

研究論文

局部加圧によるADC12合金ダイカストの疲労強度向上

井澤 龍介* 梅澤 修** 桑田 浩*

Research Article

J. JFS, Vol. 86, No. 4 (2014) pp. 294 ~ 300

Improvement of Fatigue Strength in
JIS ADC12 Die-casting by Local Squeezing

Ryusuke Izawa*, Osamu Umezawa** and Hiroshi Kuwada*

The local squeezing method with pin was adopted to prevent internal defects such as gas blowholes and shrinkage porosities in the local area of ADC12 die-castings. This treatment remarkably improved the fatigue strength of the die-castings. The smaller the size and density of defects, the higher is the fatigue strength is.

Keywords : Die-casting, aluminum, ADC12, local squeeze, fatigue, mechanical property, defect

1. はじめに

アルミニウム合金は、その比重の小ささから強度部材の軽量化に寄与し、自動車部品などに多く用いられている。中でもアルミダイカスト部品は、その寸法精度の高さ、サイクルタイムの短さなどの理由により、大量生産品である自動車の軽量化と低コスト化に大きく貢献している。

しかし、コールドチャンバーダイカスト製法は、高速で溶湯を鑄込むことによるガスの巻き込みや、金型キャビティ内での急冷に伴う凝固収縮によって、鑄巣が生じ、これらが部品の機械的特性に関わる信頼性を低下させる。特に、エンジンシリンダーブロックのジャーナル部などの強度必要部位は、設計上肉厚を増す必要があるが、肉厚が増すほどに鑄巣が生じやすくなり、単位肉厚あたりの強度信頼性が低下する¹⁾ため、部品の構造設計が難しい。

肉厚ダイカスト部品の品質向上技術に、局部加圧法²⁾がある。金型に摺動するピンと油圧シリンダーを設置し、溶湯充填完了後にピンを前進させ、局部的に溶湯供給を行うこの方法は、凝固収縮巣やガスの巻き込み巣といった鑄巣欠陥を抑制することを目的として、ダイカストの高品位化に効果を上げた事例も多い³⁾。この鑄巣欠陥の改善によって部分的な機械的特性の向上が期待できる。特に欠陥が破壊起点となることで低下する疲労強度の改善が考えられる

が、ダイカストにおける局部加圧による疲労強度への影響を調べた研究は少ない。また、局部加圧法は生産時のサイクルタイムへの影響がなく、部品コストを上げずに特性を改善する方法として、工業的価値が高い。

本研究では、ADC12 アルミダイカストの肉厚部に局部加圧を施した時の内部欠陥の抑制と、疲労強度への影響を調査し、工業部品生産への適用について考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、アルミニウムダイカスト合金 ADC12 であり、その化学成分を Table 1 に示す。次に、供試材の形状を Fig. 1 (a) に、湯道方案を含めた鑄物の形状を Fig. 1 (b) に示す。供試材は、エンジン用シリンダーブロックのジャーナル部を模擬したものであり、型締め力 250t ダイカストマシンにて Table 2 に示す鑄造条件にて鑄造した。シャットバルブ(減圧弁)を金型に設置し、高速射出開始前 0.6s

Table 1 Chemical compositions of test material (mass%).

供試材の化学成分 (mass%).

Material	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Al
ADC12	1.9	10.6	0.2	0.8	0.8	0.3	Bal.

受付日：平成25年11月5日、受理日：平成26年2月6日 (Received on November 5, 2013; Accepted on February 6, 2014)

* リョービ(株)ダイカスト本部 RYOBI Limited

** 横浜国立大学大学院工学研究院 Faculty of Engineering, Yokohama National University

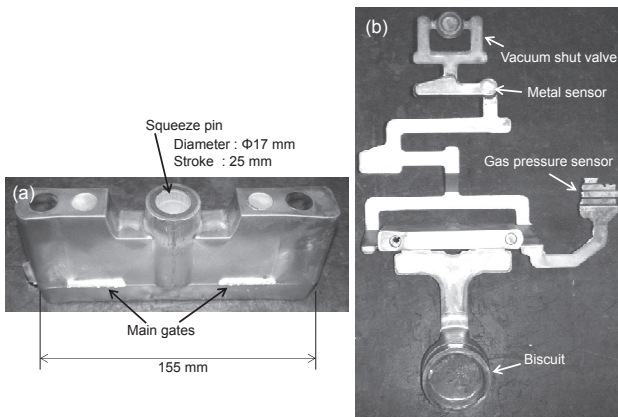


Fig. 1 Die-casting sample (a) and overall view with runner (b).

供試材 (a) と湯道方案を含むダイカスト鋳物全体像 (b).

Table 2 Experimental conditions of die-casting.

ダイカスト鋳造条件.

Parameter	Value	
Plunger tip diameter	70 mm	
Molten metal temperature	680 °C	
Injection Speed	Slow speed	0.29 m/s
	Fast speed	1.8 m/s
Metal pressure	60 MPa	
Vacuum time	0.6 s	
Curing time	13 s	
Cycle time	38.2 s	
Die temperature	Cover die	133 °C
	Movable die	153 °C

間キャビティ内のガスを強制排出する減圧鋳造を用いた。キャビティ中央部を加圧するように設置した加圧ピンは、 $\phi 17\text{mm}$ 、ストローク 25mm で、動作開始タイミングは 8s とした。なお、動作開始タイミングとは、高速充填開始後の局部加圧ピンの動作開始までの時間であり、欠陥の抑制効果が最大で、かつ各ショットで安定した動作ストロークを確保できる条件を設定した。ピンの加圧力は 73.9kN で、動作速度制御は行っていない。この加圧ピンの動作の有無により 2 種の供試材を作製した。以後、局部加圧を動作させていない供試材を N 材、局部加圧を動作させた供試材を P 材と呼称する。

2.2 疲労試験と破面解析

平板試験片を用い、応力比 (最小応力 σ_{\min} / 最大応力 σ_{\max}) $R=0$ 、周波数 25Hz、大気圧中 (室温) の条件で平面曲げ疲労試験 (シェンク試験) を実施した。試験片形状を Fig. 2 (a) に示す。応力比 $R=0$ では、試験片の片面 (Front side) にのみ引張応力が繰返し負荷される。Fig. 2 (b) に示すように、この Front side が供試材の表面 A から 1mm および 20mm に位置するように試験片を採取した。この A 面を試験片採取位置の基準とする。この試験片表面の中心部は、加圧ピンの動作軸中心上に位置し、局部加圧の有

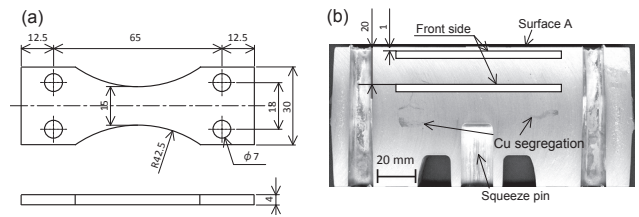


Fig. 2 Dimension of bending fatigue test specimen (a) and position of specimens in die-casting (b). Micrograph (b) shows Cu segregation in P section with local squeezing.

平面曲げ疲労試験片の寸法 (a) と供試材からの試験片採取位置 (b).

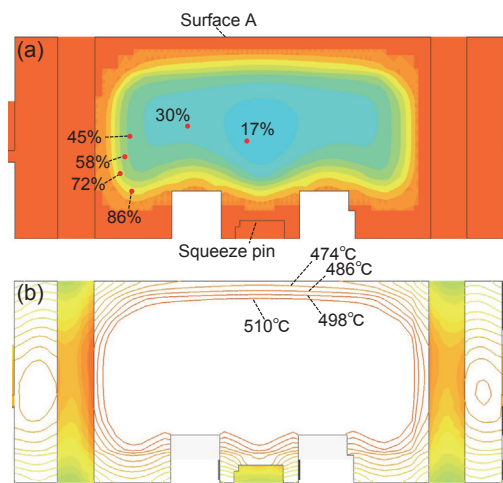


Fig. 3 CAE (computer-aided engineering) solidification analyses for (a) fraction of solid and (b) temperature at moment of local squeezing.

局部加圧動作時の (a) 固相率および (b) 温度分布の CAE 凝固解析。

無と試験片採取位置の違いから 4 種の試験片を作製した。以後、局部加圧を動作させていない A 面から 1mm の試験片を N1, 20mm を N20, 局部加圧を動作させた A 面から 1mm の試験片を P1, 20mm を P20 と呼称する。

これらの試験片採取に当たっては、CAE (computer-aided engineering) 凝固解析を用いて、局部加圧の動作時期、すなわち、充填完了から 8 秒後の固相率分布 (固液共存領域) および温度分布 (固相領域) の予測を実施した (Fig. 3)。P1 は凝固完了領域、そして P20 は固液共存領域にあると推定できる。

全ての破断試験片について、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて破面観察を行った。なお、欠陥の大きさは村上による $\sqrt{\text{area}}$ 法⁴⁾ により評価し、観察断面の $\sqrt{\text{area}}$ 値で示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 局部加圧による内部欠陥の抑制

Fig. 4 に N 材 (a) と P 材 (b) の X 線透過画像を示す。

N材は、鑄巣が中央部を中心に広範囲に存在しているのに対して、P材は、顕著なマクロ欠陥は確認されず、内部欠陥が大幅に低減されているのがわかる。Fig. 5にマイクロフォーカスX線CT装置を用いた空隙の3次元分布図を示す。疲労試験片の中央部の断面15×4mmを0.02mm間隔で50断面撮像し、コンピュータ上で3次元にマッピングした。各画像の解像度は0.02mm/pixelである。A面から20mmの肉厚中央付近は、ゲートが凝固によって閉塞した後に凝固する最終凝固部であるため、多くの凝固収縮巣と、周囲の凝固収縮によって鑄造圧力から開放され膨張したガス欠陥が存在する(b)。局部加圧を動作することによって、現認できる欠陥がほとんどない状態まで改善された(d)。これは、凝固収縮によって生じようとする空洞部に溶湯が供給され、

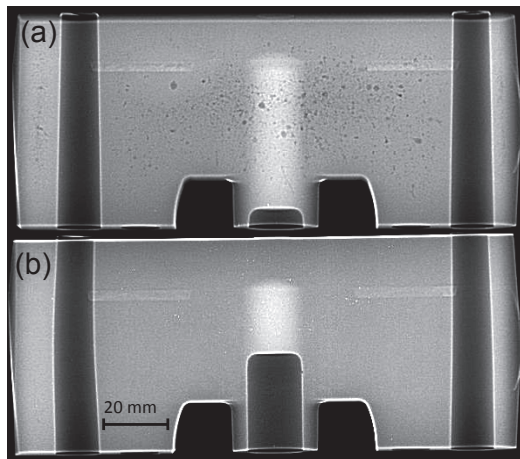


Fig. 4 X-ray images of die-casting samples (a) N without local squeezing, and (b) P with local squeezing.

ダイカスト供試材のX線透過画像：(a) 局部加圧を動作させないN材、(b) 局部加圧を動作させたP材。

また、溶湯内部圧力が高まることでガスが圧縮された結果だと考えられる。供試材の表面に近いN1は凝固開始時期が早く、鑄造圧力によって十分に溶湯が供給されるため、局部加圧をしていない状態でも鑄巣欠陥が少ない(a)。特に、A面から1mmの表層付近は、局部加圧動作前に凝固が完了するため、N1とP1との欠陥量の差が小さい。

次に、これらの欠陥について、平面曲げ疲労試験で最大応力が負荷される面、すなわち、A面から1mmおよび20mmの断面の定量調査を行った。視野範囲5.1×3.8mmの断面写真を各試料12枚ずつ撮像し、5μm以上の欠陥についてサイズおよび数を調査した。

Table 3に局部加圧の有無によるA面から1mmおよび20mmの断面の欠陥面積率の違いを示す。また、Fig. 6(a)にA面から1mm、(b)に20mmの断面の欠陥の頻度分布を示す。なお、局部加圧したA面から20mmの断面に関しては、比較参考のため(a)中にもプロットした。欠陥の頻度分布は1mm²あたりの数量を示している。

A面から20mmの肉厚中央付近では、欠陥面積率は約5.3%にも及んだ。欠陥サイズは、100μm以下のものが大半を占めるが、200μm以上の粗大なものも存在する。局部加圧を動作させることで、欠陥面積率は0.012%に、確認できる最大欠陥サイズは70μmにまで改善した。A面か

Table 3 Fraction of internal defect in the cross section of specimens.

試験片断面の内部欠陥面積率。

Sample	Area ratio (%)
N20	5.297
P20	0.012
N1	0.007
P1	0.003

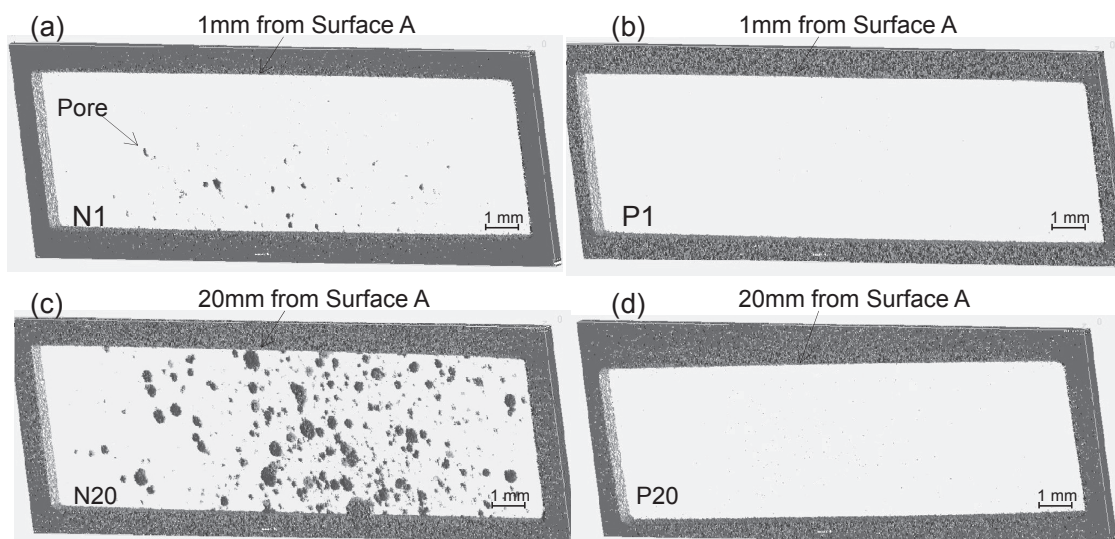


Fig. 5 3D analyses by micro focus X-ray CT for pore distribution in specimens (a) N1, (b) P1, (c) N20, and (d) P20.

マイクロフォーカスX線CTによる欠陥の3次元分布：(a) N1、(b) P1、(c) N20および(d) P20。

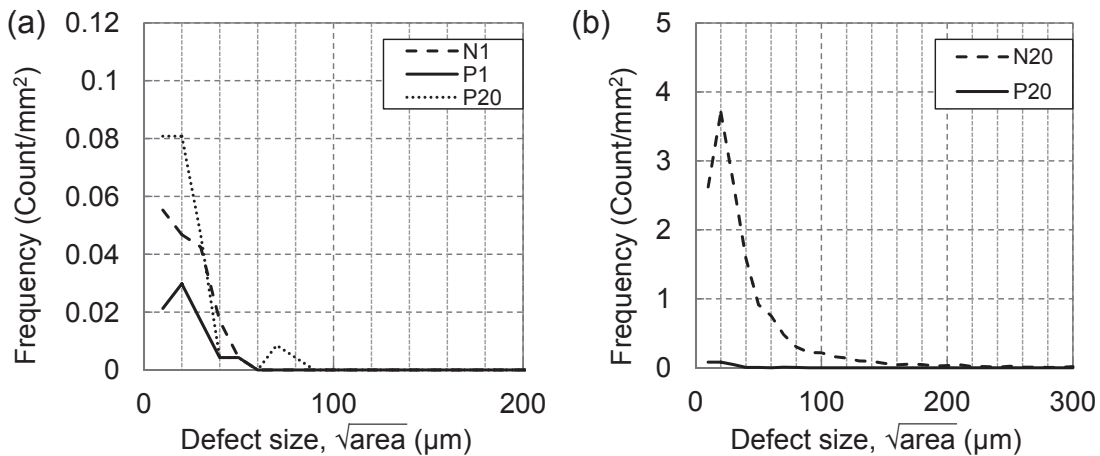


Fig. 6 Distribution of defects at 1 mm (a) and 20 mm (b) in depth from surface A.

A面から1mm (a), および20mm (b) における欠陥分布.

ら1mmの表面付近では、50 μ m以下の比較的小さい欠陥量に改善がみられるが、最大欠陥サイズに差はない。

ここで、疲労強度に影響する欠陥サイズについて考える。基地組織の硬さに固有な疲労限度の上限値 σ_{WU} は経験的にピッカース硬さHVに比例し、次式で予測されることが知られている。

$$\sigma_{WU} = 1.6HV \quad (1)$$

ただし、単位は σ_{WU} :MPa, HV:kgf/mm²である。これに対して、介在物や欠陥などが影響する場合の疲労限度評価法として、村上らは⁵⁾ $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを提案している。予測される疲労限度の下限値 σ_{WL} は次式で表わされる。

$$\sigma_{WL} = C(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1 - R) / 2]^{\alpha} \quad (2)$$

C: 欠陥などが表面に接する場合 1.41

欠陥などが表面上に存在する場合 1.43

欠陥などが内部に存在する場合 1.56

$$R := \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

$$\alpha := 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

ただし、単位は σ_{WL} :MPa, HV:kgf/mm², $\sqrt{\text{area}}$: μ mである。これらの疲労限度評価法は、山田らによってアルミニウム合金ダイカストの製造欠陥を考慮した疲労限度予測に有効であることが示されている⁶⁾。そこで、ADC12ダイカストのピッカース硬さHV=97.4(日本ダイカスト協会発行のダイカストの標準⁷⁾記載のADC12ダイカストのHRB硬さを換算した値)を代入して(1),(2)式を評価すると、表面欠陥で $\sqrt{\text{area}}=58\mu$ m以上、内部欠陥で $\sqrt{\text{area}}=106\mu$ m以上で疲労強度が低下することになる。つまり、50 μ m程度の欠陥を臨界サイズとして、それ以下が単独で存在しても疲労強度に影響しないと考えることができる。

3.2 局部加圧による組織の変化

Fig. 7にN1(a), P1(b), N20(c) およびP20(d)の光学顕微鏡写真を示す。A面から1mmのN1とP1の凝固組織に大きな違いは見られない。A面から20mmのN20とP20は、初晶の大きさに違いは見られないが、P20の凝固

組織は、共晶組織が分断されたように見える。これは、局部加圧によって半凝固状態で流動されることにより、晶出した共晶Siが引きちぎられたものと考えられる。局部加圧によって粗大な鑄巣欠陥が抑制されることが疲労限度を改善する主要因であるが、基地の改質による粒界の応力集中の緩和も、改善の方向に働く要因と考えられる。

ADC12ダイカストで局部加圧を動作させた場合、凝固が進み、溶質濃化した溶湯が流動することでCuの偏析が生じることが知られている⁸⁾。その成分量の分布によって部位ごとに強度が変化する可能性がある。Fig. 8(a)にP材の断面のX線蛍光分析によるCu濃度の半定量分析結果を示す。(b)は調査位置である。また、Fig. 2(b)に示す供試材切断面では、溶質濃化による正偏析が供試材中央部から左右にずれた位置に存在している。しかしながら、平面曲げ疲労試験において最大応力の負荷される試験片中央部に関して、A面から1mm及び20mmのCuの正偏析は

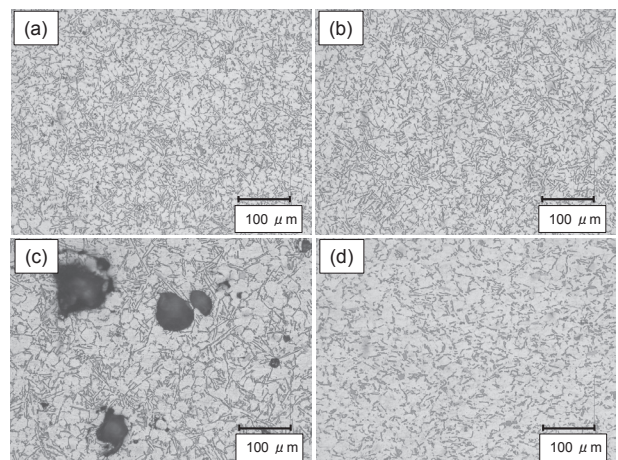


Fig. 7 Optical micrographs in cross section of specimens: (a) N1, (b) P1, (c) N20, and (d) P20.

試験片断面の光学顕微鏡写真：(a) N1, (b) P1, (c) N20および(d) P20.

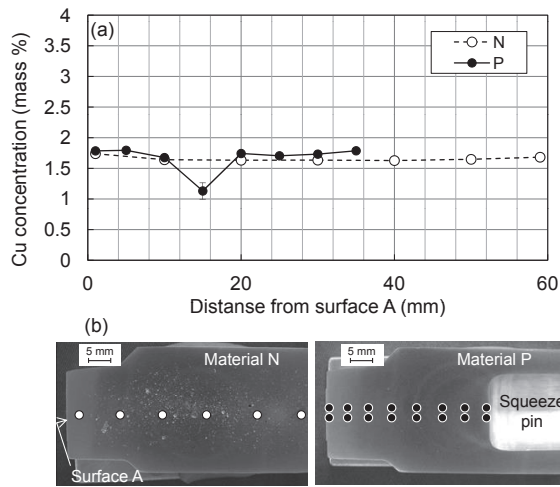


Fig. 8 Cu concentration (a) and analysis points (b) in depth from surface A.

A面から深さ方向のCu含有量 (a) と測定点 (b).

確認されないことから、成分偏析による今回の疲労試験結果への影響は無視してよいと考える。

3.3 局部加圧による疲労強度の改善

局部加圧を動作させることで、鑄巣欠陥が抑制されることを前述した。これにより、疲労強度の改善が期待される。欠陥によって本来材料のもっている疲労特性が阻害されるケースでは、すべての試験片に同様の欠陥が存在しているのではないため、疲労試験の値にばらつきが生じる。疲労試験の結果を考察するにあたって、材料の疲労強度と内部欠陥を起点とした疲労強度の低下度合いを議論するために、S-N線図中の上端のプロットを結んだ線より導く疲労限の上限値と、下端のプロットより導く上限値からの下方へのばらつき度合い(下振れ)を指標として評価することとした。N1およびP1のS-N線図をFig. 9(a)に示す。局部加圧を動作させていないN1の 10^7 回の疲労強度上限値は70MPa、下振れは 1.7×10^6 回までのデータを基に

8MPaと評価できる。局部加圧を動作させることで、同上限値は78MPaまで向上し、下振れは 3.1×10^6 回までのデータから3MPaとなった。下限値を上限値から下振れを差し引いたものとする、工業部品の設計時に考慮が必要な疲労強度下限値は局部加圧によって62MPaから75MPaへと13MPa改善したことになる。

Fig. 9(b)にN20およびP20のS-N線図を示す。N20の 10^7 回の疲労強度上限値は46MPa、下振れは4MPaであった。これに対して、P20では、同上限値は73MPaまで向上し、下振れは5MPaであった。すなわち、下限値が42MPaから68MPaに26MPa改善したことになる。肉厚のほぼ中央部に位置するN20は、多数存在する粗大な欠陥を起点にした破壊が容易に開始されることで、材料の疲労強度よりも大幅に低い応力で破壊される。また、5%以上に及ぶ欠陥面積率は、実質の試験片断面積を狭めている。平面曲げ疲労試験では、試験片の厚さ方向に対してリニアに変化する応力分布ができる。内在する欠陥が均一に存在すれば、変位一定の試験での各断面にかかる応力は、欠陥による面積減少分高くなる。つまり、実際には計算上の応力より高い応力がかかっていることになり、これも低い疲労強度を示すことにつながっている。これに対して、P20は、最大欠陥サイズ、個数ともに改善されていることで、疲労強度が改善したと考えられる。対してN1とP1は欠陥面積率の差は0.04ポイントと小さく、最大欠陥サイズにも明確な差がないにも関わらず、疲労強度が18%も改善したことから、さらに詳細な欠陥と疲労強度との関係を考察した。

3.4 欠陥サイズと疲労強度の関係

Fig. 10に曲げ疲労試験片の破面のSEM画像を示す。起点は表面に現出した欠陥(Fig. 10(a))の場合と、内部欠陥(Fig. 10(b))の場合がある。ここで、起点の初期き裂長さと破壊応力の関係を評価した。初期き裂長さは、き裂進展方向に平行な欠陥の開口長さ、すなわち、表面欠陥a、内部欠陥2aとした。破壊応力振幅は、起点欠陥中心のFront sideからの距離X(Fig. 10(b))を測定し、平面曲げ試験の

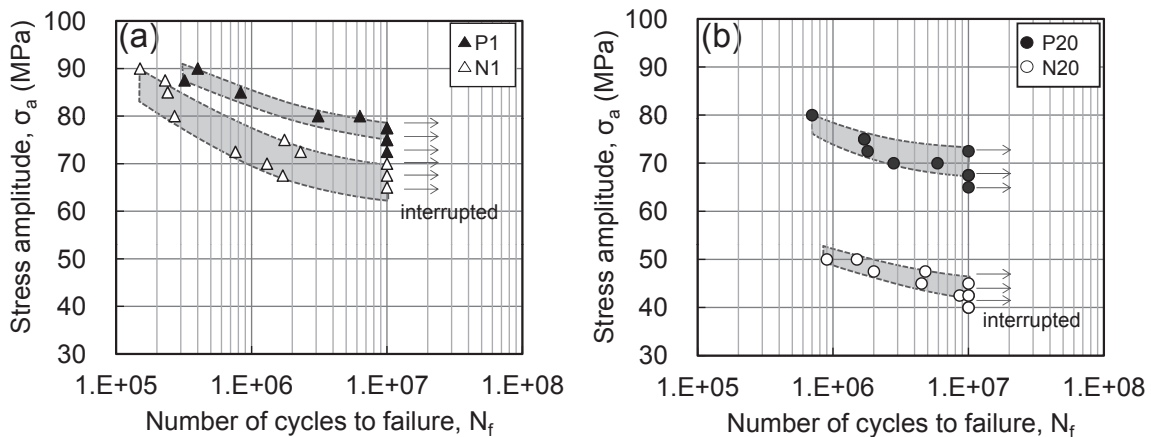


Fig. 9 S-N data under bending fatigue test for specimens of 1mm (a) and 20 mm (b) from surface A. A面から1mm (a)、および20mm (b)の試験片による平面曲げ疲労試験のS-N線図。

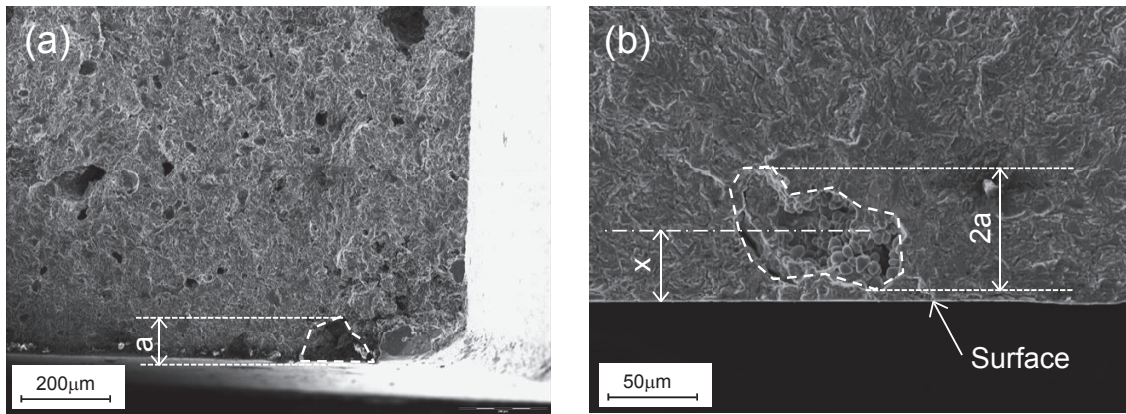


Fig. 10 Surface defect (a) and subsurface defect (b) on fracture surfaces under bending fatigue test: (a) N20, $\sigma_a=50$ MPa, 1.5×10^6 cycles, (b) P20, $\sigma_a=75$ MPa, 1.7×10^6 cycles.

平面曲げ疲労試験の破面における表面欠陥 (a) と表面下の欠陥 (b) : (a) N20, 応力振幅 50 MPa, 破断回数 1.5×10^6 回. (b) P20, 応力振幅 75 MPa, 破断回数 1.7×10^6 回.

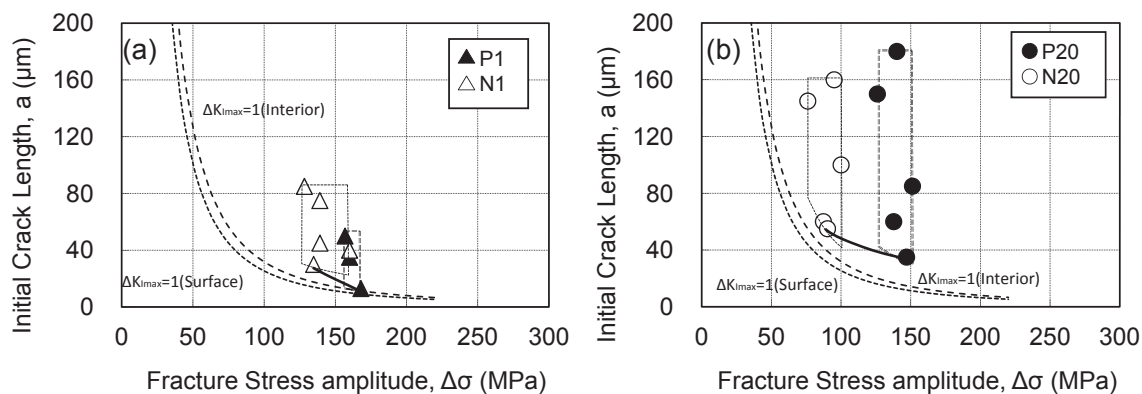


Fig. 11 Relationship between fracture stress amplitude and initial crack length for specimens of 1 mm (a) and 20 mm (b) from surface A.

A面から1mm (a), および20mm (b) の試験片における破壊応力振幅と初期き裂長さの関係。

応力分布から起点部にかかる最大応力振幅 $\Delta\sigma$ を算出した。なお、表面欠陥の場合は $X=0$ である。Fig. 11 (a) に A 面から 1mm, Fig. 11 (b) に 20mm の試験片における、破壊応力振幅と起点の初期き裂長さの関係を示す。応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\max}=1$ の表面き裂、及び内部き裂の初期き裂と破壊応力振幅の関係と比較するために描画した。その関係はき裂進展の下限限界値に対応するものであり、欠陥 (=き裂) が破壊起点を与える最小の応力振幅を示す (図中破線)。これに対して、破面から評価した疲労き裂発生点を与えた欠陥サイズは、この下限界曲線よりも大きな値となる。統計的評価には不十分なデータ点数であるが、図中実線が実験結果から推定される下限限界値に対応しており、矛盾はない。注目すべきは、N材に対してP材のプロットは、同一サイズの初期き裂が存在した場合に、明らかに破壊応力振幅が大きくなる傾向を示す。つまり、局部加圧を施すことによって疲労強度が向上する原因には、欠陥サイズが低減されることだけではなく、他の影響因子の重畳が考えられる。

3.5 疲労限度を改善する要因

欠陥の低減、凝固組織の変化の他に、疲労限度を改善する要因について考える。Fig. 3 に示した凝固解析より、局部加圧動作時に A 面近傍は凝固が完了し、固相状態にあると判断されることから、局部加圧の動作で生じる応力によって加工硬化が生じ、強度が向上する可能性が考えられる。そこで、供試材断面の A 面からの距離による硬さ変化を調べ (マイクロビッカース硬さ試験, 荷重 0.1kg), N材およびP材それぞれの硬さプロファイルを図. 12 に示す。いずれの曲線も表面付近の硬さが最も高く、内部に向けて低くなる傾向であった。この傾向は、鈴木らの ADC12 ダイカストの物性値調査⁹⁾の結果と一致する。P材の硬さはN材と比較して、表面から10mm深さまで高く、A面から深さ1mmにおける増大率は約4.1%である。村上によるとビッカース硬さと疲労限は経験的に比例関係が成り立つとされる⁴⁾ことから、硬さについて比較したが、約18%もの疲労強度向上が加工硬化を主要因として得られるとは考え難い。

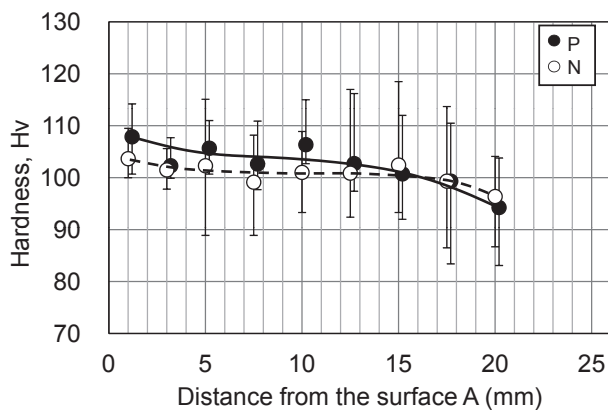


Fig. 12 Hardness profiles from surface A for die-castings with (P) or without (N) local squeezing.

局部加圧を動作させない供試材 (N) と動作させた供試材 (P) における A 面から深さ方向の硬度分布。

押切ら¹⁰⁾ は共晶組成近傍の Al-Si 系合金鑄造材における焼鈍・軟化挙動を調べ、500K 以上の温度域では数秒で急速に軟化するとしている。局部加圧動作時の鑄物温度は、Fig. 3 (b) で示すように、A 面から 1mm 付近において、少なくとも 700K 以上であると予測される。鑄造時に凝固完了後 700K 以上の温度域で加工された場合、一時的に加工硬化を生じたとしても、500K にいたるまでの冷却過程において軟化が進行して、室温での基地の硬さに大きな違いは生じないと考えられる。一方で、基地の塑性流動により微細欠陥等の小型化あるいは数密度の減少などの効果が期待され、疲労強度の改善につながる可能性がある。

局部加圧による疲労強度改善の要因について整理する。肉厚中央付近の試験片での大きな改善効果から、主要因は、破壊起点となる粗大な鑄巣欠陥の抑制にあると判断できる。疲労限度に影響すると考えられる臨界サイズ $\sqrt{\text{area}}=58\mu\text{m}$ 以上の欠陥を効率的に低減することで、欠陥を起点とした破壊を抑制できる。加えて、半凝固状態で流動する際に共晶 Si が分断され、粒界の応力集中が緩和されることによる基地の強化も期待できる。さらに、凝固組織、最大欠陥サイズ、硬さに明確な差のない表面近傍の疲労限度が向上す

ることから、凝固完了後の塑性流動などによる微細欠陥の低減などが効果を及ぼしている可能性を考えた。しかし、 $10\mu\text{m}$ 以下の微細欠陥の差を定量的に評価するに至らず、評価手法を含めて、今後の課題とする。

4. 結 言

局部加圧を施した ADC12 ダイカスト材と、施さないものの疲労試験を比較検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) ADC12 ダイカストに局部加圧を施すと、肉厚中央付近で約 62%、表面に近い場所で約 18% 疲労強度の下限値の向上が得られた。
- (2) この疲労強度改善の主要因は、局部加圧による凝固時の溶湯補給の結果、凝固収縮巣などの欠陥サイズや数密度が低減したためである。
- (3) 疲労破壊起点を与える欠陥サイズが同等であっても、疲労破壊に要する応力振幅は局部加圧材の方が高く、局部加圧による基地組織への影響も考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木宗男：軽金属 **28** (1978) 41
- 2) 杉浦恒之, 泉錦旭, 鈴木治男：軽金属 **36** (1986) 105
- 3) 谷畑昭人, 佐藤奈緒子, 勝俣耕二, 白石隆, 織田和宏, 遠藤修：軽金属 **57** (2007) 131
- 4) 村上敬宣, 児玉昭太郎, 小沼静代：日本機械学会論文集 A 編 **54** (1988) 688
- 5) 村上敬宣, 上村裕二郎, 夏目喜孝, 宮川進：日本機械学会論文集 A 編 **56** (1990) 1074
- 6) 山田耕二, 宮川進, 吉川澄, 橋本昭男：日本機械学会論文集 A 編 **68** (2002) 515
- 7) ダイカストの標準 材料編 DCS M (日本ダイカスト協会) (2006) 11
- 8) 万里, 加藤鋭次, 野村宏之：鑄造工学 **75** (2003) 3
- 9) 鈴木宗男：軽金属 **21** (1971) 111
- 10) Jouji Oshikiri, Osamu Umezawa and Norio Nakamura: Transactions of the Materials Research Society of Japan, **37** (2012) 39