

# 知識ベースを用いた冷間鍛造金型詳細設計支援システムの開発

牟禮雄二\*, 梅田政信\*\*

## Development of Knowledge-Based Die Design System in Cold Forging

Yuji MURE and Masanobu UMEDA

We had developed knowledge-based cold forging die design system for axisymmetric forged products. We have analyzed and reproduced the expert engineer's thinking process of cold forging die design. Moreover, we have formulated the data representation, inference method and knowledge-base. In order to evaluate an output plan obtained by this system, attachment workability was modeled. We concluded that the system was usefully by the trial test.

**Keyword :** Knowledge-based system, Die design, Cold forging

### 1. 緒 言

冷間鍛造品は、生産性が高く、機械的性質に優れるといった理由から、自動車や航空機、家電や精密機器など様々な分野で利用されている。冷間鍛造品の開発プロセスは、次の手順で実施される。まず、機能を満足するように製品形状を設計する。次に、鍛造で成形可能な形状（以下、鍛造体）を決定後、鍛造体をどのような工程や金型で成形するかを設計する。この中で、特に鍛造金型設計は、被加工材の変形特性や鍛造加工法に関する知識など多くの専門知識を必要とする作業である。

鍛造に関する設計支援においては、設計者の持つ事例やノウハウを活用できる知識工学の手法が有用とされる。鍛造分野において、現在までにいくつかの知識処理を用いた支援システム<sup>1)~3)</sup>が開発されてきた。これらのシステムは、過去の設計事例を基にして事例ベースを作成し、入力された形状と類似である形状を検索・修正する(事例ベースによる類似事例の検索)手法がとられてきた。当該手法による支援システムは、過去の成功した事例を用いるため非常に良質の設計案を出力することができる。しかし、類似事例が存在しない場合、設計案を得ることができないなど欠点がある。そこで筆者らは、知識工学手法を用い、類似事例が存在しない場合でも実行可能な冷間鍛造工程設計支援知識ベースシステム<sup>4)</sup>および金型構造設計支援知識ベースシステム<sup>5)</sup>を開発し、実用化した。

本研究は、開発したシステムで得られる設計案を基に、冷間鍛造金型を自動設計する支援システムの開発を目的とする。本報では金型詳細設計の設計対象および知識のモデル化、金型設計の推論手法について論じ、開発したシステムを実用課題に適用した結果について報告する。

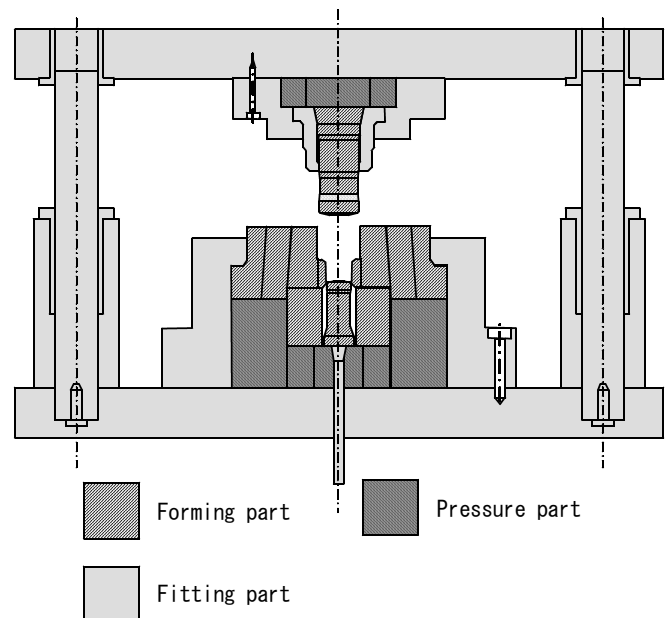


Fig. 1 Schematic illustration representing cold forging die and die set

### 2. 設計対象

冷間鍛造金型の概要をFig. 1に示す。金型は一般的に、成形部、受圧部、取付部の3種類の部品群に分類することができる。

成形部の詳細図をFig. 2に示す。成形部は、鍛造品の成形に直接関係する部品群で、パンチ、ダイインサート、補助リング、バックアップリング、ロックアウトピンの5種類の部品から構成される。パンチ、ダイインサート、ロックアウトピンは、成形時に被加工材と接触するため、破壊しやすい部品である。また、ダイインサートには成形圧力により、3方向( $r$ ,  $\theta$ ,  $Z$ )の応力が発生する。特に、円周方向応力による破壊を防ぐため、補助リングを焼嵌めあるいはテーパ圧入の締め込み構造とすることで、余圧

\*機械技術部

\*\*九州工業大学

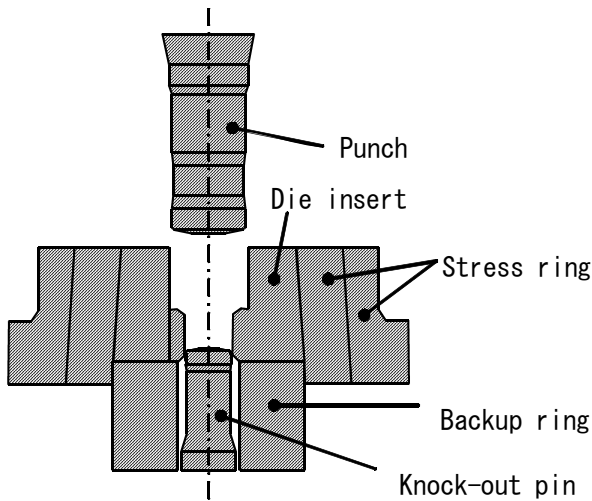


Fig. 2 Detailed illustration representing forming part

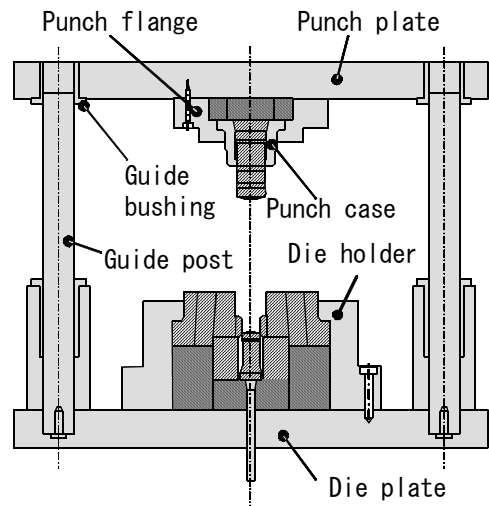


Fig. 4 Detailed illustration representing fitting part

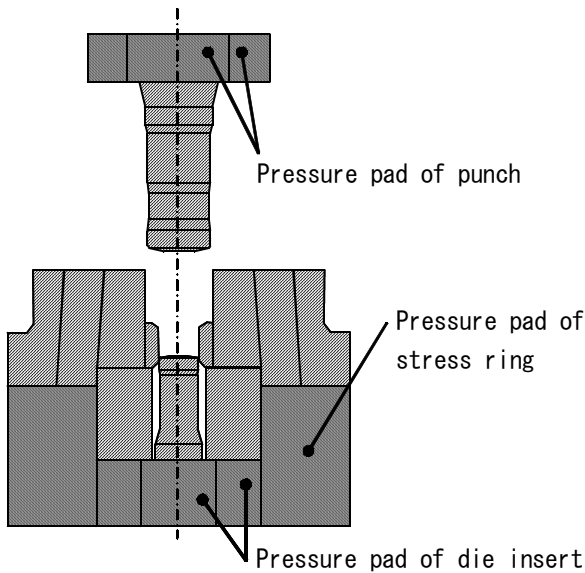


Fig. 3 Detailed illustration representing pressure part

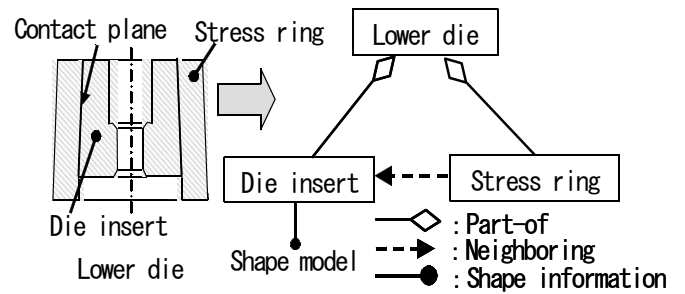


Fig. 5 An example of die composition model

を発生させ、成形時の応力と相殺させることで金型寿命を延長させる工夫がなされる。

受圧部の詳細図をFig. 3に示す。受圧部は、パンチ受圧板、ダイインサート受圧板、補助リング受圧板の3種類の部品から構成される。受圧板の役割は、プレス機械への圧力伝播を抑制することにある。受圧板は、複数枚の受圧板を積層することで減圧を行う。受圧板の厚さが薄すぎると圧力により曲がりが発生する。受圧板の曲がりには、パンチやノックアウトの破損や破壊の原因となるため、受圧板の強度及び厚さには十分な配慮を要する。

取付部の詳細図をFig. 4に示す。取付部は、パンチフランジ、ダイホルダ、ダイセットの3種類の部品から構成される。取付部の役割は主に2つあり、成形部および受圧部のプレス機械への取り付けと、上型(パンチなど)および下型(ダイインサートなど)の型合せである。

### 3. 設計対象のモデル化

筆者らは、現在までに冷間鍛造工程設計<sup>4)</sup>及び冷間鍛造金型構造設計<sup>5)</sup>に対する支援システムを開発した。開発したシステムは、既存システムとの連携を考慮して、取り扱いが容易なモデルを対象とし、各設計情報を一元的に管理できる枠組みとした。

#### 3. 1 金型構成モデル

冷間鍛造金型は、上型または下型に分類され、各部品はそれらの構成要素として扱われる。また、各部品は隣接しているため、互いの形状に寸法的な制約を与えることになる。そこで、集約関係を表す“part-of”と隣接関係を表す“neighboring”を用いることで、冷間鍛造金型の金型構成モデルを表現する。金型構成モデルの表示例をFig. 5に示す。図では、ダイインサートおよび補助リングは下型の一部であり、ダイインサートは補助リングに隣接していることを表している。隣接関係の定義により、部品形状の一部を自動設計することができる。すなわち、下型の要素である補助リングはダイインサートに密に隣接しているため、補助リングの内形寸法はダイインサートの外形寸法に依存する。そのため、補助リングの内形寸法については、ダイインサートの外形寸法から自動的に決定することができる。

3. 2 形状モデル

鍛造金型の形状は、BE (Basic Element) と呼ぶ断面形状の構成要素の並びで表現する。BE の種類と、BE を用いたパンチとダイインサートの表現例をFig. 6に示す。図の (A) に示すとおり、BE は10要素で構成される。中実形状のパンチは、(B) に示すとおり、9つのBEの並びで表現できる。また、中空形状のダイインサートは、(C) に示すとおり、外形を1つのBE、内形を3つのBEの並びで表現できる。BE はプロダクトモデルであり、設計対象の形状だけでなく物理情報や機能情報などを含んだ表現の枠組みである。BE は属性として形状、上端直径、下端直径、高さを持つ。プロダクトモデルは、鍛造品形状、素材形状などと同じ構造で表現することができ、形状や知識の記述方法を統一的に扱え、知識の保守が容易に行える。

4. 金型詳細設計に関する知識

実際の冷間鍛造金型設計の流れを分析し、3種類の部品群ごとに設計手順を標準化した。設計の流れ図をFig. 7に示す。最初に、冷間鍛造金型構造設計の出力案をもとに、成形部について設計する。次に、成形圧力を考慮して受圧部の設計を行う。最後に、取付部を設計し、鍛造金型の設計が終了する。同じ部品群に属する部品には類似の知識が適用され、各部品の形状が決定される。

4. 1 成形部の設計知識

下型要素の一つであるダイインサートの詳細設計では、ダイインサートの分割方法、ランドの生成法、型合せ方法について決定する必要がある。

4. 1. 1 ダイインサートの分割

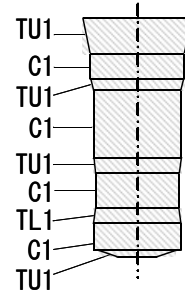
冷間鍛造では、成形時に非常に高い応力が発生し、パンチやダイインサートが応力集中により破壊されることがある。破壊を回避するため、ダイインサートの応力集中箇所を分割する必要がある。ダイインサートの分割には大別して2種類ある。分割方法をFig. 8に示す。

縦方向分割 (図の (a)) は、ダイインサートを縦方向に分割する。当該分割方法は、冷間鍛造の中でも特に大きい応力が発生する据込み加工に用いる。縦方向分割の場合は、図に示す空間 (S1) を設ける。空間設置の利点は、エア抜きおよび分割ダイインサートごとの軸方向弾性変形を部品自体で吸収できることである。

横方向分割 (図の (b)) は、ダイインサートを横方向に分割する。特に断面減少率を大きくすることができない前方押しで多く用いる。当該分割方法では、上部のダイインサートの分割面を上方向のテーパ形状 (S2) とすることで、成形時の空気抜きを促進する。また、分割面は、上部ダイインサートと下部ダイインサートの接触面を3~5mm程度確保する。これは、接触面を小さくし、型締め時の上

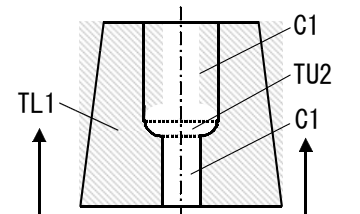
	1	2	3	4
C				
TU				
TL				

(A) Basic Elements



【Outer shape】

(B) Punch



【Outer shape】 【Inner shape】

(C) Die insert

Fig. 6 Basic Elements used for die insert and punch shape representation

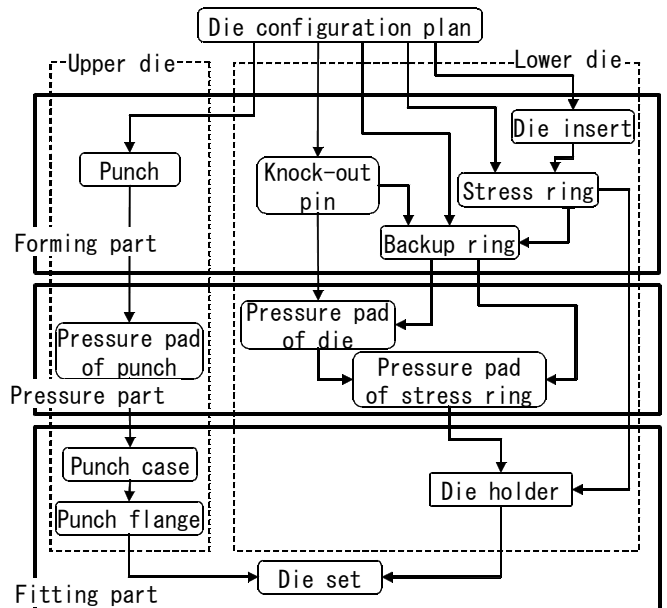
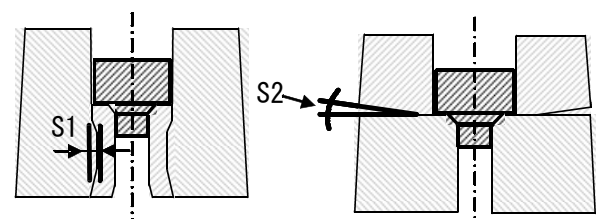


Fig. 7 Flowchart representing detailed die design of cold forging



(a) Vertical division (b) Horizontal division

Fig. 8 Schematic illustration representing division method of die insert

下ダイインサートの接触面に作用する面圧を高め、バリが出にくいようにするものである。

ダイインサートの分割方法に関する適用条件をTable 1に示す。縦方向分割に関しては、断面減少率に制限を設けた。すなわち、断面減少率が小さいと細長いダイインサートとなり現実的でなくなるためである。本研究では、縦方向分割の使用可能範囲を断面減少率40%以上とした。

4. 1. 2 ランド

前方押しでは、ダイインサートに摩擦拘束の低減を目的にランドが設けられる。ランドの概要をFig. 9に示す。製品精度が必要となる場合には、ランドの下に矯正ランドを付ける。ランドを通過した被加工材は、弾性変形により直径が微量ながら増加するが、矯正ランドにより形状を矯正できる。矯正ランドは、ランドより直径を大きくする。

本研究では、前方押しを行う場合、ランドは必ず設置し、矯正ランドは製品精度によりその有無を決定することとした。

4. 1. 3 上下型の型合せ

ダイインサートに対してパンチと嵌合するガイド部を設けることにより上下型を型合せする。このことで、鍛造品精度を向上させることができる。型合せ方法をFig. 10に示す。図は、前方押しにおいて、パンチとダイインサートを嵌合した例である。なお、本研究では、前方押し、後方押し、据込みの全ての加工において、ダイインサートにガイド部を設ける。

4. 1. 4 被加工材と成形部形状

被加工材の変形抵抗に対応して、成形部のパンチ、ダイインサート、ロックアウト形状を変更する。一例としてダイインサートの寸法形状と被加工材の炭素含有量との関係をTable 2に示す。

4. 2 受圧部の設計知識

受圧部は、成形により発生する加工軸方向の圧力を減圧し、プレス機械の変形を防ぐことを目的としている。成形により発生する内部圧力の伝播範囲はおよそ30~40°の円錐状になるとされているが、実用的な厚さの受圧板においては20°以内とされる。そこで、Fig. 11に示すとおり圧力の伝播範囲20°を基準として、受圧板の下端直径を決定する。なお、受圧板は、1枚の厚さを厚くして減圧を行うのではなく、複数枚を積層することで減圧を行う。ここで、直径と板厚の関係は、直径に対して板厚が過剰に薄いとたわみ・曲がりが大きくなるため好ましくない。逆に、直径に対して板厚が過剰に厚いと十分な減圧効果が得られない。また、金型の全高は、高いとプレス機械による制約を受けるため、低ければ低いほど柔軟な対応が可能となる。本研究では、直径と板厚の比率を3 : 1または2 : 1とした。

Table 1 Conditions used for division of die insert

Forming method	Forward extrusion	Backward extrusion	Upsetting
Reduction in area < 40%	Horizontal division	Horizontal division	Vertical division
Reduction in area ≥ 40%	Vertical or Horizontal division	Vertical or Horizontal division	

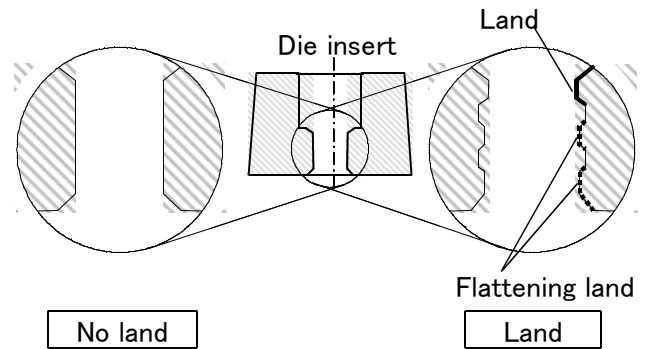


Fig. 9 Schematic illustration representing land

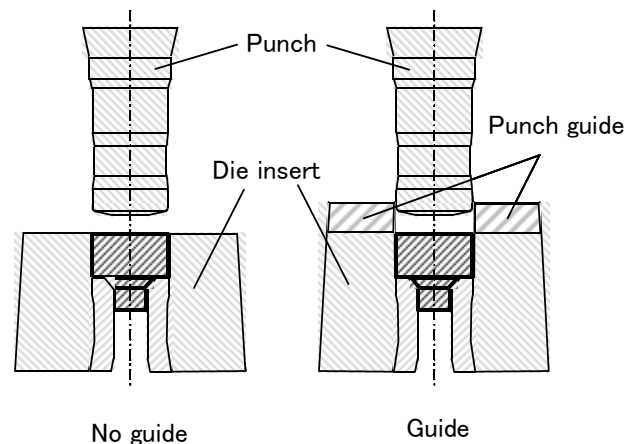
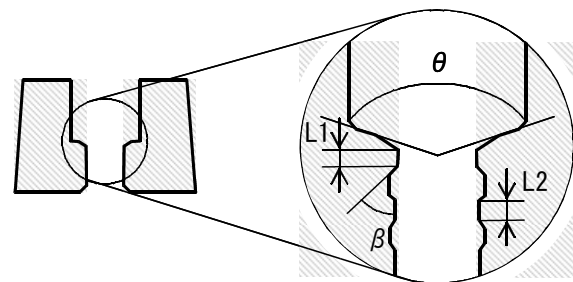


Fig. 10 Schematic illustration representing die matching of upper and lower die

Table 2 Relation between die shape and carbon (%)

	< S30C	S45C	S45C	SCM420	SCM440
$\theta$	120~150°	120~140°	100~120°	120~150°	120~140°
R	3mm	3~5mm	5~8mm	3~5mm	5~8mm
$\beta$	3°				
L1	2~5mm	3~8mm	3~10mm	3~5mm	3~8mm
L2	3~8mm				



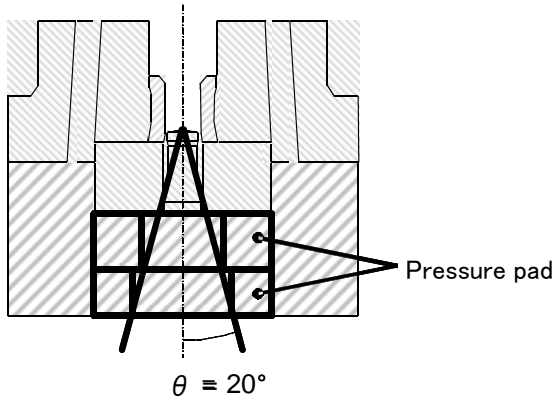


Fig. 11 Schematic illustration representing die configuration

4. 3 取付部の設計知識

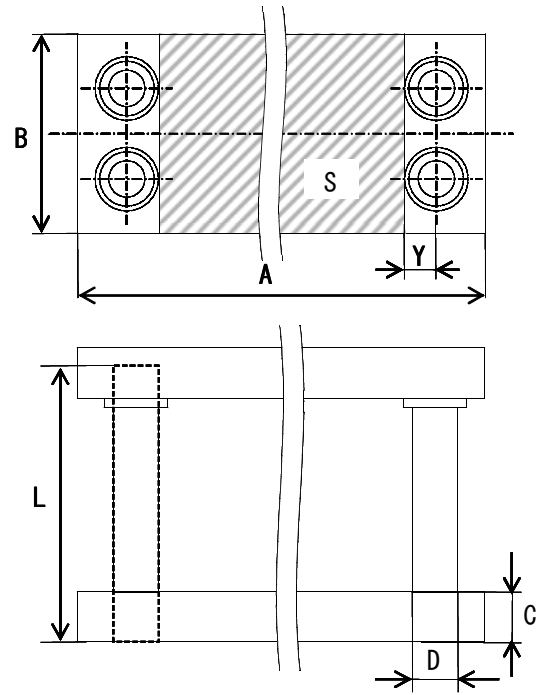
取付部の役割は、上下型の型合せ、および金型のプレス機械への固定である。取付部の中で、パンチケース、パンチフランジ、ダイホルダは、内蔵する金型部品の外形形状を各部品の内形形状として定義することができる。また、これらの各部品は、ある程度の加工荷重でも破損や破壊が起こらないように外径・高さ・取付形状等を決定する。

ダイセットの概要図をFig. 12に示す。ダイセットの知識として、金型を取り付けることができる範囲を表す有効面積、および適用可能なガイドポストをデータベースに登録する。ダイセットの選定は、成形部、受圧部およびダイセット以外の取付部における最大径及びこれらを組み立てた後の全高を計算し、最大径に対する有効面積およびガイドポスト高さに対する全高を考慮し、適用可能なダイセットの中で最小のものを適用する。

5. 組付けの作業性評価モデル

自動設計した金型が矛盾なく組付けられるかを検証する、あるいは金型組付けの作業性を評価する目的で、実際の組付けの作業手順をモデル化し、組付け手順図として整理した。組付け手順図は、組付け方法を参照するだけではなく、組付けのコスト積算に利用可能である。

組付け手順図には、組付けられる金型部品、組付ける金型部品および組付け操作名に関する情報を記載する。一例として、部品Aを部品Bに組付けるときの組付け手順図をFig. 13に示す。なお、▽印は部品、○印は組付け操作、二重▽印は組付け後のアセンブリとして表現した。また▽印の上部には部品名が、○印の横には組付け操作名と時間が、二重▽印の横には組付け時間が記載されている。組付け手順を示すツリー（図の①の方向）は、組付けられる部品のツリーに組付ける部品を付加すること（図の②の方向）によって、組付け手順を表現する。すなわち、部品Aが部品Bに組付く状態を部品Bに部品Aが付加されるように表



- A : Plate length
- B : Plate width
- Y : Radius of guide post
- S : Die area
- C : Plate thickness
- L : Guide post length
- D : Diameter of guide post

Fig. 12 Schematic illustration representing die set

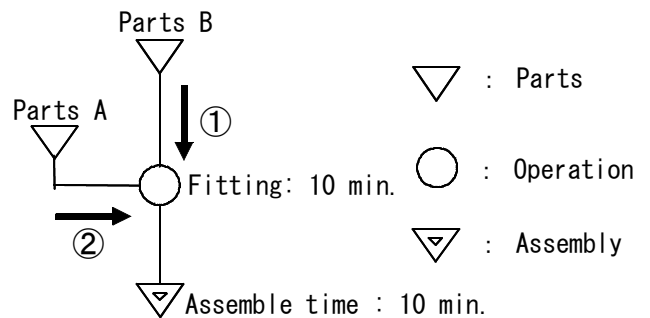


Fig. 13 Schematic illustration representing fitting model between parts A and parts B

現する。以上のように組付ける部品の数だけ部品と組付け操作を追加することにより組付け後のアセンブリが完成するため、最終的にはツリー状に表現される。なお、金型の組付け時間は、組付ける金型部品の体積・重量および操作の手間により大きく影響を受ける。すなわち金型の体積や重量が大きいほど組付けや型合せ作業が困難となるため、金型の組付け時間は長くなる。また、操作は、ボルト締結と嵌合の種類で標準時間を設定した。以上の各金型部品の組付けに要する時間を個別に計算し、それらを合計することで、総組付け時間を算出する。なお、作業性評価モデルは、金型設計案の評価指標として利用できる。

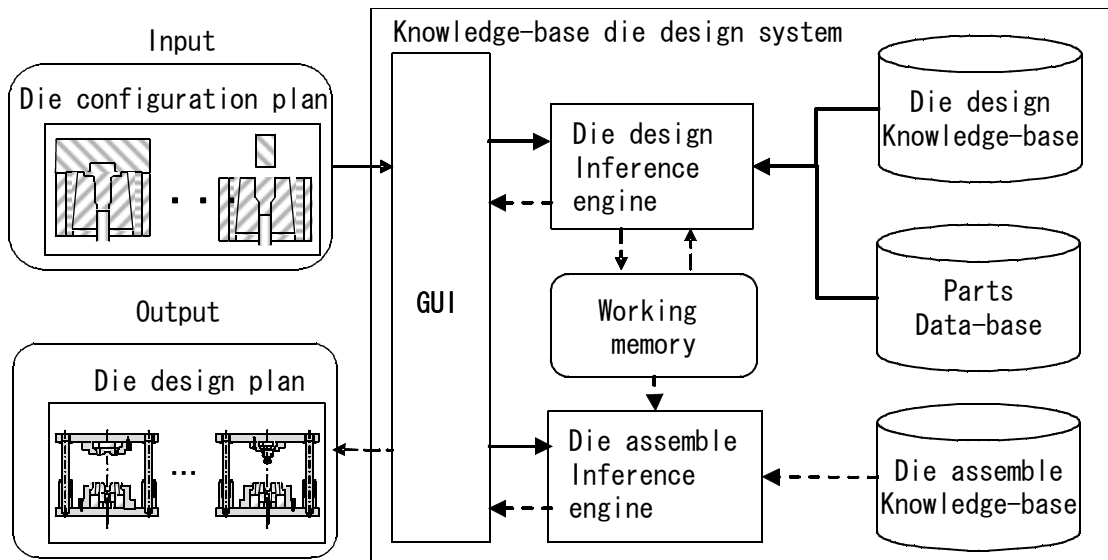


Fig. 14 Schematic illustration representing the development system

6. システムの実装

構築した金型詳細設計支援システムの概要をFig. 14に示す。本システムでは、実際の設計に準拠し、成形部、受圧部および取付部の順番で推論する。すなわち、金型詳細設計支援システムは、金型構造設計支援システムにより出力された型構造設計案を入力すると、成形部の詳細形状設計と受圧部・取付部の部品形状を設計し、これらを最終的な金型設計案として出力する。システムは、冷間鍛造金型の詳細形状設計知識が格納されている金型設計知識ベース、ダイセットやボルトのJIS規格部品データが格納されている部品データベース、金型の組付け手順の生成および組付け時間の計算を行う組付け手順生成機構、組付け手順・組付け時間に関する知識が格納されている金型組付け知識ベース、設計途中および設計が完了した部品のデータが格納されるワーキングメモリより構成されている。

推論方法の詳細は、以下のとおりである。最初に、システムに型構造設計案が入力されると、推論機構へ命令および形状データが送られる。次に、推論機構は、成形部詳細設計知識ベースの設計知識を基に、部品データベースを参照しながら各金型部品の形状を設計する。なお、ワーキングメモリには随時、金型部品の形状データが格納され、また必要な金型形状が参照される。全部品の設計が終了すると、金型組付け手順生成機構へ処理が移る。金型組付け手順生成機構では、設計された金型設計案に対して組付け手順を作成し、同時にその組付け作業の所要時間が算出される。組付け手順の設計が終了すると、すべての処理を終了し、金型設計案(所要時間が計算された組付け手順図を含む)が結果として出力される。なお、金型構造設計支援システムによって型構造部の概略形状が設計されているため、上型と下型は互いを参照する必要が無く、設計プロセスは

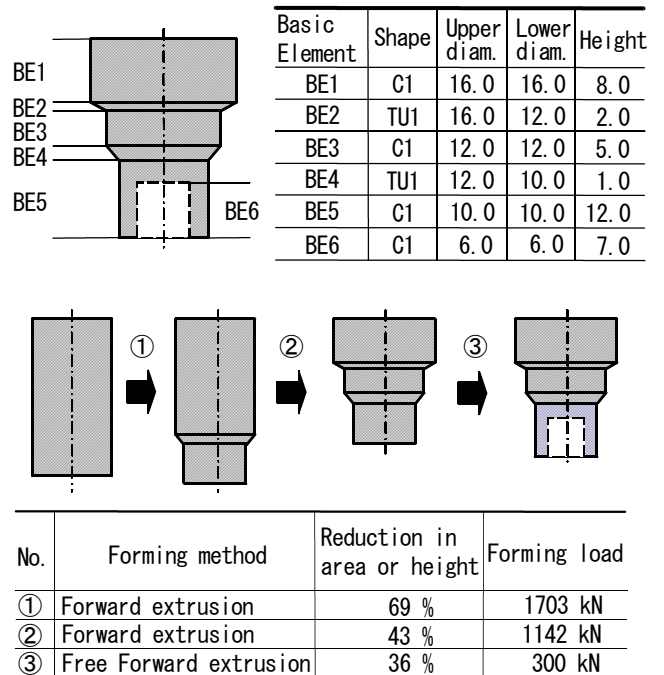


Fig. 15 Examples of the process plan and inference conditions

背反関係が成立している。よって上型と下型の推論は独立させることができる。

7. システムの試行

7. 1 試行条件

開発した冷間鍛造金型詳細設計支援システムを用いて、金型設計を試行した。推論の入力条件である工程案をFig. 15に示す。対象とした鍛造品は、先端が中空状となっている軸状部品で、素材より3工程を経て完成品となる。各工程の加工方法、BEの並びと寸法等の設計情報は、図に記載のとおりである。

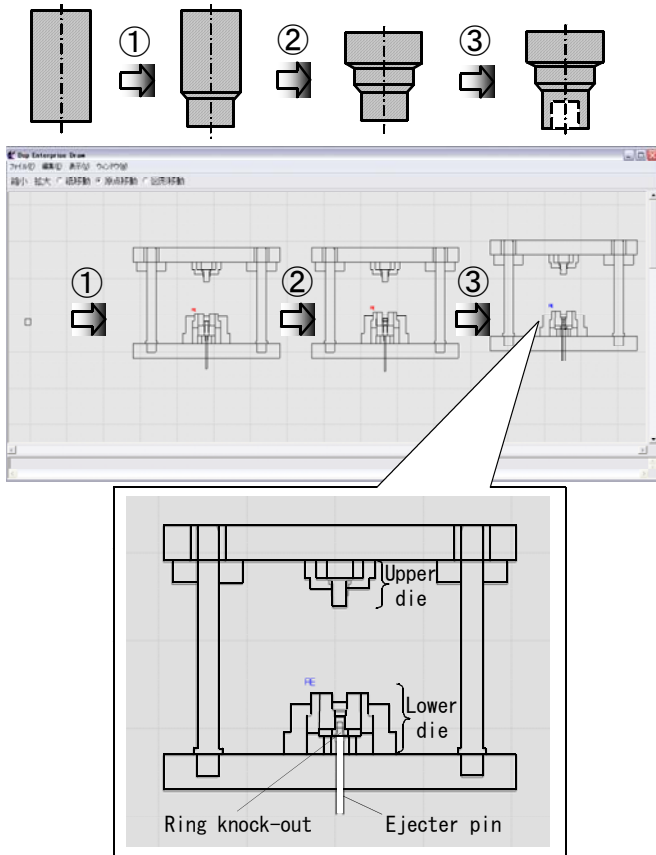


Fig. 16 Results of inference for die design

## 7. 2 試行結果

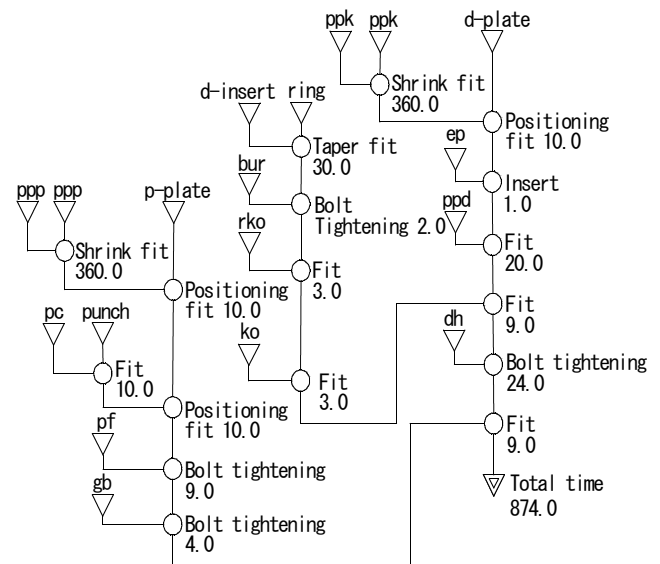
システムにより生成された金型設計案をFig. 16に示す。第1, 2工程は, 拘束前方押し出し金型, 第3工程は, 自由前方押し出し金型である。自由前方押し出し用金型の特徴である, カウンタパンチ, リングノックアウト構造を持つ下型が適切に生成されていることがわかる。また, イジェクタピンもリングノックアウトを押し上げることができるよう配置されていることがわかる。

## 7. 3 組付け作業性評価

出力された金型案について, 組付け作業の評価を行うため, 組付け手順図を作成した。第3工程の自由前方押し出し金型の組付け手順図をFig. 17に示す。図中では, 部品名を簡略化して記号で表現している。組付け手順がツリー状に作成され, 各作業時間と総作業時間が出力されていることがわかる。当該金型では, 組付けに874分を要する。

## 8. 結 言

設計対象を計算機上で表現するために設計対象モデルを提案し, そのモデルを操作する金型詳細設計知識について整理・体系化した。設計対象モデルは金型の構成を示す金型構成モデルと各部品形状を示す形状モデル, 金型の組付け手順の評価を行うための組付け作業性評価モデルの3つを提案した。金型構成モデルでは, 鍛造品を金型の一部と



Parts name	Symbol	Parts name	Symbol
Punch	punch	Die insert	d-insert
Punch case	pc	Stress ring	ring
Punch flange	pf	Backup ring	bur
Punch plate	p-plate	Knock-out pin	ko
Die plate	d-plate	Ring knock-out	rko
Guide bushing	gb	Pressure pad of K.O.	ppk
Pressure pad of punch	ppp	Pressure pad of die	ppd
Eject pin	ep	Die holder	dh

Fig. 17 Schematic illustration of Fitting sequence

して見なすことで, 試作が完了している工程設計支援システム・金型構造設計支援システムの各モデルを統一的に扱うことを可能とした。形状モデルでは, 工程設計支援システムで用いられている BE 表現を用いることで各金型部品を表現可能であることを示した。さらに, 金型組付けの作業性評価モデルを構築し, 組付け作業をツリー状に表現した。また, 組付け操作について作業時間を算出する機能を追加することで金型組付け作業の評価が可能となった。

最後に, 開発した冷間鍛造金型詳細設計支援システムを試行し, 本システムの有効性を確認することができた。

## 参 考 文 献

- 1) M. Kim et al. : Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20, 201-213(2002)
- 2) 中西広吉, 高田修, 山崎知彦, 団野敦, 白井徳雄, 今井敏博, 牟禮雄二: 塑性と加工, 34, 416-421(1993)
- 3) A. Azushima, M. Kim: Annals of the CIRP, 39, 245-248(1990)
- 4) O. Takata, Y. Mure et al. : Advanced Technology of Plasticity, 1, 99-100 (2005)
- 5) 牟禮雄二, 高田修: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 19, 47-54(2005)