

ダイカスト金型のヒートチェック生成挙動

辻井 信博*・高杉 昌志*²・阿部 源隆*³

Behavior of Heatcheck Cracks on the Dies during Diecasting

Nobuhiro Tsujii, Masashi Takasugi and Genryu Abe

Synopsis : The behavior of heat checking occurred on the cavity insert made of SKD61 hot work tool steel during aluminum alloy die casting was investigated. From the result of periodical observation for heat checking printed on the cast products it was clear that the heat checking cracks were composed of two types of cracks i.e., primary and secondary heat checking cracks. At the beginning of primary heat checking, cracks initiated on the surface of the die and grew parallel with each other. Subsequently, secondary heat checking cracks occurred at the primary cracks and grew with the direction at right angles to them. Heat checking cracks which propagated inside of the die possessed the similar secondary cracks and these cracks were connected each other by cyclic stress during die casting. Consequently, spalling of the die occurred. It was also found that softening occurred in the vicinity of the die surface and the softening depth was in good agreement with the mean cracks length of heat checking.

Key words : die casting; hot work tool steel; heat checking; low cycle fatigue; failure analysis.

1. 緒言

近年、工業製品の高機能化、高性能化および多様化ニーズに対し、アルミニウムがその軽量性から素材として注目されている。アルミニウム製品の20%近くはダイカスト製品であり、その内およそ80%が自動車向けの需要¹⁾である。自動車用ダイカスト製品は、シリンダブロックやトランスミッションケースなど多くの部品で実用化²⁾されており、とどまることのない軽量化ニーズによって、その需要も年々増加の一途をたどっている。これらダイカスト製品自体も、製品肌重視、大型化および精密化の傾向³⁾にあるとともに、スクイズキャスティング法⁴⁾⁵⁾に代表されるような新しい鋳造技術の導入や、高Si系アルミ合金の採用にともなう溶湯温度の上昇により金型に対する熱負荷はますます過酷になっているのが現状である。このようなダイカスト技術の高度化と多様化に応じて強度や靱性のより優れた高性能金型鋼の開発が望まれている。

ところでダイカスト法は、精密な金型に溶融合金を高温で圧入して、高精度で鋳肌の優れた鋳物を短時間に大量生産する鋳造方式であり⁶⁾、金型の品質はダイカスト製品の品位に大きく影響する。ダイカスト用金型には、主にSKD61系熱間ダイス鋼が使用されており、その型寿命要因の70%以上がヒートチェックによることが報告⁷⁾されている。このヒートチェックは、熱疲労現象により金型表面に生じる亀甲状の割れ⁸⁾であり、溶融アルミの充填による金型表面の加熱膨張とその後の離型剤塗布による急速な冷却

収縮のため発生する熱応力の繰返しに起因している。金型鋼のヒートチェック特性に関する研究報告は古くから数多くあり、合金元素⁹⁾¹⁰⁾、熱処理^{11)~13)}、表面処理^{14)~17)}、放電加工¹⁸⁾¹⁹⁾、試験方法^{20)~22)}、高温疲労^{23)~26)}など多方面からの検討がなされている。しかしながら、ほとんどの実験は、専用の小型試験片でヒートチェックを再現し評価する手法を用いており、実際のアルミダイカスト金型に着目しヒートチェック発生挙動を詳細に研究した例は非常に少ない²⁷⁾。そこで、本研究では、実金型のヒートチェック発生・成長挙動を明確にすることを目的として、実際の鋳造過程で試験金型に発生するヒートチェックを一定のショット回数毎に繰返して連続的に観察するとともに、それらの挙動をこれまでの基礎的な知見にもとづいて考察した。

2. 実験方法

2・1 鋳造条件

使用した鋳造機は型締力250tの横型ダイカストマシンであり、金型には、Fig. 1に示す製品2ヶ取りの入子型を採用した。金型設計において、ヒートチェックの発生を促進させる目的で、ゲート角度を通常条件より狭くし15°とした。これにより湯の直進性が増し、湯口付近キャビティ部の熱負荷を大きくすることができる。アルミニウム合金には、最も汎用的なACD12を用い、溶湯温度を650℃に設定した。

* 技術研究所特殊鋼研究室

* 2 技術企画部技術企画室高合金技術チーム

* 3 技術研究所特殊鋼研究室（現技術企画部技術開発室）

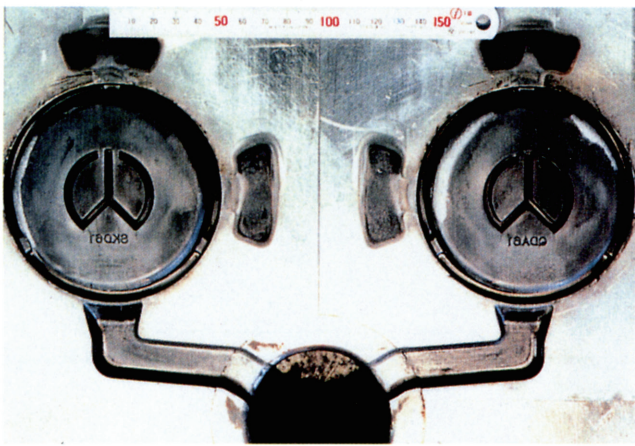


Fig.1 Appearance of cover dies.

2・2 金型材

入子型をヒートの異なる二種類の市販のSKD61系熱間工具鋼で製作し、それぞれを左右対称に主型に組込み同時に鋳造実験を行った。それら金型鋼の化学成分をTable 1に示す。Table 2に入子型の寸法、熱処理条件、硬さおよびシャルピー衝撃値を示す。なお衝撃値は実験終了後に入子型から試験片を採取し得られた値である。両金型材とも約40J/cm²の高い靱性を有している。一般に、ダイカスト用金型は硬さ42~50HRCで使われるが、製品の大きさ、複雑さ、鋳造の難易および肉厚などによって適正值は異なる。ヒートチェックは金型の硬さが高いほど抑制されることが知られており本金型のように小型で比較的形状の単純な金型の場合、通常48~50HRC程度の硬さで使用される。しかし、本実験では、ヒートチェックの発生を早めるために44HRCと硬さを低めに設定した。

Table 1 Chemical composition of steels used for cavity inserts.

(mass%)								
Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
A	0.38	1.0	0.42	0.012	0.001	5.0	1.2	0.50
B	0.34	1.0	0.42	0.007	0.001	5.0	1.2	0.55

Table 2 Specifications for dimension, heat treatment and mechanical properties of cavity inserts.

Dimension of cavity insert	190 x 190 x 65 mm
Heat treatment	1303K x 2h AC → 833K x 4h AC + 881K x 4.5h AC
Hardness	Steel A : 43.8HRC, Steel B : 43.5HRC
Charpy impact value	Steel A : 41.4 J/cm ² , Steel B : 39.5 J/cm ² (* JIS No.3)

2・3 ヒートチェックの観察方法

総試験ショット数を2×10⁴ショットとし、試験後の入子型について、外観観察、カラーチェック、ミクロ組織観察、クラック数測定、および表面硬さ測定を行った。また試験中のヒートチェック発生挙動観察を、1×10³ショット毎に2×10⁴ショットまで繰返して採取したダイカスト製品に転

写されたヒートチェックについて行った。主にヒートチェックが明瞭に現れた固定入子型のゲート近くのキャビティ面で観察を実施した。

3. 実験結果および考察

3・1 2×10⁴ショット後の金型損傷状況

試験後の割れ発生状況を観察する目的で固定および可動入子型にカラーチェックを施した。その外観をFig. 2に示す。金型に発生した割れは、カラーチェックにより赤い染みとして観察される。可動入子型の押出ピン穴周辺および可動・固定両型のコーナ部には比較的長い割れが発生している。また湯口近くのキャビティ面では、平面であるにもかかわらずヒートチェックの発生が顕著である。Fig. 3に示すように、この部分のヒートチェック発生状態は、左右対称に配置した二種の入子型ともほぼ同程度であり金型材質の影響は認められなかった。

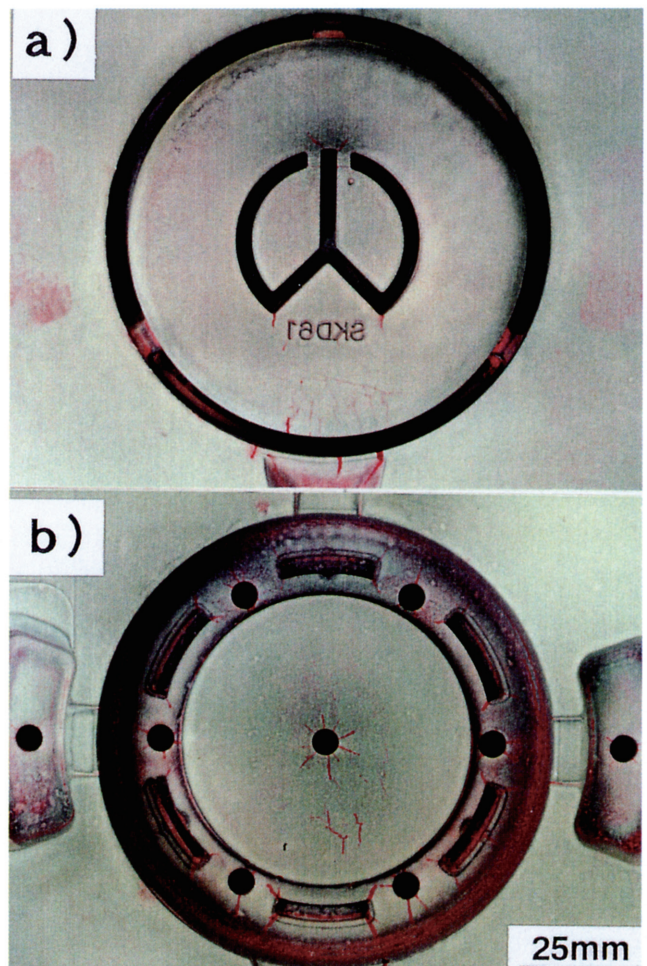


Fig.2 Results of dye penetrant test showing cracks occurred on cavity inserts after 2X10⁴ shots. a) Cover die b) Ejector die

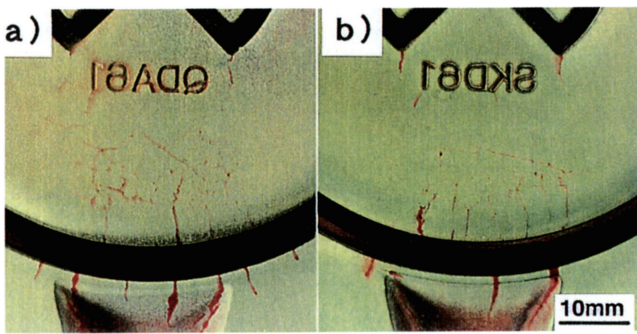


Fig.3 Comparison of heat checking occurred on the surface of dies between steel A and B. a) Steel A b) Steel B

湯口付近の固定型キャビティ面の外観および断面ミクロ組織をFig.4に示す。Fig.4(c)に示すように平坦面A部には、深さ0.5mm以下の多数のヒートチェックが型表面から発生している。また、これに垂直な方向であるB部型面には、短いヒートチェックの他にFig.4(b)に示すような非常に深い割れも観察された。このような深い割れは、型表面に発生したヒートチェックが鋳造時の機械的な衝撃力により伝播したものであり、金型の硬さ、組織および材質に影響される。これを抑制するためには、金型の破壊靱性値をさらに高める必要がある。具体的には、金型の焼入冷却速度をできるだけ速くして組織を微細化すること²⁸⁾や破壊靱性値のできるだけ高い材質を選定すること²⁹⁾、あるいは単純に硬さを下げるなどがその対策として挙げられる。

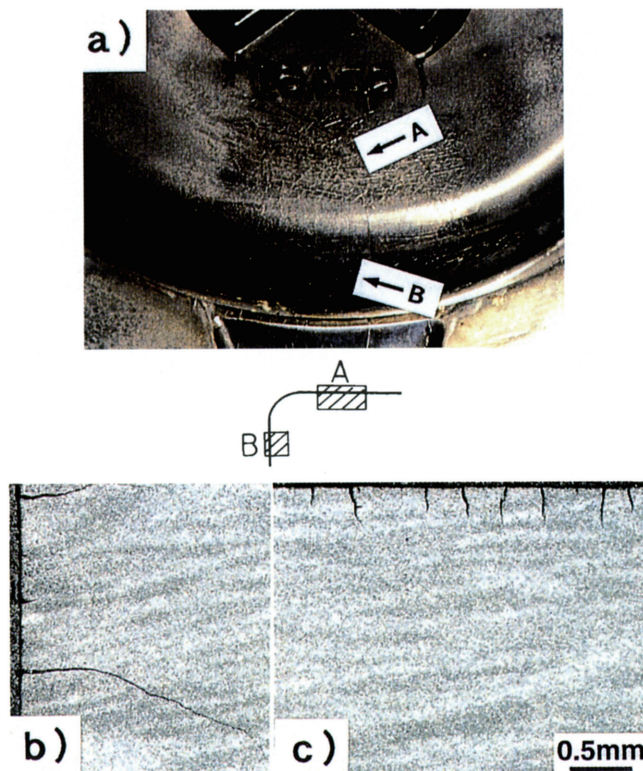


Fig.4 Cross sectional view of heat checking.
 a) External view showing the sampling position A and B.
 b) Optical micrograph in position B.
 c) Optical micrograph in position A.

これらヒートチェックの他に金型の損傷形態として、左右両方の可動入子型の湯口付近に金型が侵食された溶損も観察された。

上記A部に発生したヒートチェックの個数、平均深さおよび最大深さを左右の固定入子型について測定した結果をTable 3に示す。一般に耐ヒートチェック性の評価尺度としては欠けおよび大割れの発生を考慮すると、最大深さによる評価が最適と考えられる。しかし、ダイカスト金型は、ヒートチェックによる製品の肌荒れも重要な因子であり、これは平均深さによって評価できる。Table 3の測定結果から評価すると、両金型のヒートチェック平均深さおよび最大深さはほぼ同等であり、耐ヒートチェック性の差は認められなかった。

Table 3 Results of measurements for heat checking.

Steel	Number of cracks (/10mm)	Mean crack length (mm)	Maximum crack length (mm)
A	29.5	0.28	2.30
B	28.0	0.27	2.60

山崎ら²⁴⁾はSKD61製アルミダイカスト金型について熱伝導解析を行い、金型表面温度は溶湯注入直後に873K近くまで昇温することを報告している。これは、型表面が鋳造中に焼戻温度付近の温度に長時間加熱されることを意味しており、ヒートチェックの発生挙動に金型材の軟化挙動が関連していることが考えられる。辻井ら²³⁾はこの点を検討するために、SKD6の873Kでの高温低サイクル疲労試験を行い、疲労中に型材は疲労軟化を起し疲労き裂（ヒートチェックに相当する）の発生を助長することを報告している。

そこで、本実験において実際のダイカスト金型の型表面が軟化しているかを確認した。ヒートチェックの発生している型表面の硬さ分布測定結果をFig.5に示す。Fig.5から明らかなように母材硬さ約430HVに対して型表面から約0.15mm深さまでの範囲で硬さ低下が認められた。この深さは、Table 3に示したヒートチェックの平均深さとオーダ的にはほぼ一致することから、実際の金型においてもヒートチェック発生挙動に型材の軟化挙動が関与していることは明らかである。高温疲労中の軟化挙動は、動的な疲労軟化と温度的な焼戻軟化によるもので、組織的には基底組織の転位密度の低下と、Cr炭化物の凝集粗大化として現れる²³⁾。従って、初期ヒートチェックを抑制するためには、高温軟化抵抗性のより高い型材を選定することが有効である³⁰⁾。

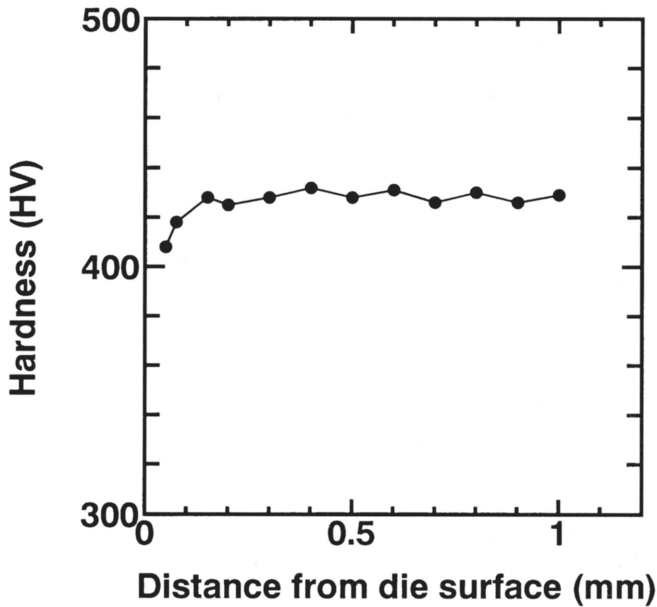


Fig.5 Hardness distribution of the die from the surface.

3・2 ヒートチェック発生および成長挙動

Fig. 6 に、 1×10^3 ショット毎に 2×10^4 ショットまで採取したダイカスト製品の外観を示す。観察部位は、ヒートチェックが明瞭に現れた固定入子型の湯口近くのキャビティ面に相当する部位であり、Fig. 3 に示したような型表面のヒートチェックが転写されている。ヒートチェックは 4×10^3 ショット (b) から明瞭に観察され始め、それらの成長方向は写真水平方向に優先している。 5×10^3 ショット (c) では、それらに直角方向のヒートチェックが発生し、その結果ヒートチェックの発生密度が増加する。しかしそれ以降のショットではその発生密度にはほとんど変化がなく、各々のヒートチェックがより明瞭になっていく傾向にある。これは金型側からみると各ヒートチェックの型表面での開口幅と型内部への深さが増していることを示している。また 1×10^4 ショット (f) になると表面肌が荒れ始め、その肌荒れはショット数の増加によりさらに激しくなる。その他、岩永ら²⁷⁾ が指摘しているように明らかに研磨きずから発生した線状の長い、Fig. 7 に示すようなヒートチェックも観察される。さらに、 9×10^3 ショット (e) からは所々に小さなバリが発生し、それらのバリは金型に生じた欠けが転写されたものである。このバリの発生機構については次節で詳しく述べる。

3・3 ヒートチェックの成長および欠けの発生機構

前節で示したように、鑄造中の型表面には、まず一定方向に平行なヒートチェックが発生、成長した後、新たなヒートチェックがそれらに直角方向に形成される。以降、前者を一次ヒートチェック、後者を二次ヒートチェックと呼ぶ。Fig. 8 は、ヒートチェックの成長およびバリ発生挙動を示している代表的な製品肌の推移である。 6×10^3 ショット (a) で、図中矢印で示すような互いに平行な一次ヒートチェックが発生する。 9×10^3 ショット (b) では、新たに図

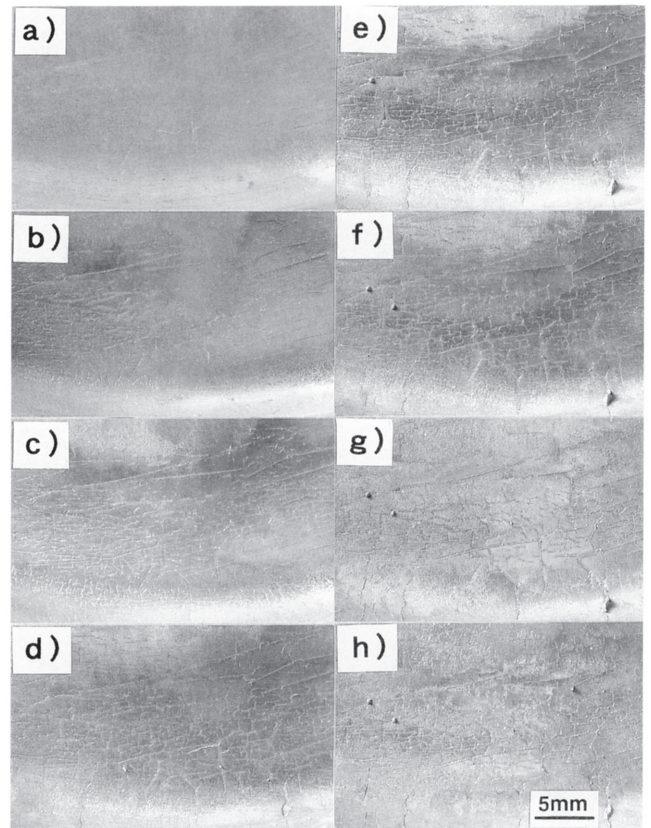


Fig.6 Heat checking printed on the cast products at various shots of casting.

a) 3×10^3 , b) 4×10^3 , c) 5×10^3 , d) 8×10^3 , e) 9×10^3 , f) 1×10^4 , g) 1.5×10^4 , h) 2×10^4

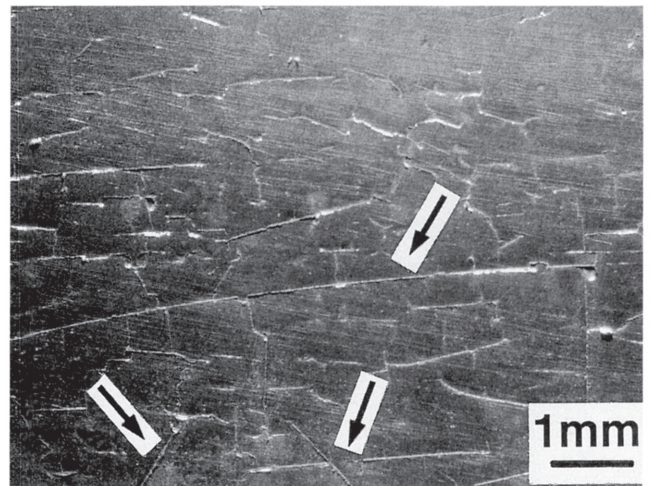


Fig.7 Typical heat checking resulting from scratches produced by polishing.

中矢印で示す二次ヒートチェックが発生する。次に、一次および二次ヒートチェックが連結した状態が 1.1×10^4 ショット (c) に観察される。 1.3×10^4 ショット (d) で、この閉鎖サークル上にバリが発生した。製品のバリは、対応する金型部分の欠け発生を意味している。Fig. 9 は、ヒートチェックの金型内部への進行形態を示した断面写真である。金型内部のヒートチェックには、型内部に真直ぐ進展した主き裂の他に、型表面に平行な枝分かれした副き裂 (矢印)

が幾つか観察される。さらにそれら副き裂の発生は、図中右方向に限られていること、および各副き裂上方の型表面がわずかに盛上がっているのが非常に特徴的である。

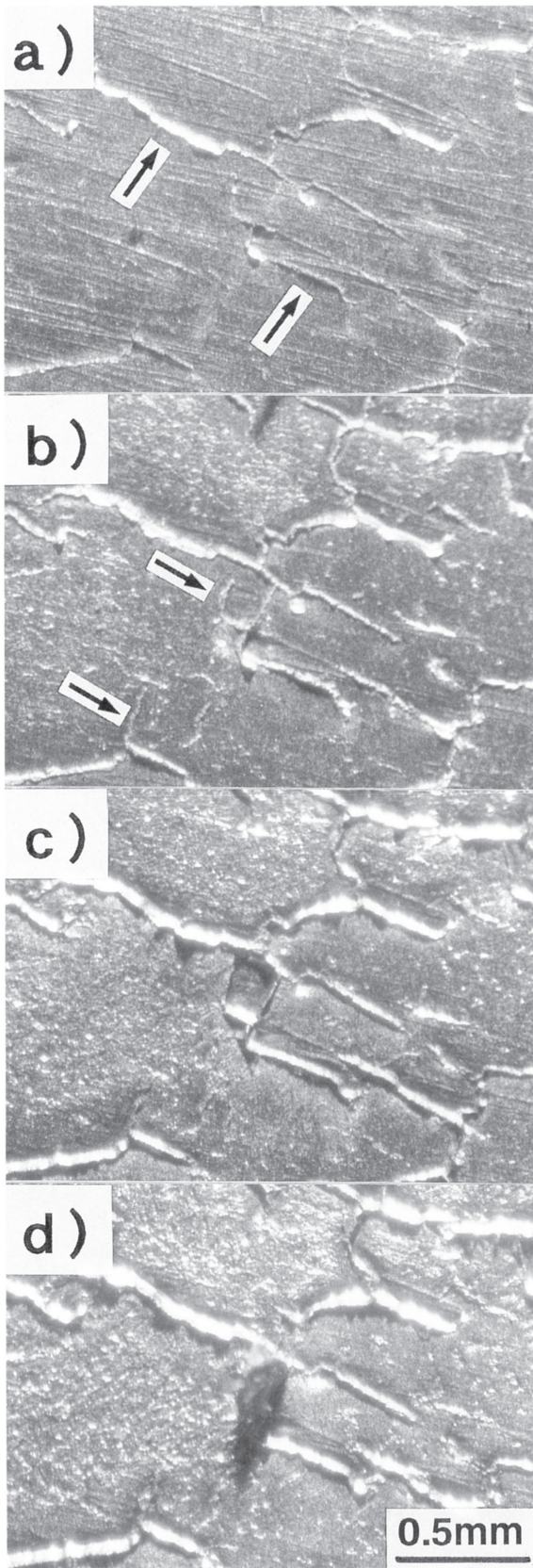


Fig.8 Photographs of heat checking printed on the cast products showing primary and secondary heat checking and spalling.
 a) 6×10^3 , b) 9×10^3
 c) 1.1×10^4 , d) 1.3×10^4 shots



Fig.9 Cross sectional view of heat checking with branched cracks.

以上の観察結果から、ヒートチェックの成長および欠けの発生挙動を考察しモデル化したものをFig.10に示す。ヒートチェックの生成は平行な一次き裂の発生(a)と、それに直角な二次き裂の発生(b)から成り、金型の欠けは、連結した一次および二次ヒートチェックと型内部に発生した副き裂が三次元的に合体することにより発生すること(c)(d)が明らかとなった。

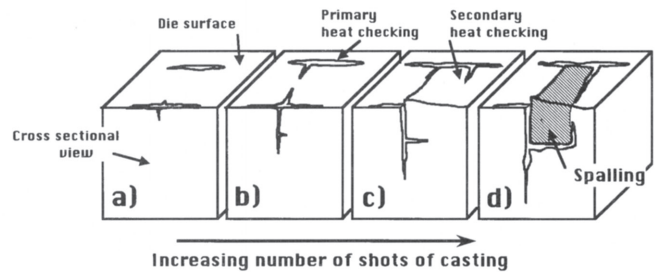


Fig.10 Schematic illustration for processes of heat checking growth and spalling occurrence.

4. 結論

アルミダイカスト casting 過程中のヒートチェック生成挙動を連続的に観察するとともに、試験終了後の金型を調査することにより以下のことが明らかとなった。

- (1) 試験終了後の金型には、押出ピン穴周辺部および型コーナー部の長い割れと湯口近くのキャビティ面のヒートチェックおよび溶損が発生していた。
- (2) 熱疲労に起因したヒートチェックは、深さ0.5mm以下であり、一部ヒートチェックは、 casting 時の機械的な衝撃力により非常に深く伝播する。
- (3) 型表面から約0.15mm深さまで硬さ低下が認められ、この深さは、ヒートチェック平均深さとほぼ一致することから、実際の金型においてもヒートチェック発生挙動に型材の軟化挙動が関与していることが明らかとなった。
- (4) ヒートチェックは、型内部に真直ぐ進展した主き裂の他に、型表面に平行な枝分かれした副き裂で構成されている。それら副き裂の発生方向は、一方向に限定されており、その上方の型表面は、わずかに盛上がる。
- (5) ヒートチェックの生成は、平行な一次き裂の発生と、それに直角な二次き裂の発生から成り、金型の欠けは、

連結した一次および二次ヒートチェックと型内部に発生した副き裂が三次元的に合体することにより発生することが明らかとなった。

- (6) 左右対称に配置したヒート条件の異なる二種類の金型鋼間でヒートチェック発生状態には有意差がなかった。

文 献

- 1) アルトピア, 24 (1994) 3, p.69
- 2) 小川修司: 型技術, 9 (1994), 4, p.72
- 3) 型技術便覧 (型技術協会編), (1989), p.694 [日刊工業新聞社]
- 4) 鈴木栢秀, 大杉泰夫: 型技術, 9 (1994), 4, p.45
- 5) 中村慎吾, 栢原芳郎: 型技術, 7 (1992), 4, p.25
- 6) 菅野友信, 植原寅蔵: ダイカスト技術入門, (1971), p.1 [日刊工業新聞社]
- 7) 菅野友信, 植原寅蔵: アルミニウム合金ダイカスト/その技術と不良対策, (1988), p.201 [軽金属出版]
- 8) 藤原達雄: 電気製鋼, 30 (1959), 1, p.72
- 9) 上原紀興, 並木邦夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S581
- 10) 藤原達雄, 松永幸雄, 門脇 亮: 電気製鋼, 28 (1957), 5, p.361
- 11) 上原紀興, 並木邦夫, 高橋国男: 電気製鋼, 52 (1981), 3, p.165
- 12) 保前正夫, 関 勇一, 芦田善郎, 辻 克己: 鉄と鋼, 68 (1982), S1455
- 13) 大森宮次郎, 伊藤伸英, 長谷川勇治: 第31回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, (1990), p.9
- 14) 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方 勲: 精密工学会誌, 56 (1990), 5, p.906
- 15) 藤木 栄, 竹内栄一, 阿部敏夫: 第17回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, (1983), p.27
- 16) 大森宮次郎, 伊藤伸英, 長谷川勇治, 清水紘一: 第33回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, (1991), p.63
- 17) 田村 庸: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1731
- 18) 日原政彦, 向山芳世: 電気加工学会誌, 26 (1992), 52, p.16
- 19) 宮田良雄, 辻 新次, 田中 武: 大阪府立工業技術研究所報告, 88 (1986), p.37
- 20) 藤原達雄: 材料, 13 (1964), p.611
- 21) L.-Å. Nörström, M. Svensson and N. Öhrberg: Metals Technology, (1981), p.376
- 22) 田村 庸: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1730
- 23) 辻井信博, 阿部源隆, 深浦健三, 砂田久吉: 鉄と鋼, 80 (1994), p.664
- 24) 山崎善夫, 横幕俊典: 熱処理, 30 (1990), 4, p.213
- 25) 江原隆一郎, 山田義和, 山田 保, 窪田勝昭: 材料, 36 (1987), p.513
- 26) G. Engberg and L. Larsson: Low Cycle Fatigue, ASTM STP942, (1988), p.576
- 27) 岩永省吾, 榊原雄二, 小長哲郎, 中村元志, 神谷孝則: 材料, 36 (1987), p.604
- 28) 奥野利夫: 鉄と鋼, 69 (1983), p.655
- 29) 山田春彦, 猿木勝司, 小川一義: 豊田中央研究所 R & D レビュー, 27 (1992), 4, p.37
- 30) 辻井信博, 阿部源隆, 深浦健三, 砂田久吉: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1734