



技術論文

過共晶Al-Si合金製 オールアルミシリンダーの開発

Development of an All-aluminum Cylinder
Using a Hypereutectic Al-Si Alloy

栗田 洋敬 Hirotaka Kurita 山縣 裕 Hiroshi Yamagata
● 研究開発センター コア技術研究室

Abstract

A monolithic aluminum block using a newly developed Al-20%Si alloy was made by a vacuum die-casting process. The bore surface design was a sleeveless type with uniformly dispersed primary-Si crystals of around $20\ \mu\text{m}$. The die-casting technology consists of a highly airtight die with two series of evacuation systems. The vacuum level in the die cavity was determined to be as low as 5kPa. The gas content of the block was found to be as low as $5\text{cm}^3/100\text{g Al}$, which has enabled T6 heat treatment. The die cavity temperature was carefully controlled to generate a fine dispersion of primary-Si crystals. Engine testing has proved that the bore wall temperature is 30K lower than that of an aluminum block enclosing a press-fitted cast iron liner. The superior cooling performance has decreased the oil consumption value to one half that of the aluminum block enclosing a cast iron liner. The simulation has revealed that the Si exposure provides EHL (Elastohydrodynamic Lubrication) contact in an exposure height ranging from 0.15 to $0.3\ \mu\text{m}$. The wear on the bore surface occurs in the process comprising the initial wear of the exposed Si crystals to $0.15\ \mu\text{m}$ and a steady state is achieved where the exposure height becomes constant.

1 はじめに

エンジンシリンダーは軽量、高強度で、よく冷えることが必要である。アルミ化はこれらの要求に応えることができる有効な手段である。このため近年種々のアルミシリンダーが開発されている。代表的なものとしては、Niめっきシリンダー¹⁾、MMC(Metal Matrix Composite)スリーブ鑄ぐるみシリンダー²⁾、アルミパウダーメタル(PM)スリーブ鑄ぐるみシリンダー³⁾、Fe溶射シリンダー⁴⁾等が挙げられる。オールアルミシリンダーとしてはAl-17%Si合金(以下A390合金)を使用したものが実用化されている。この合金はもともとレイノルズメタル社により開発され⁵⁾、1971年にシボレーベガに最初に採用された⁶⁾。その後、主として大排気量の乗用車用シリンダーとして広く使用されている。

A390合金製シリンダーは低圧(以下LP)鑄造により製造され⁷⁾、強度を出すためT5処理(高温加工から急冷後、人工時効硬化処理したもの)またはT6処理(溶体化処理後、人工時効硬化処理したもの)を施して使用される。LP鑄造は優れた鑄造品質を得ることができる一方で、サイクルタイムが長くなる欠点がある。バイクのシリンダーには、ダイキャストのように薄肉成形が可能で短いサイクルタイムで製造できるプロセスが必要である。しかしながら従来のダイキャストプロセスでは鑄物中のガス量が多く、ブリストと呼ばれる膨れが生じるため、T6処理を施すことは困難であった。

本研究で我々は真空ダイキャスト技術を使い、T6処理可能なオールアルミダイキャストシリンダー「DiASil(Die casting Aluminum-Silicon)シリンダー」を開発、実用化した。本シリンダーはAl-20%Si合金を使用した、めっきレス、スリーブレスのオールアルミシリンダーである。開発評価においてはシリンダーボア温度、オイル消費量、耐久性等を評価、また耐久試験後のシリンダーボア表面観察およびEHL

(Elastohydrodynamic Lubrication/弾性流体潤滑)シミュレーションにより摺動特性を評価した。

2 実験方法

2.1 DiASilシリンダー用アルミ合金

シリンダー用材料としてAl-20%Si合金を開発した。合金組成を表1に示す。合金には金属組織中の初晶

Siの粒径および分散を最適化するため、約100ppmのPを添加した。CaおよびNaは、Pの改良効果を阻害するため0.1%以下に規制した。CuおよびMgはT6処理により強度を得るために添加している。Feはダイキャスト時の金型の焼付きを防止するために添加した。添加量は0.5%±0.1%とした。これは、多量のFe添加は金属組織中に粗大な金属間化合物を形成し、強度の低下を招くためである。

表1 合金組成

										(wt.%)
Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Mn	Ni	Ca	P	Al	
20.0	2.61	0.59	0.44	0.01	0.01	0.01	0.003	0.027	REM.	

2.2 ダイキャスト

鑄造プロセスとして、製品中へのガス吸収を防ぐために、真空ダイキャスト法を採用した。本ダイキャストシステムは効率的な真空排気を行うために2系統の真空排気システムを有している。図1に真空排気システムの模式図を示す。1系統はキャビティを排気し、残り1系統はキャビティ以外の金型空隙部分の排気を行う。これら排気システムは真空ポンプ、真空タンクを有しており、各々独立している。金型には真空シールを配し、高気密構造とした。射出時には5kPa以下の真空度を保持することが可能である。その結果、製品ガス量は約5cm³/100gであり、T6処理が可能となっている。

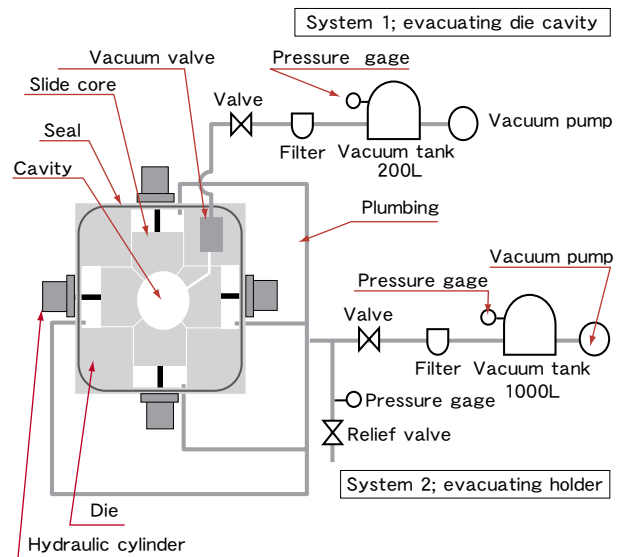


図1 真空排気システム

2.3 金属組織

ダイキャストは一般的に冷却速度が速いため、過共晶Al-Si合金を使う場合、製品表面近傍に初晶Siが晶出しない部分(初晶Si無晶出部)が生じる。初晶Si無晶出部が摺動部となると耐摩耗性が低くなってしまう。そのため金型温度をコントロールし、初晶Si無晶出部の最小化を図った。同時に残存している初晶Si無晶出部はファインボーリング工程で除去した。図2にシリンダーボア表面の金属組織を示す。画像処理装置により測定した初晶Siの平均粒径は約20μm、面積率は約11%である。

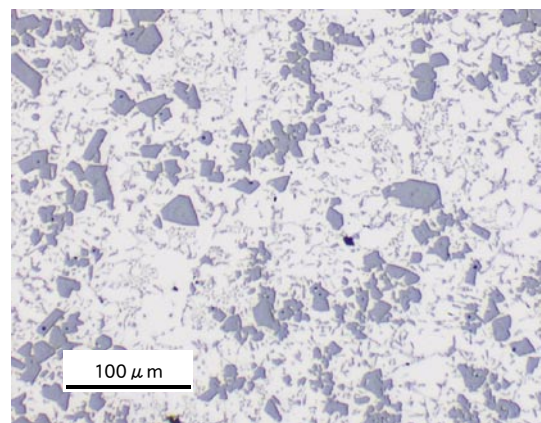


図2 金属組織

2.4 熱処理

シリンダーボア表面に十分な硬さを得るため、熱処理としてT6処理を施した。表2に処理条件を示す。HRB70のロックウェル硬さが得られた。

表2 熱処理条件

Solution treatment	4h at 763K followed by water quench
Aging	4h at 473K

2.5 ホーニング

ホーニングは2工程よりなる。第1工程でシリンダーボア径および真円、円筒度を出し、第2工程で初晶Si粒子の浮出し加工を行う。ホーニング後のシリンダーボア表面は鏡面状態であり、従来のホーニング面に見られるクロスハッチパターンは認められない。Si粒子の浮出し高さは原子間力顕微鏡(AFM)にて測定した。

2.6 エンジンテスト

空冷および水冷のDiASilシリンダー(図3)を試作、試験に供した。空冷シリンダーを用いてシリンダーボア温度およびオイル消費量を測定、水冷シリンダーを使用して耐久試験を実施した。



図3 DiASil シリンダー

(1) シリンダーボア温度測定

シリンダーボア温度測定にはボアφ49mm、ストローク80mmの空冷シリンダーを用いた。ボア温度は上死点より5mmのシリンダーボア表面に埋め込まれた熱電対により測定した。試験はテストベンチにて実施、エンジン回転数を変化させながら温度測定を行った。

鋳鉄スリーブ圧入シリンダーについても同様に測定を行った。鋳鉄スリーブ圧入シリンダーは、DiASilシリンダーと同一形状であり、スリーブ厚さは約5mmである。

(2) オイル消費量測定

オイル消費量測定にはボアφ49mm、ストローク80mmの空冷シリンダーを用い、10,000kmの実走行前後のエンジンオイル量を測定、算出した。鋳鉄スリーブ圧入シリンダーについても同様に測定を行い、結果を比較した。鋳鉄スリーブ圧入シリンダーのスペックはシリンダーボア温度測定に使用したものと同様である。

(3) 耐久試験

耐久試験にはボアφ66mm、ストローク100mmの水冷シリンダーを用い、2.5時間、8時間および105時間のエンジン運転を行った。このときエンジンオイル温度は423K一定とした。また耐久試験前後でエアマイクロメーターおよび表面粗さ計にてシリンダーボア径および表面形状の測定を行った。

2.7 EHLシミュレーション

接触部の表面形状は、接触状態に大きな影響を及ぼす。そこでEHLシミュレーションを用いて、ピストンリングとシリンダーボアの接触状態に及ぼすSi粒子浮出し高さの影響を検討した。Si粒子浮出し高さを0から0.5 μmまで変化させ、接触部の油膜厚さ(h)および油膜圧力(p)を計算した。接触モデルを図4(a)に示す。ピン先端の曲率半径は40mmでピストンリング接触部の曲率半径と等しい。ディスクは平面であり、半無限体とした。荷重(P)はピストンリング張力と等しく、14.7Nとした。ディスク速度は上死点付近のピストンスピードに対応させて2m/sとした。

計算に用いた初晶Siの配列を図4(b)に示す。本モデルでは初晶Siのみ配列し、共晶Siは考慮していない。初晶Si粒径は実際の組織で最も頻度の高い30 μmとし、初晶Si面積率は11%とした。初晶Si粒子の断面形状を図4(c)に、計算に用いたパラメータを表3に示す。表中の合成表面粗さRaはピストンリングおよびシリンダーボア表面粗さより決定した。潤滑油パラメータは423Kにおける実際のエンジンオイルの値を使用した。接触部の油膜圧力分布はReynolds方程式(1)により表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12u \frac{\partial [\rho (h-Ra)]}{\partial x} \quad (1)$$

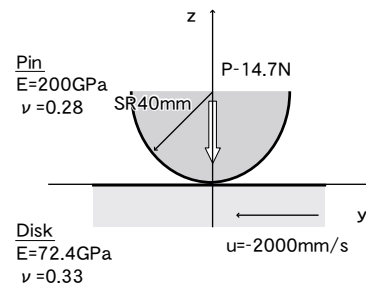
このとき粘性係数(η)は油膜圧力(p)と共に変化する。そこで粘性係数(η)はRoelandsの式(2)により補正を行った。

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp \left[\frac{\alpha p_0}{Z} \cdot \left(1 + \frac{p}{p_0} \right)^{Z-1} \right] \quad (2)$$

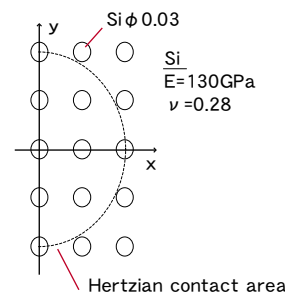
接触部の弾性変形量(δ)はBoussinesqの式(3)により計算される。

$$\delta = g(x) + E' \int_s \frac{p(\xi)}{r(x, \xi)} d\xi \quad (3)$$

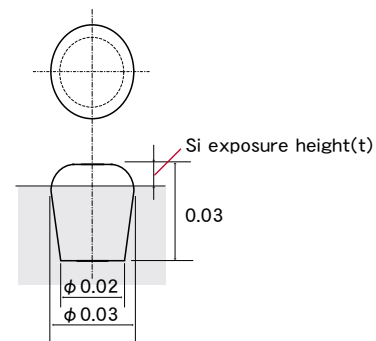
接触部の油膜圧力分布(p)および油膜厚さ分布(h)は式(1)から(3)を連立して解くことにより計算される。計算には境界要素法⁸⁾を用いた。これら分布から各Si粒子上の平均油膜圧力を求め、更にその最小値(PEHL)を求めた。また同様に接触部油膜厚さの最小値(TEHL)も求めた。



(a) 接触モデル



(b) 初晶 Si の配列



(c) 初晶 Si 粒子の断面形状

図4 接触条件

表3 パラメータ

Composite roughness: Ra	0.3 μm
Density of oil film: ρ	0.76 g/cm ³
Coefficient of viscosity at ambient pressure: η ₀	0.028 Pa·s
Pressure viscosity coefficient: α	0.020 MPa ⁻¹
Roelands viscosity coefficient: p ₀	200 MPa
Roelands viscosity coefficient (dimensionless): Z	0.5

3 実験結果

3.1 シリンダーボア温度測定

シリンダーボア温度測定結果を図5に示す。従来の鑄鉄スリーブ圧入シリンダーに対し、DiASilシリンダーは約30Kの温度低減効果が確認できた。

3.2 オイル消費率測定

DiASilシリンダーのオイル消費率は約20,000km/Lであり、鑄鉄スリーブ圧入シリンダーの約2倍であった。DiASilシリンダーの優れたオイル消費率は、優れたシリンダーボア冷却能力によるものと考えられる。

3.3 耐久試験

耐久試験の前後でシリンダーボアの径および表面形状に変化は認められなかった。しかしながらSi粒子の形状は試験前後で大きく異なっていた。図6に105時間耐久試験前後の初晶Si粒子のAFM像を示す。耐久試験前 $0.5\mu\text{m}$ であった初晶Si粒子の浮出し高さは、2.5時間、8時間、105時間のいずれの耐久試験後も $0.15\mu\text{m}$ に減少していた。試験後の初晶Si粒子には、ピストンリングの運動方向と同一方向に多数の引っ掻き傷が認められた。

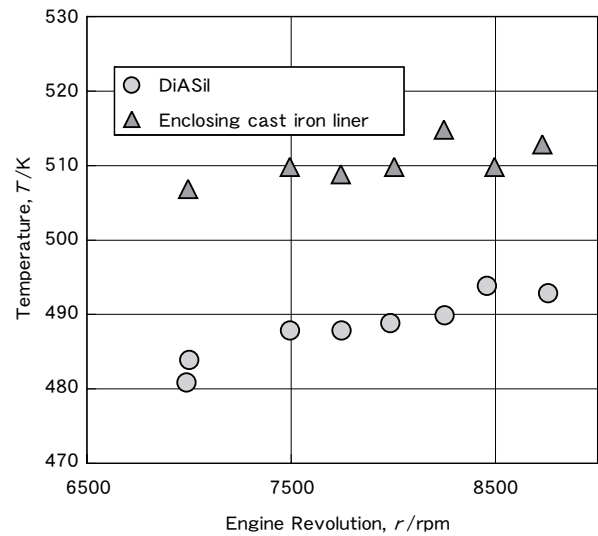
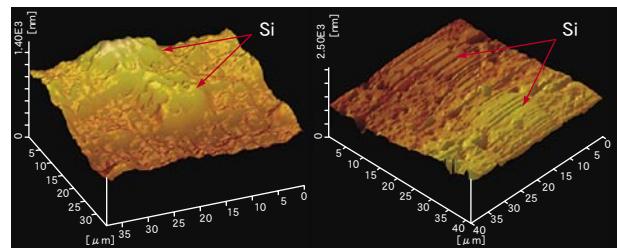


図5 シリンダーボア温度測定結果



(a) Before test. Exposure height of $0.5\mu\text{m}$ (b) After test. Exposure height of $0.15\mu\text{m}$

図6 初晶Si粒子のAFM像

3.4 EHLシミュレーション

EHLとは、高い接触圧力のために潤滑面が変形するなどの影響が現れる流体潤滑状態のことである。EHLの特徴として、接触域出口側に圧力スパイクと呼ばれる圧力のピークの発生がある。油膜圧力分布計算結果中に見られた圧力スパイクを図7(a)矢印部に示す。図7(b)には油膜厚さ分布計算結果の一例を示す。図8にTEHLおよびPEHLと初晶Si粒子浮出し量の関係を示す。

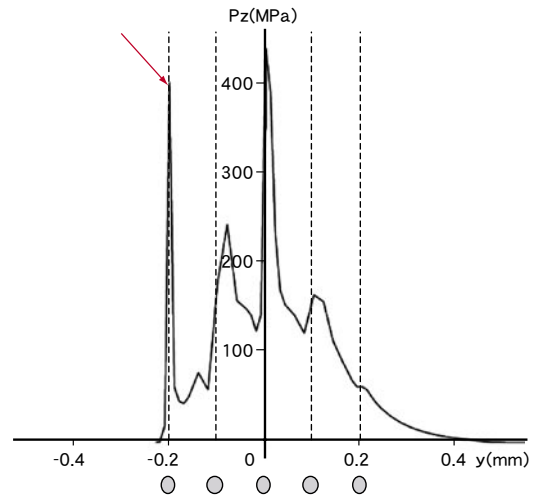
4 考察

4.1 EHL状態に及ぼす初晶Si粒子浮出し量の影響

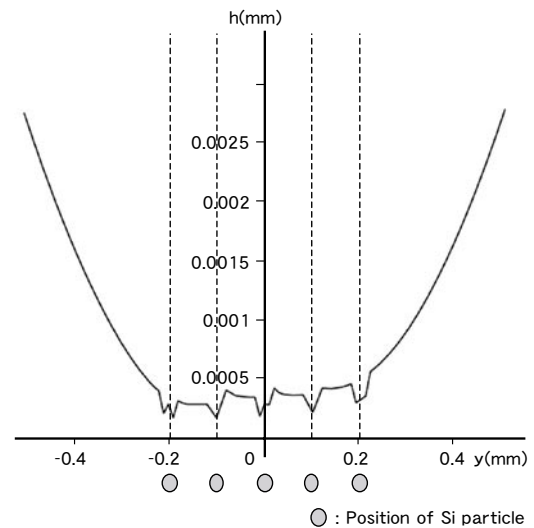
油膜厚さは耐摩耗性に大きな影響を及ぼす因子であり、接触部の表面形状(表面粗さ、うねりなど)により大きく異なる。DiASilシリンダーはホーニングによりシリンダーボア表面の初晶Si粒子を浮き出させている。そこでEHLシミュレーションによりSi粒子浮出し量がEHL状態に及ぼす影響を検討した。その結果、 $0.15\ \mu\text{m}$ および $0.3\ \mu\text{m}$ では油膜圧力分布中に圧力スパイクが観察され、EHL状態になっていることがわかった。その他の初晶Si浮出し量においてはEHL状態にならず、初晶Si粒子がピンに接触することがわかった。

4.2 エンジンテスト中の初晶Si粒子形状変化

エンジンテスト前のDiASilシリンダーの初晶Si粒子浮出し量は $0.5\ \mu\text{m}$ であった。2.5時間、8時間の耐久テストで浮出し高さは $0.15\ \mu\text{m}$ に減少していた。これらの結果より、初晶Si浮出し高さは短時間のうちに $0.15\ \mu\text{m}$ まで減少し、その後は一定値を保つことがわかる。図6(b)には初晶Siに多数の引っ掻き傷が認められ、これら傷の方向はピストンリングの運動方向と一致している。これよりSi粒子の形状変化はピストンリングによるアブレイブ摩耗によるものと推察される。図9(a)に初晶Si粒子の断面形状を示す。接触の初期、初晶Si粒子の頂部には平坦部は認



(a) 油膜圧力分布



(b) 油膜厚さ分布

図7 計算結果の一例

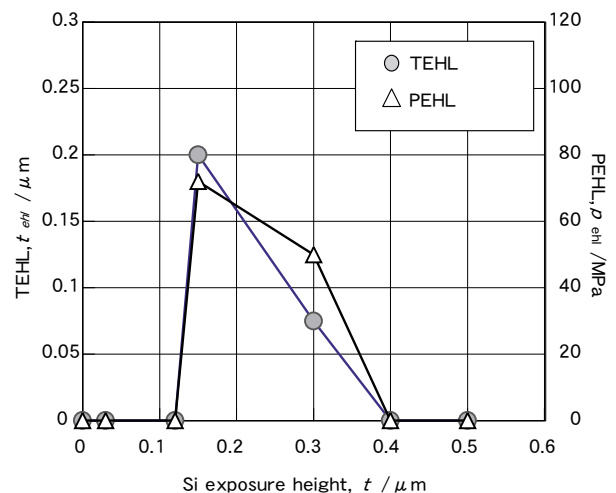


図8 TEHL、PEHLと初晶Si粒子浮出し量の関係

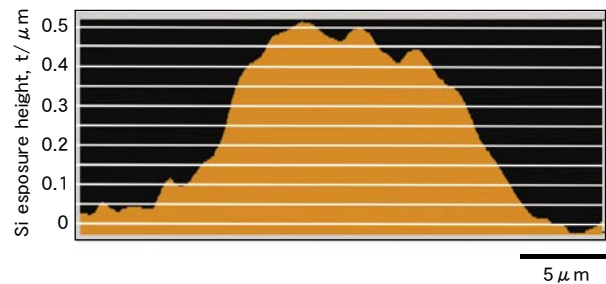
められない。このとき、実際に相手材の荷重を受ける実接触部の面積率(f)は0.2%である。図9(b)にピストンリング張力によって生じる接触圧力(PRT)と初晶Si粒子浮出し量の関係を示す。PRT値は式(4)により求められる。

$$PRT = 200 \times W / (D \times h1 \times f) \quad (4)$$

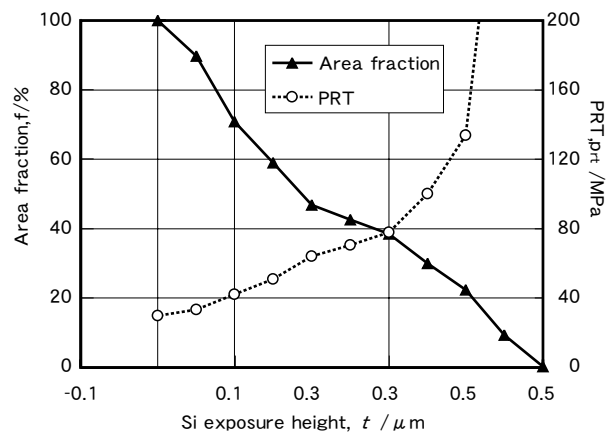
ここで W はリング張力、 D はシリンダーボア径、 $h1$ は接触部の幅(0.2mm)、 f は実接触部の面積率である。接触の初期においては、初晶Si粒子はピストンリングと点接触するため、その接触圧力は10GPaに達する。この大きな接触圧力により初晶Si粒子は速やかに摩耗する。摩耗の進行に伴い、実接触部の面積率(f)が増加することで、PRT値は減少し、浮出し量0.15 μm では50MPaとなる。

4.3 エンジンテスト結果とシミュレーションの比較

実際のエンジンテストでは初晶Si浮出し量は0.5 μm から摩耗により減少し、0.15 μm で一定となった。これに対し、シミュレーションでは浮出し量0.3 μm および0.15 μm でEHL状態となることが示されている。実際のエンジンテストにおいて浮出し量が0.3 μm で摩耗が止まらないのはなぜか、それを考察するためSi浮出し量を変数にとり、PEHL値およびPRT値の比較を行った。結果を図10に示す。図に示されるように、PEHL値はSi浮出し量0.15 μm の点においてのみPRT値よりも高い値を示す。これはSi浮出し量0.15 μm の場合、EHLにより発生する油膜圧力がリング張力による接触圧力上回ることを示しており、ピストンリングとシリンダーボアの間油膜が存在することを示す。一方Si浮出し量0.3 μm の場合、リング張力による接触圧力のほうがEHLによる油膜圧力よりも大きいため、ピストンリングとシリンダーボアが直接接触し、摩耗が進行するものと考えられる。これらよりDiAsilシリンダーは運転の初期にSi粒子が摩耗し、浮出し高さ0.15 μm でEHL状態に達し摩耗の進行が止まるものと考えられる。



(a) 初晶 Si 粒子の断面形状



(b) 接触圧力と初晶 Si 粒子の浮出し量の関係

図9 接触圧力と初晶 Si 粒子

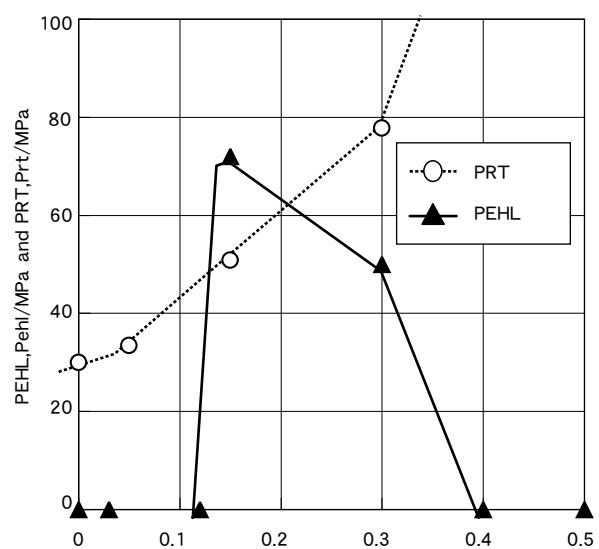


図10 PEHL 値および PRT 値と Si 浮出し量

5 まとめ

真空ダイキャスト技術によりT6処理可能なAl-20%Si合金製オールアルミシリンダーを開発実用化した。金属組織中の初晶Si粒子の粒径および分散状態は金型温度コントロールにより最適化した。シリンダーボアの初晶Si粒子はホーニングにより0.5 μm 程度浮き出させた。実際のエンジン運転においては鋳鉄スリーブ圧入シリンダーに対し、シリンダーボア温度30K低減、オイル消費率は2倍となった。境界要素法によるEHLシミュレーションより、初晶Si粒子浮出し量0.15 μm から0.3 μm の範囲でEHL状態に達することがわかった。実際のエンジンにおいては、シリンダーボア表面のSi粒子はエンジン運転の初期において0.15 μm まで摩耗し、EHL状態に達することで、その後摩耗は進行せず定常状態となる。

■記号定義

x : 接触面上の計算点	ρ : 油膜密度
h : 油膜厚さ	p : 接触圧力
η : 粘性係数	u : 2物体間の相対速度
Ra : 合成表面粗さ	η_0 : 常圧粘性係数
α : 圧力粘性係数	Z : Roelands 粘性係数 (無次元)
p_0 : Roelands 粘性係数	δ : 2つの弾性体の剛体的近接量
ξ : 接触面上の積分点	$g(x)$: 点 x での初期ギャップ
E' : 等価縦弾性係数	S : 接触面領域
$r(x, \xi)$: 点 x と点 ξ の接触面上の距離	$p(\xi)$: ξ での接触圧

■参考文献

- 1) K.Funatani et al: Automotive Engineering, January, (1995), p. 15
- 2) H.Hayashi, H.Ushio and M.Ebisawa: SAE Paper, 890557, (1989)
- 3) G.Kubelstein, P.Stocker, F.Ruckert: VDI-Bericher, 1612, (2001), p. 63
- 4) G.Barbezat and R.Herber: SULZER TECHNICAL REVIEW, 2, (2001), p. 8
- 5) J.L.Jorsted: Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 242, July, (1968), p. 1217
- 6) J.L.Jorsted: Modern casting, October, (1971), p. 71
- 7) <http://www.kolbenschmidt.de/pdfdoc/lpdc engine blocks e.pdf>
- 8) K.Kakoi: Journal of Japanese Society of Tribologists, 36, 6, (1991), p. 566