

ダイカスト金型表面に発生する熱応力亀裂に対するCAEの適用

Using Computer-Aided Engineering (CAE) to Examine Thermal Stress Cracks on Die-Casting Die Surfaces

小畑 克洋*
Katsuhiro Obata

長澤 政幸*
Masayuki Nagasawa

田村 庸*
Yasushi Tamura

中道 義弘**
Yoshihiro Nakamichi

ダイカスト製品の大型化、高意匠化およびハイサイクル化が進む中、従来に比べ casting 時の金型材料への負荷が大きくなる傾向にある。そこで、ダイカスト金型損傷に及ぼす金型の使用条件および金型材料の影響を明確にするため、ダイカストマシンを用いた実機 casting による金型の損傷形態を観察し、金型使用条件と金型損傷の相関性について検討を行った。さらに、実機試験結果との合わせ込みを行うことにより、CAE による亀裂の評価を試みた。

Thermal and mechanical loads on die material are increasing as die-casting products are growing in size, becoming more complicated in design, and as a result of high-cycle production. In this study, a die-casting machine was used to observe the damage profile of the actual die and clarify the influence of the die material and operating conditions. We examined the relationship between the conditions of use and die damage. Furthermore, CAE was applied to the test results to examine cracks on die surfaces.

● Key Word : CAE, ヒートチェック
● Production Code : DAC-MAGIC®

● R&D Stage : Development

1. 緒言

ダイカストは、アルミニウムに代表される熔融金属を金型に圧入する casting 法である。優れた生産性と高い寸法精度を有することから、産業機械、特に自動車部品に多用されて市場の拡大を図ってきた。自動車の燃費改善のために軽量のアルミニウムダイカスト部品の採用が増加しており、世界市場での成長が期待される。自動車部品としてのダイカストは、主にシリンダーブロックや駆動系の筐体などに使用されてきたが、材料特性の最適化と欠陥を抑制する特殊ダイカスト技術との組み合わせにより、シャーシなどの構造系部材への適用が進みつつあり、自動車部品へのダイカストの適用範囲が広がっている。また、ダイカストの特長である高い生産性をさらに向上させるべくハイサイクル化が進められている。

ハイサイクル化を指向する場合、金型温度は上昇する傾向にあり、金型の過熱を回避するため、効果的な抜熱を可能にする冷却孔の配置、離型剤大量塗布による金型表面の直接的な冷却が実施される。その場合、金型表面は短い時間間隔で、溶湯による加熱と離型剤による冷却にさらされ

るため、金型には熱応力に起因する損傷が発生する。

CAE の発達により、構造物での亀裂解析が報告されているが、ダイカスト金型の構造解析はほとんど報告されていない。そこで、実験型による詳細な温度測定を基に、CAE との合わせ込みにより、熱応力および casting 圧とヒートチェックの関係性を調査した。

2. 金型表面に発生するヒートチェック

高速でのアルミ溶湯充填と、高圧下での凝固により casting されるダイカストに使用される金型には、加熱と冷却が 1 サイクル毎に繰り返される。溶湯の充填直後、金型表面は高温となり、急激に熱膨張するため内部や周囲からの拘束により（場合によっては塑性域に達する）圧縮応力が生じる。その後、水溶性離型剤の塗布やエアブローなどで表面が急激に冷やされ、表面と内部の温度が逆転することで引張応力が生じる。これらの圧縮および引張りの応力が繰り返し負荷され、熱疲労によりヒートチェック（亀裂）が発生する。図 1 にヒートチェック形態の一例を示す。

* 日立金属株式会社 高級金属カンパニー
** 日立金属株式会社 高級機能部品カンパニー

* High-Grade Metals Company, Hitachi Metals, Ltd.
** High-Grade Functional Components Company, Hitachi Metals, Ltd.

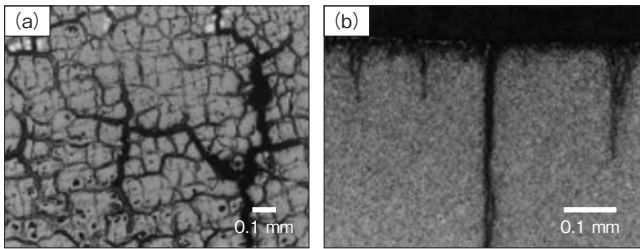


図1 ダイカスト金型ヒートチェックの一例
(a) 表面 (b) 断面
Fig. 1 Example of heat check
(a) surface view (b) cross-sectional view

3. 実験方法

3.1 平板実験金型による温度計測

実機での casting 試験により casting 条件の差異による金型表面近傍の温度変化と温度勾配、および1サイクル中の温度変化を詳細に把握した。

実験には、型締め力2,500 kNのダイカストマシンと図2に示す平板金型を使用した。熱電対は、直径1 mm (10本)と3 mm (10本)のSUS保護管付きK typeを使用した。左右対称に2つの領域に設置して金型表面からの深さを変えて計測を行った。熱電対配置の概略を図3に示す。 casting 条件は、射出速度、キュアリングタイム、内部冷却の水量と位置、離型剤塗布時間を変数として全16条件で実施した。

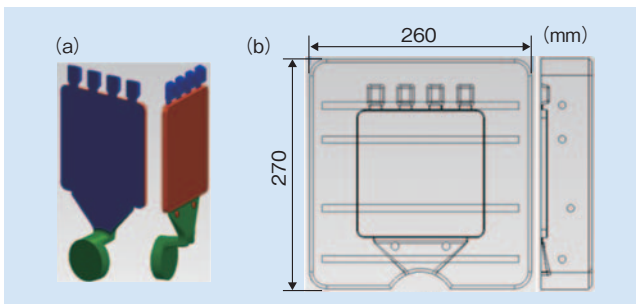


図2 平板実験金型 (a) 方案付平板形状素材 (b) 金型平面図
Fig. 2 Experimental die (cavity model) for temperature measurement
(a) structure (b) plane figure

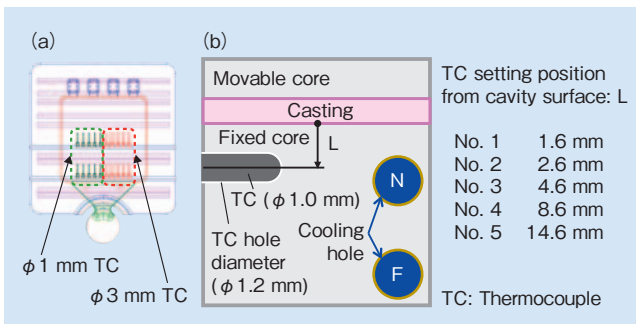


図3 熱電対配置 (a) 平面 (b) 断面
Fig. 3 Layout of the thermocouples (a) plane figure (b) cross-section

3.2 熱解析境界条件の設定

熱解析と応力解析には、CAPCAST® (「CAPCAST」は(株)CAPCASTの登録商標)、ADSTEFAN® (「ADSTEFAN」は(株)日立産業制御ソリューションズの登録商標)および

PERMAS (Intes GmbH 製)の各CAEソフトを使用した。実機による金型表面近傍での温度計測結果を基に、熱解析用境界条件をチューニングし、合わせ込みを行って解析精度の向上を図った。

3.3 ヒートチェック(亀裂)と casting 条件との因果関係の確認

ヒートチェックによる亀裂長さや casting 条件の関係性について実機での結果と熱解析、構造解析との結果を比較し検証した。

今回検証に使用したヒートチェック評価用金型¹⁾の外観を図4に示す。熱間工具鋼の汎用鋼種であるSKD61 (JIS)と高温強度と靱性を向上させた日立金属開発鋼種のDAC-MAGIC®とのヒートチェックによる亀裂進展性評価実験の結果を比較した。ヒートチェックは、初期亀裂発生までと亀裂が進展成長していく過程があるが、初期亀裂発生までのショット数についてはすでに寿命予測式²⁾を開発済みである。今回は、これとともに亀裂進展により成長する亀裂長さに着目し、CAE解析によるヒートチェック発生箇所の温度と応力、金型に生じた亀裂(進展)長さおよびそれが転写されて出現した製品部のバリ長さとの関係性について調査を行った。

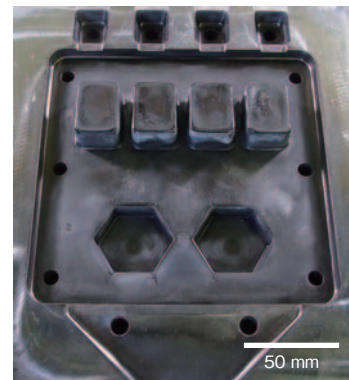


図4 ヒートチェック実験用金型
Fig. 4 Experimental die for heat check

4. 実験結果

4.1 実験金型による温度計測

今回抽出した4条件を表1に示す。

深さ1.6 mmに設置した熱電対No.1で計測した casting 中の金型温度変化を図5に示す。また、熱電対No.1と、深さ2.6 mmの熱電対No.2、深さ4.6 mmの熱電対No.3、深さ8.6 mmの熱電対No.4、深さ14.6 mmの熱電対No.5の熱電対間で計測された温度差を距離で除した値を2点間の温度勾配として図6に示す。図5の条件A、条件B、条件Cでは、内部冷却の流量を少なく、距離を遠ざけ、冷却効率を低下させることにより表面近傍での温度は上昇するが、1サイクル中の温度変化は、小さくなる傾向を示した。一方、溶湯充填直後の温度勾配は小さくなるが、離型剤塗布時には負側に増大する傾向を示した。次に、外部冷却の影響を見るため、離型剤塗布時間(量)の異なる条件

Cと条件Dの比較では、離型剤塗布時間を長くし、外部冷却を強化することで温度はさらに低下する。特に、離型剤塗布直後の温度低下が顕著で、その後温度回復を示すことから、表面近傍では内部との温度逆転現象が生じているものと推察される。温度勾配からも条件Dでより大きな値を示すことが確認できる。従って離型剤塗布時間(外部冷却)を増やす場合、金型表面にはより大きな引張応力が発生することが推測される。

表 1 実験条件

Table 1 Casting conditions for die temperature measurement

Casting condition		A	B	C	D	
Slow shot speed	m/s	0.2				
Fast shot speed	m/s	3				
Curing time	s	7				
Cooling water flow rate	ℓ/min	5	3	0		
Lubricant spray time	s	1			5	
Cooling channel distance	—	Near	Far	—		

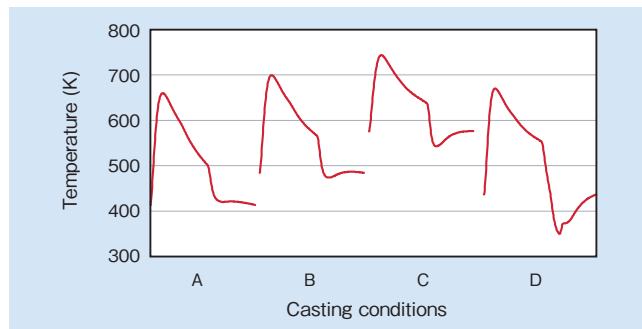


図 5 金型表面近傍の温度変化

Fig.5 Change of temperature near die surface

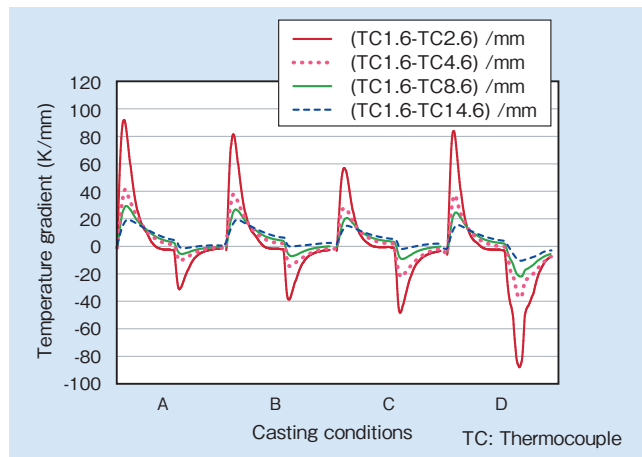


図 6 金型表面近傍の温度勾配の変化

Fig.6 Change of temperature gradient near die surface

4.2 CAE 解析のための境界条件合わせ込み

ヒートチェックは、溶湯が接する金型表面に亀裂が発生する損傷である。表面近傍の応力分布を直接計測することが望ましいが、現状では不可能であるため、まずは金型表面近傍の温度分布を詳細に把握することが必要となる。ここでは、実験型での温度計測の後、CAEでの合わせ込みを行った。図7に、熱電対の径が異なる場合の測定結果を示す。

直径3mmの熱電対では、直径1mmの熱電対に対し応答が遅れる傾向を示した。また、高温側、低温側とも追従できず山側では低め、谷側では高めの値を示した。今回合わせ込みには、直径1mmの熱電対で計測した結果を採用した。

図8に実験との合わせ込みによる解析で得られた温度曲線を重ねて示す。

両者は良く一致し、現実の温度分布をCAEにより再現できることが分かった。これにより実測が難しい金型表面温度が図9に示すようにCAEで推定可能になった。

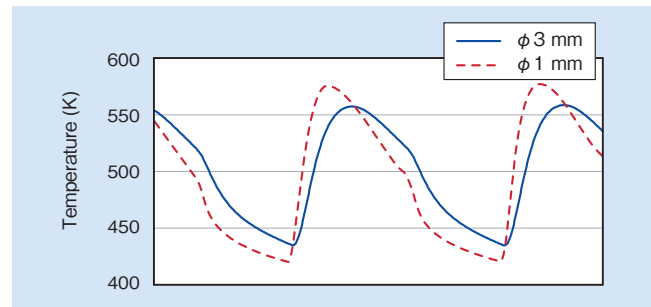


図 7 熱電対の違いによる金型温度測定値の差

Fig.7 Temperature change comparison of thermocouples of different diameters

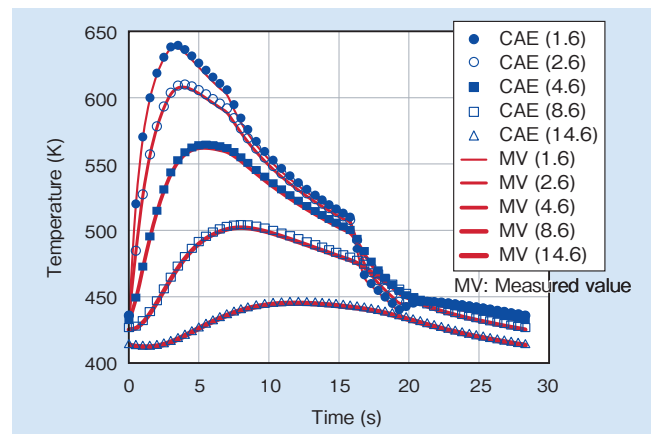


図 8 実験とシミュレーションによる温度推移の比較

Fig.8 Temperature change comparison between experimental results and calculation results

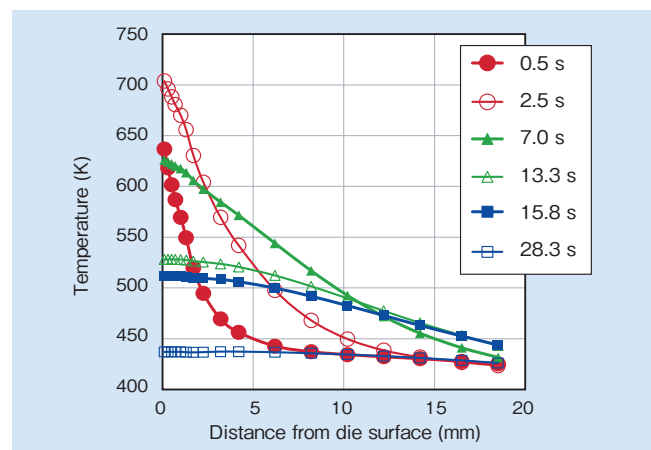


図 9 各時間における金型表面からの距離と温度の関係(計算値)

Fig.9 Relationship between distance from die surface and calculated temperature at set times

4.3 ヒートチェックと応力の関係

ヒートチェック実機評価に使用した金型のヒートチェック発生状況とアルミダイカスト試料におけるショット毎のバリの発生状況を図10に、最終的なヒートチェック長さとのバリ長さの相関を図11に示す。ヒートチェック長さとのバリ長さの間には高い相関関係があり、各ショットにおけるバリ長さを測定することにより、ヒートチェックの進展状況の推定が可能である。図12にバリ長さとのショット数の関係をDAC-MAGICとSKD61の比較で示す。DAC-MAGICおよびSKD61両者ともショット数の増加とともに徐々にバリ長さが増加することがわかる。また、DAC-MAGICはSKD61に対してバリ進展が遅く、バリ長さ2 mmに達するまでのショット数がSKD61の約4倍であった。

図13に亀裂長さの測定方法を示す。亀裂の長さとして、金型表面から測定することができる長さAと破面観察により測定可能となる長さBが挙げられる。AおよびBの各亀裂長さを測定し、比較したところ、図14に示すように両者に相関性が認められた。このことにより、長さAの測定によって、亀裂深さの見積りが可能であることを確認した。

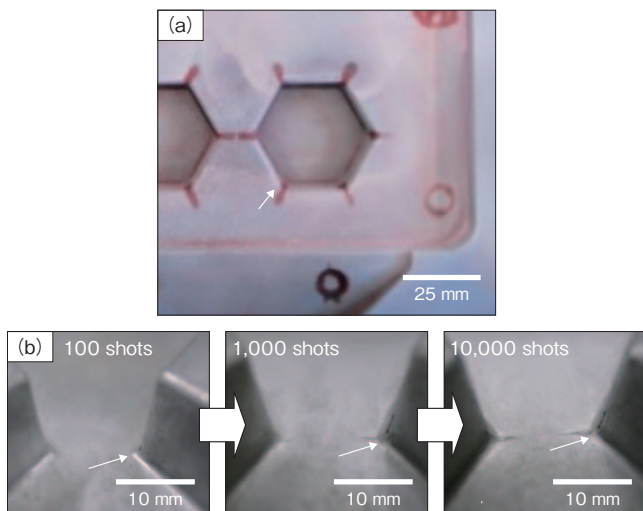


図10 ヒートチェック発生状況およびバリ進展状況 (a) 金型のヒートチェック発生状況 (b) アルミダイカストにおけるバリ発生状況
Fig.10 Heat check occurrence conditions and burr progress conditions (a) heat check of die surface (b) burr progress

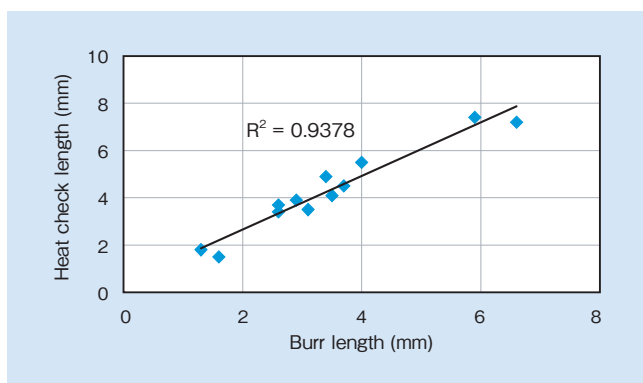


図11 ヒートチェック長さとのバリ長さの関係
Fig.11 Relationship between heat check length and burr length

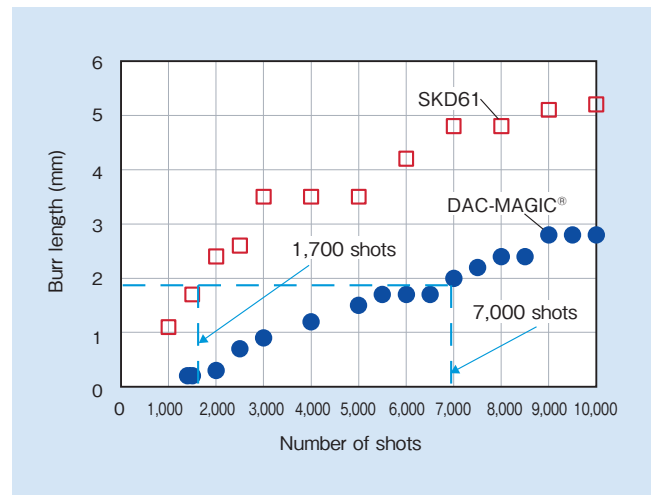


図12 バリ長さとのショット数の関係 (DAC-MAGIC®とSKD61の比較)
Fig.12 Relationship between burr length and number of shots (comparison between DAC-MAGIC® and SKD61)

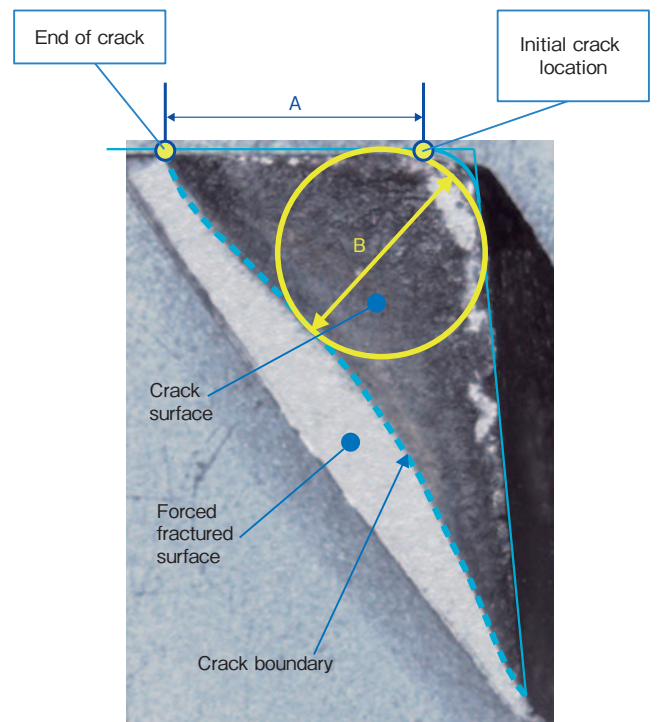


図13 ヒートチェック長さの測定方法
Fig.13 Heat check length measurement method

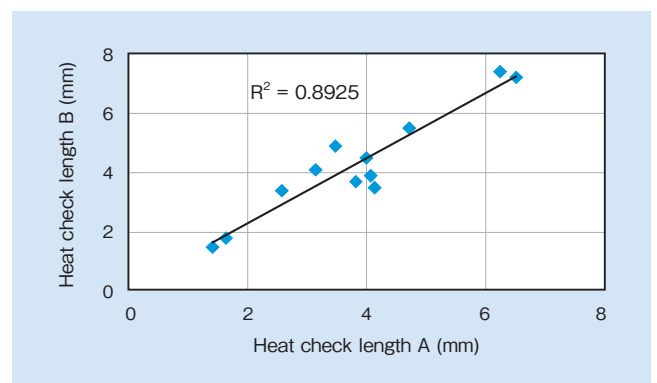


図14 ヒートチェック長さAとのBの相関
Fig.14 Relationship between heat check length A and B

亀裂進展を CAE で計算する手法は種々提案されているが、ダイカスト金型の亀裂進展を解析した事例はほとんど見られない。今回は、初期亀裂が生じる表面の応力に着目して亀裂進展の評価を試みた。図 15 に、ダイカスト工程 1 サイクル中の各亀裂発生部位の金型温度推移を、図 16 に 1 サイクル中の最高温度および最低温度における金型の表面および断面の温度分布を示す。鋳造 CAE で求めた金型の温度分布をマッピングし、構造 CAE で熱応力解析を行った。

図 17 に部位ごとに発生する熱応力と亀裂長さを各々プロットしたグラフを示す。両者を比較すると、熱応力は部位によらずほぼ一定の値を示しているのに対し、亀裂長さは部位ごとに差異が認められた。亀裂長さの相関は認められず、熱応力のみを求めただけでは亀裂長さの予測はできないことがわかった。

次に、鋳造圧力のみ負荷した場合の構造解析をアッセンブリモデルにより行った。図 18 に金型の表面応力分布を示す。また、図 19 に示す各視点および断面での金型の変

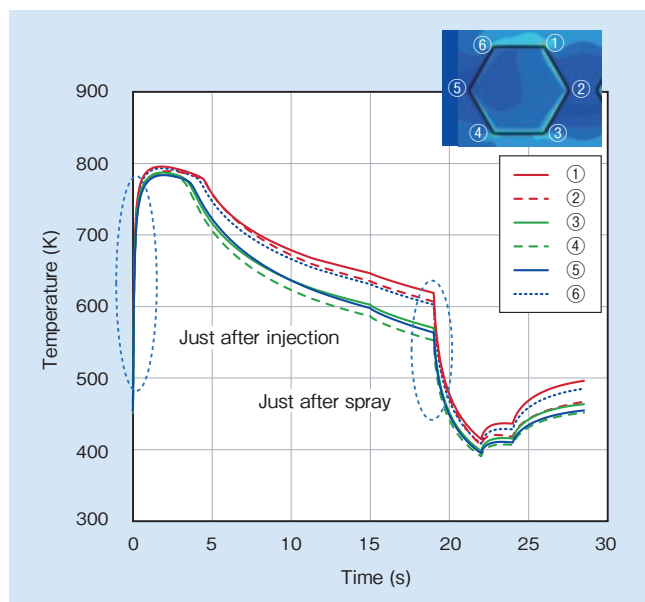


図 15 鋳造 CAE による 1 サイクル工程でのコーナー部の金型温度変化
Fig. 15 Die temperature change at the corner edge during one cycle process, calculated by CAE

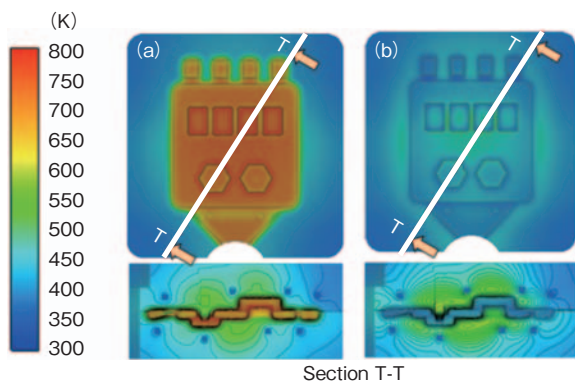


図 16 表面と断面の温度分布 (a) 最高温度 (b) 最低温度
Fig. 16 Surface and cross-section temperature distribution
(a) maximum temperature (b) minimum temperature

形状況を図 20 に示す。各コーナーに発生した応力に差異が生じていることを確認した。

図 21 に部位ごとに発生する熱応力、鋳造圧力により発生する応力および亀裂長さを各々プロットしたグラフを示す。熱応力は部位ごとの差はほとんど認められなかったが、鋳造圧力により発生する応力は部位ごとに差が見られ、この差は各部位の亀裂長さとの相関が認められた。このことから、亀裂長さは、熱応力のみではなく、鋳造圧力などによる機械的負荷により発生した応力も影響していると考えられる。鋳造圧力による金型の変形については、部材の剛性に負うところが大きい。また、同じ形状であっても配

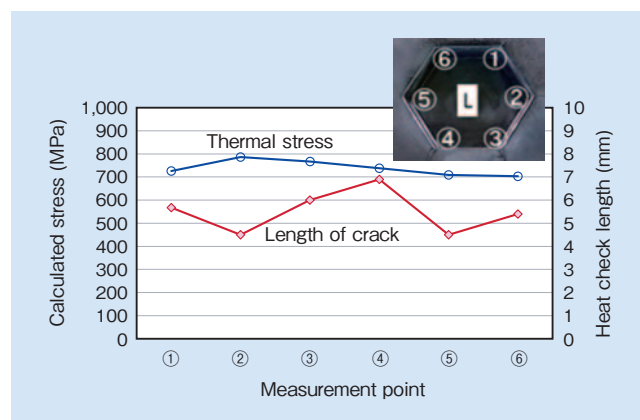


図 17 六角形状コーナー部に発生した熱応力と亀裂長さとの関係
Fig. 17 Relationship between crack length and thermal stress at corners of hexagonal shape

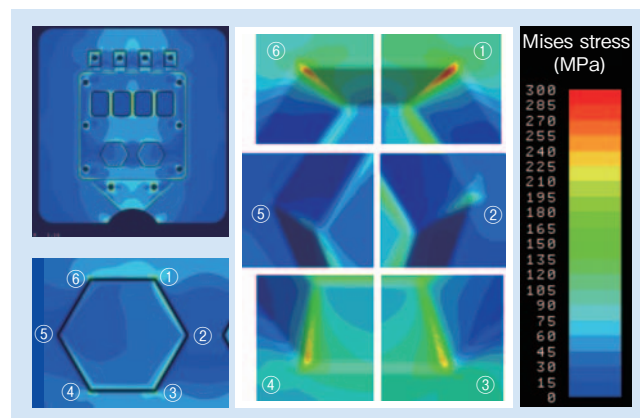


図 18 ミセス応力の分布
Fig. 18 Structural analysis of Von Mises stress distribution

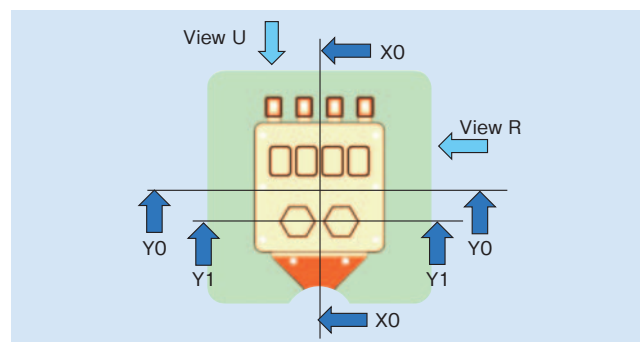


図 19 断面指示図
Fig. 19 Cross-section indication diagram

置によっては変位による荷重の入力値が異なる。熱負荷による差異がそれほどないにもかかわらず、铸造圧力と亀裂長さの関係性がより強く見られたのは、金型の変形によって亀裂部が押し広げられる状況に差があったためではないかと推察する。

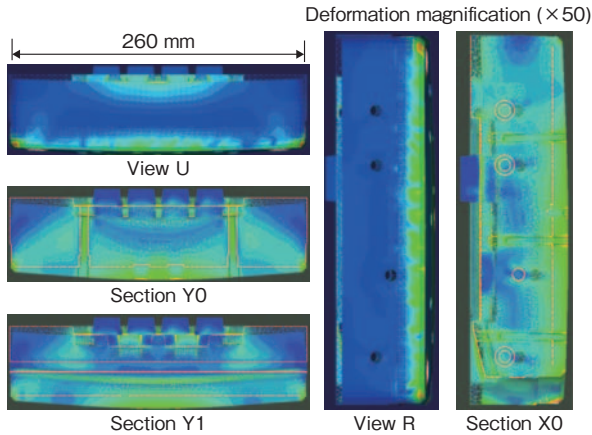


図20 断面変位モード
Fig. 20 Deformation mode of cross-section

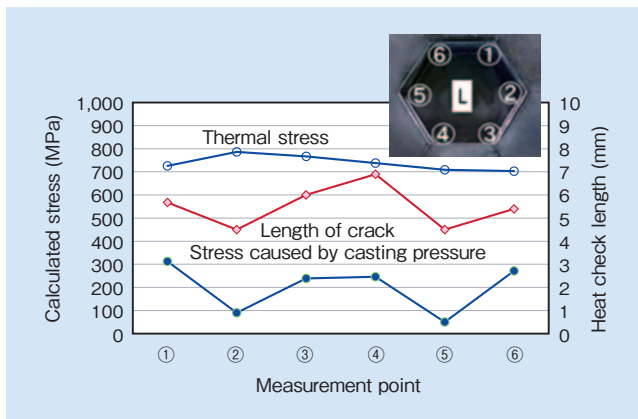


図21 六角形状コーナー部に発生した応力と亀裂長さとの関係
Fig. 21 Relationship between crack length and stress at corners of hexagonal shape

5. 結 言

ダイカスト金型の表面に発生する損傷の代表的な事例として、ヒートチェックの亀裂長さに着目してCAE適用の検討を行った。今回の検討により得られた事項は、以下の通りである。

- (1) 板形状実験型での温度計測により、铸造条件(冷却水量、位置、離型剤塗布時間)の差異による金型キャビティ表面近傍の温度変化と温度勾配を把握した。
- (2) 板形状実験型での温度計測結果を基に、CAEで使用する境界条件を探索し、合わせ込みを行って決定した。
- (3) 金型冷却時間を短くするために離型剤塗布時間を増やすと、金型表面から内部に向けて負の熱勾配が発生する。冷却条件、塗布条件によっては铸造中の最大応力に近いレベルとなり、亀裂の進展を加速すると考えられる。

(4) ヒートチェックの亀裂長さとの関係を調べた結果、今回着目した六角形状コーナー部の亀裂長さとの铸造圧力も加味した応力との間に関係性が認められた。これは、金型の剛性によっても影響を受けるものと推察する。

金型の寿命は予定した命数を全うすることが求められており、リスクを回避するための予測手法を持つことは意義がある。今後も、寿命予測の精度向上に取り組んでいく。

引用文献

- 1) 小畑克洋, 他: ダイカスト金型損傷に及ぼす金型材料および使用条件の影響, 日本ダイカスト会議論文集, JD12-03 (2012).
- 2) M. Nagasawa, et al.: Prediction of Life to Thermal Fatigue Crack Initiation of Die Casting Dies, International Conference on Tooling, 5th (1999), p.225.



小畑 克洋
Katsuhiko Obata
日立金属株式会社
高級金属カンパニー
安来工場
技術士(金属部門)



長澤 政幸
Masayuki Nagasawa
日立金属株式会社
高級金属カンパニー
安来工場
技術士(金属部門)



田村 庸
Yasushi Tamura
日立金属株式会社
高級金属カンパニー
技術部
技術士(金属部門)



中道 義弘
Yoshihiro Nakamichi
日立金属株式会社
高級機能部品カンパニー
素材研究所