

急凝固粉末アルミニウム押出し材による 高性能シリンダライナの開発

Development of a Cylinder Liner with a New Rapidly Solidified
Aluminum Alloy Extruded Material

安達 修平 Shuhei Adachi

●研究開発センター コア技術研究室

技術論文

The high-performance engines used on sports-type vehicles must have high cooling efficiency, while also being lightweight and compact. From the standpoint of environmental friendliness, it goes without saying that such an engine must also have low "total emissions", as measured by Life Cycle Assessment (L.C.A. = an evaluation of the environmental impact over the entire life cycle of a product, from obtaining the raw materials it uses to the manufacturing, sales, use and final scrapping), as well as being efficient to manufacture. One effective way to build an engine that meets these requirements, while achieving high performance and reduced environmental impact, is to line the combustion chamber assemblies with an aluminum alloy that is lightweight, has excellent heat transfer qualities and is highly durable. Since the engine block accounts for an especially large proportion of the engine's total weight and plays such an important role in the engine's performance and reliability, various approaches have been tried in the past and there are many reports of actual use of alternate materials in combustion chamber assemblies^{1~4}). However, few examples have achieved both high performance and reliability, and been efficiently manufactured at low cost. In this paper we report on our research on materials for cylinder liners, which come in contact with the piston with its high-speed reciprocating motion^{5,6}). We also report on a new rapidly-solidified type of extruded aluminum material we developed based on the results of our findings using an alloy with 26% silicon content by mass, and our use of this material to make a cylinder liner for practical use.

1 はじめに

スポーツ系高性能エンジンには、高い熱効率と軽量かつコンパクトであることが求められる。また、地球環境保護の視点から、LCA（Life Cycle Assessment, 資源採取から製造、販売、使用、廃棄にいたる、製品の全ライフサイクルにおける環境影響評価）の手法に基づくトータルエミッションの低減と、高い生産性の実現が不可欠であることは言うまでもない。これらの要求を満足し、高い性能と環境への負荷の少ないエンジンを成立させる手法のひとつとして、エンジンの燃焼室周りの部材を、軽量で、熱伝導性が高く、耐久性に優れたアルミニウム系材料に置き換えることが有効である。特に、エンジンブロックについては、総重量に占める割合が大きく、エンジン性能や信頼性の基本となる部材であるため、従来さまざまな新しいアプローチが試みられ、多くの実用化事例が報告されている^{1~4})。しかし、高い性能・信頼性と、高い生産性・低コストを両立させるのに成功した事例は多くない。本稿では、高速で往復運動をするピストンと接するシリンダライナの材質について検討した経緯^{5,6})を紹介するとともに、その結果、26 mass%のシリコンを含有する急凝固粉末アルミニウム合金押出し材料を開発し、実用化した経緯^{7,9})について報告する。

2 エンジンブロックの形式と製造上の課題

これまで自動車エンジンで採用されてきたアルミニウムブロックは、**図1**に示すように、大きく3つのカテゴリーに分類することができる。ひとつは、モノブロックとよばれるタイプのもので、ブロック全体が1つの材質からなる部材となっており、シリンダ部に要求される耐磨耗性を満足するため、多くはA390合金に代表される過共晶合金の鋳造材である。2つ目は、セミモノブロックと呼ばれ、全体を鋳造性のよい共晶合金で構成しつつ、シリンダ部のボア表面部（内周側）に、耐磨耗性硬質層を形成したタイプである。硬質層を形成する方法としては、Ni系などのめっきを施す、鉄系耐磨耗合金などの溶射を施す、高い耐磨耗性をもつセラミック系繊維などを鑄包んだ構造とする、などがあり、それぞれ実用化されている。3つ目は、ライナインサート構造で、シリンダ部に、例えば鋳鉄管のような、耐磨耗性・自己潤滑性に優れた材料でできた部材を鑄包むか圧入した構造が多く使用されている。

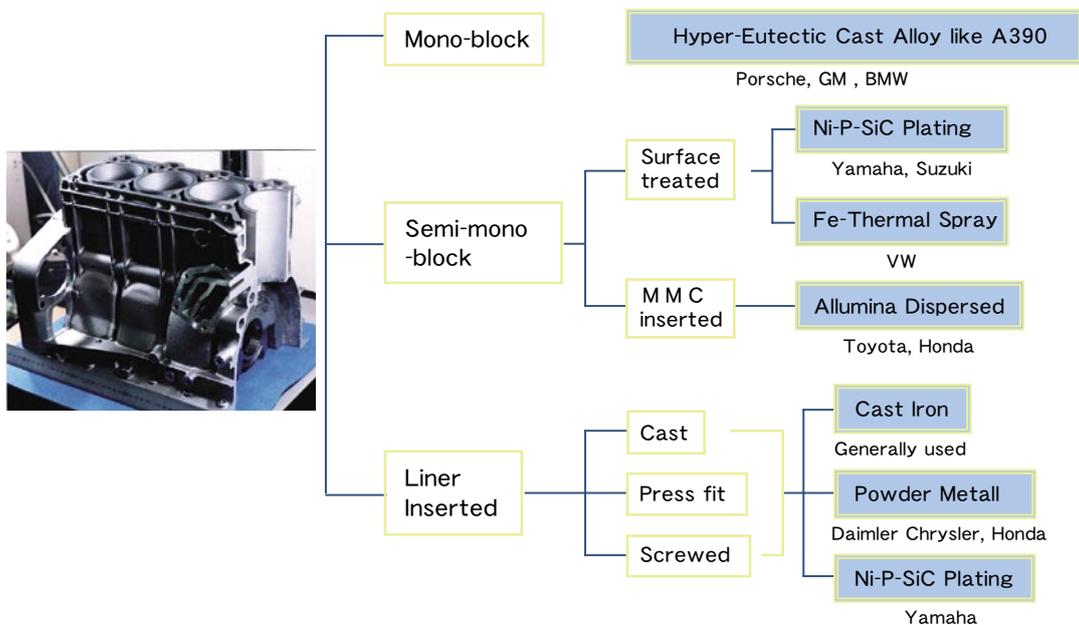


図1 アルミニウムブロックの分類

当社のスポーツ系大型モーターサイクルエンジンでは、3つ目のタイプのブロック構造で、ライナ材として鋳鉄管のかわりにアルミニウム押出し材を使用し、ボア内周側表面にニッケル- 燐 複合めっきを施したものが使用されてきた。**図2**に、そのタイプのエンジンブロックの製造プロセスを模式的に示す。

ライナ材として従来使用されていたアルミニウム押出し材は、10%Si, 4% Cu、0.7%Mg（すべてmass%）の組成をもつ材料で、ブロック本体の材料はJIS ADC10相当材である。この製造プロセスにおいて、鋳造後の素材のシリンダボア加工精度にばらつきが生じ、一部に所定の品質基準を満足しな

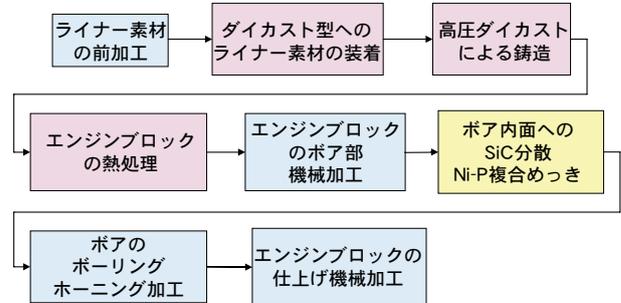


図2 エンジンブロックの製造プロセス

いものが発生するという課題があった。この原因について調査を進めた結果、鑄造終了直後の素材において、一部にライナ材とブロックの密着が不十分なものが発生していることが判明した。ライナ材とブロック間の部分的な密着性の不足が、シリンダボア剛性の不均一を生み、後工程におけるボアの加工精度ばらつきを大きくする原因となっていたのである。

3 鑄造解析による課題解決策の探査

上述の課題調査から、ライナとブロック間の密着不良をもたらしている原因を突き止めるため、鑄造過程のシミュレーションを行い、材料物性値の影響を調査することを試みた。方法として、凝固・熱変形連成解析を用いた。すなわち、鑄造過程における溶湯の凝固解析から、製品の温度分布とその変化を導出し、その結果に基づいて、各部位の熱変形解析から各部の相当塑性ひずみならびに応力分布を算出する、というものである。

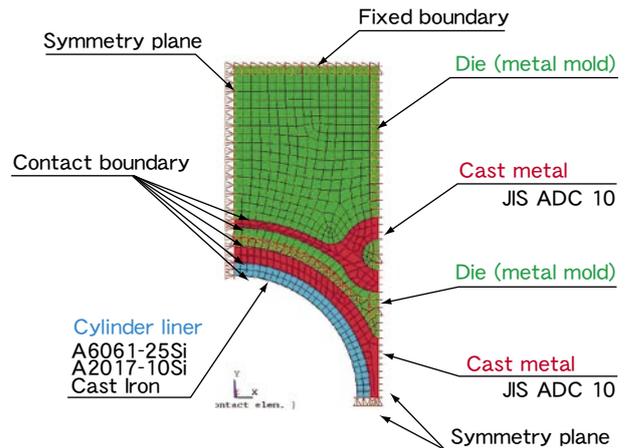


図3 鑄造シミュレーション熱応力解析モデル

図3に、凝固解析と熱変形解析に用いた鑄型のモデルを示す。4気筒の製品の1気筒分について、冷却液ジャケットを含む断面を対象とし、さらにその円周1/4をモデル化した。解析領域は、シリンダライナ (CL)、エンジンブロック (EB)、および金型である。凝固解析には汎用凝固解析コードCAPを、また、熱変形解析には汎用構造熱解析コードANSYS Ver.5.7を用いた。

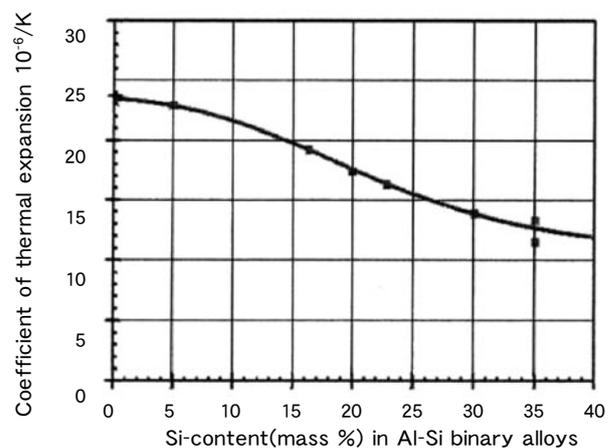


図4 Al-Si 2元系合金におけるSi含有量と線膨張係数の関係¹⁰⁾

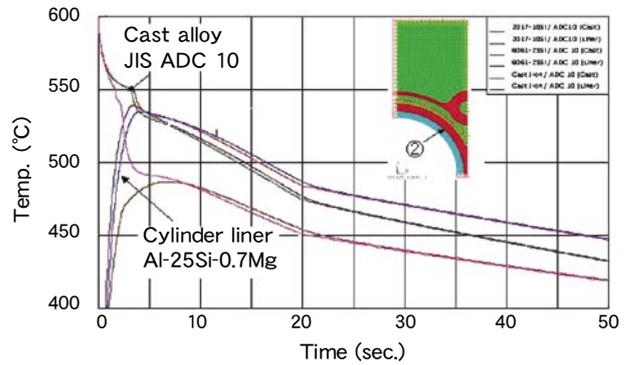
ライナ材としてAl-25Si合金、Al-10Si-3Cu合金、鑄鉄の3種類を設定した。最初の合金の材料組成は、Si含有量と線膨張係数の関係(図4)から、現行材と鑄鉄材のほぼ中間の線膨張係数を持つ材料として選定した。表1に各ライナ材の材料の物性値を示す。

表1 熱応力解析に用いた材料パラメータ

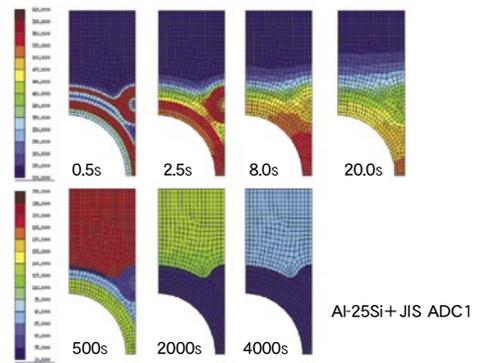
Alloy	Linear thermal coeff. $\times 10^{-6}$			Young's modulus (N/mm ²)			0.2% Offset yield stress (N/mm ²)		
	R.T.	300°C	500°C	R.T.	300°C	500°C	R.T.	300°C	500°C
JIS ADC-10(10Si)	20.6	21.5	21.7	71,000	31,000	17,000	153	63	10
Al-10Si-3Cu	20.0	20.6	21.1	79,000	45,000	27,000	410	120	11
Al-25Si-0.7Mg	17.3	17.9	18.4	84,000	45,000	27,000	290	80	11
Cast iron	13.0	13.4	13.6	1×10^5	1×10^5	1×10^5	300	280	250

凝固解析結果を図5に示す。一例として、ライナ材にAl-25Si合金を用いた場合、ライナ特定部の温度は注湯終了後約3秒で最高温度540℃に達し、その後、溶湯の凝固とともに冷却される。図5(a)、(b)は、同組み合わせの場合の、 casting 過程における温度分布の変化を示す。

次に、上述の結果をもとに、図3に示したモデルを用いて熱変形解析を行った。図6(a)は、凝固終了後の各部におけるライナとブロック間の隙間量を、両部材の線膨張係数比 α_{CL}/α_{EB} の関数としてプロットしたものである。この結果より、 α_{CL}/α_{EB} が0.8以下になると、両部材間の隙間はほとんど無視できる程度になることがわかる。種々のライナ材を用いて実際に铸造した製品から得られた結果もこれとよい一致を示したことから、ライナ材とブロック材の線膨張係数の組み合わせを適切に選ぶことが、隙間形成防止の対策として有効であることが確認された。図6(b)は、2つの異なるシリンダ材を用いた場合について、凝固終了後の部材中における相当塑性ひずみの分布を示している。 α_{CL}/α_{EB} が1の場合、製品内に高いレベルの塑性ひずみが残存するとともに、比較的大きな隙間が形成されているのに対し、同値が0.8の場合では、内部のひずみが緩和され、かつ良好な密着性が確保されていることがわかる。铸造過程における相当塑性ひずみ分布の変化をさらに詳細に調査した結果、 α_{CL}/α_{EB} 値が大きい場合には、注湯終了直後のライナの膨張量が大きい状態で溶湯の凝固が開始されるため、その後の冷却過程におけるブロックの収縮による相互作用が強く、とりわけライナ側に著しい内部ひずみ・降伏を生じることがわかった。凝固過程に内部ひずみを生じる他の因子として、高温域での部材の弾性係数、降伏応力、流動応力、剛性などがあるが、今回のような一定の断面形状においては、ブロックとライナ部

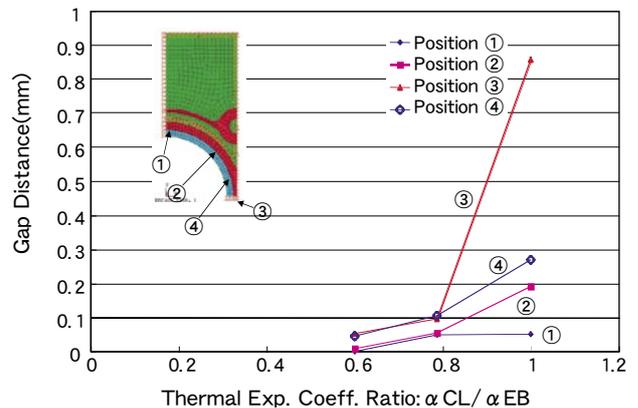


(a) 溶湯およびライナの温度変化

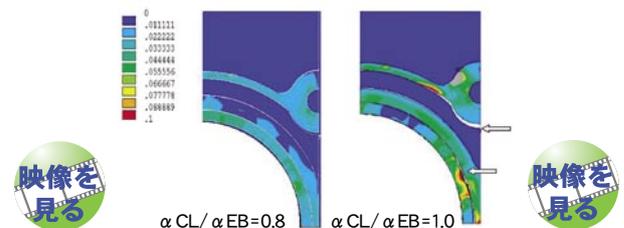


(b) ライナ材 Al-25Si、铸造材 JIS ADC10 の組み合わせにおける、铸造過程での温度分布変化

図5 ダイカスト铸造過程における溶湯・ライナ材の温度変化



(a) 各部の隙間量



(b) 異なるライナ/ブロック線膨張係数比における、铸造終了後の相当塑性歪分布の比較

図6 铸造終了後のライナ・ブロック隙間と各部材の線膨張係数比の関係

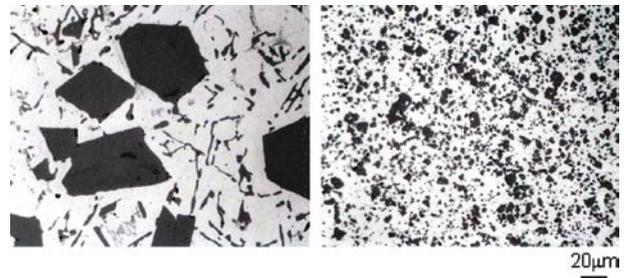
材の線膨張係数の比率が支配的な影響力をもつことがわかっている。

4 新しいライナ用合金の開発経緯

上記の解析結果より、ライナ・ブロック間の密着性確保のための方向が判明した。この方針に従って、ライナ材の材料開発を行った。

4.1 シリコン含有量と初晶サイズの制御

ライナに要求される $17 \times 10^{-6} / K$ レベルの線膨張係数が得られるアルミニウム基材料として、Al-26mass%Si 合金を選定した。しかし、従来の鑄造法でこの組成の合金を製作したのでは、初晶 Si 粒が著しく粗大化してしまい、機械的性質や被削性が劣るだけでなく、最終工程でのめっき層の密着性にも問題が生じる可能性があった。そこで、急凝固粉末合金を、押出し成形固化した材料を使用することとした。図 7 に Al-25Si 合金の微細組織を示す。急凝固粉末押出し法により製造した材料では、初晶 Si 粒の平均粒径が $5-10 \mu m$ と微細で、かつ極めて均一に分布している。



(a) インゴット鑄造法による (b) 急凝固粉末押出し材の微細組織

図 7 Al-Si 系過共晶合金 Al-25Si の微細組織比較

4.2 マトリクスの合金系の選定

これまでに実用化された高 Si 含有型急凝固粉末アルミニウム合金の多くにおいては、強度と耐磨耗性の両立をねらい、基地組成として Cu を数 mass% 添加したものが用いられていた。しかし、こうした Cu 含有材料は、無添加の材料に比べ、高温での流動応力が大きく、固相線（溶融開始温度）が比較的低い。その結果、熱間押出し時の割れや表面欠陥を生じやすく、押出し速度を上げることができず、生産性の向上に対する大きな制約となっていた。図 8 に各種アルミニウム材料の押出し性を比較した例を示す¹¹⁾。我々は、押出し性に優れた 6000 系合金に着目し、Al-26Si-0.7Mg（数字は mass%）をベースに、ライナ材としての諸特性を調整していった。

その結果、24.5-27.5Si、0.11-0.30Cu、0.55-0.90Mg、0.03-0.26Cr の組成を決定した。この材料の標準的な物理的性質は、密度 $2.68g/cm^3$ 、RT-200°Cでの線膨張係数 $16.8 \times 10^{-6} / K$ 、熱伝導率 $142W/m \cdot K$ 、ヤング率 $84Gpa$ で、T6 状態での機械的性質は、降伏点 $377MPa$ 、引張り強さ $403MPa$ 、硬さ 78HRB である。量産工程における本材料の最大押出し速度は、毎分約 4 m であり、この値は、Cu 含有の 2000 系合金をベースにした同量 Si 含有合

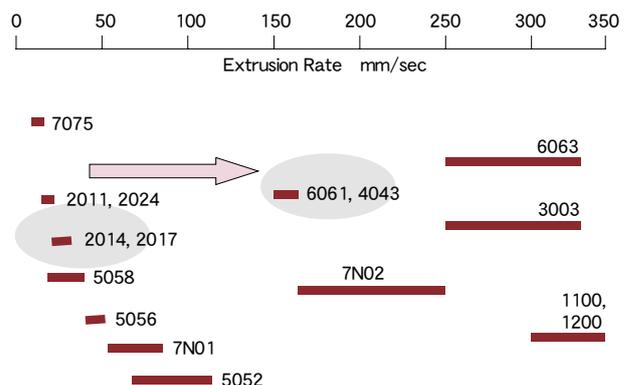


図 8 各種アルミニウム合金における最大押出し速度の比較¹¹⁾

金の値のおよそ6倍である。このような高い生産性は、基地材料の熱間での変形抵抗が低いことに加えて、溶融開始温度が、2000系合金より約50℃高いことによるものである。溶融開始温度が高いことは、より大きな押し出し速度でも表面のティアリング欠陥（微小クラック）が発生しにくいという利点がある。

5 量産化技術の開発経緯

図9にライナ材の製造プロセスの流れを示した。

- (1) 原料を溶解し、アトマイズ法にて粉末を作成
- (2) 粉末をゴム型に充填したのち、冷間静水圧プレス(CIP)にて予備成形体(プリフォーム)を作製
- (3) 減圧下で焼結し、ビレットとして保管・搬送
- (4) ビレットを誘導加熱にて所定温度まで熱し、熱間押し出し成形により中空円筒を得る
- (5) 所定長さに切断、必要に応じて熱処理を施し完成・出荷
- (6) 押し出し時に発生する端材は原料として溶解工程に使用

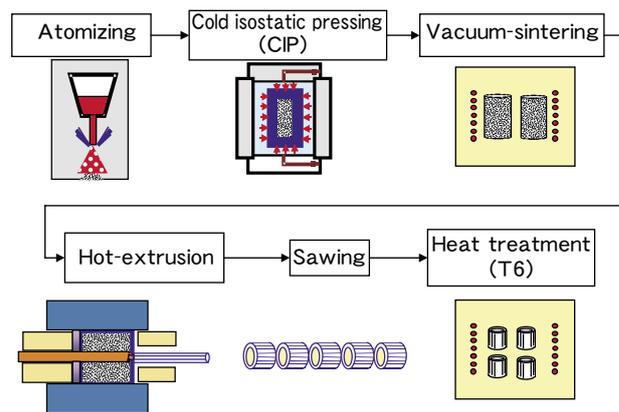


図9 ライナ材の製造プロセス

5.1 粉末およびプリフォーム材の製造

アトマイズプロセスとは、原料溶湯を圧縮空気とともに噴出させることにより、微細な噴霧液滴をつくり、飛行中に瞬時に凝固させて合金粉末を得る方法である。冷却速度は、液滴の直径が小さいほど大きい。図10に、噴霧粒径と冷却速度の関係を示す。直径50μmの粉末の場合、冷却速度はおよそ10⁴ K/sである。

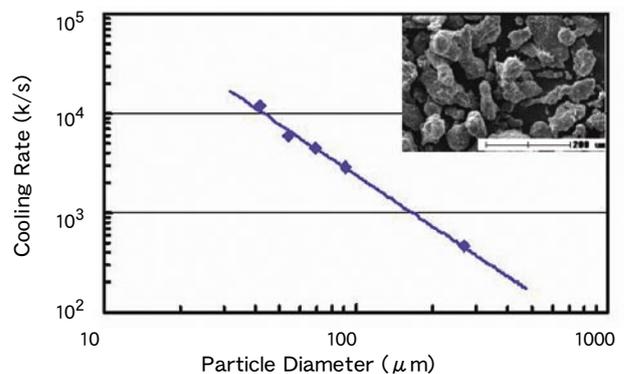


図10 アトマイズ粉の粒径と冷却速度の関係

5.2 押し出し用ビレットの製造

当初は、アトマイズ粉をゴム型に充填し、冷間静水圧プレス法にて固化成形したものを、そのまま押し出し機まで搬送し、熱間成形することを試みた。しかしながら、この方法では、搬送に耐えられる十分な強度が得られないだけでなく、ビレットの電気伝導度が小さいために、熱間押し出し前の加熱に誘導加熱法が使えないことがわかった。大型のビレットを通常の電気炉で加熱していたのでは、昇温に10-20時間を要し、量産工程で要求される生産性を確保することができない。このため、冷間静水圧プレス法によって製造したプリフォームをまとめて、減圧下で焼結する工程を入れることとした。

図 11 は、その焼結工程の加熱条件下での、微細組織ならびに空隙率の変化を示したものである。焼結温度を高くするに従い、空隙率は減少し、緻密化が早期に進行する傾向があるが、焼結温度 570°C の条件では、初晶 Si 粒の粗大化が始まってしまう。熱分析の結果から、この温度域では、液相が生じることが確認されており、それにより Si 原子の拡散が急激に促進されるためと考えられる。

5.3 押し出し材の硬度制御とリサイクル

上記の条件で焼結したピレットを熱間で押し出し、T6 の熱処理を施した。図 12 に各焼結条件における、“押し出しまま” および “熱処理後” の材料の硬度を示す。目標の硬度 60HRB は、“押し出しまま” では得られないが、焼結温度が 540°C 以上の材料では T6 処理を施すことにより要求を満たすことができた。500°C の焼結条件の材料で、T6 処理後も硬度が低かったのは、材料全体に発生したブリストア欠陥が原因である。ブリストア欠陥は、表面近傍に発生する気泡状（ふくれ）欠陥で、焼結温度が低く、脱ガスが不十分であったために、粉末表面に吸着した水分がアルミニウムと反応して水素ガスを発生させ、溶体化時に欠陥となって現れたものと推測される。

以上の結果から、初晶 Si 粒を粗大化させないためには、570°C より低い焼結温度である必要があり、ブリストアを発生させないためには 540°C 以上の焼結温度が望ましいことがわかった。実際の操業では、焼結条件として、560°C × 2 時間が採用されている。

量産工程では、この他に、粉末充填工程の自動化、CIP 処理時ならびに真空焼結時の搬送治具改良による処理個数向上、押し出しピレットの大型化による歩留まり向上など、さまざまな改善と合理化を施した結果、通常 quantity 押し出し材の製造工程とほぼ同等の生産性を実現することができた¹²⁾。

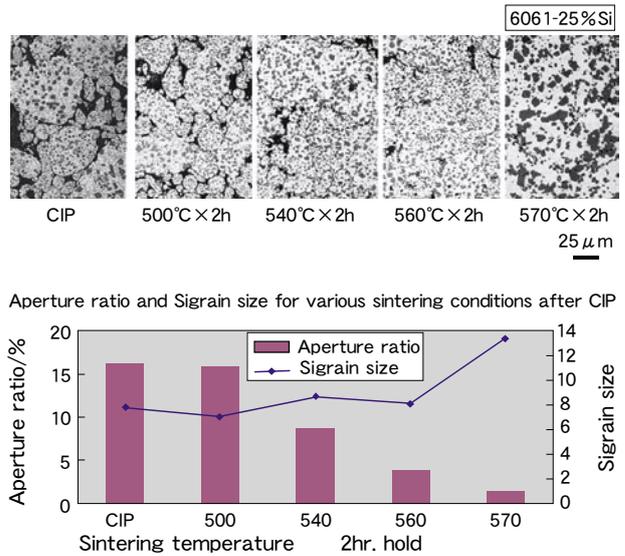


図 11 真空焼結条件と微細組織の変化

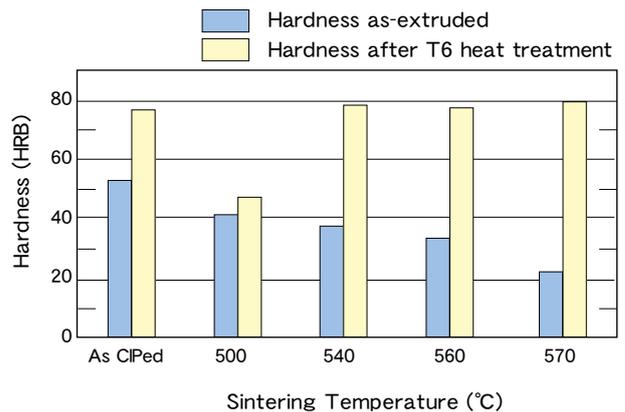


図 12 焼結条件と押し出し材の硬さ

6 ライナ材の効果

6.1 エンジン性能

開発された急凝固粉末アルミニウム合金押出し材をライナとして搭載した排気量1Lおよび1.3Lの直列4気筒エンジンでは、ライナとブロックの密着性が改善された結果、ボア加工精度のばらつきが低減し不良率の改善がなされた。さらに、運転中のボア変形が低減した結果、オイル消費量等においても改善が見られた。このボア変形の低減には、密着性の改善に加えて、ライナ剛性の向上（従来材に比べヤング率が9%高い）も寄与していると考えられる。また、ライナのみの置き換えにより、従来材との比重の差から、約6%の軽量化も図られている。

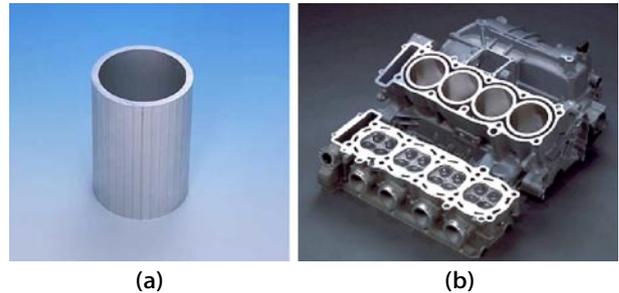


図13 急凝固粉末押出し材ライナ(a)と同材を用いたモータサイクル用エンジン(排気量1.3L)(b)

6.2 経済的効果

2000年10月より量産を開始し、現在ではライナ材として月産32,000個、大型モータサイクル用エンジン換算で約8,000台分の生産量に達している。重量にすると月約15トンとなり、わが国の急凝固粉末生産量のほぼ25%を占める。これまでなかなか実用化が進まなかった急凝固材料系新素材の用途にブレークスルーをもたらしたものと言える。

生産性向上の試みは今も継続されているが、新しい材料の立ち上がり時に通常発生しがちなトラブルや歩留まりの不足などは発生せず、量産開始から2年以上経った今も、安定した品質が保たれている。

本開発の成功により、急凝固粉末アルミニウム合金が、高い機能と価格競争力を持ちうることが実証され、実用材料として一層の適用拡大が可能となったと自負している。



図14 急凝固粉末押出し材ライナを搭載した製品例

7 まとめ

製造過程における課題の解決策として、鋳造シミュレーションを実施し、その結果に基づき、量産に適した新しい急凝固粉末アルミニウム合金を開発した。

開発された合金によるライナ材を量産するため、冷間静水圧プレス工程とそれに続く真空焼結工程を導入し、缶を使わない、急速加熱・押出し工程を確立できた。この生産ラインは、端材をリサイクルすることで廃棄物をほとんど出さない、ゼロエミッションの高効率プロセスであり、従来の押出し材と同等の生産性と品質を達成している。

本ライナを採用した大型モータサイクルエンジンでは、加工精度ばらつきが低減し、運転中のひずみを改善することができ、高い性能と信頼性を実現することができた。

8 おわりに

本開発に従事された関係者各位に感謝いたします。また、鋳造プロセスの解析に多大なご尽力をいただいた日本軽金属(株)グループ技術センターの長海博文、堀川宏両氏に謝意を表します。

■参考文献

- 1) S. Adachi, J. Inami and J. Kusui: Small Engine Technology Conference, SAE, No. 2001-01-2040 (2001)
- 2) W. H. Hunt, Jr.: SAE Technical Paper No. 2000-01-0333 (2000)
- 3) E. Koya et al.: SAE Paper No. 940847 (1994)
- 4) P. Stocker, F. Rueckert and K. Hummert: MTZ Motorentechnische Zeitschrift, 58, (1997), 9
- 5) 安達修平, 長海博文: 軽金属学会第 102 回春期大会講演概要, (2002), 133
- 6) 長海博文, 竹田好宏, 鈴木聡, 堀川宏, 安達修平: 軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要, (2002), 241
- 7) 楠井潤, 岡庭茂, 井上厚, 安達修平: 軽金属学会第 102 回春期大会講演概要, (2002), 129
- 8) 楠井潤, 岡庭茂, 井上厚, 石井秀樹, 安達修平: 軽金属学会第 102 回春期大会講演概要, (2002), 131
- 9) J. Kusui, S. Okaniwa, A. Inoue, S. Adachi: Small Engine Technology Conference, SAE, No. 2002-32-1808 (2002)
- 10) Catalogue of powder metallurgical products, PEAK Werkstoff GmbH, rev. 02/00
- 11) 時沢貢: 日本金属学会会報, 21 (1982), 11
- 12) 安達修平, 井上厚, 岡庭茂, 楠井潤: 軽金属, 53, (2003), 2

■著者



安達 修平