

冷間鍛造工程設計支援知識ベースシステムの開発

牟禮雄二*, 高田 修**

Development of Knowledge-Based System for Process Planning in Cold Forging

Yuji MURE and Osamu TAKATA

This paper describes a new practical knowledge-based system for process planning in cold forging. In this system, a forged product is represented as an aggregation of forming patterns that consists of cylindrical pillar parts. The basic principle of inference is to adjust the diameters of neighboring stepped cylinders so that they are identical. Plural deformable process plans are generated using expert knowledge about working limits and metal flow. Moreover, it can evaluate process plans and select the optimal one by considering forming load, effective strain, etc.

Keyword : Knowledge-based system, Process planning, Cold forging, Expert knowledge, Plan evaluation

1. 緒 言

近年、冷間鍛造品の多様化に伴い、鍛造品の開発期間の短縮、質的向上、標準化が望まれている。鍛造品の開発において鍛造工程設計は、素材から鍛造品に至るまでの工程数や加工法を決定し、加工時間・コスト・鍛造品の品質を大きく左右するため、大変重要な設計作業である。設計において熟練技術者は、固有の経験やノウハウを利用して、鍛造品の機能を考慮し、工程設計を行っている。熟練技術者にとって加工法や金型等についての知識は大変有益であるが、熟練技術者の減少傾向の中、知識の継承は企業にとって大変重要となっている。知識の継承を実現するためには熟練技術者の鍛造工程設計に関する思考プロセスをモデル化し、また、そのノウハウを活用することが必要であり、知識工学の手法が有効である。

過去に、知識工学の手法を用いた冷間鍛造工程設計支援システム^{1)~4)}がいくつか開発されている。しかし、これらは、予め実績のある工程案を知識ベース化し、類似性を基に工程案を生成するもので、質の高い工程案を生成することができるが、類似の知識が登録されていないと対応できず、取り扱う製品形状についての自由度が低い。また、異なる加工法や新たな設備に対応することが困難である。

本研究における基本的な主眼は、冷間鍛造工程設計における熟練技術者の思考過程の忠実な再現である。特に、熟練技術者が鍛造工程案を生成する場合、工程の立案と同時に金型構造と材料の流動性あるいはメタルフローを並列的に思考していることを重視し、その思考プロセスをシステムに取り込むことで、コンピュータによる汎用性の高い冷

間鍛造工程の自動設計システムの開発を本研究の目標とした。具体的には、新たに提案する円柱段差部解消手法と加工限界、塑性流動と金型構造に関する熟練者の知識を用いることにより実施可能な複数工程案の生成が可能となった。また、加工コスト、加工荷重、相当ひずみなどを考慮することにより工程案を評価し、最適な工程案を選定し、これにより、様々な設備、材料、未知の鍛造品形状への展開が容易なシステムを構築した。

本論文は、上述の基本原則に基づくプロトタイプシステムの実装方法と工程案の最適化機能について記述する。また、実際的な鍛造品へ適用した結果について報告する。

2. 鍛造工程案生成のモデル化

2.1 対象形状

冷間鍛造品は、中実・中空形状を含めて軸対称部品が多い。しかし、中にはギヤやカムなど軸対称要素に異形要素を付加した疑似3次元部品も存在する。そこで本システムでは、これらの疑似3次元部品も対象とし、取り扱い形状に対する自由度を高くした。

2.2 工程案生成プロセス

工程案生成プロセスをFig. 1に示す。プロセスは、工程案生成および工程案評価で構成される。

まず、設計者が入力した鍛造品形状に基づき、「工程案生成」機能により工程案生成に関する知識を適用し、加工可能な複数の工程案を生成する。次に、複数の工程案に対し、1工程における複数部位加工（以下、複合加工と言う）に関する知識を用いて工程数を短縮する。最後に、「工程案評価」機能で「工程数、最大加工荷重、ひずみ等」の評価基準に基づき、設計者の入力した評価条件により設計者にとって最適な工程案を絞り込む。

*素材開発部（現 機械技術部）

**九州工業大学

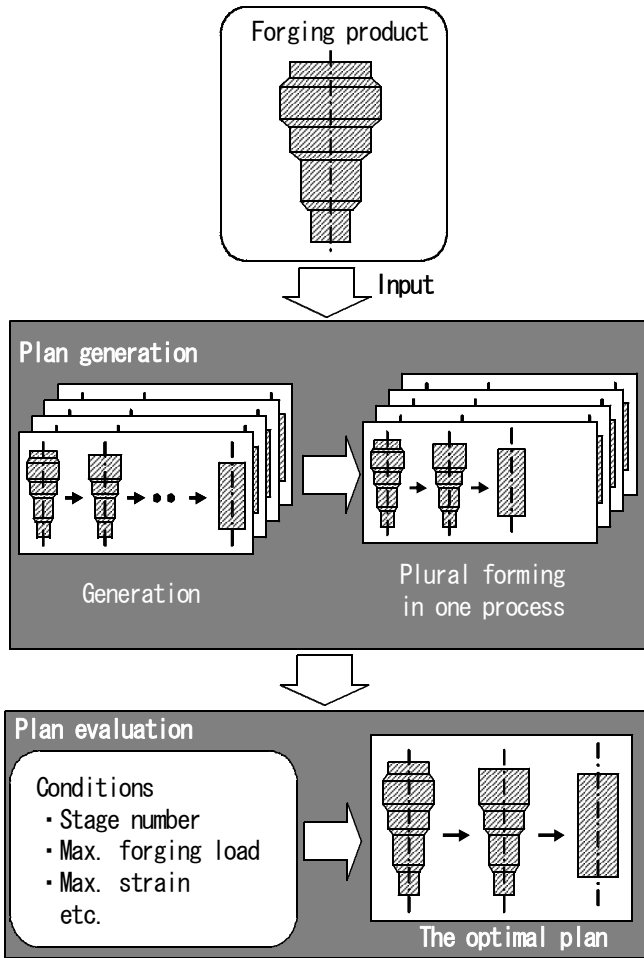


Fig. 1 The process of plan generation

2. 3 鍛造品の形状表現

鍛造品を構成する基本要素と形状表現をFig. 2に示す。鍛造品形状、中間形状および素材は、基本要素（以下、BEと呼ぶ）の並びで表現する。基本要素は、軸対称形状では円柱、円錐台、球台等の8種類、異形状では六角、トルクス、ギヤ等の6種類とし、ほとんどの冷間鍛造品を表現できる。例えば、図の中実形状の場合は [BE1, BE2, BE1, BE1, BE6, BE1, BE6, BE1] となり、中空形状の場合は外形と内形に層別し、外形が [BE1, BE6, BE1, BE6, BE1], 内径が [BE1] となる。基本要素はプロダクトモデルであり、形状情報（形状・高さ・直径など）が格納されている。プロダクトモデルは、形状や知識の記述方法が統一的に扱え、新しい知識の保守が容易に行える。

2. 4 円柱段差の定義

冷間鍛造では、円柱形状の素材に対して素材直径よりも小さい円柱を形成する押し出し加工や素材直径よりも大きい円柱を形成する据込み加工等を複数回に分けて加工することで鍛造品が得られる。素材に対して1回分の加工を施すと、円柱段差が1段増加する。本研究では、Fig. 3に示すように、鍛造品を円柱段差部で構成される加工の集合体であると定義し、段差を加工の履歴として取り扱う。

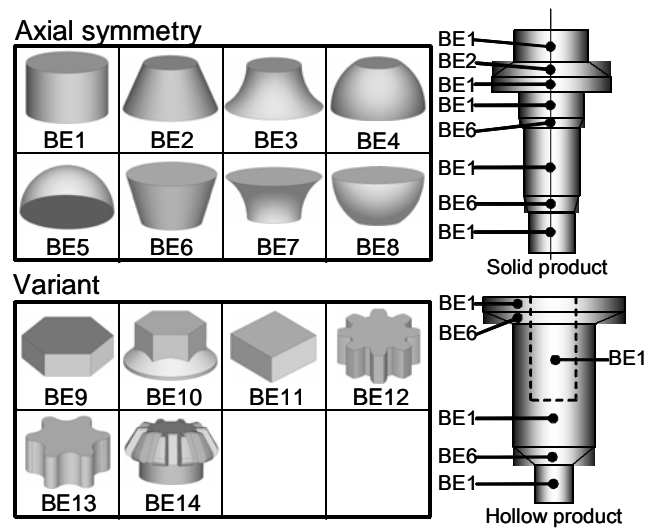


Fig. 2 Basic elements used for forging product representation

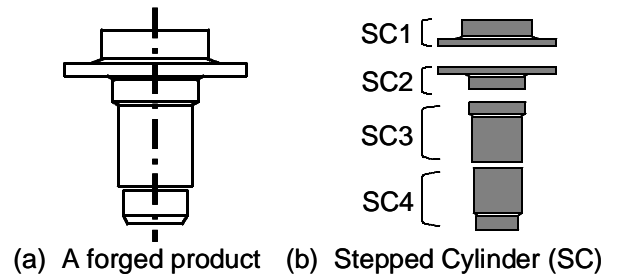


Fig. 3 Schematic illustration representing aggregation of stepped cylinder

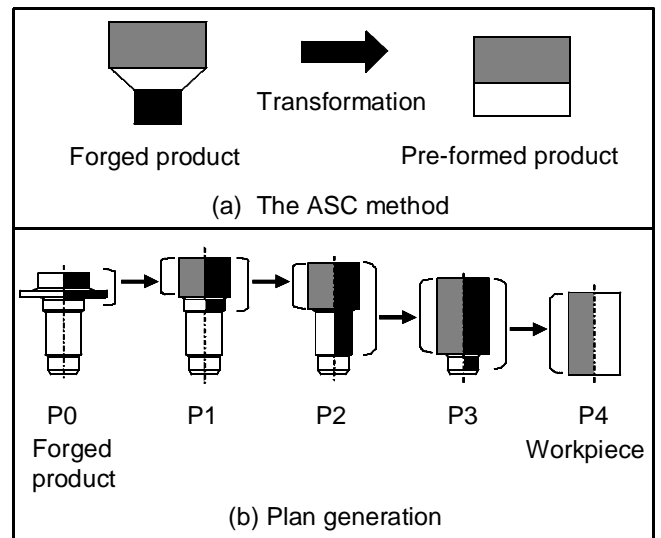


Fig. 4 Schematic illustrations representing the basic principle for plan generation

2. 5 円柱段差解消法による鍛造工程案生成

本システムによる工程案の生成過程をFig. 4 (a)に示す。図のように工程案生成は、加工とは逆向きに、円柱段差の集合体である鍛造品に対し、円柱段差を解消していくことで加工前の素材形状を生成する。円柱段差解消は、具体的には「隣接する二つの円柱段差部の直径を揃える」と

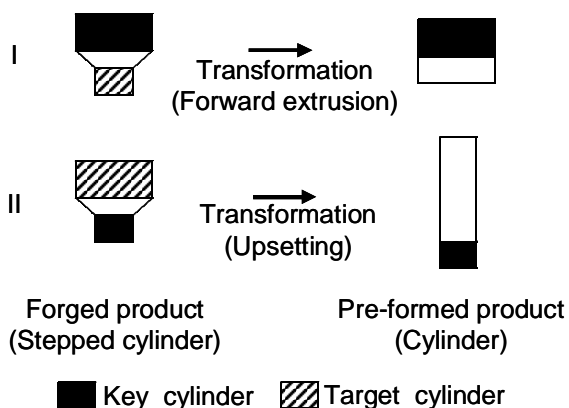


Fig. 5 Schematic illustrations representing key and target cylinder

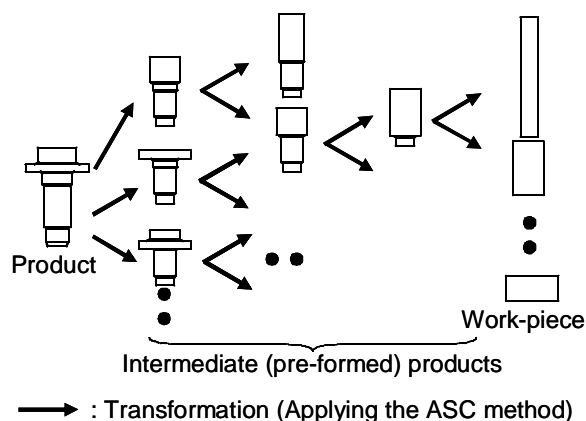


Fig. 6 Schematic illustrations representing plural process plans generated by the ASC method

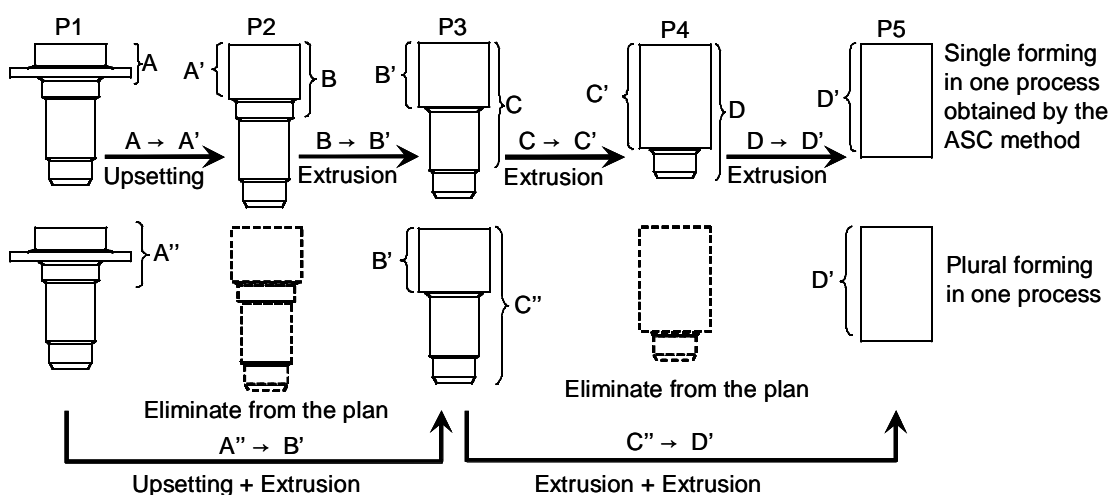


Fig. 7 Schematic illustration representing the plural forming in one process

定義できるため、本システムでは工程案生成の基本原則を「鍛造加工に関する知識（加工限界、型構造および材料の流動性）を用いて、隣接する異なる直径の円柱段差部をどちらか一方の直径に揃えることで、円柱段差部を一つ減らし、より単純な中間形状を生成する」と定式化した。これは、熟練設計者が工程案を設計する際の思考過程を忠実に再現したものである。この操作を鍛造品形状に適用し、円柱素材になるまで繰り返し、加工プロセスを決定する。以上の推論の基本原則を円柱段差解消手法（ASC法）と呼ぶ。ここで、N個の円柱部を持つ場合 $2^{N-1} \times (N-1)!$ 個の異なる工程案を生成することになる。このとき、加工に関する知識（加工の限界、流動性、型構造）を用いて実現不可能なものは削除する。Fig. 3 (a)の鍛造品では384個の工程案が生成される。

円柱段差解消法の具体的な流れを以下に説明する。Fig. 4 (b)の鍛造品は5つの円柱段差部から構成される。すなわち、円柱素材から5回の加工を施すことにより鍛造品を加工することができる。鍛造品 (P0) の1番目および2番目の円柱に対して、円柱段差解消法を適用すると中間形状

P1が生成される。同様の操作を繰り返すと4回の加工で工程案 P0 → P1 → P2 → P3 → P4が生成される。

円柱段差変換パターンをFig. 5に示す。隣接する段差部の直径を揃えるという作業は、基準とする直径の選択により2通りの変換パターン（中間形状）が存在する。これにより複数の工程案を生成することができる。

複数工程案生成のメカニズムをFig. 6に示す。1つの鍛造品には複数の隣接する円柱段差部が存在するため、段差部それぞれについて円柱段差変換パターンを適用することにより複数の工程案を生成する。すなわち、円柱段差解消の基本原則を適用するのみで、実用性の高い工程案生成が可能になる。

2. 6 工程案の複合化

円柱段差解消の基本原則により生成される工程案は、1加工1工程の実施加工な工程案である。そのため、工程数は円柱段差数以上となる。しかし、実際には複数の加工法を同時に行う複合加工を行い、工程を短縮している。これを工程の複合化という。本システムでは、複合加工を適用した工程案を生成するための工程の複合化を「生成された

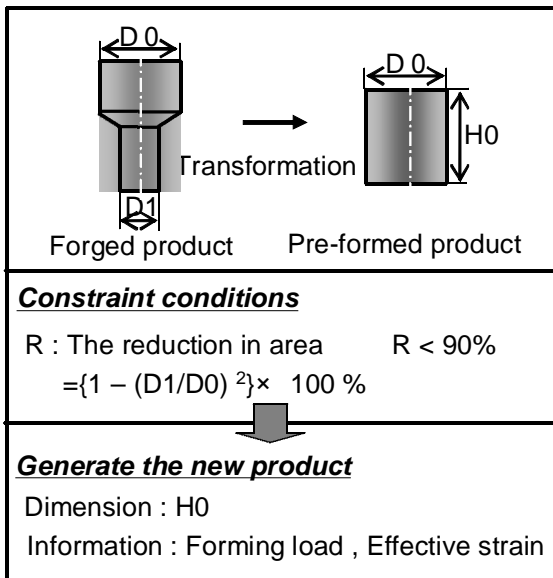


Fig. 8 An example of the knowledge for working limit

工程案中の中間形状を省略する操作」と定義する。すなわち、Fig. 7に示すように、工程案の複数段差を1度に解消することで複合化を図る。なお、工程の複合化の際は、複合化に関する知識（断面減少率が加工可能な範囲内か、異なる加工法の組み合わせが実現可能か、等に関する制約）を適用し、条件を満たせば複合化可能としている。これにより、2つの加工を1工程で実施した工程案が生成される。同様の操作を工程の複合化できなくなるまで(知識を適用できなくなるまで)繰り返す。これにより、実施可能な複合加工を含んだ工程案を生成することができる。

3. 鍛造加工に関する知識

円柱段差解消法の適用のみでは加工不可能な工程案を生成する可能性がある。そこで、探索空間絞込みの知識を適用することにより不必要な円柱段差解消操作の打ち切りを行なう。本システムでは、探索空間絞込みの知識として、「加工限界に関する知識」、「塑性流動に関する知識」等を組み込んだ。これらの知識は、個別に適用できるため、組み合わせて利用可能で、異なる鍛造品、新たな加工法・設備への柔軟な適用が可能である。

3. 1 加工限界に関する知識

冷間鍛造の成形は、圧縮変形を主体としたものであるため、断面減少率あるいは据込み率が増加すれば加工荷重が増大し、工具摩耗や破壊を引き起こす。断面減少率は、必要な加工圧力、加工限界に直接的に影響を及ぼす。そこで、断面減少率や据込み率等を形状変換の制約条件として用いる。制約条件が一定の範囲内であれば加工可能であるとし、形状の変換を行う。

本システムでは、加工限界の知識として、RE（軸押し出し）、

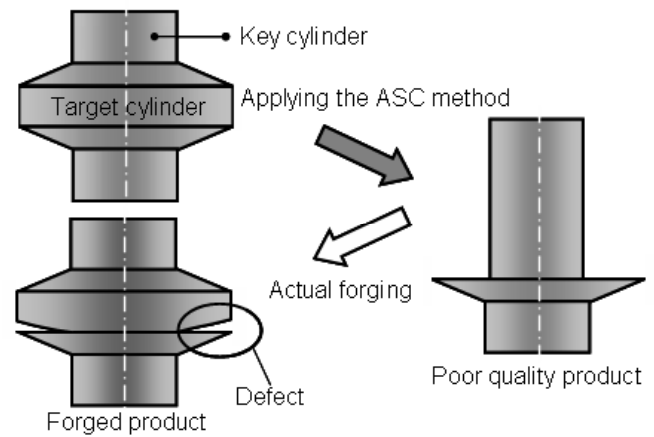


Fig. 9 An example of the poor quality products

US（据込み）、CE（缶押し出し）、SH（シヤリング）の4つの加工を取り扱う。その他のコイニング、ノージング等の知識は補助的な知識として取り扱う。

加工限界に関する知識の一例として、前方押し出し加工に関する知識をFig. 8に示す。この例では、加工限界に関する制約条件として、断面減少率（90%未満）が記述されている。この制約条件を満たすものは、次に述べる塑性流動に関する知識を適用できれば、一つ前の中間形状に戻すことができる。

3. 2 塑性流動に関する知識

塑性流動に関する知識として、形状要素の連続性について考慮する必要がある。円柱段差解消法では、押し出し加工に関する形状変換知識を適用した場合、変換後の形状の構成要素は連続性を保っているため塑性流動は正常となる。しかし、据込み加工に関する形状変換を行った際に粗悪な塑性流動が発生してしまうことがある。粗悪な工程事例をFig. 9に示す。この工程案では形状を変換させた後の形状において形状要素の連続性がなくなり巻き込みが発生する。そのため、このような工程案は実用的ではないため、工程案の探索を終了するようにする。

4. 工程案の評価

本システムでは、1つの鍛造品に対して加工可能な多数の工程案が生成される。設計者が最適な、あるいはより適切な工程案を絞り込むためには生産環境に応じた工程案の評価機能が必要である。工程案の評価項目は、素材の形状・寸法、加工荷重などの1工程に関する評価と、加工品のひずみの累積、工程数、中間熱処理回数などの工程案全体に関する評価に分けることができる。本システムでは評価項目が評価基準を満足しているか否かで工程案の評価・絞込みを行う。具体的には、複数の工程案について設計者が希望する評価項目とその評価基準を入力し、各工程案に対し1工程ごと評価を実行し、評価条件を満足している工程

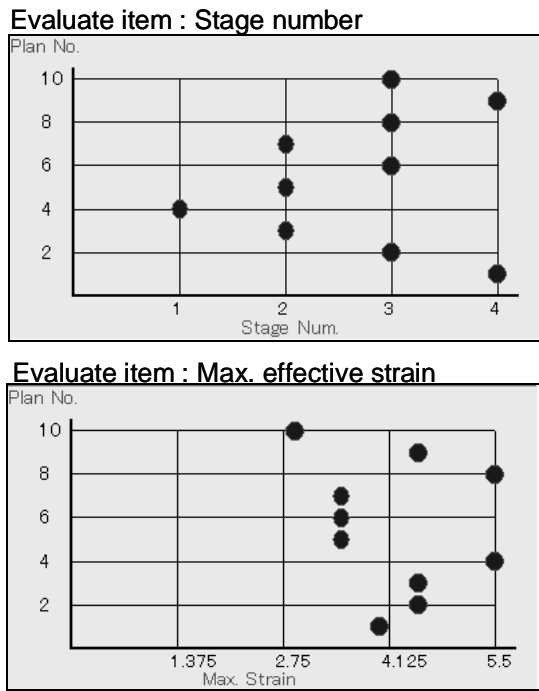


Fig. 10 Examples of evaluation output

案を残す。この操作を設計者が要求する工程案が得られるまで繰り返す。工程案の評価項目は、工程数、最大加工荷重、最大塑性ひずみ、素材径、焼鈍回数である。評価機能の出力例をFig. 10に示す。横軸に評価項目、縦軸に工程案番号が表示され、評価後の工程案の分布が確認できる。評価基準に達しない工程案は、●印が消去される。

5. システムの実装

構築したシステムの概要をFig. 11に示す。システムは、GUI (Graphical User Interface)、工程案生成機能、工程案評価機能、知識ベースおよびデータベースから構成される。GUIから鍛造品形状を入力し、工程案生成機能で知識ベースおよびデータベースを用いて材料特性や設備に関するデータを取得し鍛造品形状から素材に至る工程案を生成する。生成された工程案は、随時、ワーキングメモリに蓄えられる。工程案評価機能では、工程案生成機構によって生成された工程案について評価条件を入力とし、工程案評価で工程案の評価を行い、条件に合った工程案を解として出力する。知識ベースにはそれぞれの工程で使われる加工限界などの知識が登録されており、データベースには材料特性や設備などのデータが登録されている。

6. システムの試行

システムが様々な鍛造品に対して複数の工程案を生成できるかなど、システムの有効性を検証するため、過去に加工実績がある鍛造品に対してシステムを試行した。入力形状をFig. 12に示す。入力形状は、中実および中空の2種類

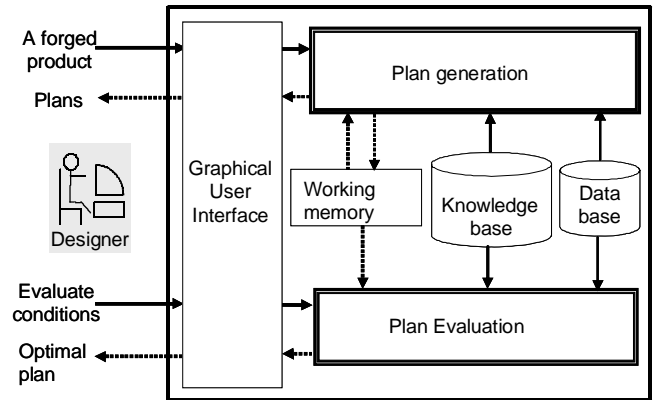
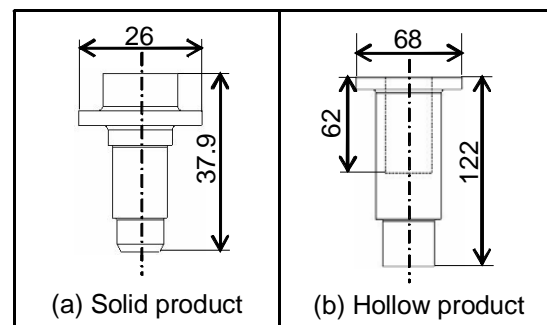


Fig. 11 Schematic illustrations representing knowledge-based system for process planning in cold forging



Material : Carbon steel (JIS-S45C)

Fig. 12 Examples of the cold forged products

で、材質は、いずれもS45Cとした。

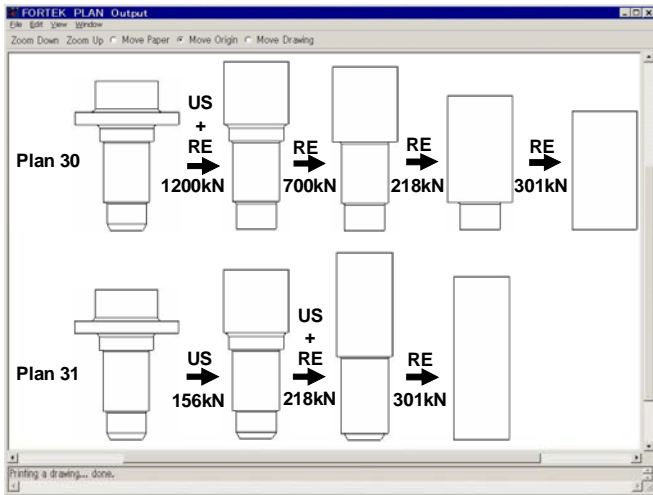
中実の鍛造品を入力とした場合の推論結果の一例をFig. 13(a)に示す。図のとおり、素材径の異なる工程案が10案生成された。出力結果は、工程ごとに加工方法、加工荷重が表示され、工程の特徴が詳細に理解できる。Fig. 13(b)は、素材から鍛造品に至るまでの塑性ひずみを計算し、指定工程の鍛造品の塑性ひずみ分布を要素ごとに表示したものである。鍛造品ごとに累積した塑性ひずみの分布を確認でき、設計者にとっては非常に有益な情報となる。なお、生成された工程案は、いずれも実際に加工可能である妥当な工程案であった。

中空の鍛造品を入力とした場合の結果の一例をFig. 14に示す。生成された工程案数は21である。ここで、中空の鍛造品に対し得られた工程案を以下に示す評価条件で絞り込んだところ、2案にまで絞込むことができた。

<評価条件>

- ・工程数 2工程以内
- ・最大荷重 800kN
- ・素材径 41.8mm

いずれの試行でも過去に生産実績がある工程案が生成されており、システムの有用性を確認することができた。



(a) Examples of output

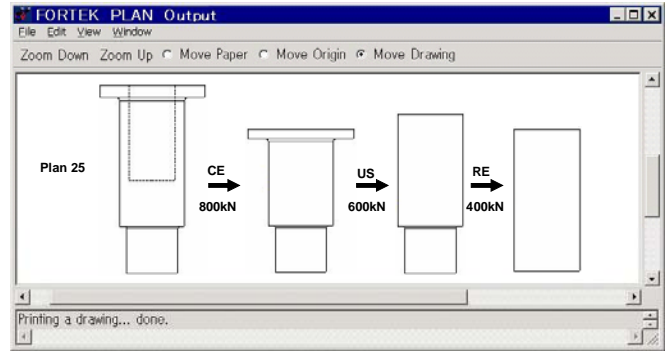
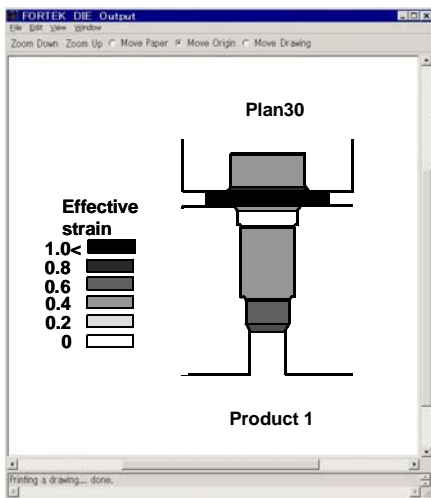


Fig. 14 Typical output of forging sequence plans for hollow product



(b) Effective strain

Fig. 13 Typical output of forging sequence plans for solid product

7. 結 言

冷間鍛造品を対象として、隣接する円柱段差部の直径を揃える円柱段差部解消手法により、鍛造工程設計者の思考プロセスをモデル化し、また、加工限界、流動性、型構造、

および複合化、評価に関する知識の表現方法と推論手法を用いて鍛造工程設計支援知識ベースシステムを開発した。システムは、「工程案生成」機能、「複合化」機能、「工程案評価」機能から構成した。本システムを様々な鍛造品に対して実行したところ、生産実績のある工程案と同等な結果を得ることができた。

今後の課題として、金型構造設計および材料の塑性流動に関する機能を充実、システムの操作性および実用性を向上させる必要がある。

参 考 文 献

- 1) H. Kim, Y. Im : Journal of Materials Process Technology, **95**, 262-274(1999)
- 2) N. Alberti et al. : Journal of Intelligent Manufacturing, **9**, 353-359(1998)
- 3) Q.C. Hsu, R.S. Lee : Journal of Advanced Manufacturing Technology, **6**, 45-61(1991)
- 4) T. Mahmood, B. Lengyel, T.M. Husband : First International Conference on Expert Planning Systems, **322**, 141-146(1990)