

逆解析による鍛造金型の予圧状態可視化手法の開発

牟禮雄二*

Development of Visualization Method for Preload State of Forging Dies by Using Inverse Analysis

Yuji MURE

A forging dies consists of a die insert and a stress ring. The forging dies maintains an inwardly preloaded state even when no load is applied by press-fitting the die insert into the stress ring. By offsetting this preload and the outward pressure during forging, the life of the forging dies is extended. However, there are many cases where the preload condition is not good due to various factors, but there was no way to check the preload condition.

In this study, a method was developed for optimizing the analysis parameters based on the outer profile of the manufactured forging dies by using the inverse analysis method that infers the cause from the results. This has made it possible to predict the preload condition of the forging dies with high accuracy.

Keyword : Forging dies, Press fitting, Direct analysis, Inverse analysis, Response surface methodology

1. 緒 言

自動車や電気・通信機器等の構成部品として広範に使用される鍛造（圧造を含む）部品をプレス機で成形するための鍛造金型は、使用寿命を延長させるため圧入作業を経て製造されている。六角ボルト成形用の鍛造金型と圧入の模式図を図1に示す。すなわち鍛造金型の主要部位は、円筒状の鍛造ダイスAと段付き円筒状の補強リングBの2つの部位から構成されている。圧入は、鍛造ダイス外径よりも補強リング内径を小さく設計（図の左吹き出しOverlapを参照）し、プレス機により押圧板を介して鍛造ダイスを補強リングの中に室温で強制的に押し込む作業である。圧入により図の右吹き出しCompressionのとおり無負荷の時でも鍛造ダイスに常に内向きの力（これを予圧と言う）を作用させて、鍛造時に鍛造ダイスへ作用する外向きの力と相殺させて鍛造ダイスのダメージを軽減している。

ところが実際の鍛造金型においては、平均的な使用寿命の1/10～1/5になる場合がある。使用寿命の低下は、予圧不足が主原因の1つであるが、現状では予圧状態を把握する術が無いため、圧入した鍛造金型の予圧状態が良好か否かは、実際に使用してみなければ分らない。

鍛造金型の寿命向上は、鍛造業界にとって非常に興味深いテーマであり、評価ツールの1つである計算機シミュレーション技術の重要度は増している。鍛造加工分野において有限要素法（Finite Element Method）に基づく解析（以下、FEM解析）などの計算機シミュレーション技術が適用されたのは1980年代からであり、そのうち鍛造金型の寿命向上を対象にしたものは、寿命向上のための解析

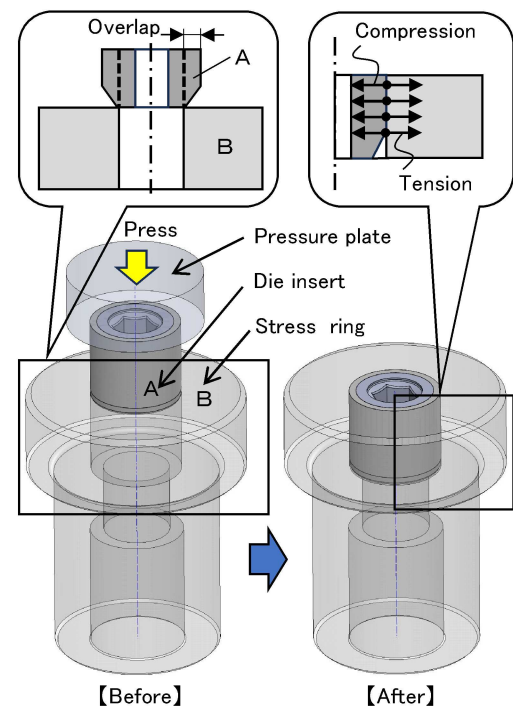


図1 鍛造金型と圧入の模式図

技術について紹介した例¹⁾、熱間鍛造金型の寿命向上例²⁾、FEM解析を用いて疲労寿命を予測した例³⁾、鍛造ダイス内形に生じる応力集中に及ぼす補強リング形状の影響を解析した例⁴⁾などがある。しかし、鍛造金型の圧入後の予圧状態を高精度に可視化した例はない。

本研究では、鍛造金型の圧入による予圧状態を評価する目的で、原因から結果を推定する一般的な解析とは逆に、結果から原因を推定する解析手法により、鍛造金型の予圧状態を可視化する手法を確立したので報告する。

*生産技術部（現 研究主幹）

2. 予圧状態の可視化手法

多くの技術分野で一般的に利用されているFEM解析は、順解析(Direct analysis)と呼ばれ、原因(既知の解析パラメータ)から未知の結果を求めるものである。鍛造金型における圧入後の予圧状態を順解析で可視化する場合、解析パラメータとして圧入率、ヤング率、ポアソン比および摩擦係数を設定してFEM解析後、鍛造金型内部の応力分布を確認することになる。しかし、この場合、各パラメータ値の選択次第で補強リングの外形プロファイルの実測値と解析値に大きな差が生じる場合があり、得られた応力分布の妥当性に疑問の余地が残る。この様に順解析では、最適な解析パラメータ値を設定する必要があるが、どの値が最適かを判断するのは非常に困難である。

逆に、既知の結果から原因(未知の解析パラメータ)を推定する解析は、逆解析⁹⁾(Inverse analysis)と呼ばれる。すなわち逆解析は、鍛造金型を圧入した後の補強リングの外形プロファイルの実測値を目標値として、その値が得られる解析パラメータを推定することになる。過去に、逆解析手法を用いた特性値の同定に関する研究^{9)~8)}などが行われているが、鍛造金型の予圧状態に関する逆解析例は皆無である。

補強リングの外形プロファイルの実測値と解析値の関係を図2に示す。外形プロファイルにおいて、実測値とFEM値との残差平方和を最小とする解析パラメータ値の組み合わせを求める評価関数Wは、補強リング上端面から任意の高さにおける実測の半径値を Rm_i 、同高さのFEM解析の半径値を Rf_i とすると、(1)式に示す残差平方和で表すことができる。ここで、 k はデータの最大数である。目標値である圧入実験により得られた外形プロファイル(図の青実線)とFEM解析により得られた同プロファイル(図の赤点線)が一致、すなわち、評価関数 $W=0$ のとき、解析パラメータ値が最適となる。

$$W = \sum_{i=1}^k (Rm_i - Rf_i)^2 \quad (1)$$

多数の解析パラメータの組み合わせにおいて、網羅的なFEM解析を実施する場合の最適化手法として、本研究では応答曲面法(Response Surface Methodology)^{9), 10)}を利用した。応答曲面法の概念図を図3に示す。応答曲面法においては、いくつかの不連続な順解析結果としてのサンプリングデータ(図の(a))を基に近似関数を生成し、その近似関数に基づく曲面を生成(図の(b))して最適条件を得る(図の(c))ことができる。

応答曲面法では、最小二乗法を用いることで容易にその係数が求められる利点がある。応答関数として2次多項式を用いた場合、応答 y は(2)式となる。

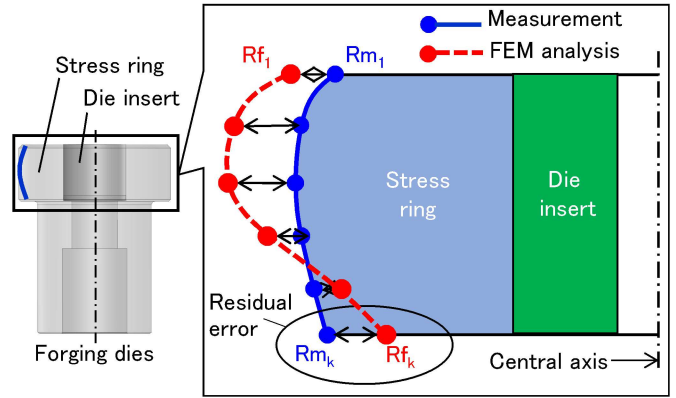


図2 外形プロファイルの実測値と解析値の関係

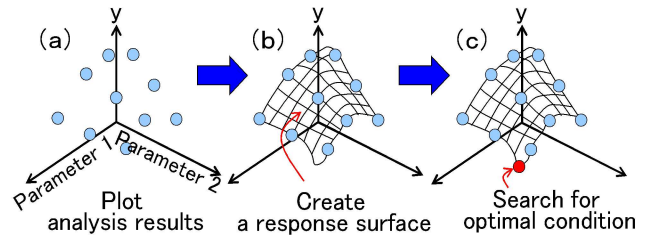


図3 応答曲面法の概念図

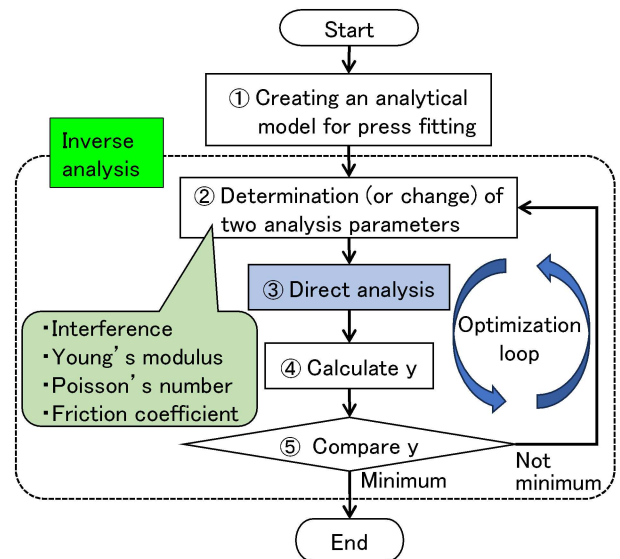


図4 逆解析プロセス

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

本研究では、簡素化のために係数 β および2変数の2次多項式である(3)式を用いる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (3)$$

ここで、(3)式の y は、(1)式の W に相当する。 W の最適化が目的であるので、 y が最も小さくなる係数 β および変数 X を決定すればよい。

圧入における逆解析プロセスを図4に示す。逆解析プロセスは、図の矢印に従い、次の①～⑤の手順で行う。

- ① 圧入の解析モデルを作成する。
- ② 既出の4つの解析パラメータ（4変数）から2つを選定し（2変数とする）、その値を決定する。
- ③ ①の解析モデルと②の解析パラメータを用いて順解析を実行する。
- ④ ③の結果から（3）式を用いて2次多項式の応答 y を求める。
- ⑤ 応答 y が最小値か否かを判断し、最小値ではない場合は、②～⑤の最適化ループを実行する。最小値である場合は、最適な解析パラメータ値が求まったことになり終了する。

ここで、圧入解析で設定する必要がある解析パラメータである圧入率、ヤング率、ポアソン比、摩擦係数をそれぞれ変数 X_1 , X_2 , X_3 , X_4 とする。

3. 圧入実験と外形プロフィール計測

3.1 圧入対象の鍛造金型

圧入実験に用いた段付きシャフト成形用の鍛造金型を図5に示す。鍛造金型は、鍛造ダイス、補強リング、バックアップ板から構成されている。

鍛造ダイス（材質：SKD11）は中空であり、外面が片側 3° のテーパ状で、上部外径88.67mm、高さ75mmである。鍛造ダイスの内面は、内径30mm、高さ50mmと内径16.4mm、高さ25mmの段付きである。

補強リング（材質：SKD61）は中空であり、外面が外径170mm、高さ90mmであり、下部にプレス機との締結用として直径210mm、高さ20mmのフランジがある。また、フランジ内面は、M98の雌ねじが形成されている。補強リングの内面は、片側 3° のテーパ状で、上部内径88.23mmである。

バックアップ板（材質：S45C）も同じく中空であり、外面がM98で厚さ27mmの雄ねじが形成されている。内面は、ロックアウトパンチが摺動するための内径16.4mmの穴が形成されている。

3.2 圧入の実験条件

実験に用いた装置と圧入実験の模式図を図6に示す。実験は、油圧万能材料試験機（島津製作所製：UH-F1000kNX、以下、試験機）を用い、補強リングを図5の正面図と上下反転させて試験機の台上に設置し、補強リング内面に鍛造ダイス外面をテーパの合わせ面で止まる位置まで挿入した後、鍛造ダイス上に押圧板を置き、これを試験機で室温にて加圧して圧入した。圧入率は鍛造ダイス上部外径の0.5%、圧入速度は1mm/sとし、下部の段付き部まで一定速度で圧入した。なお、焼き付き防止の潤滑剤としてモリコートペーストを鍛造ダイスの嵌合面に薄く一様に塗布した。

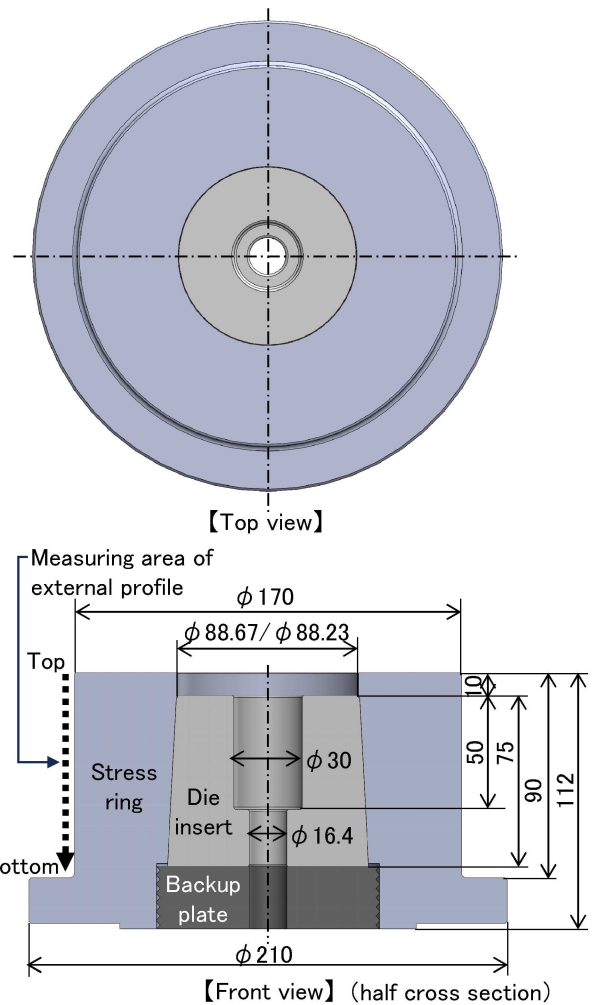


図5 圧入対象の鍛造金型

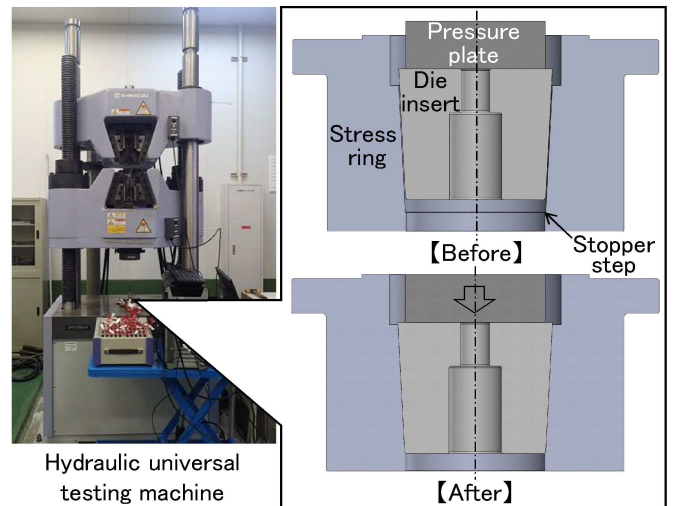


図6 実験装置と圧入実験の模式図

3.3 外形プロフィールの測定方法

圧入後の補強リングの外形プロフィール（図5の点線矢印の領域）を上端面から1mm間隔で測定した。測定に用いた装置を図7に示す。

補強リングの測定には繰り返し精度 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 、2400回/秒の高速測定が可能であるLEDセンサー式の非接触デジタ

ル寸法測定器 (KEYENCE製: LS-7070MT, 以下, 寸法測定器) を用いた。図7の左枠に示すLEDセンサーは, 発光部のA部と受光部のB部で構成され, 接続板に締結されており, 両図は, 装置への設置時に対して上下を反転した状態である。円形にくり抜いた台座の中心に鍛造金型を置き, LED光がシート状にA部からB部方向へ照射(左枠下図の緑部)され, LED光が鍛造金型により遮られた部分の寸法(左枠下図の赤矢印)を測定する仕様である。ここで, 寸法測定器1台当たりの最大測定長さは65mmであるが, 同一平面(台座)上に2台相対して設置し, 双方の寸法測定器を赤矢印方向に平行移動することで最大200mmを測定可能とした。

寸法測定器を昇降機構と回転機構を有する装置に設置し, 鍛造金型の中心軸をLED照射方向と直交する様に設置して測定した。本稿では昇降機能のみで十分であるが, 回転機構は, 局所的な焼き付きが発生するなどの不均一圧入の有無を判別する場合や六角ボルトなどの異形金型の外形プロフィールの測定時に角度を割り出す場合に有効となる。なお, 検証のために触針式の高精度三次元測定器(ミツトヨ製: LEGEX707)でも補強リングを測定した。

3. 4 外形プロフィールの計測結果

圧入後の補強リングの外形プロフィールと上端面からの高さの関係を図8に示す。ここで, 外形プロフィールは, 測定結果(直径値)の1/2(半径値)として示した。

寸法測定器と高精度三次元測定器の測定結果はほぼ一致しており, 高精度な測定結果が得られた。外形プロフィールは, 図5の設計値(170mm/2)より大きくなっており, 樽状に変形していることが分かる。また, 半径値の最大は上端面から約50~60mmの位置であり, これは鍛造ダイス内面のφ30mmとφ16.4mmの段差部に該当している。

4. 圧入の逆解析と最適化

4. 1 圧入の解析モデル

圧入の解析モデルを図9に示す。モデルは, 対称性を考慮して1/8モデルとして定義し, 鍛造ダイス(材質: SKD11)と補強リング(材質: SKD61)を弾塑性体と仮定した。また, 圧入速度は1mm/s, 室温での圧入とした。なお, 本章における解析とは図4のプロセス③(順解析)である。

4. 2 解析条件

解析パラメータと設定値を表1に示す。解析パラメータは, 既出の圧入率(変数 X_1), ヤング率(変数 X_2), ポアソン比(変数 X_3), 摩擦係数(変数 X_4)について, 各パラメータに付き, 太字下線をデフォルト値として工学的に有意な4条件を設定した。図4のプロセス②では, 解析パラメータとして2つの変数を選択することになるが, 選択した変数以外の解析パラメータは, デフォルト値を設定値とした。

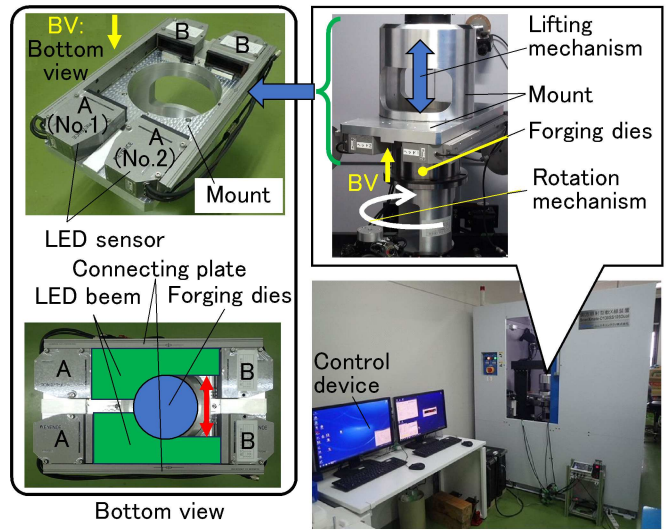


図7 外形プロフィールの測定装置

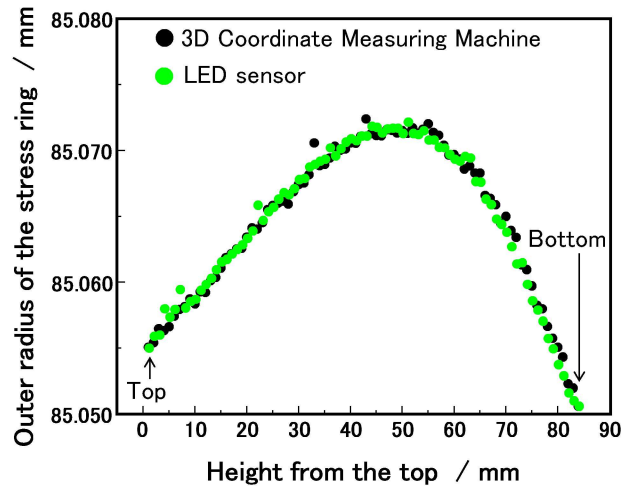


図8 外形プロフィールの測定結果

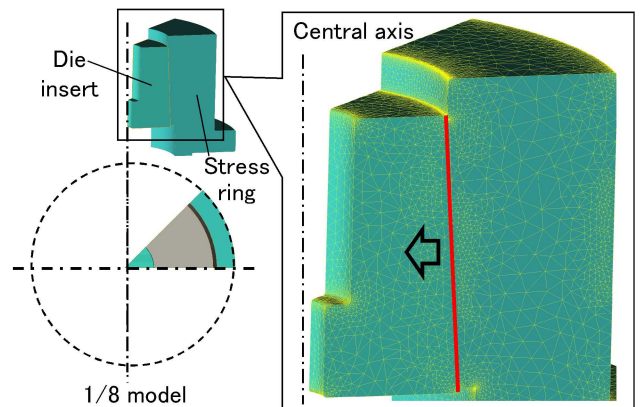
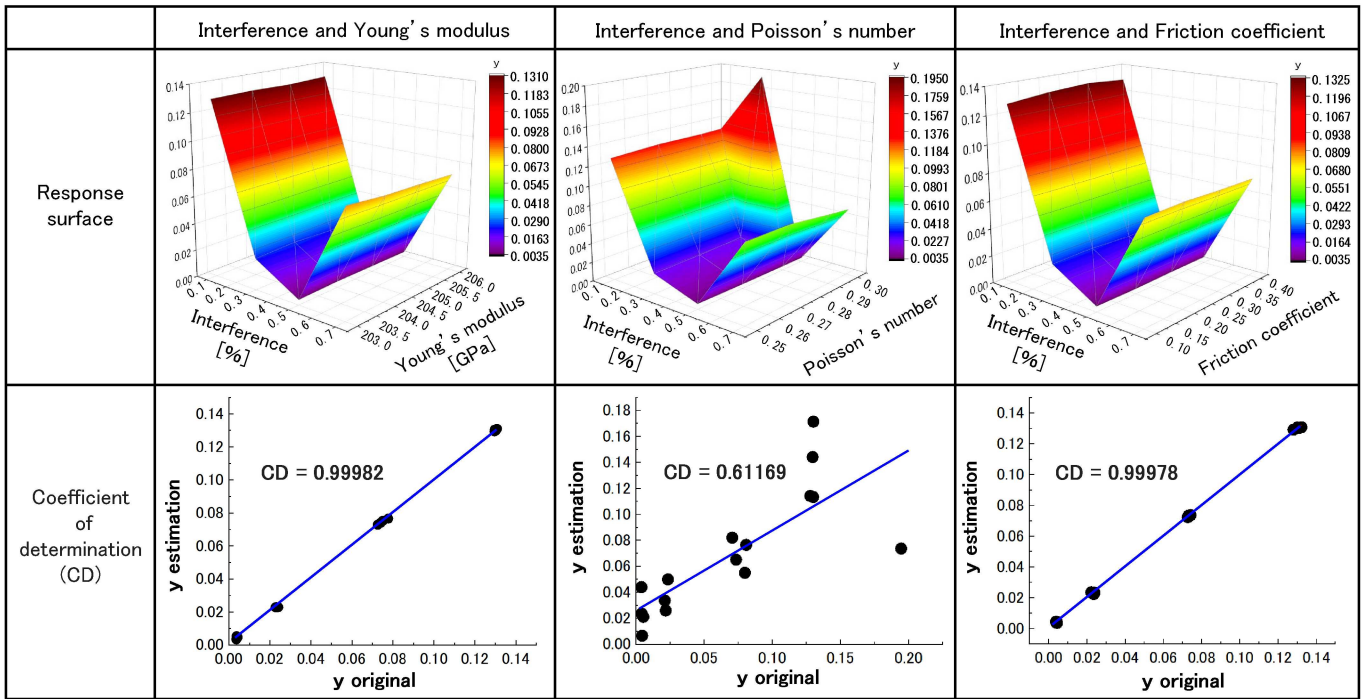


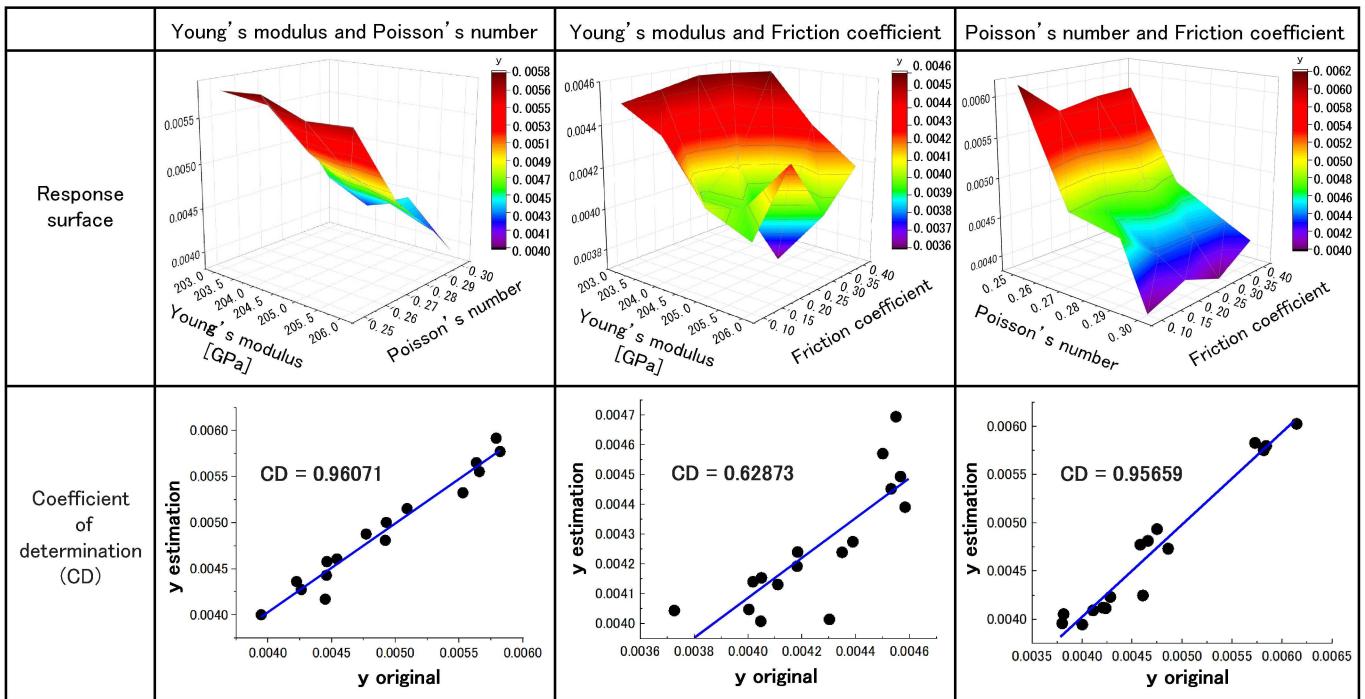
図9 解析モデル

表1 解析パラメータと設定値

Parameter	Value
Interference [%] : X_1	0.1, 0.3, 0.5 , 0.7
Young's modulus [GPa] : X_2	203, 204, 205 , 206
Poisson's number : X_3	0.25, 0.27, 0.29, 0.30
Friction coefficient : X_4	0.1, 0.2 , 0.3, 0.4



(a)



(b)

図10 応答曲面と決定係数

解析には塑性加工用の商用ソフトウェアであるQForm UK 10.2.1を使用した。圧入解析においては、図6の模式図に従い、鍛造ダイスを押圧板で押圧して圧入する解析も可能であるが、計算時間が膨大で収束性も低いため表1の解析条件を全て実行するのは現実的ではない。そこで、ソフトウェアの機能である圧入の模擬機能を利用した。すなわち鍛造ダイス上端面の外径と補助リング内径を同値としてモデル化し、補助リングの内径(図9の赤実線)を圧入率分だけ中心軸側に強制変位させて圧入を模擬した。

4.3 解析結果と最適化

最適な解析パラメータの組み合わせを可視化するために2変数ごとに(3)式により求めた応答曲面(立体図)と決定係数(分布図)を図10に示す。ここで、決定係数とは目的変数の予測値が実際の目的変数の値とどの程度一致しているかを表す指標であり、0から1までの値をとり、1に近いほど良い近似を与える。(a)は、圧入率と各解析パラメータを2変数とした場合であり、(b)は、圧入率以外の2変数の組み合わせである。

図 (a) では圧入率に対してヤング率と摩擦係数を変数に選択すると決定係数が1に近く、良い近似が得られている。図 (b) ではヤング率とポアソン比およびポアソン比と摩擦係数を変数に選択すると決定係数が0.9以上であり、良い近似が得られている。本研究では、決定係数が最大の圧入率とヤング率を最適解が得られる2変数とした。

最適解が得られる圧入率およびヤング率において、各変数と応答曲面法により導出された予測式の関係を図11に示す。予測式から応答 y が最小になる条件を導き出したところ、圧入率が0.45%、ヤング率が206.5GPaとなった。よって、各解析パラメータの最適値は、圧入率0.45%、ヤング率206.5GPa、ポアソン比0.30、摩擦係数0.2となった。

LEDセンサーによる実測値と解析パラメータの最適値および参考のため最も樽状変化の低い解析パラメータの組み合わせ (以下、低樽状条件) における補強リング半径と上端面からの高さの関係を図12に示す。実測値と最適値の近似が良好であることが分かる。低樽状条件は、実測値と大きく乖離しており、このことから解析パラメータの最適化の重要性が伺える。以上の結果を踏まえ、鍛造金型内部の予圧状態を可視化するに至った。最適条件と低樽状条件における最大主応力分布を図13に示す。鍛造金型を圧入した場合の理想状態とは圧入の除荷後に鍛造ダイスに圧縮方向の応力が作用している状態である。最適条件では、0以下の圧縮応力状態 (最大で約125MPa) となっており、予圧状態は非常に良好である。低樽状条件では、0以下の圧縮応力は作用しているが最適条件の約1/5で非常に低く、鍛造金型にとっては予圧状態が良好とは言えない。

以上のことから変数に設定する解析パラメータとその設定値によって鍛造ダイスの内部応力が大きく変化するため、最適条件を見出すための本研究手法は、実用上非常に有効であることを確認できた。

5. 結 言

鍛造金型において、鍛造ダイスと補強リングの圧入後の外形プロファイルの実測値を基に、逆解析による圧入率、ヤング率、ポアソン比、摩擦係数の解析パラメータの最適化を行った結果、2変数として圧入率とヤング率を用いた場合、実測値に一致したことで鍛造金型の予圧状態の可視化に至った。開発した手法により、製造される鍛造金型ごとの良否判定を実施する作業プロセスが可能になる。

参 考 文 献

1) 藤川真一郎：塑性と加工, **56**(650), 225-229(2015)
 2) 中溝利尚ら：Sanyo Technical Report, **9**(1), 27-34 (2002)
 3) 濱家信一：SOKEIZAI, **53**(7), 33-36(2012)

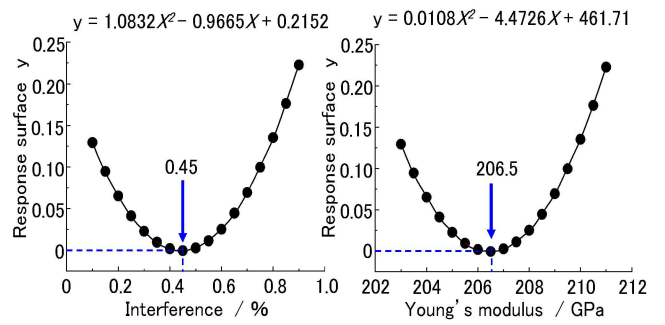


図11 応答曲面法により導出された予測式

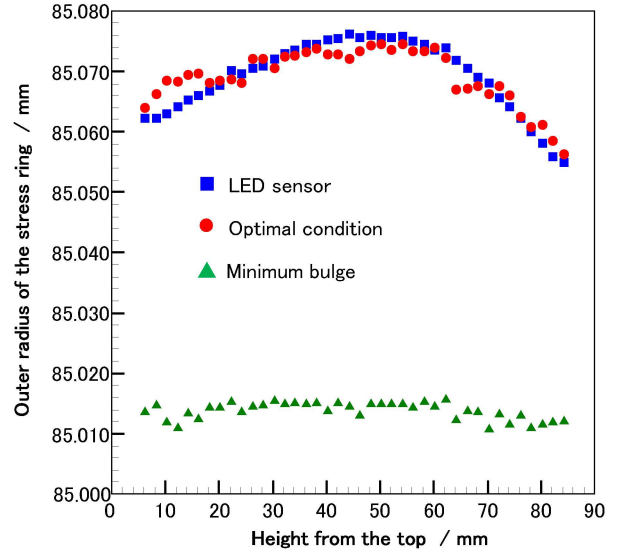


図12 補強リング半径と上端面からの高さの関係

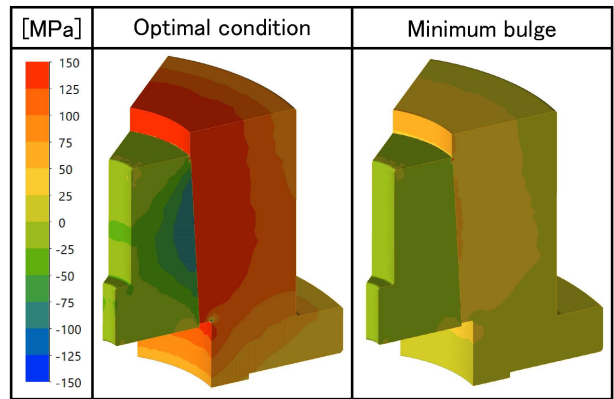


図13 予圧状態の可視化 (主応力) 結果

4) T. Hirai, T. Katayama, J. B. Hawkyard : Proc. Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., **53**, 433-436(1986)
 5) 久保司郎：材料, **41**(470), 1595-1604(1992)
 6) 二川正敏ら：実験力学, **4**(3), 222-227(2004)
 7) 小笠原永久ら：実験力学, **12**(1), 26-32(2012)
 8) 坂本潤嗣ら：実験力学, **14**(4), 257-263(2014)
 9) 尼子龍幸：R&D Review of Toyota CRDL, **37**(1), 31-36 (2001)
 10) "RSMaker for Excel", <http://todoroki.arrow.jp/ssoft/RSMkaisetsu.pdf>