

# 冷間鍛造用金型設計システムの開発

メカニクス系工学専攻 教授 落合 芳博

## 1. 緒言

冷間鍛造用金型を設計するためのシステムを試作した。本システムでは、冷間鍛造用金型特有の“締めまりばめ”を考慮に入れた応力解析が行うことができる。また、冷間鍛造においても素材の変形により金型が数十度加熱され、製造される部品の精度に影響を及ぼす。そこで、金型の熱変形量を解析することも行うことができる。また、冷間鍛造用金型は、非常に過酷な内圧が加わるので、冷間鍛造用金型解析は、金型自体を弾塑性解析する必要がある場合がある。そこで、本システムでは冷間鍛造用金型を、有限要素を用いることなしに弾塑性解析を行うことができる。弾塑性解析を行う場合、内点を使用するが、決して通常の有限要素法のように内部を要素分割する必要がない。内点は、もちろん自動的に作成され、要素データが不要なためデータは非常に少ない。さらに、材料の流れ解析および金型に作用する内圧を計算する機能を入れた。本計算においても、内部を要素分割が不要になるようにした。本計算においても内点を使用する。なお、有限要素法では、変形が進んでいくと、有限要素の形状が“いびつ”になり、再要素分割が必要になる場合が多い。本システムでは、有限要素を用いないので再要素分割は必要でない。

約25年前に“パーソナルコンピュータを用いた境界要素法による冷鍛金型解析システムの開発”を発表しているが<sup>(1-4)</sup>、その当時のパソコンの性能では、弾性計算においても一回の計算に20分ほどかかり、実用性に問題があった。また、計算時間を考慮に入れて計算精度を多少無視していた。しかし、現在のパソコンでは、軸対称弾性計算では1秒以下で精度良く解析が可能であり、実用化の可能性が高い。開発するシステムは、CAEの知識を必要としないものを目指しており、ユーザは有限要素法のように勉強会や講習会に参加する必要がないものを作成する。また、システムの内部の理論に関する知識を全く必要としないものを開発する。また、プリやポストのソフトを完全公開してユーザが、企業で使用する金型に合わせて改良できるものとする。プリやポストは、改良が容易に行えるよう Visual Basic を使用している。基本的に図や数値を指定するための矢印をクリックすることにより活用することができる。キーボードを不要にしており、タッチ式であり、パソコンよりタブレット端末を意識して作成している。

## 2. 理論

ユーザは内部の理論を知らなくても使用できるが、三重相反境界要素法を使用している[5-8]。本理論を使用することにより、塑性解析を含む場合でも内部を分割する必要がない。内部領域の情報は、内点に保存され、内点間の情報は補間により求める。弾塑性解析の基本式は、次式で与えられる。

$$c_{ij}\dot{u}_j = \int_{\Gamma} [u_{ij}^{[1]} \dot{p}_j - p_{ij} \dot{u}_j] d\Gamma - \sum_{f=1}^2 (-1)^f \int_{\Gamma} \left\{ \frac{\partial \sigma_{ijk}^{H[f+1]}}{\partial n} \dot{\epsilon}_{ljk}^{[f]S} - \sigma_{ijk}^{H[f+1]} \frac{\partial \dot{\epsilon}_{ljk}^{[f]S}}{\partial n} \right\} d\Gamma + \sum_{m=1}^M \sigma_{ijk}^{H[3]} \dot{\epsilon}_{ljk(m)}^{[3]P} \quad (1)$$

$$\sigma_{ijk}^{[f]} = \frac{-2r^{2f-3}}{(1-\nu)\{(2f)!!\}^2} \left\langle 2[-2f(f-1)(f-2)\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} - (3f^2 - 6f + 2)]r_i r_j r_k + [-2f(f-1)(1-2f\nu)\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} - \{-2f+1+2f(3f-2)\nu\}]\delta_{jk}r_i + \left[ \{2f(2f^2-3f+1) - 4f^2(f-1)\nu\}\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} + \{(6f^2-6f+1) - 2f(3f-2)\nu\}[\delta_{ij}r_k + \delta_{ki}r_j] \right] \right\rangle \quad (2)$$

また、内部応力を求める式は次式となる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \int_{\Gamma} [-\sigma_{kij}^{[1]} \dot{p}_k - S_{kij} \dot{u}_k] d\Gamma - \sum_{f=1}^2 (-1)^f \int_{\Gamma} \left[ \frac{\partial \sigma_{ijks}^{H[f+1]}}{\partial n} \dot{\epsilon}_{1ks}^{[f]S} - \sigma_{ijks}^{H[f+1]} \frac{\partial \dot{\epsilon}_{1ks}^{[f]S}}{\partial n} \right] d\Gamma + \sum_{m=1}^M \sigma_{ijks}^{H[3]}(p, q) \dot{\epsilon}_{1ks(m)}^{[3]P} - \dot{\sigma}_{ij}^{[1]} \quad (3)$$

### 3. 活用例

メイン画面を Fig.1 に、計算用の画面を Fig.2 に示す。ソフトウェアの内容の例を Table 1 に示す。Fig.1 の図または、説明をタップすると、次の画面に移動する。本システムには最適中間径を計算する簡易ソフトも含まれる。

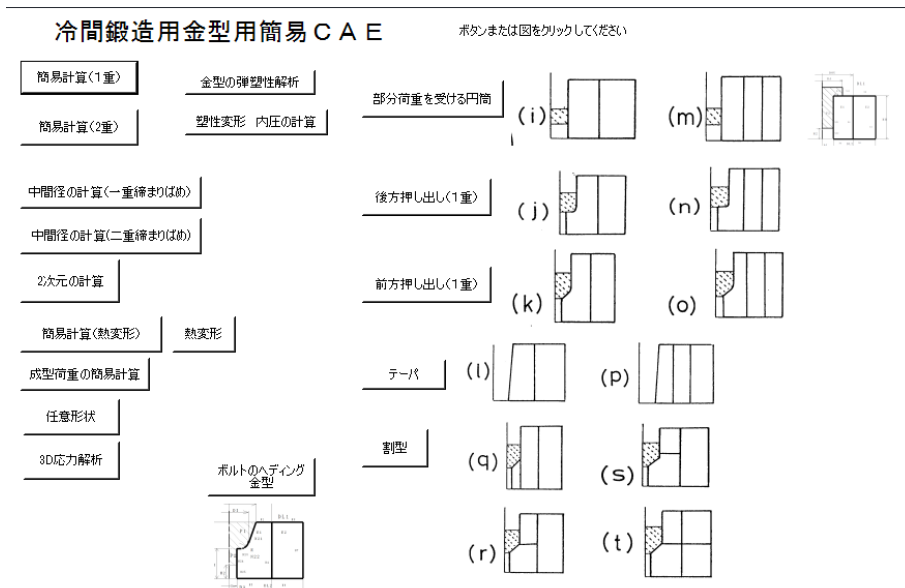


Fig.1 System for cold forging dies

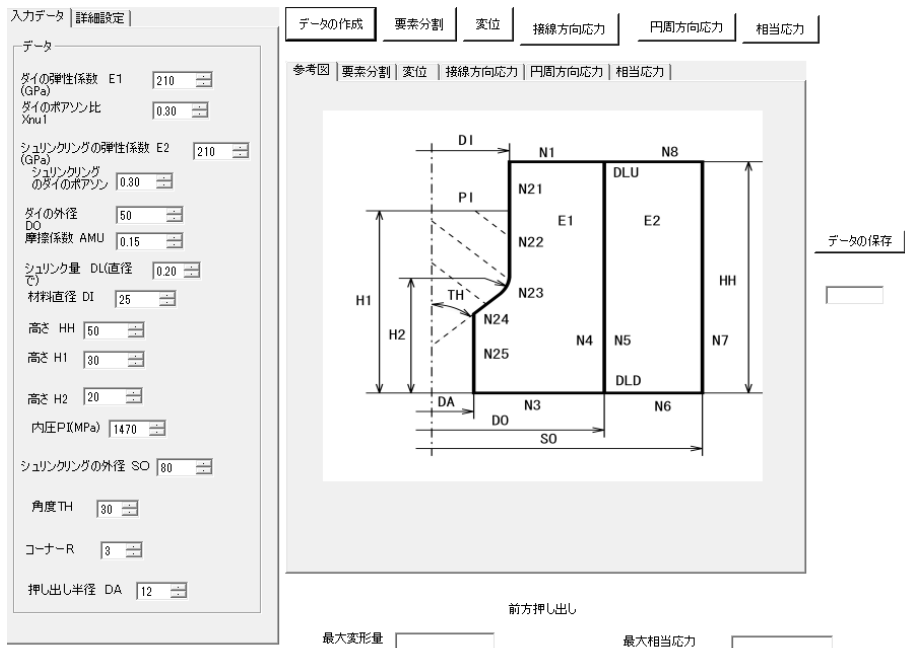


Fig.2 Example of pre-processor

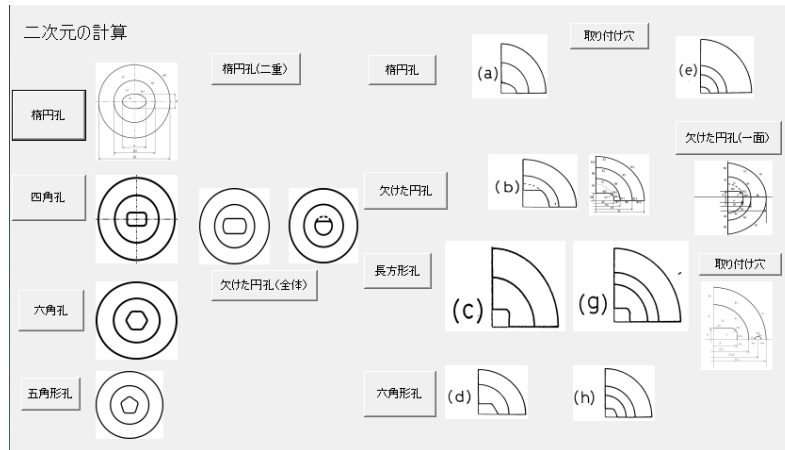


Fig. 3 Analysis of 2D

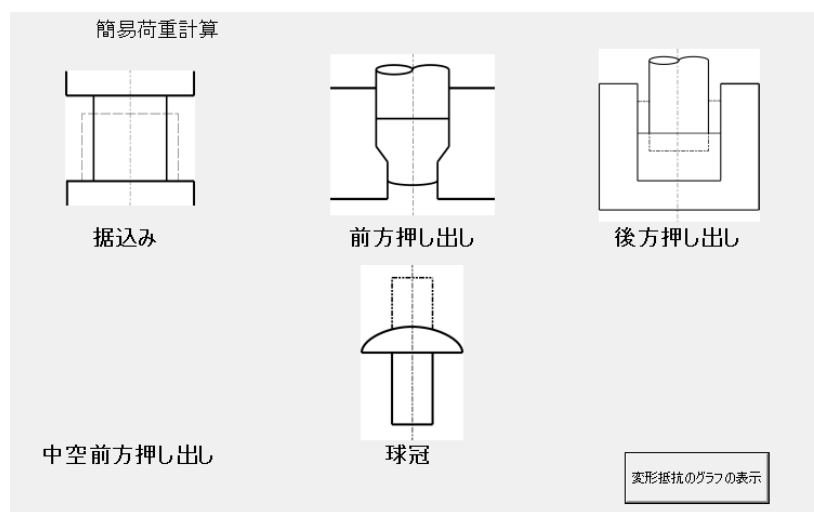


Fig. 4 Calculation of load

Fig.3 に2次元で簡易計算する場合、また Fig.4 に簡易荷重計算の画面を示す。Fig.5 に示すように金型の中に材料を入れ、上部から剛体パンチで圧縮し、形状を変形させる問題を解析した。この問題は前方押し出しを想定したものである。素材の高さ10mm、幅20mmとし、材料と金型との摩擦係数は $\mu=0$ とした。縦弾性係数 $E=210\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、硬化係数 $H=0$ とした。解析は対称性より2分の1の領域で解析を行った。Fig.5 に境界要素分割(180)と使用した内点(381)を示す。Fig.6 に変形状態を示す。変形途上で要素が長くなった場合は、自動的に要素を分割するので、要素分割数が増加していることがわかる。Fig.7, 8 に後方押し出しの例を示す。大変形解析は、計算時間を短くするために近似解法を採用している。本システムの検証には ANSYS および LS-DYNA を使用した[9]。なお、本システムに導入予定の基礎理論を発表したものを参考文献 [10-17]に示す。特に、傾斜機能材料や複合材料を使用した高度な型設計に今後活用できるものと思われる。なお、本「冷間鍛造用金型設計システムの開発」の研究はプログラム開発であり、本プロジェクトの予算は使用していない。

Table 1 Example of contents

金型の応力解析(弾性)	二次元、軸対称、三次元
金型の弾塑性解析	二次元、三次元
金型の熱変形解析	二次元、軸対称、三次元
材料の流れ解析(内圧の計算)	二次元、(三次元)
プリ・ポストプロセッサ	上記の解析用

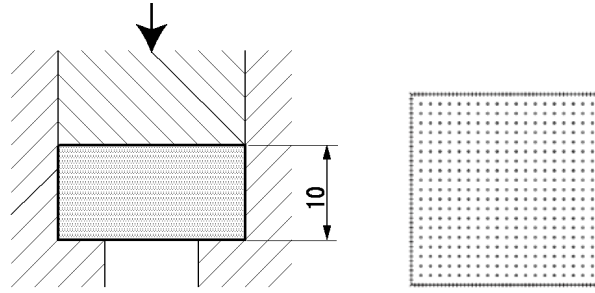


Fig.5 Forward extrusion

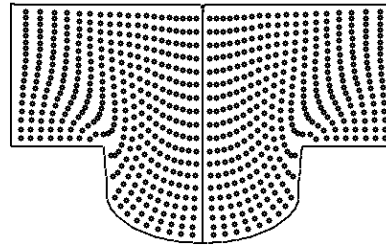


Fig.6 Deformation

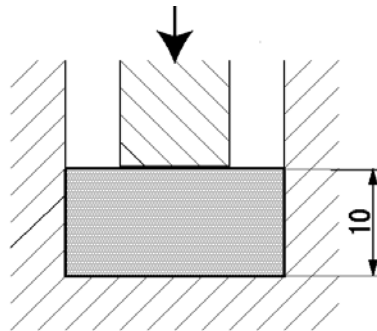


Fig.7 Backward extrusion

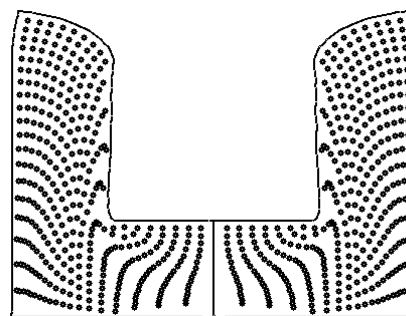


Fig.8 Backward extrusion

#### 4. 結言

CAEに馴染みのない技術者でも、研修を必要としないで活用が可能な冷間鍛造用金型を設計するためのシステムを試作した。本システムでは三重相反境界要素法により内部を分割しないで塑性解析が可能なが示された。今後、三次元自由曲面の理論を入れ<sup>(11)</sup>、東大阪市内の金型関連企業の御意見を伺いながら、本システムを完成させる予定である。

## 参考文献

- (1) 境界要素法による冷間鍛造用金型の摩擦係数を考慮した応力解析、塑性と加工、第26巻、第294号 760-765(1985)、落合、山本
- (2) パーソナルコンピュータを用いた境界要素法による冷鍛金型解析システムの開発、精密工学会誌、第55巻、第1号、87-92(1989)、落合、石田、井垣。
- (3) Ochiai, Y. and Kobayashi, T., “Initial Strain Formulation without Internal Cells for Elastoplastic Analysis by Triple-Reciprocity BEM”, *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 50 (2001), pp. 1877-1892.
- (4) Ochiai, Y. and Kobayashi, T., “Initial Stress Formulation for Elastoplastic Analysis by Improved Multiple-Reciprocity Boundary Element Method”, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 23 (1999), pp. 167-173.
- (5) Ochiai, Y. and Sladek, V. , “Numerical Treatment of Domain Integrals without Internal Cells in Three-Dimensional BIEM Formulations”, *CMES (Computer Modeling in Engineering & Sciences)*, Vol. 6, No. 6 (2004), pp. 525-536.
- (6) LS-DYNA 説明書
- (7) 落合、金型用 CAD のための自由曲面作成法、精密工学会誌、Vol.61, No.8, pp.1091-1095(1995).
- (8) Ochiai, Y. and Yasutomi, Z., “Improved Method Generating a Free-Form Surface Using Integral Equations”, *Computer-Aided Geometric Design*, Vol. 17, No. 3 (2000), pp. 233-245.
- (9) 落合、冷間鍛造用金型設計システムの開発、第 63 回塑性加工連合講演会(2012)。
- (10) Deformation Analysis of Thin Plate with Distributed Load by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.36, No.5, pp.772-778, (2012) Yoshihiro OCHIAI and Tomohiro Shimizu, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.10.0008>
- (11) Three-Dimensional Unsteady Thermal Stress Analysis by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Yoshihiro OCHIAI, Vladimir Sladek, Jan Sladek, Vol.37, No.2, pp.116-127, (2013-2) <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.09.002>
- (12) Axial Symmetric Stationary Heat Conduction Analysis of Functional Gradient Materials by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 落合芳博, V. Sladek, J. Sladek, Vol.37, No.2, pp.336-347, (2013-2) <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.10.0006>
- (13) 三重相反境界要素法による分布する熱曲げ負荷を受ける薄板の変形解析、日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.803, pp.976-988, (2013) 落合芳博, 早川雄太, <http://dx.doi.org/10.1299/kikaia.79.976>
- (14) 三重相反境界要素法による不均質材料の三次元定常熱伝導解析、日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.805, pp.1793-1804 (2013), 落合芳博 <http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.79.1793>
- (15) 三重相反境界要素法に不均質材の弾性解析、日本機械学会論文集, Vol.80, No.820, pp. 1-12 DOI:10.1299/transjsme.2014cm0386 (2014) 落合芳博
- (16) Three-Dimensional Heat Conduction Analysis of Inhomogeneous Materials by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.51, No.1, pp.101-108, (2015-2) DOI 10.1016/j.enganaboun.2014.10.014, 落合芳博
- (17) 多重調和関数を用いた補間法による画像の拡大と並列処理による高速化、画像電子学会誌 Vol.44, No.1, pp.18-pp27 (2015.1), 川島成平, 小林正, 多谷邦彦, 落合芳博