

特集 デンソーにおけるダイカスト部品の高品質化の取り組み*

High Quality Die Casting Activity in DENSO

高木 博己

Hiroimi TAKAGI

We began production of aluminum alloy die-cast dynamos and magnetos in DENSO in 1958, and now the application of aluminum alloy die casting technology has been extended to diesel jet pumps, engine control equipment, various motors, various electronic devices, industrial robots and various sensors.

Recently, there has been increased demand for higher quality die-cast automobile parts to be produced in order to reduce costs and improve quality. In this report, research projects into the development of high quality and high strength die casting technology, which is critical to production design, are described.

Key words : Aluminum alloy die casting, Die casting, Casting defect

1. はじめに

アルミニウム合金ダイカスト部品は、高精度の部品を安価に得られることから航空・宇宙、建設、輸送機器、電気、通信などの幅広い分野で用いられている。その生産量は、低成長期に入ったとされる1990年代以降も高い伸びを示しており、日本の生産量だけを見ても、アセアンや中国など海外への生産の移管が盛んになってきた昨今の状況があるものの年率10%近い伸びを示している。特に、地球環境問題に対する車両の軽量化や各種環境対応技術の必要性から輸送機器分野の需要が伸びており、ダイカストの全生産量の約80%強を占めている。

当社では、ダイナモやマグネット向けに1958年から輸送機器用のアルミニウム合金ダイカスト部品の生産を行っており、現在でもディーゼル噴射ポンプ、エンジン制御機器、各種モータ、電子機器、産業用ロボットや各種センサなど幅広い事業分野で用いられている。近年では一般構造用部材としての用途に加え、耐圧性、

耐摩耗性、接合性、耐食性、耐熱性などの機能を付与した部品が増えてきている。またこれらに加え、高圧化、部品締結方法の多様化や限界設計・最適設計の観点からダイカスト部品（以下、本報では、アルミニウム合金ダイカスト部品及び工法をダイカスト部品及びダイカスト法と言う）の強度要求が厳しくなっている特徴があり、高品質ダイカストへの期待が一層高まっている。

本報ではこれまで当社で行ってきたダイカスト部品の強度保証に対する取り組みについて報告する。

2. ダイカスト部品の強度保証のための課題

ダイカスト法は、Fig. 1に示すように、アルミニウム合金などの熔融金属を金型に高速で充填し、高圧で加圧造形する鋳造法である。このため、生産性が高い、薄肉で軽量化が可能、鋳肌が綺麗で複雑な形状が成形できるなどの長所が得られるが、巣をはじめとする鋳造欠陥があるために強度保証が困難であるなどの短所

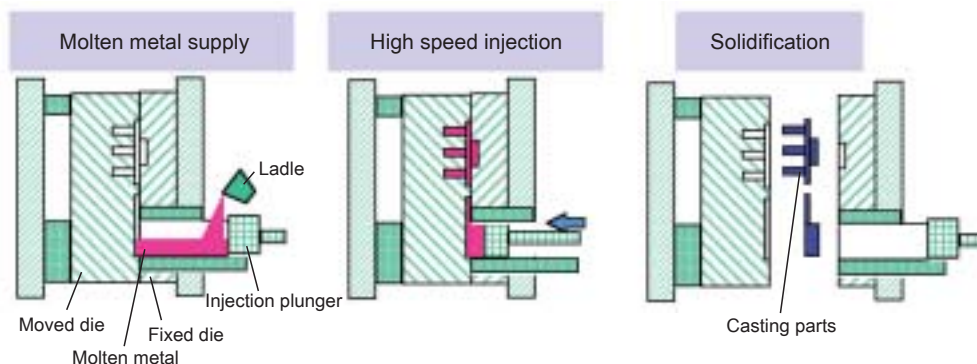


Fig. 1 Schematic view of die casting

*2006年9月20日 原稿受理

がある。ダイカスト部品の強度についてJIS (H5302)では、規定の一部ではなく付属書(参考)に、実際の強度を規定することは困難であると注記の上で、参考データを記載するに留まっている。

こうしたダイカスト部品において、強度を保証していくためには、強度に及ぼす鑄造欠陥の影響を明らかにし、それを防止する新技術との組み合わせを考慮し工法選択をおこなっていく必要がある。以下に、当社での取り組みについて記す。

3. ダイカスト部品の強度に及ぼす影響

3.1 鑄造欠陥と引張強度との関係調査

鑄造欠陥が強度に及ぼす要因として、巣、破断チル層、ガス、酸化物等の鑄造欠陥があげられている。¹⁾²⁾筆者らはこれら引張強度に及ぼす影響を調べた。³⁾

強度試験片は、前述の強度向上検討結果からTable 1の材料組成およびTable 2の条件において鑄造を行い、得られた円盤状鑄造品からFig. 2に示すJISの14B号試験片を切り出した。鑄造品の出来映えの評価は、鑄造品内ガス量、比重および硬度についての調査を実施した。また、破面に見られる鑄造欠陥の大きさは、引張試験実施後の試験片を実体顕微鏡および電子顕微鏡により観察し、巣や破断チル層等の欠陥毎に欠陥面積の和を算出した。

調査した結果について多変量解析を行い整理すると、強度に有意な要因は、Table 3に示す鑄造品内ガス量、破断チル層の大きさおよび巣の大きさに絞られ、それら鑄造欠陥と実体強度の関係は数式(1)のように表された。

$$X_0 = 313.5 - 2.69 X_2 - 16.8 X_4 - 15.21 X_5 \quad (1)$$

ここで、 X_0 は引張強度 (MPa)、 X_2 は鑄造品内ガス量 ($\text{cm}^3/100\text{gAl}$)、 X_4 は破断チル層の大きさ (mm^2)、 X_5 は巣の大きさ (mm^2)である。

ここでは、Table 1の組成について述べたが、他の材料についても鑄造品内ガス量、破断チル層の大きさおよび巣の大きさによる強度低下の影響が見られる。

Table 1 Chemical composition of test materials (wt.%)

Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Al
9.7	4.3	0.62	0.55	0.40	0.02	bal.

Table 2 Casting conditions of test

Die casting machine	650t horizontal cold chamber die casting machine
Die casting system	Vacuum die casting with squeeze die casting (Vacuum die casting : ON, OFF) (Squeeze die casting : ON, OFF)
Operation	Hand spraying and picking
Melting temperature	993 – 1013K
Fast shot plunger speed	1.9m/s
Pressure on metal	78MPa
Cycle time	65 – 90s
Shot sleeve lubricant	Water-soluble type lubricant
Heat treatment	T5 (453K, 14.4ks)

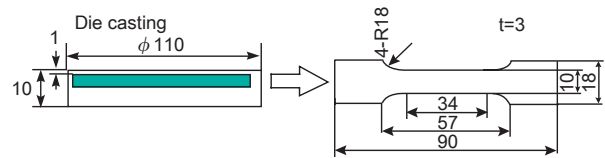


Fig. 2 Dimension of tensile specimen

Table 3 Result of multivariate analysis

	Dependent variable	Multiple correlation coefficient	Proportion
	Tensile strength	0.908	0.825
No.	Explanatory variable	Partial correlation coefficient	
1	Fixed number	313.5	
2	Gas amounts in die casting	-2.69	
4	Section area of scattered chill structure	-16.80	
5	Section area of porosity	-15.21	

3.2 ダイカスト部品の疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響

疲労強度についても、Table 4の材料組成において、実験を行っている⁴⁾ Fig. 3(a)は、SADC12, ADC10及びDADC24Zの評価に用いた平面曲げ疲労試験片、Fig. 3(b)はD10FMに用いた回転曲げ疲労試験片を示す。Fig. 4は、その試験結果をS-N曲線にまとめたものである。14-SNのうち水平部を決定する6点については、 10^7 を超えるところに示している。これらの疲労強度の差異は、合金組成や熱処理による硬度と鑄造欠陥の大小により説明できる。Table 5は、極値統計分布より算出した各試験試料14本中に存在する最大鑄造欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ 、と試験試料のビッカース硬度HVを用い、式(2)より推定される疲労強度 σ_{WL} (N=14)と疲労試験から得られた疲労強度の平均値 $\sigma_w(\bar{X})$ 比較をしたものであるが、15%以内の差異の中でほぼ一致していることが分かる。また、疲労強度

Table 4 Chemical compositions of test materials (wt%)

Test	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	-	↑

の下限値についても極値統計分布の外挿より同様に説明できる。

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

ここで、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： $\sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$
 α ： $0.226 + \text{HV} \times 10^{-4}$

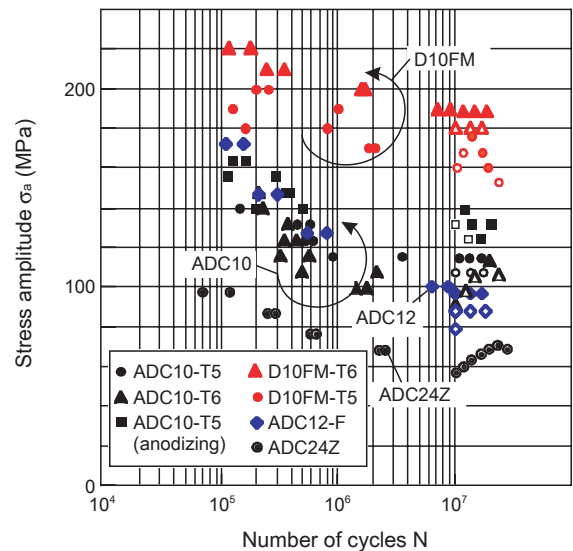


Fig. 4 S-N curve by 14S-N testing method

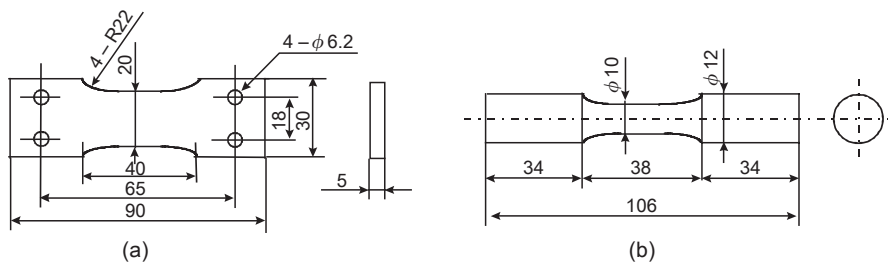


Fig. 3 Shape and dimensions of fatigue test specimens (unit : mm)

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

Test materials	Inclusion size $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ (μm)	Hardness HV	$\sqrt{\text{area}}$ parameter method $\sigma_{\text{WL}} (N=14)$ (MPa)	Fatigue limit determined by S-N curve $\sigma_w(\bar{X})$ (MPa)	$\sigma_w(\bar{X})$ $\sigma_{\text{WL}} (N=14)$
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

4. 強度信頼性を高めるダイカスト技術

当社では、スクイズダイカストや真空ダイカストなどをはじめとしてFig. 5に示すような鑄造欠陥の防止技術を開発し、量産適用している。以下それらの工法について示すが、実際にはそれぞれの技術を併用して量産しているものが多い。

4.1 スクイズダイカスト⁵⁾

ダイカスト部品の厚肉部やコーナ部に発生するFig. 6のようなひげ巣については、Fig. 7に示すスクイズダイカストを用いる。金型内に充填した溶湯は、凝固に伴い収縮するので、凝固に伴い収縮する容積を補うために金型内に装備したスクイズシリンダによりスクイズピンを駆動させ未凝固の溶湯を収縮部に加圧移動させる。Fig. 8は、本方法を適用した部品においてスクイズピンを作動させたスクイズピン移動量（スクイズストローク）と比重の関係を示したもので、凝固速度に即した領域において、比重が上がっており、ひげ巣防止に効果があることが分かる。

最近では、凝固解析などの鑄造CAEを用いて凝固位置の事前予測や金型冷却の活用やスクイズの加圧位置の最適化も行われるようになってきている。

4.2 真空ダイカスト⁶⁾

ダイカストの充填中に金型内の空気や熱分解ガスを溶湯中に巻き込んで発生する欠陥については、種々の取り組みがあるが、本報では当社で実施している真空ダイカスト、低速充てんダイカスト、型閉潤滑法について述べる。

ダイカストにおいて溶湯が金型内に充填される速度

は、数十m/s（条件には100m/sを超える場合も）あるので、金型内の空気や熱分解ガスは溶湯中に巻き込まれやすくなり、Fig. 9のような巻き込み巣が発生す

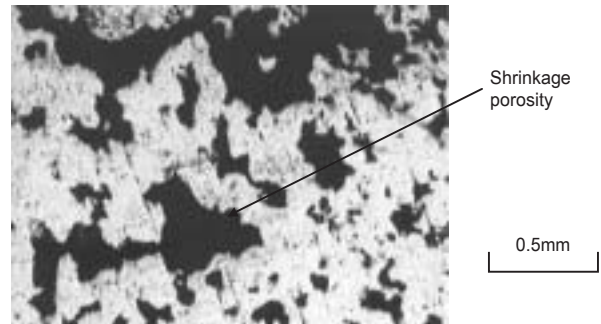


Fig. 6 Sectional view of shrinkage porosity

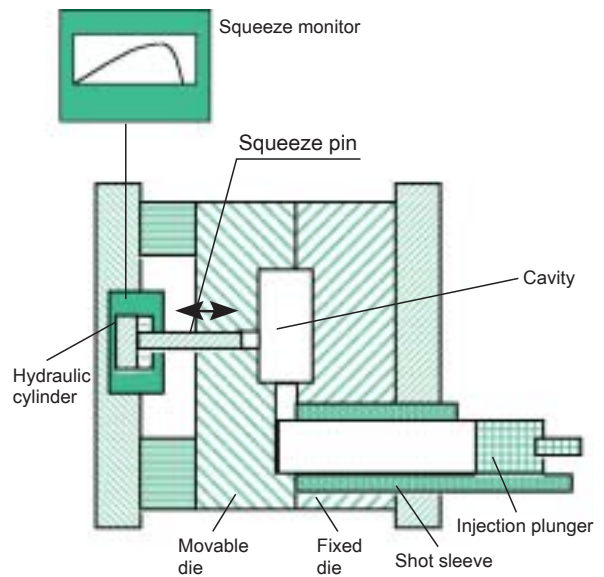


Fig. 7 Schematic view of squeeze die casting

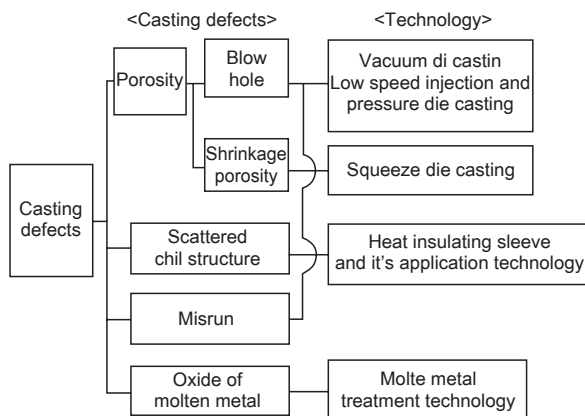


Fig. 5 Casting technology for preventing casting defects

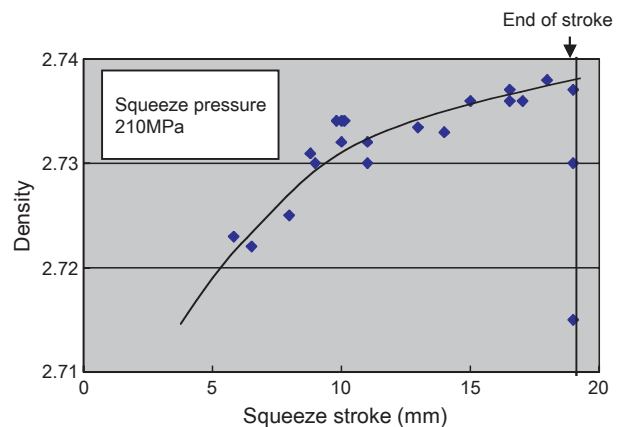


Fig. 8 Relation between and density

る。これを防止するためにFig. 10のように、金型内を真空タンクと連通させ、金型内を減圧させることにより巻き込み巣を防止している。Fig. 11は金型内の真空度を変化させた鋳造したときに、ダイカスト品の中に含まれるガス量を示したものであるが、高真空であるほど巻き込みガスの含有量が少ないことが分かる。

最近では、金型のシール性や金型の吸引能力を向上させた高真空ダイカストが使われることもあり、また薄肉・複雑形状のダイカスト部品の鋳造にも有効なことからその用途は拡大している。

4.3 低速充てんダイカスト⁷⁾

前述のように金型内の充てん速度が速いと巻き込み巣が発生することから、数m/s以下に低減し、層流領

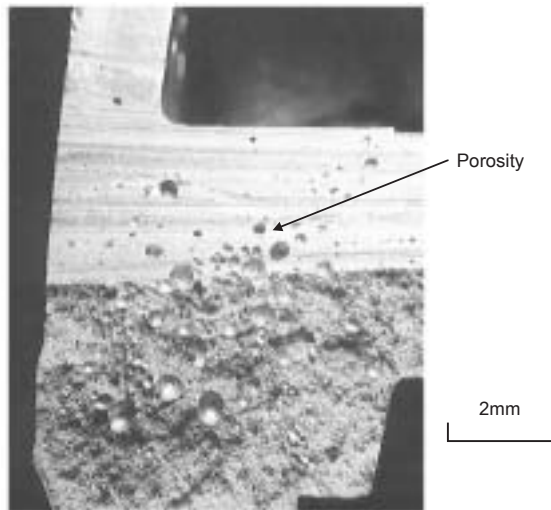


Fig. 9 Sectional view of porosity

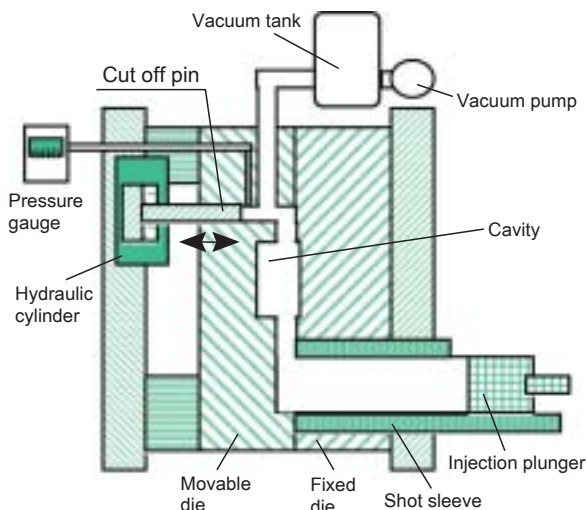


Fig. 10 Schematic view of vacuum die casting

域でダイカストを実施する工法を開発した。Fig. 12はその概要を示したものである。低速充てん用の射出ユニットと断熱性離型剤のスプレー装置が一般のダイカスト設備と異なる。充てん速度を低減すると巻き込み巣が低減するが、充てん時間が長くなるため湯まわり欠陥が発生する。これを解決するためFig. 13に示すような断熱保温効果のある離型剤を開発し、充てん速度を低減しても湯まわり性の確保できる領域を確保した。

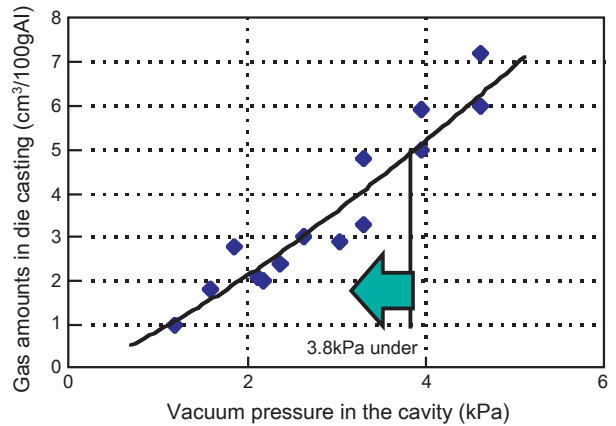


Fig. 11 Relation between gas amounts of die casting and vacuum pressure in the cavity

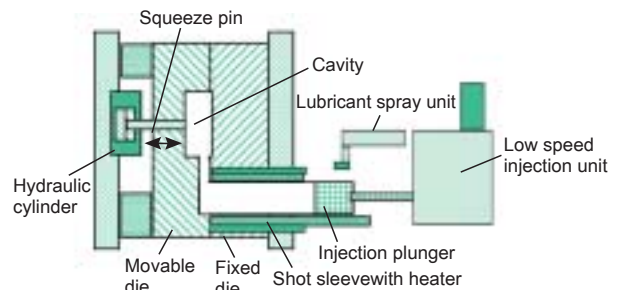


Fig. 12 Schematic view of low speed injection and pressure die casting

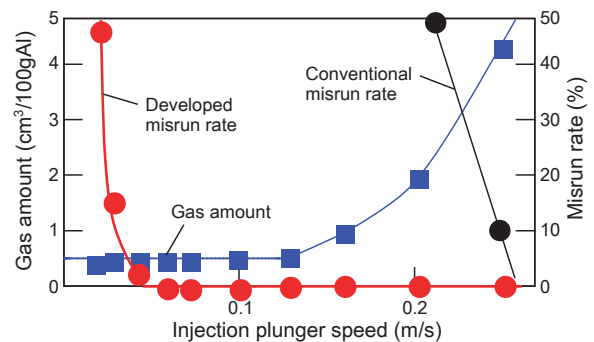


Fig. 13 Relation between gas amounts and misrun

4.4 型閉潤滑法⁶⁾

ダイカストの金型表面には、溶湯と金型の焼付き防止のため毎回離型剤や潤滑剤を塗布する。通常用いられている離型剤や潤滑剤は水溶性の油脂が主流であるが、金型表面や金型の合わせ面に残った水分や油分がガス化し、巻き込み巣を増加させる。

当社では、Fig. 14のように金型を閉じた状態で少量の粉体離型剤や油脂を塗布する方法を用いるものも増えている。Fig. 15に従来の離型剤との比較を示すが、型閉潤滑法で铸造したものは、巻き込みガスの含有量が大幅に低減していることが分かる。

また、型閉潤滑法は、離型剤塗布時に発生するミストが工場内に飛散しないことから環境面でも優れており、クリーンな工場を実現する観点でも着目されている。

4.5 その他の鑄造欠陥防止技術

ひけ巣や巻き込み巣以外の介在物や破断チル層が混入する場合も強度が低下する。

ダイカストにおける介在物は、金属中の溶解工程などで発生した酸化物が主な原因となる。これらの発生防止については、フラックス処理、フィルタ、不活性ガスなどがある。Fig. 16は、介在物防止技術を織り込んだ溶解保持炉の構造⁹⁾を示したもので、不活性ガス装置、粗さの異なる2種類のフィルタ及び直接給湯装置からなる。Fig. 17は、この方法で溶解した溶湯内の介在物を調べた(K10値：溶湯を矩形鑄型に鑄込み、破断させた破面にある介在物数を10倍倍率の顕微鏡で数える方法)のものであるが通常の方法で溶解した溶湯と比べ大幅に介在物量が低減していることが分かる。

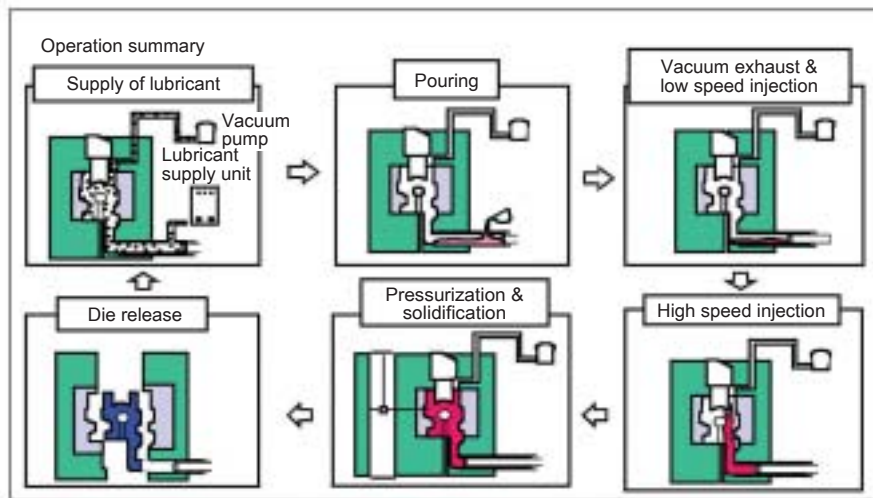


Fig. 14 Die lubrication system in shutting die

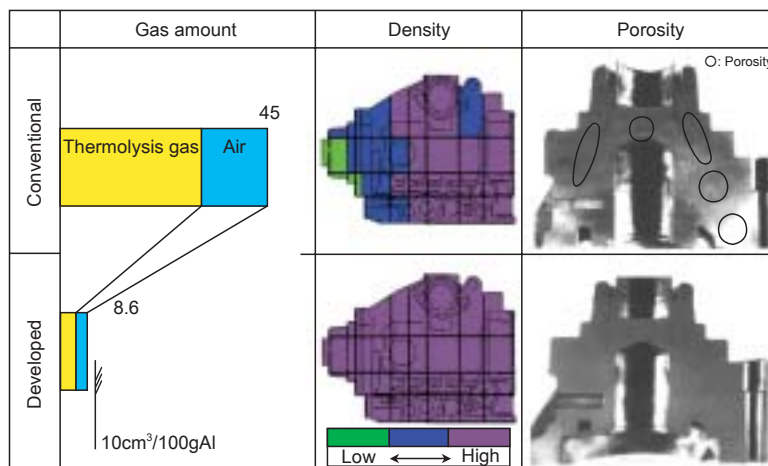


Fig. 15 Reduction effect of porosity

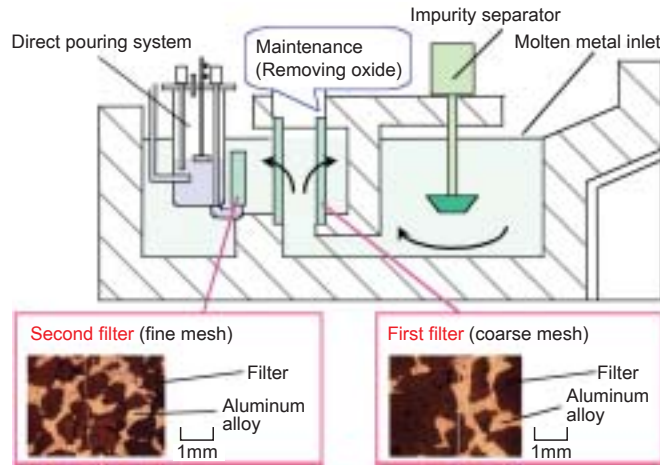


Fig. 16 Schematic view of melting furnace to reduce oxide contamination

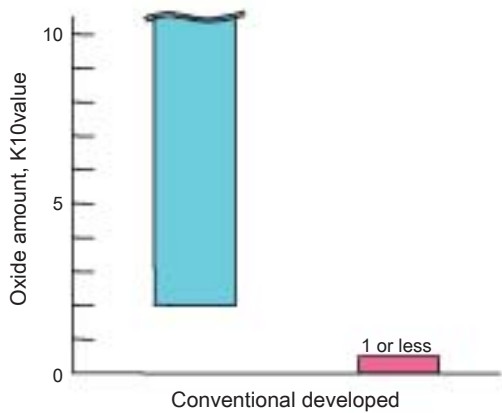


Fig. 17 Reduction effect of oxide contamination

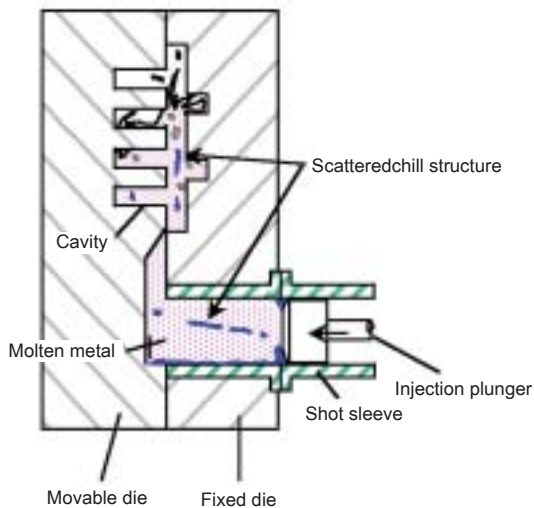


Fig. 18 Schematic view of the outbreak situation of scattered chill structure

Table 6 Composition of improved sleeve lubricant

	(%)
Mica	20.0
Polymer	2.0
Inorganic binder	4.0
Surfactant	2.0
Water	bal.

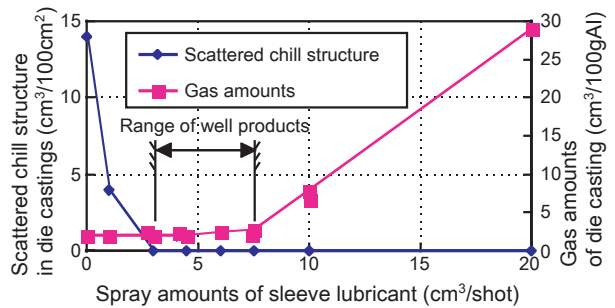


Fig. 19 Influence of spray amounts of sleeve lubricants on scattered chill structure in die castings and gas amounts of die castings

ダイカストにおける破断チル層は、Fig. 18のようにダイカストマシンの射出スリーブに給湯された溶湯が、射出スリーブ内で急冷凝固し、金型内に射出される際に破断して金型内に混入されるものである。これを防止するために、金型表面に熱伝達を抑えたTable 6に示すスリーブ潤滑剤を用いている。³⁾ Fig. 19は、このスリーブ潤滑剤の塗布量と破断チル層及び鑄造内ガス量の関係を示している。スリーブ潤滑剤の塗布量を $3\text{cm}^3/\text{Shot}$ 以上にすれば破断チル層の発生が防止されるが、 $7.5\text{cm}^3/\text{Shot}$ を超えるとスリーブ潤滑剤の成分

ガス化し、ダイカスト部品内に混入するので、塗布については十分な管理が必要となる。

5. まとめ

以上のように、ダイカスト部品の高品質化、とりわけ強度保証に対する取り組みとして、強度に及ぼす要因の究明とその防止技術の開発を行ってきた、それらを以下にまとめる。

- (1) ダイカスト部品の静的強度については、鋳造品内ガス、破断チル層、巣などの鋳造欠陥が強度低下の要因となる。また、疲労強度についても、母材の硬度に加えて巣などの鋳造欠陥の大きさにより推定できる。
- (2) 鋳造欠陥のうち主たる鋳造欠陥の防止については、スクイズダイカスト、真空ダイカスト、低速充てんダイカスト、型閉潤滑法などの工法や、溶湯清浄技術や破断チル層防止技術などを適用することにより低減できる。

ダイカスト部品の強度保証のためには、設計段階で必要とされる強度スペックの見極めと、それに応じた工法を適切に選定することが重要であると考える。

<参考文献>

- 1) 軽金属学会研究委員会：研究部会報告35 (1998)
- 2) 中村元志：日本鋳造工学会研究報告74 (1996) pp.10-11.
- 3) 高木博己，吉川澄，横山雅人：デンソーテクニカルレビューVol.3 No.2 (1998)
- 4) 山田耕二，宮川進，吉川澄：デンソーテクニカルレビューVol.7 No.2 (2002)
- 5) 杉浦恒之，泉錦廸，鈴木治男：軽金属36 (1986) 2, pp.105-111.
- 6) 高木博己：素形材技術セミナー高度真空技術による高級アルミニウムダイカスト製品の生産 (2004), pp.13-17.
- 7) 竹久文隆，深谷絃一，横井光義：鋳物66 (1994), pp.506-510.
- 8) 大見裕司，西川浩司：GIFA (1994)
- 9) 波多野智之，高木博己，稲垣三次：鋳造工学75 (2003) 6, pp.415-421.

<著者>



高木 博己
(たかぎ ひろみ)

生産技術開発部
ダイカスト加工の研究開発および
部品競争力強化推進業務に従事