

# ロストワックス精密鑄造技術の向上に関する研究

宮川 和博・佐野 照雄・望月 陽介・清水 進

## Study on Improvement of Lost Wax Precision Casting Technology

Kazuhiro MIYAGAWA, Teruo SANO, Yosuke MOCHIZUKI and Susumu SHIMIZU

### 要 約

貴金属のロストワックス精密鑄造における最適な鑄造条件を見出すことを目的として、スターリングシルバーを用いて、鑄造温度、鑄型温度並びに湯道太さを変えた場合の鑄造実験を行った。鑄造巣、割れなどの鑄造欠陥の発生、機械的性質、鑄造組織などとの関連について検討した結果、鑄造欠陥の発生傾向を捉え、巣が少なく良好な鑄造条件の領域を見出すことができた。

### 1. 緒 言

本県の代表的地場産品である貴金属の装身具製品は、小さく複雑な形状であり、多品種少量生産であることから、大部分がロストワックス精密鑄造法により製造されている。しかし、ロストワックス精密鑄造には、未だに鑄造時のさまざまな欠陥が問題となっている。これは貴金属装身具の鑄造において、定量的な研究データが少ないため、鑄造欠陥の発生原因を特定することができないからである。

一方、従来は鑄造から仕上げまで自社内で行うケースが多く、ある程度の鑄造欠陥などは仕上げ工程で修正することができたが、最近では鑄造を自社で行わず専門業者に外注するケースが増加している。そのため鑄造専門企業では後工程での修正が行えず、鑄造工程のみで欠陥の少ない製品を要求されることが多く、鑄造欠陥の低減が課題となっている。

そこで、本研究では最適な鑄造条件を見出すことを目的として、鑄造温度、鑄型温度及び湯道太さを変えた鑄造条件で引け、気泡、ゴマ巣、割れなどの鑄造欠陥、硬さ、断面組織との関連について検討を行った。

### 2. 実験方法

#### 2-1 実験材料

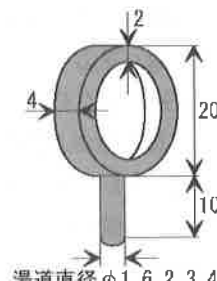
実験には、比較的安価で今でも若い人達に人気があり、2元合金の共晶系で析出硬化型の材料であるスターリングシルバー〔銀含有量92.68%、銅7.32%（定量分析結果）〕を使用した。

#### 2-2 鑄造実験

ソフトワックスを用いて、図1に示すように厚み2mm、幅4mmの断面が一様である平打ちリングを作

製し、これらを図2に示すようにツリー状に立てて原型を作製した。

表1に鑄型作製条件を示す。埋没材は、業界で最も一般的に用いられているKERR社のスーパーベストを使用し、混水比40%で3分間攪拌した後に1分間一次脱泡を行い、ワックスツリーを埋没後、90秒間二次脱泡を行った。その後、2時間自然乾燥した後、電気炉に入れ脱ろう・焼成し、真空吸引加圧鑄造機を使用して表2に



湯道直径φ1.6、2.3、4  
図1 鑄造品の形状

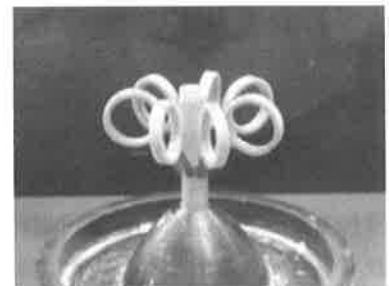


図2 ワックスツリー

表1 埋没・焼成条件

仕様埋没材	KERR スーパーベスト	
混水比	40% (埋没材1kg:水400ml)	
乾燥	2h	
焼成	室温	
	↓	10min
	150℃	1h保持
	↓	30min
	250℃	1h保持
	↓	3h
	750℃	2h保持
	↓	鑄造温度で保持
フラスコサイズ	φ90×mm	

表2 鋳造条件

鋳造位置	安井インターテック社製 真空吸引加圧鋳造機 KT15F
鋳造モード	立ち上がり1回H
加圧モード	真空吸引加圧
加圧圧力	3kg/cm <sup>2</sup>
使用ガス	窒素 (N <sub>2</sub> )
型人モード	先入れ

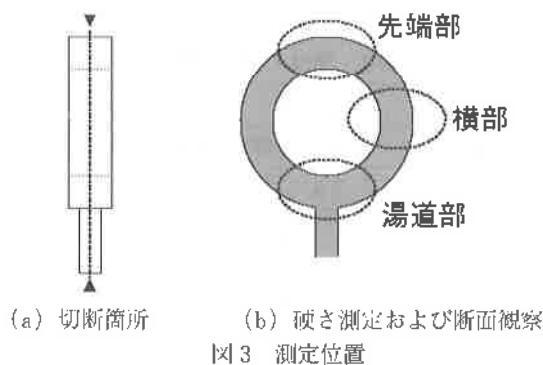
表3 鋳造条件のパラメータ

湯道寸法	長さ	10mm
	直径 (φ)	1.6mm, 2mm, 3mm, 4mm
鋳型温度 (°C)	400, 500, 600, 700	
鋳造温度 (°C)	400, 500, 600, 700	

示す条件で鋳造した。鋳造後、鋳型を室温にて5分間放置した後、水中に投入して鋳型を壊し、製品を取り出した。なお、今回の実験では、表3に示すように、湯道太さ、鋳型温度、鋳造温度をそれぞれ4段階に変化させ鋳造を行い、その鋳造品を評価した。

### 2-3 試料の評価方法

鋳造品の評価は、リングを図3(a)に示すように縦に切断し、切断面の組織と鋳造欠陥の観察および微小硬さを測定した。鋳造欠陥の評価は、切断面をエッチングして金属顕微鏡(×50~×2000)にて観察した。欠陥は大きな空洞の有無、小さな気泡は発生数、そしてゴマ菓はリング表層部の量を断面写真(×50)から目視により判断した。組織、鋳造欠陥などの写真撮影および微小硬さは、部位による違いを考慮し図3(b)に示すようにリングの湯道部(湯道付近)、横部、先端部(湯道反対側)の3カ所とし、硬さは各5点を測定した。



## 3. 結果および考察

### 3-1 鋳造欠陥について

表4にリング断面の観察結果を示す。割れについては、全てのリングで発生が認められなかったため省略した。

表4 リング断面の観察結果

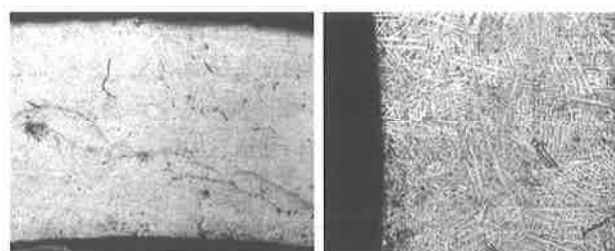
鋳造温度		400°C		500°C		600°C		700°C	
湯道太さ (mm)	鋳造温度 (°C)	気泡	ゴマ菓	気泡	ゴマ菓	気泡	ゴマ菓	気泡	ゴマ菓
1.6	950	● ..	◇	● △	◇	● ..	◆	●	◆
	1000	● △	◎	△	◇	·	◆	△	◆
	1050	..	◇	● △	◆	△	◆	..	◆
	1100	....	◎	....	◆	..	◆	△	◆
2	950	△	◎	△	◇	..	◆	△	◆
	1000	..	◇	△	◇	△	◆	◎	◇
	1050	..	◇	△	◇	△	◆	◎	◆
	1100	..	◇	..	◆	..	◆	△	◆
3	950	◎	◎	△	◇	△	◇	△	◇
	1000	△	◎	·	◇	△	◇	◎	◎
	1050	△	◎	·	◎	·	◎	△	◎
	1100	..	◇	..	◎	△	◎	◎	◎
4	950	△	◎	△	◎	△	◎	◎	◇
	1000	..	◎	△	◎	△	◎	◎	◇
	1050	△	◎	..	◎	△	◎	·	◎
	1100	..	◎	△	◎	△	◎	◎	◇

気泡：◎：良好，△：小さい気泡少数，●：大きい空洞，·：小さい気泡多数 (●の数で気泡の量を表示)

ゴマ菓：◎：良好，◇：ゴマ菓少し，◆：ゴマ菓多数

1) 大きな空洞(引け)の発生は、湯道太さが1.6mmと細い場合に発生した。特に、鋳造温度が950°C、1000°Cと低く、鋳型温度も低い400°C、500°Cのとき、湯道近傍に顕著に現れた(図4(a))。

これは、鋳造温度、鋳型温度ともに低く、湯道や鋳



(a) 先端部

(b) 横部



(c) 湯道部

図4 湯道近傍の空洞 (950°C-500°C-1.6mm)

型に接する部分が先に凝固して、リング先端部から湯道に向かって抜けようとする溶湯中のガスが外部に逃げられず、湯道の手前近傍に凝集したものと考えられる。

- 2) 小さな気泡は鑄型温度が低い400℃、500℃で多く認められ、鑄造温度が1100℃と高く、湯道太さが細い1.6mm、2mmでリング断面の全体に数多く観察された(図5)。

これは、湯道が細く鑄型温度が低いため、湯道だけでなく、リング表面層の凝固も早く溶湯中のガスが外部に逃げられずに内部に残留するためと考えられる。しかし、空洞(引け)発生の場合とは異なり鑄造温度が高いため、リング先端部・横部・湯道部がほぼ同時に凝固し、溶湯中のガスが1カ所に凝集せず小さな気泡となって製品全体に発生するものと考えられる。

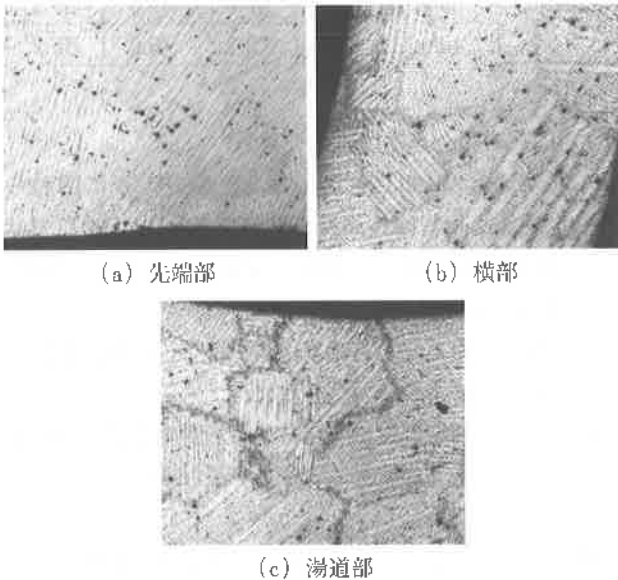


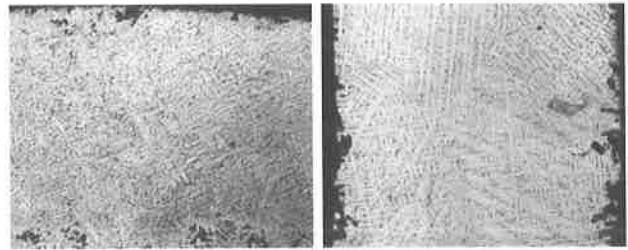
図5 気泡 (1100℃-400℃-1.6mm)

- 3) ゴマ巣は、湯道が1.6mm、2mmと細く、鑄型温度が600℃、700℃と高い領域で多く認められた(図6)。

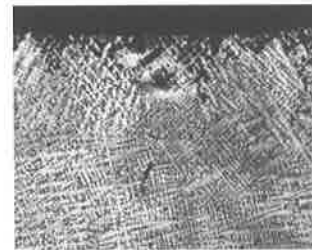
また、鑄型温度が500℃でも鑄造温度が1050℃を超えると発生量が増加する。鑄型温度が400℃と低い場合には認められない。

これは、湯道が細いため湯道部がリング部より早く凝固してしまうが、鑄型温度が高いため鑄型に接する部分の凝固は比較的遅く、溶湯中のガスや鑄型から発生するガスが鑄型と鑄造品表面との界面に集まるため製品表面にゴマ巣として発生するものと考えられる。

- 4) 図6(a)に示す断面のゴマ巣部分の欠陥を表面から見た場合どのようなになっているかを確認するた



(a) 1000℃-600℃-1.6mm先端部 (b) 1050℃-700℃-1.6mm横部



(c) 1100℃-600℃-2mm湯道部  
図6 ゴマ巣

めリング現物の表面から実態顕微鏡で観察したところ、図7に示す樹枝状品の組織に従った幹の部分が凸状で、他が凹みであることを確認した。

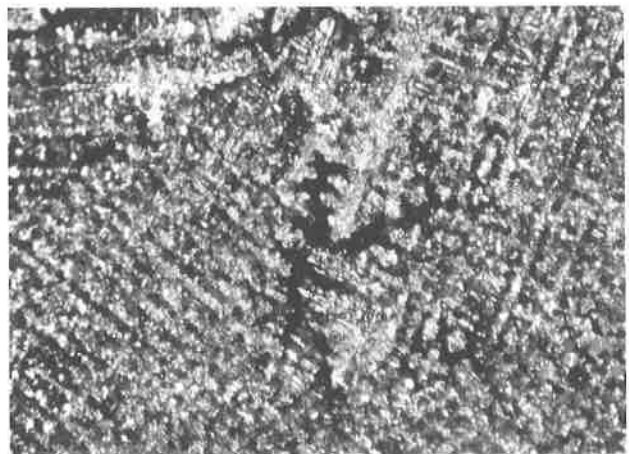


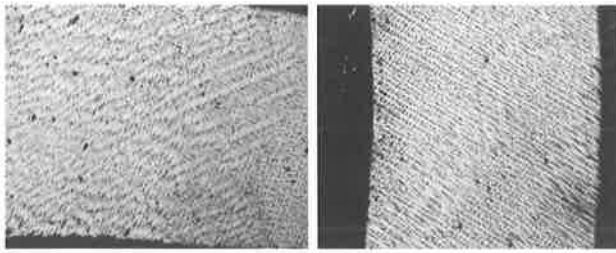
図7 表面から見たゴマ巣(×300)

- 5) ゴマ巣と気泡が同時に発生するのは、鑄造温度の高い1100℃で、鑄型温度が500℃、600℃、湯道太さが1.6mm、2mmで多く認められた(図8)。

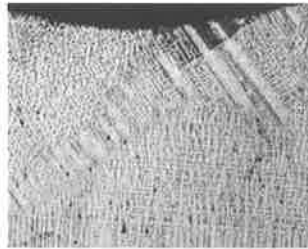
鑄型温度が上述の2)項の気泡発生と3)項のゴマ巣発生の間であるため、両方の欠陥が発生したものと考えられる。

- 6) ゴマ巣、気泡の双方とも発生が少ない条件は非常に狭く、湯道太さ3mmに存在するが、それでも僅かに気泡が認められた。中でも本実験でゴマ巣と気泡のない最も良好な鑄造条件は、鑄造温度が1000℃と1100℃で、鑄型温度が700℃で湯道太さが3mmである(図9)。

- 7) 湯道が3mm以上と太くて、鑄造温度1000~1100℃、鑄型温度700℃では外周部から凝固するとき放出

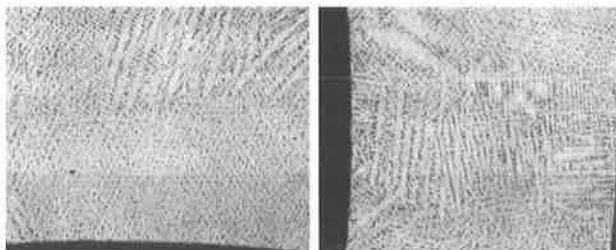


(a) 先端部 (b) 横部

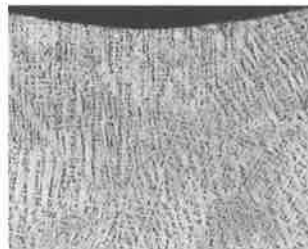


(c) 湯道部

図8 ゴマ巣と気泡 (1100℃-500℃-1.6mm)



(a) 先端部 (b) 横部



(c) 湯道部

図9 良好な断面 (1000℃-700℃-3mm)

されたガスが、内部の溶融部を上昇し湯道に抜けて、内部の気泡や外周部のゴマ巣の発生が抑えられるものと考えられる。

これらのことから、本実験に使用したリング寸法において、気泡、ゴマ巣など製造欠陥のない適正な製造条件は狭い範囲に限られていた。しかし、この条件では結晶が肥大化することがわかった。

### 3-2 硬さについて

硬さの結果を表5に示す。各条件とも平均値を表示した。

また、各条件と硬さとの相関関係を調べるため、図10に示すよう条件毎にグラフを作成した。

- 1) 鑄造温度ならびに湯道太さに関わらず、鑄型温度600℃の場合、硬さが低くなり、なかでも鑄造温度

表5 硬さ測定結果 (HV0.30)

鑄造温度		950℃	1000℃	1050℃	1100℃
鑄型温度	湯道太さ				
400℃	1.6mm	79.4	81.3	83.9	75.6
	2mm	82.5	78.5	85.1	79.1
	3mm	83.5	85.2	83.0	79.0
	4mm	83.1	86.9	97.3	81.8
500℃	1.6mm	73.5	70.8	79.2	73.8
	2mm	74.9	70.4	79.6	74.4
	3mm	72.5	73.3	80.3	77.0
	4mm	73.6	76.1	83.9	77.2
600℃	1.6mm	61.1	66.4	65.9	64.8
	2mm	63.4	65.1	65.5	64.3
	3mm	63.5	68.1	66.2	67.0
	4mm	63.2	66.2	69.3	70.3
700℃	1.6mm	66.2	69.3	68.3	72.2
	2mm	67.8	67.8	67.7	67.0
	3mm	65.8	67.9	69.5	69.2
	4mm	65.2	70.1	70.0	68.2

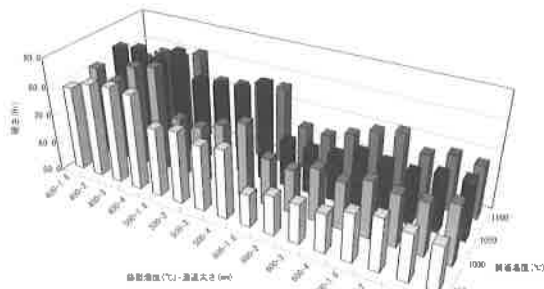
950℃の場合が他に比べ一番低い。

- 2) 鑄型温度が400℃と低い場合、湯道太さに関わらず硬さは相対的に高く平均値で82HV、500℃では76HVとやや低く、600℃で65HVと最も低くなり、700℃で68HVと少し増加する。
- 3) 鑄型温度および鑄造温度が低い条件の場合、各部位の硬さにばらつきが見られた。
- 4) 硬さは、鑄型温度の変化に最も影響を受け、鑄造温度や湯道太さの変化には影響を受けない。

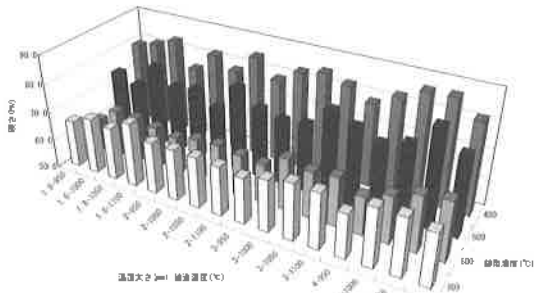
鑄造後の硬さが主に鑄型温度によって影響される理由は、溶湯が鑄込まれて凝固したのち、冷却されて常温になるまでの間に受ける熱履歴が関係していると考えられる。スターリングシルバーは固相線直下ではAgの $\alpha$ 固溶体で、急冷すると過飽和の固溶体になるが、冷却速度によっては低温になるに従いCuが析出しはじめ、過飽和のCuが $\beta$ 相になる過程で析出硬化を起す。この実験では鑄型温度が低い500℃から硬くなり、400℃では更に硬くなっているが、その原因は冷却時の温度経過が析出の条件に合ったものと推測される。

### 3-3 鑄造組織

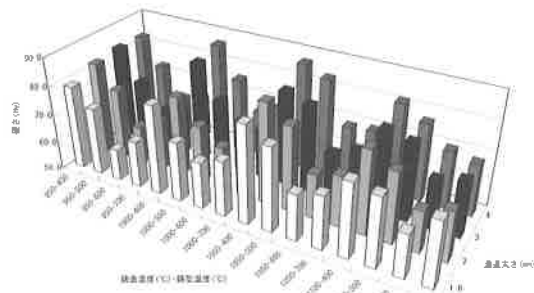
- 1) 鑄造温度が950℃で鑄型温度が400℃、500℃と低い場合は湯道の寸法にかかわらず多結晶体が形成され、湯道が3mmで鑄造温度950℃、鑄型温度400℃では小さな多結晶組織となっている(図11)。この場合、硬さはHV80前後と相対的に高くなって



(a) 鋳型温度と鋳造温度の関係



(b) 湯道太さと鋳型温度の関係



(c) 鋳造温度と湯道太さの関係

図10 硬さ測定結果

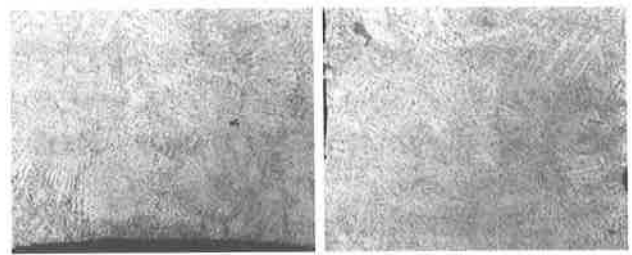
おり、数値にばらつきが見られた。これは、冷却時に通過する温度が析出硬化を起す条件に近いためであると推測され、ばらつきは凝固時に生成された結晶組織の違いや偏析などによるものと考えられる。

- 2) 鋳造温度、鋳型温度が高くなるにしたがい、初晶の $\alpha$ 相の樹枝状晶が直線的に成長し、他から成長した樹枝状晶と交差し、肥大化した樹枝状の結晶組織になっている(図12)。

この場合、硬さはHv65前後と低くなってばらつきは少なかった。

- 3) 例えば鋳造温度1100℃、1050℃、鋳型温度700℃では幹の太い $\alpha$ 相の樹枝状晶が成長し一定方向に並び、大きな結晶組織を形成している(図13)。

このように鋳造後の組織は鋳造温度、鋳型温度が高くて湯道が太い場合は結晶が大きく成長し、局所的な偏析がみとめられ、鋳造・鋳型温度が低いと小さな多結晶体が形成される。



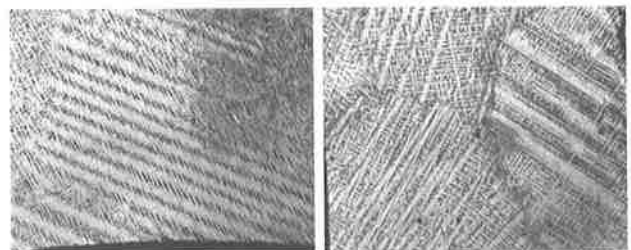
(a) 先端部

(b) 横部



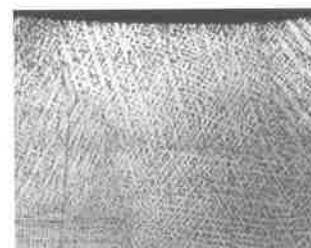
(c) 湯道部

図11 多結晶組織 (950℃ - 400℃ - 3mm)



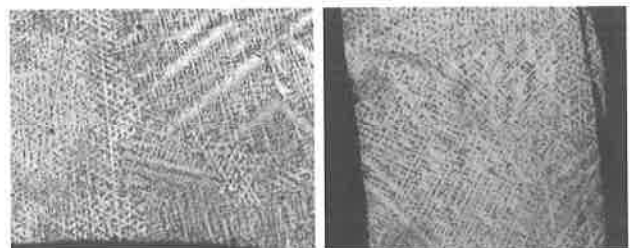
(a) 先端部

(b) 横部



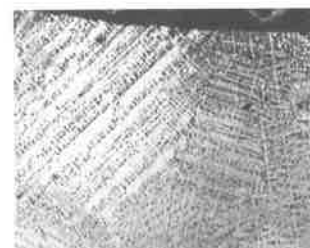
(c) 湯道部

図12 肥大化した樹枝状晶の組織 (1100℃ - 600℃ - 3mm)



(a) 1100℃ - 700℃ - 2mm先端部

(b) 1100℃ - 700℃ - 3mm横部



(c) 1050-700-4湯道部

図13 樹枝状晶の組織

#### 4. 結 言

各種鑄造条件（鑄型温度、鑄造温度、湯道太さ）と鑄造巣〔空洞（引け）、小さな気泡、ゴマ巣〕や割れなどの鑄造欠陥、機械的性質（硬さ）、断面組織との関連について検討を行った。

その結果、鑄造欠陥の発生傾向を捉え、鑄造巣が少なく良好な鑄造条件の領域を見出すことができた。

しかし、本実験によって鑄造欠陥となる鑄造巣〔空洞（引け）、小さな気泡、ゴマ巣〕などの発生し難い鑄造条件と樹枝状晶の成長で肥大化した結晶や局所的な偏析による成分の偏り、相の違い、冷却過程の熱影響で起きる析出硬化などを総合して、使用目的にあった条件を満足させるには、更なる検討が必要である。

今回の実験では鑄造条件を3水準と限定した範囲であり、溶解作業における脱酸、脱ガスの仕方、原料素材の純度、ツリー形状、製品の配置、埋没材質などの要因も鑄造欠陥の発生、硬さ、断面組織に影響している可能性が考えられ、これらについても関連を検討する必要がある。

本報告では機械的な性質は硬さのみについて報告したが、伸びや引張り強さとの関係及び析出硬化についても検討中であり、次回に報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) 諏訪小丸：ジュエリーキャスティングの基本と実際、柏書店松原（2001）
- 2) 本郷成人編：貴金属の科学応用編改訂版、田中貴金属工業株式会社（2001）