$\sqrt{area}$ パラメータモデルによる
アルミ合金鋳物の疲労強度予測*小林 幹 和^{*1}, 松 井 利 治^{*1}Prediction of Fatigue Strength of Aluminum Casting Alloys
by the $\sqrt{area}$ Parameter Model

Motokazu KOBAYASHI and Toshiharu MATSUI

In order to evaluate quantitatively the effect of inherent defects on the fatigue strength of aluminum casting alloys, a fatigue strength prediction by the $\sqrt{area}$ parameter model was performed using the statistics of extreme values of defect size. Rotating-bending fatigue tests were carried out on AC 4C aluminum alloys with three levels of defect size. It was found that the fatigue strength decreased with increasing defect size and the prediction for the lower limits of fatigue strength of these aluminum alloys was successfully correlated with the results of experiment.

Key Words: Fatigue, Life Prediction, Casting, Hardness, Aluminum, Defects, $\sqrt{area}$ Parameter Model, Statistics of Extreme Values

1. 結 言

近年の経済状況や省資源、省エネルギーをも含めた環境保全問題などの周囲を取り巻く環境がいちだんと厳しくなる中で、自動車産業においては軽量化へのニーズが非常に強くなってきており、自動車部品へのアルミ材の使用が増加しつつある。中でも、コスト面および複雑形状が可能である面などから、アルミ合金鋳物の採用が増加傾向にある。しかしながら、アルミ合金鋳物はその製造工程に起因して、本質的に鑄巣などの欠陥を初めから内在している。このような欠陥は疲労強度のばらつきの原因となるので、アルミ合金鋳物の自動車部品などの量産品への採用に際しては、鉄鋼材料などと比較してより大きな安全率で強度設計せざるを得ない状況となっている。

アルミ合金鋳物の疲労強度の定量的評価および予測法に関しては、破壊力学的手法による研究⁽¹⁾⁽²⁾などが報告されているがまだ確立されていないのが実状である。

そこで、本研究では具体的には下記 2 点を明確にす

ることを試みた。

- ① 内在する鑄造欠陥の定量化と欠陥寸法の予測、
- ② 鑄造欠陥の疲労強度に及ぼす影響の定量化。

これら二つの問題が解決できれば疲労信頼性からみた材料と製品の品質管理が可能となり、実用的価値は大きい。

なお、疲労強度と鑄造欠陥寸法の関係については、村上らによって提案された評価法⁽³⁾⁻⁽⁸⁾を用いた球状黒鉛鑄鉄の例が報告⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾されている。本研究においても、球状黒鉛鑄鉄に対して有効性が実証された村上らの評価法($\sqrt{area}$ パラメータモデル)を用いて、鑄造欠陥寸法が異なるアルミ合金鋳物について疲労強度の定量的評価を行い、同時に実施した疲労試験結果との比較から評価法の有効性につき検討を加えた。

これまで、アルミ合金鋳物について上記①、②の問題を定量的に明確にした研究は見当たらない。本研究の供試材は自動車部品用として広く使用されるもので、本研究ではこれらの問題を解決するとともに、本評価法の成果を応用し、自動車用アルミ鋳物実部品にてその有効性を確認した。

* 1994 年 8 月 18 日 第 72 期全国大会講演会において講演、原稿受付 1995 年 6 月 14 日。

^{*1} 正員、三菱自動車工業(株) (〒211 川崎市中原区大倉町 10)。

2. 供試材および試験方法

供試材としては、鋳造材として自動車部品などに広く使用されている AC4C 材 (Al-Si-Mg 系) を使用した。表 1 にその化学成分および図 1 に代表的な顕微鏡組織を示す。

素材に含まれる内部欠陥寸法を変えるため、図 2 に示す舟金型に鋳造する条件を変更し、さらに機械加工による採取位置も変えた。これにより内部欠陥寸法の異なる 3 種類の試験片 (以下、欠陥の少ない順に A, B, C 材とする) を作製した。図 3 にその試験片形状を示す。

試験片はすべて熱処理をしていない鋳放し材とし、基地硬さはいずれの試験片とも HV 60 である。なお、試験片表面はエメリー紙で軸方向に研磨を施した。

疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 100 N・m, 回転数 2 800 rpm) を使用し、室温・大気雰囲気中で実施した。

3. 疲労強度と欠陥寸法の関係式

一般に、疲労強度と欠陥寸法の関係は図 4 に示す通り三つの領域に大別されると考えられている。

領域 I は、疲労強度が寸法欠陥に依存せず材料の基地組織の硬さで決定される。領域 III は、大きなき裂 (欠陥) に対するき裂成長の下限界条件 ΔK_{th} (=一定値) で

Table 1 Chemical composition of AC4C Aluminum Alloy

wt%							
Si	Mg	Fe	Ti	Na	Cu	Mn	Zn
7.0	0.34	0.07	0.12	0.039	trace	trace	trace

Fig. 1 Microstructure

Fig. 2 Location of test piece

疲労強度が規定される。領域 II は両者の中間にあたり、欠陥寸法により ΔK_{th} が変化する領域に相当し、村上らの評価式を適用すると、材料の基地硬さ (ピッカース硬さ) と欠陥の形状パラメータ $\sqrt{area}$ から一義的に疲労強度が決まる。以下にその式を示す。

領域 I の場合⁽⁷⁾

$$\sigma_w = 1.6HV \quad \dots\dots\dots (1)$$

領域 II の場合

$$\sigma_w = 1.41(HV + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(欠陥が自由表面近傍にある場合)

領域 III の場合

$$\sigma_w = \Delta K_{th} / \{0.65(\pi \sqrt{area} \times 10^{-6})^{1/2}\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(表面欠陥の場合)

ここで、各量の定義および単位は

HV: 基地組織のピッカース硬さ kgf/mm²

area: 欠陥を最大主応力方向に投影した面積 μm^2

ΔK_{th} : き裂成長の下限界条件 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$

である。

なお、現在の鋳造技術で実際のアルミ鋳物部品に内在する欠陥寸法としては、上記の領域 II に属するものが事実上対象となる。

4. 内在欠陥の最大寸法予測

欠陥寸法が疲労強度に影響する領域 II, III では、実用上は部材に内在する最大欠陥寸法を推定することによって、その部材の疲労強度のばらつきの下限値を予測することが可能である。

村上らの研究によれば、極値統計学的手法⁽¹²⁾を用

Fig. 3 Dimension of rotating bending specimen

Fig. 4 Relationship between fatigue strength and defect size

いた介在物評価法⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾により介在物の最大寸法予測が可能である。

そこで、この手法を鋳造欠陥に対しても適用する。

前述の欠陥寸法の異なる A, B, C 材各々に対し、その断面組織中の欠陥分布(試験片断面内での欠陥寸法のばらつきは認められない)から得られた最大鋳造欠陥の累積頻度分布を極値確率紙上に整理したものを図 5 に示す。このときの検査基準面積 S_0 は、 $S_0=44.16 \text{ mm}^2$ で、検査視野数は 40 である。図より、いずれの分布も直線関係と見ることができるので、 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の分布は極値確率分布に従うと考えてよい。したがって、この直線の外挿にて任意の対象とする危険体積(試験片本数)中に存在する $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を推定することが可能である。

なお、図 6 に示すとおり近接している欠陥に関しては、二つの欠陥の間に小さいほうの欠陥が挿入できな

いレベルの場合は、一つの欠陥とみなし両者の欠陥の大きさの和を採用した。

表 2 に、A, B, C 各材について試験片 10 本および 100 本中に存在すると予想される $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を示す。表 2 からわかるように、同じ危険体積中に予想される $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ は、A, B, C 材の順に大きい。しかも C 材の欠陥は A, B 材と比較し非常に大きい。

5. 疲労試験結果

図 7 に A, B, C 各材の疲労試験結果の $S-N$ 線図を示す。疲労寿命は一見非常にばらつきが大きい。繰返し数 $N=5 \times 10^7$ 回で定義した疲労限度は試験片の採取位置違いすなわち欠陥の大きさの違いに対応して明らかに異なっており、欠陥が小さい順に疲労強度が高い結果となっている。特に A, B 材と比較して欠陥寸法の大きい C 材の疲労強度が大きく低下している。

Table 2 Prediction of $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$

Material	Test volume V(mm ³)	Number of specimens	Return period T	√ area _{max} (μm)
A	950.02	10	6.14×10 ³	124
		100	6.14×10 ⁴	149
B		10	2.45×10 ³	353
		100	2.45×10 ⁴	438
C		10	6.47×10 ²	1739
		100	6.47×10 ³	2287

Fig. 5 Distribution of extreme values for defect size

Fig. 6 Intervention effect of near defects

Fig. 7 S-N diagram

Fig. 8 Example of fatigue origin

A, B, C 各材の疲労破壊起点部を走査型電子顕微鏡で観察し、起点となった欠陥を調査した。図 8 にその一例を示す。図 8 からわかるように、A 材については起点となった明確な鋳造欠陥が認められない。しかし、B, C 材については明確な鋳造欠陥が認められる。また、C 材の欠陥は B 材に比較し明らかに大きい。なお、起点となった欠陥はすべて試験片の自由表面近傍にあった。

一方、組織の基底硬さは同一 ($HV60$) であることから、疲労強度の差異はこの鋳造欠陥が主因であると推定される。したがって、前述の評価法を適用して A, B, C 材の疲労強度を予測することが可能と考える。

6. 疲労試験結果と予測値との比較

回転曲げ疲労試験における破壊起点は、試験片の自由表面または自由表面近傍の欠陥であることから、前述の式(1)～(3)を用い、表 2 に示した $\sqrt{area_{max}}$ を代入することで疲労強度の下限値を求めることができる。

なお、領域Ⅲの疲労強度推定に用いた AC 4 C 材の ΔK_{th} については、回転曲げ疲労試験の応力比 R が -1 で実施されているため $R = -1$ における ΔK_{th} を求める必要があるが、その値は求められていない。ここでは、近似的に類似材 AC 4 A における $R = 0.05$ の $\Delta K_{th} (= 4.65 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})^{(13)}$ を採用した。

以上の方法で求めた疲労強度の下限値と疲労試験結果を比較したものが図 9 である。

推定した疲労強度の下限値は各材料についてほぼ妥当な値となっており、A 材は領域Ⅰ、B 材は領域Ⅱ、C 材は領域Ⅲに属することがわかる。

A 材の場合、基底組織の硬さで疲労強度が決まって

Fig. 9 Comparison between the experimental results and the predicted values

おり、 $\sqrt{area} = 100 \sim 150 \mu\text{m}$ 程度の内在欠陥が疲労強度に影響を与えないことを意味する。これは疲労破壊した試験片の起点部に欠陥が認められない事実と符号しており、評価式の妥当性を裏付けている。ただし、式(1)、(2)の交点として得られる $\sqrt{area}$ の適用下限(疲労強度に影響を与えない限界欠陥寸法)は約 $300 \mu\text{m}$ となるため、適用下限付近についてはさらに詳細な検討が必要と考える。

一方、C 材の場合は、推定した $\sqrt{area_{max}}$ が $\sqrt{area}$ パラメータモデルの評価式の適用上限⁽⁸⁾と言われる $1000 \mu\text{m}$ を大幅に越えている。また、領域Ⅱの適用式で求めた下限値(図 9 の C 材の破線)は実験値よりかなり高めとなり危険側の推定となっている。一方、近似的な $\Delta K_{th}(R = 0.05)$ を用いて領域Ⅲの適用式から求めた下限値は実験値より低めとなっている。これらのことと、実際の $\Delta K_{th}(R = -1)$ は $\Delta K_{th}(R = 0.05)$ よりもう少し高い値であることを考慮すれば、C 材は領域Ⅲに属すると見て妥当である。

7. 予測式に対する実部品での検証

7.1 部品形状 実際のアルミ鋳造部品に内在する欠陥寸法としては、上記の領域Ⅱに属するものが事実上対象となる。そこで、AC 4 C 材砂型鋳物で試作した自動車用ディーゼルエンジンの図 10 に形状および負荷条件を示すロッカーム実体での疲労試験を実施し、上記予測式の有効性を確認した。

7.2 予測式 前記式(2)に対して、平均応力の影響を考慮した、応力比 R を含む式(4)が提案⁽¹⁴⁾されている。残留応力に関しては局部的に作用する平均応力と等価と考えることができる。本試験に供試した実体部品の疲労強度予測には、破損部の実働応力が片振り引張応力であることおよび表面にショットピーニングが施されており圧縮残留応力が負荷されていることより式(4)を使用した。

$$\sigma_w = 1.41(HV + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \times [(1 - R)/2]^a \quad \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 10 Rocher arm

Table 3 Prediction of fatigue strength for rocker arm

Prediction of $\sqrt{\text{area}}$	Test volume (mm ³)	31.5
	Number of specimens	100
	Return period τ	3.42×10^2
	$\sqrt{\text{area}_{\max}}$ (μm)	908
Prediction of fatigue strength	Hardness HV (kgf/mm ²)	46
	Residual stress (MPa)	-40
	Fatigue strength (MPa)	135
Experiment of fatigue strength (MPa)		140

(欠陥が自由表面近傍にある場合)

ここで、各量の定義は

 R : 応力比 $[\sigma_{\min}/\sigma_{\max}]$ $\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$

である。

7・3 最大欠陥寸法の予測 4章と同様の手法により破損部近傍の鋳造欠陥の大きさ($\sqrt{\text{area}}$)の最大値の予測結果を図11に示す。この場合の検査基準面積 S_0 は、 $S_0 = 25 \text{ mm}^2$ で、検査視野数は33である。この結果、表3に示すとおり部品数 $n=100$ の場合の予測最大欠陥の大きさ $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ は $908 \mu\text{m}$ である。

7・4 疲労強度の予測 式(4)を用いて表3に示す破損部近傍のビッカース硬さ、X線応力測定により測定した表面の残留応力値、7・3節で求めた鋳造欠陥の $\sqrt{\text{area}}$ の予測最大値を使用し、トライ・アンド・エラーで予測疲労強度を求めた。なお、 R を決定するにあたり

$$\sigma_{\min} = \sigma_l + \sigma_r, \quad \sigma_{\max} = \sigma_u + \sigma_r$$

 σ_l : 負荷応力の下限值(一定) = 5 MPa σ_u : 負荷応力の上限值 MPa σ_r : 残留応力 MPa

とした。

7・5 疲労試験結果 ロッカアーム実体での疲労試験結果のS-N線図を図12に示す。図より、繰返し数 $N=5 \times 10^7$ 回で定義したロッカアーム実体での疲労限度は、140 MPa程度である。この値は試験数を増せば少しずつ低下する性質のものであるが、上記予測式により得られた部品数100個当たりの疲労限度の下限值は、135 MPaであり、実験値と予測値が非常に良く一致していることが確かめられた。

8. 結 言

多量生産する自動車用アルミ合金鋳物の疲労強度からみた品質管理を目的として、鋳造欠陥が疲労強度に

Fig. 11 Distribution of extreme values for defect size (rocker arm)

Fig. 12 S-N diagram of rocker arm

およぼす影響を定量評価することを試みた。試験結果から以下の結論が得られた。

(1) アルミ合金鋳物中の鋳造欠陥を形状パラメータ $\sqrt{\text{area}}$ を用いて整理すると、 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ の分布は極値確率分布に従う。

(2) $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ 分布による予測最大欠陥と村上らの提案式を用いて推定される疲労強度の下限值は、実験値と良い対応を示しており、評価式はアルミ合金鋳物についても有効である。ただし、 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルの適用下限および上限についてはさらに検討の必要がある。

(3) 平均応力の影響を考慮し、応力比 R を含む式に拡張した疲労強度予測式を使用することによって、アルミ鋳物部品実体での疲労試験を実施することなく精度の良い部品実体の疲労強度予測が可能である。この手法は信頼性のないあいまいな安全率の安易な導入を避けるため有用である。

文 献

- (1) 大西脩嗣・森靖, 鋳物, 56-5 (1984), 257-263.
- (2) 佐川保明・加藤寛・梅田高照・吉川敬治, 鋳物, 61-4 (1989), 252-257.

- (3) 村上敬宜・遠藤正浩, 材料, **35** 395 (1986), 911-917.
 - (4) 村上敬宜・児玉昭太郎・小沼静代, 機論, **54**-500, A (1988), 685-695.
 - (5) 村上敬宜・宇宿尚史, 機論, **55** 510, A (1989), 213-221.
 - (6) 村上敬宜・小林幹和・ほか 5 名, 機論, **57**-542, A (1991), 2305-2313.
 - (7) 池田勇人・鳥山寿之・村上敬宜, 機論, **57**-538, A (1991), 1320-1325.
 - (8) 村上敬宜, 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993), 1, 養賢堂.
 - (9) 杉山好弘・浅見克敏・松岡忍, 機論, **58**-556, A (1992), 2287-2292.
 - (10) 遠藤正浩・王习兵, 材料, **43**-493 (1994), 1245-1250.
 - (11) Endo, M., ASME MD, **28**, H 00681 (1991), 125-137.
 - (12) Gumbel, E. J. (河田龍夫・ほか 2 名訳), 極値統計学, (1963), 1, 広川書店.
 - (13) 財団法人・素形状センター編, 鋳造品の実体強度, (1989), 74.
 - (14) 村上敬宜・上村裕二郎・夏目喜孝・宮川進, 機論, **56**-525, A (1990), 1074-1081.
-