

冷却水路を内蔵した粉体造形金型による 射出成形の冷却促進と高精度化 (第2報) *

— 冷却水の温度格差の効果 —

香川博之** 米山 猛** 伊藤 強*** 伊藤豊次+ 岩根昭裕+
稲城正高+ 瀧野孔延++ 楊 青++

Effective Cooling and Accuracy Improvement in Injection Molding Using a Metal Mold with Cooling Channels Composed by Laser Sintering (2nd Report) - Effect of the Temperature Differences in the Cooling Water -

Hiroyuki KAGAWA, Takeshi YONEYAMA, Tsuyoshi ITO, Toyotsugu ITO, Akihiro IWANE,
Masataka INAGI, Yorinobu TAKINO and Chin YAN

An injection mold with inside cooling water channels which are difficult to be made by conventional machining method has been fabricated by using selective laser sintering of metal powders. By the cooling inside the corner of the core, the temperature difference in the mold is reduced and then the dimension accuracy of the work piece is improved compared with the work piece injected in the mold with outside cooling channels. When the water temperature of the inside channel in the core is assigned lower than that of outside channel in the cavity, the temperature distribution in the mold becomes more uniform and the dimension accuracy of the work piece has been further improved. After the experiment, the structure of the sintered mold and its thermal conductivity has been measured to consider on the relation with temperature distribution in the mold. In order to achieve the uniform temperature distribution in the mold, adequate channels location will be necessary in relation with the thermal conductivity of the mold.

Key words: injection molding, cooling, temperature, accuracy, selective laser sintering

1. 結 言

近年、ラピッドプロトタイピングの手法の一つとして金属粉体のレーザー焼結造形法が発展し、これによって任意の経路をもつ冷却水路を配置した射出成形用金型の製作が可能になってきた¹⁾。第1報²⁾では、このレーザー焼結造形法により金型を試作し、実際に射出成形実験を行って、その有用性について検討を行った。コア内部に冷却水路の経路を成形表面に近い位置に配置したコア用金型(高冷却コア)と、従来型の金型とみなせるように冷却水路をコア内部に配置せずコア底部のみ水路を持つコア用金型(低冷却コア)を製作し、水温一定条件のもとで成形品の形状精度(ソリ変形量)と金型温度を実験的に調べることによって、冷却水路を導入した新しい金型すなわち高冷却コアの冷却効率が高いこと、およびこれによって精度の高い成形品が得られることを示した。

射出成形品の加工精度を向上させるためには、樹脂の温度を均一に保ちながら冷却させる必要がある³⁾。冷却水路の位置や形状、その数、および冷却水の温度や流量を調整することによって最適な冷却条件を作り出すことができるものと考えられる。本報では前報で製作した金型を用いて、冷却水の温度に格差をつけた効果や流量の影響について検討する。高冷却コアと低冷却コアの2種類の金型を用いて射出成形実験を行って、コア内水路とキャビティ内水路それぞれの水温および流量を変化させたときにソリ変形量や金型温度がどの程度影響を受けるかについて調べる。

2. 射出成形実験

2.1 実験方法および実験条件

- * 原稿受付 平成14年1月10日
- ** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2丁目40番20号)
- *** 学生会員 金沢大学大学院
- + 正会員 コニカ(株)(東京都八王子市石川町2970)
- ++ (株)松井製作所(枚方市招堤田近2-19)

形状精度を検討するための成形品の寸法は、外形寸法で縦100mm、横60mm、高さ30mm、底面の肉厚2mm、側面の肉厚1.5mmの箱形状とした。射出金型は、EOS社製のSelective Laser Sinteringにより、ニッケルブロンズ粉体をレーザー焼結して造形した。水路の直径は6mmとし、金型内部の成形品コーナー部表面に近い位置(水管外壁とコア内面の距離が4mm)に冷却水路を配置した「高冷却コア」(図1)と、従来型の金型とみなせるように冷却水路をコア内部に配置せずコア底部のみ水路を持つ「低冷却コア」(図2)の2種類を製作した。キャビティの水路は図3のようにキャビティを取り囲む

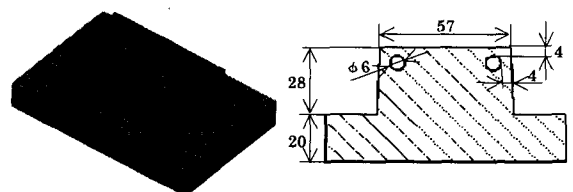


Fig.1 High cooling core

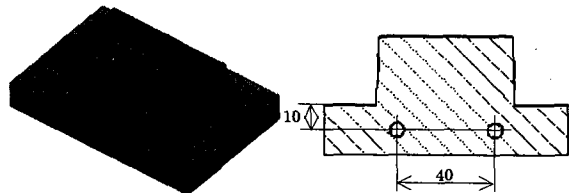


Fig.2 Low cooling core

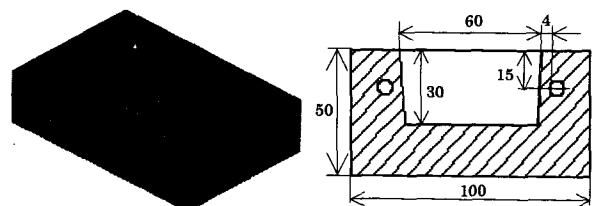
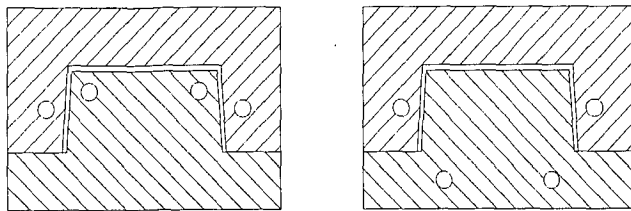
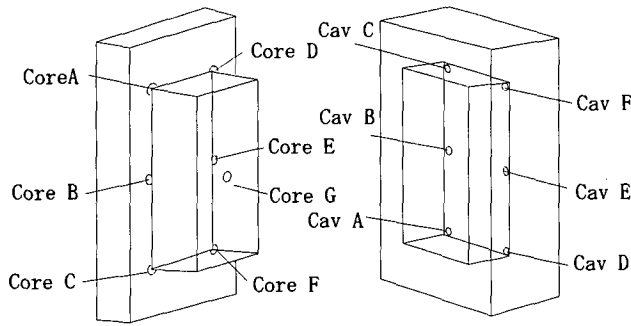


Fig.3 Common cavity



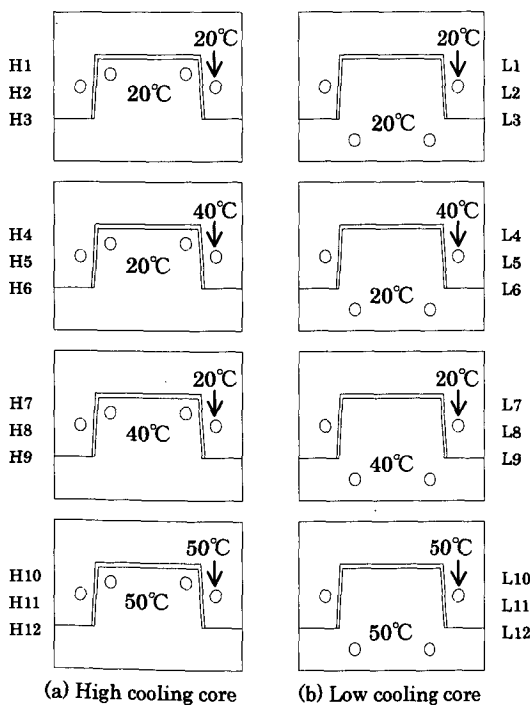
(a) High cooling core set (b) Low cooling core set
Fig. 4 Cross section of the molds



(a) Core (b) Cavity
Fig. 5 Positions of the temperature measurement

Table 1 Experimental condition

High cooling Exp. No.	Low cooling Exp. No.	Water temperature (°C)		Flow rate (L/min)
		Cavity	Core	
H1	L1	20	20	5.5
H2	L2	20	20	2.7
H3	L3	20	20	1.4
H4	L4	40	20	5.5
H5	L5	40	20	2.7
H6	L6	40	20	1.4
H7	L7	20	40	5.5
H8	L8	20	40	2.7
H9	L9	20	40	1.4
H10	L10	50	50	5.5
H11	L11	50	50	2.7
H12	L12	50	50	1.4



(a) High cooling core (b) Low cooling core
Fig. 6 Cooling condition

経路とした。キャビティは共通とし、図4に示すように各コアと組み合わせ使用した。金型には図5に示す各位置に温度センサを取り付け、金型表面から0.5mmの深さの温度を計測した。ここで、コアGはコア上面の中心で、ゲートからの樹脂が当たる正面の部分である。コアAからFは成形品側面の縁の端面にあたり、キャビA~Fはキャビティ底面の隅部で成形品コーナー部外側にあたる。

射出する樹脂にはポリスチレンを用いた。成形は、射出圧67MPa、保圧55MPa、保圧時間1s、シリンダ温度180~189°Cとし、1ショットあたりの成形サイクルを約30sとした。高冷却コア（実験番号H1~12）および低冷却コア（実験番号L1~12）について、表1に示すように冷却水の温度および流量を変化させて、それぞれ20ショットずつ射出実験を行い、上述の温度センサで金型表面の温度変化を測定した。金型内部の冷却水の影響について検討するために、冷却水温度については、図6に示すようにコア側とキャビティ側の温度が20°Cで同一の場合を基本に、キャビティに対してコア内の温度をより効果的に下げることが期待して、コア水温をキャビティ水温より下げた場合（コア20°C、キャビティ40°C）、逆にコア内部の温度が高くなって温度不均一がより拡大されることを想定して、コア水温をキャビティ水温より上げた場合（コア40°C、キャビティ20°C）、さらにコア水温とキャビティ水温が両方とも高い場合（コア50°C、キャビティ50°C）を設定した。冷却水の流量については、経験的に通常用いられる5.5L/minを基本に、その半分の2.7L/min、さらに半分の1.4L/minとした。これは、流量を絞っていくとどのあたりで形状精度が落ちる限界となるかを見ようとしたものである。つまり、冷却水路の配置によって、流量をこれだけ絞っても効果があるという目安を得ることを目的とした。

射出成形後、図7に示すように成形品の開口部長手方向中央のソリ量を3次元測定機を用いて計測した。

2. 2 実験結果

2. 2. 1 成形品のソリ量

高冷却コアおよび低冷却コアを用いた実験により得られた成形品のソリ量のうち、ショットNo.1, 5, 10, 15, 20について図8に示す。

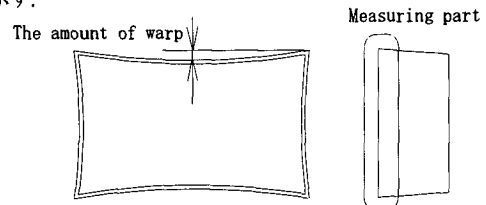
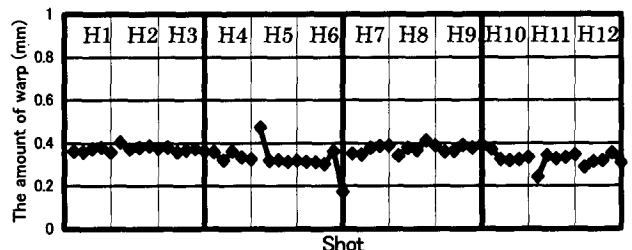
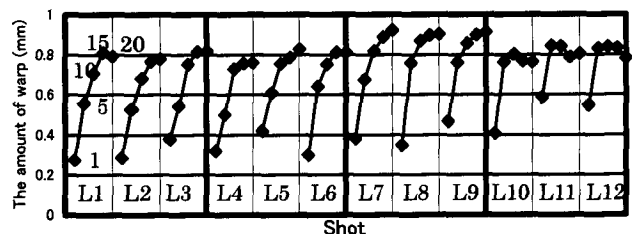


Fig. 7 Measurement of the amount of warp



(a) High cooling core set



(b) Low cooling core set

Fig. 8 The amount of warp

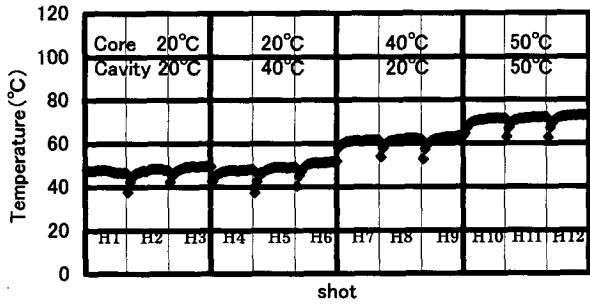
図8 (a) より、高冷却コアの場合には、ショットの最初からソリ量が安定していることがわかる。安定したソリ量は低冷却コアに比べて半分程度に減少した。冷却水温度がキャビティで40℃、コアで20℃である場合 (H4~6) が最も小さくなり、ついでキャビティ・コアともに50℃である場合 (H10~12) のソリ量が小さくなった。

図8 (b) より、低冷却コアの場合には、ショット数の増加にともなってソリ量が徐々に増加し、ある一定値に収束 (安定) していく様子がわかる。冷却水温度がキャビティおよびコアともに50℃と高温である場合 (L10~12) には5ショット程度でソリ量がほぼ安定しているが、その他の場合には20ショットでもまだ安定していない。また、冷却水温度がキャビティで20℃、コアで40℃である場合 (L7~

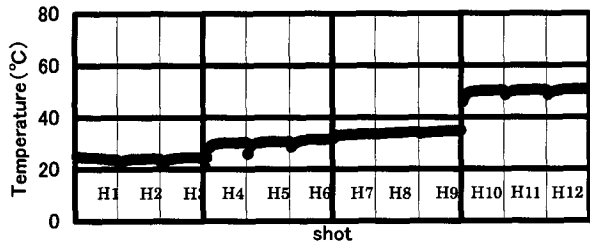
9) のソリ量が最も大きくなった。なお、本研究で行った実験の範囲では、高冷却コアおよび低冷却コアともに冷却水流量の変化の影響はほとんど見られなかった。

2. 2. 2 金型の温度変化

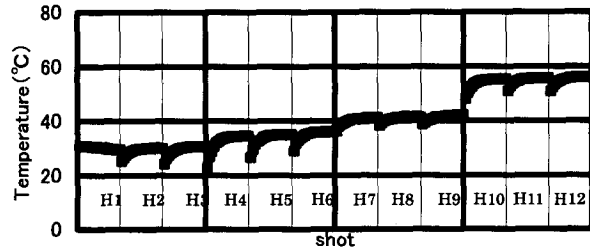
成形精度に影響すると考えられる、型開きを行う時 (射出から20秒後) における金型温度を検討する。高冷却コアおよび低冷却コアを用いた場合について、ショットごとの温度推移をそれぞれ図9および10に示す。ここではコアG, A, BおよびキャビティA, Bについて示した。コアCおよびキャビティCは、それぞれコアAおよびキャビティAとほぼ同様であった。また、コアE, D, Fおよびキャビ



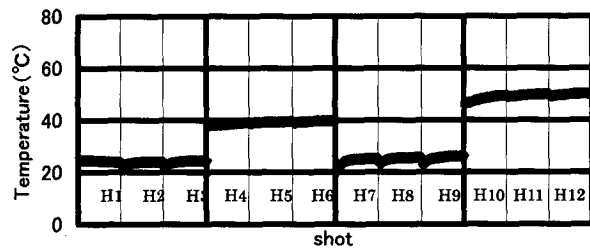
(a) Core G



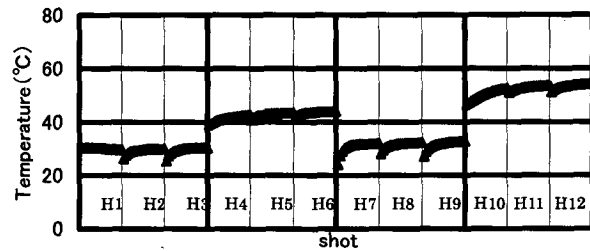
(b) Core A



(c) Core B

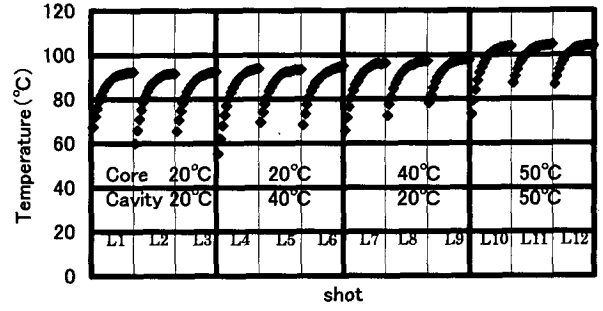


(d) Cavity A

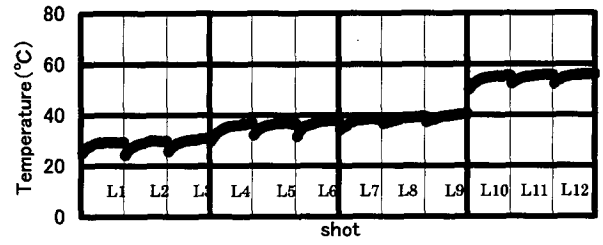


(e) Cavity B

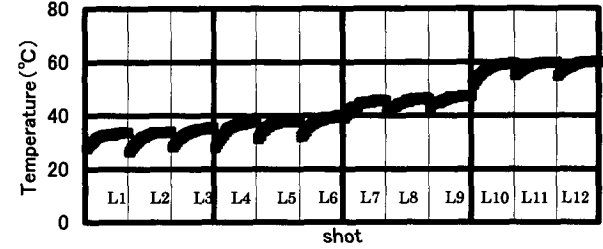
Fig.9 Temperature transition at the time of 20s after the start of the shot in High cooling core set



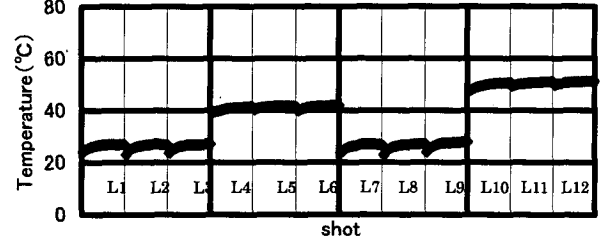
(a) Core G



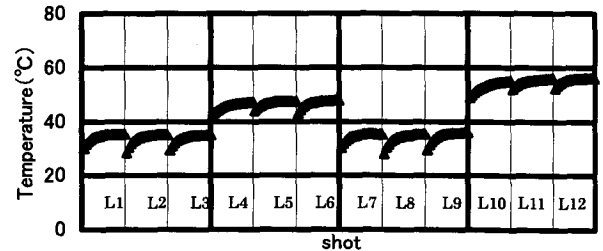
(b) Core A



(c) Core B



(d) Cavity A



(e) Cavity B

Fig.10 Temperature transition at the time of 20s after the start of the shot in low cooling core set

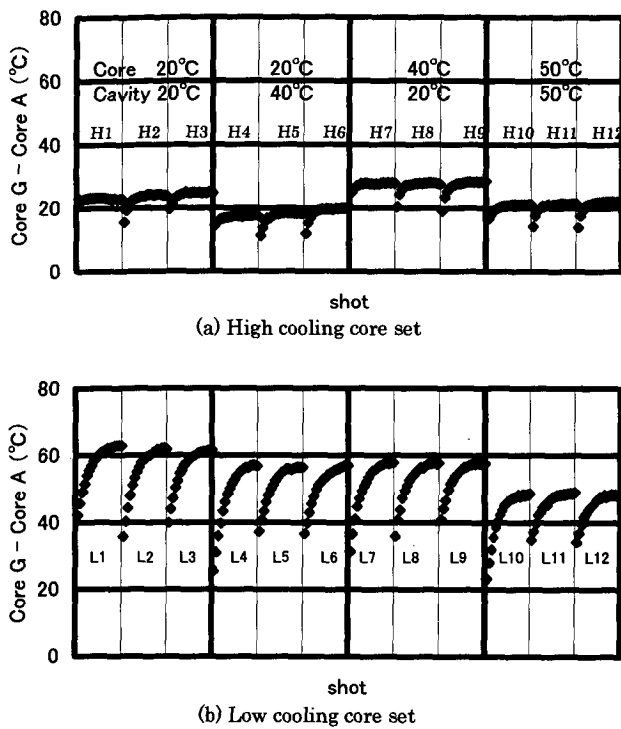


Fig.11 Difference of temperature transition between Core G and A at the time of 20s after the start of the shot

ティ E, D, F の結果についても、それぞれ A, B, C の結果とほぼ等しいために省略した。

図より、低冷却コアよりも高冷却コアの方が全般的に温度が低く、冷却効率がよいことがわかる。また、低冷却コアでは、各条件ともショットに従い徐々に温度が上昇し安定するまでに10ショット以上かかっているのに対して、高冷却コアでは、5ショット程度で温度が安定していることがわかる。これは前述したソリ量の安定化の様相に対応している。

高冷却コアセットでは、コア水温 20°C に対し、キャビティ水温を 40°C にすると図 9(d)(e) のようにキャビティ A, B の温度が上昇している。一方、キャビティ水温 20°C に対してコア水温を 40°C に上げると、(a), (b), (c) のようにコア G, A, B の温度が上昇している。コア水温、キャビティ水温ともに 50°C にした場合には、すべての温度が上昇している。低冷却コアセットでは、コア A, B やキャビティ A, B の温度は水温の変化とともに変化しているが、コア上面のコア G の温度が格段に高い。

ソリ量は型開き時の樹脂温度の不均一性により生じるものと考えられる。図 11 に、その不均一さに影響を与える金型温度の不均一さの目安として、コアの中央でゲートに最も近い位置にあるコア G と成形品の最外端でゲートから最も遠い位置にあるコア A の温度差の変化を示す。これより、低冷却コアよりも高冷却コアの方が金型内の温度差が小さく、しかも安定するまでのショット数も少ないことがわかる。また、高冷却コアでは、冷却水温度がキャビティで 40°C、コアで 20°C である場合 (H4~6) の温度差が最も小さく、ついでキャビティ・コアともに 50°C である場合 (H10~12) の温度差が小さくなる。これはソリ量変化と定性的によく一致している。

2. 2. 3 金型内の温度差

冷却水路の位置および水温が金型表面温度に及ぼす影響について理解するために、各実験条件で最も温度が安定していると考えられる流量 5.5L/min の 20 ショット目 (ショット開始後 20 秒の H1, L1, H4, L4, H7, L7, H10, L10) におけるコア G, コア B, およびキャビティ B の温度を模式的に図 12 に示す。

高冷却コアにおいては、水温をコアおよびキャビティともに 20°C

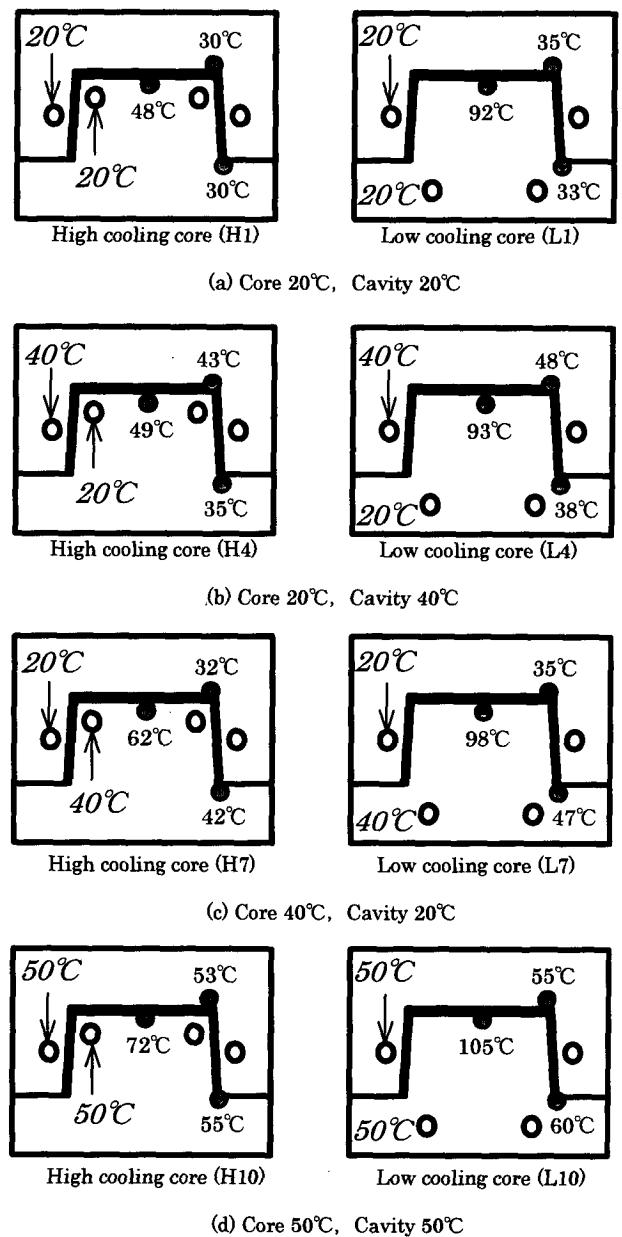


Fig.12 Comparison of mold temperatures

とした場合 (H1) と比べて、キャビティの水温を 40°C に上げた場合 (H4)、成形体外側および縁部にあるキャビティ B およびコア B の温度が上昇して、コア G との温度差が縮まり、成形体内側の温度との差が小さくなる。成形品のコーナー部において内側には熱がたまりやすいため効果的に冷却水路をコーナー内側に配置したわけだが、コア側温度を低くし、キャビティ側温度を高くすることでコーナー部の内側と外側の温度差を小さくできることがわかる。ただ、冷却水の温度が 20°C であるにもかかわらずコア中心部 (コア G) の温度が 50°C 程度と高いのはエポキシを含浸した粉体焼結金型の熱伝導率が低いためであろう。また、コア側水温をキャビティ側水温より 20°C 低くしたにもかかわらず、コアの上部 (コア G) と底部 (コア A, コア B) との温度差が 20°C までにしか縮まらなかったのは、さらに配管位置をより工夫する必要があることを示している。逆に水温をコア 40°C およびキャビティ 20°C とした場合、コア G およびコア B の温度がともに上昇し、コア G とキャビティ B との温度差が大きくなる。水温をコアおよびキャビティともに 50°C とした場合、全体に温度が高くなりコア G とコア B との温度差は、水温がともに 20°C の場合と同じぐらいである。このようにコア内水温を低くしキャビティ側水温を上

げることによって金型温度を均一化し、成形体のソリ量を一層小さくすることができたが、より均一化するためには水路の配置や数などを工夫する必要があると考えられる。

低冷却コアにおいては、コア内水路の位置が成形体縁部に近いためコア上面に対しては影響が小さいが、コア側水温の変化が成形体縁部にあたるコア A およびコア B の温度に影響を与えている。冷却水温度をいろいろ変化させてもコア上面（コア G）の温度があまり変化しないのに対して、キャビティ水温を上げれば成形体コーナーの外側にあたるキャビティ B の温度が上昇し、コア水温を上げれば成形体縁部にあたるコア B の温度が上昇している。したがって、コア水温およびキャビティ水温をともに 50℃に上げたときに、コア G とキャビティ B およびコア B の温度差が小さくなっている。これがこの条件でソリ量が小さくなった理由であると考えられる。このように低冷却コアのようにコア内部に冷却水路をもたない金型では冷却水温度を変化させてもコア上部やコーナー部の温度に影響を与えることができず、成形時に熱流入が集中して温度が高くなるコーナー内部やコア上面との温度差を縮めるためには、周囲の水温を上げるという対処を取らざるを得なくなる。この場合でもコア上部と底部の温度差は大きく、ソリ量は高冷却金型に比べると非常に大きい。

なお、本研究で行った実験の範囲では、ソリ量変化と同様に金型温度に対する冷却水流量の変化の影響はほとんど見られなかった。このことは、本実験で行った最小流量でも冷却水管表面の熱伝達率が十分な値を有していることを示唆している。

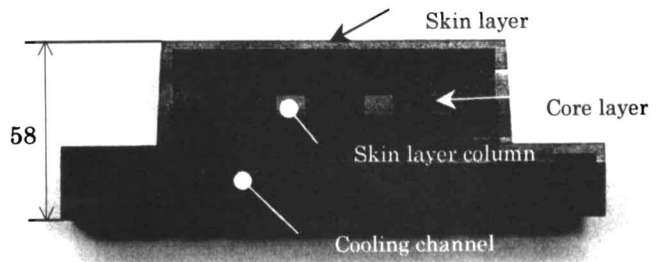
3. 粉体造形金型の内部構造と熱伝導率

冷却構造金型においてキャビティ側水温に比べてコア内水温を下げることで、コア側とキャビ側の温度差を縮めることができた。それによって、成形品のソリ量も改善することができた。しかし、水温に格差をつけても、依然として金型内の温度差（コア G—コア A）は 20℃程度あり、ソリ量を格段に縮めるほどの効果は得られなかった。この原因には造形したニッケルブロンズ製粉体金型材の熱伝導率と冷却水路配置の問題とがあると考えられる。このうち冷却水路配置については、配置位置、配管数などについて温度解析などを行いながら、より最適な構造について検討していく必要がある。ここでは粉体金型材の内部構造と熱伝導率について検討する。

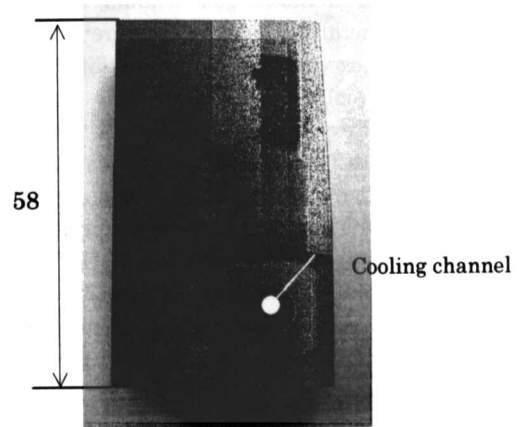
粉体造形金型材の内部構造を把握するため実験に使用した金型の断面をカットして観察した。低冷却コアの断面を図 13 に示す。レーザ造形した層は、レーザ照射密度が高く造形密度の高いスキン層と、レーザ照射密度が低く造形密度の低いコア層とからなる。造形体の表面層や冷却水路の周囲はスキン層で構成され、その内部はコア層で構成されている。また、造形体全体の強度を保つようにコア内に補強支柱の役割を果たすスキン層の柱を縦横に配置した（図(a)や(c)の矩形断面の見える部分）。冷却水路の部分は円管部の上部に若干のだれがみられるほかはスムーズな円形の孔が造形され、水路が曲がる部分も問題なく造形されていることがわかる。一方、スキン層とコア層からそれぞれサンプルをとって熱伝導率を測定したところ、スキン層で 11.7W/mK、コア層で 3.39W/mK であった。これは金型鋼（NAK80）の熱伝導率 39W/mK に比べて低く、コア層の熱伝導率は特に低い。このように粉体造形した金型材の熱伝導率が低いためにコア内の温度差が大きく現れたものと考えられる。冷却水路の最適化をはかるためには、金型材の熱伝導率の影響も考慮していくことが必要になる。

4. 結 言

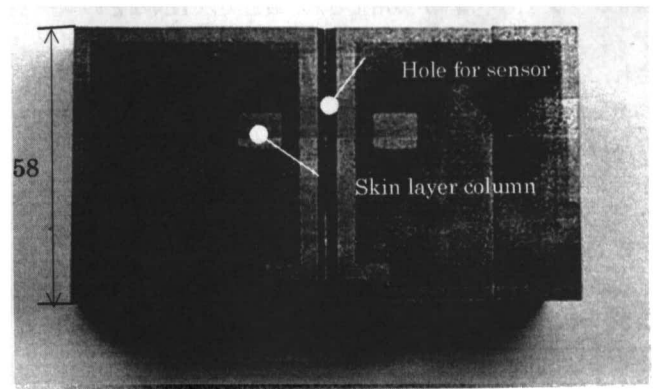
本研究では、第 1 報²⁾で報告した冷却金型において、金型コア内水路の水温とキャビティ内水路の水温を変化させて、成形品の形状精度（ソリ変形）に与える効果についてしらべた。金型コア側の水温をキャビティ側水温よりも低くすることで、金型温度分布が均一化し、成形品の形状精度が向上することがわかった。



(a) Longitudinal cross section of cooling channel



(b) Cross section of cooling channel



(c) Cross section of temperature sensor part Core G

Fig.13 Internal structure of the sintered low cooling core

今後、金型強度の向上と熱伝導率の改善をはかるために、鉄系粉体で金型を製作し射出成形実験を行う。また、数値解析を利用した最適な水路配置の検討を行い、より実際の金型設計法について研究を進める。

研究を進めるにあたり、金型製作において（株）北星の川田五市氏にお世話になった。また、射出成形実験は富山県金型協同組合で行い、同組合の堀口貢氏にお世話になった。本研究に対し、金型技術振興財団より助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) 榑原弘之, ラビッドプロトタイプング技術の現状, 精密工学会誌, Vol.67, No.3, 2001, 403.
- 2) 米山猛, 他 7 名, 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 1 報), 精密工学会誌, Vol.67, No.12, 2001, 1991.
- 3) 浜田修, コストダウンのための金型温度制御, 1995, シグマ出版.