

冷間鍛造金型構造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 Die Configuration Design in Cold Forging

Yuji MURE and Osamu TAKATA

In this study, we had developed knowledge-based system for process planning in cold forging, which is widely applicable to various shapes. In the next step, we have developed a knowledge-based die configuration design system, which can generate suitable die configurations from process plans obtained by previous system. We have analyzed and reproduced the expert engineer's thinking process of die configuration design. Moreover, we have formulated the data representation, inference method and knowledge-base.

Keyword : Knowledge-based System, Die configuration design, Cold forging

1. 緒 言

自動車産業の発展と共に進歩してきた冷間鍛造技術は、低コスト、歩留まりの向上および高生産性等の優れた特徴を持つ加工法である。冷間鍛造用金型は、成形部に極めて高い応力が発生するため、金型材質はもちろん、金型の補強方法、分割方法、加工荷重、プレス剛性など考慮すべき項目が多い。さらに、金型設計の良否が金型寿命や加工品の偏肉、芯ずれ、曲がりなどの欠陥や精度に大きく影響する。熟練技術者は、設計に関する経験やノウハウに基づいた知識を利用して、金型設計を行っている。熟練技術者の思考過程は、経験や環境によって異なるため、経験の浅い技術者では対処が難しく、熟練技術者の減少傾向は、企業の存続を揺るがす問題となりつつある。

多くの加工技術において、金型設計支援システム^{1)~5)}は開発されているが、冷間鍛造分野で金型設計を支援するシステム⁶⁾は少なく、実用化には至っていない。熟練技術者の思考過程を直接支援し、その経験やノウハウを適切に利用するには、知識工学の手法が有用である。鍛造金型の開発において、加工手順、加工法および設備などを決定する鍛造工程設計とその結果を使った金型設計は、連携して作業する必要がある。そこで筆者らは、手始めに知識工学手法を用い、冷間鍛造工程設計支援知識ベースシステム⁷⁾を開発し、実用化した。

本研究では、金型構造設計のプロセス、設計対象および知識をモデル化し、金型構造を設計する推論手法を確立した。本報では、開発した知識ベースシステムとシステムを実用課題に適用した結果について報告する。

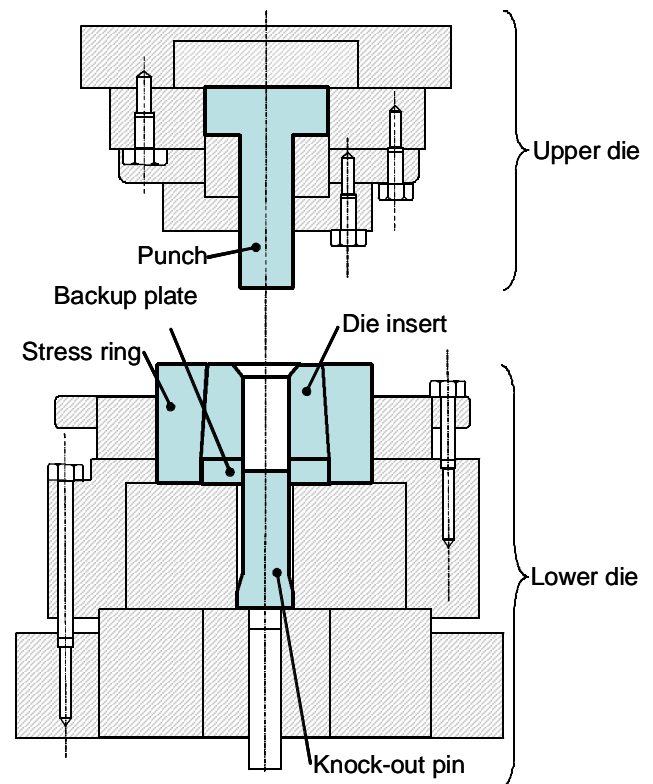


Fig. 1 Schematic illustration representing die configuration

2. 金型設計プロセスの分析

冷間鍛造の金型設計では、工程設計で得られた素材から目標形状に至るまでの複数工程で成形される鍛造品と加工法に関する情報に基づき、成形に直接関係する上金型と下金型の構造を決定（以下、金型構造設計と言う）した後、プレスへの取付けを考慮した金型全要素の詳細寸法を決定（以下、金型詳細設計と言う）する。このうち本研究では、金型構造設計を対象とする。ここで、冷間鍛造金型の概要

*機械技術部

**九州工業大学

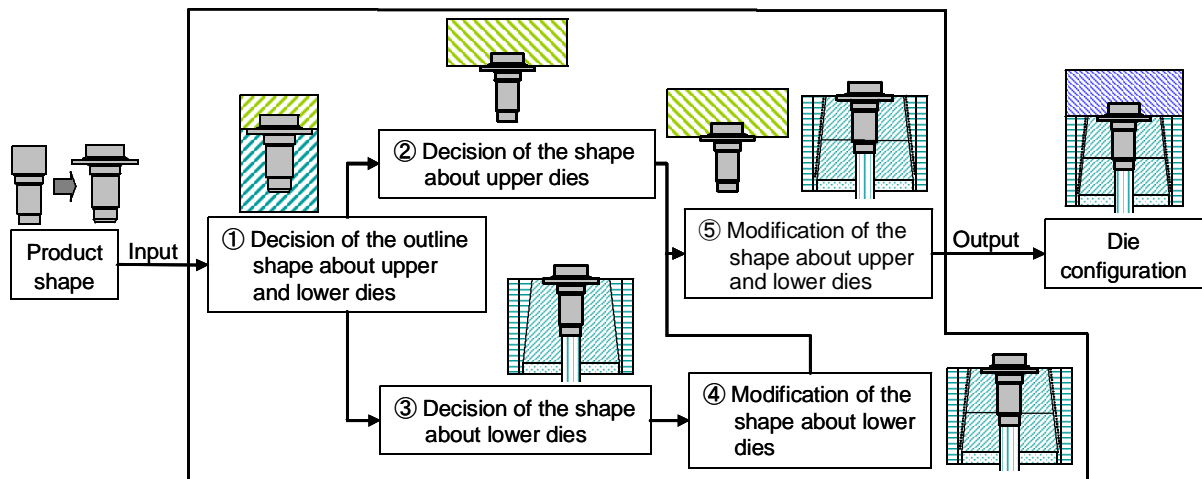


Fig. 2 Flow chart of die design process

をFig. 1に示す。成形に直接関係する金型は、図の太線で示す上金型（パンチ）と下金型（ダイインサート、補強リング、ロックアウトピン、バックアッププレート）から構成される。また、金型構造設計プロセスの概要をFig. 2に示す。本研究では、金型構造設計プロセスを以下のとおり5つに分類し、モデル化した。

2. 1 上・下金型概略決定プロセス

鍛造加工では、上金型と下金型を用いて加工するため、加工後の鍛造品をいかに金型から排出するかが問題になる。そこで、上・下金型概略決定プロセスは、「上・下金型概略決定の知識」を用いて鍛造品が成形可能であり、加工後に鍛造品の金型からの排出を可能とする上金型と下金型を決定する。

2. 2 上金型形状決定プロセス

上金型は、プレスの動力を素材に伝える役割がある。冷間鍛造では、上金型に非常に大きな圧縮応力が繰り返し発生するため、金型が破壊することがある。そこで、上金型形状決定プロセスでは、「上金型形状決定の知識」を用いて上金型の座屈限界を考慮し、金型破壊を回避するような上金型形状を決定する。

2. 3 下金型形状決定プロセス

下金型形状決定プロセスは、上・下金型概略決定プロセスで決定した下金型概略形状に対して、「下金型形状決定の知識」を用いてダイインサート、補強リング、ロックアウトピン、バックアッププレートの各形状を以下のとおり決定する。

2. 3. 1 ダイインサート

鍛造品を形成する主要部分であるダイインサートについて、加工圧力に耐えるようにダイインサートの寸法形状を「ダイインサートの知識」を用いて決定する。

2. 3. 2 補強リング

冷間鍛造では、成形圧力が2000MPaにも達することがあるため、円周方向の引張応力によりダイインサートが破壊

する場合がある。金型破壊を回避するため、補強リングを用いて、成形時にダイインサートに発生する円周方向の引張応力に対抗する圧縮応力を予めダイインサートに与えておき、成形時の応力を相殺することで金型破壊を防ぐ工夫がなされる。以上を考慮し、ダイインサートに発生する応力を推定し、その値に応じて補強リングの個数と寸法形状を「補強リングの知識」を用いて決定する。

2. 3. 3 ロックアウトピン

ロックアウトピンは、成形後にダイインサートに固着した鍛造品を排出する機能、あるいは成形時に鍛造品を下方向から拘束する機能がある。以上を考慮し、ロックアウトピンの構造と寸法形状を「ロックアウトピンの知識」を用いて決定する。

2. 3. 4 バックアッププレート

バックアッププレートは、補強リングへ圧入したダイインサートを加工軸方向に固定する機能を持つ。また、成形時の圧力を受ける受圧板としての役割がある。圧力の伝達範囲はバックアッププレートの厚さによって変わる。以上を考慮し、バックアッププレートの寸法形状を「バックアッププレートの知識」を用いて決定する。

2. 4 下金型形状修正プロセス

下金型形状決定プロセスで決定した下金型詳細形状に対して、次の様に下金型形状を修正する。

2. 4. 1 ダイインサートの分割

鍛造加工時にダイインサートの段差部等では、応力集中により金型が破壊することがある。金型破壊を回避するためにはダイインサートを予め分割しておくことが有効である。そこで、成形圧力を考慮し、ダイインサートを分割するか否かを判断し、分割が必要な場合は分割場所を「ダイインサート分割の知識」を用いて決定する。

2. 4. 2 締め代の設定

ダイインサートの補強は、テーパ圧入あるいは焼嵌めにより行う。具体的には、ダイインサートをダイインサート

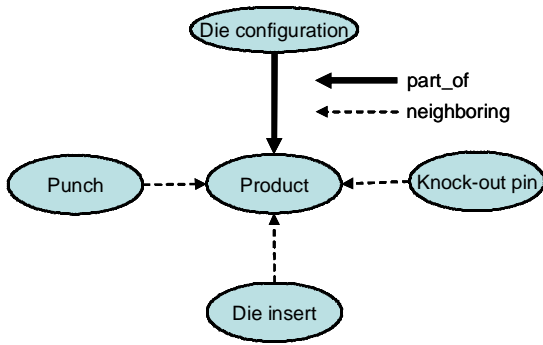


Fig. 3 Relation between die configuration and its composition elements

の内径より小さい内径を持つ補強リングに締め込み嵌めする。この内径の差を締め代と言う。締め代は大きい方が良いが、大きすぎると圧入時に金型が破壊する。そこで、圧入あるいは焼嵌めにおける締め代を「締め代の知識」を用いて決定する

2. 5 上・下金型修正プロセス

上金型と下金型の詳細形状を決めた後、双方の干渉をチェックする。また、補強リングの高さなどを「上・下金型修正の知識」を用いて決定し、最終的な金型構造の設計案を完成させる。

3. 設計対象のモデル化

鍛造工程設計で得られた設計案を用いて知識処理により金型構造を設計するには、鍛造品と金型構造を一元的に管理できる統一的な形状モデルが必要である。また、金型構造に関する設計の対象モデルが、設計知識に対して適用しやすく、設計知識の変更により対象モデルが変化することを表現できなければならない。そこで本研究では、Fig. 3に示すように金型構造と鍛造品を全体と要素を表す「part_of」の依存関係を持たせた。また、金型構造を構成する要素間で、隣接関係を表す「neighboring」の依存関係を意味ネットワークにより表現することで、設計対象を一元的に管理する。

意味ネットワークにより表現した金型構造をFig. 4に示す。各ノードは、設計対象を表し、属性（寸法情報等）の集合体である。この属性値を決定することで設計が行われる。パンチは、属性として長さ、径、また、鍛造品形状によっては内径等を持つ。ダイインサートは、属性として上端径、下端径、高さ、パンチ摺動部長さ、ノックアウト摺動部長さ等を持つ。ダイインサートの内形は、鍛造品形状の外形により決定されるため、隣接要素として鍛造品形状を持つ。補強リングは、属性として径、高さ等を持つ。補強リングの内径は、ダイインサートの外径とバックアッププレートから決定されるため、隣接要素としてダイインサートとバックアッププレートを持つ。バックアッププレ

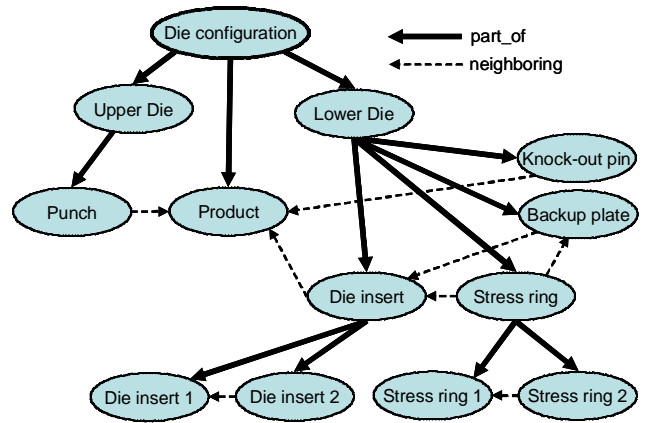


Fig. 4 Schematic illustration representing die configuration using semantic network

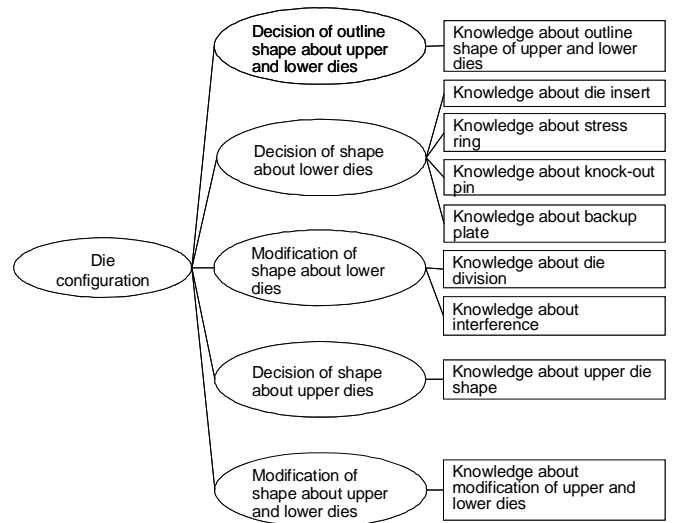


Fig. 5 Relation between die configuration design process and knowledge

トは、属性として径と高さ等を持つ。外径は、ダイインサートの外径から決定され、内径はノックアウトピンから決定されるので、隣接要素としてダイインサートとノックアウトピンを持つ。ノックアウトピンは、属性として径、長さ等を持つ。ノックアウトピンの外径は、鍛造品形状の下端径であり、隣接要素として鍛造品を持つ。以上のように、属性値が隣接する形状から一意に決まるとき、隣接関係を持たせることで設計対象の形状はその隣接要素に依存し、依存先の形状を参照することで表現できる。

4. 金型構造設計に関する知識

金型構造設計プロセスに対して適用される知識をFig. 5に示す。プロセスごとに利用する知識の内容は異なるが、知識の適用方法は同じであるため、知識はすべて同じ形式で記述することができる。知識は、if_then形式により、それを適用するための条件部と、条件が満たされた時に導かれる結論部で構成される。当該形式で記述された知識を設計プロセスごとに分類し、知識ベースに格納した。以下

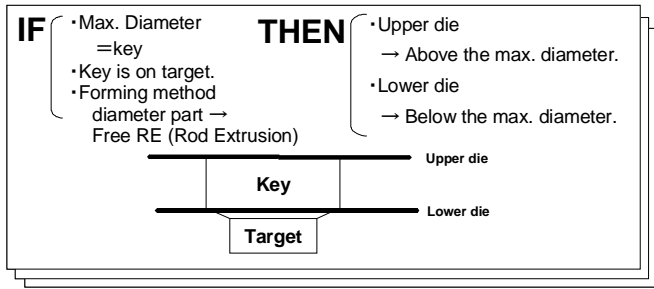


Fig. 6 An example of the knowledge for outline shapes of upper and lower die

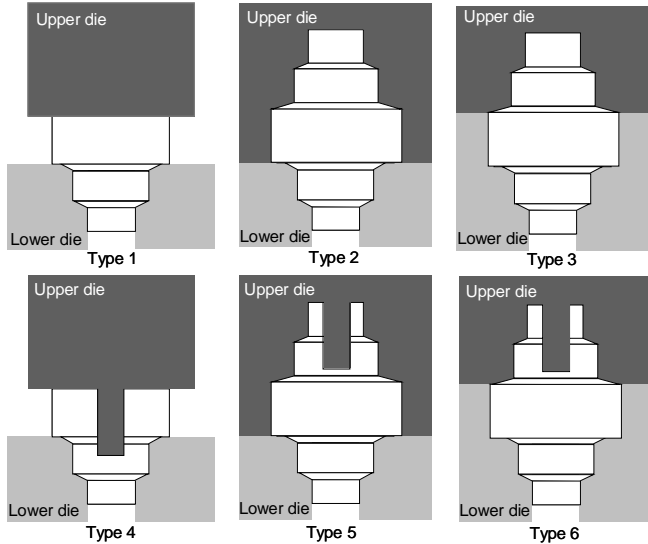


Fig. 7 Schematic illustrations representing shape pattern of upper die

に各プロセスにおける知識の詳細を示す。

4. 1 上・下金型概略決定の知識

前方押し鍛造の場合の上・下金型の概略形状を決定する知識の一例をFig. 6 に示す。加工後に干渉することなく金型から鍛造品を排出するには、上・下金型の分割位置設定が重要となる。そこで、鍛造品の最大径部を基準に上下に分割する。また、拘束据込み鍛造では、加工対象となる最大径部を拘束し、自由押し鍛造では、加工対象となる最大径部を拘束しないように上・下金型の概略形状を決定する。

4. 2 上金型形状決定の知識

据込み鍛造において、上金型であるパンチの形状パターンをFig. 7 に示す。大別すると内形がない形状（中実の鍛造品）、内形がある形状（中空の鍛造品）および後方押し要素があるマンドレルの付いた形状に分類される。

上金型形状を決定する知識の一例として、後方押し要素がなく、上・下金型概略形状決定で上金型に内形が存在しない場合の例をFig. 8 に示す。上金型の形状は、上・下金型概略形状決定で得られた上・下金型のパターンによって異なる形状となる。これらの形状について、パンチとマンドレルの径と長さは成形圧力に対して座屈限界以内か否

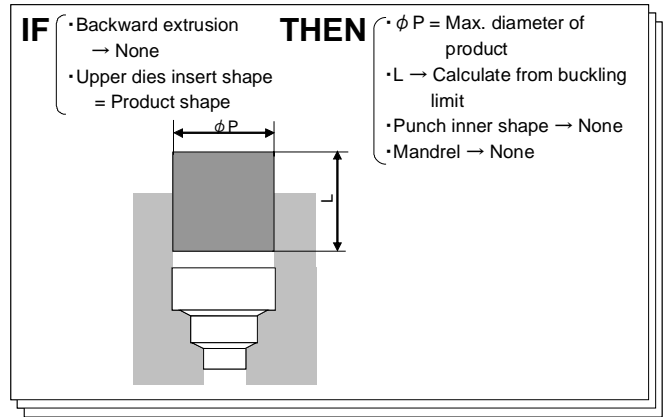


Fig. 8 An example of the knowledge for upper die

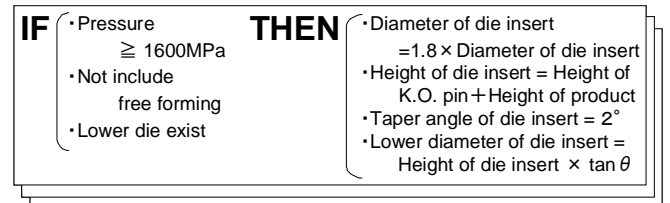


Fig. 9 An example of the knowledge for die insert

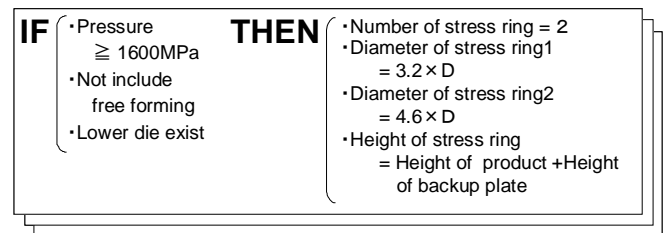


Fig.10 An example of the knowledge for stress ring

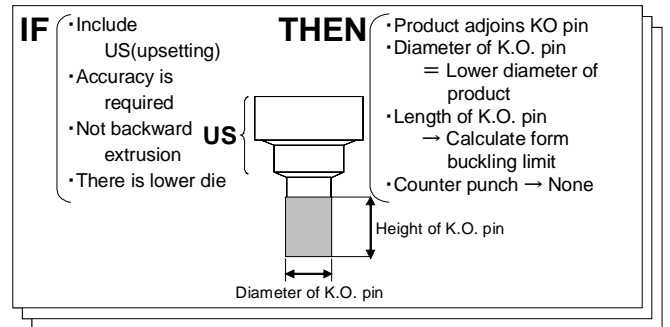


Fig.11 An example of the knowledge for knock-out pin

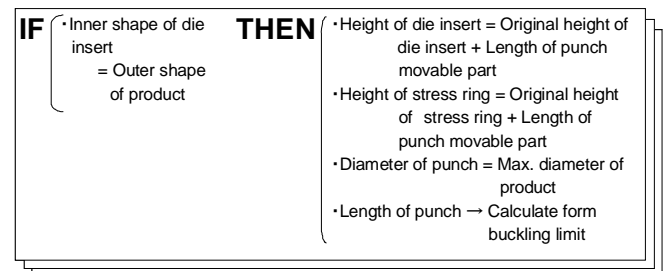


Fig.12 An example of the knowledge for modification of upper and lower dies

かを考慮して決定する。

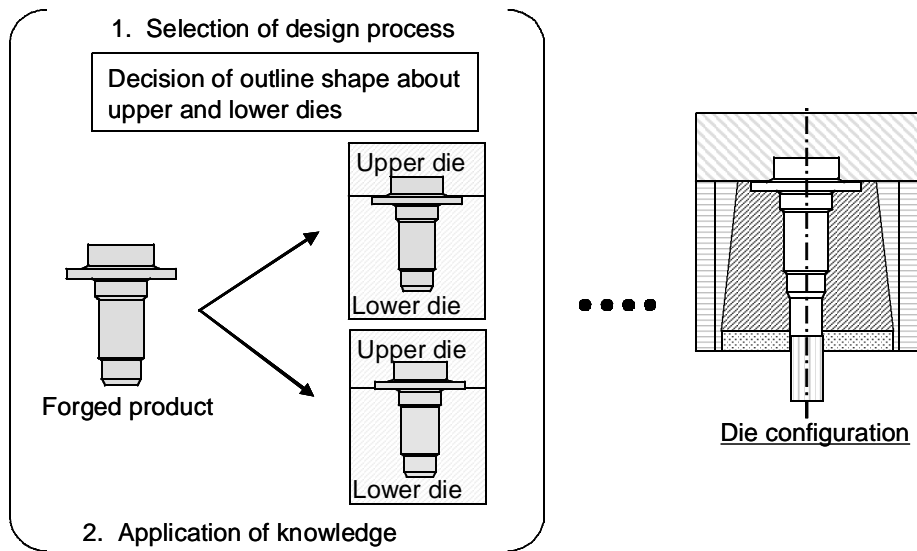


Fig.13 Schematic illustration representing inference of die configuration design

4. 3 下金型形状決定の知識

4. 3. 1 ダイインサート

ダイインサートに作用する内圧が1600MPa以上の場合のダイインサートの寸法形状を決定する知識の一例をFig. 9に示す。ダイインサートは、鍛造品を成形する部分とロックアウトピンの摺動部とから構成される。鍛造品の下端からロックアウトピン摺動部を設け、ダイインサートに発生する応力を考慮してダイインサートの寸法形状を決定する。

4. 3. 2 補強リング

ダイインサートに作用する内圧が1600MPa以上の場合の補強リングの寸法形状を決定する知識の一例をFig. 10に示す。補強リングは、ダイインサートに作用する内圧を考慮し、個数と寸法形状が決定される。

4. 3. 3 ノックアウトピン

ノックアウトピンと鍛造品が隣接し、下からの後方押し要素が存在しない場合のノックアウトピンの寸法形状を決定する知識の一例をFig. 11に示す。ノックアウトピンの寸法形状の決定に際して考慮すべき項目は、直径、長さおよびノックアウトピンと鍛造品の隣接関係である。ノックアウトピンは、加工後に金型に固着した鍛造品を排出するために加工軸方向の圧縮応力に耐える構造でなければならない。ノックアウトピンの直径は、鍛造品形状から一意に決定される。また、ダイインサートに拘束されない場合は、座屈限界以内で長さを決定する。

4. 3. 4 バックアッププレート

加工時において、バックアッププレートに作用する圧力分布は均一ではなく、鍛造加工時の加圧中心付近で最大になり外側ほど小さくなる。そこで、加圧側と受圧側の面積比だけでなく圧力の伝達範囲を考慮してバックアッププレートの厚さを決定する。

4. 4 下金型形状修正の知識

4. 4. 1 ダイインサートの分割

加工時にダイインサートで発生する応力集中を回避するため、応力集中が予測される部位を予め分割し、形状を修正する。応力集中部位は、鍛造品形状と加工法に関する経験則をデータベースへ登録しておく。

4. 4. 2 締め代の設定

ダイインサートと補強リングの圧入において、円周方向の最大引張応力が補強リングの許容応力を超えないように締め代を設定する必要がある。締め代は、許容応力を超えるか否かを評価し、適切な締め代を設定する。

4. 5 上・下金型形状修正の知識

形状修正が必要な場合の上・下金型を修正する知識の一例をFig. 12に示す。上金型形状を参照することでダイインサートにパンチとの摺動部が必要か否かを決定する。それに応じて、補強リングの形状も修正する。上金型では、パンチがダイインサートのパンチ摺動部に沿って動くように形状を修正する。

5. 推論手法

推論の概要図をFig. 13に示す。設計対象は、形状を属性として保持しており、知識を用いて属性値を決定することによって金型の構造を決定する。また、設計プロセスは構造化されており、「処理Cを行うためには処理Aと処理Bが済んでいなければならない」と言う処理の流れに関する制約が存在する。こうした制約では、参照する変数のそれぞれに入力または出力の役割が定められており、変数の依存関係が一定である。プロセスの処理順序は、各プロセスの制約を順次解いていくことで決定する。以上の考え方により金型構造の設計案の推論は、プロセスの集合の中から制約を充足するための適切なプロセスを選択し、各プロセ

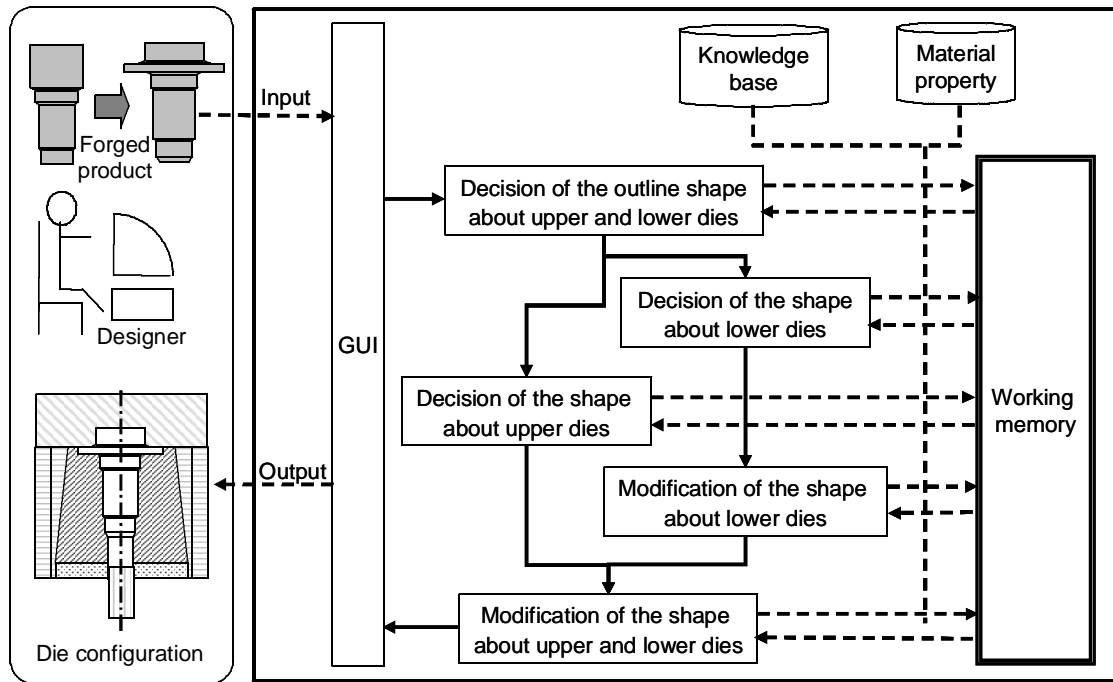


Fig. 14 Schematic illustration representing the development system

スにおける知識を適用させることで実現する。以下にプロセスの処理順序を決定する方法を示す。

- ① 入力された鍛造品形状から求解可能な上・下金型概略形状決定プロセスの制約を探索する。
- ② 上・下金型概略形状決定プロセスの制約を解き、上・下金型概略形状を決定する。
- ③ 上・下金型概略形状から求解可能な上・下金型形状決定プロセスの制約を探索する。
- ④ 上・下金型形状決定プロセスの制約を解き、上・下金型形状を決定する。
- ⑤ 上・下金型形状から求解可能な下金型形状修正プロセスの制約を探索する。
- ⑥ 下金型形状修正プロセスの制約を解き、下金型詳細形状を決定する。
- ⑦ 下金型詳細形状から求解可能な上・下金型概略形状修正プロセスの制約を探索する。
- ⑧ 上・下金型概略形状修正プロセスの制約を解き、金型構造の設計案を出力する。

各プロセスでは複数の知識があり、これらが同時に実行可能な場合、これらの競合集合の中から実行すべきものを決定する必要がある。そこで推論では、「実行可能な知識をすべて実行する」という競合解消のためのルールを設け、同時に複数の解が得られるようにした。

6. システムの実装

6. 1 システム構成

提案した金型構造設計プロセス、知識ベースおよび推論手法を基に、プロトタイプシステムを構築した。構築した

システムの構成図をFig. 14に示す。システムは、知識ベース、GUI(Graphical User Interface)、材料特性データベース、ワーキングメモリ、上・下金型概略形状決定、下金型形状決定、下金型形状修正、上金型形状決定、上・下金型形状修正の各機能から構成される。設計者が鍛造品形状を入力すると、知識ベース内の金型構造設計に関する知識を用いて金型構造の設計案を生成する。上・下金型概略形状決定、下金型形状決定、下金型形状修正、上金型形状決定、上・下金型形状修正ではそれぞれワーキングメモリに格納されている情報を参照し、知識ベースに格納してある設計知識や材料特性データベースの情報を参照しながら金型構造の各要素の形状を生成する。生成された形状は随時ワーキングメモリに登録する。

6. 2 データ表現

本システムでは、金型構造における上金型や下金型などの構成要素をオブジェクト指向の上位クラスと下位クラスとして表現する。クラスとして型構造クラス、鍛造品クラス、上型クラス、下型クラス、パンチクラス、ダイインサートクラス、補強リングクラス、バックアッププレートクラス、ロックアウトピンクラスを定義する。

7. システムの試行

システムの有用性を検証するために、生産実績がある鍛造工程案に対してシステムを試行した。推論に用いた工程案をFig. 15に示す。鍛造工程案は、複合加工がない工程とある工程の2案である。図(a)の工程③における推論結果をFig. 16に示す。工程案で指定された加工法は拘束押し鍛造であるが、据込み鍛造も加工可能と判断し、2案生成

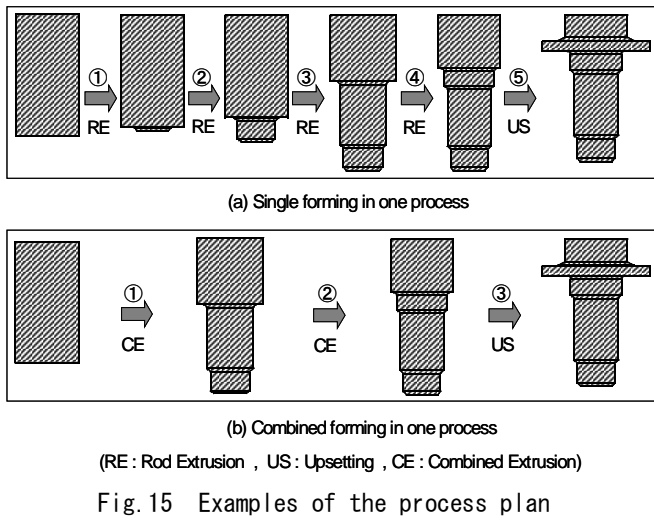


Fig. 15 Examples of the process plan

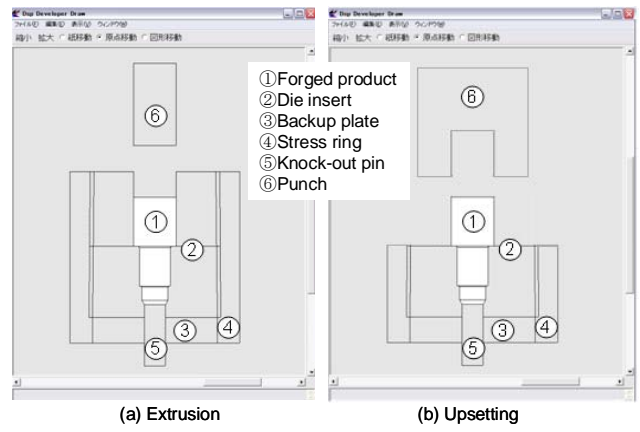
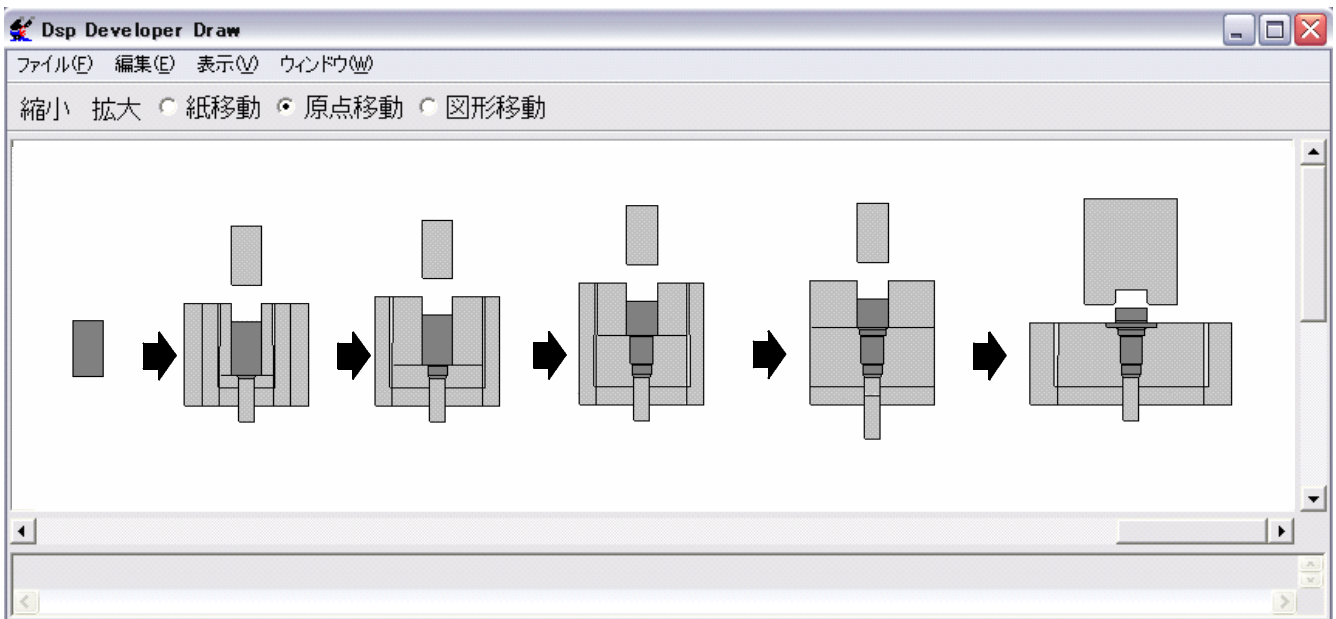
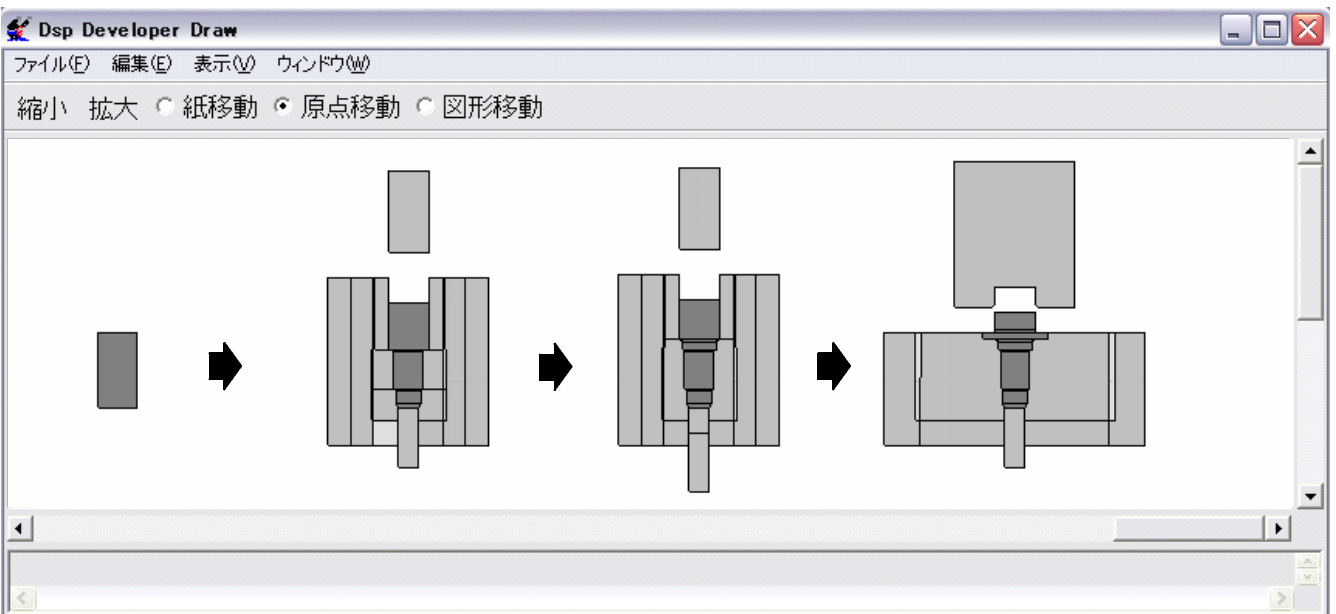


Fig. 16 Results of inference for process ③ in single forging process plan



(a) Process plan for single forming in one process



(b) Process plan for combined forming in one process

Fig. 17 Results of inference for single and combined forming in one process

された。また、図(a)のダイインサートは2つに分割されている。いずれの推論結果でも補強リングは一重となっている。補強リングの内径とダイインサート外径の間には締め代分だけ差を設け図示されている。

全工程案に対して生成された金型構造の設計案をFig. 17に示す。いずれの工程案についても補強リングの個数、ダイインサートの分割位置も適切に設定されている。

開発したシステムでは、鍛造工程案における1つの鍛造品形状に対して複数の金型構造が得られた。また、設計案を詳細に図示することで、視覚的に分かりやすい結果を提示することができた。しかし、図には寸法情報や金型構造の要素名や使用された加工法に関する詳細な情報がないため、ユーザーに十分な情報を提示しているとは言えない。図には示されていないが、実際には金型構造の各要素の寸法などが求められている。

8. 結 言

本研究では、知識処理に基づいた冷間鍛造金型構造設計支援システムを開発した。金型構造設計を「上・下金型概略形状決定」、「下金型形状決定」、「下金型形状修正」、「上金型形状決定」、「上・下金型形状修正」の5つの設計プロセスに分類し、以下のようにモデル化した。

- (1) 上・下金型概略形状決定では、上金型と下金型の概略形状を決定するための知識を鍛造品の最大直径部の加工法に着目して形状決定した。
- (2) 下金型形状決定では、ダイインサート形状の決定、補強リング形状決定、ロックアウトピン形状決定、バックアッププレート形状決定の4つの設計プロセスに細分化し、モデル化した。ダイインサート、補強リング、バックアッププレートの形状決定では、ダイインサートに作用する加工圧力および加工法に着目して設計知識を定義した。ロックアウトピン形状決定は、鍛造品の下端寸法や座屈限界に着目して設計知識を定義した。
- (3) 下金型形状修正では、ダイインサートの分割、締め代の設定の2つの設計プロセスに細分化し、モデル化した。

ダイインサートの分割は、分割場所を決定するための知識を加工対象域における加工圧力に着目して定義し、締め代の設定では、圧入した際の最大応力と許容応力に着目して設計知識を定義した。

- (4) 上金型形状決定では、上金型の形状を決定するためパンチ圧力と座屈限界を考慮し知識を定義した。
- (5) 上・下金型形状修正では、ダイインサートにパンチとの摺動部が必要か否か考慮して設計知識を定義した。

金型構造は、1つの鍛造品に対して決定されるため、金型構造要素と鍛造品を「part_of」と「neighboring」と言う依存関係を用いることで一元的に扱った。また、推論手法については、「設計プロセス集合から適切なプロセスを選択し、実行可能な設計知識をすべて実行する」と定式化した。

提案した設計プロセス、対象モデル、設計知識、推論手法を用いて、プロトタイプシステムを構築し、試行した結果、適切な金型構造案が生成されることを確認した。

今後の課題として、より現実的な金型構造設計への対応、金型の割れや補強に関するより定量的な評価手法および金型費などの算出方法を確立していくこと等が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) O. Takata, Y. Mure et al. : Advanced Technology of Plasticity, 1, 99-100 (2005)
- 2) 吉澤恵資・大森健児 : 塑性と加工, 387, 369-375(1993)
- 3) 仁藤真之輔・小林義和・白井健二 : 型技術, 17(8), 14-15(2002)
- 4) 三原功雄・沼尾正行 : 人工知能学会全国大会論文集, 205-208(1995)
- 5) B. Jooybari : Journal of Engineering Manufacture, 210-B6, 565-578(1996)
- 6) R. Lee, Y. Chen, Chang-Zou Lee : Computer Integrated Manufacturing Systems, 10-4, 287-307(1997)
- 7) M. Kim et al. : Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20, 201-213(2002)