疵の発生原因の有効な推定手段となり、疵を減少させるための対応策もとることができることを示している。このような観点から、これまでも、鋼スラブ表面に割れ等の代表的な人工疵を施して圧延実験をして、疵の変形を調査した例もある²¹⁻²⁴⁾。しかし、数値解析を用いた表面疵の変形に関する研究は、あまりなされていない。それは疵部が材料全体の体積に比して微小であるために、困難な局所的な微小領域の解析をする必要があるためである。

熱間圧延において鋼板に現れる表面疵・突起の変形挙動を数値解析し、圧延前の疵・突起形状と圧延後に残る疵形状の関係、圧延条件による欠陥形状変化への影響について、日本鉄鋼協会創形創質工学会研究会として調査・研究した^{25,26)}。

本研究で使用した解析ソフトは、名古屋大学の湯川伸樹博士が開発したRIPAD-2Dでメッシュサイズの設定などが自由にコントロールできるので局部変形解析など、微小領

域の解析が可能である。今回解析に使用したメッシュの一例をFig.24に示す。疵近辺に段階的に細かなメッシュをつくることで疵付近の変形を細かく解析できる。

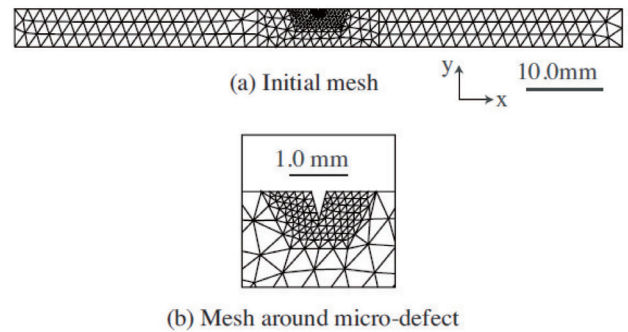


Fig.24 表面疵変形解析のための解析メッシュ

V字形状の疵が圧延によってどのように変形するかを調査した。圧延条件をTable 1に示す。初期疵開口部0.3 mm、初期疵深さ1.0 mm、圧下率30%の解析結果をFig.25に示す。図からV字形状疵はロールにかみ込まれる際、若干V字が開くが、そのままV字の形を残している。しかし、圧延が進行することで疵のV字の低部から圧着を

Table 1 圧延条件

板厚	10 mm
ロール半径	100 mm
ロール胴長	250 mm
軸受中心間距離	450 mm
ロール材質	高炭素クロム軸受鋼
最大圧下力	500 N
圧延速度	0.395 r.p.m

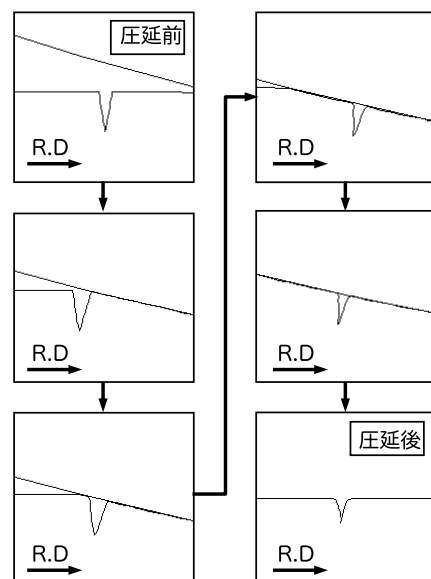


Fig.25 V字形状疵の変形過程

起こすことが確認できる。同条件で実施した実験結果と解析結果の比較をFig.26に示す。摩擦係数は $\mu = 0.20$ とした。両者は形状、寸法ともよく一致しており、解析によって表面疵の形状変化を予測することが可能である。そこで、各種の表面疵を設定して圧延後の疵形状の変化を解析から調査した。調査したのは、V形状疵、凹形疵、三角突起疵、凸形疵である。結果を圧延疵変形マップとしてFig.27にまとめた。製品に残る疵を観察することで圧延前の疵や欠陥の形状を予想し、疵発生原因の特定につなげて、表面疵のない圧延板の製造に結びつけばと考えている。

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、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思っはいけない。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掛かり、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、シミュレーションをうまく活用した人材育成も考えられる。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。

シミュレーションの利用拡大を進める上で問題なのがシミュレーションに必要なデータベースがほとんどないことである。変形抵抗、金型寿命等の材料データベース、トライボロジーに関する摩擦・摩耗データベース、熱伝達等に関する熱解析データベース、金属組織予測のためのデータベース等が必要であり、これらデータベースの整備が急務と思われる。これには、大学や学協会だけでなく、製造メーカ、素材メーカ、工具材料メーカ、ソフト開発メーカなどの協力体制が必要であろう。

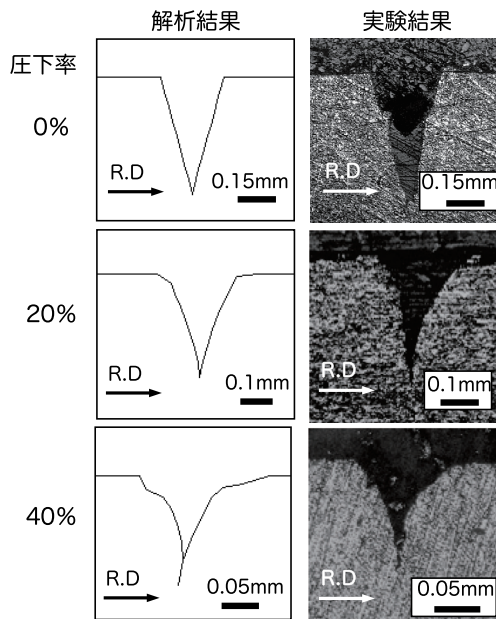


Fig.26 解析結果と実験結果との比較

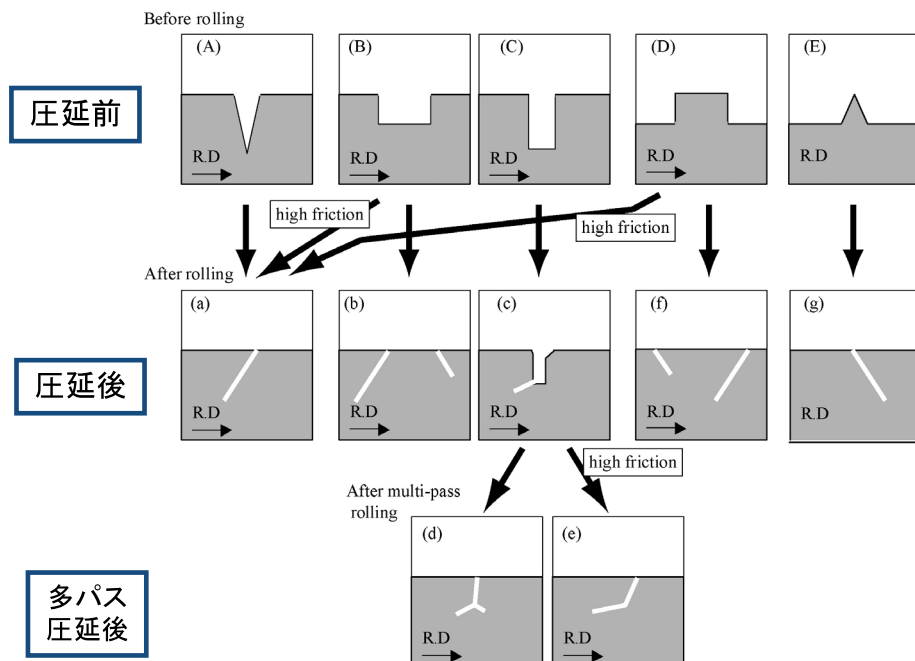


Fig.27 圧延疵変形マップ

参考文献

- 1) [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moore_slaw_\(1970-2011\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moore_slaw_(1970-2011).PNG)
- 2) 石川孝司: 電気製鋼, 66-3 (1995), 186-191.
- 3) 五十川幸宏: NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」シンポジウム講演予稿集, (2010), 123-124.
- 4) 湯川伸樹, 石川孝司: NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」シンポジウム講演予稿集, (2012), 103-104.
- 5) 野崎康仁, 湯川伸樹, 石川孝司: 平成23年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2011), 407-408.
- 6) T. Ishikawa, N. Yukawa, Y. Yoshida, H. Kim, Y. Tozawa: Annals of the CIRP, 49-1(2000), 169-172.
- 7) T. Ishikawa, T. Ishiguro, N. Yukawa, T. Goto: Annals of the CIRP, 63-1(2014), 289-292.
- 8) Y. Miwada, T. Ishiguro, E. Abe, N. Yukawa, T. Ishikawa, T. Suganuma: Procedia Engineering, 81(2014), 2006-2011.
- 9) 石川孝司, 吉田佳典, 菅沼友章: 特願2012-163271, 特開2014-18857.
- 10) 小林章人, 石川孝司, 水野一路: 2019年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2019), 141-142.
- 11) 石川孝司, 高柳聡, 吉田佳典, 湯川伸樹, 伊藤克浩, 池田実: 塑性と加工, 42-488 (2001), 949-953.
- 12) M. G. Cockcroft and D. J. Latham: J. Inst. Met., 96 (1968), 33-39.
- 13) F. A. McClintock: Trans. ASME, J. Appl. Mech., 35 (1968), 363-371.
- 14) M. Oyane: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 75-639 (1972), 596-600.
- 15) T. Ayada, T. Higashino and K. Mori: Proc. of 1st ICTP, Advanced Technology of Plasticity, 1 (1984), 553-558.
- 16) 伊藤耿一: 塑性と加工, 28-323(1987), 1222-1229.
- 17) 後藤学: 機械の研究, 41-1(1989), 169-175.
- 18) 平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書 <http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/2008/20-14-2-4.pdf>
- 19) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編: 鉄鋼材料便覧.
- 20) 日本鉄鋼協会編: 第3版鉄鋼便覧Ⅲ(1)圧延基礎・鋼板.
- 21) 榊井明, 梶谷英雄, 小林周司, 矢野幸三, 須田豊治, 三辻晴夫: 鉄と鋼, 68(1982), S 360.
- 22) 角南英八郎, 寒河江裕: 鉄と鋼, 68(1982), S 415.
- 23) 小河卓, 生嶋栄次: 鉄と鋼, 61(1975), S 555.
- 24) 井上健, 安中弘行, 松本洋: 材料とプロセス, 6(1993), 1167.
- 25) 石川孝司, 湯川伸樹, 吉田佳典, 殿畑勇飛: 鉄と鋼, 89 (2003), 1142-1149.
- 26) 湯川伸樹, 石川孝司, 吉田佳典, 小谷内章: 鉄と鋼, 91 (2005), 861-867.