

技術資料

Technical Data

湯流れ解析によるダイカスト金型のヒートチェック予測

河野正道*

Heat Checking Prediction of Die Casting Dies through Flow and Solidification Simulation

Masamichi Kawano

Synopsis

For the prediction of heat checking, die casting tests and numerical analyses were performed. Heat checking behavior of steels with different strength, toughness and thermal conductivity is investigated on die casting.

The damage of die is markedly suppressed by increasing of high temperature strength. And also high thermal conductivity steel exerts superior performance for damage reduction. On the other hand distribution of heat checking is not influenced by toughness. Numerical results indicate that higher thermal conductivity leads to lower thermal stress. Severe damage parts correspond to higher flow velocity of molten aluminum. Cast progressing, the surface roughness of die increased and then crack is initiated.

It could be assumed that heat checking is a thermal fatigue phenomenon with erosion. Consequently heat checking prediction model as a function of strength, thermal stress and flow velocity is given. The crack initiation timing and its distribution can be evaluated through flow and solidification simulation.

1. 緒言

ダイカスト金型のヒートチェックは、水冷孔割れとの連結による水漏れや、鋳造品への転写による表面品質低下の原因となる。このため、ヒートチェックが発生した金型は溶接補修され、修復が困難なほど損傷が激しくなった金型は寿命として交換される。補修や交換の計画化、あるいは鋳造品のコスト試算の観点から、ヒートチェックが発生するショット数を推定したいとのニーズは強い。

また、金型寿命延長効果の定量表示を求めるニーズが強まってきた。鋳造条件、金型の材質や硬さ、金型形状などを変化させた場合に、ヒートチェック寿命が何倍になるかを鋳造前に知りたいとの要求である。その背景に

は、実生産での試行錯誤による検証が多大なコストと時間を要して非効率的であり、目標とする効果が得られるか否かも分からないという現状がある。数値解析でヒートチェック予測ができれば、鋳造前に机上計算で寿命検証ができるため、上記のニーズに応えることができる。

以上の経緯から、熱応力や鋼材物性値と関連付けてヒートチェックを評価する試みがなされ、型材質や応力集中に応じたヒートチェック予測が可能となった^{1), 2)}。

一方、従来の予測手法では溶湯の流動（以下、湯流れ）が考慮されていない。湯流れは金型温度の分布に大きな影響を及ぼす。湯流れには、エロージョンによって金型の表面粗さを大きくする作用もある。表面粗さの増大は機械疲労強度の低下をもたらすが³⁾、熱疲労であるヒートチェックにおいても、同様の現象が起こると考え

2014年4月9日受付

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

られる。更に、従来の検討では損傷と鋼材特性の相関が必ずしも明確ではない。ヒートチェックの予測精度を向上するには、考慮すべき鋼材特性の明確化と同時に、湯流れの影響を導入することが不可欠と考えられる。

そこで本報では、ヒートチェックの支配因子を鋼材特性調査とダイカスト試験と湯流れ解析によって明確化する。そして、鋼材特性と湯流れを考慮したヒートチェック予測モデルを構築し、その妥当性を検証する。

2. ダイカスト試験の条件

2. 1 試験片となる金型

供試材の化学成分を Table 1 に示す。鋼 A は JIS SKD61 である。鋼 B は、鋼 A の高温強度を維持しつつ焼入れ性と熱伝導率を高めた鋼である。鋼 C は高温強度と熱伝導率が共に高い。

210 mm × 205 mm × 65 mm の鋼材を 1303 K から焼入れ、853 ~ 893 K で 3 ~ 4 回焼戻し 38 HRC, 43 HRC, 48 HRC とした。鋼 A の 43 HRC のみ、焼入れを急冷と緩冷の 2 水準を設けた。鋼 B と鋼 C の焼入れは急冷である。鋼材特性に大きく影響する 673 ~ 473 K の焼入れ速度は、急冷が 0.333 K/s, 緩冷は 0.033 K/s である。焼戻し後、機械加工と研削によって Fig. 1 に示す約 18 kg の金型を作成した。また、φ 1.6 mm のシース熱電対を意匠面から深さ 1 mm の位置に 6 か所設置し、表面温度を測定した。

Table 1. Chemical composition in mass% of steels for dies.

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Note
A	0.39	1.00	0.45	5.20	1.20	0.85	JIS SKD61
B	0.35	0.45	0.70	5.50	1.20	0.55	
C	0.33	0.10	0.60	5.50	3.00	0.85	

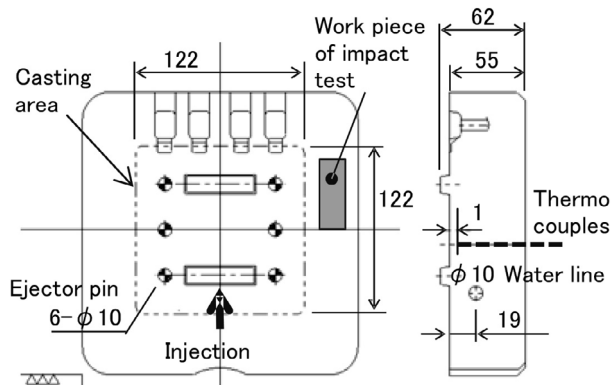


Fig. 1. Dimensions of test die for die casting.

2. 2 鑄造条件

ダイカストマシンは、型締め力 1323 kN の東芝機械(株)製 DC-135JT である。鑄造条件を Table 2 に示す。溶湯は、湯口前の突起を直撃するように射出される。離型剤には(株) MORESCO 製のモルゾール MS-10 を用いた。冷却水は常時 298 K に制御している。冷却水温の季節変動を排除することによって、金型温度や熱応力のバラツキが低減される。高い熱応力による損傷の加速を目的とし、金型の加熱と冷却を強化した⁴⁾。まず、射出時の温度上昇によって発生する金型表面の圧縮応力を増すため、溶湯温度を一般的な値より 30 ~ 60 K 高温にした。また、熱容量を大きくする観点から、鑄造品を大面積かつ厚肉とした。さらに、外部冷却時の抜熱によって発生する金型表面の引張応力を増すため、離型剤のスプレー時間を 3 秒と長くした。

亀裂が発生した概略のショット数は、鑄造品と金型の触診や目視観察によって把握した。ショット数が 10000 に達した時点で試験は終了とした。

Table 2. Conditions of die casting test.

Items		Conditions	Notes
Al alloy		ADC12	Conventional
Molten alloy temperature		973 K	
Cast	Weight	600 g	
	Size	122 mm X 122 mm X 14 mm	
Injection velocity	Low	200 mm/s	
	High	1600 mm/s	
Pressure		65 MPa	
1 cycle	Whole time	28 s	Pressure 0.5 MPa
	Solidification	8 s	
	Air blow	0.5 s	
	Spray	3 s	
	Air blow	1.5 s	
Water cooling	Temperature	298 K	All seasons
	Volume flux	1.83 X 10 ⁻⁴ m ³ /s	

2. 3 試験後の調査

鑄造後は、染色浸透探傷試験(以下、カラーチェック)によってヒートチェックを観察した。さらに、溶湯と接触しない端部付近の衝撃値と金属組織を調査した。素材の切り出し位置は Fig. 1 に示した通りである。ノッチ深さ 2 mm の U ノッチ試験片 (JIS Z 2202) は、その

長手方向を金型素材の長手方向（射出の方向）と一致させた。衝撃試験の破断材は、長手方向と平行な面を鏡面研磨し、5%ピレラで腐食後に光学顕微鏡で金属組織を観察した。衝撃値と金属組織は、鋳造前の初期状態に相当する。

また、金型と同等の速度で急速焼入れした素材を43~45 HRCに焼戻し、機械疲労強度、破壊靱性値、高温引張特性、熱膨張係数、ヤング率を調査した。

3. ダイカスト試験の結果

3. 1 金型の金属組織

非熱影響部の組織を Fig. 2 に示す。いずれも、43 HRC の水準を対象とした。鋼 B のみ旧 γ 粒径が大きい理由は、V 含有量が 0.6% と少なく、焼入れ時に粒界をピン止めする VC 粒子が少ないためである。緩冷した鋼 A には粗大なベイナイトの混入が認められ、衝撃値の低

下が予想される。いずれの鋼種も、急冷材はマルテンサイト組織であり、金型として適正と判断できる。

3. 2 ヒートチェック

10000 ショット鋳造後のカラーチェックを Fig. 3 ~ Fig. 5 に示す。Fig. 3 は 43 HRC の鋼 A であり、これら 2 水準の焼入れ速度は大きく異なる。Fig. 4 は焼入れが急冷であった 43 HRC の 3 鋼種である。Fig. 5 は、急速焼入れした鋼 A の硬さが異なる 3 条件である。

最も早く亀裂が発生する部位は、湯口前の突起基部（コーナー R 部）であった。平面部では湯口前の損傷が目立つ。高硬さや高性能鋼の金型では湯口前の損傷が軽度で、意匠面の中央付近に亀裂が発生していない。亀裂が早期に発生する部位ほど、最終的な損傷も激しい傾向であった。

金型形状はほぼ上下対称であるが、損傷の分布は著しく非対称である。この事実は、湯流れとヒートチェックの強い相関を示唆している。

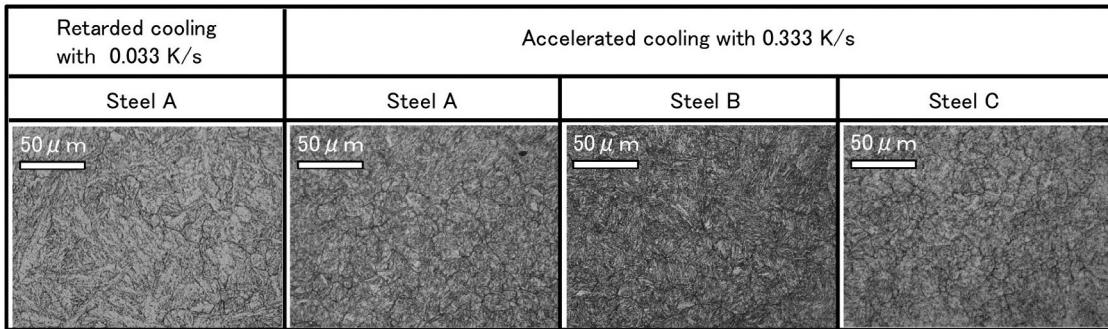


Fig. 2. Micro-structures of dies for die casting test.

Dies are quenched from 1303 K by noted cooling rate at region of 673 K~473 K and then tempered to 43 HRC.

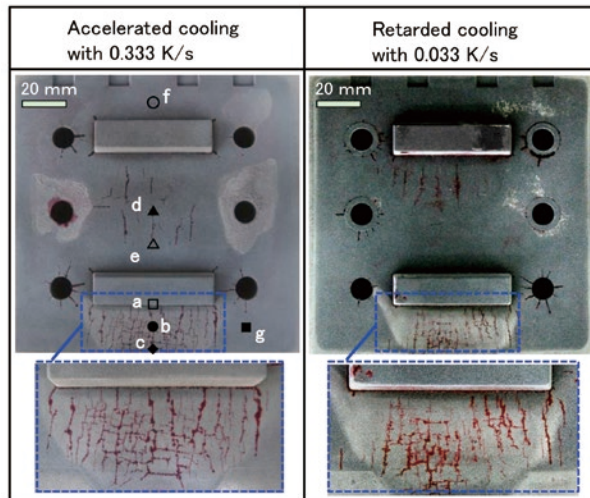


Fig. 3. Influence of cooling rate on heat checking of steel A.

Dies are quenched from 1303 K by noted cooling rate at region of 673 K~473 K and then tempered to 43 HRC. 10000 shots die casting tests are performed.

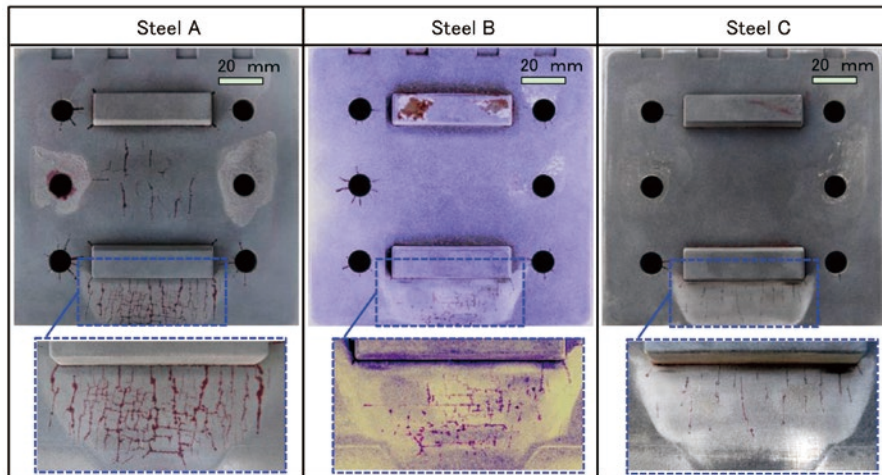


Fig. 4. Influence of die material on heat checking.

Dies are quenched from 1303 K and then tempered to 43 HRC.

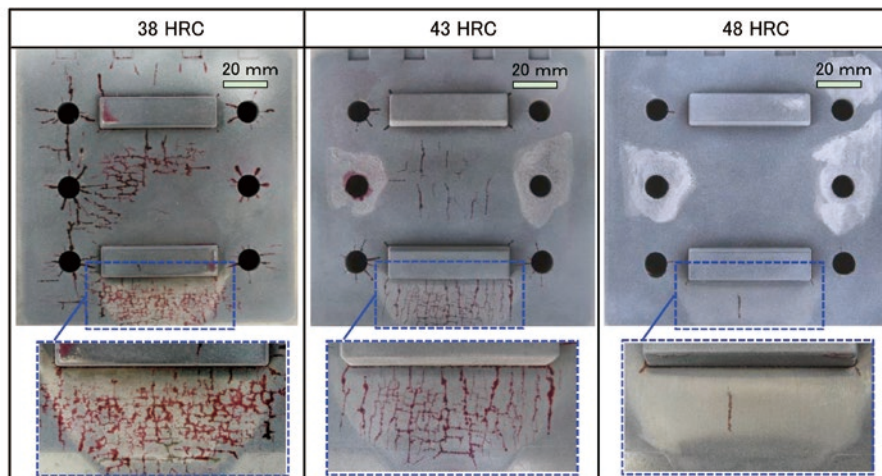


Fig. 5. Influence of hardness on heat checking of steel A.

Dies are quenched from 1303 K and then tempered to different hardness.

4. ヒートチェックに影響する鋼材特性の考察

4. 1 衝撃値・破壊靱性値・延性

焼入れ速度が異なる鋼 A のヒートチェックの程度と衝撃値を Table 3 に示す。Fig. 2 と Table 3 から明らかな通り、組織や衝撃値に大差があっても、鋼種と硬さが同じであれば損傷の程度は同等である。亀裂の深さは最大 3 mm 程度で、衝撃値による顕著な差は認められなかった。衝撃値ではヒートチェックを説明できない⁵⁾。

43 HRC の 3 鋼種のヒートチェックの程度と鋼材特性

を Table 4 に示す。損傷レベルの数値が小さいほどダメージも軽いことを意味する。ヒートチェックの程度は、意匠面を目視観察した相対評価による順位付けである。亀裂の最大深さは、損傷が最も激しい鋼 A で約 3 mm、最も軽傷な鋼 C で約 1 mm であった。一般的には高靱性材ほど割れ難いが、耐ヒートチェック性に優れた鋼 C の破壊靱性値は 3 鋼種中で最低である。破壊靱性値ではヒートチェックを説明できない。

定ひずみ型の熱疲労では、高延性材ほど長寿命になる⁶⁾。ダイカストにおける熱疲労亀裂の発生が延性に依存するとの報告もある¹⁾。しかし、Table 4 から明らかな通り、延性ではヒートチェックを説明できない。損傷が最も軽度な鋼 C の絞りは 3 鋼種中で最低であった。

Table 3. Impact value of steel A.

Items	Accelerated cooling with 0.333 K/s	Retarded cooling with 0.033 K/s
Degree of heat checking	4	4
Impact value at RT [J/cm ²]	52	21

Dies are quenched from 1303 K by noted cooling rate at region of 673 K ~ 473 K and then tempered to 43 HRC. Work pieces of impact test are cut in from dies after 10000 shots casting.

Table 4. Fundamental properties of steels

Items	Steel A	Steel B	Steel C
Degree of heat checking	4	3	2
Impact value at RT [J/cm ²]	52	56	51
Fracture toughness at RT [Mpa/m ^{0.5}]	96	90	56
Reduction of area at 773 K [%]	74	73	62
0.2 % proof stress at 773 K [MPa]	826	827	891
Average thermal conductivity from RT to 774 K [W/m/K]	26	29	31
Average coefficient of thermal expansion from RT to 774 K [K ⁻¹]	12.0 X 10 ⁻⁶	12.0 X 10 ⁻⁶	11.9 X 10 ⁻⁶

Materials are quenched from 1303 K and then tempered to 43 HRC. The greater the heat checking number, the severer the damage.

4. 2 熱伝導率

Table 4 においては、熱伝導率の高い型材ほど損傷が軽度である。この理由は、溶湯との接触やスプレー冷却によって発生する熱応力が高熱伝導率材ほど低減され、亀裂の発生や進展も抑制されるためと考えられる⁵⁾。

一般に、断面内に温度差を有する物体の表面に作用する熱応力 σ は、equ.(1) ~ equ.(3) で計算される。

$$\sigma = C \times E \times a \times \Delta T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta T = f(\lambda) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C = f(\nu) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 E 、 a 、 ΔT 、 λ 、 ν は、それぞれヤング率、熱膨張係数、内部と表面の温度差、熱伝導率、ポア

ソン比である。 λ の増加は、 ΔT の減少を介して σ を低減する。なお、 E 、 a 、 ν の鋼種間差は室温から 873 K において最大 4 % 程度と小さかった。その例として、室温から 773 K における熱膨張係数の平均値を Table 4 に示す。

4. 3 高温耐力・機械疲労強度

硬さが異なる鋼 A の耐ヒートチェック性と 773 K における 0.2 % 耐力を Table 5 に示す。ヒートチェックに対する硬さ、すなわち高温耐力の影響は非常に大きい¹⁾。一方、硬さの増加に対して衝撃値は低下しており、高衝撃値材が耐ヒートチェック性に優れるわけではないことも再確認できる。なお、Table 4 において鋼 C のヒートチェックが最も軽度な理由は、高熱伝導率に加え高温耐力が高かったためと考えられる。

Fig. 6 は鋼 A と鋼 C の室温における回転曲げ疲労強度を示す。これら 2 鋼種のヒートチェックには大差を生じたが、機械疲労試験の時間強度は同等である。すなわち、機械疲労特性では耐ヒートチェック性を説明できない。

Table 5. Impact value and proof stress of steel A.

Items	38 HRC	43 HRC	48 HRC
Degree of heat checking	5	4	1
Impact value at RT [J/cm ²]	72	52	27
0.2 % proof stress at 773 K [MPa]	696	826	991

Dies are quenched from 1303 K and then tempered to different hardness.

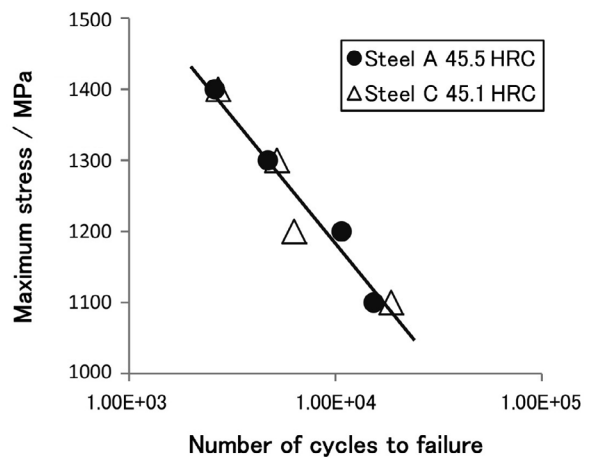


Fig. 6. Rotary bending fatigue strength of steel A and steel C.

4. 4 ヒートチェック予測に用いる鋼材特性

以上の知見を総合して判断すれば、ヒートチェックの評価で注目すべき鋼材特性は熱伝導率と高温耐力である。熱応力に影響を及ぼすヤング率、熱膨張係数、ポアソン比の鋼種間差は小さい。機械疲労強度の鋼種間差もほとんど認められなかった。衝撃値、破壊靱性値、高温延性の鋼種間差は損傷の程度と非対応である。また、ダイカストでは軟化が問題になるほど金型温度が上昇しないため、軟化抵抗によってヒートチェックの程度を説明することも困難である⁵⁾。

なお、ヒートチェックとの相関は認められなかったが、破壊靱性値は重要な金型特性である。この理由は、ヒートチェックの深い進展、あるいは水冷孔割れの進展においては、低靱性の金型ほど短い亀裂（低い応力拡大係数）で急速破壊し大割れに至ると考えられるためである。

5. ヒートチェックに影響する 鑄造因子の考察

5. 1 湯流れ解析の条件

MAGMA社製の湯流れ解析ソフトMAGMASOFTによって、温度、熱応力、流速を見積った。要素数は金型と鑄造品を合わせて約900万、1要素の厚さは0.6~1mmである。金型の初期温度を423Kとし、9サイクルの凝固解析で定常状態に近い温度分布を金型に発生させた後、1サイクルの湯流れ解析をおこなった。この10サイクル目を対象とし、金型の温度や応力、溶湯の流速を評価する。熱伝達係数は、金型と溶湯の界面が16000W/m²/K、鑄造品と金型の界面（凝固収縮による隙間を考慮）が50W/m²/K、スプレー冷却が7500W/m²/Kである。

Fig. 7は、表面温度の実測値と計算値の比較を示す。対象は鋼Aであり、意匠面から深さ1mm位置の最高温度T_{max}と最低温度T_{min}を評価した。T_{max}は射出過程で、T_{min}はスプレー時に観測された。部位b~部位gはFig. 3と対応する。計算による再現誤差は最大で約20Kと比較的に小さく、見積もり精度は良好である。温度から計算される熱応力にも高精度が期待できる。

湯流れの指標としては、流速の時間積分値I_{vf}を採用した。I_{vf}は、時間に対する流速の推移を示したグラフの面積に相当し、鑄造品ではなく金型表面が有する情報である。高速の流動に長時間さらされる部位ほどI_{vf}は大きい。

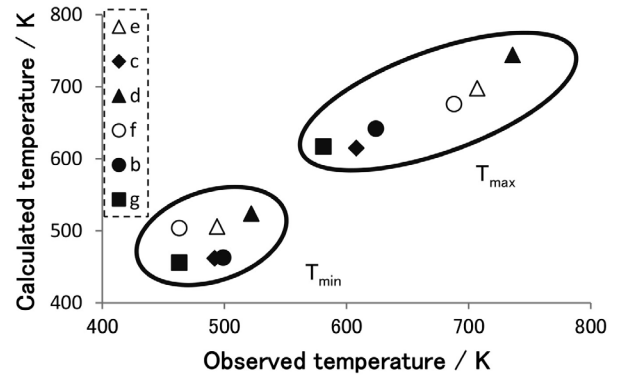


Fig. 7. Comparison of die surface temperature between calculation and observation.

Locations of temperature measurement at die correspond to Fig. 3.

Maximum temperature and minimum temperature in a casting cycle are evaluated.

5. 2 温度振幅ΔT

鋼Aの43HRCを対象とし、金型各部位の負荷と損傷の評点をTable 6に示す。ヒートチェックの評点が大きいほどダメージも顕著であることを意味する。評点1の部位fでは亀裂が発生していない。負荷については、温度振幅ΔTが大きい部位や応力の絶対値が大きい部位の評点を大きくした。ΔTは、Fig. 7に示した最高温度と最低温度の差である。

一般には、サーモビューアで金型の表面温度を測定し、ΔTをヒートチェックと対応付けることが多い。しかし、Table 6から明らかな通り、ΔTによる損傷の説明は困難である。損傷が激しい部位a~部位cはΔTが小さい。

Table 6. Casting parameters of steel A given by flow and solidification simulation.

Items	Locations of die surface							
	a	b	c	d	e	f		
Degree of heat checking	6	5	4	3	2	1		
Temperature amplitude ΔT=T _{max} -T _{min}	1	3	2	6	5	4		
Principal stress	σ ₃ ^{min} during injection	6	5	4	3	2	1	
	σ ₁ ^{max} during spray	1	2	3	6	4	5	
	ΔP _s =σ ₁ ^{max} -σ ₃ ^{min}	6	6	4	3	1	2	
Molten Al flow	Integrate flow velocity I _{vf} =∫v dt		4	5	6	3	2	1

The greater the parameter, the higher the temperature amplitude, pressure and integrate flow velocity.

5. 3 熱応力

損傷と最も良く対応する因子は、最小主応力の最小値 σ_3^{\min} であった。 σ_3^{\min} は、溶湯と接触して発生する圧縮応力の最大値である。この結果は、equ.(4)⁷⁾とも矛盾しない。

$$\text{寿命限界 } L \propto (\sigma_B / (E \times a \times \Delta T))^8 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ_B は高温引張強度、 ΔT は溶湯温度と金型温度の差である。equ.(1) から分かる通り、equ.(4) の分母が射出時の圧縮応力に相当する。

一方、外部冷却の強度を下げると熱疲労亀裂が著しく抑制されるため^{8), 9)}、スプレー冷却時の熱応力も考慮すべきと考えられる。そこで、 $\Delta P_s = \sigma_1^{\max} - \sigma_3^{\min}$ を定義した。 σ_1^{\max} は、スプレー冷却における最大主応力の最大値である。 ΔP_s も損傷の順列とほぼ一致する。鋼 A については、 $\sigma_1^{\max} = 237 \sim 474 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_3^{\min} = -447 \sim -1214 \text{ MPa}$ であった。応力比に準じて σ_1^{\max} を σ_3^{\min} で除した値は -0.2 ~ -1.1 であった。 σ_1^{\max} の増加によって、平均的な応力はプラスに近づく。また、強い熱応力が作用する領域は意匠面から深さ 3 ~ 4 mm であり、ヒートチェックの深さが最大で約 3 mm であった事実と対応した。

本研究では、 $\Delta P_s / \sigma_y$ と亀裂発生ショット数 N_c を関連付ける。 σ_y は最高温度 T_{\max} における 0.2% 耐力であり、 T_{\max} が同じでも鋼種や初期硬さによって σ_y は異なる。熱応力と高温強度の比で損傷を評価する考え方は、equ.(4)⁷⁾ や従来の検討¹⁾ と同様である。

5. 4 湯流れ

$\Delta P_s / \sigma_y$ と N_c の相関を Fig. 8 に示す。硬さが異なる鋼 A の部位 a ~ 部位 e に注目した。 N_c はダイカスト試験の観察結果、 $\Delta P_s / \sigma_y$ は湯流れ解析の結果である。 σ_y に対して ΔP_s が大きくなるほど N_c は小さくなる。

また、 $\Delta P_s / \sigma_y$ が同一でも I_{vf} が大きいほど N_c は小さい。図中、V1 と V2 および V2 と V3 には約 10 倍の差がある。

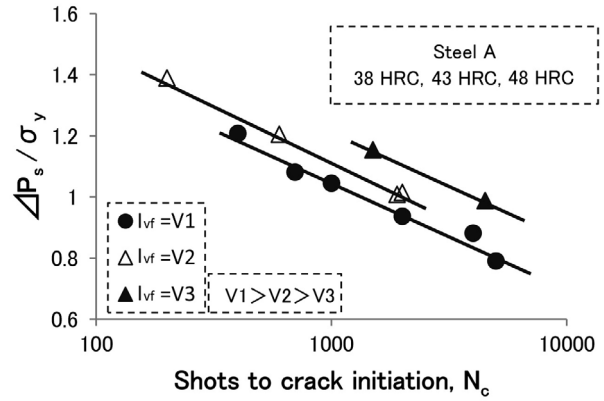


Fig. 8. Influence of thermal stress and proof stress on crack initiation.

V1 is approximately 100 times greater than V3.

Fig. 4 の鋼 A を対象とし、鋳造品の表面粗さの変化を Fig. 9 に示す。部位は湯口前の b である。鋳造 1 ショット目では滑らかな研削肌の金型表面が転写されている。1000 ショットでは、金型の表面粗さ（十点平均粗さ）が約 1.5 倍になった。ただし、この時点では金型に亀裂は確認されていない。一方、亀裂が発生した後の 2000 ショットでは、面粗さが初期の約 4 倍になっている。なお、この部位における流速の最大値は 54 m/s と湯流れ解析で見積もられた。

Fig. 8 と Fig. 9 から、湯流れによるエロージョンはヒートチェックを助長することが分かる。その理由として、表面粗さの増加による応力集中、圧縮応力が残留する加工変質層の除去、などが考えられる。溶湯の流動がヒートチェックに影響することを定量的に明らかにした。以上より、ヒートチェックはエロージョンを伴う熱疲労現象と推測される。

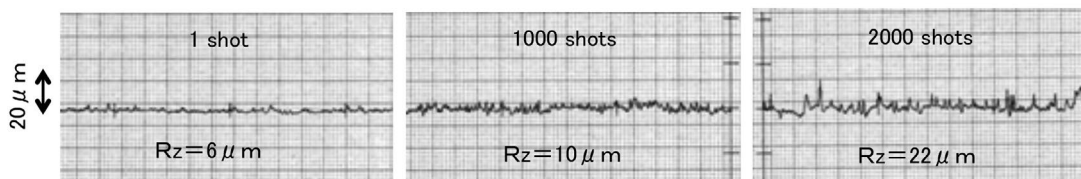


Fig. 9. Surface roughness of casting die. Investigated location corresponds to "b" of Fig. 3.

6. 損傷予測モデルの妥当性検証

得られた知見をもとに N_c を定式化した。

$$N_c = f(\sigma_y, \Delta P_s, I_{vf}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_y = f(\text{鋼種}, \text{HRC}, \text{温度}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta P_s = f(\lambda, a, E, \nu) \dots\dots\dots (7)$$

λ, a, E, ν も鋼種と温度の関数である。以下では、鋼種や硬さや金型形状が変化した場合の N_c を MAGMASOFT で計算し、予測精度を検証する。

6. 1 鋼種と硬さの影響

Fig. 10 は 43 HRC の 3 鋼種の N_c とその分布を示す。各水準とも、左半分がダイカスト試験の結果、右半分が湯流れ解析による予測結果である。 N_c の小さい部位は

ど、10000 ショット後の損傷が顕著である。

また、耐ヒートチェック性の鋼種間差が湯流れ解析で正確に再現できた。 λ と σ_y が高い鋼 C は損傷が軽度である。亀裂が著しい湯口前 b 部の ΔP_s は、鋼 C が鋼 A よりも約 10 % 低い。鋼 C は σ_y も高いため、効果的に $\Delta P_s / \sigma_y$ を小さくすることができる。この結果、鋼 C の N_c は鋼 A の 2.4 倍になった。

Fig. 11 は硬さが異なる鋼 A の N_c を示す。硬さが耐ヒートチェック性に及ぼす影響を湯流れ解析で正確に再現できた。硬さを上げることによって、損傷は著しく抑制される。これは、 σ_y を大きくして $\Delta P_s / \sigma_y$ を小さくした効果である。48 HRC の N_c は 43 HRC の 2.6 倍になった。

N_c を実測値と計算値で比較したところ、差は最大で 25 % であった。予測精度は比較的に良好である。鋼種や硬さが変化しても、 N_c とその分布をかなり正確に予測できることを確認した。

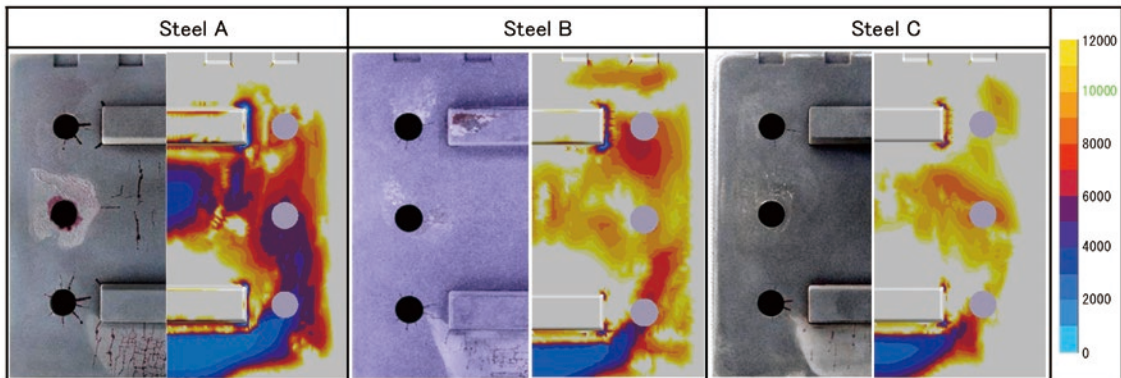


Fig. 10. Comparison of damage distribution between die casting tests and numerical analyses.

Dies of different steels are treated to 43 HRC. Maximum calculation error of crack initiation timing is approximately 25 %.

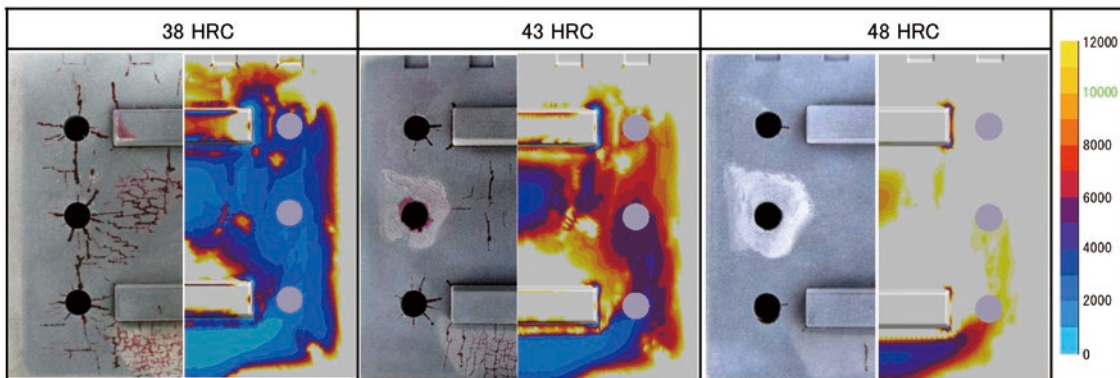


Fig. 11. Comparison of damage distribution between die casting tests and numerical analyses.

Dies of steel A are treated to different hardness. Maximum calculation error of crack initiation timing is approximately 25 %.

6. 2 金型形状の影響

Fig. 12は、突起の位置を変えた場合のダイカスト試験結果と解析結果の比較を示す。金型は43 HRCの鋼Aである。カラーチェックは5000ショット後と10000ショット後であるが、鋳造品の表面観察によって推定した N_c の概略値を図中に併記した。

全体的な傾向として、湯流れ解析とダイカスト試験の

損傷分布は良く一致している。部位によっては N_c を約1000ショット小さく見積もったが、誤差は20%程度であり予測精度は良好である。非常に複雑な湯流れとなる金型形状においても、ヒートチェックの発生ショット数や損傷の分布をかなり正確に予測できることが期待される。

また、金型中央付近の左側と右側で N_c には1.7倍の差が生じ、ヒートチェックに及ぼす湯流れの影響が大きいことを再確認した。

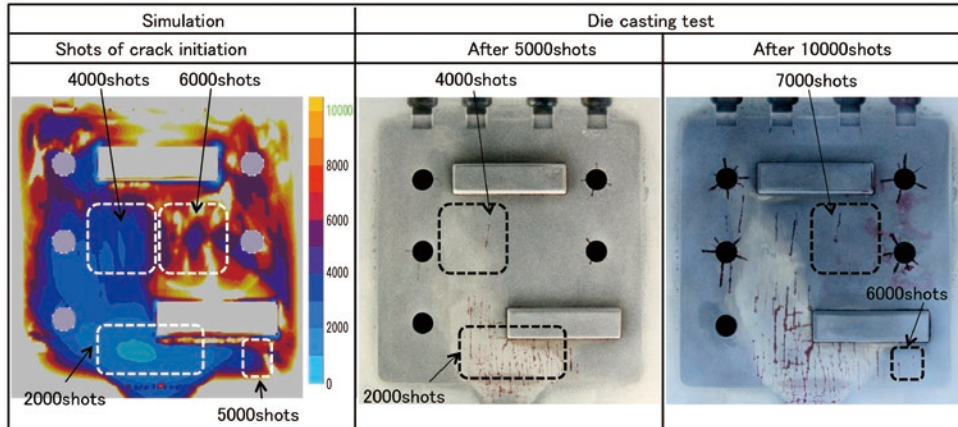


Fig. 12. Comparison of damage distribution between die casting tests and numerical analyses.

Steel A with 43 HRC is evaluated. Maximum calculation error of crack initiation shot is approximately 20 %.

7. 結 論

- 1) 亀裂が発生する鋳造ショット数 N_c は、 $\Delta P_s / \sigma_y$ が小さいほど大きくなった。 $\Delta P_s = \sigma_1^{\max} - \sigma_3^{\min}$ である。 σ_1^{\max} はスプレー冷却における引張応力の最大値(最大主応力の最大値)、 σ_3^{\min} は溶湯と接触して発生する圧縮応力の最大値(最小主応力の最小値)である。 σ_y は、金型の高温耐力である。
- 2) 耐ヒートチェック性に支配的な影響を及ぼす鋼材特性は、 σ_y と熱伝導率 λ である。 $\Delta P_s / \sigma_y$ を低減して N_c を大きくするには、 λ の増加で ΔP_s を小さくし、初期硬さを上げて σ_y を大きくすれば良い。すなわち、高熱伝導率鋼を硬くすることがヒートチェック抑制に非常に有効である。
- 3) $\Delta P_s / \sigma_y$ が同一でも、流速の時間積分値 I_{vf} が大きいほど N_c は小さくなる。すなわち、湯流れが激しい部位ほど亀裂が早期に発生する。湯流れがヒートチェックに影響することを初めて定量的に明確化した。鋳造ショット数の増加につれ、エロージョンで金型の表面粗さは大きくなる。したがって、荒れた表面の凹部における応力集中がヒートチェックを助長したと考えられる。

- 4) N_c を σ_y 、 ΔP_s 、 I_{vf} の関数として定式化した。鋼種、硬さ、型形状が N_c とその分布に及ぼす影響を最大誤差25%で予測できた。

本報告は、2012日本ダイカスト会議(2012年11月)講演論文集に掲載された資料を加筆修正したものである。

(文 献)

- 1) 長澤政幸, 久保田邦親, 田村庸, 横尾英俊: CAMP-ISIJ, 12(1999), 1175.
- 2) 金川淳, 栢原芳郎, 岡島琢磨: 型技術, 20(2005), 15, 86.
- 3) 古谷匡, 栢原芳郎: 2004日本ダイカスト会議論文集(2004), 59.
- 4) 横井直樹, 井上幸一郎: 型技術, 23(2008), 8, 150.
- 5) 河野正道, 井上幸一郎, 横井直樹: 2010日本ダイカスト会議論文集(2010), 21.
- 6) 平修二: 熱応力と熱疲労, 日刊工業新聞社, 1974, 102.
- 7) 社団法人日本ダイカスト協会: ダイカスト技能者ハンドブック, 双葉レイアウト, 2006, 169.
- 8) 井澤龍介: 型技術, 21(2006), 5, 43.
- 9) 古川雄一, 佐藤理通, 吉倉冬彦, 植林秀悟, : 2004日本ダイカスト会議論文集(2004), 63.