

ロストワックス精密鑄造技術の向上に関する研究 (第2報)

宮川 和博・佐野 照雄・望月 陽介・清水 進

Study on Improvement of Lost Wax Precision Casting Technology (2nd Report)

Kazuhiro MIYAGAWA, Teruo SANNO, Yosuke MOCHIZUKI and Susumu SHIMIZU

要 約

ロストワックス精密鑄造時の割れをはじめとする鑄造欠陥の発生原因を究明することを目的として、K10 ピンクゴールドを用いて、鑄造温度、鑄型温度、湯道太さ並びに冷却方法を変えて鑄造実験を行い、割れなどの鑄造欠陥と機械的性質、鑄造組織、元素分布などとの関連について検討した。材料によって鑄造後の冷却方法が割れの発生に大きく影響すること並びに K10 ピンクゴールドに Pd を添加すると析出硬化した時の硬さは軟らかくなり、EPMA のマッピング分析では Cu の析出が緩和され割れの発生を抑制していることが確認できた。

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く、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。

そこで、昨年度はスターリングシルバーを用いて最適な鑄造条件を見いだ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¹⁾。

今年度は、現場で問題となっている K10 ピンクゴールド (以後 K10PG と表示) の割れをはじめとする鑄造欠陥発生の原因究明を目的として、鑄造条件と鑄造欠陥、硬さ、断面組織、熱処理と硬さの関係、元素分布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、比較的安価でその色合いが人気であるが、ホワイトゴールドやイエローゴールドなど他の金合金に比べ割れをはじめとする鑄造欠陥の発生が問題となっている K10PG を用いた。中でも県内企業での利用量が多い K10PG 特 2(Pd) [(株)森銀社製] を使用した。

また、構成元素と割れとの関連を検討するため Pd を含有しない K10PG (2:8) (Au:41.67%, Ag:11.67%, Cu:46.66%) [同社製] を比較対象として使用した。

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 3mm 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 に示す条件で鑄造した。鑄造後、鑄型を室温にて 5 分間放置した後、水中に投入して鑄型を壊し、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、鑄型温度、鑄造温度、冷却方法をそれぞれ変化させ鑄造を行い、その鑄造品を評価した。

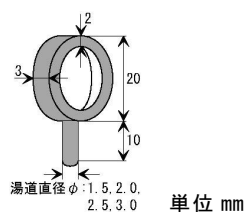


図 1 鑄造品の形状



図 2 ワックスツリー

表1 埋没・焼成条件

使用埋没材	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 ↓
	铸造温度で保持
フラスコサイズ	φ90×150mm

表2 铸造条件

湯道	長さ	10mm
寸法	直径(φ)	1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm
铸型温度(℃)	400, 500, 600	
铸造温度(℃)	1050, 1100	
冷却方法	急冷, 10分空冷後急冷, 空冷	

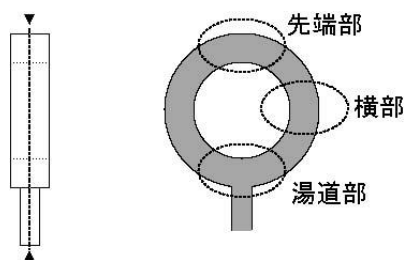
表3 铸造条件のパラメータ

铸造装置	安井インターテック社製 真空吸引加圧铸造機 KT15F
铸造モード	立ち下がり2回目
加圧モード	真空吸引加圧
加圧圧力	2kg/cm ²
使用ガス	窒素(N ₂)
型入モード	後入れ

2-3 試料の評価方法

铸造品の評価は、リングを図3(a)に示すように縦に切断し、切断面の組織と铸造欠陥の観察および微小硬さを測定した。铸造欠陥の評価は、切断面をエッチングして金属顕微鏡(×50~×1000)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から目視により判断した。組織、铸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。

また、割れの原因と金属組織の影響について確認するため、EPMAによるマッピング分析を行った。



(a)切断箇所 (b)硬さ測定および断面観察

図3 測定位置

3. 結果および考察

3-1 铸造条件と铸造巣の関係について

表4にリング断面の観察結果を示す。

表4 リング断面の観察結果

冷却方法	铸型温度	铸造温度	湯道太さ(mm)			
			1.5	2.0	2.5	3.0
急冷	400℃	1100℃	×	◎	◎	◎
		1050℃	×	○	○	△
	500℃	1100℃	△	◎	◎	◎
		1050℃	△	△	△	◎
	600℃	1100℃	△	○	△	○
		1050℃	△	◎	○	△
10分空冷後急冷	400℃	1100℃	×	△	○	△
		1050℃	×	×	◎	◎
	500℃	1100℃	△	◎	○	△
		1050℃	△	△	○	◎
	600℃	1100℃	△	△	○	○
		1050℃	△	◎	○	◎
空冷	400℃	1100℃	×	△	△	○
		1050℃	×	△	○	○
	500℃	1100℃	△	◎	◎	◎
		1050℃	△	◎	△	◎
	600℃	1100℃	△	○	△	○
		1050℃	△	△	○	○

◎:良好, ○:欠陥少数, △:欠陥多数,

×:大きい空洞・欠陥多数

1) 大きな空洞(引け)の発生は、湯道太さが最も細い1.5mmの場合に多数発生した。特に、铸型温度が低い400℃のとき、湯道近傍に顕著に現れた。

(図4(b))

これは、铸型温度が低く、湯道や铸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。

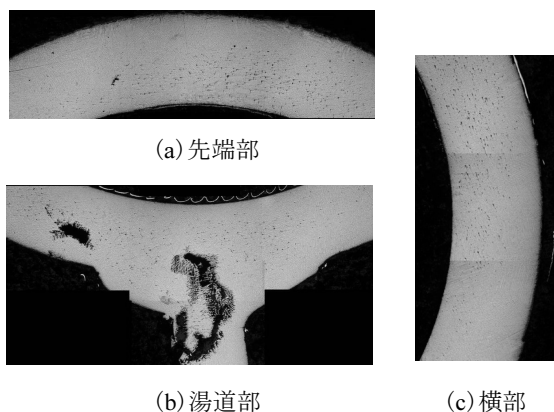


図4 湯道近傍の空洞 (1100°C-400°C-1.5mm-10分空冷)

2) 気泡は、湯道太さが細い1.5mm および2mm で casting 温度が1050°Cでの発生が多い(図5)。これは、空洞(引け)発生の場合よりも casting 温度が低いため、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。

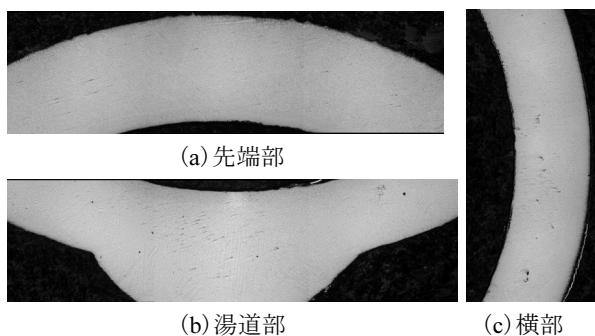


図5 気泡 (1050°C-400°C-2.0mm-10分空冷)

3) ゴマ菓, 気泡の双方とも発生が少ない条件は湯道太さ2mm以上に存在する。中でも本実験で最も安定した良好な casting 条件は、 casting 温度が1100°Cで、 casting 温度が500°Cで湯道太さが2mmまたは2.5mmである(図6)。

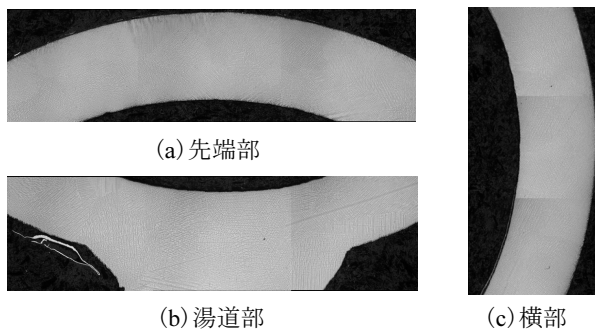


図6 良好な断面 (1100°C-500°C-2.5mm-空冷)

4) 今回の実験では、 casting 温度, casting 温度, 湯道太さが同じ条件でも casting 欠陥発生状況に若干ばらつきがあった。この原因としては、センタースプルーへの取り付け位置および角度の僅かな差による影響が考えられる。

3-2 casting 条件と硬さの関係について

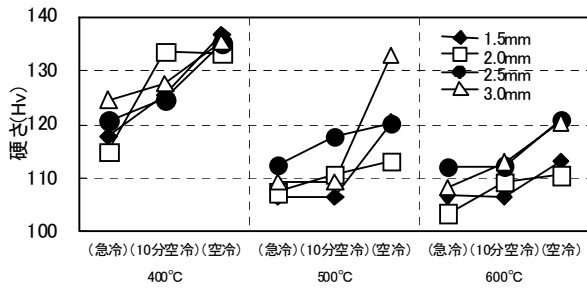
硬さの結果を表5に示す。各条件とも平均値を表示した。

また、各条件と硬さとの相関関係を調べるため、図7、図8に示すよう条件毎にグラフを作成した。

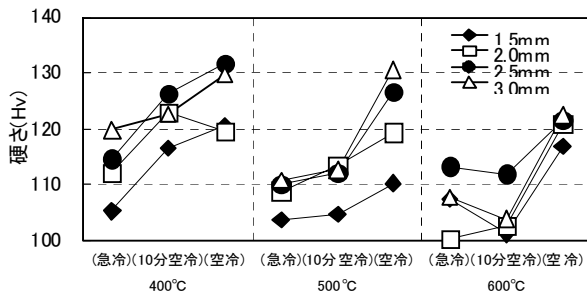
- 1) casting 温度が400°Cと低い場合、 casting 温度, 冷却方法, 湯道太さに関わらず、硬さは相対的に高く、 casting 温度の上昇に伴い低下する。
- 2) 硬さは、空冷の場合に最も高く、10分空冷後急冷、急冷の順に低下する。
- 3) わずかではあるが、湯道太さが太い場合、硬さは相対的に高い。
- 4) 硬さは、 casting 温度と冷却方法に最も影響を受け、 casting 温度には影響を受けない。湯道太さにはわずかに影響を受ける。

表5 硬さ測定結果 (HV0.30)

冷却方法	casting 温度	湯道太さ(mm)	湯道太さ(mm)			
			1.5	2.0	2.5	3.0
急冷	400°C	1050°C	118	115	121	125
		1100°C	105	112	115	120
	500°C	1050°C	107	107	113	109
		1100°C	104	109	110	111
	600°C	1050°C	107	103	112	108
		1100°C	107	100	113	108
10分空冷後急冷	400°C	1050°C	125	134	125	128
		1100°C	116	123	126	123
	500°C	1050°C	106	111	118	109
		1100°C	105	113	112	113
	600°C	1050°C	107	109	112	113
		1100°C	101	103	112	104
空冷	400°C	1050°C	137	133	135	135
		1100°C	121	119	132	130
	500°C	1050°C	120	113	120	133
		1100°C	110	119	127	131
	600°C	1050°C	113	111	121	120
		1100°C	117	121	122	122

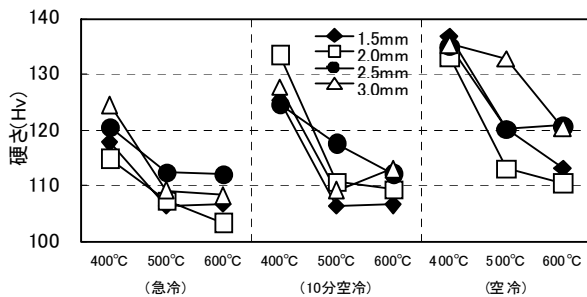


(a) 鋳造温度 1050°C

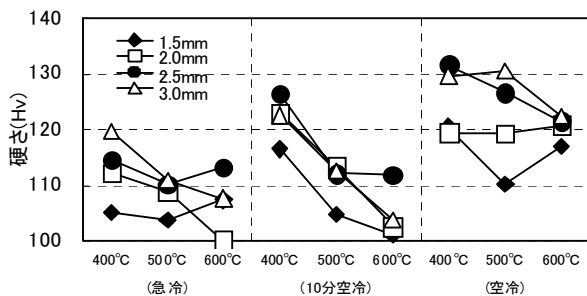


(b) 鋳造温度 1100°C

図7 硬さ測定結果 (鋳型温度別)



(a) 鋳造温度 1050°C



(b) 鋳造温度 1100°C

図8 硬さ測定結果 (冷却方法別)

3-3 鋳造条件と割れの関係について

鋳造したリングでは、割れは発生しなかった。

そこで、割れの発生を確認するため厚み 0.5mm、幅 1.5mm とサイズを薄く変えたリングを鋳造した。鋳造は最も良好な鋳造条件である鋳造温度 1100°C、鋳型温度 500°Cで固定し、湯道径も一定とし、冷却方法のみ変

化させ行った。その結果、K10PG (2:8) において空冷した場合に湯道付近に割れの発生を確認した (図9)。

K10PG 特 2 (Pd) では、冷却方法にかかわらず割れは発生しなかった。

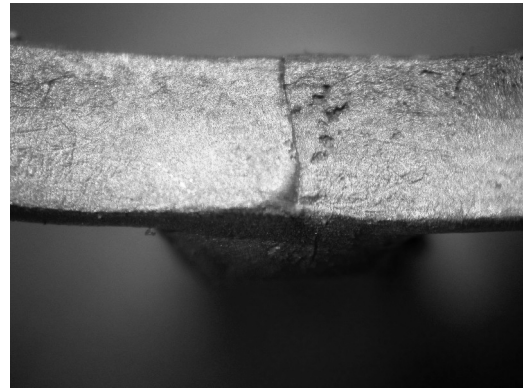


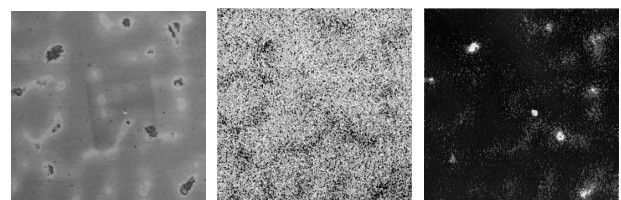
図9 湯道付近の割れ (K10PG (2:8) 空冷)

3-4 割れの発生原因について

鋳造したリングの EPMA によるマッピング分析結果を図10, 図11に示す。

その結果、鋳造後 K10PG 特 2 (Pd) では、デンドライト組織の中に Au と Pd は同じ位置に、Cu と Ag はそれぞれ分離して検出されている。

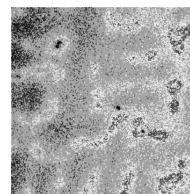
K10PG (2:8) では Au と Cu は同じ位置に、Ag は分離して検出されていることが確認できた。



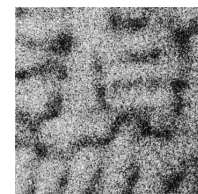
(a) 分析面

(b) Au

(c) Ag



(d) Cu



(e) Pd

図10 マッピング分析結果 (K10PG 特 2 (Pd) 鋳造品)

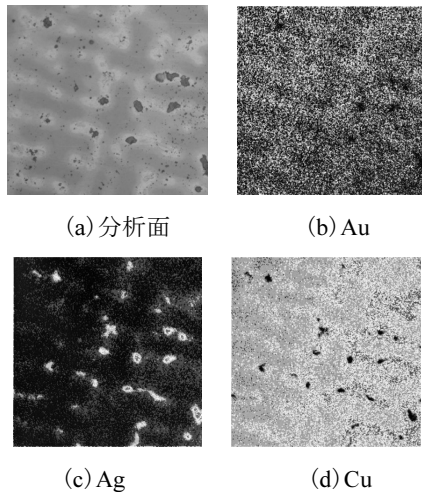


図 11 マッピング分析結果 (K10PG (2:8) 鋳造品)

このことから K10PG (2:8) の割れは、Au と Cu の化合物の析出が割れに影響を及ぼしていることが考えられる。その検証のため、両地金の鋳造前の板材に溶体化処理 (750°C, 2h), 析出硬化処理 (350°C, 400°C, 450°C) を行い、その試料の硬さ測定 (図 12, 図 13), 断面観察, マッピング分析 (図 14~図 21) を行った。

- 1) K10PG 特 2 (Pd) は溶体化処理により硬さは 108HV になり、析出硬化 350°C×30 分で 159HV と最も硬くなり、それ以降の時間で軟化し 140HV 前後であった。
- 2) K10PG (2:8) では溶体化処理後の硬さ 120HV で K10PG 特 2 (Pd) と大差はないが、析出硬化 350°C×30~60 分で 290HV と非常に硬くなり、450°C では時間と共に軟化する。
- 3) EPMA 分析の結果、K10PG 特 2 (Pd) は溶体化処理で均質になり、析出硬化処理温度を変えても、Pd, Au, Cu, Ag, Zn が均等に分布している。
- 4) K10PG (2:8) では溶体化処理後は K10PG 特 2 (Pd) と同じように均質になっているが、析出硬化処理を 350°Cで行うと Cu が結晶粒界に析出して、硬さが 290HV ともっとも硬くなる。400°C では Cu の析出は結晶粒内に広がり、硬さは 240HV をピークに低下する。さらに 450°Cでは時間と共に軟化し過時効になり、粒界へは銀が析出し始め、硬さが 180HV 以下に低下する。

これらのことから、K10PG (2:8) は、空冷のように冷却速度が遅い場合、凝固収縮時の鋳型収縮率と材料の収縮率の違いによって生じる歪が、金属間化合物 (AuCu) による脆化条件とマッチングすると割れが起

こるものと考えられる。

特に湯道が細くその近傍の製品の寸法が薄く細い場合、割れが発生し易いが、Pd の存在は割れの発生原因を緩和する働きがあること及び冷却速度を管理することによって割れを防止することが可能であることが確認できた。

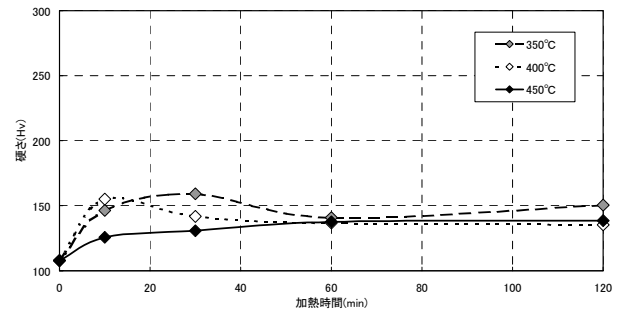


図 12 硬さ測定結果 (K10PG 特 2)

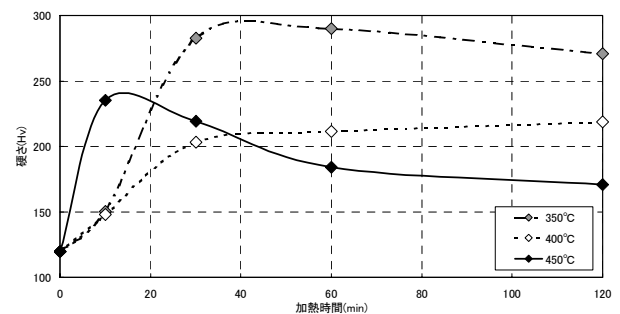


図 13 硬さ測定結果 (K10PG (2:8))

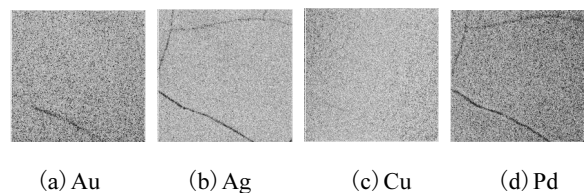


図 14 マッピング分析結果 (K10PG 特 2 溶体化処理)

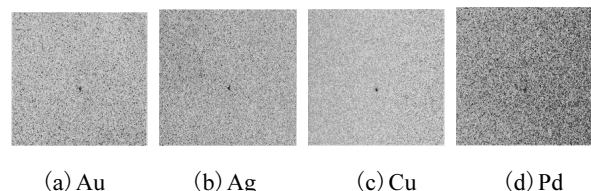
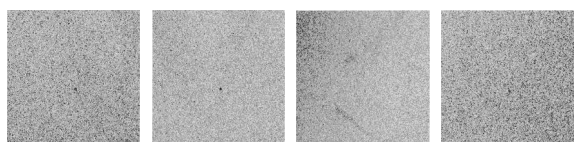
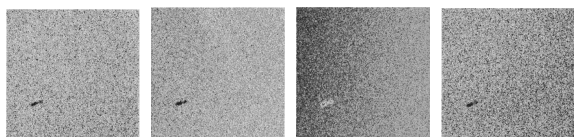


図 15 マッピング分析結果 (K10PG 特 2 350°C-120min)



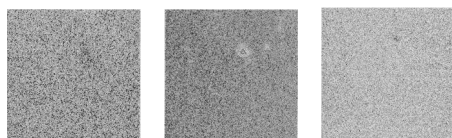
(a) Au (b) Ag (c) Cu (d) Pd

図 16 マッピング分析結果 (K10PG 特 2 400°C-120min)



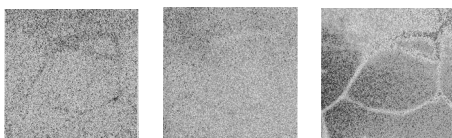
(a) Au (b) Ag (c) Cu (d) Pd

図 17 マッピング分析結果 (K10PG 特 2 450°C-120min)



(a) Au (b) Ag (c) Cu

図 18 マッピング分析結果 (K10PG (2:8) 溶体化処理)



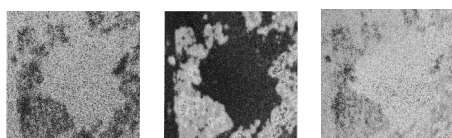
(a) Au (b) Ag (c) Cu

図 19 マッピング分析結果 (K10PG (2:8) 350°C-60min)



(a) Au (b) Ag (c) Cu

図 20 マッピング分析結果 (K10PG (2:8) 400°C-60min)



(a) Au (b) Ag (c) Cu

図 21 マッピング分析結果 (K10PG (2:8) 450°C-60min)

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と共に割れの発生原因を特定することができた。

しかし、今回の実験では鑄造条件を 4 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。

参考文献

- 1) 宮川和博, 佐野照雄, 望月陽介, 清水進: 山梨県工業技術センター研究報告, No22, p.75-80 (2008)
- 2) 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)

4. 結 言

各種鑄造条件 (鑄型温度, 鑄造温度, 湯道太さ, 冷却方法) と割れをはじめとする鑄造欠陥, 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。