

# 内燃機関用アルミニウム合金ピストン

川崎重工業㈱技術研究所\* 清 重 正 典

## 1. まえがき

内燃機関用ピストンにアルミニウム合金が使用されはじめておよそ45年になる。この間に、よく知られたY合金(4%Cu, 2%Ni, 1.5%Mg, 残りAl)やRR合金(1.9%Cu, 0.8%, 1.3%Si, 1.0%Fe, 1.1%Mg, 残りAl), 更にLo-Ex合金(12%Si, 1%Cu, 1%Ni, 1%Mg)などが実用化され、次いで、KS 280合金(Si 22%)で代表される過共晶アルミニウム-珪素合金が出現し、一部の小型の自動車用ピストンに使用されるようになって、その大型化が試みられようとしてくる。

このような使用材料の歴史的変遷は、非常に多くの技術的問題を包含しつつ、内燃機関の発展と歩調を合わせて来たわけであるが、最近に至ってその材料変換のテンポが遅くなった感がある。これは高過給、高出力化の要請がピストンに対する機械的および熱的負荷の程度を高めた結果、ピストン材の高温強度の大きいことが特に要求されるようになったことも一因と考えられる。

従来、ピストンクラウンの温度が高々200°C迄であった頃には、ピストン材料の評価は主として硬さによってなされていたが、温度が250°C~300°Cに達するとともに高温における硬さ、引張強さのみならず、疲れ強さ、クリープ強さ、熱衝撃および熱疲労に対する抵抗などが考慮されなければならなくなってきている。

他方、機関の性能面から、シリンダーライナーとピストン胴との間の遊隙を無負荷或は高負荷時に限らず小さくするために熱膨張係数の小さいピストン材が要求されたが、従来のY合金やRR合金はおよそ $24 \times 10^{-6} \text{mm/mm}^\circ\text{C}$ の熱膨張係数を有し、鋳鉄シリンダーとの膨張差が大きいので、高温強度では前二者にやや劣るが熱膨張係数の小さい( $20 \times 10^{-6} \text{mm/mm}^\circ\text{C}$ 以下)Al-Si系合金がこの要求によって採用されているのである。

かように、ピストン材料に対する要求は特に性能面からの要求が強く、高温強度面の研究が遅れているといえる。筆者らは数年前この点に着目し、Lo-Ex系合金における熱処理と高温強度の関連を調べ、250~300°Cの間で

この合金の高温疲労強度が著しく低下することを明らかにした。<sup>1)</sup> また実機のピストンについて運転後の硬さを測定し、運転使用間に硬さが著しく低下することを指摘している。<sup>2)</sup>

以下、材料使用者の立場から内燃機関用のアルミニウム合金ピストンについて、主として使用上の問題点について述べてみたい。

## 2. ピストン用アルミニウム合金の種類と特徴

Y合金およびRR合金はその優れた高温強度のために第二次大戦中は軍用機のピストンとして多用されたが、最近の高速4サイクルディーゼル機関においては殆んど使用されていない。その理由は既に述べたように、熱膨張係数が大なのでピストン径が大きくなると、無負荷或は軽負荷時の遊隙が大きくなってピストンの首振り運動が起りやすいこと、耐磨性が悪く焼付を起しやすきことなどの欠点があるためである。それに代るものとしてLo-Ex系のAl-Si合金が多く用いられている。

Al-Si系合金はその組成によって次の3グループに分けられる。

- (1) 共晶 Al-Si 合金 (Si12%)
- (2) 過共晶-Al-Si 合金 (Si18%)
- (3) 特に高 Si の過共晶 Al-Si 合金 (Si25%)

表1はこれらの合金の主要組成、用途、特性、製造法、物理的および機械的性質の一例<sup>3)</sup>を示したもので、比較のためにY合金および鋳鉄に関するデータも付記してある。

Al-Si系における二元共晶は11.7% Si, 577°Cで起こり、1.65%の固溶Siを含む連続したマトリックス内にSi晶が粗目の板状もしくは針状に晶出する。このような組織では常温および高温における機械的性質がよくないのでSi晶の微細化が行なわれる。これはチル製造法によるか、或はNaなどの少量添加によって得られる。また共晶Al-Si合金にはSiのほかにCu, Ni, Mgが添加されているが、CuおよびNiは高温における軟化防止、Mgは熱処理による時効性賦与のためである。従ってこの合金は時効硬化性を有するので、溶体化処理と時効が行なわれる。この合金に適用される熱処理としては、T

\* 神戸市生田区東川崎町2丁目14番地

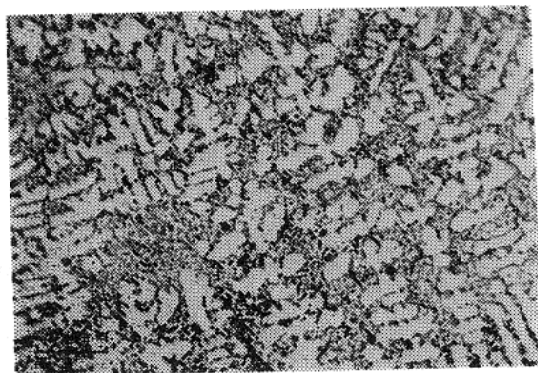
表1 Al-Si系ピストン材料<sup>1)</sup>

合金の種類	Al-Si12Cu-Ni (共晶)	Al-Si18-Cu-Ni (過共晶)	Al-Si25-Cu-Ni (過共晶)	Al-Cu-Ni	鋳鉄			
基質	アルミニウム	アルミニウム	アルミニウム	アルミニウム	鉄			
主添加元素	12%Si	18%Si	25%Si	4%Cu	3.2%C			
副添加元素	1%Cu 1%Ni 1%Mg	1%Cu 1%Ni 1%Mg 少量のCr, Mn, Co	1%Cu 1%Ni 1%Mg 少量のCr, Mn, Co	2%Ni 1.5Mg	2.3%Si 0.7%Mn 特殊目的に対し 少量のNi, Cr, Mo			
用途	内燃機関用ピストンに有用な標準合金	2ストロークの空冷機関ピストン部品用特殊合金	ディーゼル機関用高温強度の高い合金	2ストロークディーゼル機関の油冷時など熱的に適度な強度のピストン材				
特性	熱膨張小 機械的強度大 耐摩耗性大 走行性良 熱伝導度大 軽量	熱膨張小 走行性良 軽量	熱膨張Al合金中最小 走行性最良 高温硬さ大 軽量	高温強度最大 熱伝導性最大	熱膨張小 耐摩耗性最大 熱伝導度小 重い			
製造法 (1)	金型鑄造 人工時効	鍛造 人工時効	金型鑄造 人工時効	鍛造 人工時効	金型鑄造 人工時効	鍛造 人工時効	砂型鑄造	
比重 g/cm <sup>3</sup>	2.70	2.70	2.68	2.68	2.65	2.80	2.80	7.3
熱伝導度 cal/cm <sup>2</sup> sec°C	0.32	0.34	0.28	0.30	0.25	0.34	0.36	0.12
熱膨張 (20~200°C) cm/cm°C × 10 <sup>-6</sup>	20.5	20.5	18.5	18.5	16.5	23.5	23.5	11
比摩耗値 (2)	1.0	1.0	0.9	0.9	0.7	1.1	1.1	0.4
ブリネル硬さ 20°C	105	110	105	115	105	110	125	200
kg/mm <sup>2</sup> 200°C(3)	95	95	95	95	95	100	100	200
300°C(3)	35	32	37	33	40	32	30	170
引張強さ 20°C	23	36	20	28	18	25	37	22
kg/mm <sup>2</sup> 300°C(3)	12	14	10	13	10	11	16	20
破断伸び 20°C	1	3	0.5	2	0.5	0.7	7	0.1
% 300°C(3)	5	8	1	5	1	6	14	0.1
疲労強度 20°C	8.5	13.5	8	10	8	7	12	9.5
kg/mm <sup>2</sup> 300°C(3)	5	9.5	5	9	5	4.5	10	8.5
弾性係数 kg/mm <sup>2</sup>	8000	8000	8500	8500	9100	7900	7900	10500
JIS	AC8A AC8B	A4F5	—	—	—	AC5A	A4F2	—
Alcoa	A132 D132	4032	—	—	—	142	2218	—
Mahle	—	124	—	138	—	—	Y	—
Karlschmidt	—	1275	—	283	—	—	—	—
Nüral	—	3210	—	1761	—	—	—	—

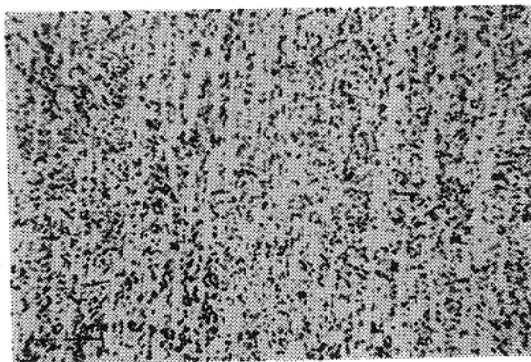
(1) 鍛造ピストンは鑄造ピストンより堅固弾靱であるので、高能率ディーゼルおよび特殊な機関に使用される。

(2) Al-Si12-Cu-Ni (共晶) を1として比較値で示した。

(3) 短時間試験



铸造ピストン



鍛造ピストン

図1 共晶 Al-Si 合金の組織

5 処理（铸造のままから人工時効）、T6 処理（溶体化処理後人工時効）および T7 処理（溶体化処理後安定化）の 3 通りがある。ピストン体の製造法としては金型铸造法とプレス鍛造法がある。後者の方が信頼性の高いピストンが得られるが製造コストが高くなる。図 1 は铸造ピストンおよび鍛造ピストン実体より採取した顕微鏡組織写真を示す。

過共晶 Al-Si 合金は、通常の溶解法では初晶 Si が大きく発達するとともに偏析を生ずるので実用にはなりにくい。しかし、P などの微細化剤を用いると初晶 Si の大きさは 0.02mm 以下となる。しかし铸造の場合、引張強さは高々 20kg/mm<sup>2</sup> 程度である。これを鍛造すると Al-18%Si 合金で約 30kg/mm<sup>2</sup> 程度の強度になる。

### 3. 共晶アルミニウム—珪素合金ピストン

#### 3.1 ピストンの損傷例

アルミニウム合金ピストンの損傷例について金属学的な調査報告は少ないが、齊藤氏らの報告<sup>4)5)</sup>によれば铸造欠陥を含めてピストンの製造技術上の問題に起因する損傷の多いことが指摘されている。筆者が経験した事故例においても、ピストンボス部の破損は铸造欠陥と金属組織的要因が作用したことを確認している。図 2 は铸造欠陥によってボス部から破損したピストンを示した。また図 3 は破損したピストンのリブ断面に存在する铸造欠陥の一例を示した。金属組織的な要因としては、共晶 Si の形状が重要で、針状に長く発達した共晶 Si を含まないように製造しなければならない。図 4 は破損したピストンの顕微鏡組織と健全なドイツ製ピストンのそれと比較したものである。

ピストンのもう一つの損傷例として、ピストン頂面の熱衝撃および熱疲労による亀裂を生じた例がある。図 5 はこの損傷形態をスケッチにて分類して示したもので、

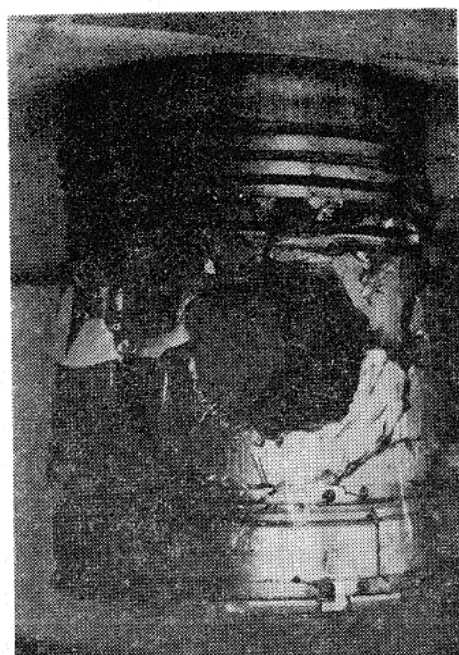


図 2 铸造欠陥の存在によりボスから破損したピストン（復元したもの）

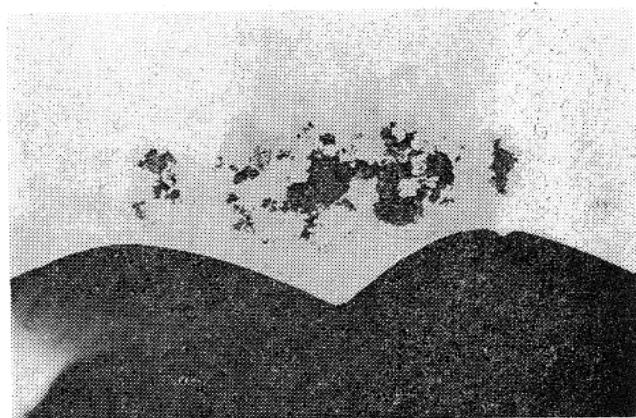
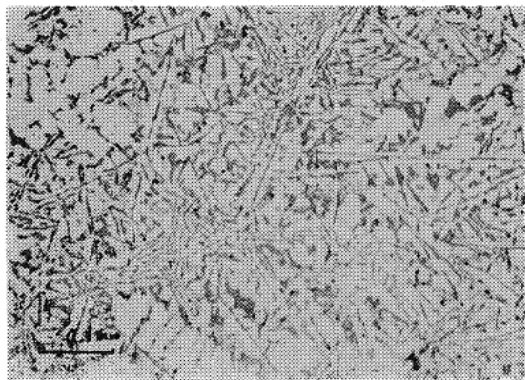
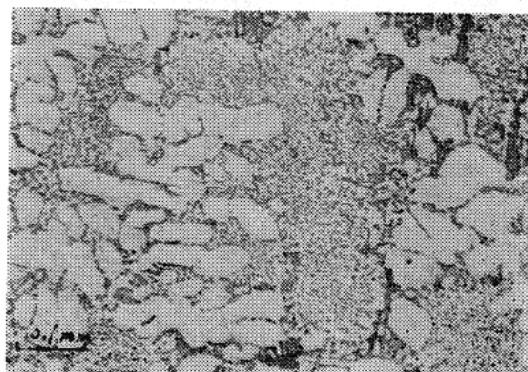


図 3 共晶 Al-Si 合金ピストン実体内に存在する铸造欠陥例

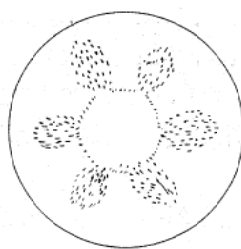


破損ピストン

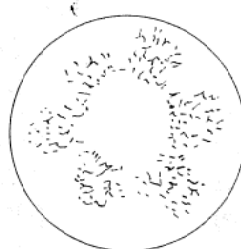


健全ピストン

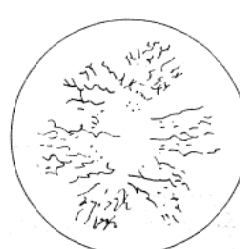
図4 使用中に破損したピストンと健全なピストンの組織の比較



タイプ1 斑点状

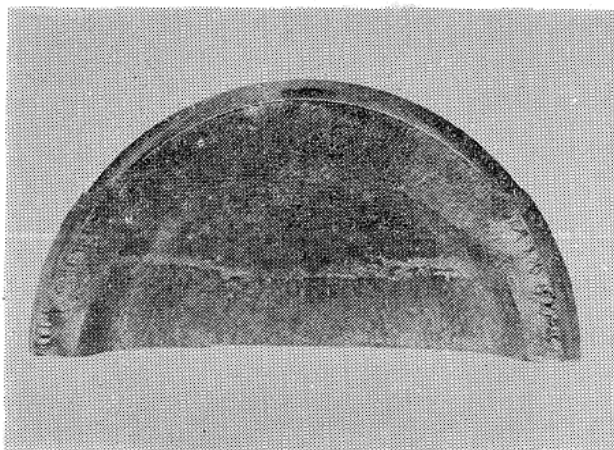


タイプ2 斑点状とヒビ割れ状

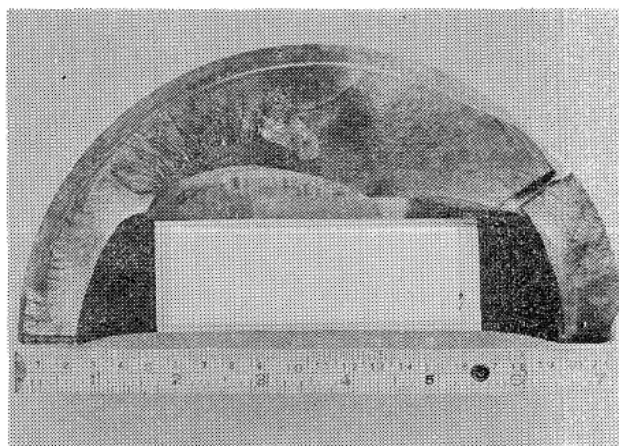


タイプ3 ヒビ割れ状

図5 Lo-Ex 合金鋳造ピストンのクラウン頂面に使用中生じた熱亀裂



鋳造ピストンの破面



鍛造ピストンの破面

図6 鋳造および鍛造ピストンの疲労破面

この亀裂性状にはピストン材の金属組織が大きく関係することが判り、ピストン温度の上昇とピストンの剛性不足が直接の原因であることが明らかになったので現在では一応解決されている。

ピストンの構造設計が改善される過程で、やや特殊な損傷例がある。それはピストンのリングベルトの内側から疲労破壊が生じたのである。図6に破面を示す。これは鋳造ピストンおよび鍛造ピストンの両方の場合に生じ

鋳造の場合は、ブローホールとケロイド状の鋳造欠陥が亀裂発生の主因であったが、鍛造ピストンの場合には、図7に示すような粗大な初晶Siの偏析が原因であった。このような欠陥はプレス鍛造前の連続鋳造過程で生じたものと考えられる。

### 3.2 ピストンの高温強度

健全なピストンが製作される段階においてピストンの高温強度が検討されるようになって来た。特にピストン



図7 共晶 Al-Si 合金ピストンにおける初晶の偏析

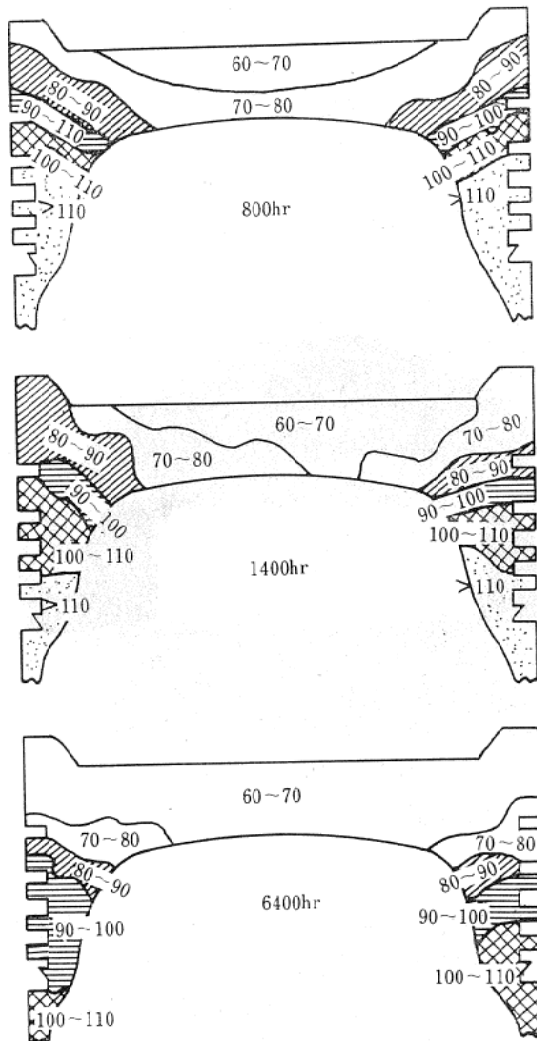


図8 ピストンの使用時間と断面硬さ分布の変化 (ピッカース硬さ荷重20kg)

頂面は運転使用間に熱的負荷を著しくうけるので、高温で長時間保持された後の強度が重要視されている。図8は車輛用高速ディーゼル機関のピストンについて断面の硬さ分布の運転時間に対する変化を例示したもので、温度条件が最もきびしいと考えられるクラウン部の硬さが初期硬度のおよそ60%程度迄低下し、ほぼ一定になることがわかる。伊藤らも、ピストン合金 AC8A について 250°C および 300°C で長時間保持した場合に、引張強さ、耐力および疲れ強さが著しく低下し、かつ材質（铸造、鍛造など）の相違による強度の差がなくなることを指摘している。<sup>6)</sup>

このような使用中の材料強度の変化は、ピストンを設計するに当っては当然考慮されなければならない。特に熱処理に関連して、この種の合金に常温で最高の強度を与える T6 処理は、使用中の時効析出の進行によって寸法変化を来すので、強度は或る程度犠牲にしても、T6 処理よりも高温で安定化処理した T7 処理が推奨されるのである。

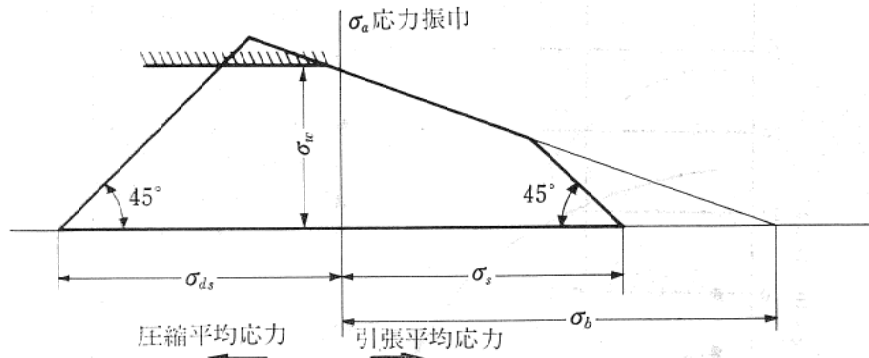
筆者らは、共晶 Al-Si 合金の高温強度におよぼす金属組織と熱処理の影響をしらべた。結果の一部の高温における疲れ強さを表2に与えてある。室温では、組織の改良処理を行なった T6 処理材が最も疲れ強さが大で、その T7 処理が最も低いが、高温では改良しない組織の T7 処理が最も低くなっており、T6 処理の効果は高温でもあらわれている。しかしボア径の大きいピストンに対しては寸法変化が重要視されるので T7 処理を選ばなければならない矛盾がある。

表2 共晶 Al-Si 合金の高温における疲れ強さ 単位 kg/mm<sup>2</sup>

記号	改良処理 (金属組織)	熱処理	1×10 <sup>7</sup> 耐久限		
			R. T	250°C	300°C
MT6	改良した	T6	13.7	6.0	3.0
MT7	"	T7	11.5	6.3	2.0
GT6	改良せず	T6	12.9	7.1	2.5
GT7	"	T7	12.1	6.0	1.8

表3は筆者らのデータを用いて中野らが作成した実体ピストンの高温疲れ限度線図資料<sup>7)</sup>を示した。また図9および図10はこの値を他の研究者のデータと比較して示したものである。この値は共晶 Al-Si 合金ピストンを設計する場合の許容応力として使用することができる。

表3 実体高温疲れ限度線図資料<sup>7)</sup>



高温強度 温度	引張り強さ $\sigma_b$ kg/mm <sup>2</sup>		引張耐力 $\sigma_s$ kg/mm <sup>2</sup>		圧縮耐力 $\sigma_{ds}$ kg/mm <sup>2</sup>		曲げ疲労強度 $\sigma_N$ kg/mm <sup>2</sup>	
	鋳造	鍛造	鋳造	鍛造	鋳造	鍛造	鋳造	鋳造
20°C	21.0	30.0	19.0	27.0	19.0	27.0	6.5	8.0
100°	20.5	28.0	18.0	25.0	18.0	25.0	6.0	7.4
125°	20.0	26.5	17.2	23.4	17.2	23.4	5.6	7.0
150°	18.7	24.0	16.0	20.2	16.0	20.2	5.0	6.2
175°	16.0	18.5	13.0	14.4	13.0	14.4	4.4	5.1
200°	12.5	13.0	9.7	10.5	9.7	10.5	3.7	4.1
225°	9.5	9.7	7.6	8.0	7.6	8.0	3.1	3.3
250°	7.5	7.5	6.2	6.2	6.2	6.2	2.7	2.7
275°	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	2.3	2.3
300°	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.0	2.0

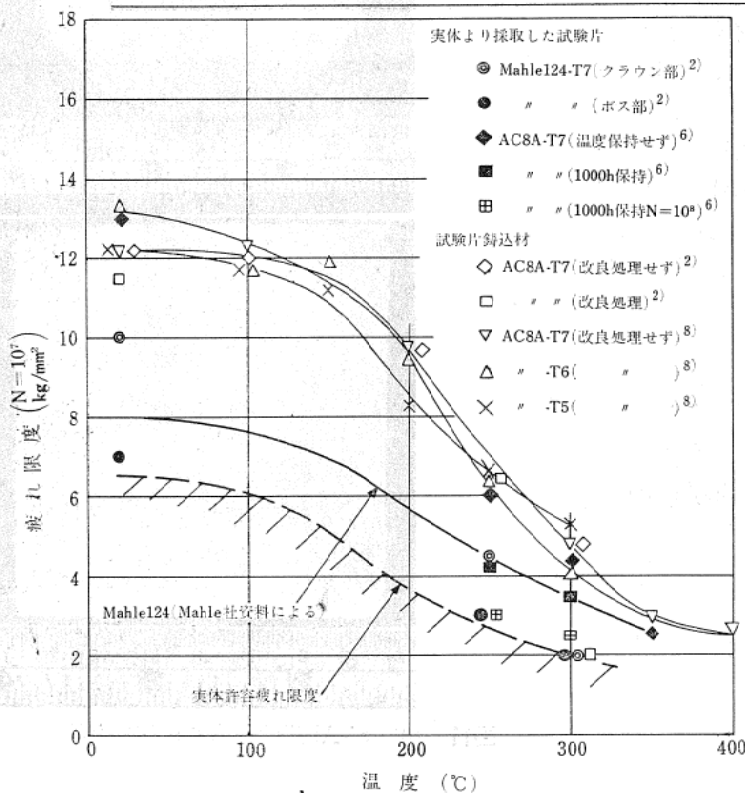
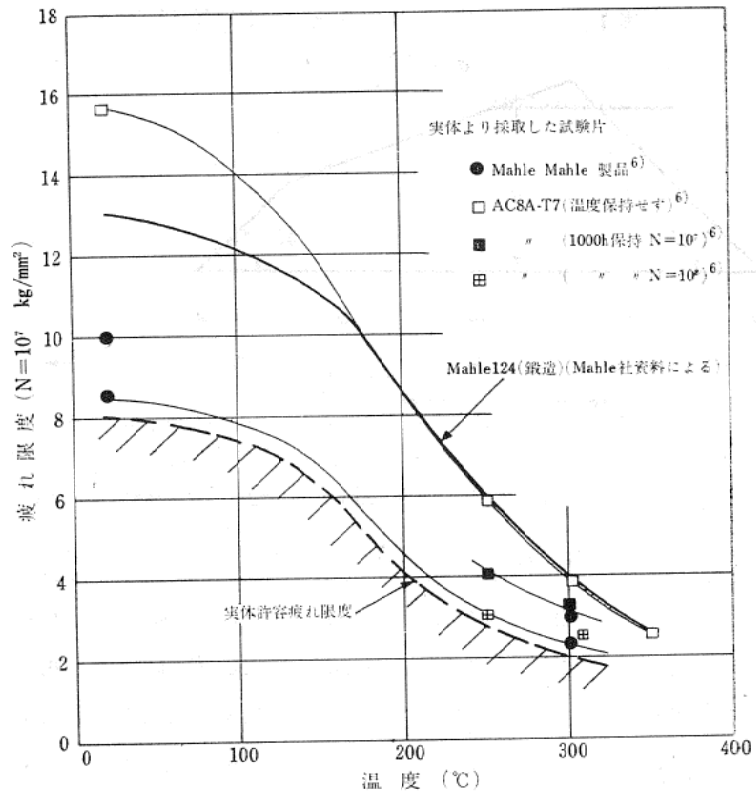


図9 Al-Si-共晶合金 (鋳造) 高温疲労強度<sup>7)</sup>



#### 4. 過共晶アルミニウム—珪素合金

過共晶 Al-Si 合金については近年多くの研究がなされているが、その多くは初晶の改良処理に努力が払われている。<sup>9)10)</sup> しかしながら、一般的には、鋳造合金ではあまり高い強度が期待できない。そこで18%の段階で鍛造品の製造に努力がなされている。しかし大型のピストンでは初晶の完全な微細化と偏析防止に問題があり、実用化までには多くの製造技術上の問題を解決して行かなければならない。図11は試作した18% Si-Al 合金押出丸棒の断面マクロ組織、表4は同じ丸棒から採取した試験片により求めた引張強さ、伸びおよび疲れ強さを示した。

表4 18% Si-Al 合金押出丸棒の機械的性質 (平均値)

位 置	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸 び (G, L=28mm) kg/mm <sup>2</sup> 10 <sup>7</sup>	耐久限
押し出し方向 に平行	17.5	2.73	10
押し出し方向 に垂直	11.1	0.80	7

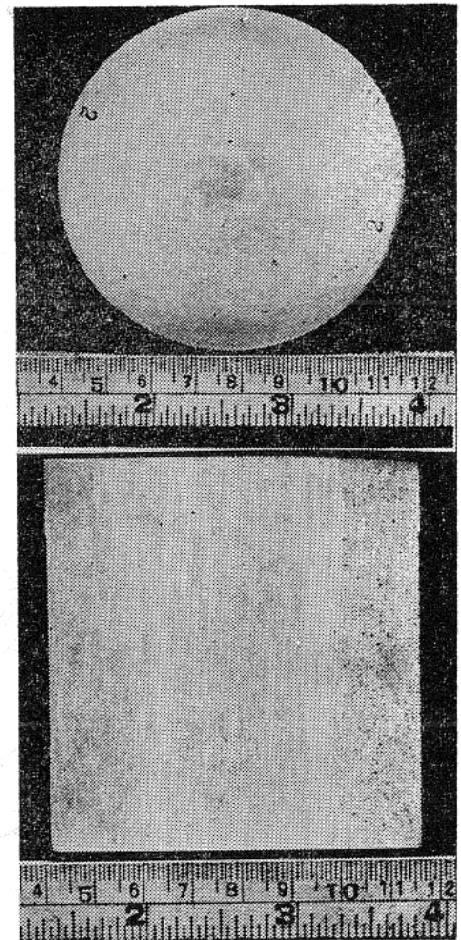


図11 18% Si-Al 過共晶合金の押出丸棒のマクロ組織

### 5. S.A.P (Sintered Aluminium Products)

この合金は、1946年スイスのイルマンらが実用化した耐熱性の分散型アルミニウム合金で、アルミニウムを母相としその中にきわめて微細なアルミナを分散させたものであるがその詳細についてはここでは省略する。しかし、将来のピストン材料として注目に値するので製造技術上の進歩に期待したい。

S. A. Pの特性は次のようである

- i) 低比重 (アルミニウムよりわずか大きい)
- ii) 熱に対する抵抗大
- iii) 熱膨張係数が小さい
- iv) 電気伝導度が大きい
- v) 耐食性が良い
- vi) 耐疲労性が良い

図12および図13に S. A. Pの機械的性質の一例を示した。500°C迄のすぐれた耐熱性は S. A. P がピストン材料として適していることを示している。アルミナを10%含有するもので、室温における引張強さ 35kg/mm<sup>2</sup>、伸び8%、硬さ HB=104が代表的な値である。

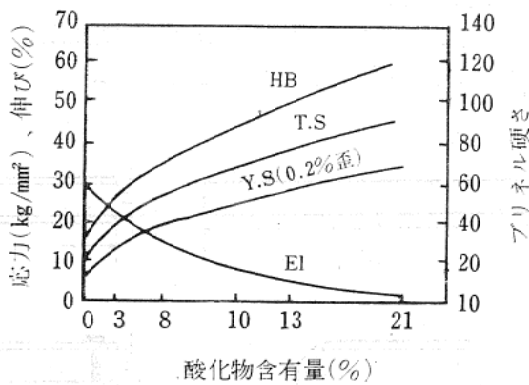


図12 の S.A.P 酸化物含有量と常温における機械的性質の関係

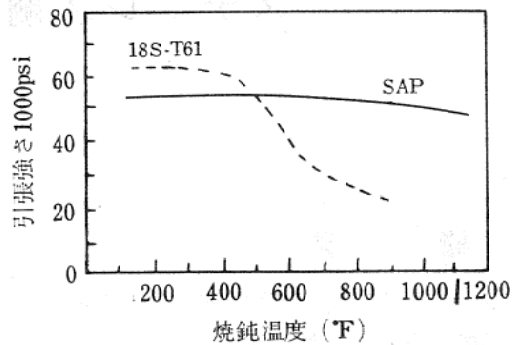


図13 焼鈍した、材料の常温における引張り強さ

### 6. むすび

内燃機関用ピストンに使用される材料は、機関の発展とともに試練をへて徐々に変遷しているが、小型の航空機や自動車用のピストンと違って、中、大型ともなると製造技術上の問題が大きな neck となっており、その進歩は決して早くはない。我々材料使用者の立場からは、より強度の高い、より信頼性の高いピストンの製造が切望されるわけであるが、その使用量との関係もあり、その技術的進歩の速度は遅く、製造技術を含めて未だ最適な材料が得られていないのが現状といえよう。

この稿を終るに当たって発表の許可を与えられた川崎重工業技術研究所、中嶋副所長に、また、終始ご指導を賜った川崎重工業技術研究所、前田徳美博士に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 前田(宗), 前田(徳), 清重: 学振123委耐熱金属材料研究委員会報告集 vol.1 No. 1 (1960) 265
- 2) 前田, 清重: 川崎技報 25 (1964) 74
- 3) Mahle社: Kleine Kolben-Kunde (1957) 22
- 4) 齊藤, 大山: 鉄道技術研究報告99 (1959) 1
- 5) 齊藤: 日本機械学会誌vol.62, No.491 (1959) 73
- 6) 伊藤, 小林: 日本機械学会誌vol.67, No.544 (1964) 738
- 7) 中野, 服部: 川崎技報27 (1965) 44
- 8) 深井, 竹内, 田中: 住友軽金属技報 vol. 4, No.4 (1963) 273
- 9) 大日方: 金属 vol.29No. 9 (1959) 649
- 10) 真鍋他: 鋳物 vol.35 No. 7 (1963) 23