

高性能アルミニウム材料

High Performance Aluminum Materials

椎 名 治 男* 村 檉 良 一* 星 雅 己*
Haruo Shiina Ryoichi Murakashi Masami Hoshi
有 村 光 典* 北 条 信 明*
Mitsunori Arimura Nobuaki Houjo

要 旨

急冷凝固粉末法を用いた合金開発により、高温強度、ヤング率、耐摩耗性に優れる合金を開発した。合金系はアルミハイシリコン系を基本としFe、Mnの添加によって高温強度を従来の二倍に引き上げた。また、セラミックスとの複合化によりスチールを相手材にした耐摩耗性の優れた材料にすることができた。

本論文では、高温強度、ヤング率、耐摩耗性を大幅に向上させたアルミニウム合金の開発について、材料の強化機構、合金設計の方向性、製造プロセス、他材料に対する位置付けの観点から述べると共にスプリングリテーナ（以下リテーナと称す）、コネクティングロッド（以下コンロッドと称す）への応用技術を紹介する。

ABSTRACT

A high-temperature rigid, high-Young's modulus and high-wear resistant alloy was developed by the use of rapid solidification powder metallurgy process. This alloy is basically an aluminum high-silicon group that is twice as rigid under high temperature as its equivalent with Fe and Mn added. Combined with ceramics, it also offered high rigidity when coupled with steel plate.

This paper introduces its reinforcing mechanism, alloy design approach, and manufacturing process. It also includes a comparison with other materials. Its application is described for a spring retainer and connecting rod.

1. ま え が き

エンジンの軽量、小型化の要望は強く、また、メカニカルフリクション低減に対して材料技術への期待も大きい。従来、軽量材料としてのアルミニウムは、高温強度、剛性が低く、スチール部品に取って代わるには限られたエンジンスペースの中では困難であった。この問題点を解決する手法として複合材料(FRM)が研究され、当社でもコンロッドに適用した経験がある。⁽¹⁾ 一方合金化による全体強化を狙った材料として従来の溶製法(Ingot Metallurgy法 以下I/M法と称す)で

は大量添加ができなかった合金元素を均一微細に添加できる急冷凝固粉末法(Rapid Solidification Powder Metallurgy法 以下P/M法と称す)を採用したAℓP/M材料が強度部材として注目されている。

2. Aℓ P/M材料の考え方

2.1. 材料の強化機構と合金設計の方向性

(1) 強化機構

一般に、アルミニウム材料の合金化による強化機構には、

* 和光研究所

- 1) 固溶強化
- 2) 析出強化
- 3) 分散強化

がある。実用合金では2)を主として利用しているが、150℃以上での高温強度に着目した場合、1)では結晶粒が粗大化することにより、2)では添加元素が粗大に析出することにより、その強化効果が小さくなり、エンジン部品用材料としての応用は困難である。また、3)では高温安定な金属間化合物を析出する元素の添加がむずかしく利用できなかった。今回、3)の手法での効果を積極的に利用できるようI/M法では多量に添加できなかった元素をP/M法を用いて添加し、高温強度を向上させた合金を開発した。次にその詳細について述べる。

(2) 合金設計の考え方

- 高温強度をあげる考え方としては、
 - ① 高温強度の高い材料との複合化→FRM化
 - ② 均一材料での合金設計では、
 - a) Al中での固溶度が小さく
 - b) Al中での拡散速度が遅い合金元素を添加すること

の二点があげられる。

分散強化させる元素としては高温安定な金属組

織を作ることが大切である。すなわち高温の Al 基地中で安定な拡散が生じにくい相を析出させること、また、Al 基地への固溶度が小さく添加量の増加にしたがって Al 基地中に析出する量が増えることが重要である。図 1⁽²⁾ から Fe、Co、

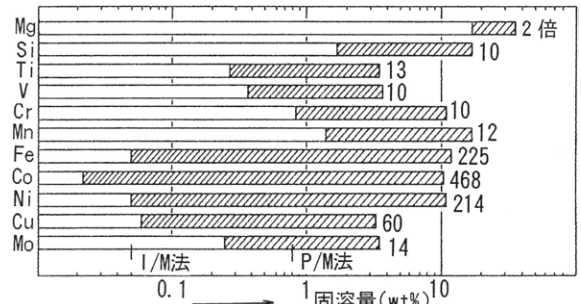


図1 急冷凝固によるAl中への固溶限度化

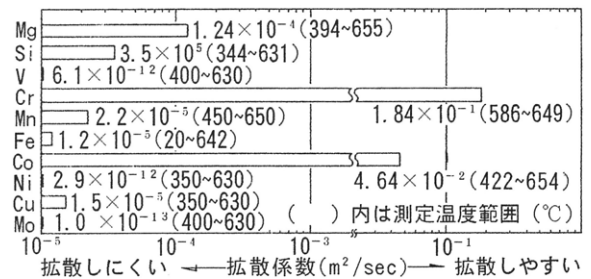


図2 Aℓ中の拡散係数

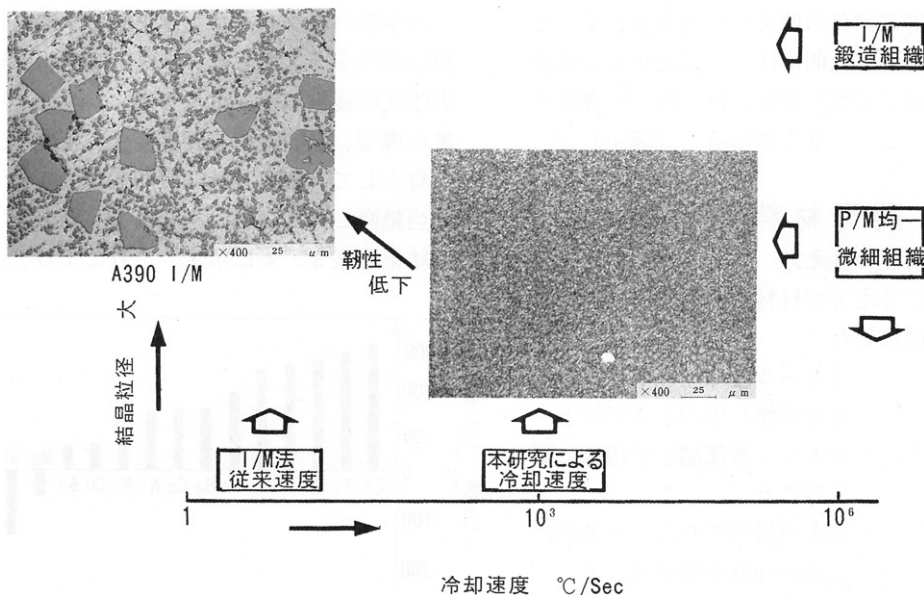


図3 冷却速度による組織の変化

Ni 等が I/M 法での固溶量が少なく急冷凝固法での固溶量が多い性質を持つことがわかる。これらは急冷凝固により粉末中に固溶し、加熱工程で均一に析出する。図2⁽³⁾から Fe、Ni、Mo、V 等が拡散しにくい元素である事がわかる。こうした考え方から、Fe、Ni 等が合金元素として有効であると考えられる。これらの元素を添加する方法として、通常の I/M 法、例えば重力鋳造法 (GDC)、ダイキャスト法 (DC) 等の製法では溶湯からの冷却速度が遅いため合金元素による金属間化合物が粗大に析出し材料の靱性が低下する。(図3) アトマイズ法で凝固させ冷却速度を大きくすると、析出物が微細化し、合金元素を大量に添加しても靱性の低下が少なく高温強度に優れた合金にすることができる。アトマイズ法で得られる粉末を構造体にするには、従来の圧粉焼結法では十分な強度が得られないため、熱間押出しによる緻密化手法を用いる。

高温強度と同じく剛性 (ヤング率) についてもアルミニウム合金はスチールに比べて低いことが材料としての課題になっている。(表1)

- ・ 剛性向上の考え方には、高温強度をあげる手法と同様に以下の二点があげられる。

- ① 剛性の高い材料との複合化→FRM 化
- ② 均一合金では剛性そのものが純金属、金属間化合物の物質固有の値であり合金としてはその組成比により複合則に従って変化するので剛性の高い合金元素例えば Cr、Ti、Mn、V 等を大量に添加することが基本になる。(図4)⁽⁴⁾

3. 開発材料の特性

3.1. 材料特性の考え方

2.1 に述べた考え方で材料を開発するにあたり次の項目を目標にした。

- 熱膨張 : スチール製部品との組み合わせを考慮し極力小さいこと
- 耐摩耗性 : スチール製部品との摺動に耐えること
- 疲労強度 : 従来の耐熱アルミニウム材の二倍の強度を有すること
- 加工性 : 鍛造、機械加工が可能なこと
- 応力腐食割れ : 実用上問題ないこと

表 1 一般材料特性比較

材 料 名	7075T6 超7 アルミ	2014T6 2014 アルミ	HS176 ≒AC2B 超7 アルミ	S35VC 中炭素 鋼	FCM45 球状黒 鉛鉄	FC25 ねずみ 鉄
素 形 製 法	鍛造	鍛造	鍛造	鍛造	鍛造	鍛造
引張強度	σ_B (kgf/mm ²)	58	49	18	70	45
	$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	51	42	16	45	29
	δ (%)	11	13	0.6	17	13
疲労強度(kgf/mm ²)	16	12.5	6.0	34.5	23.0	9.8
ヤング率(kgf/mm ²)	7300	7500	7300	21000	15500	11000
線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 20~100 $^{\circ}\text{C}$)	23.6	23.0	23.3	11.0	11.4	11.4
密度(gr/cm ³)	2.8	2.8	2.7	7.8	7.3	7.2

表 2 スクリーニング材、比較材成分

(重量%)							
	材料	Si	Cu	Mg	Fe	その他	備 考
P/M	I	15	4.5	1.0	<0.5	—	ハイシリコン系
	II	15	4.5	1.0	2.0	—	I + 2Fe
	III	15	4.5	1.0	4.0	—	I + 4Fe
	IV	15	2.5	1.0	8.0	—	I + 8Fe
	V	<0.5	—	—	8.0	3.4Ce	Al-8Fe系
	VI	<0.5	—	—	8.0	2.0Co	↑
比較材	DWA	0.6	0.3	1.0	<0.7	20SiC	P/M複合材
	AC8H	11	3.0	1.0	<0.4	—	≒AC8C

3.2. 供 試 材

合金系のスクリーニングとして、表2 に示す材料の特性をテストした。テスト項目は、引張強度、引張圧縮疲労強度、ヤング率、シャルピー衝撃値、熱伝導率、熱膨張率、硬度変化、密度とした。比較材として、DWA 社 6061/20SiC、AC8H (AC8C 相当量産ピストン材) をテストした。

結果を表3、4 に示す。これにより、Al-8Fe

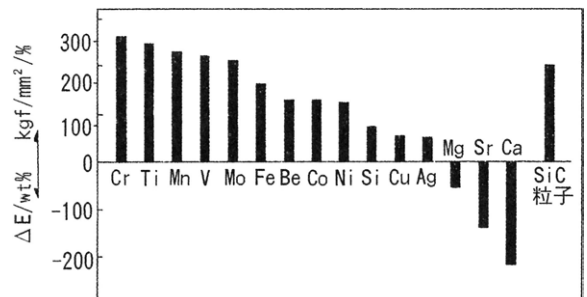


図 4 添加元素のヤング率への影響

表3 スクリーニング材特性

材料	Temp	引張強度			疲労強度	ヤング率 E	シャルピー 衝撃値	熱膨張係数	
		σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ				Temp	
	℃	kg/mm ²	kg/mm ²	%	kg/mm ²	kg/mm ²	kg・m/cm ²	℃	10 ⁻⁶ /℃
I	RT	45.0	43.0	6.0	15.8	8600	2.7	20	18.4
	200	25.0	18.2	13.3	12.0	7820	—	-100	19.4
II	RT	47.6	35.5	—	17.0	9174	1.4	20	19.0
	200	27.3	21.2	11.7	13.0	8370	—	-100	20.0
III	RT	44.2	37.7	0.9	17.0	9140	0.7	20	16.9
	200	26.7	18.8	6.3	12.5	8760	—	-100	17.9
IV	RT	47.0	46.0	0.5	19.0	9300	0.6	20	16.1
	200	37.4	24.8	2.7	14.0	8530	—	-100	17.3
V	RT	36.8	25.1	11.7	11.8	8620	5.5	20	22.8
	200	24.6	19.5	14.0	10.5	7870	—	-100	23.5
VI	RT	36.7	23.7	10.7	11.5	8830	4.3	20	20.5
	200	25.9	21.3	9.7	10.2	8100	—	-100	21.4

系では、熱膨張係数が従来材なみであること、DWA6061 基複合材は 200℃ の強度が目標に対して不足していることが明らかになった。また、Al-15Si 系では Fe の添加量増加と共に疲労強度とヤング率の向上の傾向が見られる。

これらのスクリーニングの結果をもとにコンロッド、リテーナ用の材料を開発した。

3.3. コンロッド用材料

合金元素としては、高温強度、ヤング率向上に共に有効と考えられる Fe、Ni のうち、コストの安

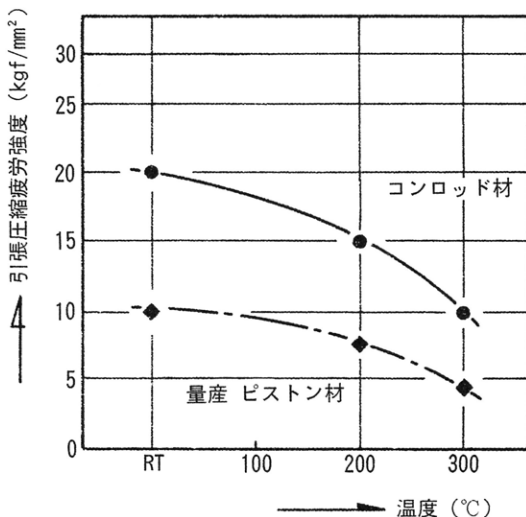


図5 コンロッド材疲労強度

表4 比較材特性

材料	Temp	引張強度			疲労強度	ヤング率 E	シャルピー 衝撃値	熱膨張係数	
		σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ				Temp	
	℃	kg/mm ²	kg/mm ²	%	kg/mm ²	kg/mm ²	kg・m/cm ²	℃	10 ⁻⁶ /℃
DWA	RT	51.2	42.0	5.0	22.8	11400	2.5	20	16.3
	200	23.5	18.9	11.7	11.5	11000	—	-100	17.1
AC8H	RT	32.0	29.0	0.8	8.0	7200	0.1	20	19.2
	200	23.0	20.0	1.4	—	—	—	-100	20.4

表5 コンロッド材成分

	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Al
重量 %	17.0 ~ 18.0	2.0 ~ 2.5	0.3 ~ 0.5	4.0 ~ 4.5	1.8 ~ 2.2	残

い Fe を選んだ。また、Fe の添加量増加により低下する応力腐食割れ性を改善するために Mn を同時に添加した。Si は、熱膨張低減を狙って添加した。成分を表5 に示す。疲労強度は図5 に示すように各温度で従来材の二倍になった。ヤング率、熱膨張係数共にそれぞれ 7200 → 9200Kgf/mm²、19.2 → 17.8 × 10⁻⁶/℃ と従来材に比べ優れている。組織写真を図6 に示す。

3.4. リテーナ用材料

コンロッド用材料を基本に摺動特性を最適化するため硬質粒子を添加した。

3.4.1 添加材仕様の選定

添加材は、研磨材として使われている Al₂O₃、ZrO₂、SiO₂ 系のセラミックス粉末に着目し、粒径と添加量の最適化を行った。最適化は、a) リテーナ座面摩耗量、b) スプリング端面摩耗量をそれぞれ量産のスチールリテーナの実力値に近づけ

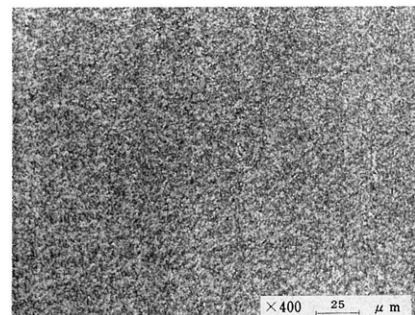


図6 コンロッド材 (× 400)

る事を目標とした。引張強度、疲労強度、シャルピー衝撃値についても、基材に対し低下しないことを目標にした。添加材の組成を表6に示す。最適化のまとめを図7に、引張特性を図8、疲労特

表6 リテーナ材成分

	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	SiO ₂
添加材	47	30	20

	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Zr	Na	Ca	その他	Al
押出材	14.2 ~ 14.9	2.00 ~ 2.50	0.30 ~ 0.50	4.36 ~ 4.66	1.90 ~ 2.30	0.06 以下	0.60 ~ 0.70	30ppm 以下	150ppm 以下	各0.05 以下	残

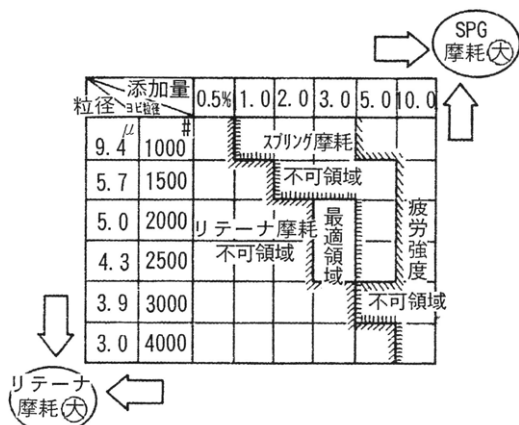


図7 添加量最適化

性を図9、シャルピー衝撃値を図10、テストピース図11による摺動特性を図12、13に示す。これらの結果摩耗に関しては添加材粒径が小さく添加量が少なくなるとアルミ材の摩耗量が大きくなり、粒径を大きく添加量を増やすとスプリング材の摩耗量が大きくなること。また、疲労強度は添加量が少ないほうが高いことが明らかになった。最終的な材料仕様を表6に、組織写真を図14に示す。

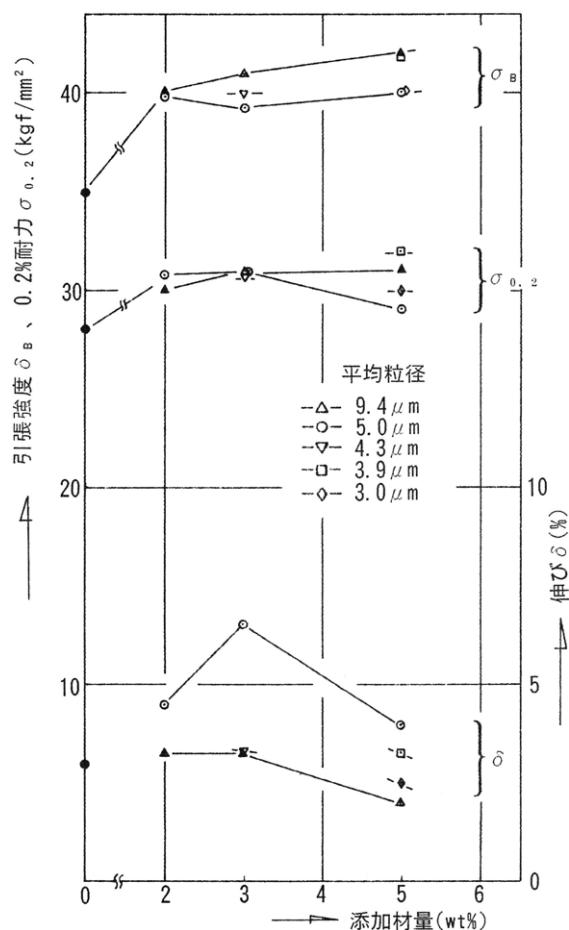


図8 引張特性

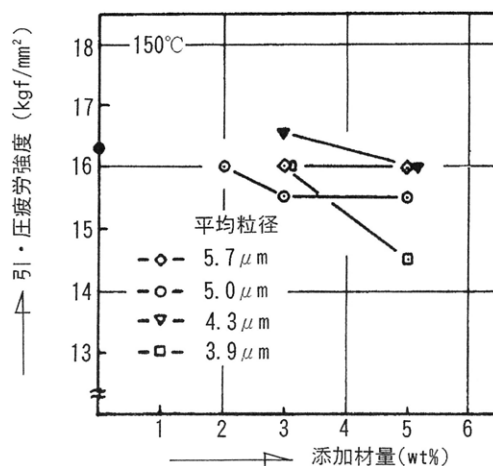


図9 引張圧縮疲労強度

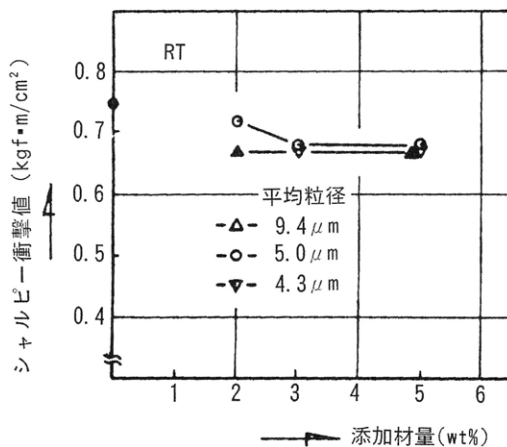


図10 シャルピー衝撃値

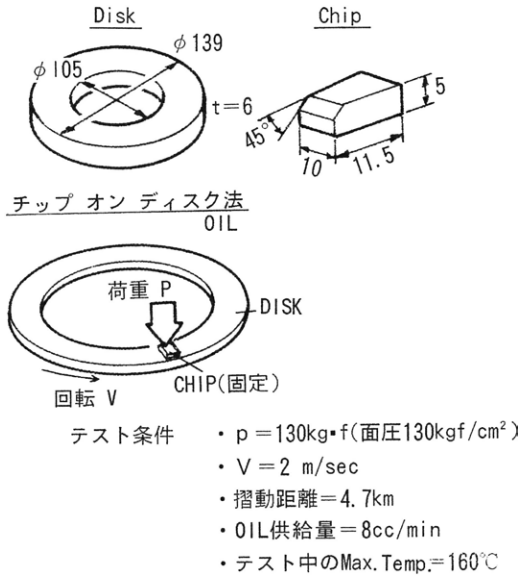


図 11 摺動テスト方法

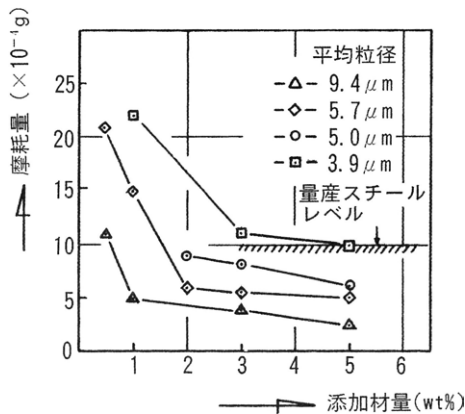


図 12 リテーナ材摩耗

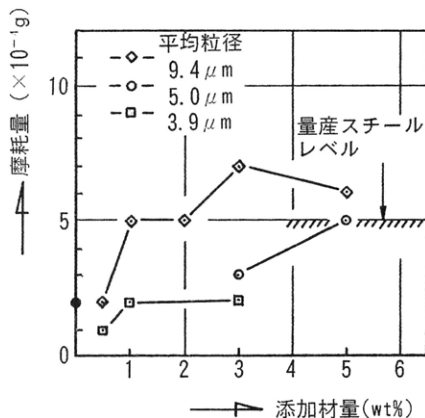


図 13 スプリング材摩耗

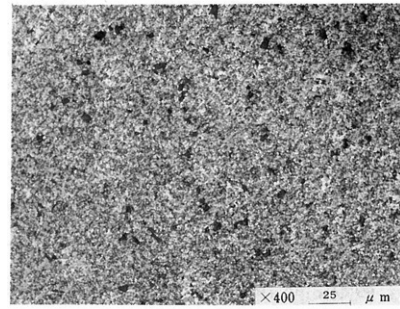


図 14 リテーナ材 (× 400)

3.5. エンジンテスト

以上のテストピースによる強度、摺動特性テスト結果から、Aℓ P/M 材料の強度特性及び摺動特性をコンロッド、リテーナ用に設定することができた。そこでエンジンテスト用の品物を製作しテストを行った。図15にAℓ P/Mコンロッドを図16にAℓ P/Mリテーナを示す。

3.5.1. 耐久性

Aℓ P/M 材コンロッド、リテーナの耐久性としコンロッドでは主としてクラックの発生の有無、リテーナではリテーナ座面摩耗、スプリング端面摩耗について調べた。

(1) コンロッドではベンチ耐久、実走耐久共に問題がなかった。

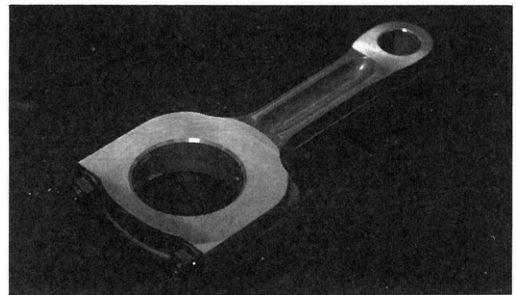


図 15 コンロッド

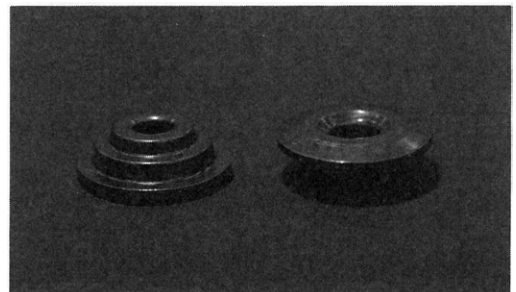


図 16 リテーナ

(2) リテーナの摩耗、及び、スプリングの摩耗は量産スチールリテーナと同等であることが確認された。

3.5.2. エンジン回転数

二部品共アルミニウム材料による軽量化の結果として、エンジン回転数を高くすることが可能となる。その効果は、コンロッド、リテーナ共に約500rpmであり、アルミニウム急凝固固材料が高回転化に適した材料技術であることが確認できた。

4. Al P/M 材料の製造技術

4.1. 工程の特徴

アルミニウム急凝固固粉末材料の製造工程とし

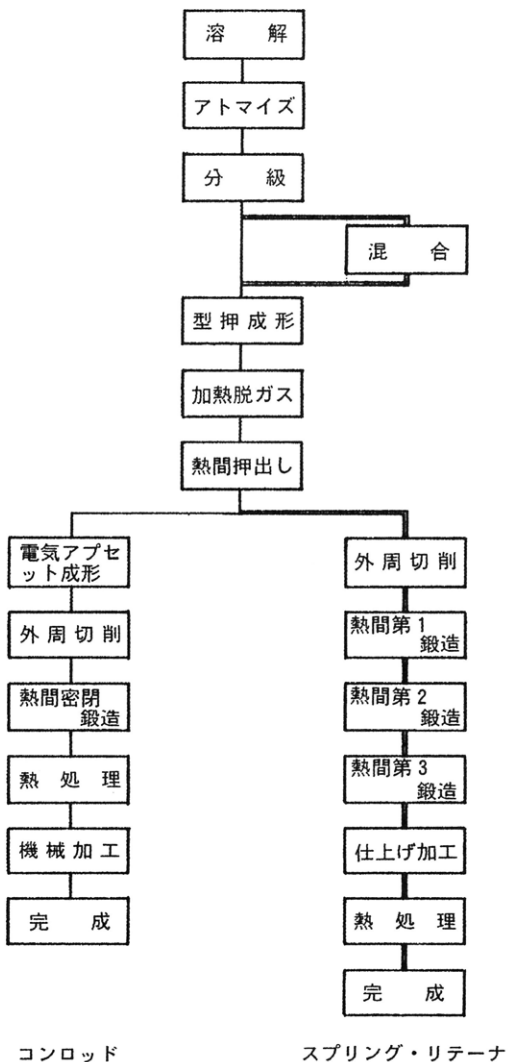


図 17 製造行程

ては種々の方法が提案されている。⁽⁵⁾ 今回採用した工程の基本を図17に示し各工程の技術項目について述べる。

4.2. 粉末製造、固化方法、脱ガス方法

アルミニウム粉末を原材料として構造部材に適用する場合に問題になるのは、アルミニウム粉末表面の酸化膜に起因する H_2 ガス含有量である。アルミニウム溶製材は一般に $0.1 \sim 10cc/100g$ である。含有量を少なくするには、Ar ガスアトマイズ、真空脱ガス等の工程を用いることになるが、本開発ではコスト、量産性と疲労強度への影響が少ない許容ガス量限界を考慮し、エアーアトマイズ、型押し圧粉、 N_2 ガス置換えによる脱ガスの組合せで、 $3cc/100g$ 以下の H_2 ガス量になるように設定した。

4.3. 塑性加工法

本開発合金は、高温強度向上を狙った成分設定のため全温度領域に於いて塑性加工性が劣っている。この成形能力の小さいアルミニウム材料を高精度で成形する方法として、

- 1) 電気アプセットプリフォーム成形法
- 2) 密閉熱間鍛造法

を開発した。

コンロッドへの応用に1)、2)を、リテーナへの応用に2)を適用した。

4.3.1. 電気アプセット法

この方法は、エンジンバルブの成形に量産で用いられている。基本は棒状素材を通電加熱により局部的に昇温し材料の変形抵抗を下げ、同時に圧力をあげることで次々と変形部位を移動させながら連続成形を行うものであり、難成形材料を座屈させないで大変形させることが可能な製法である。

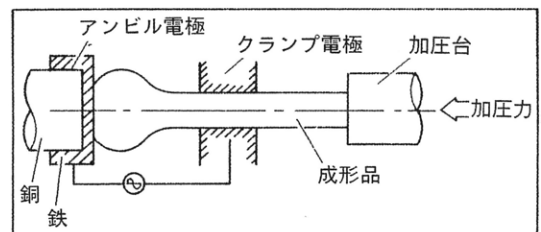


図 18 電気アプセッター概略図

スチールの加工に比べ、アルミニウム合金は次の特性からこれまで実用化した例はなかった。

- 1) 電気抵抗が少なく発熱しにくい
- 2) 熱伝導率が大きく冷え易い

これらのアルミニウム材料特有の性質による成形性の悪さに対し、電極を従来の銅製から銅と鉄のハイブリッド型式にすることで安定した成形を可能にした。これは鉄電極が発熱すること、鉄電極の熱伝導が銅電極より小さくアルミニウム材の温度を保持できることによるものである。構成を図18に示す。

4.3.2. 密閉熱間鍛造法

熱間においても材料の成形性が悪く、バリ出し鍛造ではトリミング時の割れ発生があること、製品としてパーティングライン段差での応力集中を避けたいこと、更に、寸法精度、重量管理に優れること等の理由により密閉鍛造法を採用した。

密閉化の要点は、プリフォーム形状設定、金型方案、鍛造加熱温度・金型温度管理である。コンロッドでは、鍛造加熱温度 460～500℃、金型温度 150～250℃、リテーナでは同じく 460～500℃、80～120℃を選んだ。

リテーナ鍛造の問題点はコンロッド鍛造に比べ、製品としてほぼ全面を鍛造黒皮状態で使用し、その寸法精度が非常にきびしいことと鍛造品形状が小さく冷え易いために、鍛造温度を精密にコントロールすることが困難であることである。スチール冷間鍛造品と同等の精度を保証する為に、図19に示す三工程鍛造とし最終成形を密閉とした。本材料はデンドライトの無い微細組織であり、熱による組織変化から生じる寸法変化が少ないことと、高温強度が高く加熱中の変形が少ないことが特徴であり、高精度金型による精密密閉鍛造が可能になった。

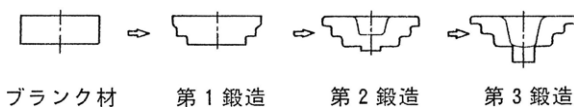


図19 リテーナ成形方案

4.4. 機械加工法

リテーナは鍛造後の加工が少ないので、コンロッド用材料について機械加工性を検定した。本材料の成分はハイシリコン系であるが、初晶 Si 粒径が約 10 μm 以下の微細組織であるので切削抵抗、穴径変化、面粗度変化の問題はなく、従来のアルミニウム合金と同等の被削性を持つこと、また、切粉処理性が良く高送りが可能であることが確認できた。刃具摩耗については超硬材種で問題ないことが確認できた。

4.5. 非破壊検査

A ℓ P/M 材料の製造工程は従来材料に比較すると複雑であり、内部品質により特性が左右されることから、実際に使用するときには非破壊検査が必要になる。特に粉末を扱う工程での介在物の混入が考えられるため、製造現場での系外、系内異物の混入防止の徹底と、押し出し丸棒での超音波探傷法による検査が必要である。今回は 200 μm をこえる場合を不合格にした。

5. まとめ

急冷凝固法により可能となった合金設計を用いて高剛性耐熱アルミニウム材料を開発した。この結果、従来の状態図を用いた材料開発から一歩進んで要求する特性を得るために合金元素をかなり自由に選択できる新しい手法が得られた。又、難加工性アルミニウム材料を歩留りよく高精度に成形する技術を開発した。

謝 辞

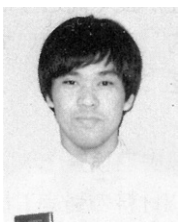
終わりに本研究で素材の研究に携わって下さいました昭和電工(株)平野忠男主席研究員をはじめ関係者の方々、ホンダエンジニアリング(株)の方々に深く感謝します。

参考文献

- (1) 林直義、伴恵介、“繊維強化アルミコンロッドの開発”、日本金属学会会報、25 1986 P565
- (2) 堀茂徳、“アルミニウム合金の急冷凝固と特性”、軽金属学会第 22 回シンポジウム、1983 P20

- (3) 金属学会、“金属データブック”、1984 P24
- (4) 堀茂徳、“高弾性アルミニウム合金”、軽金属
学会第 21 回シンポジウム、1982 P5
- (5) 洪江和久、“急冷凝固アルミニウム合金”、
軽金属、1989 Vol.39 No.11 P850

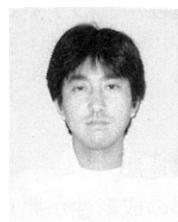
■著 者■



椎 名 治 男



村 檉 良 一



星 雅 己



有 村 光 典



北 条 信 明