

# 論文 アルミダイカスト材料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  
Kouji YAMADA

宮川 進  
Susumu MIYAKAWA

吉川 澄  
Sumi YOSIKAWA

橋本 昭男  
Akio HASIMOTO

To investigate the influence of casting defect on the fatigue strength of aluminum die casting materials, fatigue tests were conducted on four type of aluminum die casting materials. The fatigue strengths were evaluated by using the stair case method for small sample size (JSME Standard S02-1981 14S-N testing method) and  $\sqrt{\text{area}}$  parameter model using the statistics of extreme values of casting defect.

The main results obtained are as follows:

- (1) The origin of fatigue crack is casting defect caused by various die casting method.
- (2) The square of casting defect area ( $\sqrt{\text{area}}$ ) follow the statistics of extreme values.
- (3) The fatigue limits predicted by the  $\sqrt{\text{area}}$  parameter model are in good agreement with the fatigue limits by the 14S-N testing method.

**Key Words** : Casting defect, Fatigue strength, Aluminum die casting materials, 14S-N testing method,  $\sqrt{\text{area}}$  parameter model

### 1. はじめに

量産性、コスト面に優れるとともに寸法精度、複雑形状に対応可能なアルミダイカスト材料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、摺動特性が必要とされる機能部品が挙げられる。また、アルミダイカスト材料の密度は鉄鋼の密度の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、製法工程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、欠陥および亀裂が存在しないか、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れ限度の上限値  $w_u$  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れ限度の上限値  $w_u$  が得られない。村上らは<sup>1)</sup> 介在物などが影響する疲れ限度の下限値  $w_l$  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面積の平方根  $\sqrt{\text{area}}$  と基地組織のピッカース硬さ HV で求められる次式の疲れ限度評価法 ( $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデル) を提案している。

\* (社) 日本機械学会の了解を得て、M&M 材料力学部門講演会 No.939(2000.10) より加筆転載

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

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

$$R = \frac{\min}{\max} \\ = 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

アルミダイカスト材料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亀裂進展特性についての研究<sup>2)~4)</sup> 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加えた報告は少ない。

アルミ鑄造材料の鑄造欠陥を考慮した疲れ限度に関する検討を加えた報告<sup>5)</sup> によれば、村上等<sup>1)</sup> の  $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルが有効であるとしている。

本研究では、各種ダイカスト製法によった4種類のアルミダイカスト材料の14S-N試験法による疲労強度特性と  $\sqrt{\text{area}}$  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、ダイカスト製法が異なっている。

ADC10材は真空+局部加圧ダイカスト製法であり、D10FM材はPFダイカスト製法である。ADC12材とADC24Z材は一般のダイカスト製法である。

Fig. 1に各種試験片形状・寸法を示す。ADC12材、ADC10材、ADC24Z材は(a)の両振り平面曲げ疲労試験片、D10FM材は(b)の両振り回転曲げ疲労試験片とした。ADC12材とADC24Z材は型にて試験片を作製し、ADC10材は部品より機械加工により試験片を作製した。

これら試験片の組織をFig. 2に示す。ダイカスト製法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の共晶組成である。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 μm)を施したのもも実験に供試した。

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 1 Chemical compositions of fatigue test materials

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	
ADC12	10.8	2.5	0.9	1.0	0.5	0.3	
ADC24Z	0.1	0.1	0.8	4.7	1.4		

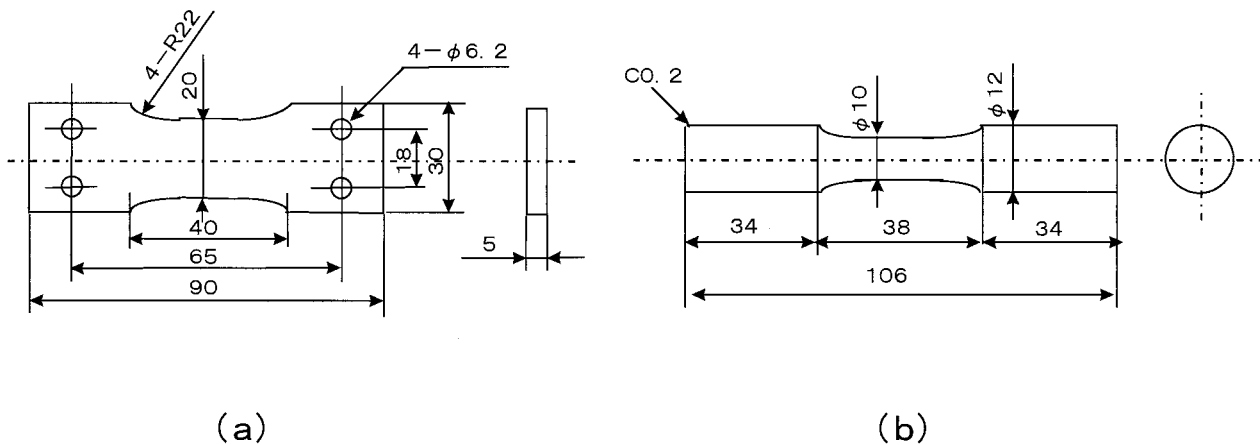


Fig. 1 Shape and dimensions of fatigue test specimens

Table 2 Mechanical properties of fatigue test materials

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

2.2 疲労試験方法

両振り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、両振り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)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試験法で耐久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耐久限度がないとされており、本研究では繰返し数N = 10<sup>7</sup>回の時間強度を疲れ限度と以下記すことにした。

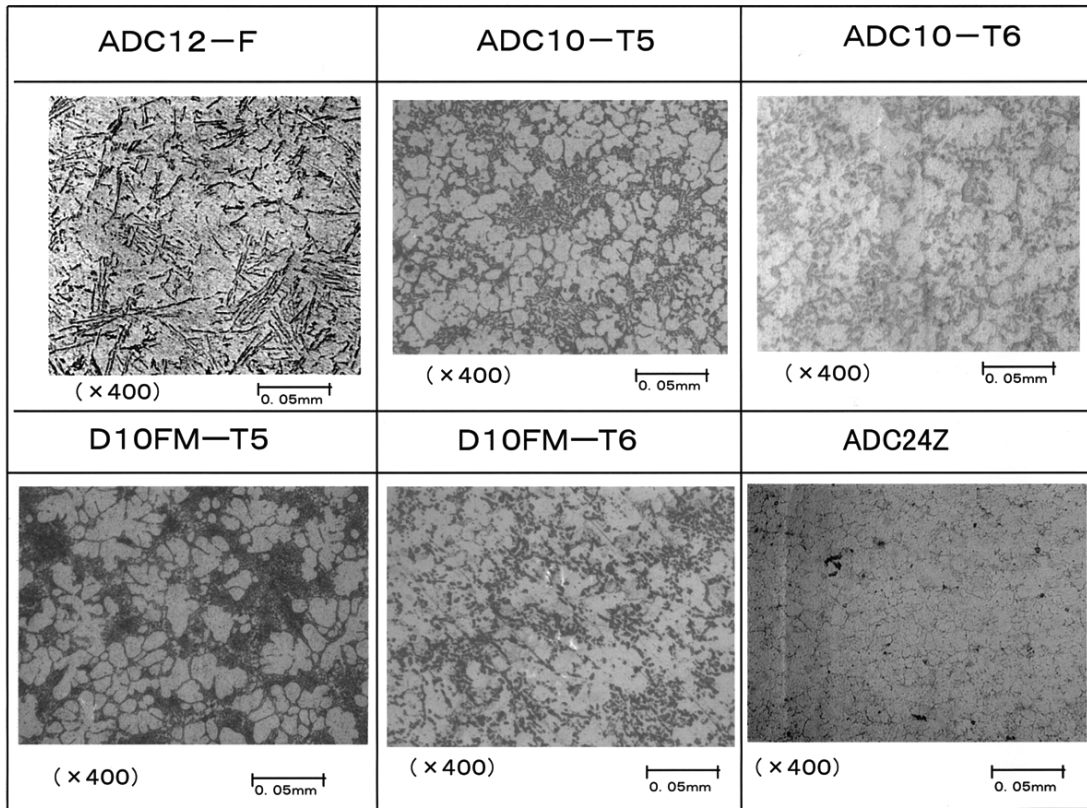


Fig. 2 Microstructures of fatigue test specimens

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

各種試験片の両振り曲げ疲労試験結果をS-N曲線にまとめてFig. 3に示す。黒塗りで破壊を、白塗りで未破壊を示した。Table 3には時間強度の破壊確率50%となる直線回帰式、時間疲労強度標準偏差  $\sigma_s$ 、疲れ限度の平均値  $\sigma_w(\bar{X})$  および変動係数  $\mu(= \sigma_s / \sigma_w(\bar{X}))$  の解析結果を示す。

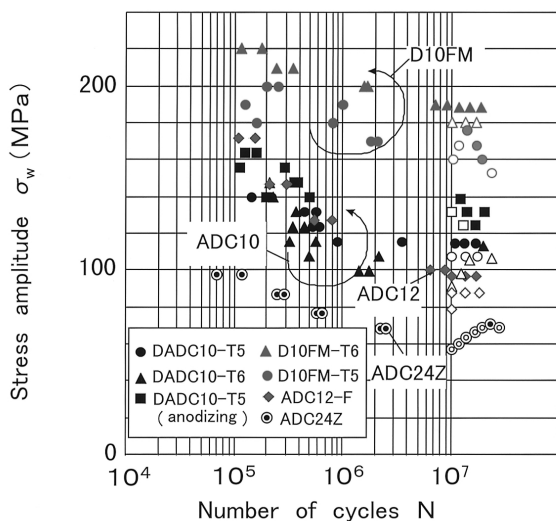


Fig. 3 S-N curve by 14S-N testing method

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

これらの疲れ限度平均値  $\sigma_w(\bar{X})$  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に疲れ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<sup>7)</sup>。今回のADC10-T5材の結果はやや増加した結果となっている。アルマイト皮膜による圧縮残留応力効果によるものが今後の検討が望まれる。

疲れ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。疲れ限度平均値  $w(\bar{X})$  が一番低かったADC24Z材の変動係数は3.3%である。

西島らによるS45C材160本の両振り回転曲げ疲れ限度のばらつきの検討結果によれば、焼きならし平滑試験片の変動係数は2.1%、調質切欠き試験片の変動係数は6.4%と報告している。夏目ら<sup>8)</sup>によるS45C材の14S-N試験法による両振り引張・圧縮疲れ限度のばらつき検討結果によれば、焼きならし平滑試験片の変動係数は3.1%、調質切欠き試験片の変動係数は5.5%と報告するとともに、ダイカスト製法によった過共晶Al-Si合金A390-F材の14S-N試験法による両振り平

面曲げ疲れ限度のばらつき検討結果によれば、鑄放し平滑試験片の変動係数は11%と報告している。

今回のADC12-F材はA390-F材と、3種類のADC10材とD10FM-T5材はS45C調質切欠き試験片と、D10FM-T6材はS45C焼きならし平滑試験片と、それぞれほぼ同等の変動係数となっている。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製法に起因した鑄造欠陥の差と考えられる。

Table 3 Results of fatigue test

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

### 3.2 疲労破面の観察結果

両振り曲げ疲労試験した各種試験片の疲労亀裂開始点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材と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材は鑄肌表面付近である湯境を疲労亀裂開始点としている。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亀裂が発生・進展している。ADC24Z材のピッカース硬さHVと同等のアルミ合金展伸材の疲れ限度A1010-H38, HV50,  $w_u=60\text{MPa}$ )とほぼ同等なことからも基地組織の硬さに固有な疲れ限度の上限値  $w_u$  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

疲労亀裂開始点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。

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。しいて言えば、アルマイト処理有りの方が大きい傾向にある。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。

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が、しいて言えばT6熱処理の方が小さい傾向がある。一般ダイカスト製法である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より、14S-N試験法により得られた各種試験片の変動係数の大小関係を無理なく説明することができるものと考えられる。

なお、ダイカスト製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。

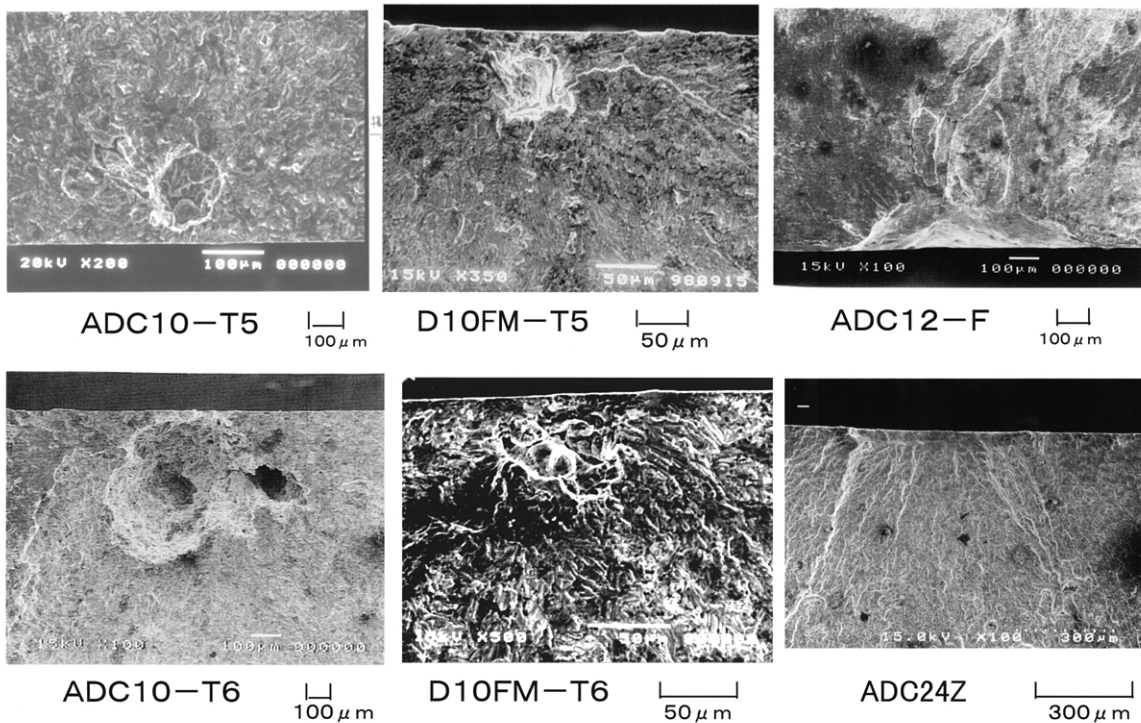


Fig. 4 Fracture surfaces of crack initiation portion

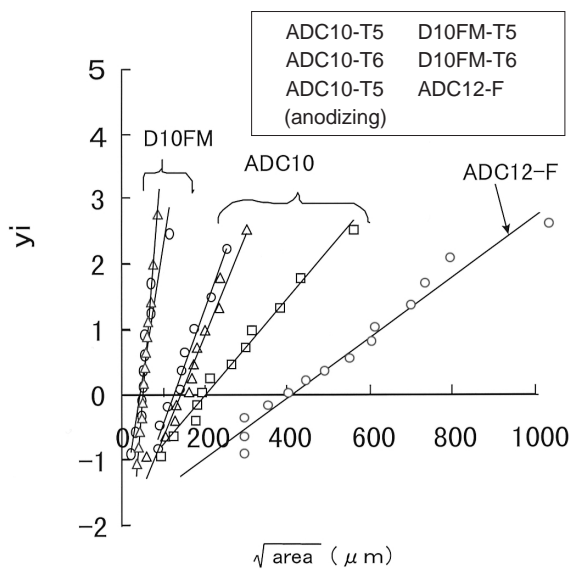


Fig. 5 Statical distributions of the extreme values

### 3.4 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルによる疲れ限度の推定

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

$\sqrt{\text{areamax}}$  , 基地組織のピッカース硬さHV , 式(2)

により得られる疲れ限度  $w_L(\bar{X})$  および疲労試験により得られた疲れ限度の平均値  $w(\bar{X})$  をTable 4に示す。

$\sqrt{\text{areamax}}$  により推定した疲れ限度  $w_L(\bar{X})$  と疲労試験により得られた疲れ限度の平均値  $w(\bar{X})$  とは約15%程度でほぼ良く一致している。ADC12-F材の疲れ限度が最も小さいという疲労挙動, T6熱処理により疲れ限度が低下するというADC10材の疲労挙動およびT6熱処理により疲れ限度が増加するというD10FM材の疲労挙動等を合理的に説明しうる。

### 3.5 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルによる疲れ限度下限値の検討

疲れ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。14S-N試験法により得られた疲れ限度下限値  $w(\bar{X} - 3)$  を  $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルにより検討を加えることにした。疲労試験の関係上, 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, Fig. 5に示した直線の外挿にて任意の  $\sqrt{\text{areamax}}$  に対応する試験片本数を推定することにした。

Fig. 6に疲れ限度  $w$  , 欠陥寸法  $\sqrt{\text{areamax}}$  と試験片本数の関係を示す。14S-N試験法により得られた疲れ限度下限値  $w(\bar{X} - 3)$  に対する試験片本数は材

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

Test Materials	Inclusion size $\sqrt{\text{areamax}} (\mu\text{m})$	Hardness HV	$\sqrt{\text{area}}$ parameter method $w_L (\bar{X} \pm \text{MPa})$	Fatigue limit determined by S-N curve $w_L (\bar{X} \pm \text{MPa})$	$\frac{w_L(\bar{X})}{w_L(\bar{X})}$
ADC10-T5	280	119	132	117	0.89
ADC10-T6	550	142	128	106	0.83
ADC10-T5 (anodizing)	284	120	132	128	0.97
ADC12-F	860	90	96	93	0.97
D10FM-T5	110	125	158	165	1.04
D10FM-T6	82	155	186	183	0.98

質によらずほぼ $10^7$ 本数であることがわかる。

Table 5 に試験片本数 $10^7$ に対する鑄造欠陥より求めた疲れ限度  $w_L(\bar{X} - 3\sigma)$  (14S-N 試験法により得られた疲れ限度下限値  $w_L(\bar{X} - 3\sigma)$ ) を比較して示す。両者は約10%程度でほぼ良く一致しており、実用上有意義ではないかと考える。

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)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 試験法の試験期間は 1 ~ 2ヶ月間である。左記よりも短時間の欠陥寸法調査により疲れ限度を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。

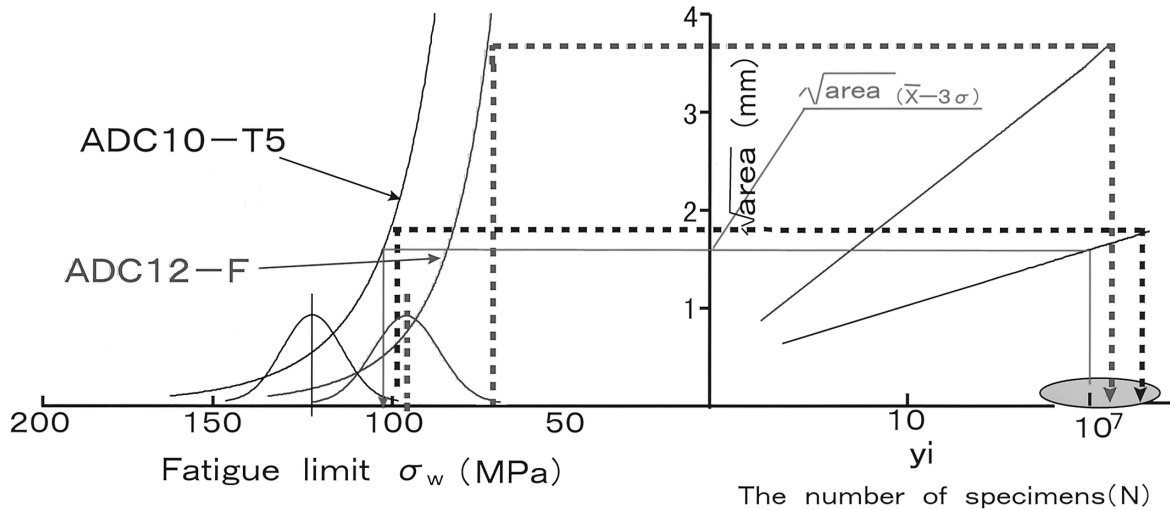


Fig. 6 Relationship between fatigue limit and defect size and the number of specimen

#### 4. まとめ

ダイカスト製法によった 3 種類のアルミダイカスト材料の疲労強度特性を明らかにするとともに、 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルを用いて鑄造欠陥と疲れ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) 疲労破面の観察結果より、ダイカスト製法によった各種鑄造欠陥を疲労亀裂開始点としている。
- (2) 疲労亀裂開始点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  $\sqrt{\text{area}}$  は極値確率分布に従っている。

- (3)  $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルによる疲れ限度の推定値と 14S-N 試験法により得られた疲れ限度の実測値は良い対応を示しており、 $\sqrt{\text{area}}$  パラメータモデルはアルミダイカスト材料の疲れ限度の推定に有効な評価方法である。

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

Test Materials	$\sqrt{\text{area}}$ parameter method $w_L(\bar{X} - 3)$	Fatigue limit determined by S-N curve $w_L(\bar{X} - 3)$	$w_L(\bar{X} - 3)$
			$w_{LE}(\bar{X} - 3)$
ADC10-T5	106	98	0.92
ADC10-T6	100	89	0.89
ADC10-T5 (anodizing)	107	109	1.02
ADC12-F	75	69	0.92
D10FM-T5	139	125	0.90
D10FM-T6	167	152	0.91

<参考文献>

- 1) 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, 56(1990), 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, 134-142
- 3) 千々岩健児, 金沢憲一, 南和一郎, 鑄物, 60, 12 (1988) 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), 379-386
- 5) 小林幹和, 松井利治: 日本機械学会論文集A, 62(1996), 341-346
- 6) 日本機械学会編, “統計的疲労試験方法JSME S002” (1981).
- 7) 川田雄一, 金属の疲労と設計, 180-181
- 8) 夏目喜孝, 宮川進, 時森好孝, 材料, 38-43(1989), 796



<著者>



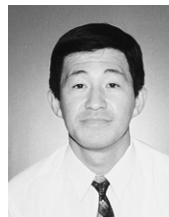
山田 耕二  
(やまだ こうじ)

材料技術部  
材料強度の研究(アルミダイカスト製品の強度・信頼性保証等)に従事。



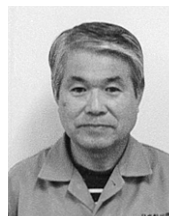
宮川 進  
(みやかわすすむ)

材料技術部  
材料強度の研究(金属材料の強度全般)に従事。



吉川 澄  
(よしかわ すみ)

アルミダイカスト製品・部品の製造・開発に従事。



橋本 昭男  
(はしもと あきお)

日本軽金属(株)  
アルミニウム合金の開発に従事。