

高速ターボ冷凍機用インペラの精密鑄造

Precision Casting of Impeller of Centrifugal Refrigerator

桑 野 俊 一* 上 田 博**
Shun'ichi Kuwano Hiroshi Ueda

要 旨

風水力装置は機械技術の急速な発展に伴い、高速小形化される傾向がきわめて急である。このために鑄造品に対する要望も、材力的には強靱(きょうじん)なものが、また寸法精度も性能のばらつきに大きく現われるためより高度なものが要求される。

今回、日立製作所で開発した高速ターボ冷凍機用各種インペラの鑄造を目的として、高力アルミニウム合金鑄物の精密鑄造品を鑄造する技術を開発した。

その要点は鑄造品の形状、肉厚に応じて、石膏(セッコウ)鑄型を主体として各種の鑄型と組み合わせることによって指向性凝固を容易にしたことである。これによって健全な鑄造品が得られることを確認した。この結果、薄肉鑄造品で材力的には実体強さが約 30 kg/mm^2 、寸法精度が $\pm 0.20 \text{ mm}$ 、鑄はだが $10 \sim 15 \text{ S}$ 程度の高力精密鑄造品を安定して得ることができた。

1. 緒 言

最近のアルミニウム合金鑄物の需要の動向は、宇宙開発および機械技術の発達に伴い、超薄肉化による軽量化と、寸法精度の向上が要求されている。また回転部品はいずれも高速化の傾向がみられ、鑄造品の材力的な強靱化が要求されている。

アルミニウム合金鑄物の精密鑄造法として用いられている方法には、ロストワックス法、ショウプロセス、石膏鑄型法および金型鑄造法などがある。今回開発の対象とした製品は冷凍機、流体変速機に用いられるインペラ、ステータなどである。これらはいずれも形状が複雑で、最小肉厚は 1 mm 、寸法精度は $\pm 0.25 \text{ mm}$ 、鑄はだのあらさは 10 S が要求されている。また強度的には非常に高い実体強度が要求されており、したがって鑄造品の欠陥は内外部ともに微少なものとせざるを得ないものである。

この鑄造品を鑄造するにあたり適切な鑄造法を検討した結果、羽根の形状が三次元であるため金型鑄造法は利用できず、またロストワックス法、ショウプロセスも冷却速度の関係で材力が低下する。また鑄造後の後処理の問題があり利用できない。石膏鑄造法もそのままで利用することは無理であると判断した。

したがって石膏鑄型の性質をじっくりと検討し、その利用を具体化した。石膏鑄型の欠点は、溶湯が凝固する際に熱伝導度が悪いため冷却速度が遅く、結晶粒度が粗大化され、材力の低下が避けがたいことである。筆者らはこの欠点を改善する目的で、石膏鑄型と他の鑄型との組み合わせによって、凝固時の冷却速度を大きくするとともに、温度こう配が指向性凝固を可能にするよう鑄造品の肉厚を調整することによってこの欠点を解決した。

この結果、鑄造品の寸法精度は $\pm 0.25 \text{ mm}$ 、鑄はだのあらさは $7 \sim 10 \text{ S}$ 、実体の強さも要求をじっくりと満足する鑄造品を安定して得ることができた。これらの鑄造品はいずれも高速回転体として用いられ、周速 $250 \sim 300 \text{ m/s}$ に耐えるものである。

以下にこの精密鑄造法の開発についての概略を述べる。

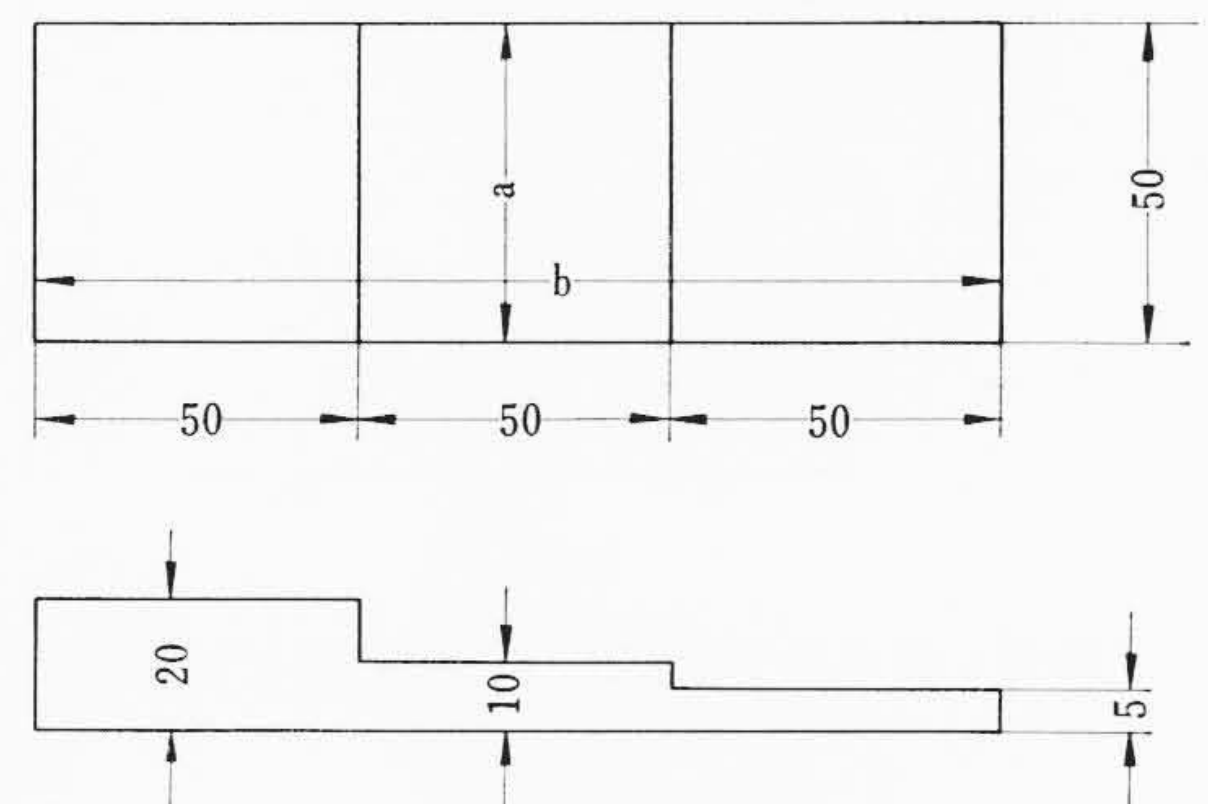
2. 石膏鑄型の基本的性質

2.1 石膏の選定

現在使用されている鑄型用石膏としては、それぞれ異なった特長を持つものが数種ある。選定の対象とした石膏は国内製品4種、外

* 日立製作所亀有工場

** 日立製作所機械研究所



(階段状試験片)

図1 鑄造用試験片

国製品2種の6種類で、いずれも発泡(はっほう)性の鑄型用石膏である。これらを用いて予備試験を行なった結果、アメリカ製の石膏を採用することとした。

2.2 基礎的性質

鑄造に最も適した石膏鑄型を造型するための条件を決める目的で、基礎的な性質を調べた。実験は混水量、攪拌(かくはん)条件による容積増加、流動性、鑄型の強さ、鑄型の乾燥、吸湿および鑄造品の寸法精度、鑄はだのあらさなどについて行なった。

2.2.1 試験片の形状

試験片の形状は、一般に石膏用の特殊な形状をしたものもあるが、砂型の鑄型と比較検討ができるようにすべて AFS(アメリカ鑄物協会)に準じたものを用いた。測定値はいずれも試験片3個の平均値を示している。

試験片(A) $50 \text{ mm} \phi \times 50 \text{ mm}$

抗圧力、通気度、乾燥時間、吸湿量の測定用

試験片(B) $25 \text{ mm} \square \times 210 \text{ mm}$

抗折強度測定用

試験片(C) 図1に示す階段状試験片で鑄造試験に用いられた。

2.2.2 実験の方法

(1) 石膏を攪拌する装置は図2に示すような $110 \text{ mm} \phi$ のゴム製円盤を2枚重ねて固定したものを、卓上ボール盤に取り付けて使用した。

(2) 混水量は70%、75%、80%の3条件とし、水温はいずれも 20°C である。

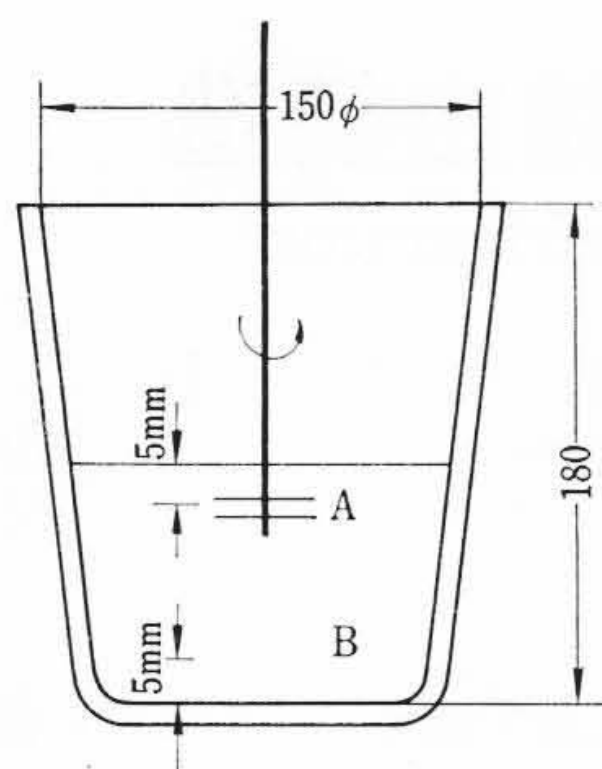


図2 石膏攪拌装置

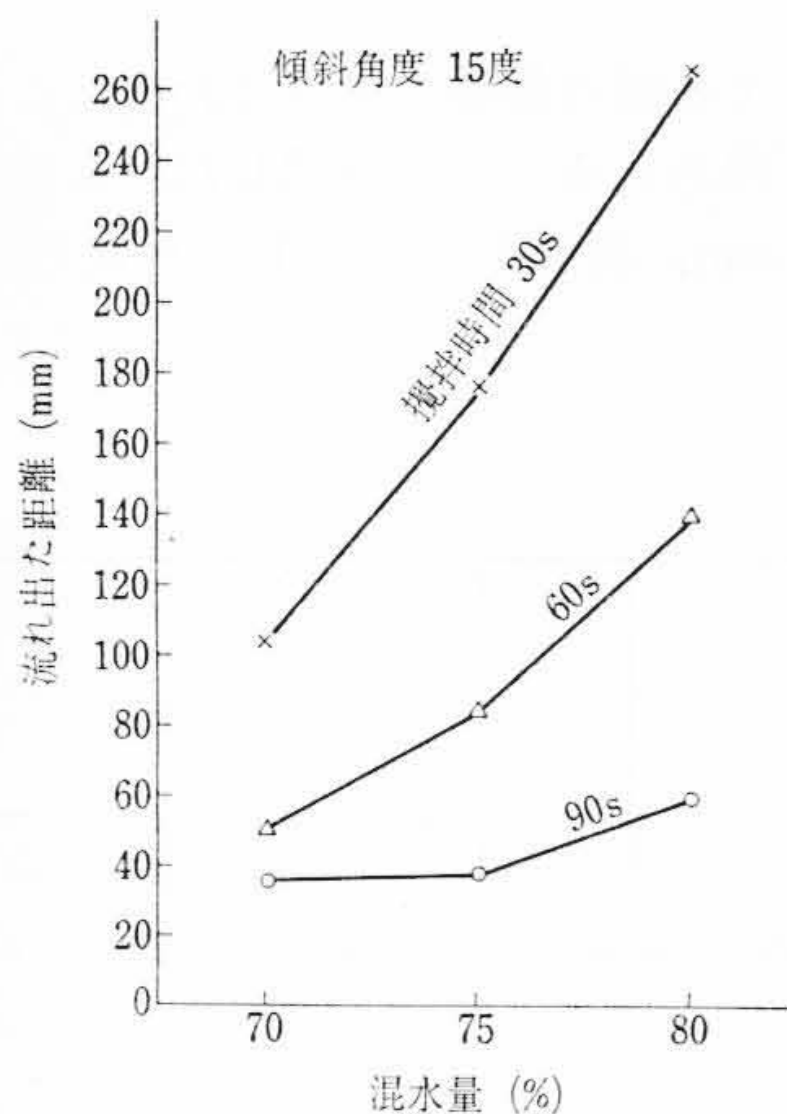


図3 混水量と攪拌時間の流動性との関係

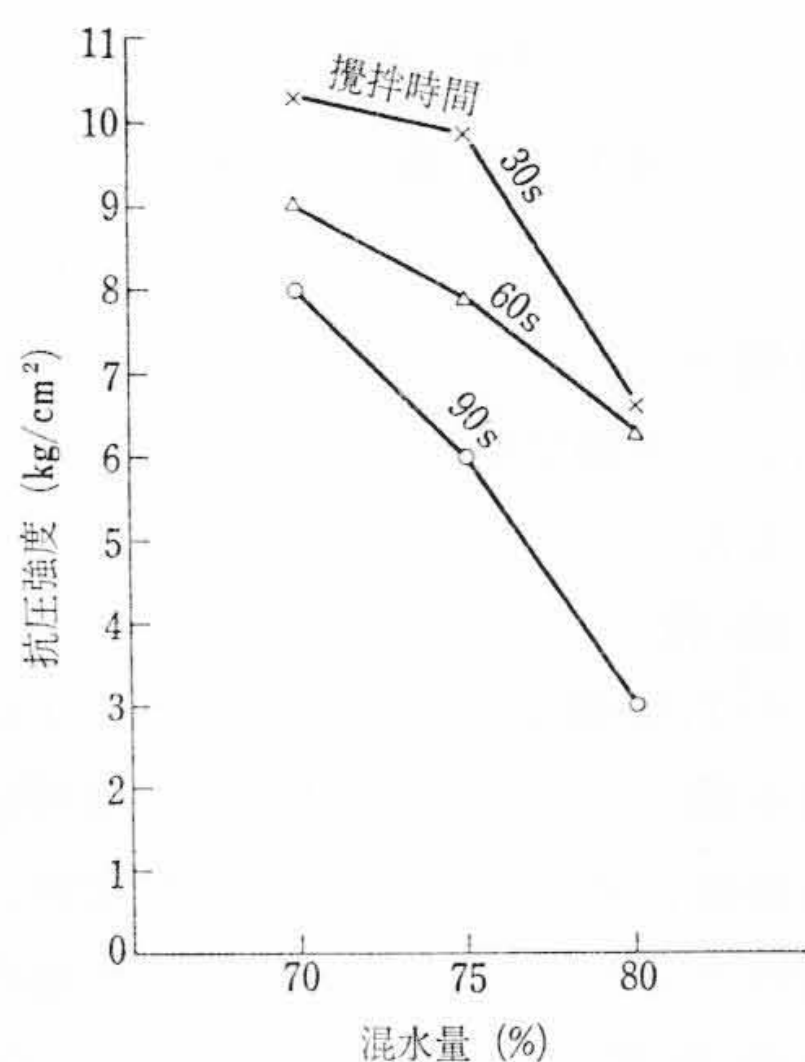


図4 混水量と攪拌時間の湿態強度の関係

- (3) 攪拌条件は、いずれも所定の容器に規定量の水を入れ、石膏を秤量（ひょうりょう）して散布する。30秒放置後、予備攪拌を20秒行ない、攪拌装置によって30秒、60秒、90秒攪拌とした。この場合、いずれも終わりの15秒は鎮静時間とした。

攪拌は図2に示す水面下5mmのA点で行なわれ、水底から15mmのB点まで円盤を下げて鎮静を行なった。

- (4) 乾燥条件としては、いずれも電気炉を用い、炉内温度は $200 \pm 5^\circ\text{C}$ で、保持時間を20時間とした。

2.2.3 実験の結果

(1) 流動性

傾斜式流動性測定装置を用いて流動性の測定を行なった。傾斜角度は15度である。その結果は図3に示すとおりである。流動

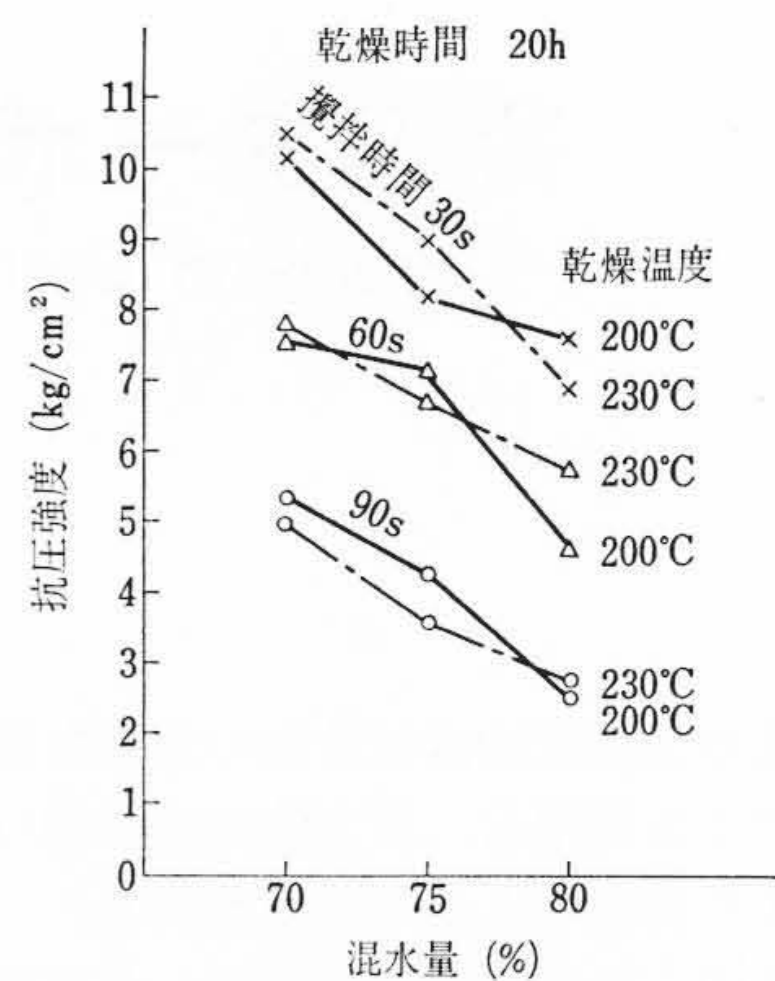


図5 混水量と攪拌時間の乾態抗圧強度との関係

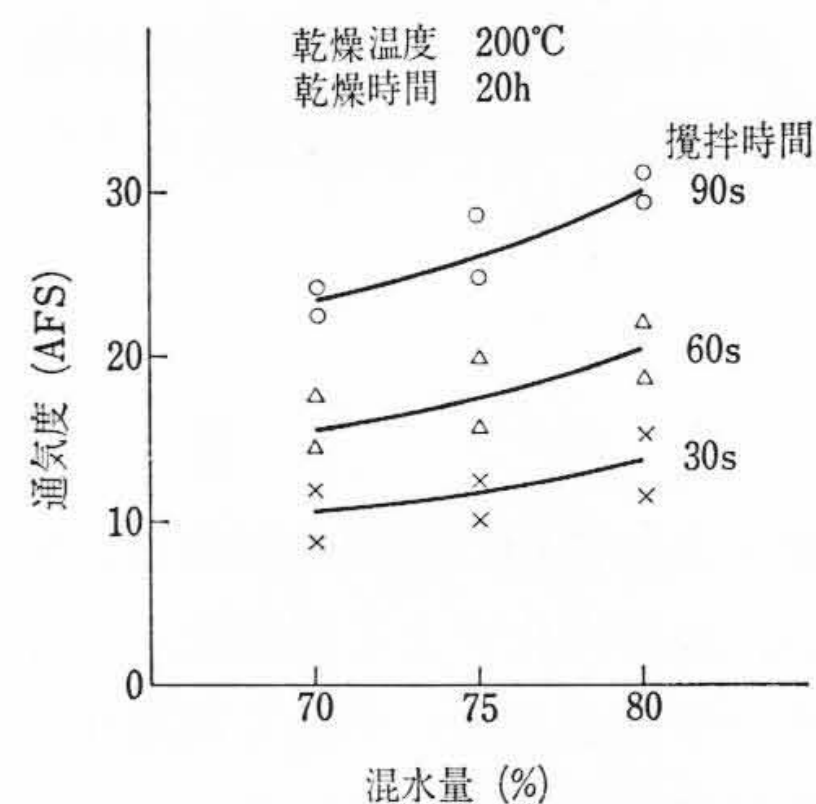


図6 混水量と攪拌時間の通気度の関係

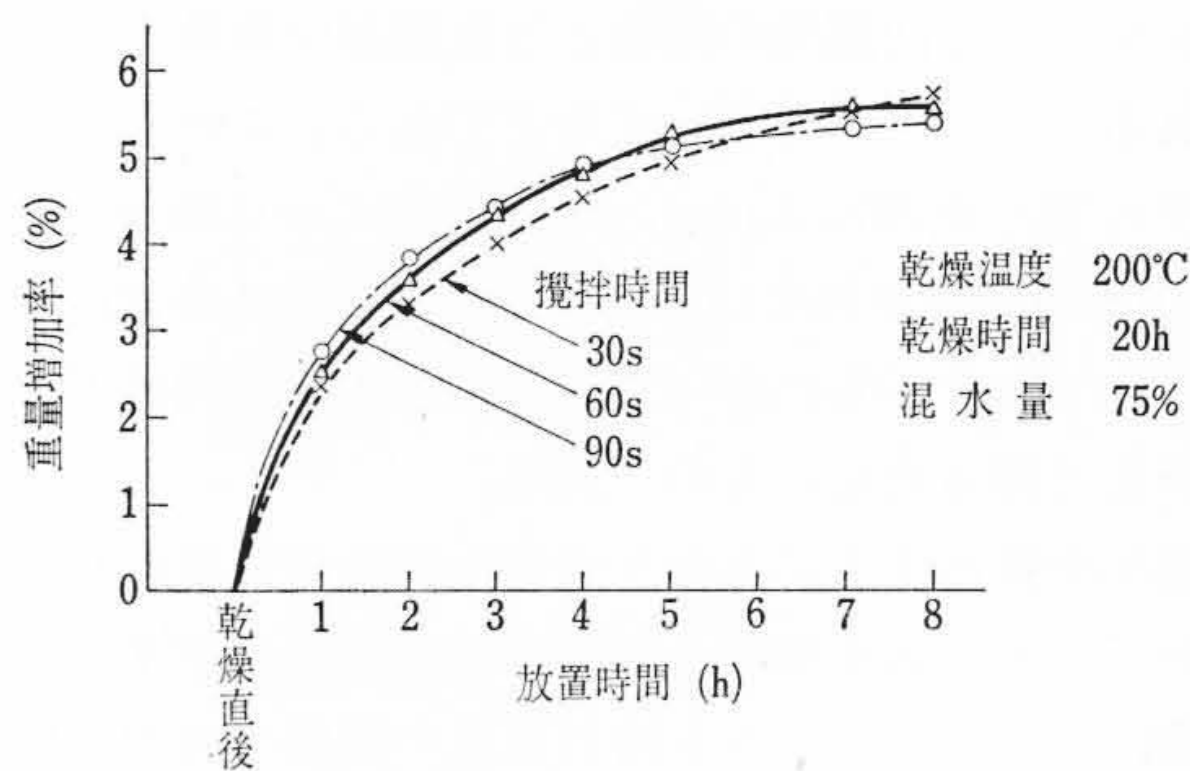


図7 乾燥した石膏試験片の吸湿

性は混水量が増加するとよくなり、攪拌時間が長くなると低下する。

(2) 抗圧強度

湿態抗圧強度は、試験片を造型後25時間自然乾燥を行なったものについて測定された。その結果は図4に示すとおりである。またこの試験片を 200°C および 230°C で20時間乾燥したのち測定した結果は図5に示すとおりである。湿態抗圧強度は混水量が多く、攪拌時間が長くなるほど低下する。乾態抗圧力は乾燥温度による変化はほとんどなく、湿態の場合と全く同じ傾向を示した。

(3) 通気度

試験片はいずれも造型後25時間自然乾燥されたのち、乾燥された。試験はAFS 鋳物砂通気度試験機によって行なわれた。その結果は図6に示すとおりである。通気後は混水量が多く、攪拌時間が長いものほど高くなっている。

(4) 吸湿量

乾燥後の試験片について吸湿量を測定した。まず試験片を乾燥後、大気中に放置し、一定時間ごとに秤量したのである。このときの平均室温は 29°C で、湿度は71%であった。その結果は図7

表 1 石膏鑄型に鑄造した AC2A の収縮率

混水量 (%)	攪拌時間 (s)	A 部 (mm)			B 部 (mm)		
		模 型 寸 法	鑄造同 寸 法	収縮率 (%)	模 型 寸 法	鑄造品 寸 法	収縮率 (%)
75	60	50.25	49.75	0.99	151.00	149.35	1.09
80	60	50.25	49.80	0.89	151.00	149.45	1.02

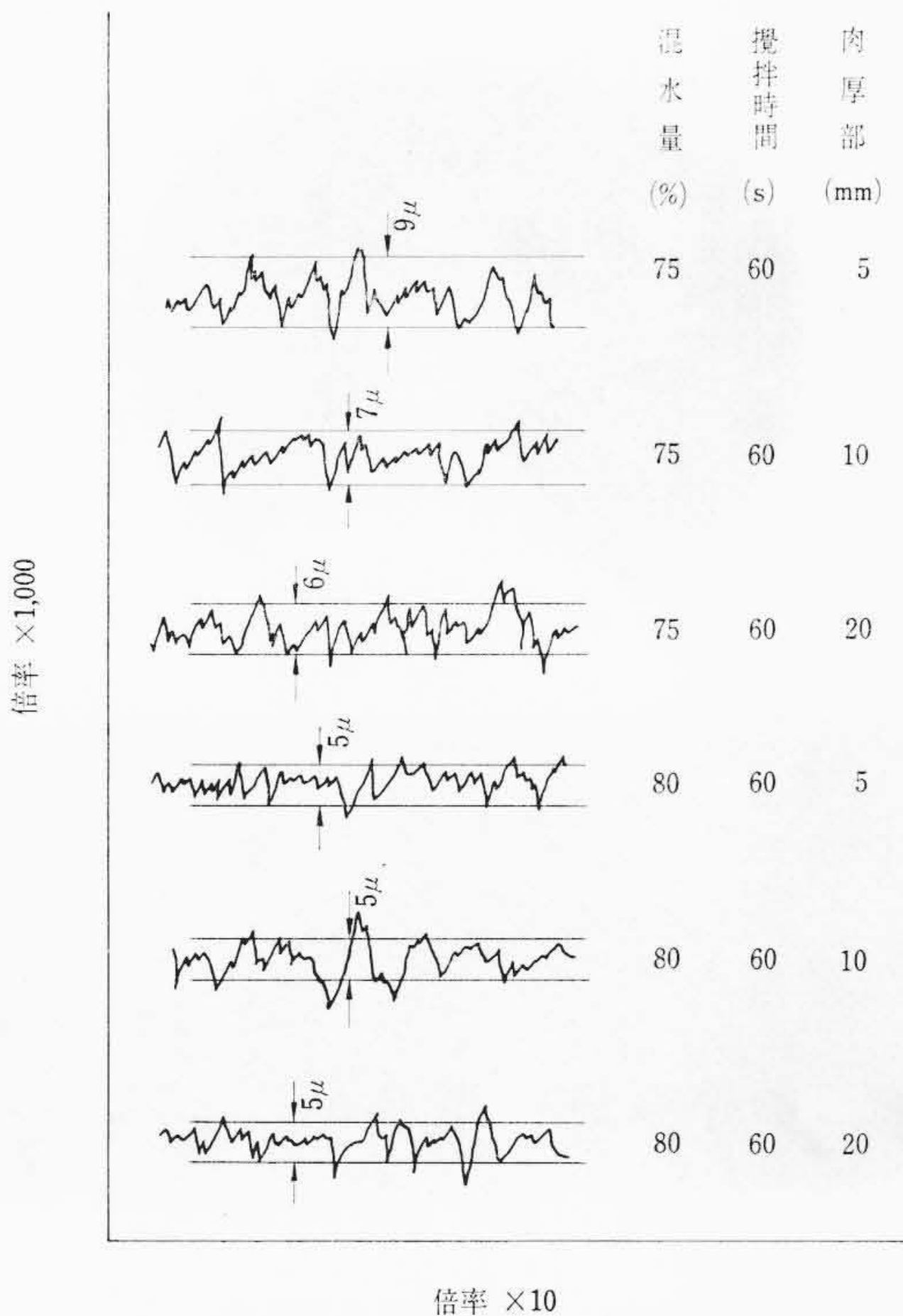


図 8 鑄はだあらさ測定結果

に示すとおりである。吸湿量はきわめて多く、1時間で約2.5%以上であった。

(5) 鑄造試験

鑄造試験は図1に示す階段状試験片を用いて行なわれた。鑄型の条件としては、混水量は75%、80%で、攪拌時間はいずれも60秒である。乾燥温度は200℃、時間は20時間である。注湯は鑄型を炉から出してから20分以内に行なわれた。実験に用いた材質はAC2Aで、鑄込温度は670~700℃である。

これによって鑄造した試験片について寸法を測定し、鑄造品の収縮量を調査するとともに、鑄はだのあらさを測定した。寸法の測定結果は表1に、鑄はだの測定結果は図8に示すとおりである。寸法の収縮量は、約1.0%で一般の砂型に比べて小さい。これは注湯時の鑄型温度が高いためである。

鑄はだのあらさは5~10S程度で、鑄型の造型条件を確立することにより、きわめて平滑な鑄はだを安定して得ることができた。

3. 石膏鑄型による精密鑄造法

鑄造品の代表的なものの形状は次に示すとおりである。このインペラは高速(20,000~30,000 rpm)で使用される曲面が、三次元の羽根を持つフルシェラウド形のインペラである。その概略寸法は、羽根部の肉厚が1mm、シェラウドの厚さが約2~4mmである。また要求される寸法精度は、性能のばらつきを最小限に保つため各部ともに±0.25mm、鑄はだのあらさは10S以下となっている。材力的には実体強度が25kg/mm²以上で、鑄造品の欠陥は、X線透過試

表 2 鑄造品の機械的性質に及ぼす加圧空気の脱湿処理の効果

試料 No.	処 理 前				処 理 後			
	露 点 (℃)	湿 分 (%)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	露 点 (℃)	湿 分 (%)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
1	-1.0 ~-0.6	0.7 ~0.8	31.9	3.1	-32.0 ~-30.5	0.05 ~0.06	31.2	3.4
			27.1	3.4			30.6	3.4
2	-5.0 ~-3.0	0.6 ~0.7	31.8	2.6	-32.0 ~-31.0	0.05 ~0.06	29.7	4.0
			27.4	2.6			28.8	3.6
3	-9.0 ~-7.0	0.5 ~0.6	27.1	3.4	-32.0 ~-30.5	0.05 ~0.06	31.1	3.6
			27.0	3.0			31.4	4.0
4	-11.5~ -10.8	0.4 ~0.5	28.1	3.6	-32.5 ~-31.0	0.05 ~0.06	29.8	4.0
			26.3	2.4			30.0	3.6
平 均			28.3	3.0	平 均		30.3	3.7

表 3 インペラ出口幅および
出口部羽根ピッチ寸法精度

位 置	W	P
最大誤差	0.15	0.30
寸法精度	±0.075	±0.15

験およびカラーチェックにより内外部とも微少な欠陥も許されないものである。

筆者らは石膏鑄型の基礎実験の結果と、各種鑄型について凝固速度を予備実験で調査した結果に基づき、設計者と協議を重ね、羽根部の肉厚を1mmとした場合、指向性凝固が可能なように各部の肉厚を決定した。

ここで最も重点を置いて取り上げた問題点は、薄肉品であるためマイクロポロシティなどの微細欠陥でも強度の低下率が大い。したがって密度の高い健全な鑄造品を得ることである。このために鑄造方案、溶湯処理、鑄込方法については予備実験を行ないじゅうぶんな検討を加えた。

3.1 鑄型条件

鑄造品の実体強さを向上するため、鑄造品の形状、大きさ、肉厚および肉厚差によって鑄型の組合せを決めた。たとえば石膏鑄型のみ、石膏鑄型とジルコンサンド鑄型、石膏鑄型と金型などの組合せによって指向性凝固をじゅうぶんに行なうことである。

3.2 鑄造条件

(1) 鑄造品の材質

肉厚がきわめて薄いため、使用される材質としては、流動性がよく、酸化の度合いの少ないJIS AC2A系およびAC4A系のものを用いた。また使用目的に適した熱処理を行なった。

(2) 溶湯の特殊処理

Al-Si系の材質については、一次溶解で改良処理を行ない、鑄造時に毎回溶湯を真空処理によって脱ガスを実施した。鑄込温度としては各材質とも比較的低温を用いた。

(3) 鑄造方法

低圧力鑄造機を用いて鑄造したが、鑄造品の大きさ、鑄型条件によって加圧速度を自動的に制御した。

加圧ガスには不活性ガスおよび圧縮空気を用いたが、いずれもシリカゲルによるじゅうぶんな脱湿を行なった。圧縮空気のシリカゲルによる脱湿の効果は表2に示すとおりである。

4. 精密鑄造品の寸法精度と鑄はだのあらさ

鑄造品の寸法精度を測定した一例は表3に示すとおりである。ま

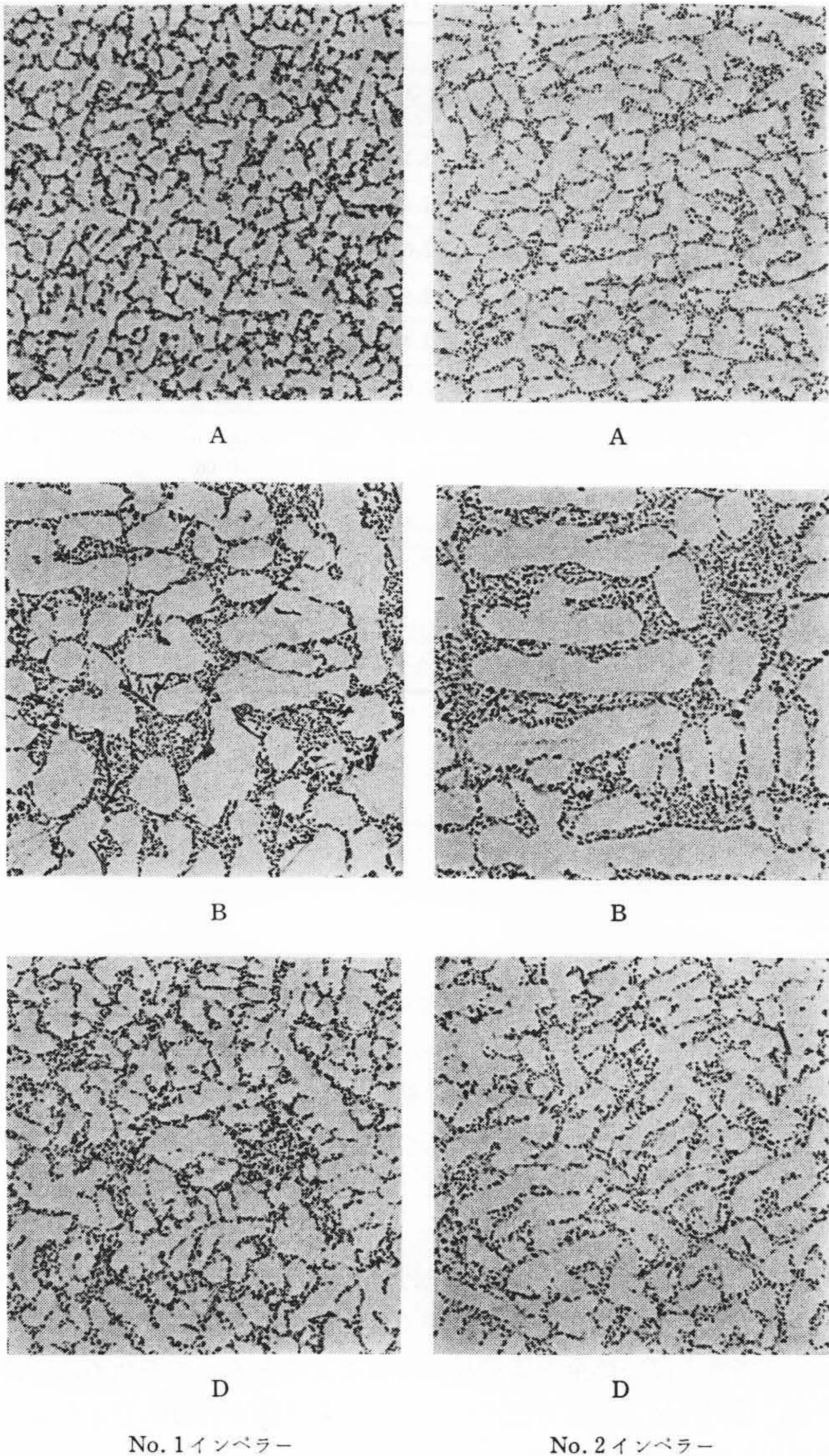


図9 代表インペラー顕微鏡組織

た各測定値のばらつきは $\pm 0.10 \sim 0.15 \text{ mm}$ の範囲であり、製品個々のばらつきも $\pm 0.20 \text{ mm}$ 以下の範囲に安定している。

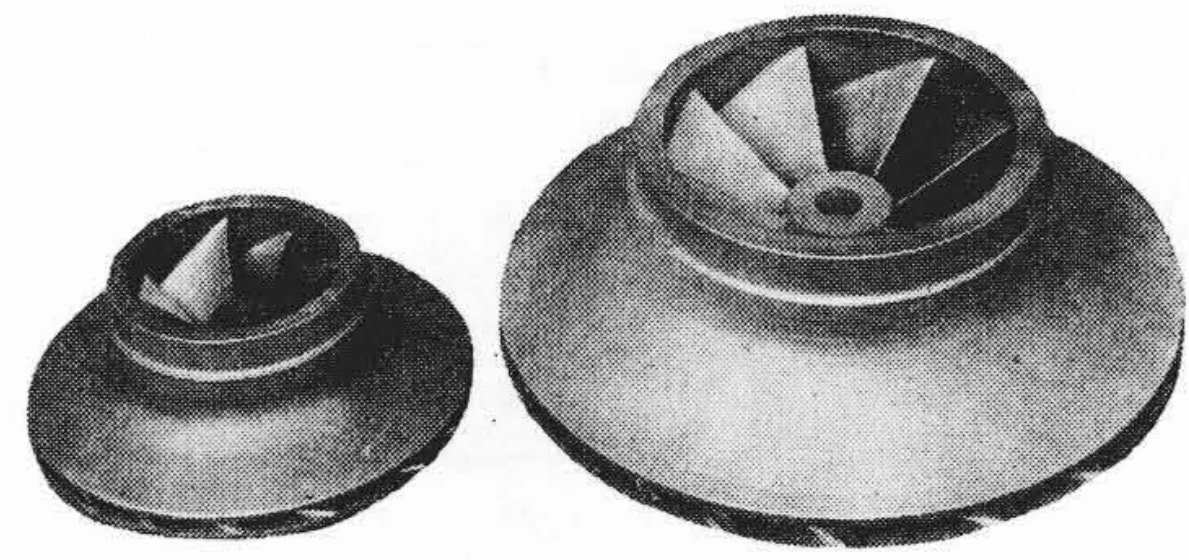
鋳はだについては羽根面 5~12 S、シュラウド内面 7~15 S ときわめて良好な鋳はだを得ることができた。

5. 鋳造品の機械的性質

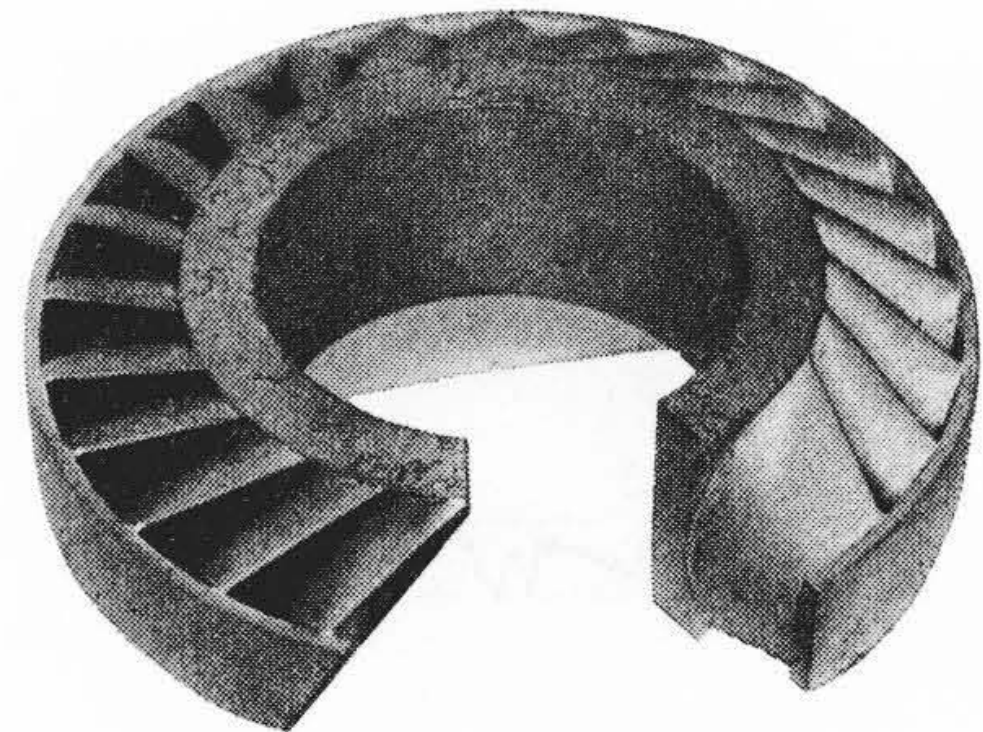
鋳造品の実体強さを測定した結果、引張り強さは各部分ともに約 30 kg/mm^2 を得た。また実物のスピントスタによる過速度試験においても定格の2倍以上の回転強度を有することが確認された。この測定値は鋳造品の形状肉厚が異なってもあまり変化していない。このことは凝固の速度と、指向性凝固が適切に行なわれている結果と判断している。また代表的なもの2種類についての顕微鏡組織は図9に示すとおりである。

6. 石膏鋳型による精密鋳造品

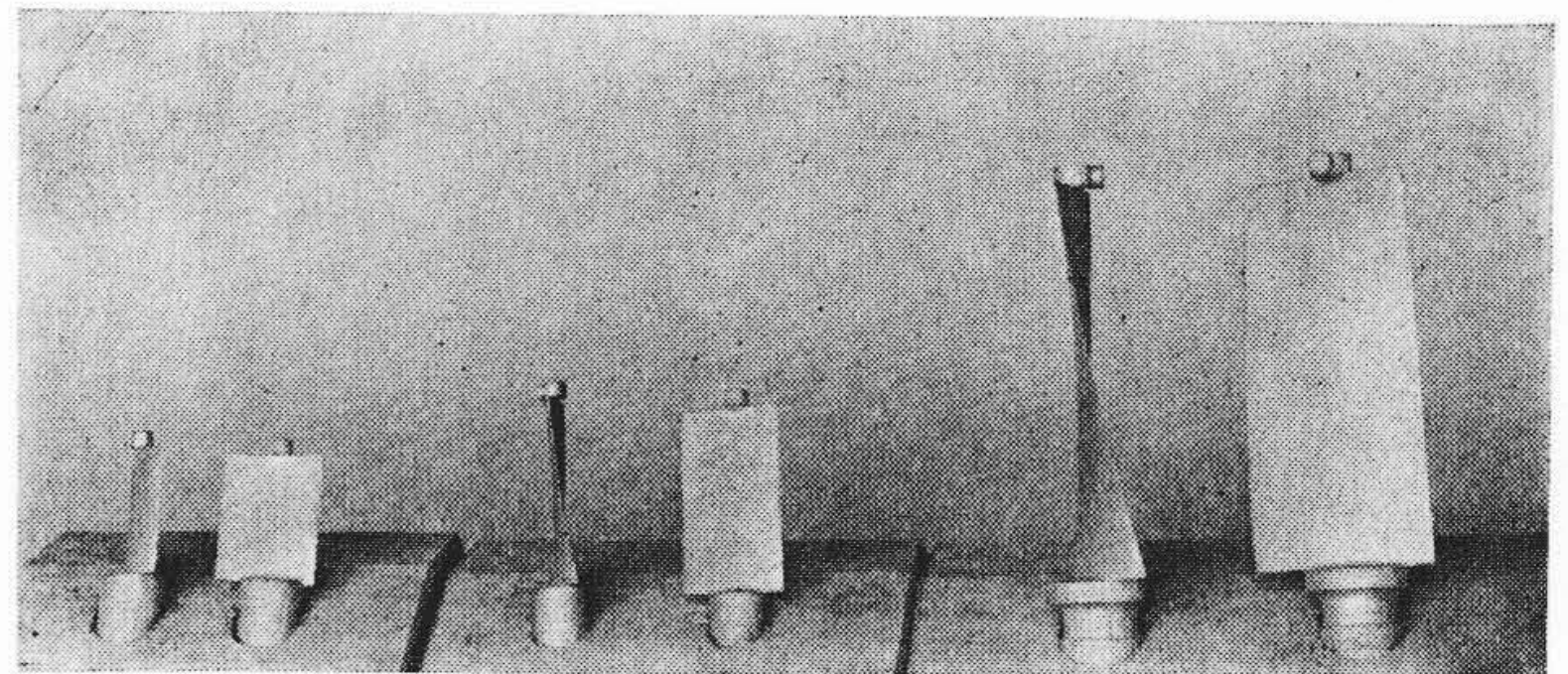
石膏鋳型によるアルミニウム合金鋳物の精密鋳造の代表例を示したのが図10である。



(a) 冷凍機用インペラー



(b) トルクコンバータ用ステータ



(c) タービン用ブレード

図10 精密鋳造品の適用例

7. 結 言

近年、アルミニウム合金鋳物に対する要望は、鋳造品の薄肉精密鋳造化と、鋳造品の材力的な強靱化である。これにこたえるため鋳造技術の開発を目的として研究を重ね、その目的を達成することができた。その内容を要約すると、

- (1) 薄肉の精密鋳造品については石膏鋳型を用いることによって、肉厚は 1 mm 、寸法精度は $\pm 0.20 \text{ mm}$ 以下、鋳はだは 10 S 程度の鋳造品を得る鋳造技術を開発した。
- (2) 鋳造品の実体強度を向上することについては、従来から石膏鋳型では凝固速度が遅くなるため不可能とされていたが、鋳造品の肉厚を調整する異なる鋳型と組み合わせて、低圧力鋳造機で鋳造するなどの技術によりこれを克服することができた。この結果、実体強さ約 30 kg/mm^2 の強靱な精密鋳造品を得ることができた。

以上のように当面の目標を達成することができた。今後の問題点としては、鋳造品の材力の向上である。今後、機械技術の飛躍的發展によりその要求は満たされる。本研究では凝固速度、指向性凝固など主として鋳造技術的な面から検討したが、今後は新しい材質、組成の面から検討を進め、さらに材力的に高度な安定した精密鋳造品の開発を進める考えである。

参 考 文 献

- (1) シェル協資料 55: 石膏鋳型 (昭 40-5)
- (2) 日本総合鋳物センター編: 軽合金鋳物便覧 (昭 40-12)
- (3) 日本化学会編: 化学便覧 (昭 41-9)