

過共晶 Al-Si 合金の研究

Study on the Hyper-eutectic Al-Si Alloy

稲垣 伍三郎* 山田 泰生*
Gosaburō Inagaki Yasuo Yamada

内 容 梗 概

過共晶 Al-Si 合金は“アルジル”と称して、近時空冷 2 サイクルエンジン用ピストン材料として開発され、熱膨張係数が鉄に近いこと、軽いこと、耐摩耗性がすぐれていること、高温強度が大きいことなどから、ピストンに限らず、シリンダブロック、プレーキドラムなどにも試用されつつある。

この合金は、共晶をはるかにはずれているために凝固時、初晶 Si の粗大粒が析出して良好な仕上面を得られず、初晶偏析による諸性質の変動も生じる。本報告は、初晶 Si を微細化するために必要な組成と熔製条件、最上の仕上面をうるために必要な熱処理条件およびそれらについて熔製、熱処理した合金の casting 性、被削性、機械的性質、物理的性質について測定した結果を述べたものである。

1. 緒 言

ピストン材料としては、軽量、高熱伝導性で有利なアルミニウム合金が圧倒的に多く使用されガソリンエンジンはもちろん、燃焼温度の高いディーゼルエンジンのピストンにまで進出している。その材質は JIS AC 8 A (ローエックス), AC 8 B または AC 5 A (Y 合金) であるが、これらはいずれも熱膨張係数がかなり大きく、耐摩耗性の点でも満足な材料とはいえないので、最近、過共晶 Al-Si 合金の地位が急速に認められてきた。

過共晶 Al-Si 合金の特長は、熱膨張係数がアルミニウム合金のいずれよりも小さく、耐摩耗性は鋳鉄に匹敵し高温強度が比較的大きいことである。

しかるに過共晶 Al-Si 合金は、共晶系 Al-Si 合金であるシルミンと異なり凝固時に初晶として析出する Si 粒が第 1 図に示すように著しく粗大化し、Si の比重が小さいために偏析を生じ切削加工時“むしれ”の現象を呈して良好な仕上げ面を得られない。この初晶 Si を微細化し分散させるには Na の添加は効果がなく逆に初晶を粗大化し球状化する結果となり⁽¹⁾、現在のところ P の添加が最も有効確実な手段であることが判明している。ところが P の添加方法および添加条件、熔製条件によって初晶の微細化程度は大きく変化し極端な場合には P を添加しない場合よりも初晶 Si が粗大化する条件もみられる。

また過共晶 Al-Si 合金の仕上面は初晶 Si の微細化によって著しく向上するが、さらに仕上面程度を良好ならしめるには初晶の微細化とともにマトリックスの硬化が必要である。

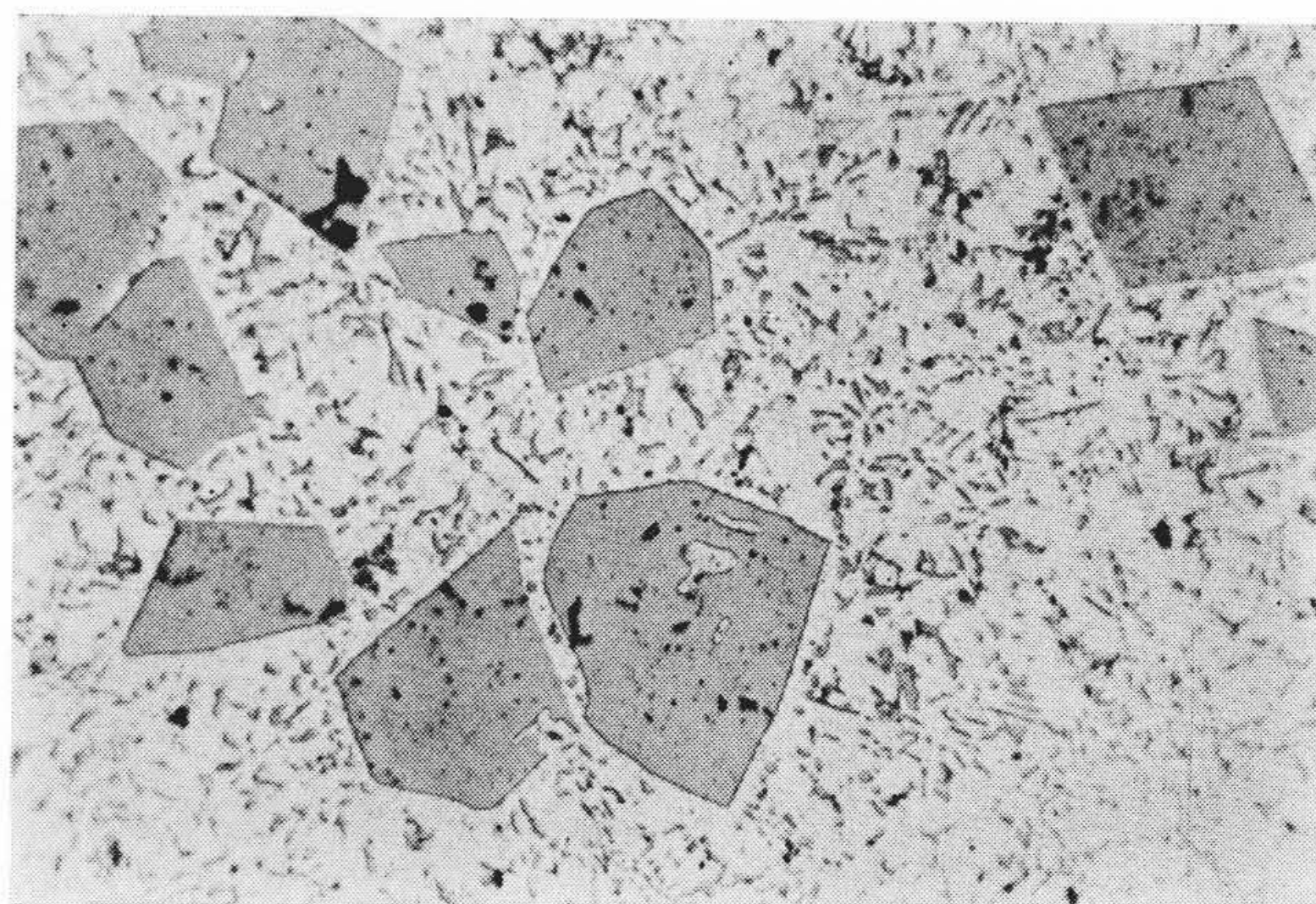
そこで過共晶 Al-Si 合金の初晶 Si を微細化するために必要な組成と熔製条件ならびに最上の仕上面をうるために必要な熱処理条件を決定し、それらについて熔製、熱処理した合金の casting 性、被削性、機械的性質、物理的性質などについて測定した結果を報告する。

2. 初晶 Si の微細化

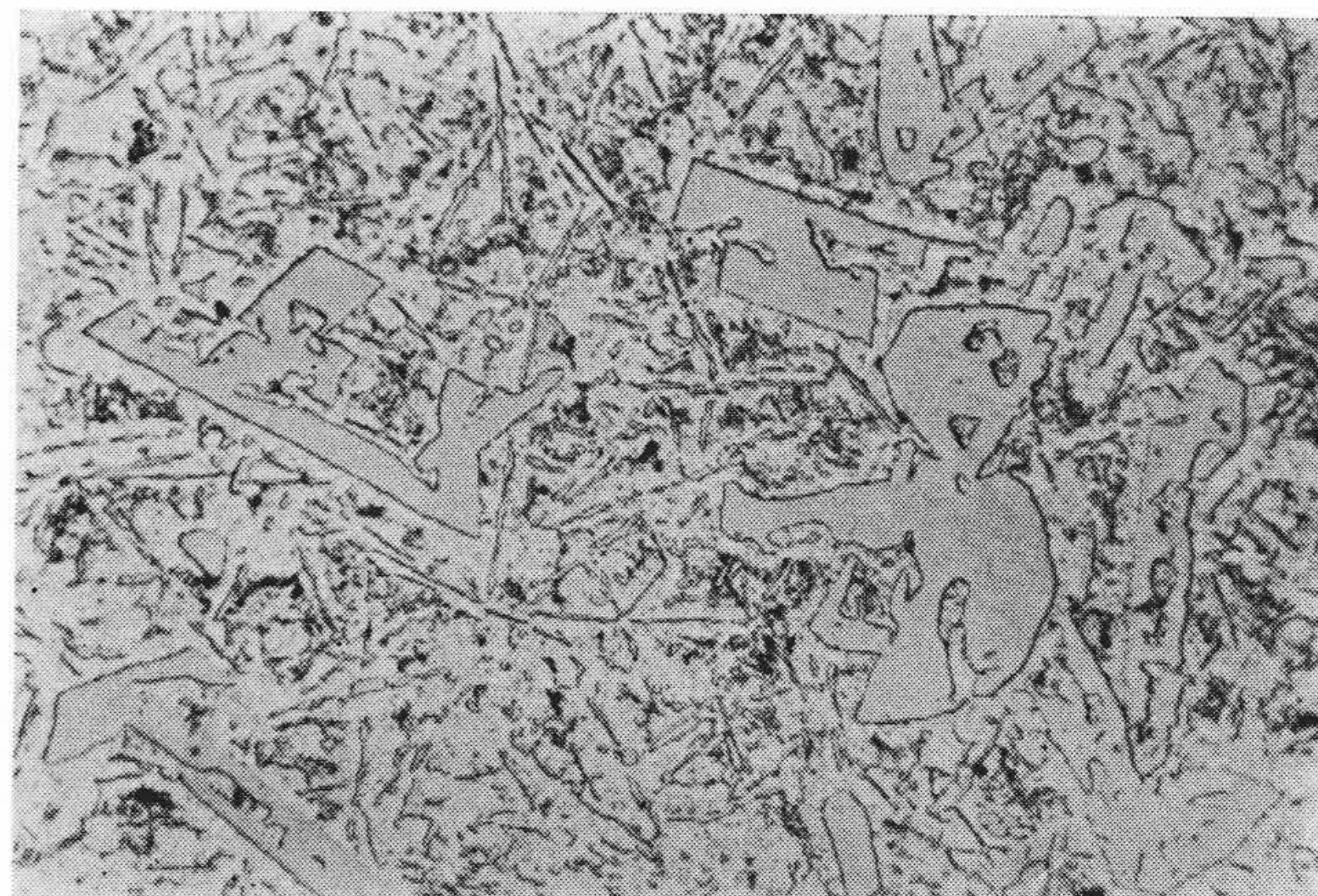
P を Al-Si 熔湯に添加する方法としては赤燐、Cu-P 合金、 PCl_5 ⁽²⁾、P を含む混合塩⁽³⁾など種々の形態がある。それぞれ一長一短があって各研究者によって独自の方法が採られているが、化学分析値で P 0.01% 以上なければ微細化が完全でない点では一致している。

初晶 Si の大きさを決定する大きな要因は、P の添加であるが微細化を助長する要因は数多く存在する。

同じ Cu-P 合金で添加するにしても Cu_3P の形態で添加した場合



第 1 図 P を添加しない場合の過共晶 Al-Si 合金 (×130)



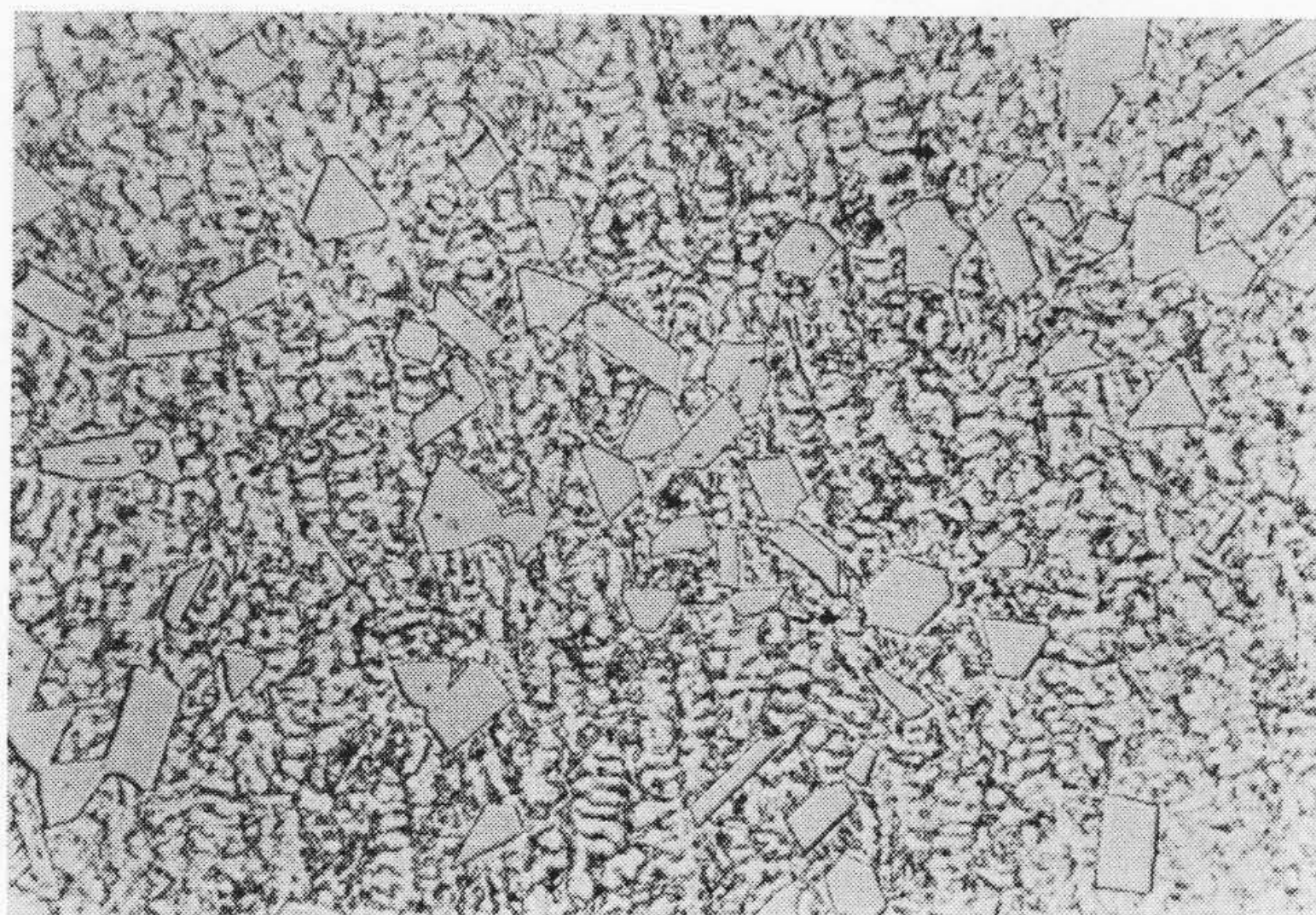
第 2 図 P を添加しても初晶が粗大化した過共晶 Al-Si 合金 (×130)

は、Cu に完全に固溶した P の形よりも AlP なる化合物が生成しやすく、したがって初晶 Si は微細化されやすい。そのほか Cu-P 合金の添加温度の影響も大きく、また Thury⁽²⁾, Kessler⁽³⁾, 大日方など⁽⁴⁾の示すように Cl_2 ガス処理によっても初晶 Si は微細化される。これらの要因を含めて 10 因子の効果を解析して得た初晶 Si の最大大きさと最小大きさの場合を第 2, 3 図に示す。

2.1 初晶 Si の大きさと偏析に及ぼす肉厚の影響

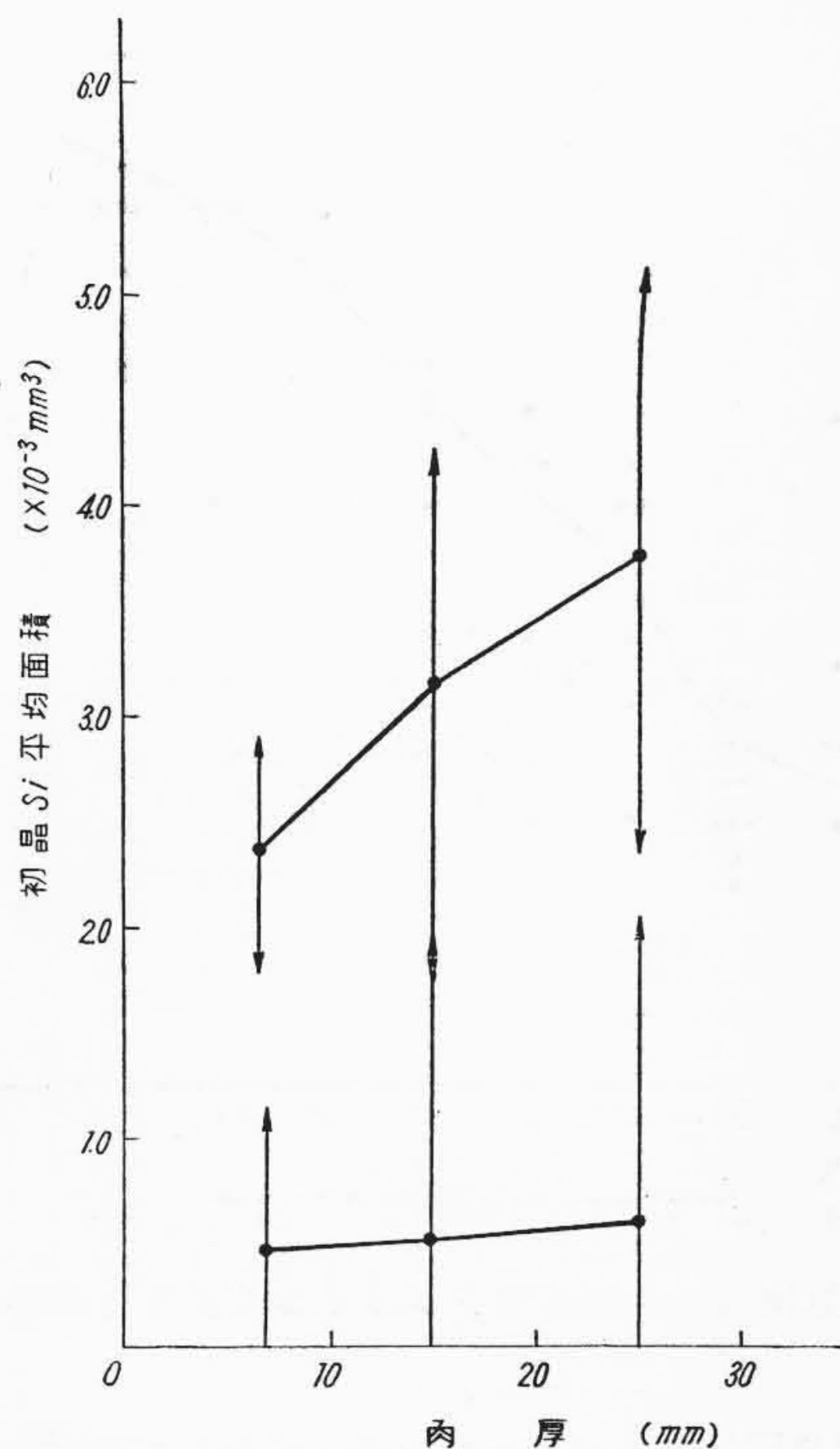
初晶 Si の微細化機構は、 AlP の結晶構造が初晶 Si の結晶構造に類似しているために AlP が核となって初晶が微細化されると考えられている。 AlP の核作用とともに冷却こう配が微細化に関係していることも考えられ、肉厚差、鋳型の種類によって生成される冷却

* 日立金属工業株式会社深川工場



(金型, 肉厚 15 mm) (×130)

第3図 Pを添加し初晶の微細化した過共晶 Al-Si 合金



第5図 初晶 Si 平均面積と肉厚との関係

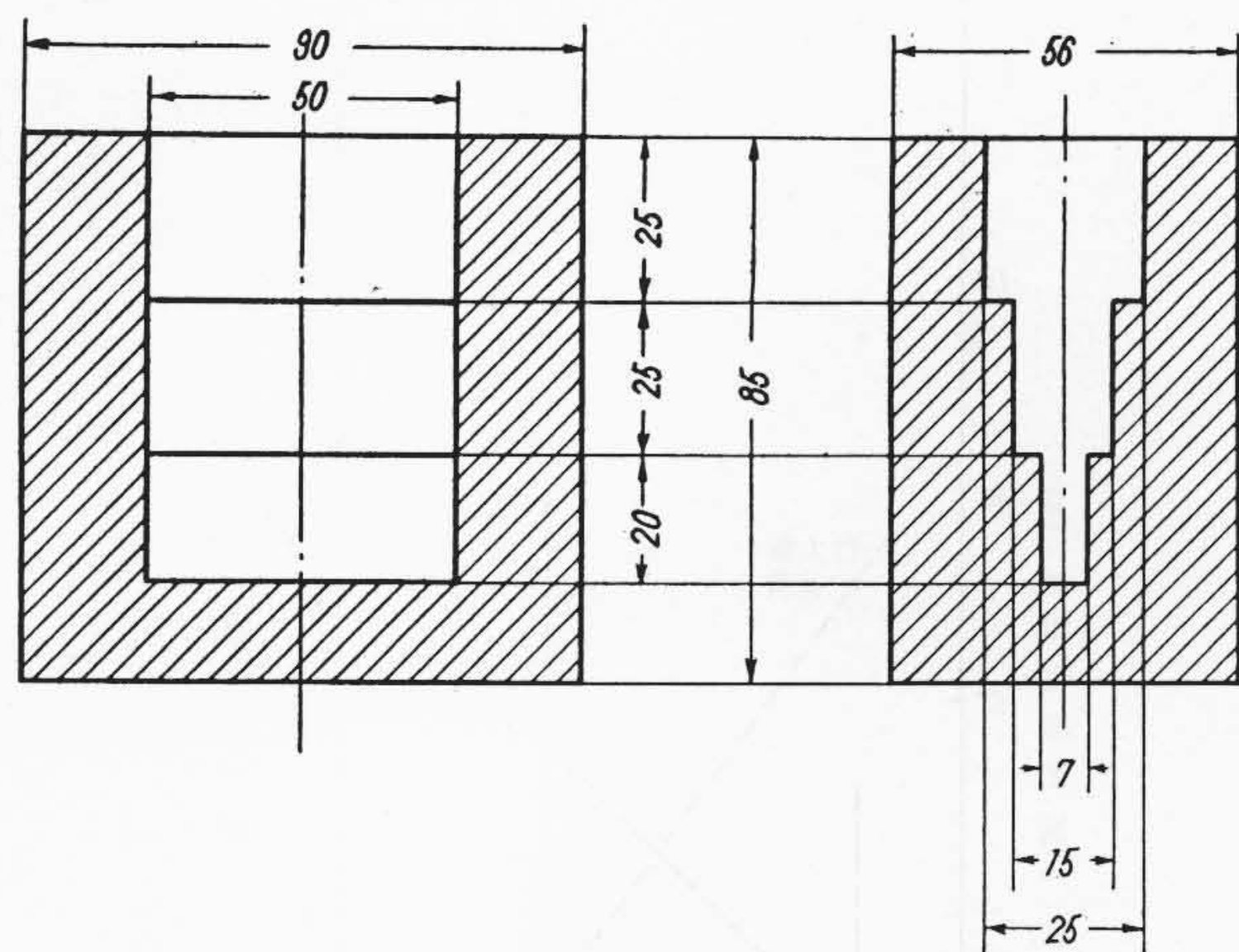
こう配は、初晶 Si の大きさに微妙に影響している。

第4図の金型で試料を採り、7mm, 15mm, 25mm部の肉厚と初晶 Si 平均面積との関係について調査した結果は、第5図のように肉厚が大きくなると初晶 Si が大きい場合には、肉厚に比例して初晶 Si は粗大化するが、非常に微細化されている熔製条件下では、肉厚感度は小さい。初晶の偏析は各肉厚ごとに切断部を60倍の低倍率で検鏡し、0から4まで採点する方式をとり、同一試料を3名で判定しその総合結果をもって偏析度とした。結果は第6図のように偏析の少ないものは肉厚感度も小さくなっている。

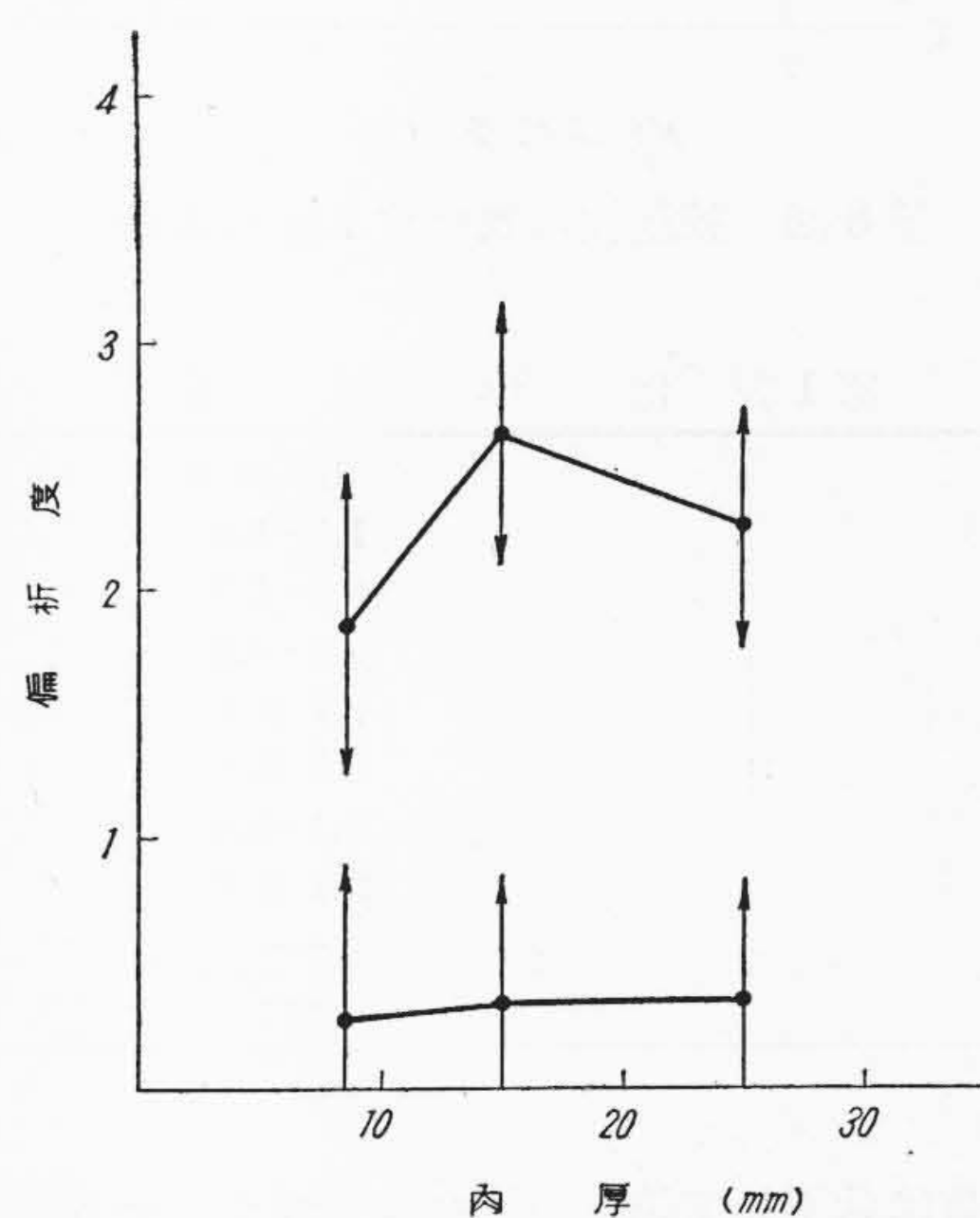
偏析に関係した因子と初晶 Si の微細化に有効であった因子とは、必ずしも同一ではないが、初晶 Si の微細化に効果ある条件は偏析を大きくする条件ではなく、初晶 Si が微細化されれば、偏析が少なくなること裏付けている。

2.2 保持時間と再熔解の影響

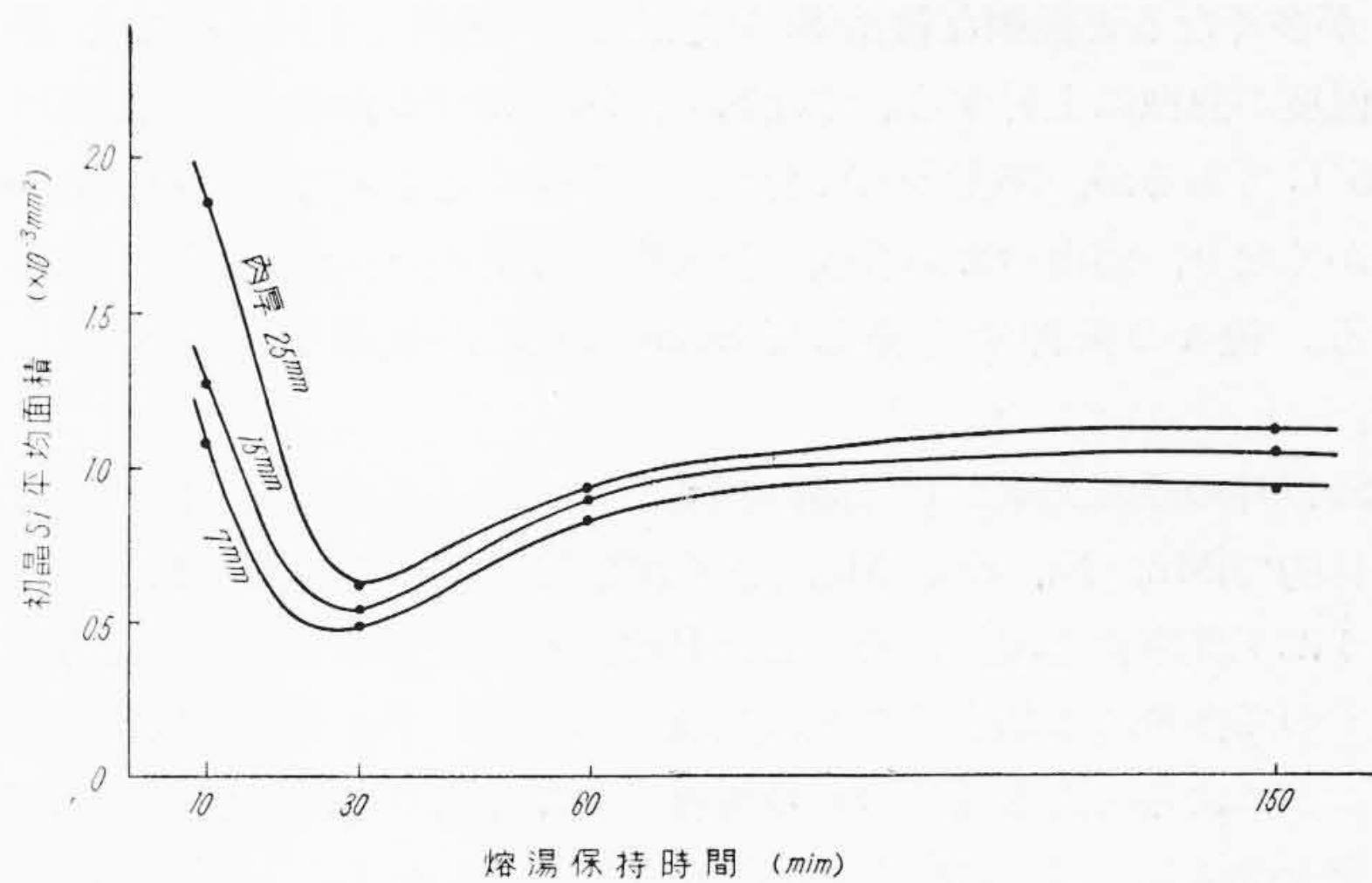
Pの初晶 Si 微細化能は、Cu-P 合金添加後、時間とともに変化する⁽⁵⁾。第7図は、Cu-P 合金添加、Cl₂ ガス処理後の保持時間による初晶 Si の大きさを求めたもので、処理後 20~30 分で最も微細化され、以後多少粗大化して 60分から 2.5 時間程度まで初晶微細化能を有している。



第4図 階段状試験片金型



第6図 初晶 Si の偏析度と肉厚との関係

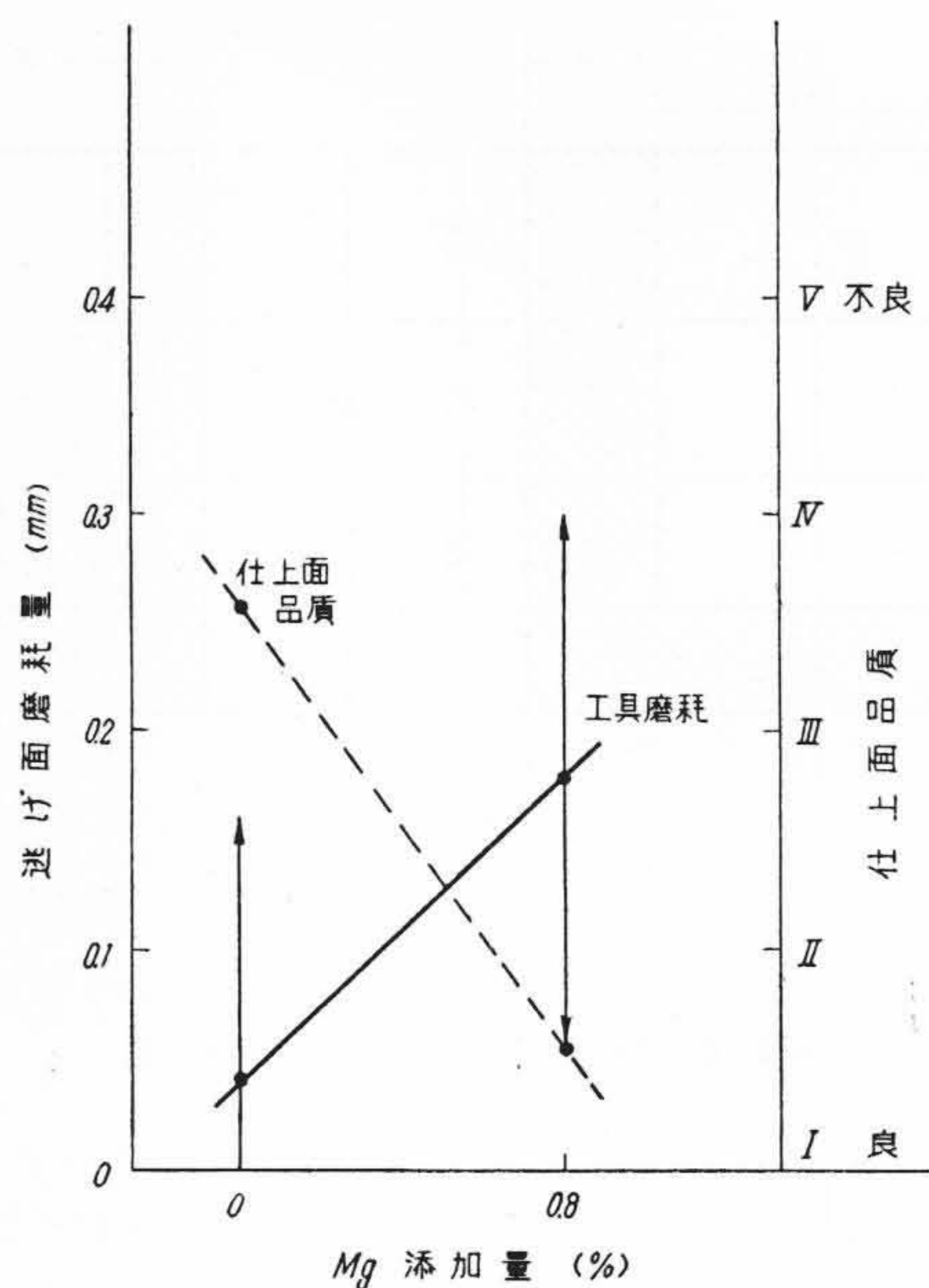


第7図 初晶 Si 大きさの時間的变化

初晶 Si の大きさは、熔湯の保持時間が長くなるとやや粗大化しますが、再熔解すると Si の大きさは約 2~3 倍となる。その理由は、再熔解試料に残存している P の化学分析結果からも明らかであり、初熔解時 0.012% 含有していた P が、再熔解 (max 770°C に押えて熔解) によって 0.005% と約 1/2 に低下しているために、初晶 Si の微細化が行われなかったのである。それゆえ、再熔解に当っては、熔湯に 0.005% 以上の P を添加してやれば、初熔解と同一の性質が得られる。

3. 組成

過共晶 Al-Si 合金は、Si % が増加するにつれて耐摩耗性を増加



第 8 図 被削性に及ぼす Mg の影響

第 1 表 化 学 成 分

Si	19~22 %
Cu	1.3~1.8
Ni	0.8~1.3
Mg	0.5~0.8
Fe	0.7 以下
Ti	0.2 以下
Mn	0.4~0.6
Zn	0.2 以下
Co	—
Cr	—

し、熱膨張係数は低下して鋳鉄のそれに近づく。一方強度は、Si 21 % 以上になると急激に低下する⁽⁶⁾。そのほか Si % が増加して初晶 Si が多くなると微細な初晶 Si をえがたく、偏析も生じやすく、凝固温度が急激に上昇する。すなわち、20% Si-Al 合金の凝固温度は 695℃ であるが、25% Si-Al 合金では 765℃ となって鋳型の寿命が短くなり、熔湯のガス吸収、被削性の劣下といった悪影響が現出する。種々の条件を考慮して Si 20~21 % が最適であると判断した。

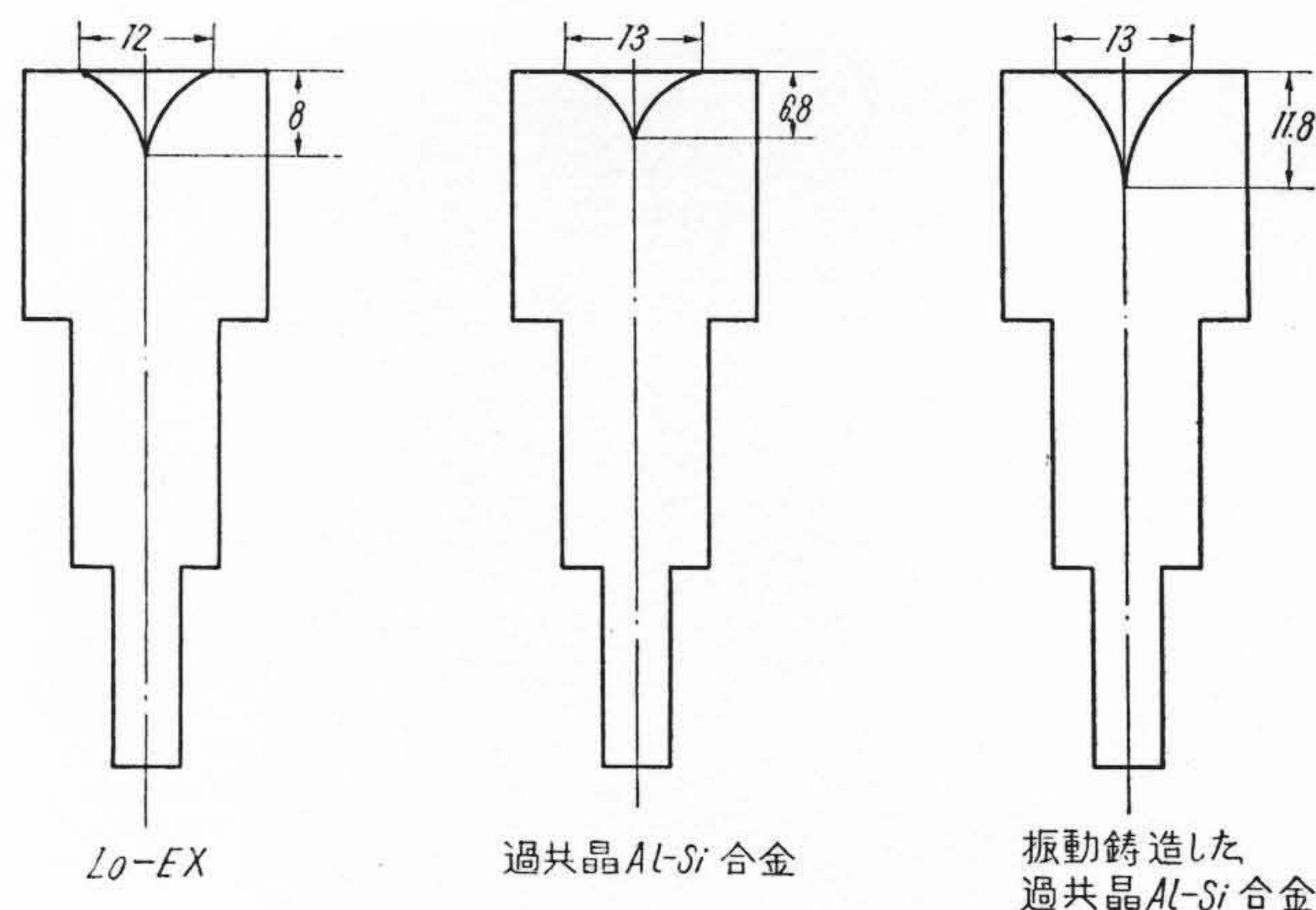
Si 以外の添加元素として高温強度、マトリックス強度、硬化などの目的で Mn, Ni, Cu, Mg, を添加した。Mg の添加は第 8 図のように工具摩耗を増加させ、また P の微細化能を低下させることもある⁽³⁾ので多量に添加することは無謀であるが、Mg を 0.8 % 添加することによって肉厚部の Si の偏析が少なくなり引張り性質、圧縮性質を改善し、さらに仕上面品質を良好ならしめる。

Cu は添加量が多くなると初晶 Si の偏析が多くなるが、圧縮強度を増加する傾向にある。

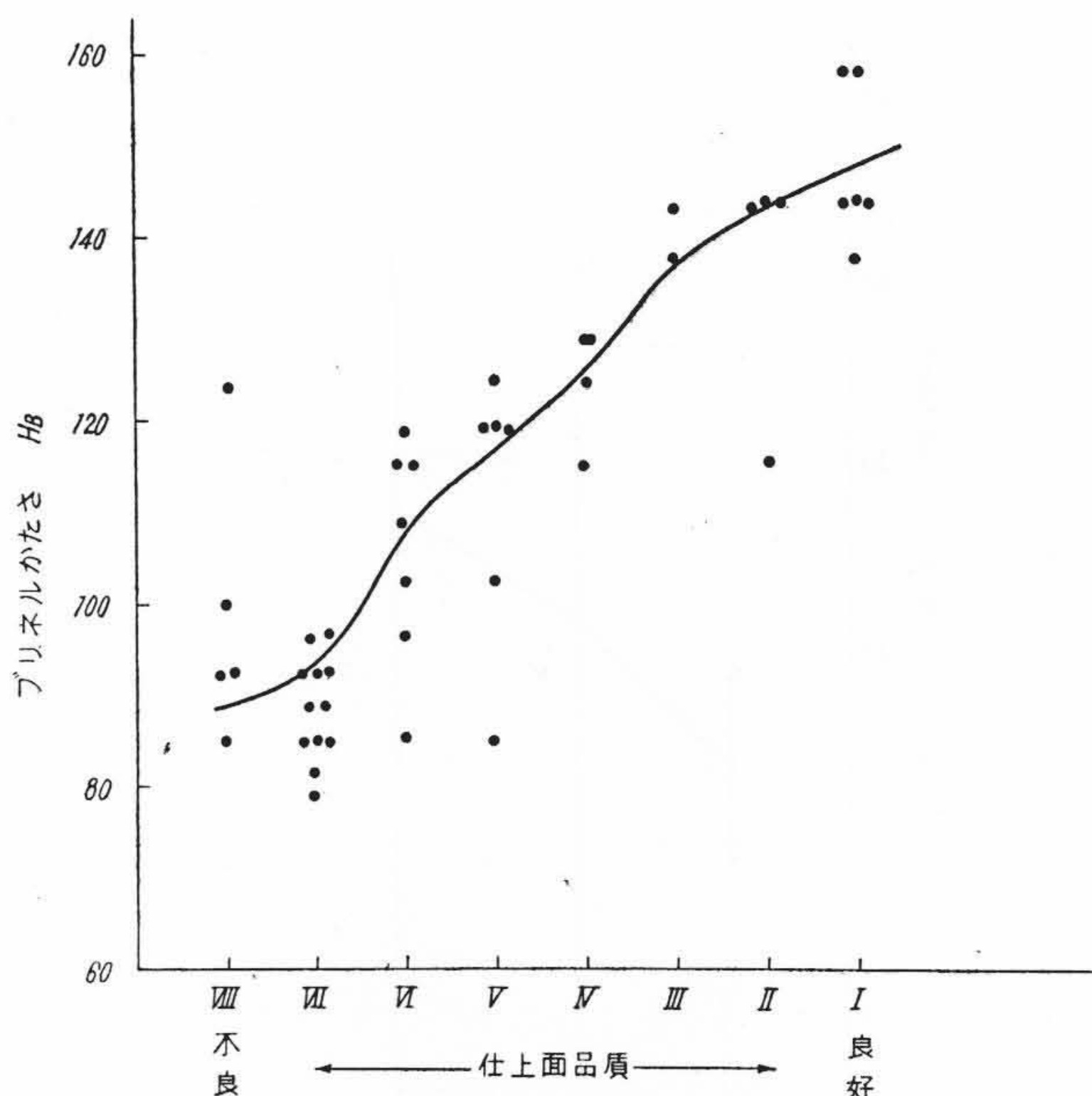
過共晶 Al-Si 合金の化学成分を第 1 表に示す。

4. 鋳 造 性

過共晶 Al-Si 合金は、凝固温度範囲が広く(約 120℃)初晶 Si の析出によって湯流れが阻害されるなどの点から鋳造性は、よくないと考えられるが、Kuemmerle⁽⁷⁾によれば、流動性は共晶系のシルミンより良好であり、Kissling⁽⁶⁾は湯口、押湯を短かく幅広い物とすれば鋳造性は劣らないとしている。この両者の見解を総合すると流動性はシルミンに比してかなりよいものであるが注湯後完全凝固までの Mussy Zone における湯の補給性はきわめて悪いということになる。実際に階段状試験片を X 線透過し、引け巣の状態を観察し



第 9 図 X 線透過による引け巣の状態



第 10 図 仕上面品質とブリネルかたさとの関係

た結果では第 9 図のようにローエックスに比して引け巣の広がり深さともほとんど変化がない。

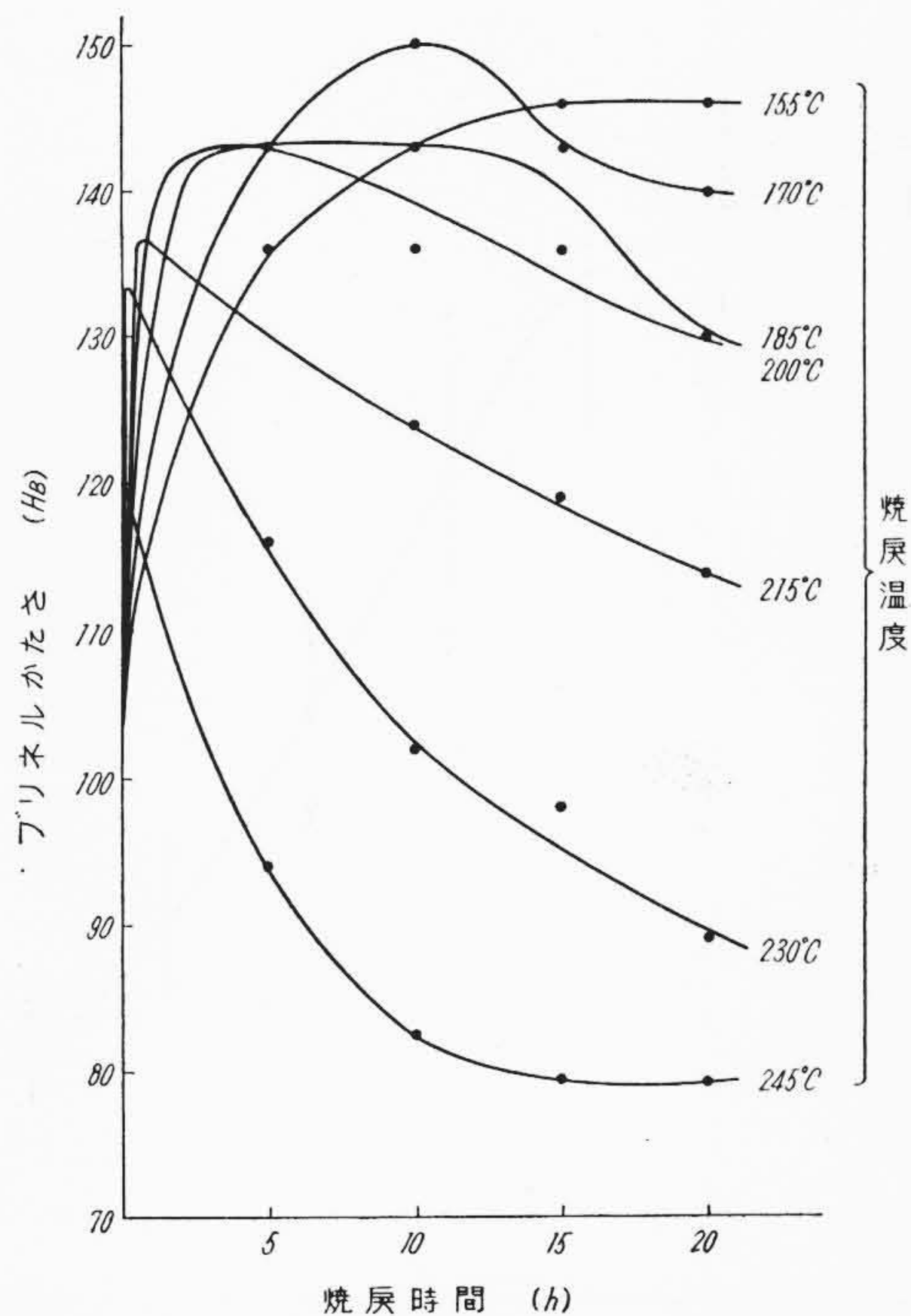
また過共晶 Al-Si 合金の凝固時、振動数 50 c/s、振幅 1 mm の振動を鋳型に与えると、引け巣の深さは深くなるが、プリント性が非常に良くなる点興味深い。

5. 被 削 性

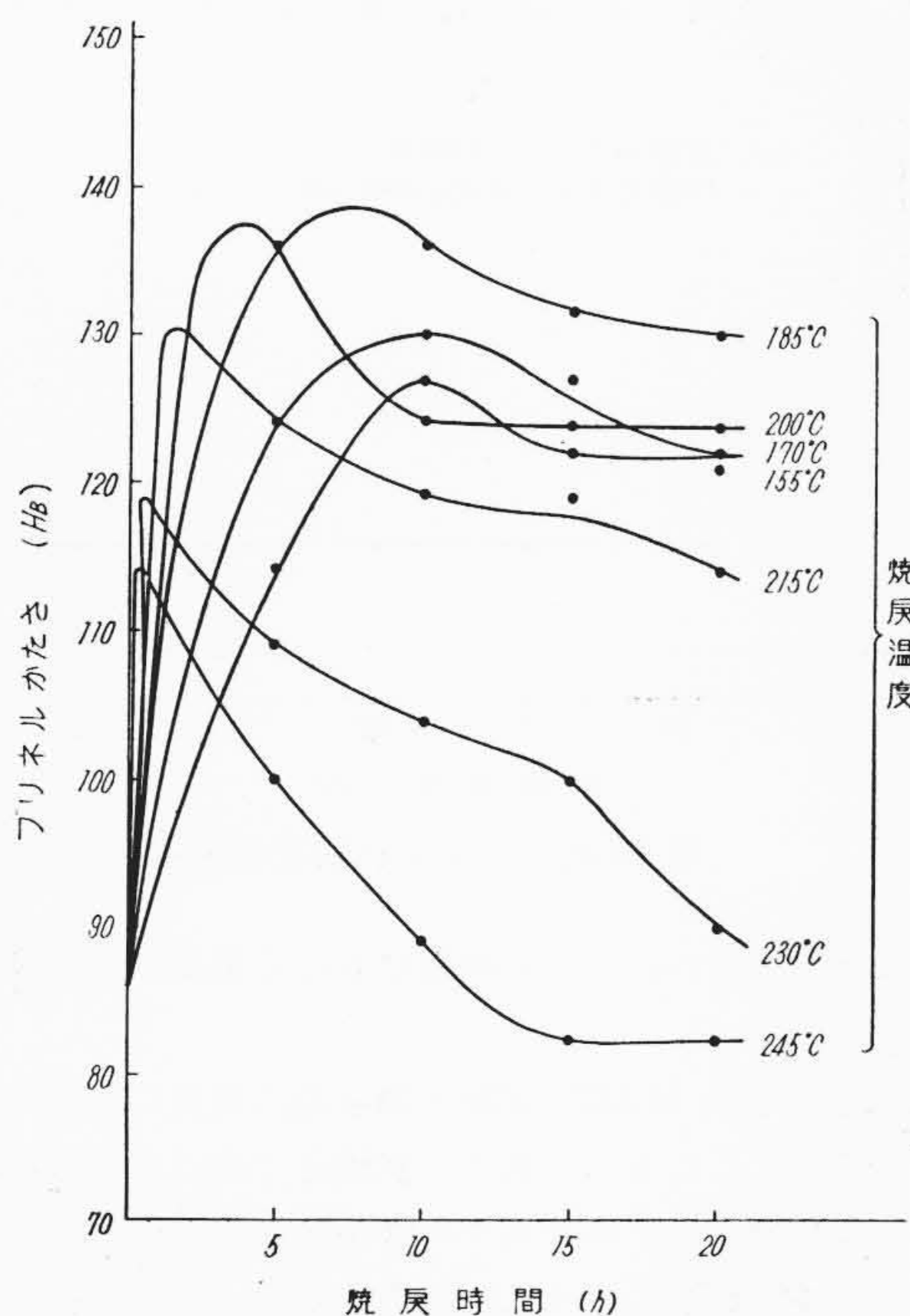
工具寿命は、初晶 Si を微細化することによって長くなる。タップ試験の結果では、初晶 Si を微細化することによって寿命は約 3 倍になり⁽⁵⁾旋削試験では、約 5 倍になる。しかし一般のアルミニウム合金に比して工具寿命が短いのは当然で、初晶微細化試料でさえ約 $1/2 \sim 1/3$ である。

切削抵抗は、初晶が微細化されていれば、AC 8 A-T6 の試料と大差なく、わずかに大きい程度である。

仕上面品質は、かたさときわめて大きな相関性を有し、第 10 図のようにブリネルかたさが増加すると仕上面品質は向上する。第 11 図より仕上面品質 III 以上をうるには、ブリネルかたさ 135 以上が必要であることがわかる。このかたさは、焼入、焼戻処理によらなければ、得られず、したがって熱処理条件の狭い範囲が要求される。過共晶 Al-Si 合金の仕上面が良好な場合は、光沢が灰色を帯びるのみでほかのアルミニウム合金と比べてなんらそん色なく、仕上面不良の場合は、初晶 Si のかたさが大きいために、“むしれ” “ひっか



第11図 510°C×3時間溶体化処理をした場合の焼戻時効曲線



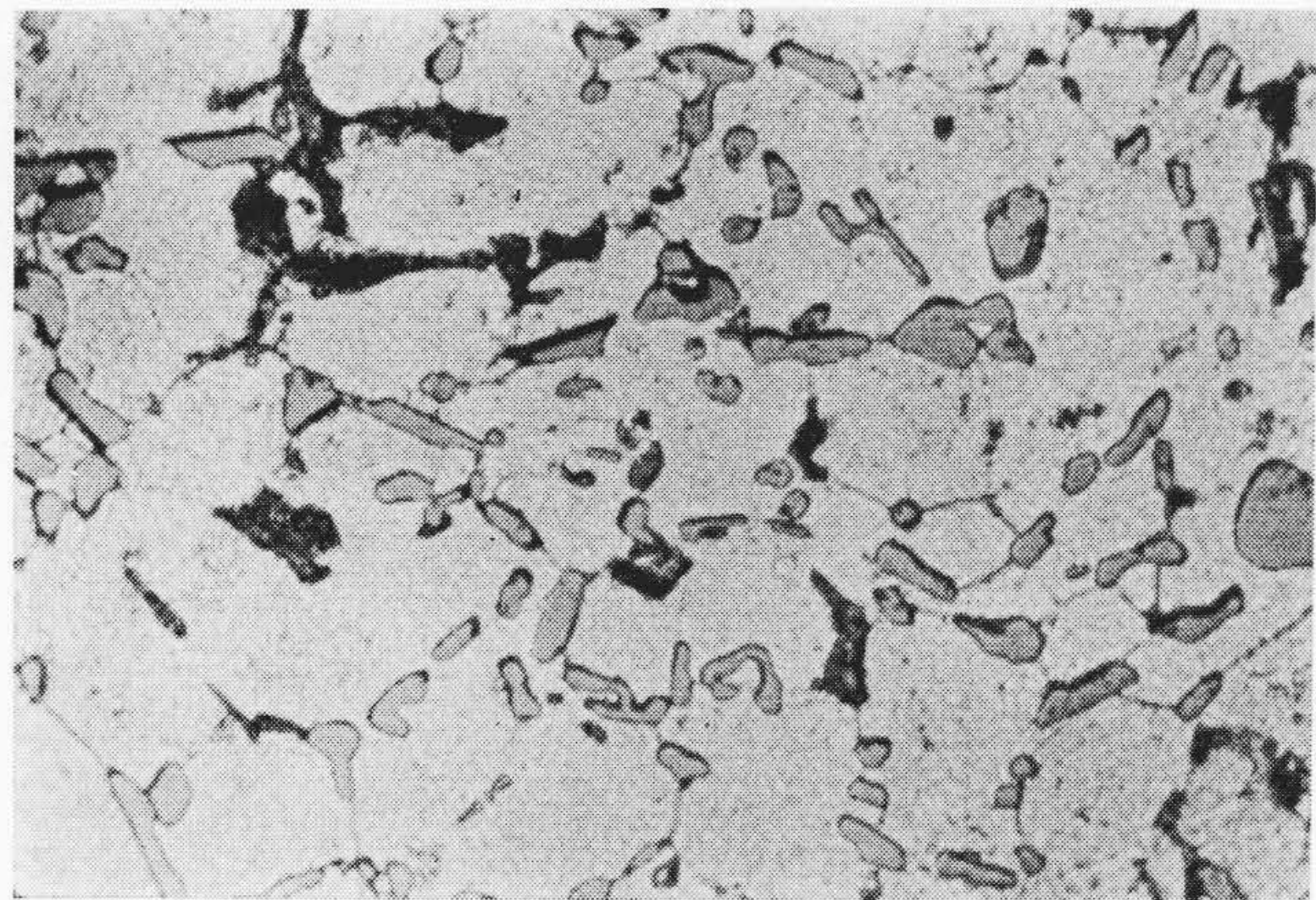
第12図 510°C×20時間溶体化処理をした場合の焼戻時効曲線

き”の状態となる。マトリックスのかたさを増すと工具寿命は短くなるが、仕上面品質を良好にするには、マトリックスのかたさを増して初晶 Si との硬度差を小さくすることが必要である。

6. 熱 処 理

溶体化処理温度を 510°C±10°C とし、溶体化処理時間、焼入浴温度、焼戻温度、焼戻時間などの要因を取り、ブリネルかたさにより熱処理条件を検討した結果、焼入浴温度の影響は大きくないが、溶体化処理時間、焼戻時効処理は、ほかのアルミニウム合金と同様ブリネルかたさを種々変化させる。

焼入浴温度を 70°C とした場合の熱処理条件とかたさとの関係は溶体化処理時間によって著しく異なる。すなわち、焼戻処理によって



第13図 ブリネルかたさ 135 のマトリックス組織 (×520)

最高硬度をうるまでの時間は、溶体化処理時間によってほとんど変化しないが、軟化を始める時間は、溶体化処理時間が長いほうが早くなっている。長時間の溶体化処理によって溶質原子が固溶体内部で統計的に平衡分布に近付き、擬析出が、短時間に完成されるためであろう。

また、溶体化処理時間が長くなると、得られる最高硬度は低くなり結晶格子のじょう乱度の小なるものは過飽和固溶体の硬度が低くなることを示している。

ブリネルかたさ 135 以上を得た場合のマトリックスの組織は第 13 図のごとくで結晶粒界に共晶 Si がみられる。

7. 寸 法 安 定 性

ブリネルかたさ 135 以上をうるに最適な焼入、焼戻熱処理条件の決定にあたっては化合物の析出による寸法変化なるべく小さくなるように最高硬度または軟化を開始したところをもって熱処理条件とした。

決定された熱処理条件にもとづく試料の高温における寸法変化は第 2 表のとおりである。

試 料 寸 法	5φ×50mm
熱 処 理 条 件	510°C×3 hr 溶体化処理 70°C温水焼入 200°C×5 hr 焼戻処理
昇 温 速 度	2°C/min

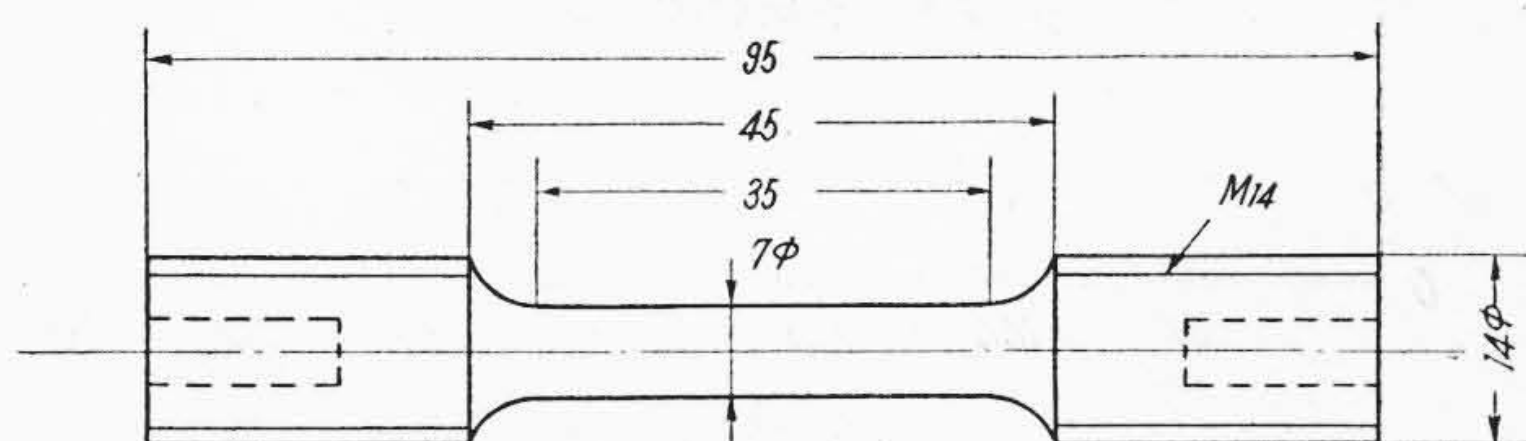
第2表 寸 法 安 定 性

試 験 温 度	200 °C	230 °C
所定温度で寸法が安定するまでの時間	40 min	90 min
所定温度における実体の伸び	3.9×10 ⁻³ mm	9.0×10 ⁻³ mm

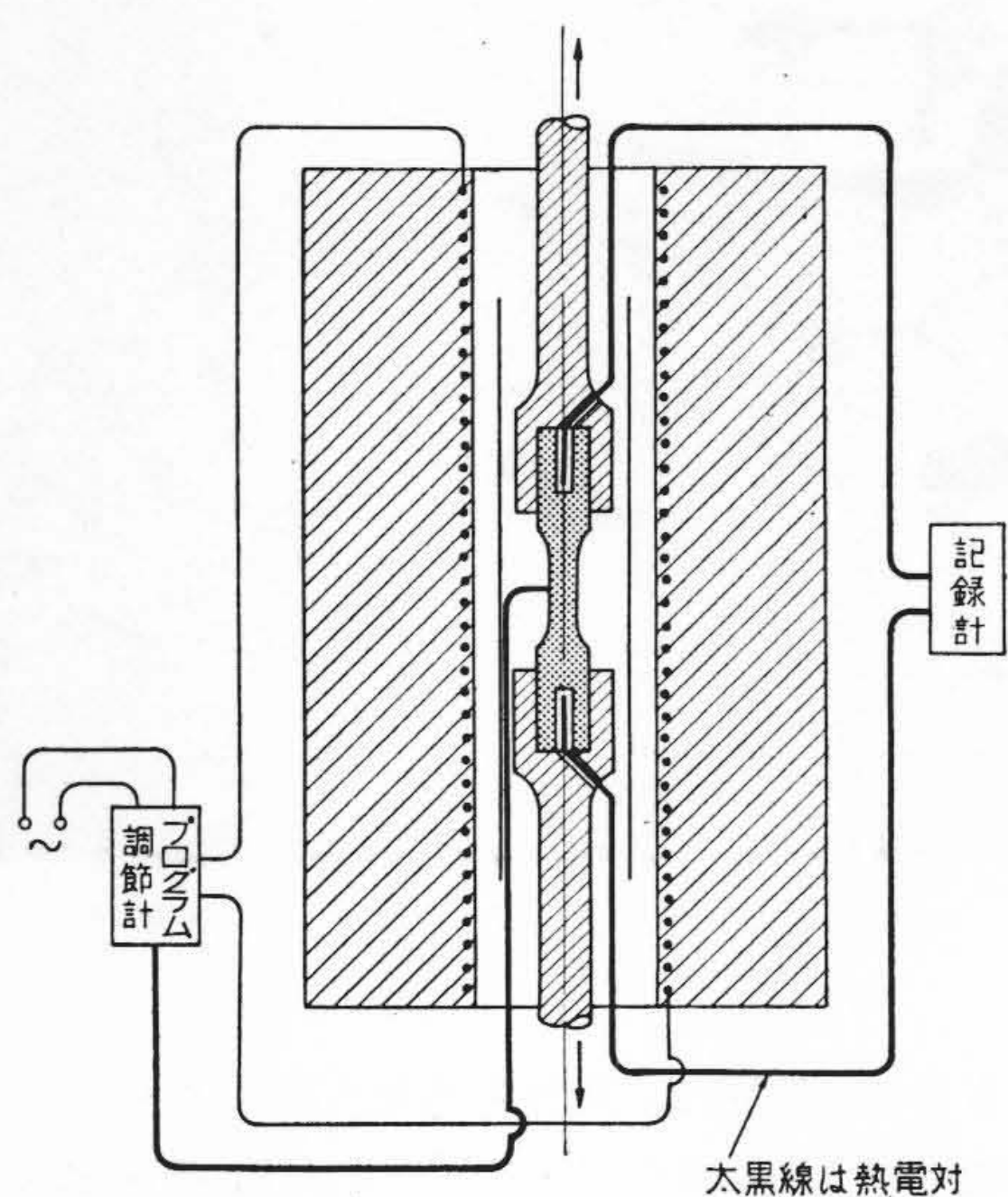
200°Cの試験温度は、再結晶温度以下であり、230°Cは再結晶温度を越えた温度であるから、再結晶による差が 200°C と 230°C の差となって現われている。

8. 機 械 的 性 質

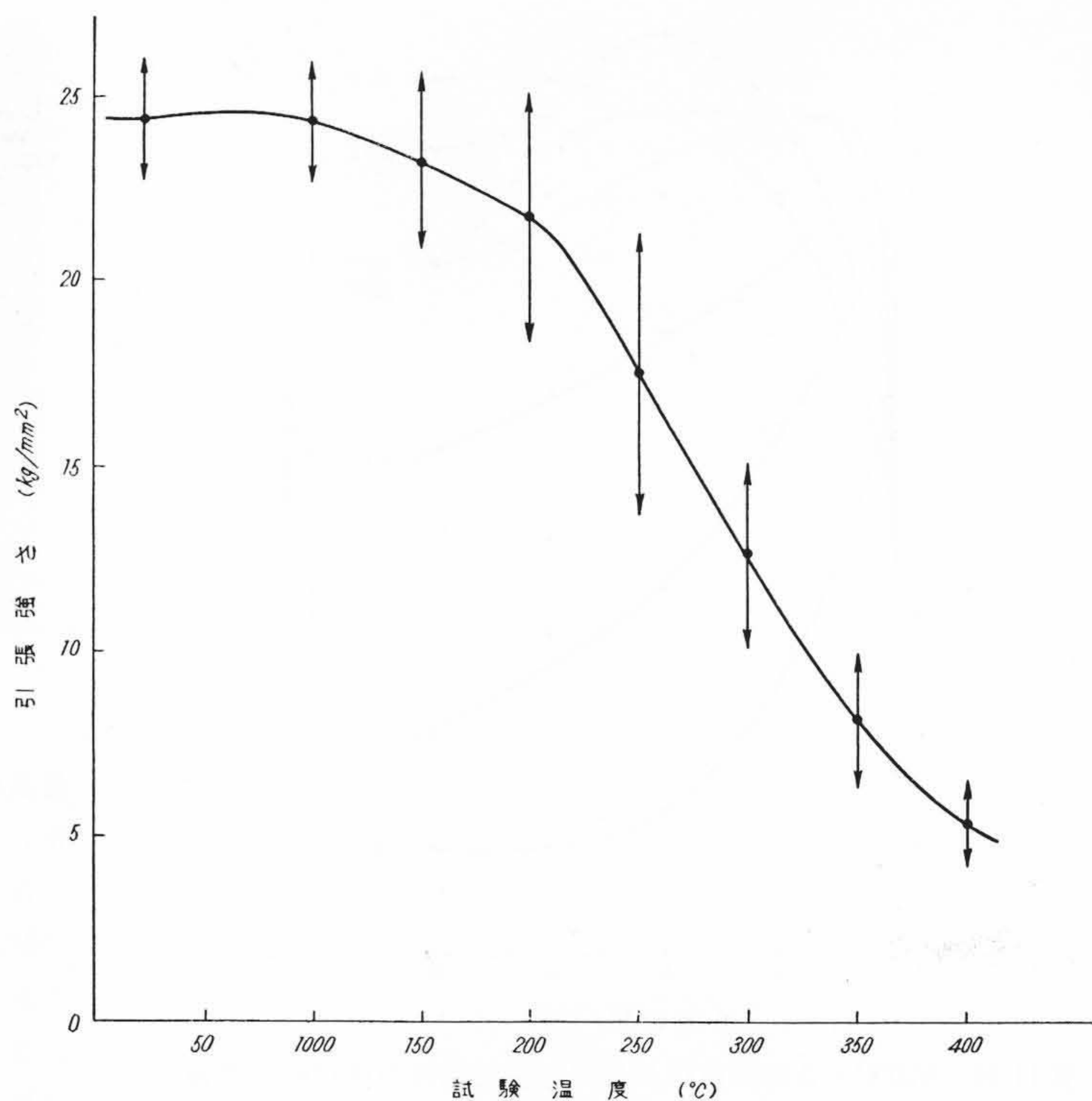
過共晶 Al-Si 合金の常温における強度は、ほかのアルミニウム合



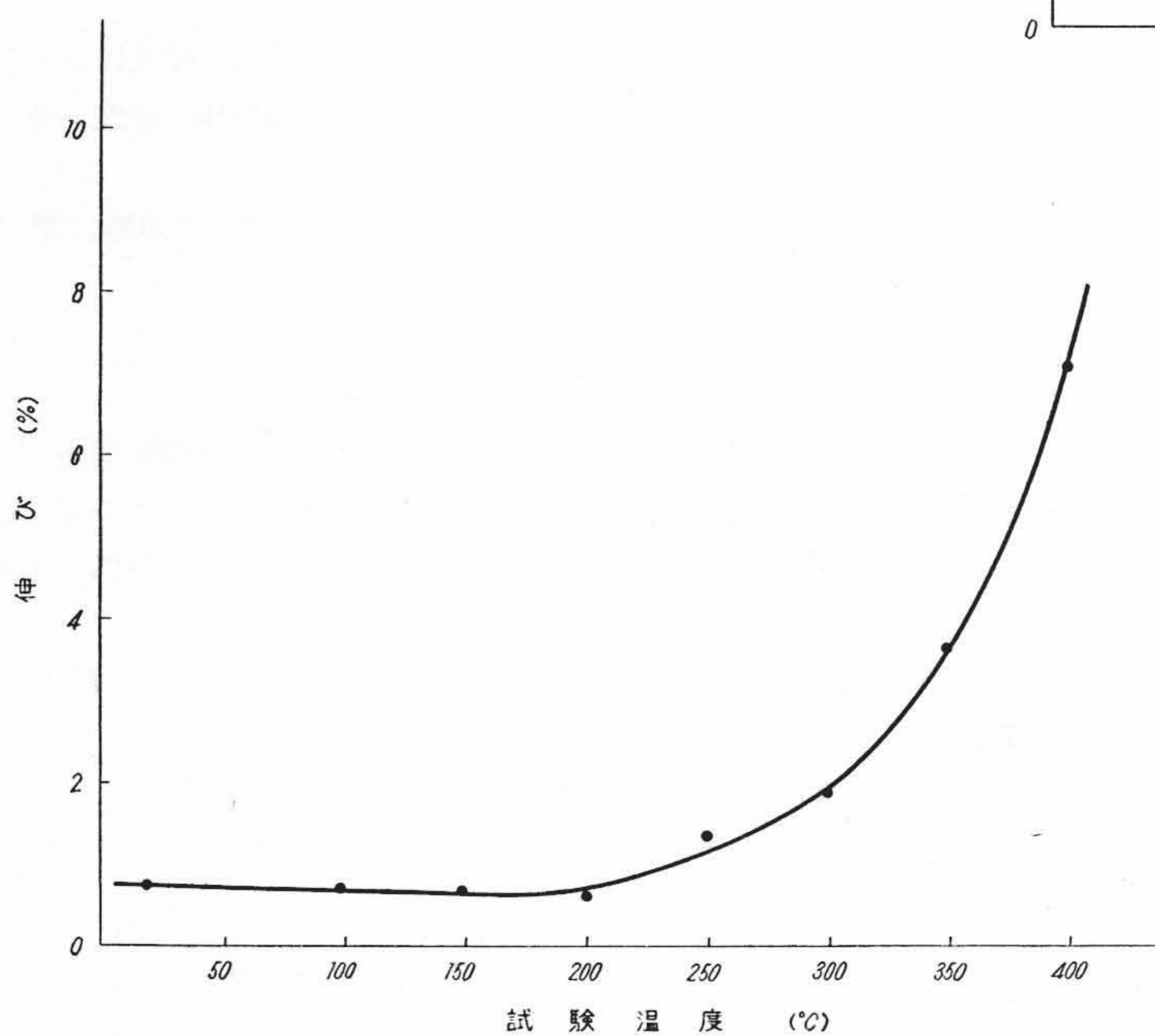
第14図 高温引張試験片



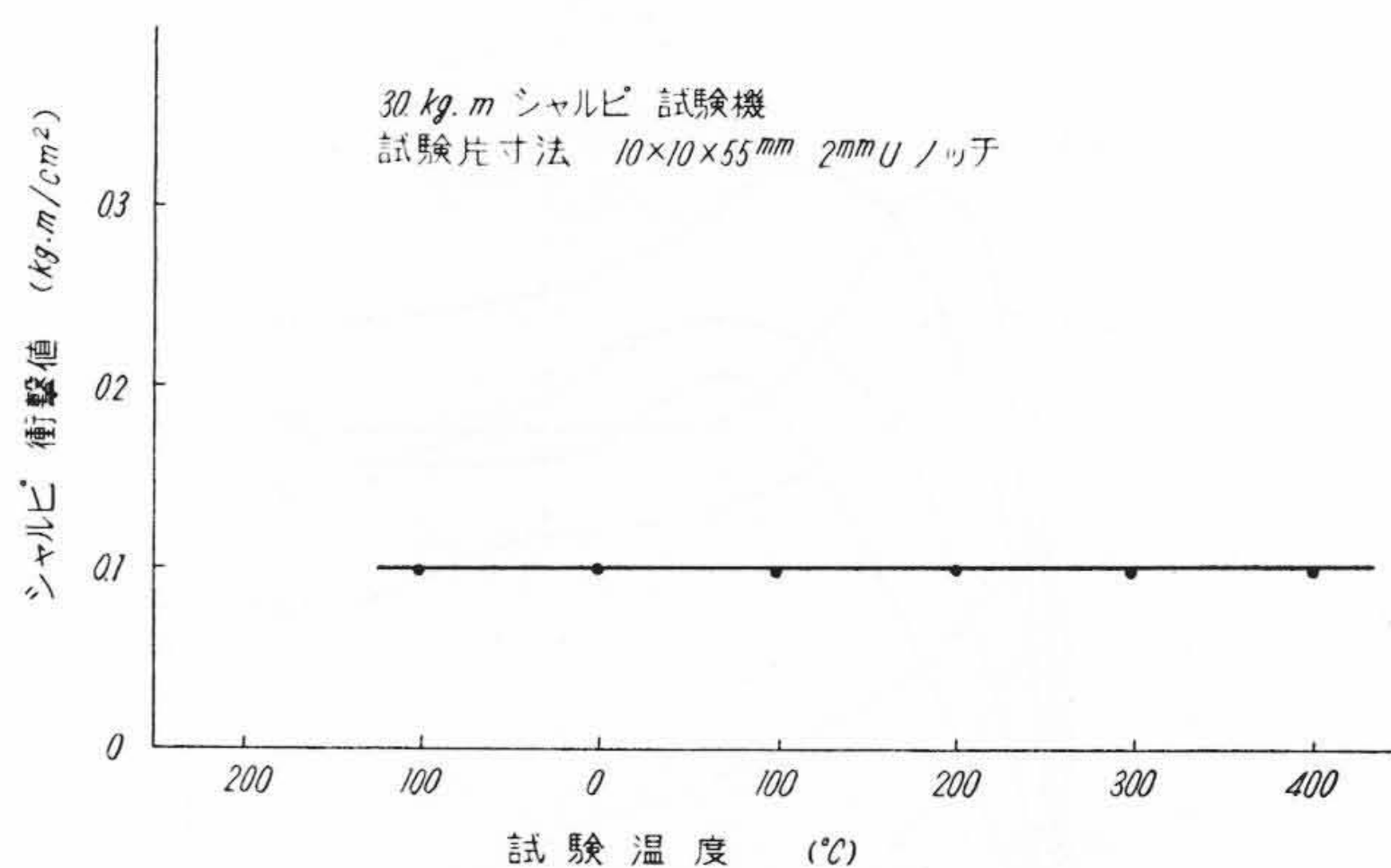
第 15 図 高温引張試験装置略図



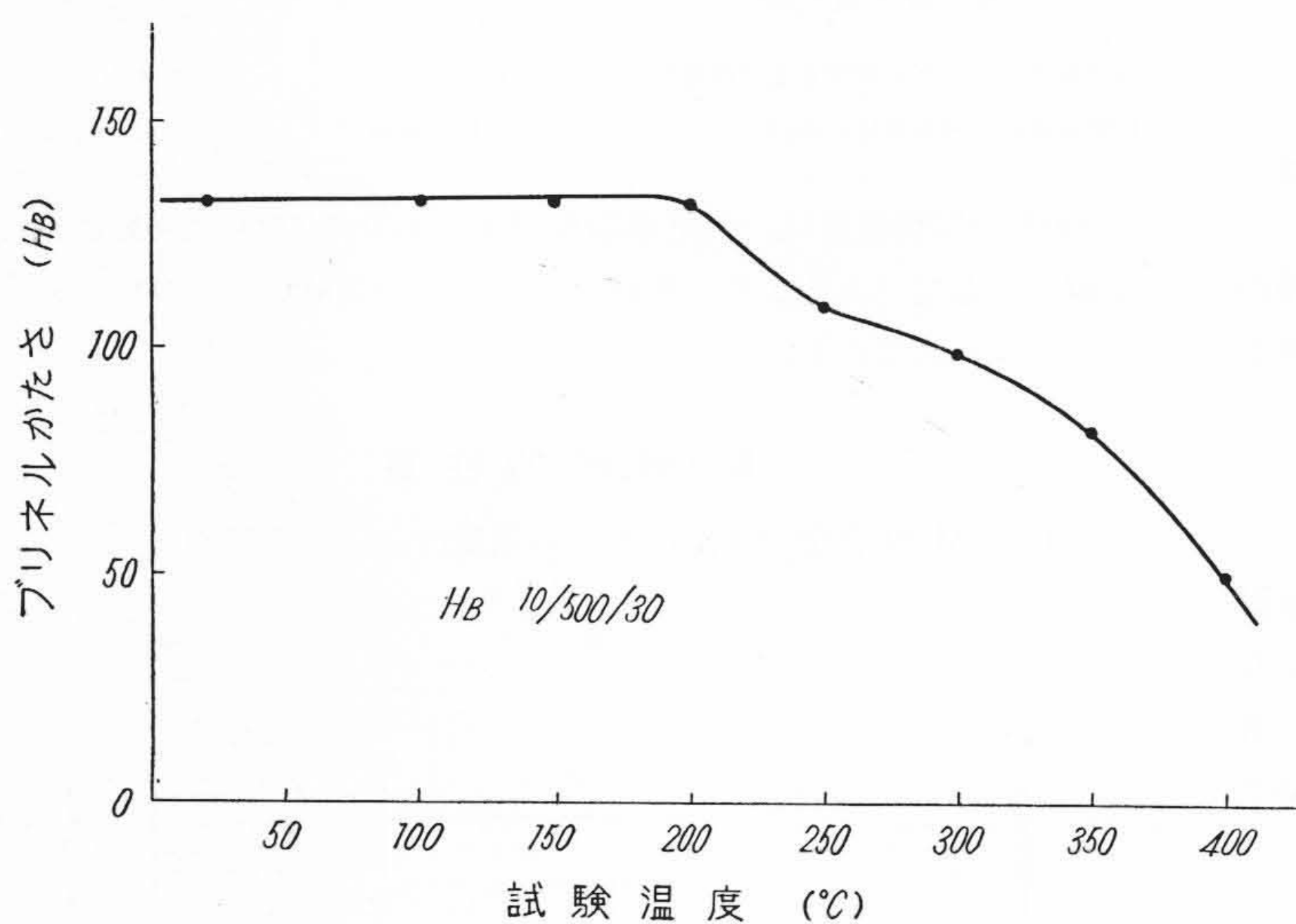
第 16 図 高 温 引 張 強 さ



第 17 図 高 温 伸 び 率



第 19 図 シャルピ衝撃値遷移曲線



第 18 図 高 温 ブ リ ネ ル か た さ

金に比して低い。しかし高温における強度低下の少ないのが特長である。

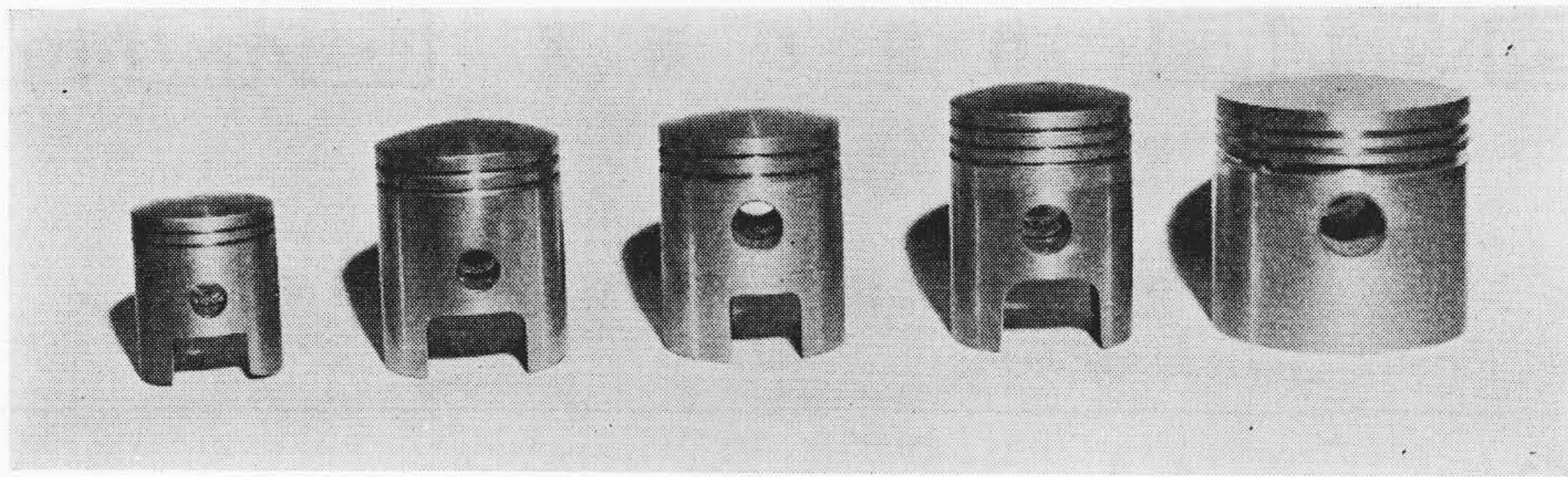
粗材は JIS H0321 試験片用金型に鋳造し熱処理後、所定寸法に加工したものである。試験片寸法は、第 14 図のように軽金属協会のアルミニウム合金高温試験用のもので、試験方法も第 15 図のように同協会の試験に準じて行った⁽⁸⁾。

昇温速度は 3°C/min、所定温度で 10 min 保持したのち、破断荷重を求め、同時に $1/100$ のダイヤルゲージによって伸びを求めた。第 16 図は、引張強さの平均値およびばらつき（2 s）であり、常温から 150°C までは、有意差がないが、それ以上の温度では、常温強度と差がある。ばらつきは、200°C、250°C において大きくこの温度が再結晶温度付近であるために微妙な温度差が再結晶の進行に影響を及ぼしたものであろう。

第 17 図は伸びの平均値である。

高温における引張強さ低下率は AC5A (Y合金) に匹敵し、絶対値は AC5A の約 80% であるが、ほかのいずれのアルミニウム合金よりも高温強度は大きい。

第 18 図は高温でのブリネルかたさ、第 19 図はシャルピ衝撃値の遷移曲線であり、衝撃値は非常に低い。



第20図 過共晶 Al-Si 合金による製品

第3表 高温強さ低下率

合金別	試験温度	200 °C	300 °C	400 °C
過共晶 Al-Si 合金-T7		0.90	0.52	0.22
AC4A-T6		0.71	0.23	0.08
AC5A-T6		0.88	0.57	0.21
AC8A-T6		0.77	0.31	0.09
AC8B-T6		0.77	0.37	0.11

〔注〕
 $\text{高温強さ低下率} = \frac{\text{高温強さ}}{\text{常温強さ}}$

9. 物理的性質 (金型, T7)

比 重 (25°C)	2.68
比 熱	0.24~0.27 cal/g °C
熱伝導率 (25°C)	0.27 cal/cm sec °C
熱膨脹係数 (25~100°C)	17×10^{-6} cm/cm °C
(25~200°C)	17×10^{-6} cm/cm °C
(25~300°C)	18×10^{-6} cm/cm °C

10. 結 言

初晶 Si を微細化し均一に分散させた過共晶 Al-Si 合金は優秀な

仕上面をうることができる。すべての性質が初晶 Si の微細化と偏析のないことを前提としているといっても過言ではないほど、初晶 Si の大きさは重要である。

この合金で作成したピストンは現在主として空冷2サイクルエンジンに使用されているがこの合金は耐摩耗性がすぐれていることからピストンのみならずシリンダブロック、ブレーキドラム、クラッチなどにも使用され始め需要の開拓が進められている。

参 考 文 献

- (1) C. Mascré: Fondrie Vol. 91 (1953) p. 356
- (2) Thurry, Kessler: Light Metals Vol. (1956) No. 7 p. 225
- (3) Kessler, Winterstein: Z. für Metalkunde Vol. 47 (1956) p. 97
- (4) 大日方: 金属 Vol. 29 (1959) p. 649
- (5) Wagner: Metal Progrese Vol. 69 (1956) June p. 691
- (6) Kissling, Ticky: Modern Casting Vol. 35 (1959) No. 6 p. 67
- (7) Kuemmerle: Metal Vol. 11 (1957) p. 848
- (8) 軽金属協会: アルミニウム合金鋳物 (1958)

1961 日 立 No. 4

- ◎猫のどの弁.....サトウ・ハチロー
- ◎完 成 近 い 国 産 1 号 炉
- ◎全 自 動 運 転 の 立 坑 巻
- ◎冷 蔵 庫 の あ る 暮 し
- ◎音 の バ ラ ン ス と 使 い 勝 手
- ◎観 世 より と より 線 の 功 徳
- ◎明日への道標(超高压送電に活躍する 260,000 kVA 超
高压変圧器と 15,000 kVA 負荷時電圧調整器)
- ◎自 動 車 用 エ レ ベ ー タ
- ◎日 立 だ よ り
- ◎函 館 一 札 幌 マ イ ク ロ 通 信
- ◎J マ ー ク の 電 気 洗 濯 機 と は

発行所 日立評論社
 東京都千代田区丸の内1丁目4番地
 振替口座東京71824番
 取次店 株式会社オーム社書店
 東京都千代田区神田錦町3の1
 振替口座東京20018番

Vol. 22 日立造船技報 No. 1
目 次

- ◎調質鋼熔接部のき裂伝ば(播)特性に関する実験
- ◎逆ひずみ、拘束度と角変形および薄板における変形について
- ◎直交異方性板理論による道路橋鋼床板の実験的研究
- ◎鋼材切削における正面フライスカッタの工具寿命について
- ◎テレモータの性能に関する実験的研究
- ◎原油および重油の放射線損傷の研究
- ◎高压水門ビ(扉)に加わる水圧力に関する実験的研究
- ◎船体部現図配管法について
- ◎ルルギ Dewight-Lloyd 焼結機について

本誌につきましての御照会は下記発行所へ
 お願いいたします。

日立造船株式会社技術研究所
 大阪市此花区桜島北之町



最近登録された日立製作所の実用新案

登録番号	名 称	氏 名	登録年月日	登録番号	名 称	氏 名	登録年月日
522701	遮断器手動操作装置	田所武夫	35. 10. 31	522723	鉄道車両の先台車用コロ軸箱	関野陽朝	35. 10. 31
522702	高圧気中遮断器	田所武夫	"	522729	ジブコールカッタにおけるジブのロックン	野井 兄幸	"
522743	立軸ペルトン水車	井原一政	"	522736	石炭鉱石などの移送装置	油部田崎	"
522747	ニードル操作装置	井原一政	"	522753	調整形オリフイス	森渡村山	"
522755	原子炉制御棒	松江梅沢	"	522758	負荷表示装置付コールカッタ	木山暮内	"
522757	整流器用冷却ファン着脱装置	平野重守	"	522761	過負荷防止装置を有するカップリング	青山木田	"
522771	側路管管接	篠原川藤	"	522762	コールカッタ	近藤幸	"
522687	交流電気車用変圧器の圧力調整装置	前斎山酒	"	522765	旋回体のケーブル給電装置	青森端山	"
522689	低インダクタンス蓄電器	石大中	"	522768	ウオータハンマ防止装置付チェックバルブ	石山暮野	"
522691	電磁接触器の固定接触子取付装置	中島塚石	"	522769	排砂装置付チェックバルブ	木岸野村	"
522695	配電函における裏面板取付装置	石大野	"	522773	石炭鉱石などの移送装置	村山崎	"
522696	電磁接触器隔壁取付装置	湯沢川	"	522692	ホイス用リミットスイッチ操作桿	古徳市永	"
522697	数段折開閉扉用蝶番	羽野滑	"	522710	光電光度計メーター保護装置	小山崎	"
522703	断路器の接地ブレード取付装置	安藤川	"	522712	遠心分離機回転筒	川崎江	"
522704	引出形遮断器の断路部鎖錠装置	羽野滑	"	522713	遠心分離機回転筒	横門馬	"
522705	大電流断路装置接触部	安藤川	"	522714	遠心分離機回転筒	北齋川	"
522706	断路器の接地装置	額斎藤	"	522716	警報装置	川崎江	"
522707	断路器接地装置	斎藤野	"	522717	遠心分離機回転筒	小野寺	"
522734	同期電動機起動装置	仲内毛	"	522719	遠心分離機回転筒	斎藤致	"
522737	断路器固定接触子	大市齋	"	522726	警報接点付膜式指示計	鈴木岡	"
522738	装甲形配電盤の安全装置	前川藤	"	522731	水素放電管放電装置	中村諸	"
522739	油入コンデンサ	加坂川	"	522732	三相積算電力計	宝野谷	"
522744	交流電気車両用変圧器冷却装置	前山堀	"	522733	積算電力計軸受装置	小沢内	"
522745	直線切形断路器可動接触杆案内装置	前山堀	"	522740	気機用端子箱	小沢内	"
522746	交流電圧用変圧器	中口沢	"	522741	電機用端子箱	小沢内	"
522752	星形接続三相蓄電器	川口沢	"	522748	遠隔測定装置	小沢内	"
522767	扉固定装置	森山井	"	522749	分圧器	小沢内	"
522774	整流回路における交流計器用変流器	酒井井	"	522751	絶縁および導体抵抗計	安田川	"
522776	押ボタンスイッチ調整装置	酒井井	"	522759	洗濯槽水位調整装置	安田川	"
522777	変圧器遮音壁	沢宮後	"	522760	濃度測定装置	安田川	"
522780	変圧器端子套管取付装置	沢宮後	"	522763	真空掃除機集じん袋取付装置	安田川	"
522781	変圧器バースチングチューブ取付装置	沢宮後	"	522764	真空掃除機送風装置	安田川	"
522782	移動変電所用密閉形変圧器	沢宮後	"	522775	管接	安田川	"
522786	装甲形配電盤における母線切替装置	中野武	"	522778	電気洗濯機注水および排水装置	安田川	"
522693	管接	武居居	"	522779	遠隔指示積算電力指装置	鈴川木	"
522694	管接	武居居	"	522783	気機用端子箱	湯沢内	"
522709	弾性車輪	村小永	"	522784	気機用端子箱	伊藤田	"
522711	軌条塗油装置	弘井	"	522788	ネジ伝動装置	伊藤田	"
522718	折たたみテーブル	斎藤節	"	522708	油浸形高圧整流管の冷却兼絶縁装置	伊藤田	"
522720	車両用幌装置	斎藤節	"	522785	電気ポットのサーモスタット取付装置	伊藤田	"
522725	弾性車輪	斎藤節	"	522722	管形放熱器	伊藤田	"
522742	縮付具	斎藤節	"	522770	微動ダイヤル装置	伊藤田	"
522754	秤量車の排出表示装置	斎藤節	"	522688	ダイヤル装置	伊藤田	"
522772	落込式大物車	斎藤節	"	522721	アナログ計算機演算回路制御装置	伊藤田	"
522686	電気車制御装置	古上森	"	522724	継電器	伊藤田	"
522690	液体接手を使用した駆動装置	森脇高	"	522727	連接形通信装置	伊藤田	"
522698	電磁空気式単位開閉器	高橋村	"	522756	回転陽極X線管の陽極	伊藤田	"
522699	単位開閉器空気力操作装置	高橋村	"	522728	絶縁ワニスクロス	伊藤田	"
522700	電磁空気式単位開閉器	高橋村	"	522715	エレクトロルミネセンス標示板	伊藤田	"
				522730	ガラス蓋付蛍光灯器具	伊藤田	"
				522735	電球などの包装用サック	伊藤田	"
				522750	蛍光灯用ルーバ	伊藤田	"