研究論文

金型均熱化技術の開発

本田　崇*　田村　信*　須藤　貴裕*

Development of Thermal Uniformity Technology for Forming Die

HONDA Takashi*, TAMURA Makoto* and SUTOH Takahiro*

抄　　録

温間絞り用の金型表面の均熱化を目的として，伝熱シミュレーション技術の精度向上と金型表面の均熱設計手法の確立に取り組んだ。対流，輻射による熱損失を測定し，測定結果を熱伝達係数として整理することで，シミュレーションの精度が向上することを示した。このシミュレーションにより熱損失の割合を把握した。最も大きい損失は熱伝導であり，全損失の約 50%であることを示した。均熱設計手法では，シートヒータを用いた設計手法を開発した。実際に角筒絞り用金型をサンプルとして，設計，試作を行い，本手法の有効性を示した。

1. 緒　　言

オーステナイト系ステンレス鋼はダイス加熱およびパンチ冷却を組み合わせた温間絞り加工法を用いることで飛躍的に深絞り成形性が向上することが知られている[1)]。また，マグネシウム合金は常温における絞り加工は困難であるが，200℃以上に加熱すると変形抵抗が大きく低下することから，フランジ部やダイス肩部を加熱した温間絞り加工が行われている[2)]。

このように，熱を用いて加工を行うと，材料強度の温度依存性を利用して加工性を向上させることができるため，金型の温度制御は非常に重要である。しかし，金型の熱設計は経験によるところが多く，一様な温度条件を意図し設計しても，金型には温度ムラが生じてしまうため，成形への影響が懸念される。そこで本研究では，金型表面の均熱化を目的とし，伝熱シミュレーション技術の解析精度向上と金型表面の均熱設計手法の確立に取り組んだ。

2. 伝熱シミュレーション技術の精度向上

2.1　金属表面の熱損失の把握

金型からの熱損失は，空気への対流伝熱，輻射伝熱およびプレス機への熱伝導の 3 形態がある。精度のよいシミュレーションを行うには，これらの熱損失量の把握が必要となる。しかし，これらの把握は困難であり，特にプレス機への熱伝導による損失は実験から求めることは難しい。そこで，全熱損失に対し対流と輻射の割合を把握することで，間接的に熱伝導による損失を求め，各熱損失を把握することとした。

対流と輻射の測定の様子を図 1 に示す。測定

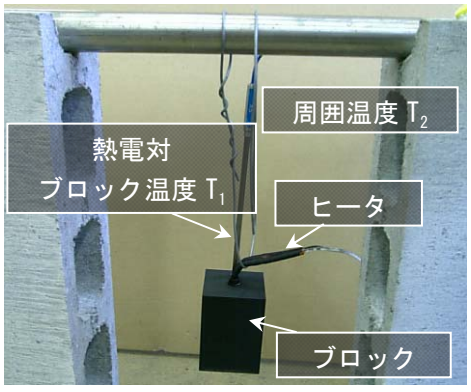


図 1　対流・輻射の測定

* 研究開発センター

サンプルには，材質 S45C，大きさ 50mm×50mm×70mm のブロックを用いた。この測定の環境では，熱伝導による熱損失はほとんど発生しないため，定常状態における全供給熱量 Q は対流熱損失量 Q_c と輻射熱損失量 Q_r により式(1)で表される。

$$Q = Q_c + Q_r \quad (1)$$

また，対流と輻射熱損失については，それぞれ式(2),(3)のように表わすことができる。

$$Q_c = \alpha_c(T_1-T_2)A \quad (2)$$

α_c：熱伝達係数

A：表面積

$$Qr = \sigma F_{12}F_\varepsilon(T_1^4-T_2^4)A \quad (3)$$

σ：ステファン・ボルツマン係数

F_{12}：形態係数

F_ε：放射率

ここで，σ は輻射のエネルギーをやり取りする面の形状と面間距離から決定する係数であるが，ここでは 1 と仮定した。

熱損失量は，対流については熱伝達係数，輻射については放射率で表わされるため，このままでは熱損失量の比較が難しい。そこで，輻射を式(2)と同じ形で表すことで，輻射の熱損失量は式(4)のように等価熱伝達係数 α_r として表わすことができ，統一して整理することができる。

$$Q_r = \alpha_r(T_1-T_2)A \quad (4)$$

ここで式(3)と式(4)から等価熱伝達係数は式(5)として求めることができる。

$$\alpha_r = \sigma F_{12}F_\varepsilon(T_1^2+T_2^2)(T_1+T_2) \quad (5)$$

式(5)の等価熱伝達係数を用いることにより熱損失は熱伝達係数だけで整理でき，式(1)より対流と輻射を合わせた熱伝達係数 α は式(6)で表わされる。

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (6)$$

実験では Q，T_1，T_2 および F_ε を測定し，式(3)より放射伝熱量 Q_r を, 式(5)より輻射の等価熱伝達係数 α_r を求めた。Q_r を決定した後，対流伝熱量 Q_c，対流熱伝達係数 α_c は式(1),(2)より求めた。実測した熱伝達率測定の結果を図 2 に示す。熱伝達係数は温度に依存しており，温度が上がると大きくなることが分かる。なお，ブロックの表面はフライス仕上げで放射率は 0.18 である。

一般に表面が平滑であれば，対流の熱伝達係数 α_c に大きな違いはないため，本研究では表面によらず同一と仮定する。これに対し，輻射は表面の腐食，色等の影響を受けるため，放射率は表面状態により変化する。金型は部位により表面状態が異なるため，正確な温度分布を予測するには，表面状態ごとに放射率を把握する必要がある。よって，表面状態ごとに放射率を測定し，等価熱伝達係数 α_r を求めた。測定した放射率を表 1 に，等価熱伝達係数を先ほど示した図 2 に示す。対流のみによる熱伝達係数と比べ，輻射により熱伝達係数が大きくなっていることがわかる。

2.2　金型表面の温度分布解析

2.2.1　解析モデル

測定した等価熱伝達率を用いて金型表面の温度分布解析を行い，実測値と比較してその有効性について検討した。解析には ANSYS.Inc 製有限要素解析ソフト ANSYS Workbench ver.11.0 を用いた。検討に用いた角筒絞り金型を図 3 に示

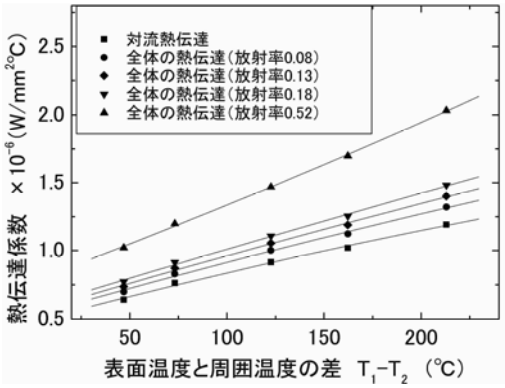


図 2　熱伝達測定結果

表 1　表面状態による放射率

表面の状態	放射率
鏡面	0.08～0.13
フライス面	0.18～0.25
さび面	0.52～0.60

す。金型はダイス，8 本の棒状ヒータを配置したヒータ板，断熱板および台座で構成されている。金型形状の対称性から，解析モデルは金型の 1/8 とした。解析モデルを図 4 に示す。

2.2.2　プレス機への伝熱量

プレス機上に金型を載せた場合，金型の熱損失は 2.1 で検討した対流伝熱と輻射伝熱だけでなく，プレス機への熱伝導が発生するため，式(6)で表される。ここで Q_m はプレス機への伝熱量である。

$$Q = Q_c + Q_r + Q_m \qquad (6)$$

Q は測定した実測した供給熱量であり，Q_c と Q_r は 2.2.1 で求めた熱伝達係数を用いて計算した結果から求めることができるが，それぞれの熱損失量は Q_m の大きさにより変わるため，まず Q_m を把握する必要がある。しかし，プレス機への伝熱量 Q_m を測定するのは困難なため，実測した表面温度と解析結果の比較から値を推定した。推定値を用いるにあたり，値の誤差が表面の温度分布に与える影響を検討した。解析から求めた，プレス機への伝熱量を変化させたときの温度分布を図 5 に示す。測定位置の数字は，上の図の番号である。各条件で求めた平均温度を 0 として，平均値からの温度差を比較した。ここで台座とプレス機の接触面では，面内で一様な熱の移動が行われていると仮定した。

結果より，プレス機への伝熱量 Q_m は表面の平均温度に影響を及ぼすものの，温度分布には影響しないことが確認できた。よって，Q_m は解析で求めた金型表面の平均温度と実測した平均温度が一致したときの値を用いることとした。

2.2.3　解析結果

金型表面の熱画像と解析結果の比較を図 6 に示す。熱画像の測定にはアビオニクス社製 TVS-500EX を用いた。シミュレーションにより温度分布を精度よく再現できていることが分かる。図 5 の測定点と同じ位置での，実測値と解

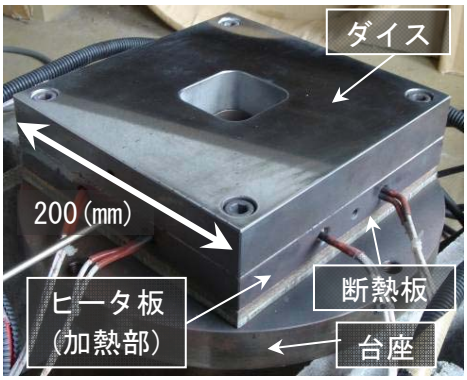


図 3　角筒絞り金型

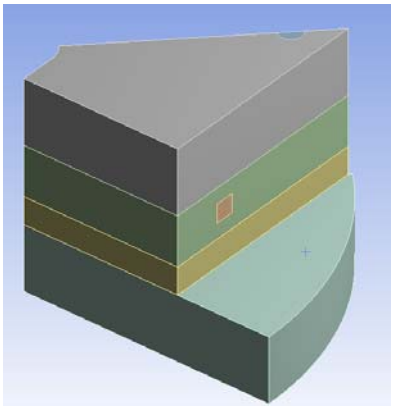
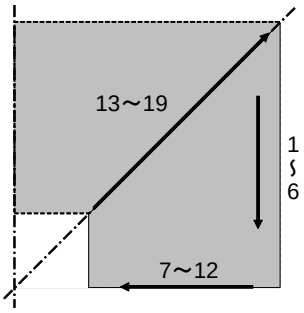
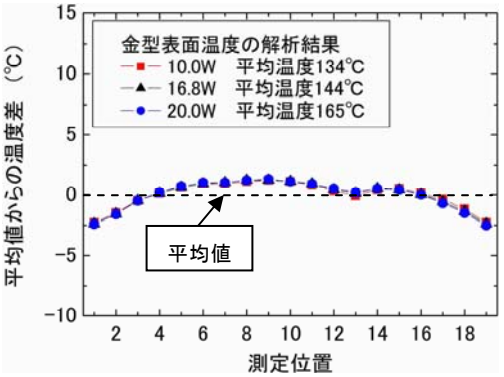


図 4　解析モデル



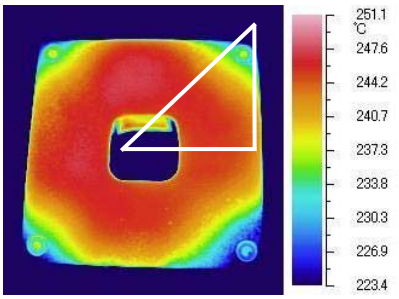
温度測定位置



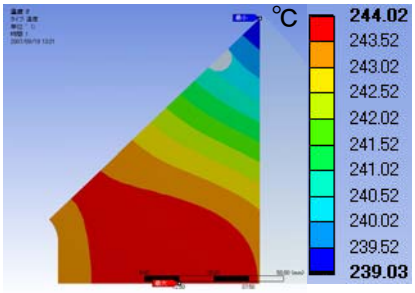
プレス機への伝熱条件と
平均値からの温度差

図 5　伝熱量の変化による表面温度の分布

析結果の比較を図 7 に示す。ダイス上面を平均温度約 140℃に加熱したとき，温度の誤差を±1℃以内で再現できていることが分かる。また，熱伝達率を温度依存で表現していることから，ダイス上面の平均温度を約 240℃にした場合も±1℃で再現できている。これより本研究で用いている熱伝達率の有効性を確認できた。

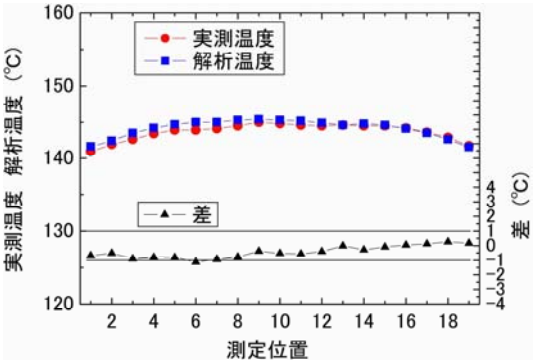


熱画像測定結果

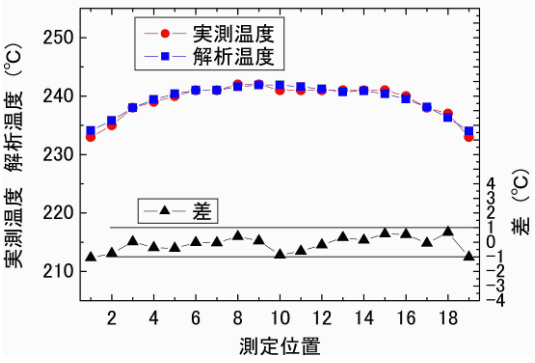


解析結果

図 6 金型表面の熱画像と解析結果の比較



表面平均温度約 140℃の比較



表面平均温度約 140℃の比較

図 7　伝熱量の変化による表面温度の変化

2.2.4　熱損失の割合

金型の温度分布を精度よく再現できたことから，そのときの金型内の熱損失の割合について検討した。熱損失の割合を図 8 に示す。全損失に対して，対流による損失は 41～45%，輻射による損失は 6%，プレス機への伝熱量は 48～52%であった。ダイスの表面温度によらず，金型表面の大部分が光沢面であることから放射率が低く，輻射による熱損失の割合が少ない。それに対してプレス機側への伝熱量は供給熱量の約 50%と極めて大きい。結果より，金型に供給するエネルギーを有効に使うためには，プレス機への熱伝導を少なくすることが最も有効であることがわかった。

3.　均熱化の手法

3.1　金型の温度ムラ発生原因

金型の温度が均一にならない原因として以下の要因が考えられる。

① 周囲への熱損失（対流・輻射）

② プレス機への熱の移動（熱伝導）

① 周囲への熱損失（対流・輻射）

金型の表面は空気への熱伝達および周囲への輻射により熱を奪われる。そのため，金型の表

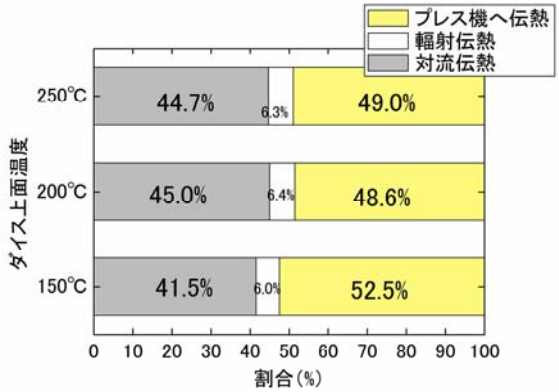


図 8　金型内の熱収支の割合

面と内部には温度差が生じ，特に複数面空気と接する角部からの熱損失は大きく，温度は低くなる。

② プレス機への熱損失（熱伝導）

温間絞り用の金型は，図 3 のようにヒータ板（加熱部）とプレス機の間に断熱板を採用することにより，プレス機への熱の移動を減じている。しかし，ボルト締結部など金属同士が接する部分からは熱の移動が大きく，熱損失量は大きくなる。そのため，締結部周辺の温度は低くなる。

ヒータから発生した熱は，金型内を熱伝導により伝播するため，温度分布は均一になるよう変化する。しかし，上記①②のような熱損失が発生すると，熱伝導による均一化より，熱損失による冷却の効果が大きくなるため，温度は均一にならない。

金型表面の温度を均熱化するには，①の対策として，周囲への熱損失の大きい箇所（角部周辺）に多くの熱を供給し，温まりやすい箇所（角部遠方）には熱を供給しないようにする必要がある。また②の対策には，締結部からの熱の逃げの影響を表面の温度分布に対して少なくする必要がある。

そこで，まず締結部からの影響が少なくなるような金型の構造を検討し，次に熱源の最適配置を行うことで表面の均熱化を行った。

3.2 締結部の影響

熱の移動はフーリエの法則により式(7)の形で表される。

$$\frac{Q}{A} = -k\frac{dT}{dx} \qquad (7)$$

k：熱伝導率

式(7)より，移動する熱流 Q は，熱伝導率と温度差に比例して大きくなることがわかる。よって，ヒータから締結部に流れる熱流を減らすには，表面を加熱するヒータとは別のヒータで締結部周辺を加熱することで，周囲と締結部の温度差を少なくすることが有効と考えられる。そこで，締結部周辺の加熱の有効性を確認するため，図 3 に示した角筒絞り金型を対象に，全面ヒータ板を用いた解析を行った。全面ヒータ板の構造を図 9 に示す。全面ヒータ板は，外周部と穴部の周囲 10mm 以外に窪みを設け，ここにシートヒータを取り付けることによりダイスの上面全体に熱を供給する構造である。

この全面ヒータと棒状ヒータ（以下従来ヒータ）を上下複層ヒータとして，表面温度の比較を行った。解析したモデルを図 10 に，比較として行った条件を表 2 に示す。

解析結果を図 11 に示す。条件 2 と 3 の比較から，全面ヒータより従来ヒータの方が均熱化さ

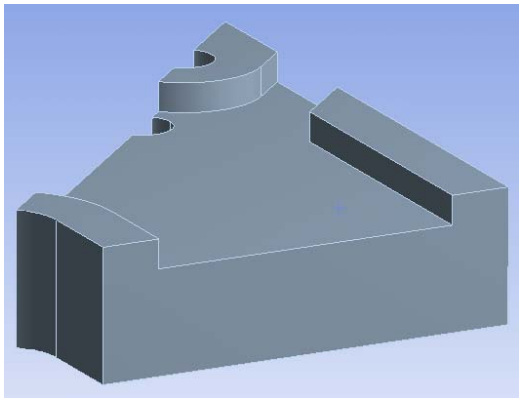


図 9　全面ヒータ板

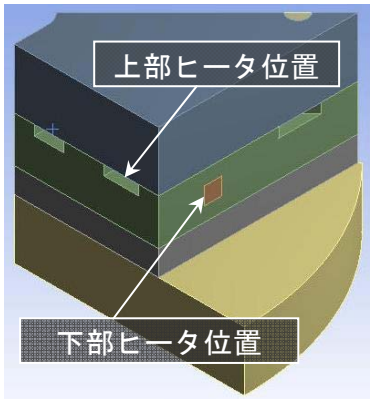
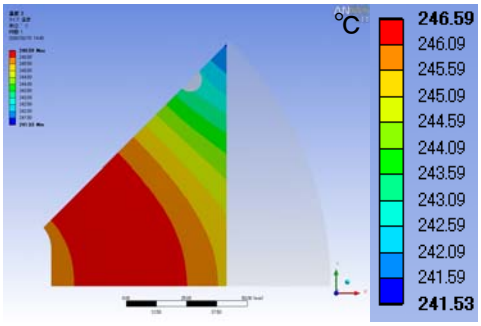


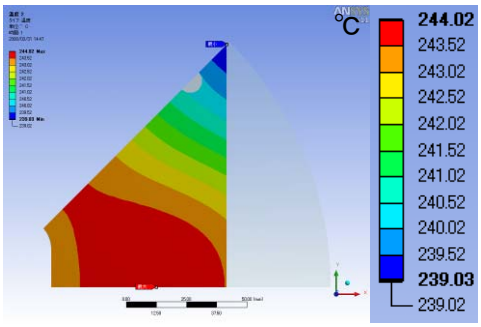
図 10　上下複層ヒータ解析モデル

表 2　比較条件

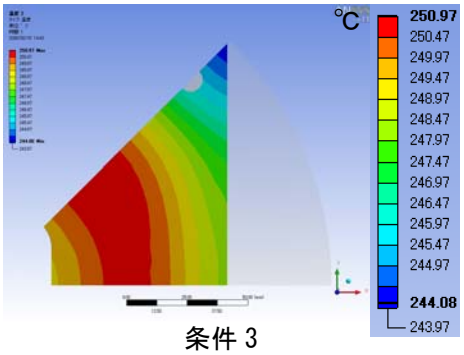
	上部ヒータ	下部ヒータ
条件 1	全面ヒータ	従来ヒータ
条件 2	なし	従来ヒータ
条件 3	全面ヒータ	なし



条件 1



条件 2



条件 3

図 11　複層ヒータ板比較解析結果

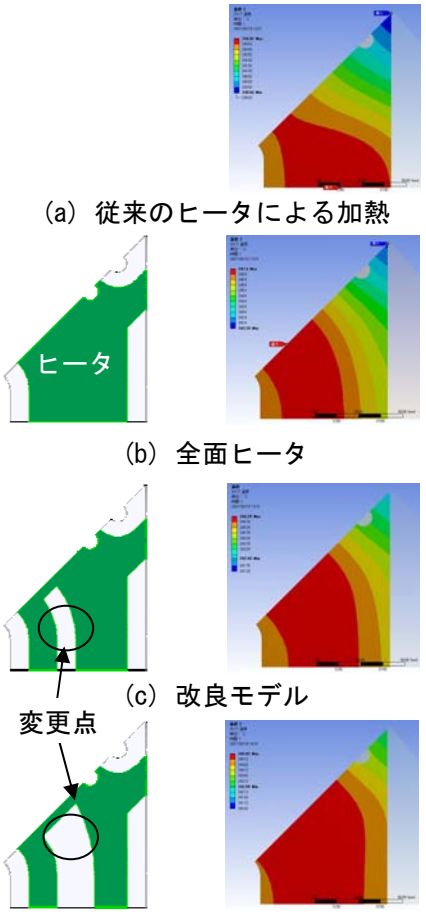
れている。これより，単純に上面全体を加熱するだけでは均熱化されないことがわかる。また，条件 1 との比較から，従来のヒータと全面ヒータを複層化することで，より均熱化されることがわかる。これより，上下複層ヒータ構造金型では，下部ヒータにより締結部周辺が加熱され，表面を加熱する上部ヒータからの熱流が締結部へ流れにくくなり，均熱効果が得られることが確認できた。

3.3　熱源の最適配置

次に熱の供給コントロールとして熱源の配置を検討した。この検討については，3.2 で均熱効果を確認できた上下複層ヒータ構造とし，熱源には任意に配置が可能なシートヒータを用いた。検討した手順は以下のとおりである。

① 従来ヒータ板＋全面ヒータ板による解析
② 解析結果から，表面高温部直下のヒータを削除した CAD モデルの作成
③ ②で作成した CAD モデルを用いた解析
④ ②③の繰り返しによるシートヒータ形状の最適化

まず，上部ヒータ板に全面ヒータ用いて解析を行うことにより，金型の形状に起因する，金型表面への熱流を表面温度から把握する（①）。その後 CAD によるモデルの修正（②）と解析（③）を行う。①と同様に，現ヒータ形状による熱流を把握し，モデル修正を行うことで，温度分布が均一となるよう形状を制御することができる（④）。修正と解析結果の例を図 12 に



(a) 従来のヒータによる加熱
(b) 全面ヒータ
(c) 改良モデル
(d) 最適化モデル

図 12　ヒータ形状（左）と解析結果（右）

示す。1 色を 0.5℃刻みで表示した。単純な修正を数回行うことで均熱化がなされることがわかる。ただし，この金型のサイズはあまり大きくないため，均熱化の効果を確認するには，大型で温度ムラが生じやすい金型が望ましい。そこで，図 13 の金型を対象として，同様の解析により最適形状のヒータ板を設計し，均熱化の効果を確認した。解析モデルを図 14 に，ヒータモデルの修正と解析結果を図 15 にそれぞれ示す。1 色を 2.0℃刻みで表示した。図 12 と同様に，金型形状が変わっても均熱化されており，改良前の金型の温度差が大きいことから，均熱化の効果が確認できた。

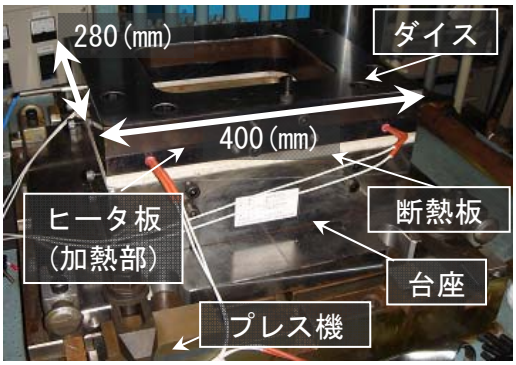


図 13　大型角筒絞り用金型

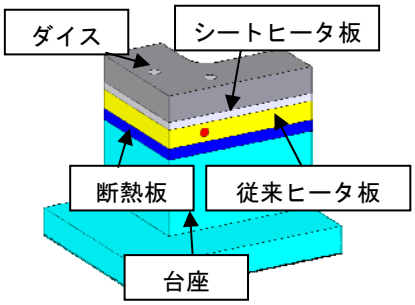


図 14　シートヒータ取り付け位置

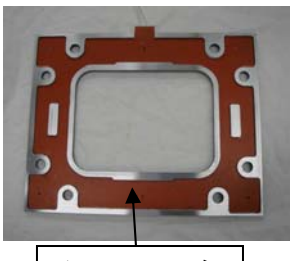
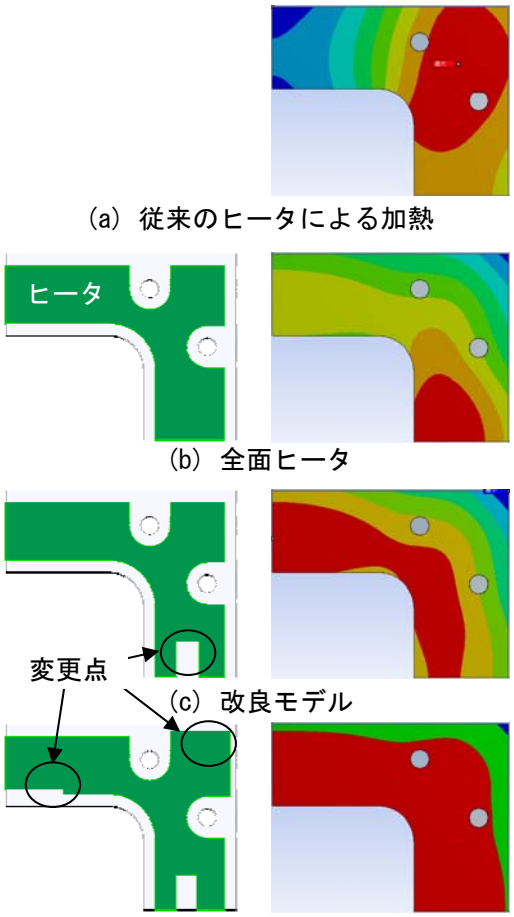
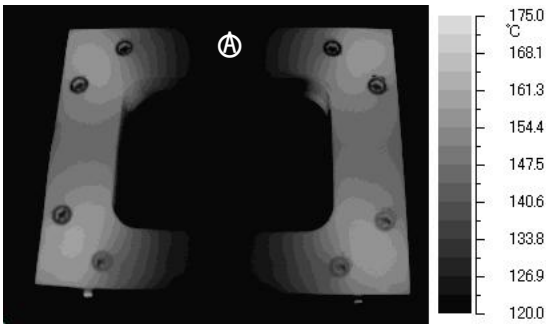


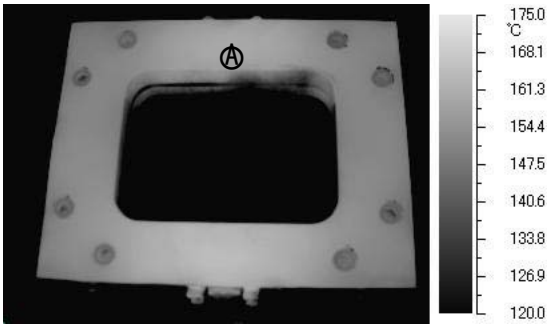
図 16　均熱ヒータ板



(a) 従来のヒータによる加熱
(b) 全面ヒータ
(c) 改良モデル
(d) 最適化モデル
図 15　ヒータ形状（左）と解析結果（右）



(a) 従来ヒータのみによる加熱



(b) 上下複層ヒータによる加熱
図 17　大型角筒絞り用金型

3.4　均熱化の検証

均熱化の検証を行うため，解析結果を基にシートヒータおよびシートヒータ板を試作して加熱実験を行った。試作したシートヒータ板を図16に示す。シートヒータの取り付け位置は図14に示すとおり，ダイスと従来ヒータの間である。効果を比較するため、従来ヒータ板のみの加熱と，最適化された上下複層ヒータによる加熱による金型表面の温度を熱画像にて測定した。測定結果を図17に示す。従来のヒータ板による加熱では，図中Ⓐ部は温まっておらず，金型表面に温度ムラが生じている。これに対し，上下複層ヒータによる加熱では，Ⓐ部も周囲と同様に温まっており，金型表面の温度は均熱化されており，本手法による均熱化を確認することができた。

4. 結　　言

(1) 対流，輻射による熱損失を測定し，熱伝達係数で整理することで，精度のよいシミュレーションを可能とした。

(2) シミュレーションにより，対流，輻射，熱伝導による熱損失の割合を把握した。熱伝導による熱損失は全損失の約50%であることから，効率よく金型を発熱させるには，熱伝導による損失を抑えることが有効であることを示した。

(3) 均熱化手法の一つとして，シートヒータを用いた設計手法を開発した。サンプルとなる金型を対象に設計，試作を行い，本手法の有効性を示した。

参考文献

1) 渡部豈臣，”塑性と加工“，33，375，1992，p.396

2) 鎌土重晴，小原久，小島陽,”マグネシウム合金の成形加工技術の最前線“