

特集 アルミニウム合金ダイカストの疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響*

Effect of Casting Defect on the Fatigue Strength of Aluminum Die Casting Materials

山田 耕二 宮川 進 吉川 澄
 Kouji YAMADA Susumu MIYAKAWA Sumi YOSIKAWA

To investigate the influence of casting defects on the fatigue strength of aluminum die casting materials, fatigue tests were conducted on four types of aluminum die casting materials. The fatigue strengths were evaluated by using the stair case method for small sample sizes (JSME Standard S02-1981 14S-N testing method) and *area* parameter model using the statistics of extreme values of casting defects. The main results obtained are as follows : (1) The origin of fatigue cracks is casting defects caused by various die casting methods except ADC24Z. (2) The square root of the casting defect area (*area*) follows the statistics of extreme values. (3) The fatigue limits predicted by the *area* parameter model are in agreement with the fatigue limits established by the 14S-N testing method.

Key words : Casting defect, Fatigue strength, Aluminum die casting materials, 14S-N testing method, *area* parameter model

1. はじめに

量産性、コスト面に優れるとともに複雑形状に対応可能なアルミニウム合金ダイカストは自動車部品に数多く採用されている。ハウジング、ブラケットなどの構造部品、耐摩耗特性が必要とされる機能部品が挙げられる。またアルミニウム合金ダイカストの密度は鉄鋼の密度の約1/3であり、有望な軽量化材料の一つである。

このダイカスト材料を今後さらに適用拡大するには、製造方法に起因して内在している巣、湯境等の鑄造欠陥と疲労強度の定量的把握が必要不可欠である。

介在物、欠陥およびき裂が存在しないか、存在しても影響がないほど小さい場合の基地組織の硬さに固有な疲労限度 w_u は経験的に次式で求められることが知られている。

$$w_u = 1.6HV \quad (1)$$

これに対して介在物などの寸法や位置によっては上記疲労限度 w_u が得られない。村上らは¹⁾介在物などが影響する疲労限度 w_L を介在物などの等価寸法、すなわち、主応力方向に投影した欠陥面積の平方根 *area* と基地組織のピッカース硬さ *HV* で求められる次式の疲労限度評価法 (*area* パラメータモデル) を提案している。

$$w_L = C(HV+120)/(area)^{1/6} \cdot [(1-R)/2] \quad (2)$$

- C : 介在物などが表面に接する場合 1.41
- 介在物などが表面上に存在する場合 1.43

介在物などが内部に存在する場合 1.56

$$R := \frac{\min}{\max}$$

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

アルミニウム合金ダイカストの強度特性に関しては、機械的性質、破壊靱性値および疲労き裂進展特性についての研究^{2)~4)}が多く行われているものの、鑄造欠陥を考慮した疲労強度特性に関する検討を行った報告は少ない。

アルミ鑄造材料の鑄造欠陥を考慮した疲労限度に関する検討を行った報告⁵⁾によれば、村上等の *area* パラメータモデルが有効であるとしている。

本研究では、各種ダイカスト法によった4種類のアルミニウム合金ダイカストの時間強度、疲労限度および疲労強度のばらつきを評価するとともに、*area* パラメータモデルとの関係を定量的に検討する。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

実験に用いた材料は共晶Al-Si-Cu合金ADC10材、D10FM材およびADC12材の3種類と亜共晶Al-Mn合金ADC24Z材であり、その化学成分をTable 1に示す。ADC10材とD10FM材の化学成分はほぼ同一であり、ダイカスト法が異なっている。

ADC10材は真空+局部加圧ダイカスト法⁶⁾であり、D10FM材はPFダイカスト法⁶⁾である。ADC12材とADC24Z材は普通のダイカスト法⁶⁾である。

* (社)日本機械学会の了解を得て、「日本機械学会論文集(A編)68巻667号(2002-3)」より転載

Fig.1に試験片形状・寸法を示す．ADC10材，ADC12材，ADC24Z材は (a) の平面曲げ疲労試験片，D10FM材は (b) の回転曲げ疲労試験片とした．D10FM材，ADC12材，ADC24Z材は型に鑄込んで試験片を作製し，ADC10材は部品より機械加工により

試験片を作製した．ADC10材，D10FM材の試験片表面は機械加工面であり，ADC12材，ADC24Z材の表面は鑄肌である．

これら試験片の組織をFig.2に示す．ダイカスト鑄造後に熱処理しない鑄放し状態のADC12-F材の組織は針状の共晶シリコンが多数認められる．ADC10材，D10FM材のT5，T6熱処理後の組織は 相とAl-Siの共晶組織である．ADC24Z材の組織は 相と一部Al-Mn-Feの晶出物（3元結晶）が認められる．なお，ADC10-T5材は表面処理の影響を把握すべくアルマイト処理（皮膜厚さ 最大20 μ m）を施したもも実験に供した．

Table 1 Chemical compositions of fatigue test materials (wt.%)

Test materials	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Al
ADC10	10.5	4.3	0.5	≤ 0.1	0.38	0.55	Bal
D10FM	10.5	4.3	0.5	≤ 0.1	≤ 0.5	0.6	\uparrow
ADC12	10.8	2.5	≤ 0.9	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 0.3	\uparrow
ADC24Z	≤ 0.1	≤ 0.1	0.8	4.7	1.4	—	\uparrow

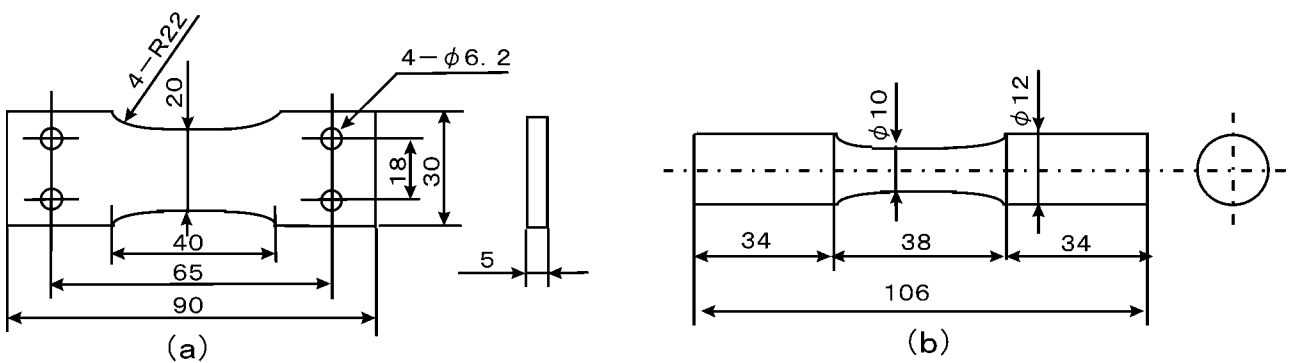


Fig.1 Shape and dimensions of fatigue test specimens (unit : mm)

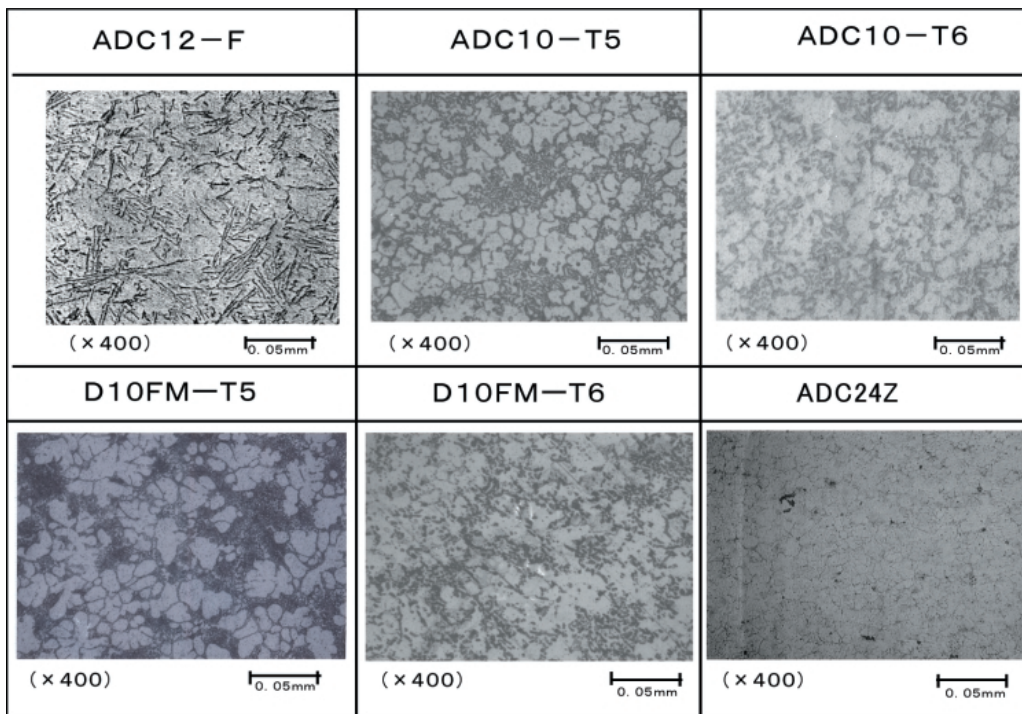


Fig.2 Microstructures of fatigue test specimens

主な材質の機械的性質をTable 2に示す。なお、表中のピッカース硬さHVは押し込み荷重25gで測定した10点の平均値である。

Table 2 Mechanical properties of fatigue test materials

Test materials	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Hardness HV
ADC10-T5	328	0.7	119
D10FM-T6	412	1.4	155
ADC12-F	260	1.5	90
ADC24Z	210	13.2	50

2.2 疲労試験方法

平面曲げ疲労試験は森試験機製作所製シェンク型疲労試験機を用い、回転曲げ疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機を用い、いずれも常温で周波数50Hzで実施した。

疲労試験結果の整理は日本機械学会基準の統計的疲労試験方法(小標本ステアケース法)⁷⁾に準拠した。S-N曲線の傾斜部を決定するために、4応力段階各2本ずつ計8個、水平部を決定するために6個の試験片を用いる14S-N法で疲労限度のばらつきを評価した。非鉄金属材料は鉄鋼材料と異なり疲労限度がないとされており、本研究では繰返し数 $N = 10^7$ 回の時間強度を疲労限度と以下記すことにした。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

各種試験片の疲労試験結果をS-N曲線にまとめてFig.3に示す。黒塗り印で破損を、白塗り印で未破損を示した。なお、水平部を決定するための6点は、記号の重なりを避けるため、 10^7 回を超えるところに記述した。Table 3には時間強度の破壊確率50%となる直線回帰式、時間強度の標準偏差 s 、疲労限度の平均値 $w(\bar{X})$ および変動係数 $\mu (= s / w(\bar{X}))$

の解析結果を示す。

ADC10材の疲労限度平均値 $w(\bar{X})$ は、T5熱処理・アルマイト処理無しを基準に考えると、T5熱処理・アルマイト処理有りは約10MPa増加し、T6熱処理・アルマイト処理無しは約10MPa減少している。

ADC12-F材の疲労限度平均値 $w(\bar{X})$ はADC10材に比較して低く、ADC24Z材はADC12-F材よりもさらに30%程度低い。D10FM-T5材はADC10-T5アルマイト無し材に比較し40%程度高く、D10FM-T6材はD10FM-T5材に対しさらに10%程度向上している。

これらの疲労限度平均値 $w(\bar{X})$ の相違は基本的に硬さに起因した差であるが、鑄造欠陥も影響していると考えられる。アルミニウムおよびアルミニウム合金にアルマイト処理を行った場合の疲労限度はほとんど変化が無いが、やや増加するか、アルマイト皮膜厚さによっては減少することがあるといわれている⁸⁾。今回のADC10-T5材の結果はやや増加した結果となっている。

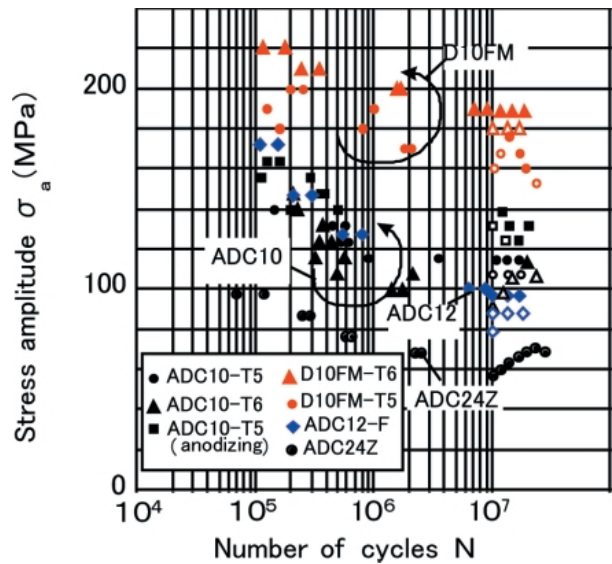


Fig.3 S-N curve by 14S-N testing method

Table 3 Results of fatigue test

Test materials	Regression line in slope	Standard deviation σ_s (MPa)	Fatigue limit $\sigma_w(\bar{X})$ (MPa)	Variable coefficient $\mu (= \sigma_s / \sigma_w(\bar{X}))$
ADC10-T5	$\sigma_a = -20\log N + 244$	6.7	117	0.057
ADC10-T6	$\sigma_a = -23\log N + 246$	7.1	106	0.067
ADC10-T5 (anodizing)	$\sigma_a = -27\log N + 297$	7.0	128	0.055
ADC12-F	$\sigma_a = -37\log N + 353$	9.1	93	0.098
D10FM-T5	$\sigma_a = -17\log N + 280$	8.6	165	0.052
D10FM-T6	$\sigma_a = -21\log N + 327$	5.4	183	0.030
ADC24Z	$\sigma_a = -21\log N + 202$	2.2	66	0.033

疲労限度のばらつきを表す変動係数はADC10-T5材はアルマイト処理の有無によりそれぞれ5.7%, 5.5%である。ADC10-T6材は6.7%であり, D10FM-T5材とD10FM-T6材はそれぞれ5.2%, 3.0%である。ADC12-F材は最も大きく9.8%である。疲労限度平均値 $w(\bar{X})$ が一番低かったADC24Z材の変動係数は3.3%である。今回の疲労試験によって得られた変動係数の相違はダイカスト法に起因した鑄造欠陥の影響を受けているものと考えられる。そこで、次に各種アルミニウム合金ダイカストの破壊起点部を詳細に観察する。

3.2 疲労破面の観察結果

疲労試験した各種試験片の疲労き裂発生起点部付近の破面の一例をFig.4に示す。アルマイト処理の有無にかかわらずADC10-T5材, ADC10-T6材, D10FM-T5材, D10FM-T6材は切削表面付近の鑄造欠陥である巣を, ADC12-F材は鑄肌表面付近の鑄造欠陥である湯境を疲労き裂発生起点としている。ADC24Z材は鑄造欠陥を起点としておらず, 試験片表面より疲労き裂が発生・進展している。ADC24Z材の疲労限度がADC24Z材と同等の硬さを有するアルミ合金展伸材の疲労限度(A1010-H38, HV 50, $w_u = 60\text{MPa}$) とほぼ同等なことからも基地組織の硬さに固有な疲労限度 w_u が得られたものと考えられる。

3.3 極値統計による鑄造欠陥の評価

疲労き裂発生起点部付近から得られる各種鑄造欠陥面

積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ を極値確率紙にプロットした結果をFig.5に示す。各プロット点の $\sqrt{\text{area}}$ は試験片1本当たりの最大欠陥寸法を示す。各種鑄造欠陥とも直線関係となっていることより極値確率分布に従っているものと判断される。

ADC10-T5材はアルマイト処理有無により巣の寸法やばらつきに差はほとんど認められない。ほとんど差が認められなかったのは, アルマイト処理有無試験片を同一ロットの部品より作製しているためと考える。

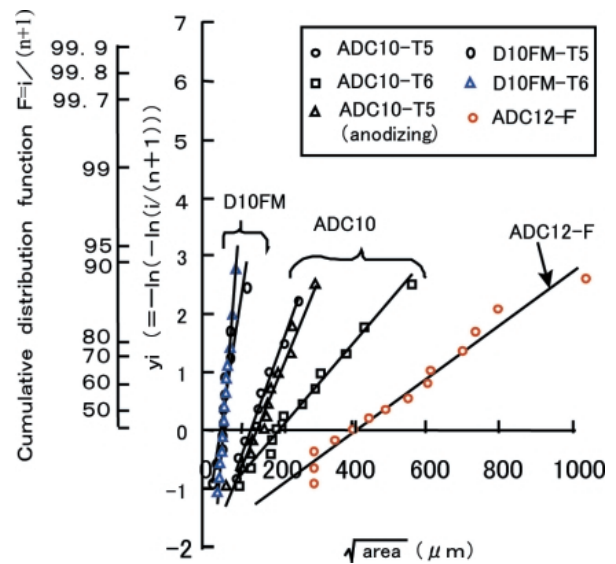


Fig.5 Statistical distributions of the extreme values

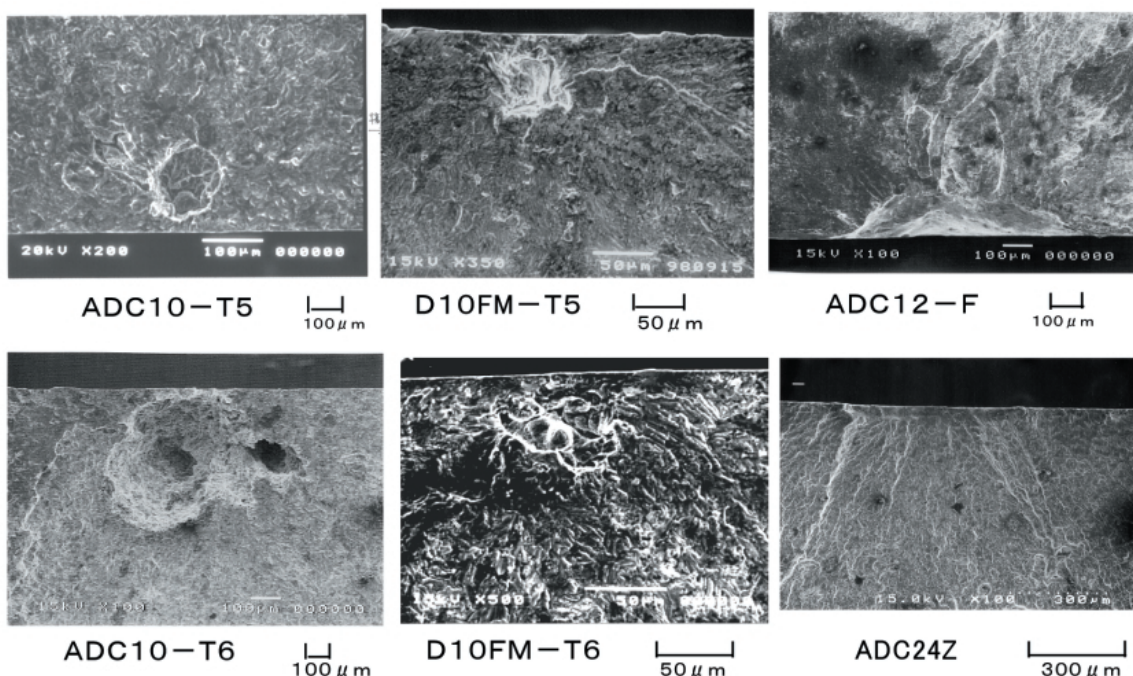


Fig.4 Fracture surfaces of crack initiation portion

ADC10-T6材は、上記ADC10-T5材と同一ロットの部品より作製しているにもかかわらずADC10-T5材よりも巣の寸法が大きく、かつばらつきも大きくなっている。T6熱処理（熱処理温度500 付近）によりアルミニウム合金ダイカストの強度が低下し、巣内の圧力により巣が膨張したためと考える。

D10FM材は最も鑄造欠陥の寸法が小さくばらつきも小さくなっている。T5熱処理とT6熱処理により巣の寸法やばらつきに差がほとんど認められない。

ダイカスト製造方法に起因して、D10FM材はADC10材よりも、ガス量が少なく、巣内の圧力も低いために巣の膨張が生じなかったためと思われる。普通のダイカスト法であるADC12-F材の湯境は、ADC10-T6材の巣よりも、寸法が大きくかつばらつきも大きい。このような鑄造欠陥の寸法やばらつきの大小関係は、14 S-N法により得られた各種試験片の変動係数の大小関係とよく一致しているものとする。

なお、ダイカスト法によった部品の品質管理において、鑄造欠陥の管理は重要であり、極値統計分布による欠陥評価は極めて有効な手法と考える。

3.4 \overline{area} パラメータモデルによる疲労限度の推定

Fig.5の極値統計分布より得られる疲労試験14本中に存在することが予想される最大鑄造欠陥寸法、 $area_{max}$ 、基地組織のピッカース硬さHVを用いて式(2)より推定される疲労限度 $w_L(N=14)$ および疲労試験により得られた疲労限度の平均値 $w(\bar{X})$ を

Table 4に示す。なお、 $area_{max}$ による疲労限度を推定する際、式(2)中の $C=1.41$ の値を用いた。 $area_{max}$ により推定した疲労限度 $w_L(N=14)$ と疲労試験により得られた疲労限度の平均値 $w(\bar{X})$ との差は約15%程度以内であり、ほぼ良く一致している。ADC12-F材の疲労限度が最も小さいという疲労挙動、T6熱処理により疲労限度が低下するというADC10材の疲労挙動およびT6熱処理により疲労限度が増加するというD10FM材の疲労挙動等を説明する。

3.5 \overline{area} パラメータモデルによる疲労限度下限値の検討

疲労限度のばらつきは量産品の品質保証の観点から重要である。14 S-N法により得られた疲労限度下限値 $w(\bar{X}-3)$ を \overline{area} パラメータモデルにより検討を行うことにした。破損した試験片より得られる鑄造欠陥数が少ないくらいはあるが \overline{area} パラメータモデルによる疲労限度下限値 $w(\bar{X}-3)$ に対する最大欠陥寸法の推定は、Fig.5に示した直線の外挿にて行うことにした。14 S-N法による疲労限度下限値が \overline{area} パラメータモデル法による疲労限度推定の際、試験片本数が何本相当になるか検討を行う。Fig.6に疲労限度 w 、欠陥寸法 $area$ と各種欠陥の極値確率分布の基準化変数 y_i に対応する試験片本数の関係の概略図を示す。 $area_{max}$ により推定した疲労限度 $w_L(N=14)$ と疲労試験により得られた疲労限度の平均値 $w(\bar{X})$ との差(Fig.6中 1)が疲労限度下限値の場合も同様な割合で生じると考え、14 S-N法に

Table 4 Comparisons between the predicted fatigue limit and the experimental result

Test materials	Inclusion size $\sqrt{area_{max}}(\mu m)$	Hardness HV	\sqrt{area} parameter method $\sigma_{WL(N=14)}(MPa)$	Fatigue limit determined by S-N curve $\sigma_w(\bar{X})(MPa)$	$\frac{\sigma_w(\bar{X})}{\sigma_{WL(N=14)}}$
ADC10-T5	275	119	132	117	0.89
ADC10-T6	559	142	129	106	0.82
ADC10-T5 (anodizing)	287	120	132	128	0.97
ADC12-F	950	90	94	93	0.99
D10FM-T5	112	125	157	165	1.05
D10FM-T6	83	155	186	183	0.98

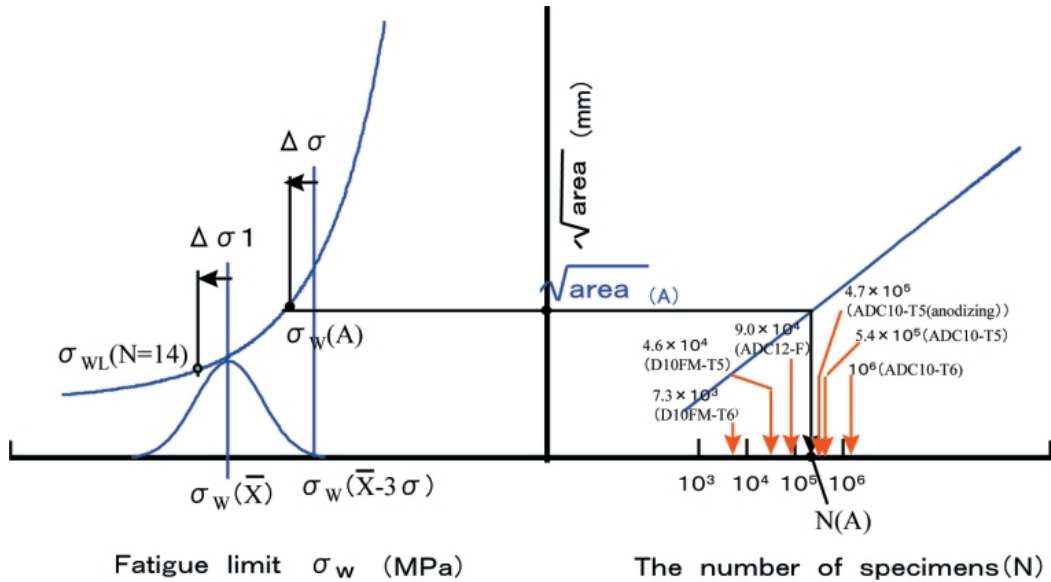


Fig.6 Relationship between fatigue limit and defect size and the number of specimen

より得られる疲労限度下限値 $\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma)$ を図中 $(\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma) = \sigma_w(N=14) / \sigma_w(\bar{X}) - 1)$ で修正した値 $\sigma_w(A)$ を求める。 $\sigma_w(A)$ に相当する欠陥寸法 (Fig.6中 $\sqrt{area}(A)$) を求め、その欠陥寸法に相当する試験片本数 (Fig.6 $N(A)$) を求める。このようにして求めた各種アルミニウム合金ダイカストの試験片本数を図6中に示す。求めた試験片本数は 10^3 本から 10^6 本付近とかなりのばらつきを持っている。各種材料の求めた試験片本数の平均は 3.6×10^5 本であったが、かなり大きなばらつきを持っていることより、 \sqrt{area} パラメータモデルによる疲労限度下限値推定の際、試験片本数として、平均の試験片本数相当の 10^5 本とした。

Table 5に試験片本数 10^5 本に対する鑄造欠陥寸法 \sqrt{area}_{max} 、基地組織のピッカース硬さ HV を用いて式

(2)より疲労限度 $\sigma_{WL}(N=10^5)$ と14 S-N法により得られた疲労限度下限値 $\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma)$ を比較して示す。ADC10-T6材、ADC12-F材を除き両者の差は約15%以内である。村上らの \sqrt{area} パラメータモデルは欠陥寸法として1mm未満の微小欠陥に対して提案されている。ADC10-T6材、ADC12-F材の最大鑄造欠陥寸法は1mm以上となることにより、 \sqrt{area}_{max} により推定した疲労限度 $\sigma_{WL}(N=10^5)$ と14 S-N法により得られた疲労限度下限値 $\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma)$ との差が大きくなったものと思われる。推定される最大欠陥寸法が1mm程度以上の場合、推定精度が悪くなり、適用限界があることには留意すべきである。

S-N曲線の傾斜部を決定するために、4応力段階各2本ずつ計8個、水平部を決定するために6個の試験片を用いる14 S-N法の試験期間は1~2ヶ月間であ

Table 5 Comparisons between the predicted fatigue limit and the experimental result

Test materials	Inclusion size $\sqrt{area}_{max} (\mu m)$	\sqrt{area} parameter method $\sigma_{WL}(N=10^5)$ (MPa)	Fatigue limit determined by S-N curve $\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma)$ (MPa)	$\frac{\sigma_w(\bar{X} - 3\sigma)}{\sigma_{WL}(N=10^5)}$
ADC10-T5	777	111	97	0.87
ADC10-T6	1738	107	85	0.79
ADC10-T5 (anodizing)	752	112	107	0.96
ADC12-F	2815	79	66	0.84
D10FM-T5	335	131	139	1.06
D10FM-T6	208	159	167	1.05

る。上記よりも短時間の欠陥寸法調査により疲労限度をある程度精度良く推定できることは実用上有意義なことと考える。

4. まとめ

4種類のアルミニウム合金ダイカストの疲労強度特性を明らかにするとともに、*area* パラメータモデルを用いて鑄造欠陥と疲労限度の定量的関係について検討を加えた結果、次の結論を得た。

- (1) 亜共晶Al-Mn合金ADC24Z材を除き、共晶Al-Si-Cu合金ADC10材、D10FM材およびADC12材の疲労き裂は、製造方法に起因した巣、湯境をき裂発生起点としている。
- (2) 疲労き裂発生起点部付近から得られる各種鑄造欠陥面積の平方根 *area* を極値確率紙にプロットした結果によれば、いずれも直線関係となっていることより、鑄造欠陥面積の平方根 *area* は極値確率分布に従っている。
- (3) 極値確率分布による鑄造欠陥の寸法やばらつき的大小関係は、14S-N法により得られた各種試験片の変動係数の大小関係とよく一致している。
- (4) 極値統計分布より得られる疲労試験片14本中に存在することが予想される最大鑄造欠陥寸法、*area_{max}*、基地組織のピッカース硬さ*HV*を用いて推定される疲労限度 $w_L(N=14)$ と14 S-N法により得られた疲労限度の平均値 $w(\bar{X})$ との差は約15%程度以内である。
- (5) 極値統計分布より得られる試験片本数 10^5 本の鑄造欠陥と基地組織のピッカース硬さ*HV*を用いて推定される疲労限度 $w_L(N=10^5)$ と14 S-N法により得られた疲労限度下限値 $w(\bar{X}-3)$ との差はADC10-T6材、ADC12-F材を除き、約15%以内である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、疲労試験片等の提供をして頂いた日軽金属株式会社殿に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 村上敬直, 上村裕二郎, 夏目喜孝, 宮川進: 日本機械学会論文集A, 56 (1990), p.1074.
- 2) 金沢憲一, 千々岩健児, 兼定逸夫: 日本ダイカスト協会, JD90-17, pp.134 - 142
- 3) 千々岩健児, 金沢憲一, 南和一郎, 鑄物, 60, 12 (1988), p.784.
- 4) 金沢憲一, 久保田一, 中村和久, 平野一美: 日本機械学会論文集A, 62 (1996), pp.379 - 386.
- 5) 小林幹和, 松井利治: 日本機械学会論文集A, 62 (1996), pp.341 - 346.
- 6) 日本ダイカスト協会編、“ダイカスト技術史” (1995), p.9.
- 7) 日本機械学会編, “統計的疲労試験方法JSME S002” (1981)
- 8) 川田雄一, 金属の疲労と設計, pp.180 - 181
- 9) 西島・ほか9名, 材料, Trans. NRIM, 19 (1977), p.119.
- 10) 夏目喜孝, 宮川進, 時森好孝, 材料, 38 - 430 (1989), p.796.
- 11) 田村宏, 杉山好弘, 木村太郎, 鑄造工学, 第69巻 (1997), 第3号



< 著 者 >



山田 耕二
(やまだ こうじ)
材料技術部
金属材料等の材料強度研究に従事



宮川 進
(みやかわ すすむ)
材料技術部 工学博士
金属材料,樹脂材料等の材料強度研究
に従事



吉川 澄
(よしかわ すみ)
部品製造部
ダイカスト部品加工の生産技術に従事