

AM 技術の鋳造用模型への適用

金森陽一*, 樋尾勝也*, 服部 俊*

Application of Additive Manufacturing (AM) for Casting Model

Yoichi KANAMORI, Katsuya HIO and Suguru HATTORI

Dimensional error and surface roughness of specimens prepared by several kinds of AM technologies (Stereolithography Apparatus SLA, Fused Deposition Modeling FDM, Material Jetting, Binder Jetting, Selective Laser Sintering SLS) were measured. In addition, these specimens were used as a casting model, cast iron specimens were obtained. The surface roughness of cast iron specimens was measured.

The dimensional error at 200 mm (length) was in the range of $-0.55 \sim +0.4$ mm. The dimensional error at 20 mm (height) was in the range of $-0.1 \sim +0.25$ mm. The surface roughness (plane) was in the range of $0.3 \sim 125$ μm . The surface roughness (30 degrees) was in the range of $10 \sim 250$ μm . In cast iron specimens, those surface roughness (plane) were less than 110 μm , and those surface roughness (30 degrees) were more than 110 μm .

Key words: Additive Manufacturing, Casting Model, Dimensional Error, Surface Roughness, Cast Iron

1. はじめに

近年、鉄やアルミニウム鋳物では、新しい製品の試作、交換部品の製造など、比較的ロット数が少ない生産への対応が求められてきている。一般的に、ロット数が少ない生産では、木型を用いて砂型を製造し、この砂型に溶融金属を流し込んで製品が製造される。しかし、木型は設計変更が難しい、木型製作の後継者不足¹⁾などの課題があり、木型に代わる模型製作技術の開発が望まれている。

AM (Additive Manufacturing) 技術は、3次元 CAD データを用いて樹脂などを積層して造形する技術である。この技術は、3次元 CAD データから直接造形を行うことから設計変更が容易であること、また装置を無人で稼働させることができることなどから、木型に代わる模型製作技術として期待されている。この技術は、1980 年ごろに開発され、これまでに鋳造用模型への適用などについて検討されてきた²⁻⁴⁾が、鋳造用模型を製作する

技術として、広く普及するまでに至っていない。

2012 年後半になって、高性能 PC 及びグラフィックス環境の成熟、3次元 CAD システムの低価格化と普及、AM 装置の特許が切れたことなど⁵⁾により、AM 技術が再び注目され、多くの新しい装置が市場導入されてきた。しかし、多くの AM 装置において寸法精度が保証されていない⁶⁾ことに加え、表面や積層造形により生じる段差 (以下、「積層造形により生じる段差」は「段差」とする。) を仕上げるための後処理が必要になる^{7,8)}などの課題も指摘されている。

砂型鋳物では、例えば、ねずみ鋳鉄、砂型鋳造手込め、自硬性鋳型の鋳放し鋳造品 (基準寸法: 200 mm) の寸法公差は $5.6 \sim 11$ mm であり⁹⁾、また、鋳鉄品の表面粗さは $35 \sim 140$ μm ¹⁰⁾であるように、比較的寸法精度や表面粗さの許容範囲が広く、最近市場導入された装置であれば、後加工を行わずに鋳造用模型として使用できる可能性がある。

そこで、本研究では、各種 AM 技術で試験片を

* 金属研究室

作製し、寸法精度、表面粗さ（平面、段差）を測定し、鋳造用模型への適用を検討した。また、AM技術で作製した鋳造用模型を用いて鋳物を溶製し、その転写についても確認したので、それらの結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 作製した試験片（模型）形状

図1に作製した試験片（模型）形状を示す。作製した試験片（模型）は、(1)長さ試験片 $X \times 20 \times 10$ mm $X: 20, 50, 100, 200$ mm の4種類、(2)高さ試験片 $20 \times 20 \times Z$ mm $Z: 5, 10, 20$ mm の3種類、(3)段差試験片 角度 $\theta: 30, 45, 60, 90^\circ$ の4種類の合計11種類である。なお、積層方向

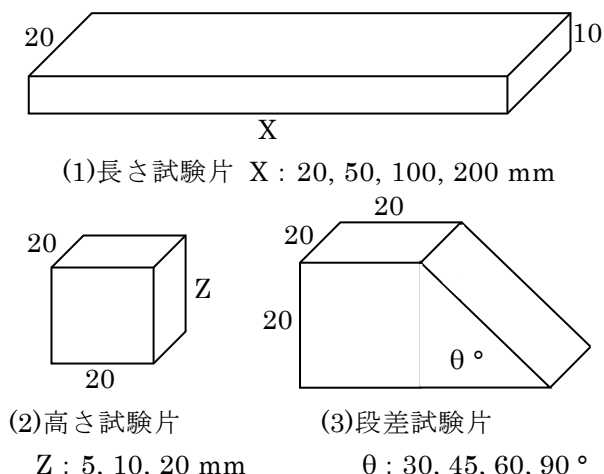


図1 作製した試験片（模型）形状

表1 作製に用いたAM技術の造形条件

試験片名	方式	積層ピッチ mm	モデル材	サポート材
光造形	光造形法	0.1	ABS ライク	同左
FDM1	熱溶解積層法	0.18	ABS ライク	ABS ライク
FDM2	熱溶解積層法	0.25	ABS ライク	ABS ライク
インク1	インクジェット法 材料噴射	0.03	アクリル系	ジェル
インク2	インクジェット法 材料噴射	0.03	ABS ライク	ワックス
石膏	インクジェット法 結合剤噴射	0.1	石膏	なし
粉末	粉末焼結 積層造形法	0.1	ナイロン	なし

は、すべての試験片において、高さ方向（Z方向）とした。

2.2 試験片（模型）作製に用いたAM技術

試験片（模型）作製については、光造形法（SLA Stereolithography Apparatus）：1種類、熱溶解積層法（FDM Fused Deposition Modeling）：2種類、インクジェット法（材料噴射 Material Jetting）：2種類、インクジェット法（結合剤噴射 Binder Jetting）：1種類、粉末焼結積層造形法（SLS Selective Laser Sintering）：1種類の計7種類により行った。表1に、作製に用いたAM技術の造形条件を示す。なお、試験片については、各方式名等を省略し、試験片名で区別する。

2.3 試験片（模型）の評価

長さについては、ノギスにより長さ試験片のX部を測定し、3次元CADデータ（設計値）との差を求めた。高さについては、マイクロメータにより高さ試験片のZ部を測定し、3次元CADデータ（設計値）との差を求めた。また、表面粗さ（平面）については、長さ試験片（ $200 \times 20 \times 10$ mm）の上面について、接触式表面粗さ測定機により試験片の長手方向と長手に垂直な方向の表面粗さを測定し、これらの平均値を表面粗さ（平面）とした。測定した表面粗さは最大高さ粗さ（以下、「最大高さ粗さ」は「Rz」とする。）である。また、表面粗さ（段差）については、段差試験片の傾斜部について、接触式表面粗さ測定機により傾斜方向のRzを測定した。また、比較として木型（寸法：200 mm）の寸法及び平面のRzについても測定した。

2.4 試験片（鋳鉄）の溶製と評価

段差試験片（ $\theta: 30^\circ$ ）を模型としてフラタリー珪砂（粒度分布の最大ピーク：約150 μm ）と有機自硬性樹脂を用いて砂型を製作し、ねずみ鋳鉄（FC150）を溶製した。図2に作製した砂型の概略図を示す。溶製した試験片（鋳鉄）の評価については、平面（図

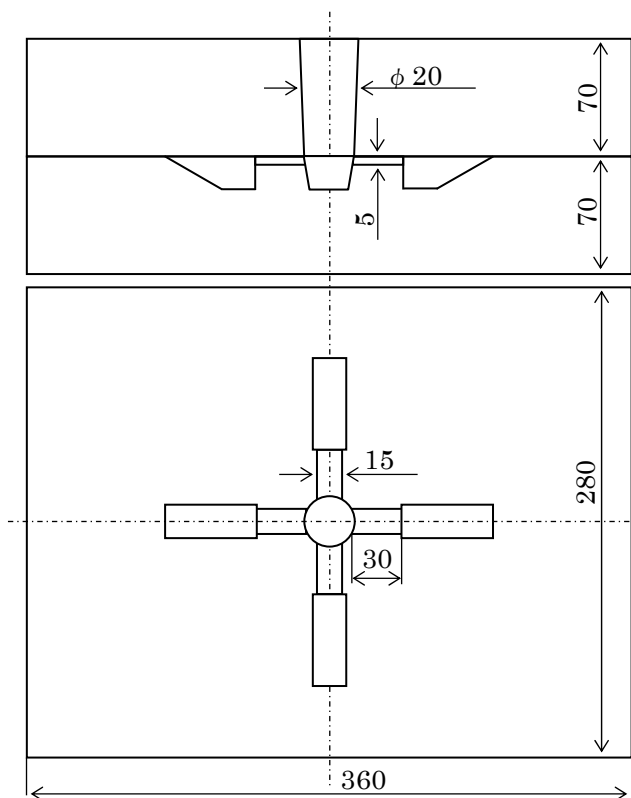


図2 作製した砂型の概略図 mm

2の底部 20×20 mm) と傾斜部の Rz の測定を行った。また、比較として、55×20×20 mm の木材を模型として、ねずみ鉄 (FC150) を溶製し、平面の Rz を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 作製した試験片 (模型) の長さ

図3に作製した試験片 (模型) の長さ と 3次元

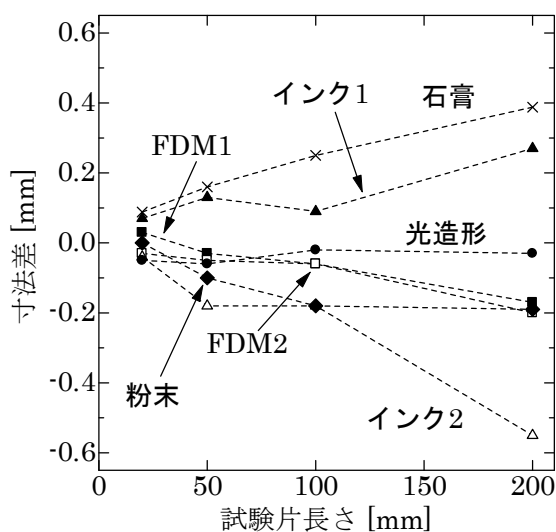


図3 作製した試験片 (模型) の長さ と 3次元 CAD データ (設計値) との寸法差の関係

CAD データ (設計値) との寸法差の関係を示す。図3から、試験片長さが長くなるほど、寸法差は大きくなる傾向が見受けられた。木型の寸法を測定したところ、寸法: 200 mm に対し、寸法差は ± 0.3 mm 程度であった。試験片寸法 200 mm での寸法差を見てみると、寸法差は $-0.55 \sim +0.4$ mm の範囲であり、寸法差が ± 0.3 mm より小さいものは、光造形, FDM1, 2, インク1, 粉末の5種類、寸法差が ± 0.3 mm より大きいものは石膏とインク2の2種類であった。

寸法差に影響を及ぼす因子としては、プリントヘッドなどの駆動部の精度や造形時に生じるバリやひずみなど多くの因子が考えられる。積層1面の造形パターンもその因子の1つである。寸法差が小さい5種類の積層1面の造形は、先に外周を造形し、その後内部を造形する。この造形パターンでは、先に外周を造形するため、設計寸法に近い寸法が得やすくなると考えられる。これに対し寸法差が大きい2種類では、外周の造形を行わずに1面を造形する。この造形パターンでは、先に外周を造形しないため、積層1面毎の駆動部の精度、バリなどの影響を受けやすくなり、寸法精度が低下しやすくなるのではないかと推察される。また、最も寸法差が大きかったインク2では、加熱してサポート材を除去した。この加熱により生じたひずみも寸法差を大きくした原因と考えられる。

3.2 作製した試験片 (模型) の高さ

図4に作製した試験片 (模型) の高さ と 3次元

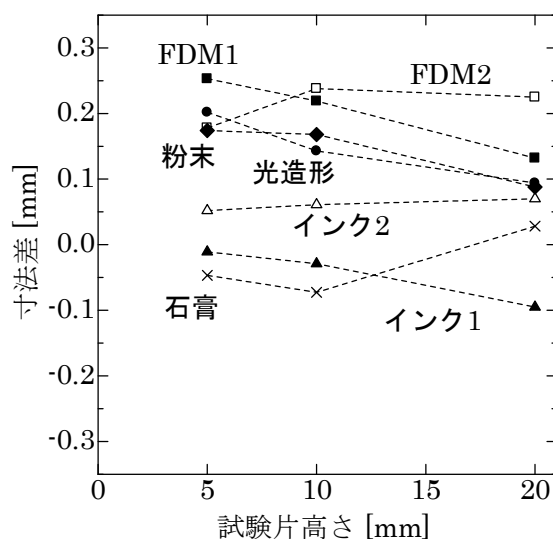


図4 作製した試験片 (模型) の高さ と 3次元 CAD データ (設計値) との寸法差の関係

CAD データ (設計値) との寸法差の関係を示す。図 4 から、試験片高さが厚くなっても、寸法差はあまり変わらず、高さ : 5 mm での寸法差は -0.05~+0.25 mm の範囲、高さ : 20 mm での寸法差は -0.1~+0.25 mm の範囲でほぼ同じであった。また、ばらつきはあるが、積層ピッチが大きいほど寸法差が大きくなる傾向が確認され、積層ピッチが大きい FDM1, 2 の寸法差が大きかった。

また、寸法差は、光造形, FDM1, 2, インク 2, 粉末の 5 種類においてプラス, インク 1, 石膏の 2 種類においてマイナスであり、高さ方向の寸法差はプラスになりやすい傾向が見受けられた。この理由としては、3次元 CAD データ (設計値) と積層ピッチ×層数との差がプラスになるように設定されている、サポート材の取り残しの影響などが考えられる。

3. 3 作製した試験片 (模型) の平面の表面粗さ

図 5 に作製した試験片 (模型) の表面粗さ (平面) の測定結果を示す。図 5 から、平面の表面粗さは Rz : 0.3~125 μm の範囲で、光造形, インク 1, 2 では、Rz : 20 μm 以下の平滑な面が得られたことがわかる。これらの方式では、液槽中で造形または液体を噴射して造形する。この場合、表面は液体が固まることにより形成されるため、平滑な面が得られやすいと考えられる。これに対し、FDM1, 2, 石膏, 粉末の Rz は 80 μm 以上であった。これらの方式では、固体を焼結や化学反応で固める、あるいは半熔融状態の樹脂を付けることで造形する。このため、Rz が大きくなったと考えられる。

木型の平面について Rz を測定したところ、60

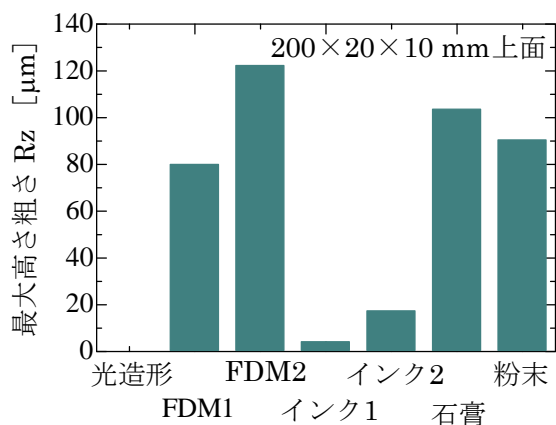


図 5 作製した試験片 (模型) の表面粗さ (平面)

μm 程度であった。FDM1, 2, 石膏, 粉末の Rz は、木型より粗い表面粗さであった。

3. 4 作製した試験片 (模型) の傾斜部 (段差) の表面粗さ

図 6 に作製した試験片 (模型) の角度 θ と傾斜部 (段差) の表面粗さの測定結果の関係を示す。図 6 の C (実線) は、それぞれ各積層ピッチについて、積層ピッチと角度 θ から計算で求めた Rz である。計算から求めた Rz は、角度が大きく、積層ピッチが小さくなるほど、小さくなる。計算結果と測定結果を比較すると、両者が合うのは、光造形, インク 1, 2, FDM1, 2 である。これに対し、石膏, 粉末については計算結果と測定結果が合わなかった。計算結果と合わなかった石膏, 粉末では、層間にバリ等が発生したと考えられる。

計算結果で最も表面粗さが粗くなった θ : 30° での、Rz は 10~250 μm の範囲であった。前述のとおり、比較として測定した木型の Rz は約 60 μm であった。今回検討した 7 種類の中で、Rz が 60 μm 以下になる条件は、インク 1, 2 及び光造形 θ : 90° のみであった。

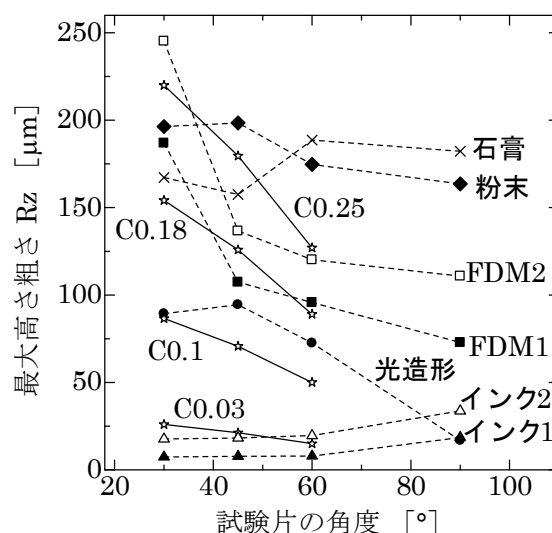


図 6 作製した試験片 (模型) の角度と傾斜部 (段差) の表面粗さの関係

3. 5 溶製した試験片 (鋳鉄) の表面粗さ

図 7 に、光造形, FDM1, 粉末を模型として溶製した試験片 (鋳鉄) の表面粗さ (平面と傾斜部 (段差, θ : 30°)) の測定結果を示す。比較として、木型を模型として溶製した試験片 (鋳鉄) の

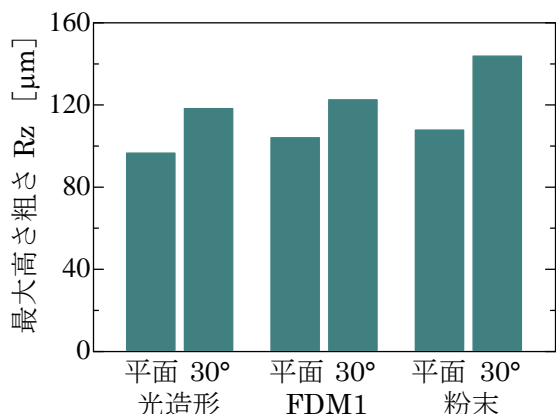


図7 溶製した試験片（鋳鉄）の表面粗さ（平面と傾斜部（段差，θ：30°））

平面の Rz を測定したところ、約 110 μm であった。図 7 を見てみると、平面については、3 種類とも Rz は 110 μm 以下であり、木型と同程度あるいはそれより平滑な表面粗さが得られた。これに対し、傾斜部（段差，θ：30°）については、3 種類とも Rz は 110 μm 以上であり、木型を模型として溶製した試験片（鋳鉄）の平面より粗い表面粗さになった。

図 8 は、図 7 の結果を、横軸に模型の表面粗さ、縦軸に鋳鉄の表面粗さとして、プロットしたものである。なお、図 8 では、光造形、FDM1、粉末は区別せずに、すべて模型とした。図 8 では、模型の表面が平滑 (Rz が非常に小さい) であっても、鋳鉄の Rz は約 90 μm 程度となった。鋳鉄の表面は砂型の表面が転写される。模型を用いて砂型を製作する場合、砂型の表面粗さは、模型の表面粗

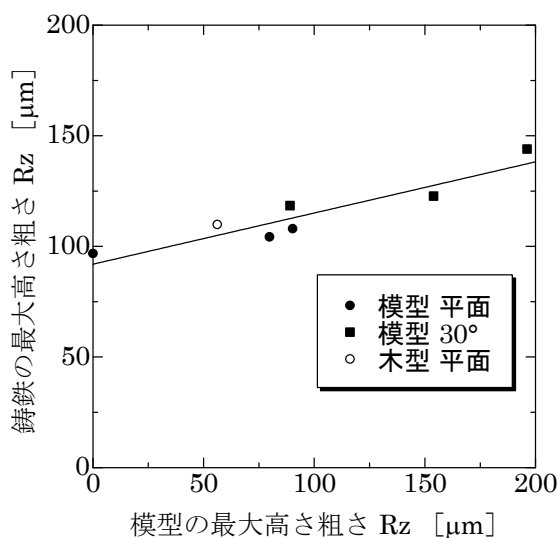


図8 模型と鋳鉄の表面粗さの関係

さに加え、砂の粒度などの影響を受ける¹¹⁾。このことから、模型の表面粗さを平滑 (Rz が非常に小さい) にしても、鋳鉄の Rz は小さくならなかったと推察される。

また図 8 では、模型の Rz が大きくなるとともに、鋳鉄の Rz も大きくなったが、模型の Rz に比べ鋳鉄の Rz はわずかにしか大きくならなかった。鋳鉄の表面粗さは、砂型の表面粗さだけでなく、溶湯の表面張力などの種々の因子の影響も受ける¹²⁾ことから、模型の表面粗さが粗くなっても、鋳鉄の表面粗さは模型の表面粗さほど粗くならなかったと考えられる。

4. 結論

各種 AM 技術で試験片（模型）を作製し、寸法精度、表面粗さ（平面、段差）を測定し、鋳造用模型への適用を検討した。また、鋳造用模型を用いて鋳物を溶製し、その転写についても確認し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 作製した試験片（模型）の長さでは、試験片が長くなるほど、寸法差は大きくなる傾向が確認され、長さ：200 mm での寸法差は-0.55~+0.4 mm の範囲であった。作製した試験片（模型）の厚さでは、試験片が厚くなっても、寸法差はあまり変わらず、高さに対して寸法差が一定である傾向が確認された。高さ：20 mm での寸法差は、-0.1~+0.25 mm の範囲であった。
- 2) 作製した試験片（模型）の平面の表面粗さは、Rz：0.3~125 μm の範囲で、液槽中で造形または液体を噴射して造形する方式において、平滑な表面粗さが得られる傾向が確認された。作製した試験片（模型）の傾斜部（段差）の表面粗さでは、角度が小さくなるほど表面粗さが粗くなり、θ：30°では、Rz：10~250 μm の範囲であった。
- 3) 溶製した試験片（鋳鉄）の表面粗さは、平面で Rz は 110 μm 以下、傾斜部（段差，θ：30°）で Rz は 110 μm 以上であった。模型と鋳鉄の表面粗さでは、模型が平滑 (Rz が小さい) であっても、鋳鉄の Rz は約 90 μm 程度になり、模型の Rz が大きくなるとともに、鋳鉄の Rz は徐々に大きくなることが確認された。
- 4) 光造形、FDM1 を模型として溶製した鋳鉄は、傾斜部（段差）の表面粗さが若干粗いものの、

これらの寸法公差および表面粗さは許容範囲内であった。これらの模型については、後加工なしで铸造用として適用できる可能性が確認された。

参考文献

- 1) 小岩井修二：“各種積層技術の特徴と将来性”。日本铸造工学会第165回全国講演大会技術講習会テキスト，p111-124 (2014)
- 2) 素形材センター：“平成7年度型技術に関する動向調査報告書（铸造用模型製造におけるRP技術と今後の方向）”。素形材センター研究調査報告書，498, (1996)
- 3) 素形材センター：“平成11年度RP最新技術動向と現状技術レベル調査研究報告書”。素形材センター研究調査報告書，550, (2000)
- 4) 増田峰知ほか：“ラピッドプロトタイピングの铸造用模型への応用と可能性試験”。三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告，27, p128-133 (2003)
- 5) 萩原恒夫：“材料から見た3Dプリンターの現状と将来”。素形材，54, p37-44 (2013)
- 6) 新野俊樹：“よくわかるRP(積層造形)の活用方法 - 粉末焼結積層造形法の基礎 -”。素形材，52, p46-51 (2011)
- 7) 早野誠治：“3Dプリンターって何”。日本铸造工学会第165回全国講演大会技術講習会テキスト，p1-27 (2014)
- 8) 朝倉慶子：“後処理で広がる積層造形品の可能性”。素形材，54, p66-68 (2013)
- 9) 日本工業規格JIS B 0403：“铸造品-寸法公差方式及び削り代方式”。(一財)日本規格協会 (1995)
- 10) 鹿取一男ほか：“鑄肌の研究(第2報)”。鑄物，21, p1-8 (1949)
- 11) 鹿取一男ほか：“鑄肌の研究(第14報)”。鑄物，23, p1-4 (1951)
- 12) 鹿取一男ほか：“鑄肌の研究(第15報)”。鑄物，23, p12-19 (1951)