

## 技術論文



Technical Paper

# ダイカスト金型のヒートチェックに及ぼす硬さと合金元素 “モリブデン, シリコン” の影響

横井直樹\*<sup>1</sup>, 河野正道\*<sup>1</sup>, 井上幸一郎\*<sup>2</sup>

## Effects of Hardness and Alloying Elements, Molybdenum and Silicon, on Heat Checking Behavior of Die-Casting Dies

Naoki Yokoi, Masamichi Kawano, and Koichiro Inoue

### Synopsis

Effects of hardness and alloying elements, molybdenum and silicon, on heat checking behavior of die-casting dies are investigated. Three steels of middle carbon 5 %Cr type hot work die steels are tested by actual diecasting machine up to 10000 shots. The results obtained are as follows.

- (1) Increase in hardness from 43 HRC to 48 HRC leads to marked decrease in heat checking. This is considered due to the suppression of fatigue crack initiation by increased yield strength.
- (2) Molybdenum content is not controlling factor of heat checking. Low Si steel, 0.1 %Si-1.2 %Mo, performs the same heat checking resistance as 0.1 %Si-3 %Mo steel.
- (3) Low Si steels with 0.1 % shows superior heat checking resistance to 1 % Si steel. The increased thermal conductivity by lowering Si is the main cause of this improvement. This is supported by the numerical analysis that shows 10 % decrease of stress amplitude in casting cycles by the increased thermal conductivity from 23.6 W/m/K to 30.5 W/m/K.
- (4) To increase the hardness is the most effective in preventing heat checkings and followed by lowering Si content.

It's concluded, therefore, that using of high thermal conductivity steel at high hardness is the most effective method in preventing heat checkings.

## 1. 緒 言

近年におけるダイカストのトレンドは、高品位化と生産性向上である。高品位化の目的は casting 品の用途拡大であり、韌延性や熱処理性の改善が指向されている。特性改善のキーテクノロジーはガスの巻き込み低減と急速凝固であり、課題を達成するため各種の特殊ダイカスト法が開発されている<sup>1)</sup>。

超高速ダイカストなどの特殊ダイカスト法では、金型温度が上昇しやすく<sup>1)</sup>、外部冷却の強化が必要になる。結果として金型の温度振幅が増大し、金型の表面に発生するヒートチェックが助長される。もう1つのトレンドである生産性向上においても、ヒートチェックは顕在化の傾向にある。これは、 casting サイクルタイムの短縮によって金型が高温度化し、外部冷却を強化するためである。

ヒートチェックは、製品の表面品質を害するだけでな

2010年3月10日受付

\*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\*2 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博 (Dr., Eng., Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

く、金型が破壊に至る大割れの原因ともなる。品質やコストに直結するため、ヒートチェックの発生し難い（以下、耐ヒートチェック性）金型用鋼がダイカストには求められる。

耐ヒートチェック性に優れた金型用鋼の開発においては、ヒートチェックに影響を及ぼす因子の把握が必要である。その手段として、ダイカストを模擬した試験方法が一般的に用いられる。実際の鑄造による調査は、コスト、評価期間、条件の統一性、などから容易でない。一方、小さな試験片の表面に加熱と冷却のサイクルを付与し、ヒートチェックを発生させる模擬試験は、効率的かつ系統的な評価に便利である。

模擬試験によって明らかにされたヒートチェックへの影響因子は<sup>2)~4)</sup>、軟化抵抗、高温強度、熱膨張係数、延性である。具体的には、軟化抵抗、高温強度、延性が高いほど、また、熱膨張係数が小さいほど、ヒートチェックの発生は抑制される。ヒートチェックに影響を及ぼす高温強度は、高モリブデン（以下、Mo）化によって上昇する。さらに、シリコン（以下、Si）の低減はヒートチェックの抑制に有効である<sup>5)</sup>。このような知見を基に、低Si-高Mo鋼をはじめとする耐ヒートチェック性に優れた金型用鋼が種々開発されてきた<sup>6)</sup>。

一方、模擬試験では、湯流れによる型の表面粗さの劣化など、ダイカストで起こる現象を再現できない。また、試験の加熱温度がダイカストの溶湯温度より高い場合も多く<sup>5),7)</sup>、高温強度や軟化抵抗の寄与が実際とは異なる可能性がある。

以上より、従来の模擬試験では、ヒートチェック発生の影響因子を十分に解明しているとはいえない。鋼材開発にフィードバックする正確な情報を得るには、実機を用いた簡便かつ効率的なダイカスト試験が不可欠である。そこで著者らは、5000ショット程度で湯口付近や応力集中部に熱疲労き裂が発生するダイカスト試験方法を確立した<sup>8)</sup>。

本研究においては、上記の試験方法を用いて、金型の硬さ、MoとSi、がヒートチェックに及ぼす影響を検証した。

## 2. 耐ヒートチェック性の評価方法

### 2. 1 従来の試験方法

金型用鋼の耐ヒートチェック性は、試験片表面に加熱と冷却のサイクルを付与する模擬試験によって評価することが多い<sup>9)</sup>。加熱方法は、加熱効率の良い高周波加熱

が最も一般的である。また、加熱体に試験片を接触させる方式や、バーナーによる加熱、流動層中で加熱する方法もある。加熱温度は873~973 Kである場合が多い。冷却方法は、試験片表面への水の噴霧や噴射、水中への試験片の浸漬、などである。模擬試験の利点は、小さな試験片に短時間でヒートチェックが発生すること、条件の再現性が高く系統的な評価も容易であること、である。

一方で、ダイカストと比較し、模擬試験には温度に関する2点の問題があり、鋼材の耐ヒートチェック性を正確に評価できない恐れがある。1点目の問題は、所定の温度に試験片を到達させる場合には、鋼材の熱伝導率の影響を評価できないことである。ダイカストにおいては、鋼材の熱伝導率によって金型の到達温度が異なる<sup>10)</sup>。2点目の問題は、試験片をダイカストの溶湯より高温に加熱する場合もあることである。すなわち、実際には到達しない温度域の耐ヒートチェック性を評価することになる。

ダイカスト試験では、上記の問題が起こらない反面、コスト・評価期間・条件の統一性が課題となる。模擬試験の問題点とダイカスト試験の課題を解決した例として、350 tonの小型ダイカストマシンによる試験が報告されている<sup>11)</sup>。このダイカスト試験では、曲率を変化させた溝底の応力集中部において、500~3000ショットの早期にき裂が発生する。また、き裂の発生するショット数が鋼種によって異なることも示された。

### 2. 2 本研究のダイカスト試験

鑄込み重量や金型サイズが小さい小型のダイカストマシンでは、金型表面に作用する熱応力が小さく、き裂が発生し難い。350 tonの装置を用いた上記のダイカスト試験<sup>11)</sup>でも、熱応力が低い平面部のヒートチェックは未評価である。実生産においては、湯口付近などの平面部に発生するヒートチェックが問題となる場合も多い。したがって、平面部のヒートチェックを評価できるダイカスト試験が必要である。

従来のダイカスト試験<sup>11)</sup>より小型の135 tonダイカストマシンを用いる本試験方法では、平面部にヒートチェックを発生させるため、大型ダイカストマシンに相当する高い熱応力の再現を目指した。鑄込み重量は600 gと小さいが、射出時の急加熱による圧縮応力を増大させるため、溶湯温度を一般的なダイカスト対比30~60 K高温とし、鑄造品を14 mmの厚肉とした。さらに、強制冷却時の引張応力を増大させるため、3 sと長いスプレー時間を設定した。以上によって、効率的かつ系統的な実験を低コストで実施できるダイカスト試験方法

を確立した<sup>8)</sup>。損傷が発生するショット数は、平面部のヒートチェックが2000～5000、突起基部の応力集中部におけるき裂は500～1000である。

### 3. 試験方法

#### 3. 1 金型形状

試験用金型の概略形状を Fig.1 に示す。試験片となる金型の重量は18 kg である。応力集中によるき裂の発生を再現するため、基部のコーナー R が0.3 mm の突起を設置した。突起の形状は、幅が50 mm で高さ7 mm、抜き勾配が1°である。溶湯は、湯口前の突起を直撃するように射出される。湯口付近および金型中央付近の2箇所平面部では、ヒートチェックを発生させる。なお、金型素材の長手方向は、射出の方向と一致させている。

#### 3. 2 金型の調質

金型には、Table 1 に示す3鋼種を用いた。Steel-A は、JIS SKD61 のプレミアム材である<sup>12)</sup>。Steel-B は JIS SKD6 に類似の鋼であるが、Si 量を0.1%に低減している。0.1%Siかつ3%MoのSteel-Cは、耐ヒートチェック性に優れた高性能鋼として市販されている。

これらの鋼材から作製した金型を、真空中で1303 Kに加熱し、3.6 ksの保持後に6 Barに加圧してガス焼入れした。さらに、853～883 Kにおける3～4回の焼

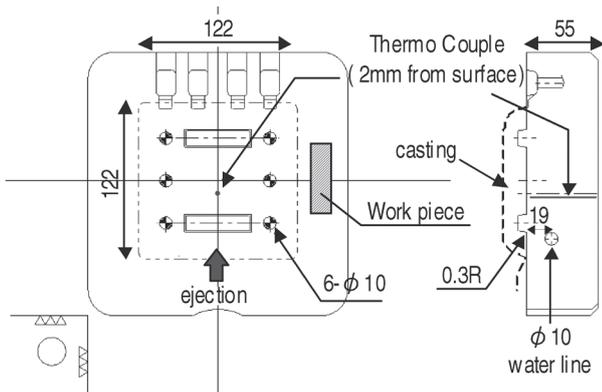


Fig.1. Schematic geometry of the test die.

Table 1. 5 % Cr type hot work die steels for test dies.

Steel	Chemical compositions [mass%]						Notes
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
A	0.41	1.00	0.40	5.18	1.21	0.88	JIS SKD61 premium grade
B	0.37	0.09	0.43	5.29	1.24	0.52	
C	0.34	0.08	0.60	5.56	3.01	0.80	

戻しによって所定の硬さへ調質した。Steel-Aのみ、43 HRCと48 HRCの2水準を準備し、損傷に及ぼす硬さの影響を評価した。他の鋼種は43 HRCの1水準である。

#### 3. 3 装置および鑄造条件

装置には、東芝機械(株)製のDC-135JTダイカストマシンを用いた。型締力は135 tonである。電気加熱式黒鉛るつぼ炉は、溶解容量が300 kg、常用温度の上限は993 Kである。鑄造条件をTable 2に示す。離型剤には、(株)MORESCO製のモルゾールMS-10を用いた。

#### 3. 4 ヒートチェックの評価

10000ショット鑄造後に湯口付近、中央部、突起基部、の外観を染色浸透探傷試験(以下、カラーチェック)をおこない、ヒートチェックの程度を評価した。

#### 3. 5 金型材質の確認

10000ショットの鑄造後、損傷が顕著な湯口付近を切り出し、意匠面から深さ0.04～5 mmにおけるピッカース硬さの分布を荷重100 gで調査した。さらに、溶湯と非接触の端部付近を切り出し、鑄造前の初期状態と位置付け、組織や材質を調査した。素材の切り出し位置をFig.1に示す。

10 mm × 10 mm × 55 mmの2 mmUノッチ衝撃試験片は、その長手方向を金型素材の長手方向と一致させた。衝撃試験後の破断材については、試験片の長手方向と平行な面を鏡面研磨し、1%ナイタールによって腐食後、光学顕微鏡によって金属組織を観察した。

Table 2. Casting conditions.

Items	Conditions	Note	
Al-alloy	ADC12		
Molten metal temperature	973 K		
Cast weight	600±15 g		
Ejection Velocity	Low	200 mm/s	
	High	1600 mm/s	
Cast pressure	65 MPa		
1 cycle	Cycle time	28 s	
	Solidification time	8 s	
	Air 1	0.5 s	Air pressure 0.5 MPa
	Spray	3.0 s	
Water cooling	Air 2	1.5 s	
	Temperature	278 K	
	Volume flux	0.66 m <sup>3</sup> /h	

また、衝撃試験の破断材は軟化抵抗の評価にも用いた。試験片を873 Kで3.6～108 ks保持し、室温まで冷却した後に硬さを測定した。

### 3. 6 数値計算

鑄造による負荷を検証するため、MAGMA社製の湯流れ解析ソフトMAGMAを用いて、金型の温度や応力を見積った。温度が定常状態になるまでのサイクル数を減らすため、金型は423 Kの均熱を初期状態とした。10サイクルの湯流れと凝固を計算し、10サイクル目の温度と応力を評価する。計算上、金型温度は8～9サイクルで定常状態に達する。

熱伝導率は、Table 3に示す実測値を用いた。ヤング率や熱膨張係数など、その他の金型に関する材料物性値とADC-12の物性値は、MAGMAの標準データベースを用いた。溶湯/金型および冷却水/金型の界面における熱伝達係数は、別の実験<sup>8)</sup>であらかじめ実測した温度をもとに、逆解析によって導出した値を用いた。

## 4. 結 果

### 4. 1 金型の金属組織および材質

金型の金属組織をFig.2に示す。Steel-AとCは、焼

入れ時の旧オーステナイト粒径が25 μm程度と小さく、組織も非常に微細な焼戻しマルテンサイトである。バナジウム（以下、V）量が少ないSteel-Bは、焼入れ時に結晶粒界をピン止めするバナジウム炭化物も少ないため、結晶粒径が50 μm程度とやや粗大である。しかし、焼入れ速度が大きいことから、微細な組織が得られている。いずれの鋼種も、ダイカスト金型として適正な金属組織と判断できる。

金型の材質をTable 3に示す。43 HRCの水準は、41～52 J/cm<sup>2</sup>の衝撃値を有する。特に、Steel-AとSteel-Cは、約52 J/cm<sup>2</sup>と高位である。873 Kにおける軟化抵抗をTable 4に示す。3鋼種の軟化抵抗に大差は無く、10.8 ks保持後の硬さは40.7～41.3 HRCであった。

Steel-Aは汎用の熱間ダイス鋼であり、Steel-Cは耐ヒートチェック性に優れた高性能鋼である。しかし、両者の衝撃値や軟化抵抗には、顕著な差異は認められない。

### 4. 2 硬さの影響

Steel-Aを対象とし、10000ショット後のカラーチェックの結果をFig.3に示す。42.5 HRCの金型には、湯口付近や中央部で顕著なヒートチェックが発生している。一方、47.9 HRCの金型は損傷が非常に軽微である。湯口付近の状態が著しく改善し、中央部のヒートチェックはほとんど確認できない。

一方、Fig.4に示すとおり、損傷に対する硬さの影響

Table 3. Properties of test dies before and after 10000 shots casting.

Steel	Hardness [HRC]	Thermal conductivity [W/(m·K)]				2U Charpy impact value [J/cm <sup>2</sup> ]	Thermal fatigue crack
		278 K	573 K	723 K	873 K		
A	47.9	23.6	25.0	25.5	26.0	27	◎
	42.5					52	×
B	43.1	30.5	31.8	31.2	30.2	41	○
C	42.5	30.0	31.2	31.4	30.9	51	○

Table 4. Room temperature hardness when held at 873 K.

	Initial hardness [HRC]	Holding time at 873 K		
		3.6 ks	10.8 ks	36 ks
Steel A	42.5	41.6	40.7	38.1
Steel B	43.1	42.5	41.3	39.5
Steel C	42.5	42.1	41.0	37.9

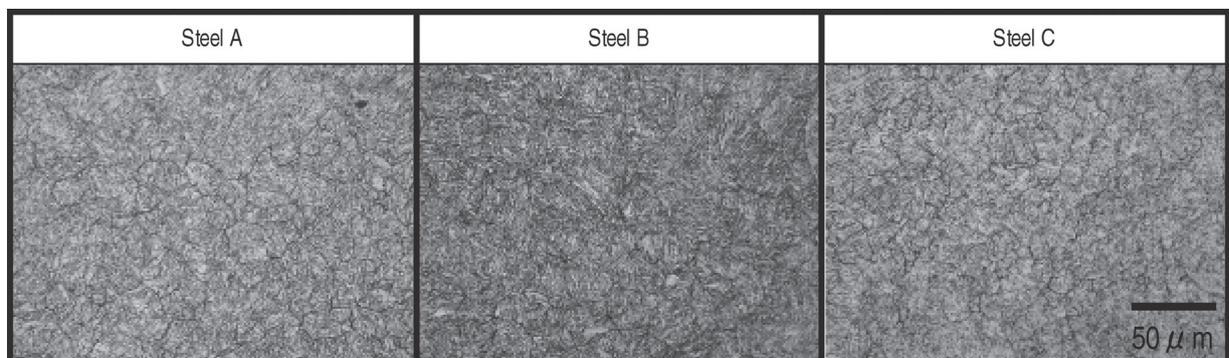


Fig.2. Microstructures of test dies.

が突起基部では非常に小さい。き裂の連結による欠け落ちの程度は、硬さによらず同等である。すなわち、応力集中が顕著な部位では、高硬度化によるヒートチェックの抑制効果は小さくなる事が分かる。

### 4. 3 Moの影響

ヒートチェックの発生状況を、金型の湯口付近を拡大して Fig.5 に示す。Steel-A と Steel-B は共に 1.2 %Mo であるが、損傷の程度には大差を生じた。また、1.2 %Mo の Steel-B は、3 %Mo の Steel-C と同等の耐ヒートチェック性である。以上より、Mo 量はヒートチェックの抑制に対する支配因子ではないと判断できる。

### 4. 4 Siの影響

Fig.5 および Table 3 に示したとおり、0.1 %Si 鋼である Steel-B と Steel-C の耐ヒートチェック性は同等である。一方、1.0 %Si 鋼の Steel-A は、これら 2 鋼種に比べ、損傷が著しい。以上より、Si 低減は耐ヒートチェック性の改善に有効である事が分かる。

### 4. 5 試験後の表面硬さ

10000 ショット鑄造後の湯口付近における硬さ分布を

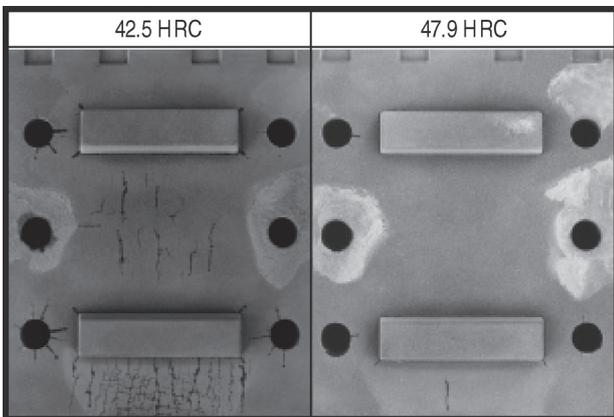


Fig.3. Penetrate inspection tested Steel A die after 10000 shots.

Fig.6 に示す。深さ 1 ~ 5 mm の領域では、初期硬さが維持されている。一方、表面側は内部よりも低硬度である。しかし、表面と内部の差は約 10 HV であり、熱間鍛造金型ほど顕著な軟化ではない<sup>13)</sup>。

## 5. 考 察

### 5. 1 硬さの影響

ダイカスト金型の表面では、急加熱されて内部より高温となる射出時に、高い圧縮応力が発生する。この時、金型表面は塑性変形を生じる。離型剤の噴霧時には、急冷却されて内部より低温となるため、金型表面に引張応力が発生する。このようなサイクルの繰返しによって、金型表面に疲労き裂が発生すると考えられている<sup>14)~16)</sup>。

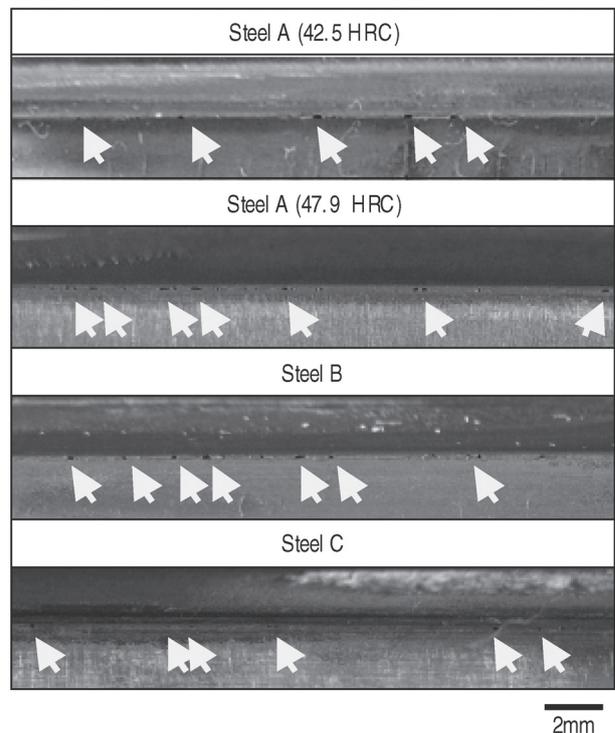


Fig.4. Heat cracks along the 0.3 mm radius root of the projections after 10000 shots (Arrows indicate chips).

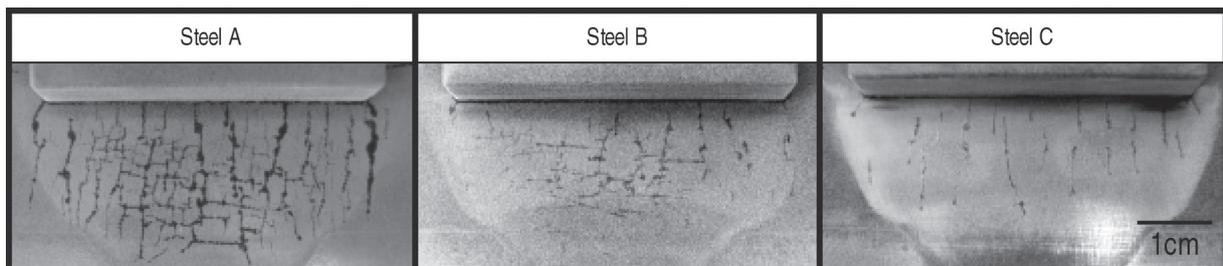


Fig.5. Penetrate tested dies after 10000 shots: Around gates.

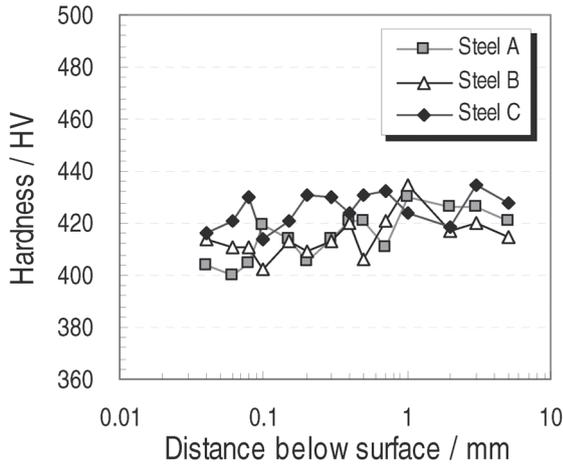


Fig.6. Hardness distributions of the dies after 10000 shots.

以上より、ヒートチェックの抑制に対して高硬度化が極めて有効であった理由は、耐力の上昇によって塑性変形が困難となる結果、疲労き裂の発生が抑制されるためと考えられる<sup>17)</sup>。Steel-Aの0.2%耐力をTable 5に示す。ダイカスト金型の表面に相当する673~773 Kでは、48 HRCの0.2%耐力が43 HRCに比べ約160 MPa向上している。

Table 5. Proof stresses of SKD61 on high temperature tensile test.

Temperature [K]	0.2 % proof stress [MPa]		
	43 HRC	48 HRC	Difference
673	979	1145	166
773	816	976	160

### 5. 2 Moの影響

Steel-AとSteel-Cの673~873 Kにおける0.2%耐力をTable 6に示す。ともに初期硬さは45 HRCであるが、3%MoのSteel-Cは1.2%MoのSteel-Aより高強度である。2鋼種の強度差は高温ほど拡大する。高Mo鋼には、耐力の上昇によるヒートチェックの抑制が期待される。

一方、Steel-BとSteel-Cの比較から、Mo量は耐ヒートチェック性の支配因子ではないことが、本研究によって明らかとなった。この理由は、ダイカスト金型の表面がそれほど高い温度に加熱されないためと考えられる。673~773 Kでは、Steel-AとSteel-Cの強度差が10~30 MPaと小さい。ダイカスト金型においては、熱間鍛造金型ほど高温強度の重要性が高くないと推測される。

Table 6. Proof stresses of SteelA and SteelC as 45 HRC on high temperature tensile test.

Temperature [K]	0.2 % proof stress [MPa]		
	Steel A	Steel C	Difference
673	1092	1104	12
773	946	979	33
873	672	740	68

### 5. 3 Siと熱伝導率の影響

ヒートチェックは主として熱疲労現象と考えられ、熱伝導率は温度と熱応力を介して疲労挙動に関与する。また、熱伝導率はクロム（以下、Cr）量とSi量に敏感である一方、Mo量とV量にはあまり影響されない<sup>10)</sup>。したがって、5%Cr-Mo-V鋼の熱伝導率はSi量でほぼ決まると判断される。実際に、Steel-BとSteel-CのSi量は等しく、熱伝導率もほぼ等しい。さらに、Steel-BとSteel-Cの耐ヒートチェック性も同等である。一方、これらの2鋼種に比べ熱伝導率が低いSteel-Aは、耐ヒートチェック性も劣る。この結果を説明するため、数値計算によって温度と熱応力に及ぼす熱伝導率の影響を検証した。

金型の最表面温度は、射出開始から凝固完了までの過程で最高値に達し、製品取出しにおいては緩やかに低下する。そして、スプレー終了時に最低値を示した後、復熱して次サイクルを迎える。このような1サイクルにおける最高温度と最低温度を、湯口付近の深さ0.3 mm位置を対象としてTable 7に示す。Steel-Aと比較し、熱伝導率の高いSteel-Bは最高温度が25 K低い。一方、最低温度は同等であるため、結果として温度振幅が22 K小さくなる。

Table 7. Estimated temperature amplitude at the gate.

Steel	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Temperature [K]			Difference of amplitude
		Max	Min	Amplitude	
A	23.6	663	372	291	0 K
B	30.5	638	369	269	22 K

Table 8は、湯口付近における静水圧応力の最大値と最小値を示す。最小値（圧縮）は最高温度の時点で、最大値（引張）は最低温度の時点で、それぞれ発生した。高熱伝導率のSteel-Bは、圧縮と引張の応力が共に小さく、応力振幅は10%小さくなる。

Table 8. Estimated stress amplitude at the gate.

Steel	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Mean normal stress / [MPa]			Rate of amplitude
		Min	Max	Amplitude	
A	23.6	-572	75	647	100 %
B	30.5	-524	58	582	90 %

以上より, Steel-B と Steel-C のヒートチェックが軽微な理由は, 熱伝導率が高いために熱応力が低減し, き裂の発生が抑制されるためと考えられる<sup>16)</sup>. 低 Si 材に関する従来の知見<sup>5)</sup>も, 偏析軽減や高衝撃値化ではなく, 高熱伝導率化によって得られた可能性が高い.

## 5. 4 影響因子の優劣

Steel-B と Steel-C の比較から, Mo 量と耐ヒートチェック性には相関が認められない. 一方, Steel-A の 43 HRC 材と Steel-B では熱伝導率のおよそ 5 ~ 7 W/m/K 増加によってヒートチェックが抑制される. また, Steel-A の熱伝導率は 23.6 W/m/K と低い, 48 HRC 材は高熱伝導率材よりも損傷が軽度であった.

以上より, ヒートチェックを最も効果的に抑制する特性は硬さであり, 次いで熱伝導率, すなわち Si 量と判断できる. したがって, ヒートチェックの抑制に対しては, 高熱伝導率材を高硬度で使うことが最適な手段と結論付けられる.

一方, Fig.4 に示したとおり, 突起基部の損傷に対しては硬さと熱伝導率の影響が現れにくい. 応力集中が顕著な部位の損傷抑制には, 5 ~ 7 W/m/K の高熱伝導率化や 5 HRC の高硬度化よりも, 窒化などの表面処理の適用が有効と考えられる.

## 6. 結 言

135 ton のダイカストマシンを用いた 10000 サイクルの鑄造試験によって, ヒートチェックに及ぼす硬さ, Mo, Si の影響を評価した. 金型の温度や応力は, 湯流れ解析ソフトによって推定した. 得られた結果を以下に示す.

- (1) ヒートチェックへの影響が最も大きい因子は硬さである. 43 HRC から 48 HRC への高硬度化によって, 損傷は著しく抑制された.
- (2) Steel-A と Steel-B は共に 1.2 %Mo であるが, 損傷の程度には大差を生じた. また, 1.2 %Mo の Steel-B と 3 %Mo の Steel-C では, 耐ヒートチェック性が同等である. 以上より, Mo 量はヒートチェックの抑制に対す

る支配因子ではないと判断できる.

- (3) Si は熱伝導率を介して耐ヒートチェック性に関与すると考えられる. 熱伝導率, すなわち Si の影響は, 硬さに次いで大きい. 高熱伝導率材はヒートチェックが軽微である. 熱伝導率が 23.6 W/m/K から 30.5 W/m/K に増加すると, 温度振幅は 22 K 減少し, 応力振幅は 10 % 低減されると見積られた. 高熱伝導率化による熱応力の軽減が, 損傷を抑制したと考えられる.
- (4) 高 Mo かつ低 Si の高性能鋼が耐ヒートチェック性に優れる最大の理由は, 熱伝導率が高いためと考えられる.
- (5) ヒートチェックの抑制に対しては, 高熱伝導率材を高硬度で使うことが最適な手段と結論付けられる.
- (6) ただし, 応力集中が顕著な部位では, 高硬度化や高熱伝導率化の効果が現れにくい.

(文 献)

- 1) 西直美: 型技術, 24(2009), 4, 40.
- 2) 豊田裕至, 森時彦, 細見広次, 保前正夫, 水野幸隆, 寺林武司: 鉄と鋼, 70(1984), S1272.
- 3) 細見広次, 森時彦, 豊田裕至, 保前正夫, 水野幸隆, 寺林武司: 鉄と鋼, 70(1984), S1273.
- 4) 田村庸: CAMP-ISIJ, 7(1994), 1730.
- 5) 須藤興一: 電気製鋼, 60(1989), 367.
- 6) 田部博輔: 特殊鋼, 53(2004), 6, 5.
- 7) 松田幸紀, 須藤興一: 電気製鋼, 57(1986), 181.
- 8) 横井直樹, 井上幸一郎: 型技術者会議講演論文集, 2008, 220.
- 9) 例えば, 日本熱処理技術協会: 金型のヒートチェック研究部会共同研究成果発表講演論文集, 14.
- 10) 河野正道, 井上幸一郎: まてりあ, 48(2009), 32.
- 11) 小森誠, 田村庸, 室重昌史, 加田善裕: 型技術, 16(2001), 8, 26.
- 12) 井上幸一郎, 大藤孝, 市岡雄二, 荒木利彦: 電気製鋼, 76(2005), 287.
- 13) 五味伸幸, 塩田哲郎, 森川秀人: 電気製鋼, 78(2007), 299.
- 14) 田村庸, 浜小路正博, 長澤政幸, 市川二郎, 大藤孝, 水島徳秋, 山下広: 熱処理, 36(1996), 3, 158.
- 15) 大森宮次郎: 熱処理, 36(1996), 3, 118.
- 16) L. Kindbom: Archiv für das Eisenhüttenwesen, 35(1964), 773.
- 17) K.K.Mehta, W.Schmidt, P.Schuler: Thyssen Edelstahl Tech Ber, 4(1978), 29.