研究論文

高断熱・均熱金型の開発

本田　崇*　田村　信*　杉井　伸吾*

Development of Well Insulated and Thermal Uniformity Technology for Forming Die

HONDA Takashi*, TAMURA Makoto*and SUGII Shingo*

抄　　録

温間絞り加工用などの熱源を有する金型に対して，断熱性能の向上と温度分布の均熱化を目的に，シミュレーションを用いた数値解析手法による高断熱・均熱設計手法の確立に取り組んだ。その結果，適切な断熱対策を採ることで，加熱に必要なエネルギーを従来比 1/2 以下に削減できることを示した。また，熱源の配置を適切に行うことにより，加工領域の温度分布を均一にできることも併せて示した。実際に， 250×500mm マグネシウム合金板用ブロー成形金型（以下ブロー成形金型）を 450℃の使用条件にて設計・試作を行い，本設計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の深絞り成形やマグネシウム合金など常温での絞り加工が困難な材料に対して，金型を加熱し成形を行う温間成形加工が有効である。これは，材料強度の温度依存性を利用し加工性を向上させるもので，金型の断熱設計・温度制御が非常に重要となる。断熱対策では，プレス機への熱の逃げを防ぐため，プレス機との間に断熱板が使用されているが，その効果について十分に把握されていない。また，加工領域の均一な加熱のためには，熱源の適切な配置を行う必要があるが，金型の構造・材質，断熱方法により温度分布が大きく変わるため，適切な熱源配置は容易ではない。

このような背景から，当研究所ではこれまでに熱伝達係数・放射率を測定し，熱収支の評価と面状ヒータを熱源とした均熱金型の試作を行い，その効果を確認した[1)]。本研究ではその成果を応用し，低コストな汎用の棒状ヒータを用いた均熱化に加え，新たに断熱効果向上の検討を行い，高断熱・均熱設計の手法確立に取り組んだ。実際にこの手法を用いてブロー成形金型の設計・試作を行い，評価を行った。

2.　断熱効果の検討

金型からの熱損失は，①プレス機への熱伝導，②空気への対流伝熱，③周囲環境への輻射（放射）伝熱の 3 形態である[2)]。これらの対策をシミュレーションにより検討し，断熱設計手法の確立に取り組んだ。解析には ANSYS.Inc 社製汎用有限要素解析コード ANSYS Workbench ver.11.0 を用いた。前報[1)]にて熱流挙動を把握済みである図 1 に示す角筒絞り用金型にて検討した。②③の損失については，小型サンプルで

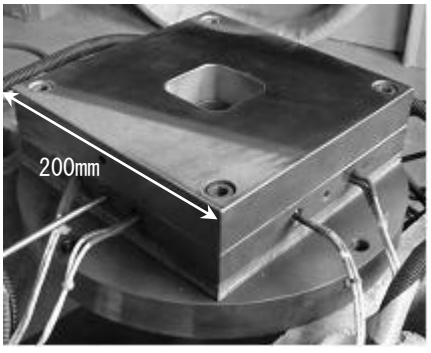


図 1　角筒絞り用金型

* 研究開発センター

の熱伝達係数の実測値に，それぞれの表面の放射率から求めた等価熱伝達を併せて冷却条件とした。

2.1　プレス機への熱損失低減

2.1.1　熱損失の割合

プレス機への熱伝導を減らすには，プレス機と金型との間に，断熱板を入れる対策が一般的である。金型構造のイメージを図 2 に示す。断熱板として用いられる材料に求められる性能として，加工時の負荷に耐える強度を持つこと，耐熱温度が使用条件以上であること，熱損失を減らせるよう熱伝導率が小さいことが挙げられる。しかし，熱伝導率と熱損失量については強度，耐熱温度ほど検討されていない。市販されている断熱材の成分および熱的性質を表 1 に示す。金属材料として S45C，SUS316 および参考として空気について併せて示した。表 1 から断熱材の性能には差があるものの，金属材料にくらべ熱伝導率はかなり小さいことがわかる。熱伝導率の大小だけでは熱損失量の違いを把握しにくいので，比較対象の金型を 150℃に加熱したときの S45C 製ボルトと断熱材を通りプレス機へ逃げる熱損失量を求めた。熱損失量は，シミュレーション結果の温度分布を基に，断熱材上面・下面位置でのそれぞれの温度差から求めた。解析モデル，温度分布を図 3，4 にそれぞれに示す。解析モデルは対称性より 1/8 とした。熱損失量の計算結果を表 2 に示す。この条件では，ボルトが全断面積に占める割合は少ないが，

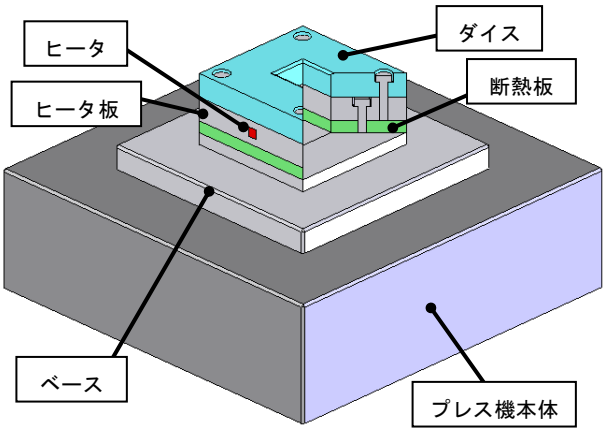


図 2　金型構造イメージ

表 1　熱的性質

種　類	成　　分	耐熱温度 (℃)	熱伝導率 (W/(m・K))
高断熱	ｶﾞﾗｽ繊維 ｹｲ酸系ﾊﾞｲﾝﾀﾞ	400	0.08
標準	ｶﾞﾗｽ繊維 ｹｲ酸塩系ﾊﾞｲﾝﾀﾞ	220	0.71
耐熱仕様	ｶﾞﾗｽ繊維 ｹｲ酸塩系ﾊﾞｲﾝﾀﾞ	500	1.21
S45C	－	－	50
SUS316	－	－	16
静止空気	－	－	0.025～

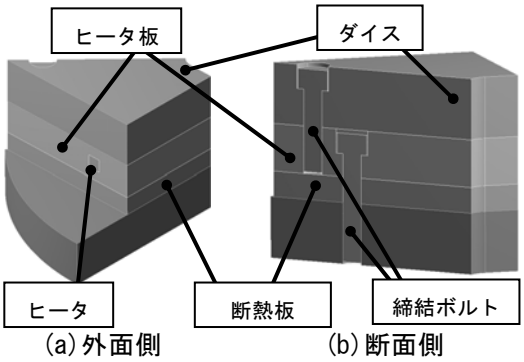


図 3　解析モデル

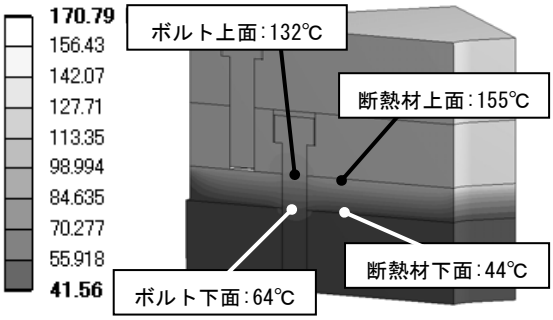


図 4　解析結果の温度分布

表 2　熱損失の割合

	ボルト	断熱材
熱伝導率 (W/(m・K))	50	0.1
断面積 (mm^2)	79	4560
断面積比 (%)	1.7	98.3
熱流出量 (W)	17.9	3.4
損失割合 (%)	84	16

熱損失の 80%以上はボルトを通してであることがわかる。以上の検討から，プレス機への熱損失は，ボルトからの熱の逃げの影響が大きいことが確認できた。

2.1.2　締結部の検討

シミュレーションにより締結部の断熱対策を検討した。検討は断熱ワッシャの有無，ボルトの材質およびボルト首下部とヒータ板・断熱材との隙間の有無について行った。検討した対策を表 3 に示す。断熱ワッシャについては，熱伝導率の低いアルミナ製（熱伝導率:0.24W/(m・K)）とし，厚さは 5mm とした。隙間については，ボルトと金型の隙間の有無による熱流の違いを確認するために設けた。解析結果を図 5 に示す。断熱性能の評価については，金型の温度が高いほど熱損失も大きくなるので，プレス機への熱損失量の比較だけで断熱性能の評価はできない。そこで，入力エネルギーに対する金型の表面温度を求め，対策ごとの温度の違いから熱損失低減効果を検討した。

表 3　検証した締結部構造

	ボルト材質	隙間	ワッシャ
①	S45C	なし	S45C
②	S45C	なし	断熱
③	SUS316	なし	S45C
④	SUS316	あり	S45C
⑤	SUS316	あり	断熱

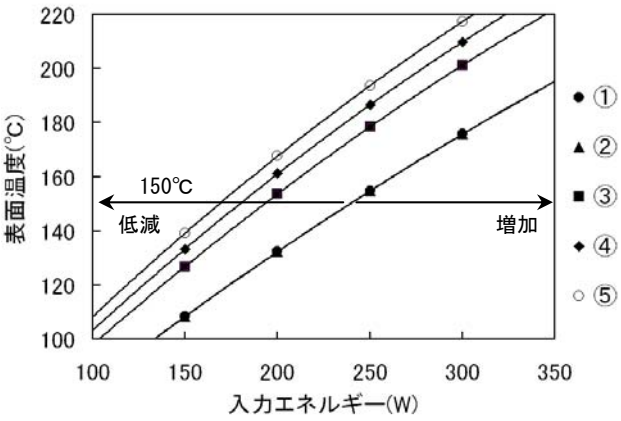


図 5　締結部の断熱効果

表 4　締結部断熱の比較

	①	②	③	④	⑤
入力(W)	242	240	194	180	169
削減(W)	-	-2	-48	-62	-73
削減率(%)	-	-1	-20	-26	-30

比較条件：表面温度 150℃

まず，従来構造に断熱ワッシャを追加したが，効果はほとんど見られない(①→②)。これは，断熱ワッシャによりヒータ板とボルトフランジ間の熱流を防いでも，他の箇所で接触してしまうことで，断熱ワッシャの効果はほとんどなくなることを示している。次にボルトの材質による違いであるが，金型表面を 150℃に設定時の入力エネルギーで約 48W の低減効果が見られる(①→③)。したがって，ボルト材質の変更は断熱性能の向上に非常に有効な対策であるといえる。

次にボルトと金型の接触について検討した(③→④)。適切な隙間を設けることにより，ヒータ板からの熱流を減らせたことでさらに約 14W の低減効果が見られる。このような隙間を設けた場合には断熱ワッシャの使用は有効で，さらに約 11W の低減効果が見られた(④→⑤)。検討結果を整理すると表 4 のようになる。削減率は①の入力エネルギーに対し，対策により削減できるエネルギーの割合である。最も有効な①→⑤の対策により約 30%の入力エネルギー削減効果を得られることが予測される。

2.2　対流損失の低減

周囲空気への断熱は，金型を断熱材により覆うことが有効である。周囲の断熱板は，金型とプレス機の間に使用する断熱板と同じものを用いる場合が多い。しかし，金型 - プレス機間の断熱板には加工時の面圧に耐える強度が必要であるのに対し，金型の周囲には負荷はないため，周囲の断熱板は断熱性能を重視した選定が有効と考えられる。そこでシミュレーションを用いて，金型周囲に配置した断熱材の効果を確認するとともに，断熱性能による効果の違いを比較

した。表 5 に比較した断熱材を示す。ここで，①，②，④，⑤の断熱材は表 1 に示した成分のものである。③，⑥のシリカ断熱材は，ヒュームドシリカを圧縮成形したもので，静止空気を内部に閉じ込めていることから断熱性能が高く，耐熱温度が 950℃と高温での使用が可能である。一方，やわらかく強度は小さい。

また，断熱材の材質と併せて，断熱材の表面状態の違いによる輻射効果も検討した。放射率の実測結果より，断熱材のままを 0.87，アルミで被覆したものを 0.08 とした。評価方法は 2.1.2 節と同様に入力エネルギーに対する金型の温度で比較した。

表 5　金型周囲の断熱材比較

種　類	圧縮強さ MPa	熱伝導率 W/(m・K)	表面放射率
①耐熱仕様	45～55	1.21	0.87
②高断熱	94	0.08	0.87
③シリカ	―	0.02～0.03	0.87
④耐熱仕様	45～55	1.21	0.08
⑤高断熱	94	0.08	0.08
⑥シリカ	―	0.02～0.03	0.08

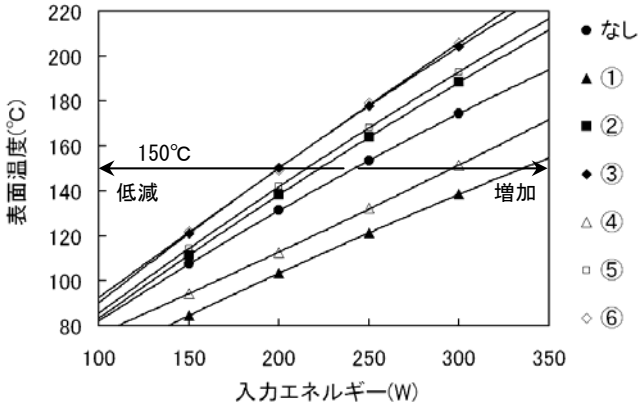


図 6　金型周囲の断熱効果

表 6　金型周囲の断熱効果の比較

	なし	①	②	③	④	⑤
入力(W)	242	335	223	200	296	216
削減(W)	－	+93	−19	−42	+54	−26
削減率(%)	－	+38	−8	−17	+22	−11

比較条件：表面温度 150℃
断熱材の厚さ：10㎜

解析結果を図 6 に示す。周囲に断熱材を用いない構造の結果を比較のため示した。まず，耐熱仕様の断熱材(①)であるが，周囲に断熱材を用いない金型に比べ，加熱に多くのエネルギーを必要とする。これは，断熱材の断熱効果より断熱材設置に伴う表面積増加による熱損失が大きくなったことに起因しており，断熱材の使用が必ずしも熱損失を低減しないことを示している。高断熱仕様(②)，シリカ断熱材(③)については熱損失低減の効果はあり，金型表面温度 150℃時の入力エネルギーでそれぞれ約 19W，42W の低減効果が見られる。以上の検討から，金型の周囲に使用する断熱材にとって，熱伝導率は重要であることがわかった。

次に表面状態の比較についてであるが，断熱性能が低い場合(①→④)では，放射率を小さくすることによる熱損失低減の効果が見られる。輻射による熱損失は熱流出面の表面温度と周囲環境温度の 4 乗の差に比例し，断熱性能の低い断熱材ほど表面温度が高くなるため，輻射による熱損失は大きい。そのため，同様の表面状態であっても，断熱性能が低い仕様の方が，放射率を下げた効果が現れている。高断熱仕様(②→⑤)では，若干放射低減の効果は見られるものの，耐熱仕様ほどの効果はなく，シリカ断熱材(③→⑥)の場合は，ほとんど効果がない。150℃加熱時における比較結果を表 6 にまとめた。なお，⑥の結果については③とほぼ同じであるため省略する。最も有効な③の対策により約 17%の入力エネルギー削減が予測される。

3.　ブロー成形金型の設計

ブロー成形金型を図 7 に示す。まず，これまでの経験により設計した金型（以下従来設計）について，シミュレーション上で性能を確認した。それを基に，2 章の断熱技術と前報[1)]の均熱技術を応用した高断熱・均熱金型を設計し，性能比較を行った。断熱方式によって最適な熱源配置は変わるため，最初に断熱設計を行った

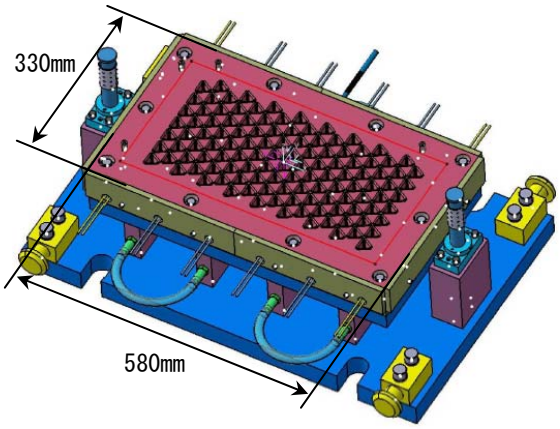


図 7　ブロー成形金型

後，均熱化の検討を行った。

3.1　従来仕様金型の性能評価

ブロー成形金型の使用温度は 450℃である。よって，表面平均温度が 450℃の状態で，必要な入力エネルギーと表面の温度分布を調べた。

表 7　従来設計の金型の仕様

熱 源	500W×12 本

部　品	材　質
ダイス	NAC55
ボルト	S45C
ワッシャ	S45C

断熱材	耐熱温度 (℃)	熱伝導率 (W/m・K)	厚さ (mm)
プレス機断熱材	700	0.3	15
周囲断熱材	700	0.3	10

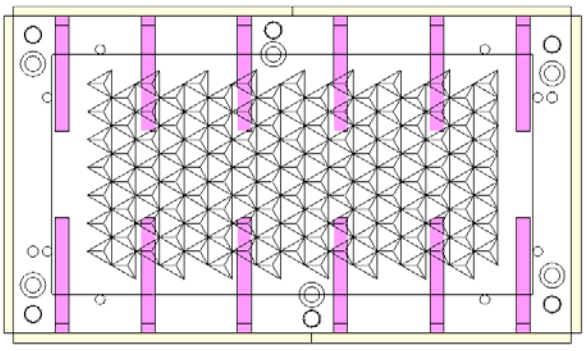


図 8　従来設計によるヒータ位置

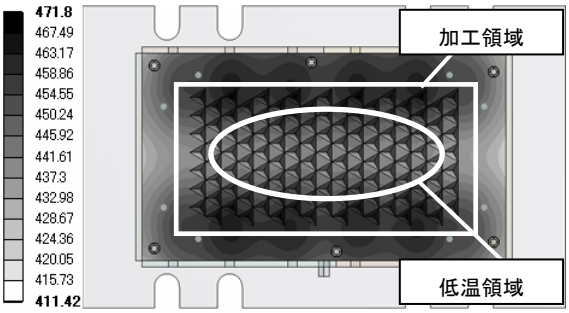


図 9　従来設計金型解析結果

従来設計金型の仕様を表 7 に，ヒータ配置を図 8 に示す。450℃の加熱を想定し，2 章で検討した断熱板以上の耐熱性能をもつ断熱板を選定してある。ヒータ配置は加工領域で均等な間隔で配置してある。また，放射率については加熱時の金型表面の酸化を考慮し 0.95 とした。

この仕様におけるシミュレーション結果を図 9 に示す。金型表面の温度差は大きく，加工部中央に温度が低い領域ができると予測される。加工領域内の温度差は約 28℃，加熱に必要なエネルギーは 8.19kW である。

3.2　高断熱・均熱金型の設計

3.2.1　高断熱設計

2 章で検討した各対策を用いて高断熱仕様の金型を設計した。併せて，断熱性能は高いが耐熱温度が低いために 450℃の条件では使用できない断熱材について活用を検討した。具体的には，2 枚の断熱板を重ねて複層での使用を検討した。それぞれの断熱板について耐熱温度を超えていないかシミュレーションで確認し，最適な断熱材の組み合わせを採用した。

表 8　変更した金型の仕様

部　品	材　質
ボルト（ヒータ板 - ベース）	SUS316
ワッシャ（ヒータ板 - ベース）	SUS316

プレス機断熱材	耐熱温度 (℃)	熱伝導率 (W/m・K)	厚さ (mm)
ヒータ板側	700	0.3	5
ベース側	400	0.08	10

表 8 に従来設計から高断熱設計へ変更した仕様を示す。また，従来設計では NAC55 材の酸化による金型表面の放射率が大きく，金型の温度が高温であることから輻射による熱損失が大きくなることが懸念される。この対策として，酸化しにくく放射率が小さい硬質 Cr を表面にメッキすることにし，放射率を 0.13 と設定した。この仕様にて金型表面を 450℃に加熱したときの入力エネルギーは 3.50kW であり，従来設計に比べ約 57%の削減が予測される。

3.2.2　均熱金型の設計

3.2.1 節で設計した断熱仕様にて，汎用の棒状ヒータを用いた均熱設計を試みた。ヒータの移動は従来位置での加熱温度分布を基に①各ヒータ単独での加熱効果により，配置した真上の位置がそれぞれ温度分布のピークとなる②ヒータとヒータの間は温度勾配が 0 となり，熱流の移動はないという 2 点を方針とし，ヒータ位置を調整した。均熱配置されたヒータ位置を図 10 に，加熱したときの表面温度分布を図 11 に示す。比較のため従来配置の温度分布を併せて示した。従来設計に比べ，均熱設計した金型の温度は均一になっており，加工領域の温度差は 28℃から 14℃に減っている。このように，形状の自由度が少ない棒状ヒータでも，適切な配置とすることで均熱設計が可能であると予測される。また，ヒータの配置については，従来設計からの変更はわずかであるにもかかわらず温度分布には大きな違いがあることから，熱源配置の検討は必要であることがわかった。

3.3　ブロー成形金型の試作

シミュレーションによる結果を検証するため，従来設計と高断熱・均熱設計の金型を試作し，温度分布および入力エネルギーの測定を行った。試作した金型を図 12 に示す。

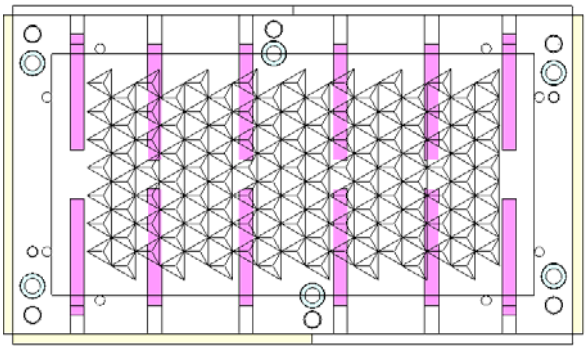
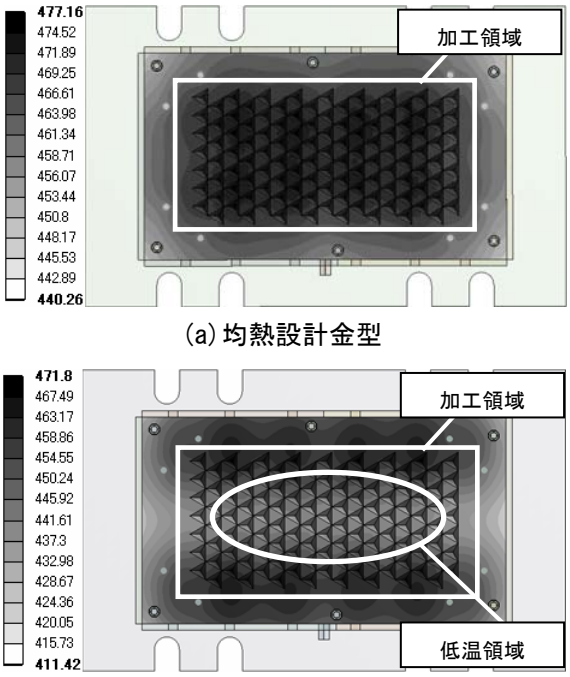


図 10　均熱設計によるヒータ配置



(a) 均熱設計金型

(b) 従来設計金型

図 11　シミュレーションによる温度予測結果

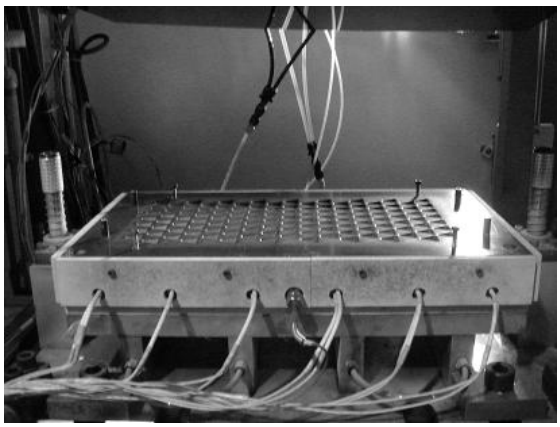


図 12　試作したブロー成形金型

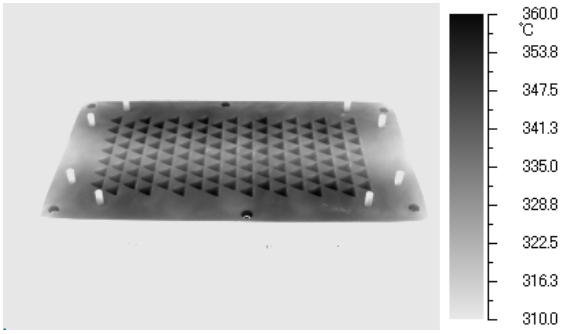
表 9　温度分布測定条件

設　計	金型表面	放射率	350℃	450℃
従来	黒体	0.95	①	－
高断熱 均熱	黒体	0.95	②	③

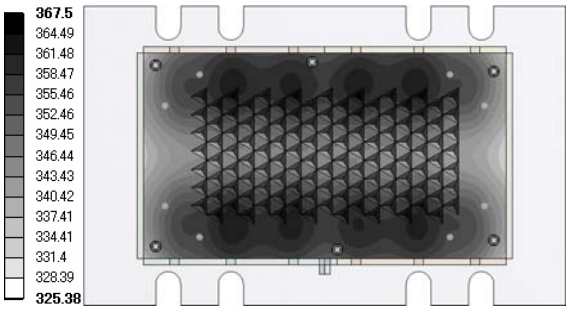
3.3.1　温度分布の測定

金型表面全体の温度分布を把握するには，赤外線計測による熱画像測定が有効である。ただし，赤外線を温度に変換する場合，温度測定値は変換に使用する放射率の設定値に依存する。精度よく温度測定を行うには，測定面の放射率が一定であること，放射率が十分に大きいことが必要である。NAC55 材の酸化表面は，放射率の大きさは測定に十分であるが場所によるムラが大きく，測定に与える影響が大きい。また，Cr メッキ面は放射率が小さく，表面の反射等で測定誤差が発生してしまう。そこで，金型表面を黒体スプレーで放射率を 0.95 に固定して，各設計の表面温度の違いを熱画像により測定した。熱画像測定にはアビオニクス社製 TVS-500EX を用いた。温度分布測定条件を表 9 に示す。従来設計の金型ではヒータ出力を最大にしても 350℃までしか昇温できなかったため，350℃と加工温度である 450℃の 2 条件で測定した。

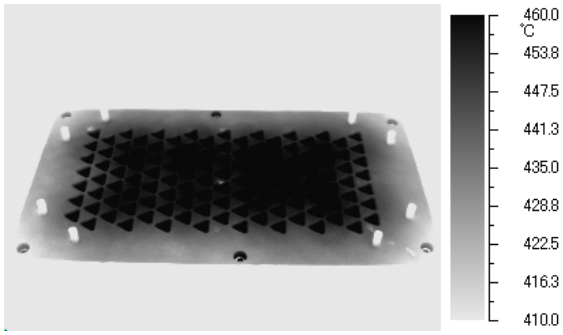
熱画像測定の結果を図 13 に示す。シミュレーションにより予測したとおり，従来設計では加工領域の温度に差が大きいことが確認できる。従来設計と同様，均熱設計による金型においても，ミュレーションにより予測したとおり熱源配置による均熱化が確認できた。350℃での温度差は，従来設計金型で 28℃，均熱設計金型で 11℃であった。また，設計温度である 450℃加熱時の温度差は，シミュレーションで 14℃，実測値で 18℃とほぼ予測したとおりであった。以上から，本手法による均熱手法が有効であることを示した。



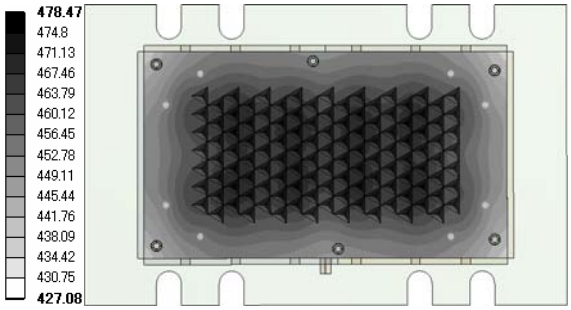
(a) 測定条件①　実測結果
（従来設計　金型表面黒体　350℃）



(b) 測定条件①　シミュレーション予測
（従来設計　金型表面黒体　350℃）



(c) 測定条件③　実測結果
（高断熱・均熱設計　金型表面黒体　450℃）



(d) 測定条件③　シミュレーション予測
（高断熱・均熱設計　金型表面黒体　450℃）

図 13　温度分布測定

表 10　入力エネルギー測定条件

設　計	金型表面	放射率	350℃	450℃
従来	NAC55	0.95	①	③
高断熱均熱	Cr メッキ	0.13	②	④

表 11　入力エネルギー測定結果まとめ

条件	実測値		シミュレーション	
	入力 (kW)	削減率 (%)	入力 (kW)	削減率 (%)
①	5.68	0	5.50	0
②	2.62	-54	2.31	-58
③	―	―	8.19	0
④	4.01	―	3.50	-57

3.3.2　断熱性能比較

次に各条件における入力エネルギーの比較を行った。表 10 に入力エネルギーの測定条件を表 11 に測定結果のまとめを示す。削減率は，従来設計から高断熱・均熱設計への変更において，同じ温度条件での比較とした。実測した 350℃加熱時の結果から，54%のエネルギーを削減できたことがわかる。また，シミュレーションの結果から，450℃加熱時でも 50%以上のエネルギー削減が期待できる。これより，本研究で行った断熱設計の有効性を示した。実験とシミュレーションの入力エネルギーを比較すると，高断熱・均熱仕様における実測値が若干大きい。これは，表面形状の凹部 Cr メッキの均一性および加熱中の表面の酸化等の影響で，シミュレーションで設定した条件に比べ放射率が大きくなったことによると考えられる。こうした点を考慮すれば十分な解析精度である。

4. 結　　言

(1) プレス機への熱損失はボルトを含めた締結部からの割合が大きい。熱伝導率の小さい材料への置換が有効な断熱対策となる。

(2) 周囲雰囲気への断熱は，断熱材設置に伴い面積が増加するため，断熱特性の検討が重要となる。断熱性能の高くない断熱材を使用することにより，表面積が大きく増加する場合には，断熱材未使用時より熱損失が大きくなる可能性がある。

(3) シミュレーションを活用し，汎用の棒状ヒータによる均熱手法を確立した。実証試験により，350℃加熱時に従来設計で約 28℃あった温度差を約 11℃に抑えることができた。また，金型設計温度である 450℃においても，温度差を 18℃に抑えることができた。

(4) シミュレーションによる断熱手法を確立した。同じ温度に加熱する際のエネルギーを従来設計に比べ 1/2 以下に抑えることができた。

参考文献

1) 本田崇，田村信，須藤貴裕，“金型均熱化技術の開発”，工業技術研究報告書，37，2008，p68-75.

2) J. R. ホールマン，“伝熱工学”，丸善，1982.