

## 技術資料

## Technical Data

# 分流子の熱伝導率とその温度とビスケット部の凝固組織におよぼす影響

河野正道<sup>\*1</sup>, 達谷正勝<sup>\*2</sup>

## Influence of Thermal Conductivity of a Sprue Core on Its Temperature and on the Solidification Microstructure of a Die Cast Biscuit

Masamichi KAWANO and Masakatsu TATSUTANI

### Synopsis

The temperature of sprue cores and the microstructure of casts were investigated regarding the thermal conductivity of sprue cores. Steels were prepared in a wide range of thermal conductivities of 20 to 50 W/(m·K). Higher thermal conductivity of a sprue core leads to its maintaining a lower temperature. In the case of a 22-mm biscuit thickness, a 6-degree-Celsius decrease was obtained through a 1 W/(m·K) increase of thermal conductivity in the range of 20 to 30 W/(m·K). A sprue core with higher thermal conductivity accelerates solidification and gives a finer microstructure in the cast biscuit. In the case of a 45-mm thick biscuit, marked influence of thermal conductivity was observed in the range of 26 to 40 W/(m·K). A 9-degree-Celsius decrease was obtained through a 1-W/(m·K) increase in thermal conductivity. It could be assumed that the influence of thermal conductivity is enhanced by the large heat capacity of molten aluminum alloy.

## 1. 緒言

複雑形状品の高効率生産に適し、鋳造品のリサイクル性にも優れたアルミニウムダイカストは、自動車部品の製造に広く用いられてきた。ダイカストの年間国内生産量およそ100万トンのうち、80%以上が自動車向けである<sup>1)</sup>。自動車の電動化と更なる軽量化<sup>2)</sup>に対しても、ダイカストは重要な役割を果たすと考えられる。

自動車の進化を支えるため、ダイカストの要素技術には多くの改良が加えられてきた。例えば、装置や鋳造方案<sup>1)</sup>、離型剤<sup>3)</sup>、金型用鋼<sup>4)</sup>や焼入れ<sup>5)</sup>、表面改質<sup>6)</sup>、溶接補修<sup>7)</sup>、内部冷却<sup>8)</sup>、積層造形<sup>9)</sup>、シミュレーション<sup>10)</sup>などは大きな進歩を遂げている。本稿は、これら

の要素技術のうち金型用鋼に関するものである。

ダイカストの生産性や鋳造品質を向上させるため、金型にはさまざまな性能が要求される。ヒートチェック抑制と大割れ回避には強度と靱性の高さが必要である。また、ダイカスト金型は熱交換機の役割を果たすことから、熱伝導率の高さも必要である。高熱伝導率の金型は冷却能に優れ、速やかに低温度化して溶湯を急速凝固させる。

熱伝導率は単なる物性値ではなく、金型の重要な実用性能である。本稿では冷却能を検証するため、熱伝導率が20～50 W/(m·K)の範囲で異なる8鋼種の金型を作製し、ダイカストの金型温度や凝固組織を比較した内容について報告する。

2020年9月25日 受付

\* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 2 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

## 2. 鋼の熱伝導率におよぼす元素の影響

焼戻した鋼の熱伝導率と合金元素量の関係を Fig. 1 に示す。鋼の熱伝導率を低下させる元素は、炭素・シリコン・マンガン・クロムである（以下、それぞれ C, Si, Mn, Cr という）。バナジウムとモリブデン（以下、それぞれ Mo, V という）は熱伝導率にあまり影響しない。全体的な傾向としては、焼戻しマルテンサイト中に固溶する合金元素の種類と量の多い方が低熱伝導率である。

ダイカスト金型用鋼の熱伝導率は、金型に用いられる銅合金やタングステン合金の 100 ~ 200 W/(m·K) に対して 1/3 ~ 1/9 と低い。しかし、その低い範囲内でも 5 ~ 10 W/(m·K) の変化がダイカストの生産性や品質に大きな影響を与えるため、熱伝導率は重要である。

Fig. 1 に示した通り、各種元素を積極添加すると熱伝導率は低下する。その一方で、被削性・焼入れ性・高温強度・靱性は改善される。したがって、ダイカスト金型用鋼の開発や選定においては、熱伝導率と他特性のバランスをどう取るかが重要になる。

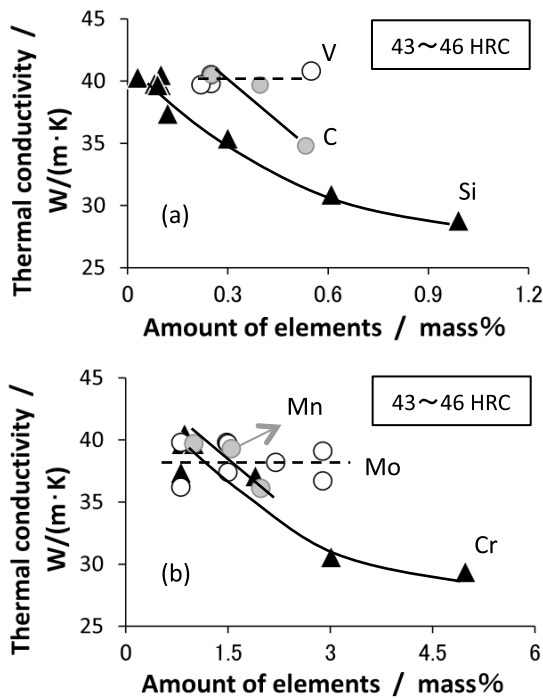


Fig. 1. Thermal conductivity at room temperature of tempered steels. (a) is on a 1.55Mn-1.5Mo-0.9Cr system and (b) is on a 0.38C-0.1Si-0.25V system.

## 3. 実験条件

### 3. 1 対象とする金型

温度を評価する金型として分流子を選定した。分流子

は铸造品の意匠部とは接触しないが、溶湯との接触時間が最も長い箇所に配置され、その冷却能がサイクルタイムや「爆ぜ」と呼ばれる不具合の発生頻度に大きく影響する重要な金型部品である。

### 3. 2 素材および調質

分流子に用いた鋼とその熱伝導率を Table 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) の 6 鋼種は、熱伝導率の広い範囲で温度や铸造組織を評価する実験に用いる。Fig. 2(b) の 3 鋼種は、ダイカスト金型に用いられる熱伝導率の範囲を対象とし、铸造品の熱容量が大きい条件で熱伝導率の影響を評価する実験用である。

Fig. 2(a) において、炭素鋼 F (Si ≤ 0.4, Mn ≤ 0.9, Cr ≤ 0.2) は 35 ~ 50 W/(m·K) の高熱伝導率、ステンレス鋼 D (1.0Si, 0.40Mn, 13.3Cr) は 20 W/(m·K) 程度の低熱伝導率である（元素量は、いずれも mass%）。鋼材特性の関係上、鋼 F や鋼 D を分流子に適用することは工業的にはない。しかし、熱伝導率の影響を広く評価する今回の実験には好適である。

Fig. 2(b) の 3 鋼種はダイカスト金型に実際に用いられ、熱伝導率は 23 ~ 41 W/(m·K) の範囲である。SKD61 対比、鋼 G と鋼 H は Si 量が大幅に低く、さらに鋼 H では Cr も大幅に減量されている。固溶する元素量が少ないことによって、これらの 2 鋼種は高い熱伝導率を実現している。

全 8 鋼種のうち、焼きがほとんど入らない鋼 F の調質は省いた。それ以外の鋼種の 100 mm 角材を真空中で 1030 °C に加熱保持後、窒素ガス噴射による急冷で焼入れた。引き続き、鋼 D 以外は 620 ~ 665 °C の焼戻しで 44.2 ~ 46.3 HRC の実用硬度に調質した。鋼 D については、熱伝導率をあえて低く保つための 300 °C 焼戻しによって 51.1 HRC となった。焼戻しが低温の場合、C や Cr が炭化物として析出しにくい。したがって、固溶元素が多く保たれ、焼入れままの状態に近い低い熱伝導率となる。

### 3. 3 ダイカスト

上記の素材から作製した分流子の外観、型組みにおける分流子の位置、铸造条件をそれぞれ Fig. 3 と Fig. 4 および Table 2 に示す。铸造には芝浦機械(株)製の型締め力 135 ton のダイカストマシンを用いた。射出された ADC12 の溶湯は、鑄巣を減らすため凝固完了まで加圧され続ける。射出と加圧はプランジャーチップが担う。分流子は加圧される溶湯を受ける役目を負う。

凝固完了後は可動型（分流子が組み込まれている側）を後退させて铸造品を取り出す。铸造品の外観は Fig. 5

Table 1. Steels applied to a sprue core.

(a) Group one	
Notation	Classification
F	Carbon steel (eutectoid composition)
C	Cr-Mo-V-structural steel
E	Cr-Mo-V-structural steel
B	High performance 5%Cr dies steel
SKD61	5%Cr dies steel for general use
D	Martensitic stainless steel
(b) Group two	
Notation	Classification
H	Cr-Mo-V-structural steel
G	High performance 5%Cr dies steel
SKD61	5%Cr dies steel for general use

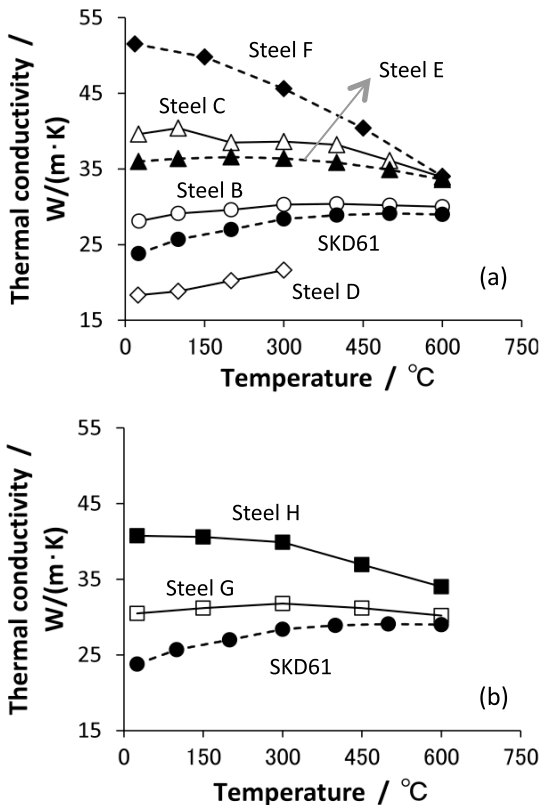


Fig. 2. Thermal conductivity of steels applied to a sprue core. (a) is group one and (b) is group two given in Table 1.

に示す通りで、プランジャーチップと分流子に挟まれていた部位 (Fig. 4) をビスケットと呼ぶ。

評価する項目は、ビスケットを受けていた分流子の面 A (Fig. 3) の温度と、分流子と接触していたビスケット (Fig. 5) 表層部の凝固組織である。これらの2項目に、分流子の熱伝導率がおよぼす影響を明らかにする。

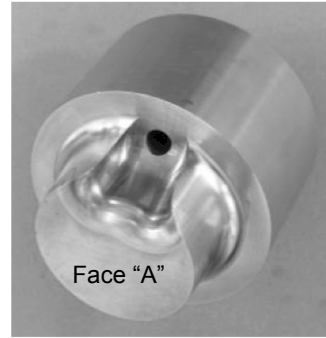


Fig. 3. Appearance of a sprue core. The dimensions are approximately 80 mm diameter by 80 mm in height. The temperature of face "A" which holds a biscuit is measured and compared in the die casting test.

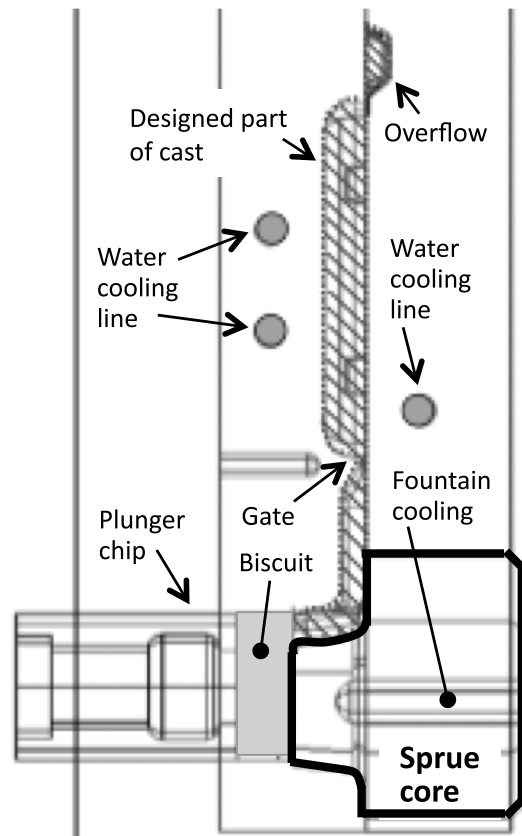


Fig. 4. Side view of a die casting apparatus. A sprue core with a built-in fountain cooling system holds a biscuit pressured by a plunger chip. The diameter of a biscuit contacting face "A" of the sprue core is 50 mm.

Table 2. Conditions of die casting. Temperature of a sprue core and microstructure of a biscuit are evaluated. For the test of group two steels, biscuit thickness is set at 45 mm and chill time is prolonged to 11 sec.

Item	Detail	
Cast Al-alloy	ADC12	
Temperature of molten Al-alloy	700 °C	
Weight of a cast	600 g	
Biscuit	Diameter	50 mm
	Thickness	22 mm
Injection velocity	Gate to cavity	54 m/sec
Time in a cast cycle (Total 29 sec)	Chill time	9 sec
	Spray	3.5 sec
	Air blow	1.5 sec
Cooling water	Die	11 L/min
	Sprue core	1.8 L/min

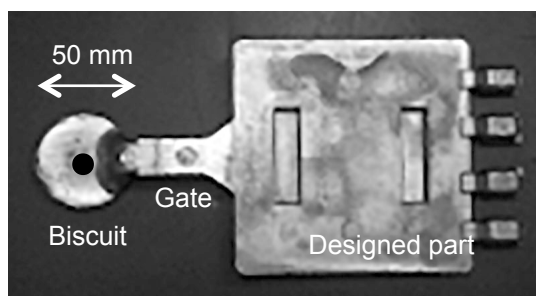


Fig. 5. Appearance of a cast weighing 600 g. The solid circle position of the biscuit corresponds to a microstructure observation portion.

## 4. 実験結果および考察

### 4. 1 分流子の温度

分流子の熱画像を Fig. 6 に示す。アングルは Fig. 3 とほぼ同じで、鋳造品を取出した2秒後に固定型側からサーモビューアで観察した様子である。図中の「+」や「×」の箇所は最高温度（“A”の表記）に該当し、その位置には鋼種による多少の違いが認められるものの、いずれもビスケットを受けていた面上にある。この最高温度部の値を図中右上に記載した。最高温度は、鋼 D (20 W/(m·K)) が 366 °C、鋼 E (36 W/(m·K)) は 303 °C、鋼 F (50 W/(m·K)) は 278 °C となった。熱伝導率は、Fig. 2 における 300 °C 以下の平均値である。分流子の温度は熱伝導率が高いほど低下した。高熱伝導率鋼は冷却能に優れている。

全6鋼種を対象として、熱伝導率と最高温度の関係を Fig. 7 に示す。30 W/(m·K) 程度までは高熱伝導率化による低温度化の効果が著しく、1 W/(m·K) あたり約 6 °C の差を生む。20 ~ 50 W/(m·K) の平均では、1 W/(m·K) の高熱伝導率化で約 3 °C 低下する。

ほとんどのダイカスト金型用鋼の熱伝導率は 23 ~ 41 W/(m·K) の範囲であり、金型用高熱伝導率合金の 1/3 ~ 1/9 に過ぎない。このため、ダイカスト金型用鋼の範疇における高熱伝導率化が鋳造におよぼす影響は小さい、との意見もある。それに対して今回の実験結果は、金型温度の制御における熱伝導率の重要性を明確に示している。

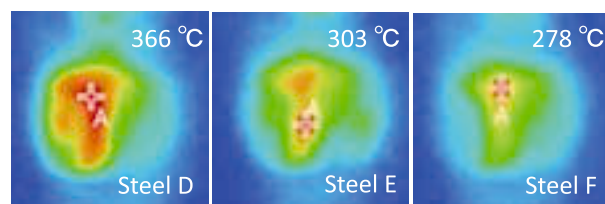


Fig. 6. Thermal images of a sprue core at 2 sec after picking out of a cast. Steels of group one were evaluated. As shown in Fig. 2(a), steel D has the lowest thermal conductivity and steel F has the highest.

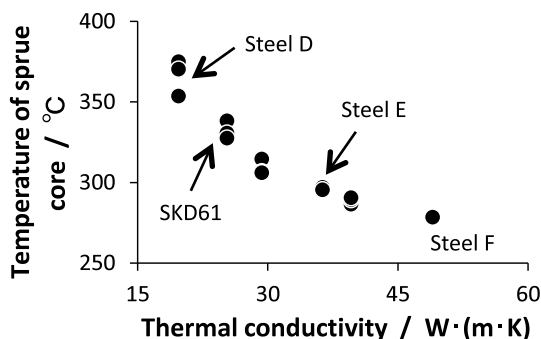


Fig. 7. Influence of thermal conductivity on temperature. Steels of group one were evaluated. Thermal conductivity is the mean value below 300 °C given in Fig. 2 (a). Higher thermal conductivity of the sprue core leads to its maintaining a lower temperature.

### 4. 2 凝固組織

分流子と接触していたビスケット表層の組織を Fig. 8 に示す。Fig. 6 と同様に、分流子は鋼 D (20 W/(m·K))、鋼 E (36 W/(m·K))、鋼 F (50 W/(m·K)) である。熱伝導率の最も高い鋼 F が分流子だった場合は、表面から深さ 300 ミクロン程度の領域が微細である。低温の分流

子との接触によって、凝固速度は大きくなったことが示唆される。分流子への高熱伝導率鋼の適用による凝固組織の微細化は、大型のダイカストマシンを用いた自動車部品の casting においても報告されている<sup>11)</sup>。

ビスケットの凝固時間が casting サイクル短縮のネックとなることも多い。低温化する高熱伝導率鋼を分流子に適用すれば、ビスケットの凝固促進によるハイサイクル化が期待できる。また、意匠面への高熱伝導率鋼の適用は、凝固組織の微細化や鑄巣の減少による鑄造品の高品位化に有効と考えられる。

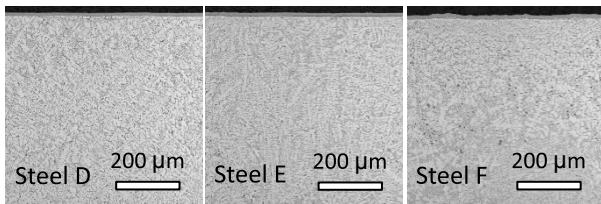


Fig. 8. Microstructure of biscuits relating to Fig. 6. The near surface is observed. As shown in Fig. 4 and Fig. 5, a biscuit contacts to a sprue core. In the case of steel F, a finer microstructure is given approximately 300  $\mu\text{m}$  below the surface.

#### 4. 3 ビスケット厚さと分流子の温度

ショット数に対するビスケット厚の推移を Fig. 9 に示す。分流子は鋼 B である。鑄造条件は同一であるが、25 ショット内でビスケット厚には最大で約 8 mm の差 (設定値の 22 mm に対して、マイナス 3 mm ~ プラス 5 mm の幅) が発生した。他の鋼の場合も同様であった。熱画像を採取した水準の中から、ビスケット厚さ 21.5 ~ 23 mm のデータを抽出した結果が Fig. 7 である。

一方、Fig. 10 に示す通り、ビスケットが 1 mm 厚くなると分流子の温度は 5  $^{\circ}\text{C}$  高くなる。熱伝導率が分流子の温度におよぼす影響を正確に評価するには、溶湯温度や冷却水量の変動抑制だけでなく、ビスケット厚が同等の水準を対象にする必要がある。



Fig. 9. Fluctuation of biscuit thickness during production. The sprue core is made of steel B.

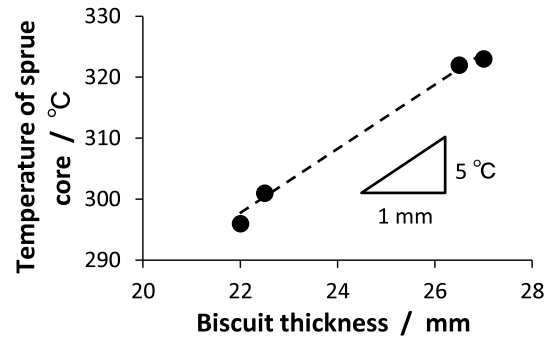


Fig. 10. Effect of biscuit thickness on temperature of a sprue core. The sprue core is made of steel B.

#### 4. 4 鑄造品の熱容量の影響

Fig. 10 に示した通り、分流子の温度はビスケット厚の変動に敏感である。すなわち、鑄造品の熱容量は金型温度に大きく影響する。また、鑄造品の熱容量によって、金型の熱伝導率が鑄造性におよぼす影響の程度も変わる可能性がある。

そこで、ビスケット厚を Fig. 6 ~ Fig. 10 の約 2 倍となる 45 mm にした場合を評価した。凝固が確実に完了した状態で型を開くため、チルタイムは 11 sec に延長した。

分流子の熱画像を Fig. 11 に示す。最高温度は、SKD61 (26  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) が 333  $^{\circ}\text{C}$ 、鋼 G (31  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) は 265  $^{\circ}\text{C}$ 、鋼 H (40  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) は 213  $^{\circ}\text{C}$  である。高熱伝導率鋼ほど低温化する結果は Fig. 6 と同じであるが、熱伝導率の影響はビスケット厚が 22 mm の場合よりも顕在化し、1  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  の変化が生む温度差は約 9  $^{\circ}\text{C}$  となった。

分流子と接触していたビスケット表層の組織を Fig. 12 に示す。Fig. 11 と同様に、分流子は SKD61 (26  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )、鋼 G (31  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )、鋼 H (40  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) である。熱伝導率の影響は Fig. 8 の場合よりも大きく、26  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  から 31  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  への増加によって、ビスケットの表面は平滑化し凝固組織も微細化した。40  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  では、組織がさらに微細化している。

以上より、高熱伝導率の金型が低温化し凝固組織が微細化する現象は、鑄造品が厚い (熱容量が大きい) 場合に顕在化することが分かった。熱容量が大きいと、凝固完了までに金型で奪うべき熱量も多くなる。このため、金型内での熱移動の速度、つまり熱伝導率の影響が大きく表れると考えられる。逆に、鑄造品が非常に薄い場合は金型への少しの抜熱で凝固が完了するため、金型の熱伝導率は温度や凝固組織に影響しにくいと推測される。

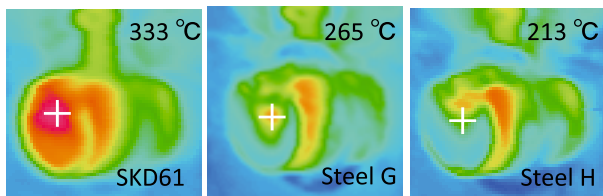


Fig.11. Thermal images of a sprue core at 2 sec after picking out of a cast. Steels of group two were evaluated. Biscuit thickness of 45 mm is approximately twice that in the experiments of Fig. 6. And chill time is prolonged to 11 sec. Mean thermal conductivity below 300 °C is 26 W/(m·K), 31 W/(m·K) and 40 W/(m·K) for SKD61, steels G and H, respectively.

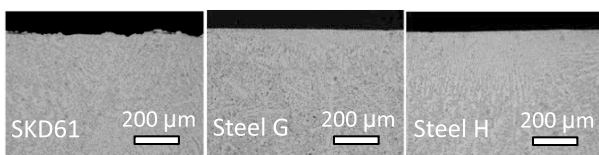


Fig. 12. Solidification microstructure of biscuits from Fig. 11. Higher thermal conductivity of a sprue core leads to a smoother surface and a finer microstructure.

## 5. 結 言

熱伝導率の異なる8鋼種で分流子を作製し、135 tonダイカストマシンで铸造をおこなった。熱伝導率が分流子の温度と铸造品ビスケット部の凝固組織におよぼす影響を調査し、得られた知見を以下に示す。

1. 熱伝導率の高い分流子ほど低温度化する。ビスケット厚が22 mmの場合、20～30 W/(m·K)の範囲では、1 W/(m·K)の高熱伝導率化によって分流子の温度は6 °C低下した。20～50 W/(m·K)の平均では、1 W/(m·K)あたり約3 °Cである。
2. ビスケット表層の凝固組織は、分流子の熱伝導率が高いほど微細化する。低温度化する高熱伝導率の分流子は、ビスケットの凝固を促進することが示唆される。
3. ビスケット厚さ1 mmの変化は、分流子の温度に5 °Cの差を生む。実験結果の評価に際しては、ビスケット厚が同等の水準を選定することが重要である。
4. 高熱伝導率の金型が低温度化し凝固組織が微細化する現象は、铸造品が厚い(熱容量が大きい)と顕在化する。ビスケットが45 mmと厚肉の場合は、1 W/(m·K)

の高熱伝導率化によって分流子の温度が9 °C低下した。また、26 W/(m·K)から40 W/(m·K)への増加によって、ビスケットの表面は平滑化し凝固組織も顕著に微細化した。

5. 熱交換器の役割も果たすダイカスト金型において、熱伝導率は重要な実用性能であることが改めて確認できた。

(文 献)

- 1) 西直美: 素形材, 60(2019), 11, 21.
- 2) 神戸洋史: アルトピア, 50(2020), 1, 9.
- 3) 前原一仁, 早藤哲典, 小林竜之: 2018日本ダイカスト会議講演論文集, (2018), 75.
- 4) 河野正道, 並木邦夫, 瓜田龍実, 越川典弘, 柳澤民樹: 素形材, 54(2013), 12, 30.
- 5) 渡辺憲一, 北川利博, 河野正道, 大藤孝: 2011型技術者会議講演論文集, (2011), 200.
- 6) 大崎隆史, 福井茂雄: 型技術, 33(2018), 8, 60.
- 7) 梅森直樹, 堀尾浩次, 増田哲也: 電気製鋼, 85(2014), 1, 63.
- 8) 井戸信介: 型技術, 28(2013), 3, 30.
- 9) 山崎友也, 関宏友: 型技術, 33(2018), 8, 52.
- 10) 青野光: 型技術, 32(2017), 6, 56.
- 11) 井ノ口貴之, 伊藤恒夫, 相田保和: 2011型技術者会議講演論文集, (2011), 204.



河野正道



達谷正勝