

論 文

AD12合金鋳物の衝撃特性に及ぼすポロシティの影響

西村 信司^{*1)} 佐藤 健二^{*1)}

Effects of porosity on impact properties of AD12 alloy castings

Shinji Nishimura^{*1)}, Kenji Sato^{*1)}

The effects of porosity volume, size and distribution in JIS AD12 aluminum alloy castings on impact properties were investigated. Three different porosity volumes were prepared by controlling gas content of the melt. Volume fraction, sizes and distribution were evaluated by density, cross-sectional observation of microstructure using an optical microscope and radiographic examination. The toughness was evaluated using an instrumented Charpy impact tester. The impact fracture surfaces observed using an SEM were grouped into two categories, the fracture surfaces with gas porosity and those without. The impact values of specimen group without gas porosity proportionally increased with the logarithm of the solidification rate. The porosity reduced the crack initiation energy, while giving only limited effect on the crack propagation energy. The impact value excluding the influence of solidification rate proportionally decreased with increased volume fraction of porosities. The tendency of impact values excluding the influence of solidification rate was influenced by the size and the distribution of porosities. The crack propagation showed less steep gradient with the increased volume fraction of porosity.

キーワード : アルミニウム, 靱性, シャルピー衝撃試験, ポロシティ

Keywords : Aluminum, Toughness, Charpy impact test, Porosity

1. はじめに

アルミニウム合金鋳物・ダイカストは自動車部品に広く用いられ, 近年では軽量化・薄肉化を目標として高強度・高靱性の部品が要求されている。鋳造・ダイカスト品では高速・高圧で射出する際のガスの巻き込みや凝固時の収縮, 溶湯中のガス量などが原因で鑄巣欠陥(ポロシティ)が発生する。鑄巣欠陥は機械的性質を劣化させる要因になっている。高靱性部品に要求される品質を満たすためには鑄巣欠陥をより少なくすることが重要である。現場では鋳造条件や方案の最適化, 溶湯品質の管理などを行い鑄巣欠陥の低減に努めている。このため, 鑄巣欠陥が機械的性質に及ぼす影響を把握し, 要求品質に対して許容できる鑄巣の量を知ることが重要となる。

鑄巣などの欠陥と機械的性質の関係は引張試験⁽¹⁾, 引裂き靱性⁽²⁾および疲労試験⁽³⁾で多く調査されている。衝撃試験では, 計装化シャルピー衝撃試験機を用いた靱性評価法の開発⁽⁴⁾や, 凝固速度および組織形態の影響の評価⁽⁵⁾を主としており, 欠陥と衝撃値の関係を調査した例は少ない⁽⁶⁾。通常の衝撃試験は材料破壊時の全体の吸収エネルギーを計測するものであるが, 計装化シャルピー衝撃試験は亀裂の発生から伝播までを連続的に計測できる。このため, 破壊時の欠陥の影響を詳細に調べることが可能となる。

そこで, 本研究ではAD12合金鋳物の衝撃特性を計装化シャルピー衝撃試験機で評価し, 凝固速度・鑄巣欠陥と衝撃特性の関係を調査した。また, ポロシティの量・大きさおよび分布が衝撃特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 試料および鋳造条件 実験に用いた試料の化学組成を表1に示す。溶湯1000℃に昇温することで溶湯の水素ガス量を増加させた。その後, アルゴンガスで脱ガス処理時間を変えることで溶湯中のガス量を変化させ, 3水準のガス量レベルとした。溶湯のガス量はランズレー銅金型に鑄込んだ試料を真空溶解抽出パラジウム管透過法(ランズレー法)で分析した。溶湯は図1に示す鑄鉄製の舟金型に鑄込んだ。試料の鑄込み条件とガス量の分析値, 介在物数を表2に示す。No. I, II, IIIの順でガス量が多い。

試料の介在物数は破断面観察法で評価した。得られた舟形試料の底面から5 mmの位置で切断し, 10倍のルーペで介在物数を計数した(図1)。

2.2 衝撃試験 衝撃試験は5 Jの計装化シャルピー衝撃試験機で行い, 試験片はノッチなしの5×5×55 mmの寸法である。計装化衝撃試験より得られた衝撃力-変位(図2)

表1. 試料の化学成分 (mass%)

Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Mn	Al
10.5	1.74	0.82	0.24	0.67	0.27	bal.

表2. 鋳造条件と試料のガス量と介在物数

試料No.	鋳込み温度 (°C)	鋳型温度 (°C)	ガス量 (ml / 100 gAl)	介在物数 (/ cm ³)
I	630	170	0.51	0
II	650	180	0.38	0
III	630	160	0.12	0.5

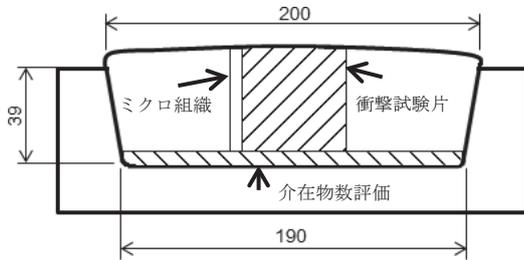


図1. 鋳鉄製舟金型の形状 (JIS H 5202)

から、亀裂発生エネルギー E_i および亀裂伝播エネルギー E_p を求め、曲げ応力 σ ・曲げひずみ ϵ を式(1)および式(2)で算出した。ここで、 F : 衝撃力、 s : 変位、 L : 支点間距離、 b : 試験片幅、 h : 試験片高さである。下り傾き S は応力-ひずみ線図より、最大応力後の $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ の最大傾きから求めた。

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon = \frac{6sh}{L^2} \dots\dots\dots (2)$$

岡安らは、ADC10ダイカストの引張試験で、破断チルなどの粗大な二次元的な界面を有する欠陥は鋳巣欠陥より強い影響を引張強度に及ぼすと報告した⁽¹⁾。試料No. IIIは介在物数が多い。酸化皮膜などの介在物が衝撃値に強く影響した。本報告ではポロシティの影響のみを対象とするため、破断面を走査電子顕微鏡 (SEM) 観察し、ガスおよび引け巣ポロシティ以外の欠陥が存在した試験片は事前に実験結果から除外した。

2.3 ミクロ組織および内部欠陥の評価 ミクロ組織およびポロシティの大きさや分布を調べるため、光学顕微鏡で観察した。試料は1 μm ダイヤモンドペーストで研磨し、0.5%ふっ化水素酸水溶液で腐食した。衝撃試験片はポロシティの大きさや量の違いを調べるため、密度測定およびX線透過試験を行った。試験片密度はイオン交換水を標準液体とした液中秤量法で測定した。試験片の空隙体積率をポロシティ量とし、密度から式(3)で求めた。 P : ポロシティ量、 ρ_s : 試料の基準密度、 ρ_p : 試験片の密度である。 ρ_s はランズレー銅金型で採取した試料密度より $2.736 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とした。

$$P = \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s} \times 100(\%) \dots\dots\dots (3)$$

ポロシティの大きさと分布はミクロ組織の画像解析により調べた。ポロシティの平均直径 D は式(4)より求めた。ここで、 A_i は画像解析によるポロシティの断面積、 N は測定したポロシティの数である。ポロシティの分布はポロシティ中心間の無次元距離 δ で表し、式(5)により求めた。

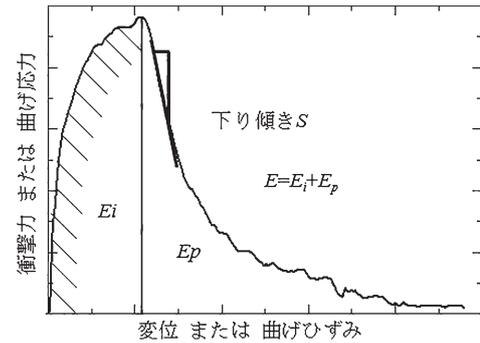


図2. 吸収エネルギーと変形特性

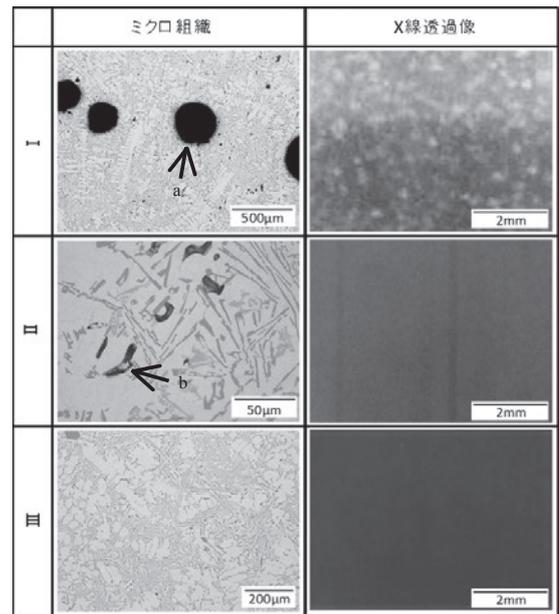


図3. ミクロ組織とX線透過像

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}}{N} \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta = \left(\frac{1}{6} \pi D^3 / \frac{P}{100} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

3. 実験結果および考察

3.1 ポロシティの観察 図3にミクロ組織の光学顕微鏡写真とX線透過試験写真を示す。試料No. Iの矢印aはガスポロシティで、X線透過写真では白い斑点として表れている。ガスポロシティはX線透過試験で試料Iに多く、IIでは数個、IIIではほとんど観察されない。矢印bはaよりも微細な空隙であり、形態上はマイクロ引け巣であるが、試料のガス量およびNo. Iでの分布からガス欠陥と合わさったものとする。X線透過試験で引け巣は検出できなかった。ミクロ組織写真では、試料I・IIに多く、IIIは少ない。

3.2 吸収エネルギーとポロシティの関係 シャルピー衝撃値とDAS II (デンドライト二次アーム間隔) の関係を図4に示す。また、図5に破断面で観察されたポロシティのSEM写真を示す。(a)の表面は比較的平滑であるが、(b)ではデンドライトの突起が観察される。

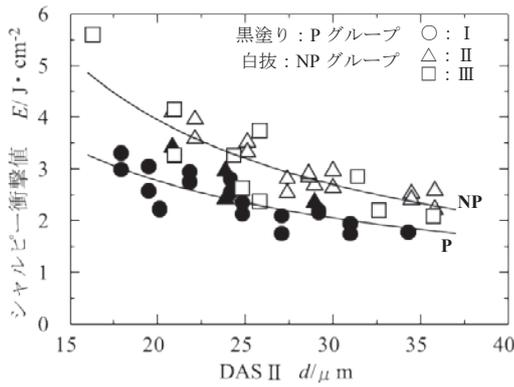
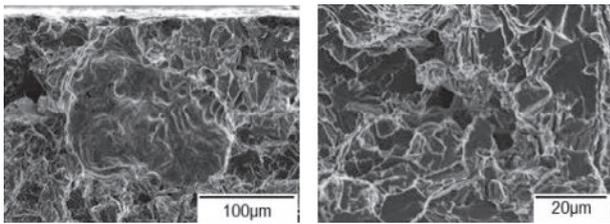


図4. シヤルピー衝撃値とDAS IIの関係



(a) ガスポロシティ (b) 引け巣
図5. SEM観察による破断面のポロシティ

図4は破断面に10倍ルーペ観察で判別できる100 μm程度以上のポロシティが観察される試料を黒塗り(以後Pグループ), 判別できない試料を白抜き(以後NPグループ)で表している。Pグループ, NPグループ共にDAS IIの拡大に伴い衝撃値は低下する。Pグループの衝撃値はNPグループよりも小さい。

図6に亀裂発生エネルギー E_i ・亀裂伝播エネルギー E_p とDAS IIの関係を示す。NP, Pグループ共に E_i はDAS IIの拡大に伴い低下するが, E_p はDAS IIに依存せず, ほぼ一定値の $0.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。ポロシティ量がかなり低いNPグループからは, 衝撃値はDAS IIの小さな凝固速度が高い場合には, E_i が支配的になることを表す。

そこで, 衝撃特性に及ぼすポロシティの影響を検討するため, 基準となるNPグループのDAS IIとシヤルピー衝撃値の関係を最小二乗法で近似し, 式(6)を求めた。ここで E : 衝撃値, d : DAS IIの測定値である。

$$E = 65.3 d^{-0.94} \dots\dots\dots (6)$$

試料の衝撃値と式(6)によるDAS IIでの補正值との比を相対衝撃値 E_N と定義した。図7に E_N とポロシティ量の関係を示す。ポロシティ量の増加に伴い相対衝撃値は小さくなる。ポロシティ量0.5%以下の試験片の相対衝撃値の平均は1.0であり, 標準偏差は0.1であった。

アルミニウム合金では, 凝固速度が高いほど, 衝撃値に及ぼす欠陥の影響が強いことが知られている⁽⁶⁾ため, 凝固速度の影響を調べた。本実験試料のDAS IIの範囲は16~36 μmであり, 350°C予熱の舟金型試験片の引張試験片採取位置では, DAS IIが30 μm以上であることから, これを基準に2グループに区分した。

図7に E_N のポロシティ量の依存性を示す。DAS IIが広い

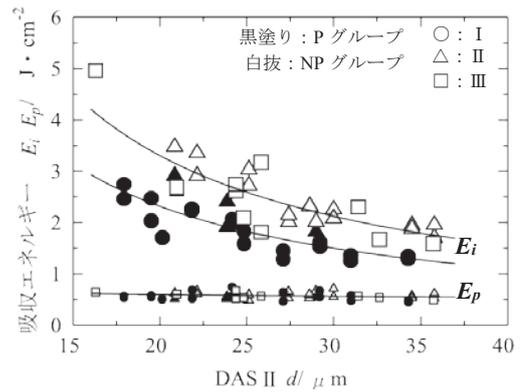


図6. 吸収エネルギーとDAS IIの関係

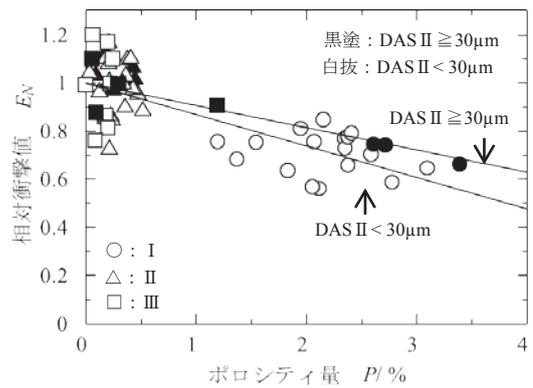


図7. 相対衝撃値とポロシティ量の関係

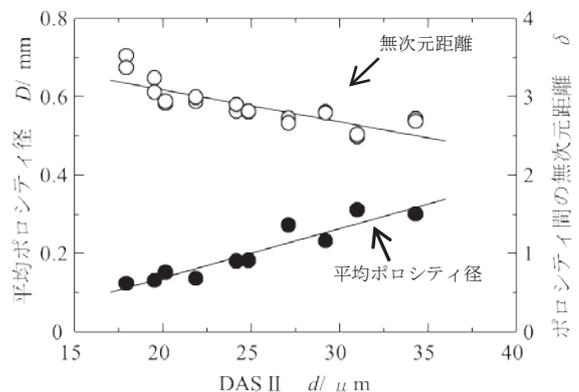


図8. ポロシティの径および無次元距離とDAS IIの関係

ほど, E_N の傾きが小さいことから, ポロシティの影響が小さいことを示している。

(1) ガスポロシティの大きさの影響

図8にNo. IのDAS IIに対するφ100 μm以上のガスポロシティの平均径 D およびポロシティ中心間の無次元距離 δ との関係を示す。DAS IIが狭いほど D は小さくなり, δ は広がる。シヤルピー衝撃試験時に破壊の起点側では, ポロシティの曲率半径から, ポロシティが小さいほどその周囲のひずみは大きくなる。ポロシティ間の相互作用を考えなければ, ポロシティが小さいほど応力集中が大きくなり, 亀裂が発生しやすいことになる。

(2) ガスポロシティ分布の影響

無次元距離 δ はDAS IIが広がるにつれ小さくなり, D も

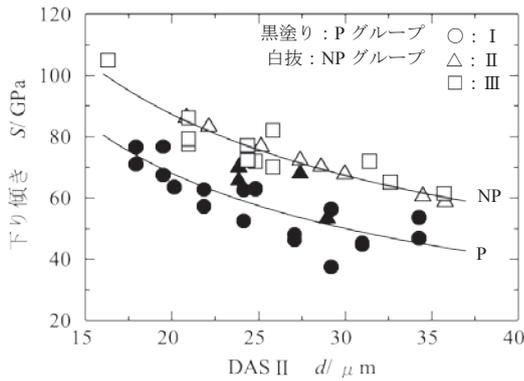


図9. 下り傾きとDAS IIの関係

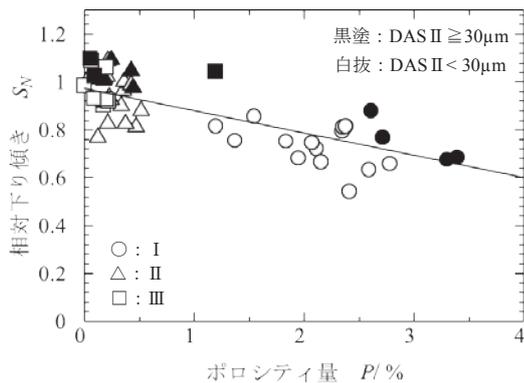


図10. 相対下り傾きとポロシティ量の関係

大きくなることで、 δ が近いほど相互作用でポロシティ間に相対的に強い応力集中が発生する。したがって、DAS IIが広がるほどポロシティ径との δ から、亀裂が発生しやすくなると考える。

ポロシティの影響は図7に示すようにDAS IIが狭いほどポロシティ量の増加により相対衝撃値が低下する。しかし、ポロシティ分布では、DAS IIが広いほどDの拡大と δ の縮小により靱性低下に作用する。本実験では、ポロシティ径とポロシティ間距離の影響が強く表れている。

3.3 亀裂伝播特性とポロシティの関係 破壊開始後の衝撃特性は下り傾き S を採用した。下り傾きが緩やかであるほど、亀裂伝播抵抗が強いことを表す。

図9に下り傾きとDAS IIの関係を示す。下り傾きはDAS IIが広がるほど緩やかになる。凝固速度が低いほど3次元的に平板状の共晶Siは粗大になる。

破面観察では、DAS IIが広いほど破面の凹凸が大きくなり、破断面積が広がる幾何学的な要因が挙げられる。また、亀裂が伝播する際、平板状の共晶Siに沿って亀裂が伝播しやすことを考えるとDAS IIが広いほど S は低下しやすくと考える。図6からは、 E_p はDAS IIに依存せず、ほぼ一定であり、初期亀裂を生じさせる E_i はDAS IIが狭いほど、高くなる。このことから、組織的な影響よりも亀裂発生時に亀裂先端にかかる曲げ応力がDAS IIの広い方で低くなるため、見掛け上、亀裂伝播速度が低下したと考える。

NPグループの下り傾きの近似式から得られた計算値と下り傾き S との比を相対下り傾き S_v とした。図10に相対下り

傾きとポロシティ量との関係を示す。相対下り傾きはポロシティ量の増加により亀裂伝播抵抗は強くなる。この要因として以下の二つが挙げられる。

(1) ガスポロシティによる亀裂のピン止め効果

亀裂がガスポロシティに到達すると、亀裂の開口端が一時的に球形となり、亀裂の進展が停滞する。亀裂はポロシティを回り込むように進展するため、亀裂進展が遅れると考える。このため、下り傾きが緩やかになる。

(2) ガスポロシティ間の亀裂伝播

ガスポロシティがあることでポロシティ周囲に応力集中が起きる。ポロシティ中心間の無次元距離に近いほどポロシティ間の応力集中係数が高くなり、最近傍のポロシティへ向かって亀裂が発生または進展しやすくなると考えられる。応力集中の方向に沿って亀裂が進展することで破壊面積が増加し、下り傾きが小さくなる。

この二つは共に下り傾きを緩やかにする。これら要因のどちらかまたは両方が作用すること、亀裂先端に掛かる応力レベルが異なることで、亀裂伝播エネルギー E_p に対してポロシティ量の影響が小さく表れたと考える。

4. まとめ

溶湯ガス量の異なるAD12合金鋳物の衝撃特性を調査し、衝撃特性に及ぼす鋳巣欠陥の影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 衝撃値はガスポロシティによって低下した。衝撃値の低下は亀裂発生エネルギーが支配的である。亀裂伝播エネルギーはポロシティの影響をあまり受けない。

(2) 凝固速度の影響を除いた衝撃値はポロシティ量の増加により小さくなる。これはポロシティによって衝撃力の支持面積が減少するためである。衝撃値に及ぼすポロシティ量の影響はポロシティ径とポロシティ間距離の影響を強く受ける。

(3) 凝固速度の影響を除いた下り傾きはポロシティ量の増加によって緩やかになる。ガスポロシティのピン止め効果による亀裂進展の遅れや、ガスポロシティ間を亀裂が伝播することによる破壊面積の増大が要因であると推察する。

(平成27年8月24日受付, 平成27年8月24日再受付)

文 献

- (1)岡安光博, 金沢憲一, 西直美:「ADC10アルミニウム合金ダイカストの引張特性に及ぼす内部欠陥の影響」, 鋳造工学, Vol.70, No.11, pp.779-785 (1998)
- (2)村上敬宣, 遠藤正浩:「疲労強度に及ぼす微小欠陥の影響の評価法」, 日本機械学会論文集(A編), Vol.49, No.438, pp.127-136 (1983)
- (3)熊井真次, 向山陽:「アルミニウム合金鋳物・ダイカストの新しい引裂き靱性表示法」, 鋳造工学, Vol.79, No.11, pp.671-675 (2007)
- (4)小林俊郎, 山本勇, 上村正樹:「計装化シャルピー試験法による動的弾塑性靱性値の有効性」, 鉄と鋼, Vol.74, No.5, pp.903-909 (1988)
- (5)加藤鋭次, 小林俊郎:「Al-Si系合金鋳物の破壊靱性に及ぼす凝固組織の影響」, 軽金属, Vol.30, pp.140-146 (1980)
- (6)アルミニウム合金鋳物のガス含有量と機械的性質に関する研究部会:「研究報告41 アルミニウム合金鋳物のガス含有量と機械的性質」, 日本鋳物協会 (1986)