アルミニウム合金 AC4CH 大型鋳物の 疲労挙動に及ぼす鋳造欠陥の影響

田尻明子^{*1}, 植松美彦^{*2}, 柿内利文^{*2}, 野崎大司^{*3}
中島正貴^{*4}, 中村裕紀^{*4}, 田中 博^{*1}

Effect of casting defect on fatigue behavior in large scale cast aluminium alloy AC4CH

Akiko TAJIRI^{*5}, Yoshihiko UEMATSU, Toshifumi KAKIUCHI,
Taishi NOZAKI, Masaki NAKAJIMA, Yuki NAKAMURA and Hiroshi TANAKA

^{*5} Murata Machinery, LTD. Logistics and Automation Division
2 Nakajima, Hashizume, Inuyama-shi, Aichi 484-8502 Japan

Several plates had been sampled from a large-scale cast aluminum alloy, AC4CH, ingot. Subsequently, rotating bending fatigue tests and microscopic observation had been conducted using three kinds of specimens with different solidification rates. The shape of pores, hardness and dendrite arm spacing (DAS) were affected by the solidification rates, while the fatigue strengths of three specimens were insensitive to the rates. The lower limit of fatigue strengths were estimated by means of extreme value theory. When separately-located pores were dominant in the specimen, the prediction was inconsistent with test results. The modified counting method of pore size was proposed to improve the accuracy of the prediction.

Key Words : Fatigue, Cast aluminium alloy, Casting defect, Gas Porosity, Extreme Value Theory

1. 結 言

近年、エネルギー問題などを背景に低コストで信頼性の高い設計が要求されており、軽量で高い比強度を持ちかつ低コストな鋳造アルミニウム (Al) 合金の利用拡大が期待されている。鋳造材は引け巣やガス孔などの鋳造欠陥を内在しているが、これらの鋳造欠陥は材料の機械的特性に影響を及ぼす。微小欠陥と疲労強度との関係については、鉄鋼材料で介在物寸法の $\sqrt{area}$ から疲労限度 σ_w を推定する村上らによる $\sqrt{area}$ パラメータモデル⁽¹⁾がよく知られており、鋳造欠陥を有する Al 合金へのこのモデルの適用可能性についても検討されている⁽²⁾。しかし、大型の同一鋳物中での欠陥分布や疲労強度の部位による相違や相関関係については詳細に研究されていない。本研究では Al 合金 AC4CH 大型鋳物の異なる部位から採取した材料を用いて疲労試験を行い、主に鋳造時の凝固時間の違いに起因する鋳造欠陥分布が疲労強度に及ぼす影響に注目

し、 $\sqrt{area}$ パラメータモデルに基づく疲労限度予測手法の妥当性について検討した。

2. 供試体および実験方法

2・1 供試体および試験片 供試材は Al 合金 AC4CH であり、長さ約 1.5m、幅約 30cm の大型鋳物である。材料の化学組成を Table 1 に示す。予め鋳物製作時の溶湯流れや冷却凝固を鋳造シミュレーションによって予測し、凝固までの時間が異なることが予測される 3 つの部位から材料を切り出した。凝固時間が早いものから順に、A 材、B 材、C 材と呼ぶ。鋳物型上辺の複数箇所に設置された湯口に対して、A 材は湯口から最も遠い湯境部、B 材は湯口付近の底部、C 材は湯口直下部にそれぞれ相当する。疲労試験片は直径 8mm、長さ 10mm の平行ゲージ部を有する回転曲げ疲労試験片である。ゲージ部は 2000 番までのエメリー紙で順次研磨を施し、バフ研磨により鏡面に仕上げた。

Table 1 Chemical composition of material (wt%)

Si	Mg	Fe	Ni	Cr	Sn	Al
6.66	0.383	0.153	0.009	0.002	0.002	Bal.

^{*1} 村田機械 (〒484-8502 愛知県大山市橋爪中島2)

^{*2} 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

^{*3} 岐阜大学工学研究科機械システム工学専攻

^{*4} 正員, 豊田高専 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

E-mail: yuematsu@gifu-u.ac.jp

2・2 実験方法 組織観察には塩酸：5ml，フッ化水素酸：7.5ml，蒸留水：4.5ml の腐食液を用いて試料表面を腐食した後，光学顕微鏡を用いて観察を行った．硬さ試験にはマイクロビッカース硬さ試験機を用い，荷重 0.98N，保持時間 30 秒の条件で試験を行った．疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機を用い，室温大気中にて繰返し速度 $f=60\text{Hz}$ ，応力比 $R=1$ の条件で試験を行った．疲労限度 σ_w は，打ち切り繰返し数 $N=10^7$ として定義した．

3. 実験結果

3・1 機械的性質および組織観察 Table 2 に A 材の機械的性質を示す．ビッカース硬さは，A，B，C 材でそれぞれ 116HV，108HV，90HV であった．Fig.1 に組織観察結果を示す．デンドライト組織および鑄造欠陥が確認される．デンドライトアームスペーシング (DAS) は A，B，C 材の順に大きくなり，それぞれ平均 $57\mu\text{m}$ ， $84\mu\text{m}$ ， $96\mu\text{m}$ であった．鑄造欠陥は小寸法から $1000\mu\text{m}$ 程度の寸法まで様々であった．

3・2 疲労強度 Fig.2 に S-N 曲線を示す．疲労強度は有限寿命域では大きな差は見られない．疲労限度 σ_w は A，B，C 材でそれぞれ 65MPa，80MPa，75MPa であった．

3・3 破面様相 Fig.3 に A 材の疲労破面の SEM 観察結果の一例を示す．表面付近の鑄造欠陥が疲労き裂の起点であることがわかる．他の材料においてもこれと同様に，表面付近の約 $1000\mu\text{m}$ 前後の鑄造欠陥がき裂起点となっていた．

Table 2 Mechanical properties of material A

0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile stress σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Elastic modulus E (GPa)
215	237	2.5	70

Fig.1 Microstructures of materials.

3・4 極値統計による $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の推定および疲労限度の予測

極値統計に基づく手法⁽¹⁾を用いて，試験片の危険体積に含まれる最大欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の推定を行った．危険体積はゲージ部において公称応力が最大値の 90%以上となる部分とした．Fig.1 に示すように，A 材と C 材では大きな欠陥が単独で存在するが，B 材では比較的小さな欠陥が密集する場合が多い傾向にあった．これは試験片採取位置における湯流れや冷却速度に依存すると考えられる．そこで B 材のように小さい欠陥が密集する場合，村上等が提案する手法に基づき⁽¹⁾，欠陥寸法と各欠陥の隣接距離の相対関係から欠陥を合体させるかどうかを判定し，隣接距離が小さい場合には結合した仮想的な大欠陥と等価であると考えて $\sqrt{\text{area}}$ を算出した．その結果，A，B，C 材の最大欠陥寸法はそれぞれ， $956\mu\text{m}$ ， $1512\mu\text{m}$ ， $1046\mu\text{m}$ となり，B 材のみ顕著に大きな欠陥寸法となった．

次に $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルに基づく下記の推定式⁽²⁾を用いて疲労限度 σ_w の推定を行った．

$$\sigma_w = \frac{1.43(75 + HV)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}} \quad \text{where } \sqrt{\text{area}} < 1400 \mu\text{m} \quad (1)$$

$$\sigma_w = \frac{1.43(450 + HV)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/3}} \quad \text{where } \sqrt{\text{area}} > 1400 \mu\text{m} \quad (2)$$

ここで， HV はビッカース硬さ， $\sqrt{\text{area}}$ は極値統計の手

Fig.2 S-N diagram.

Fig.3 SEM micrographs showing crack initiation site of material A ($\sigma_a=120\text{MPa}$, $N_f=2.7 \times 10^5$):

(a) low magnification, (b) high magnification.

法により推定された最大欠陥寸法 $\sqrt{area_{max}}$ (μm)を用いた。疲労限度 σ_w は、A, B, C 材でそれぞれ 87MPa, 70MPa, 74MPa と推定された。

4. 考 察

Table 3 に各材料の主な特性値と、疲労限度推定値をまとめて示す。硬さと DAS には凝固時間との相関が見られ、凝固時間が早いほど硬さは高く、DAS は小さい。これは casting Al 合金における一般的な傾向で有る。しかし、予想される最大欠陥寸法については、凝固時間が中程度の B 材で最も大きくなった。

推定疲労限度については、C 材については比較的良い一致を見た。B 材は予想値が低い、前述のように B 材では複数の欠陥が密集している場合が多く、これらを合体させて仮想的な大欠陥としたため、欠陥寸法を過大に見積もっている可能性がある。3・4 項では Fig.4 に模式的に示すように、比較的近隣にある I および II の欠陥群を合体させた後、I と II の距離が II の $\sqrt{area}$ よりも小さいため、最終的に III の包絡線を欠陥群に対する等価な大欠陥として扱っている。しかし、Fig.4 で示す欠陥群 I 中の欠陥 a および II 中の b を個々に考えた場合、両者の距離は小さい方の欠陥 a の $\sqrt{area}$ よりも大きい、お互いの欠陥は力学的に独立である。そこで、近隣する欠陥群のうち、お互いに最も近い個々の欠陥が力学的に独立している場合、I と II の欠陥群を個々の欠陥と判定した極値統計結果を Fig.5 に示す。図

Table 3 Experimental and estimation results of materials.

Material	HV	DAS (μm)	$\sqrt{area}$ (μm)	σ_w (MPa)	
				$\sqrt{area}$ model	experiment
A	116	57	956	87	65
B	108	84	1512	70	80
C	90	96	1046	74	75

Fig.4 Schematic illustration of coalescence of casting pores.

より、B 材の推定される $\sqrt{area}$ は 1178 μm 、対応する予想疲労限度は 81MPa となり、試験結果に近づいた。すなわち、複数の casting 欠陥が密集して存在するような場合、その寸法評価を適切に行わなければ、過度に安全な設計となる。なお、同様の手法により A 材、C 材の欠陥寸法を再度推定した場合、A 材は 943 μm とわずかに小さくなるが、C 材では 3・4 項と全く同じ結果となった。

Fig.5 では、再帰期間から予想される最大欠陥寸法は、実際の組織観察で得られた最大欠陥よりも小さい。現在、疲労限度を得る際の試験片数を 3 本とし、再帰期間を大きくした試験を行っている。

凝固速度の最も速い A 材の疲労限度については、予測値が実験値よりかなり高く、危険側となっている。A 材の採取位置は、大型鋳物で左右の湯口から注ぎ込まれた溶湯がぶつかり合う湯境にあたり、今後湯境における特異な要因がないかを検討する必要がある。

5. 結 言

鋳造 Al 合金 AC4CH 大型鋳物材において、凝固時間が異なる部位から採取した材料を用いて回転曲げ疲労試験を行った。その結果、硬さと DAS には凝固時間との相関がみられるが、鋳造欠陥の寸法と分布は凝固時間以外の因子の影響を受けることがわかった。隣接する欠陥の結合手法を工夫することで、鋳造欠陥が密集するような状態での $\sqrt{area}$ パラメータモデルに基づく疲労限度予測を高精度化することが可能である事を示した。

参 考 文 献

- (1) 村上敬宜, “金属疲労 微小欠陥と介在物の影響” (2008) 養賢堂.
- (2) 上野明, 西田匡秀, 宮川進, 山田耕二, 菊池将一, 第 31 回疲労シンポジウム講演論文集, 159-163 (2012)

Fig.5 Extreme value distribution of casting defect size.