

氷上を滑空するイモノづくり ＝環境低減型の減圧凍結鑄型鑄造システム＝

星山 康洋*, 平野健太郎**, 三宅 秀和***

Characterization of Casting by Frozen Mold Casting Method

Yasuhiro HOSHIYAMA, Kentarou HIRANO and Hidekazu MIYAKE

はじめに

1970年代の初めにイギリスのW.H.Booth社で、粘土、ベントナイト、水分を少量加えた生型を、液体窒素で凍結し鑄型として使用する方法が考案され、凍結鑄型として実用化がはかられた^{1) 2)}。わが国では、1970年代後半から省資源、無公害鑄造技術およびLNGなど低温工業技術の活用を目的として、各所の研究機関や数社の企業で研究、実用化が検討された^{3) -13)}。

これらの方法は、冷凍鑄型、Frozen molding process、エフセットプロセス(Fセット鑄型)とも呼ばれ、鑄物砂に添加した水分をドライアイスまたは液体窒素で凍結して鑄型に強度をもたせた造型法を意味している。

これに対して、ここで紹介する減圧凍結鑄型鑄造法は、正に氷上を滑空する鑄鉄溶湯による鑄物づくりである。省エネルギー・無公害な鑄造技術の確立を目的とし、経済産業省が支援する地域新生コンソーシアム研究開発事業の一環として研究開発されたもので、減圧式凍結法という冷凍技術を利用した新しい造型システムである。

凍結鑄型は、(1)水分以外の粘結剤をほんの少量使用するか、まったく使用しないで非常に強い鑄型ができる、(2)型ばらし時の砂落しがきわめて容易で、(3)砂はそのまま再利用でき、(4)砂処理や公害に対する設備投資が少なく済み、(5)作業環境が良好である、など優れた特徴を有している。しかし、LNGに関連

する冷熱などの低温技術を利用する必要があり、その効果的な使用が本鑄型を実用化する場合の要点となる。

凍結鑄型鑄造法の概要：本システムの概要¹⁴⁾を図1に示すように、基本的には型込め作業場、凍結装置、注湯作業場ならびに砂処理設備から構成される。砂がそのまま再使用でき、回収処理設備が少なく済み、造型作業に関連する公害設備などもほとんど要らない。他の造型法との経済性を比較した場合、その優位性を発揮するが、凍結鑄型は凍結に冷媒が必要で、その消費量を低く抑えるための貯溜および使用法を含めた合理的な設備計画が必要となる。

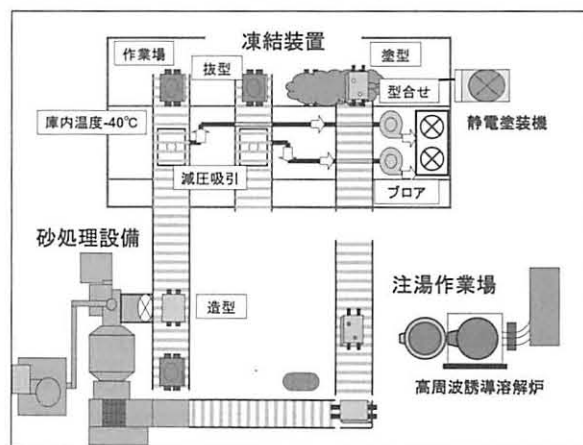


図1 減圧凍結鑄型システムの概要

環境面：「鑄物砂混錬・型込工程」では粘結剤に水分だけを使い、環境負荷の大きな有機性粘結剤・硬化剤・配合添加剤を一切使用しなくても既存の鑄型と同等以上の非常に強い鑄型圧縮強度が得られ、「注湯工程」ではガス発生が微小である。また、「砂型解枠(型

原稿受付 平成23年8月3日

*化学生命工学部 化学・物質工学科 准教授

**(株)アサヒセイレン 研究所 技術主任

***化学生命工学部 化学・物質工学科 教授

ばらし) 工程」では、注湯後に凍結した水分の融解によって砂の結合力が失われ、解砕時に自然崩壊しやすいために大きな動力を使った粉碎の必要がなく、砂落しが極めて容易で、粉塵・騒音・振動がほとんど発生しない。その結果、環境に優しい21世紀型の鑄造方案が可能となる。

製造面：本システムの場合、鑄型全体が低温凍結しているために湯の流れが非常に良く、押し湯量を大幅に削減しても欠陥のある鑄物を最少に抑えることができ、歩留まりの大幅な改善が実現できる。また、「砂型型込め工程」では、連続式減圧急速凍結法を用いるため、現行の有機自硬性鑄型鑄造法では実現不可能だった『製造に係る各種装置(労働安全衛生上操業時常時運転が不可欠な集塵機などの公害防止設備、砂型振動解砕装置、砂冷却装置、砂振り分け装置等)のためのランニングコストの大幅低減』が可能である。

設備導入面：既存の鑄造法との併用が可能であり、既存の鑄造設備とバッティングする面も全くないため、キー・コンボの「連続式減圧急速凍結装置」を設置するだけで済むため、鑄物工場は『工場リニューアルのための投資』を最少に抑えることが可能である。

適用面：現行技術(有機自硬性鑄型鑄造法)で鑄造する場合と同様、連続式減圧凍結による鑄型造型法の場合も、鑄鉄(FC材)、ダクタイル鑄鉄(FCD材)、鑄鋼(SC材)、非鉄合金(銅合金、アルミ合金)などの連続・安定生産が可能で、中子型製品についても適応性がある。

凍結鑄型鑄造法の実際：我が国の鑄物技術は世界に誇る技術立国の基礎を築いた基幹産業であり、その歴史は非常に古いものである。近年においては20世紀に代表される大量生産・大量消費とは異なった、資源循環型システムやゼロエミッションシステムへの転換が産業界を通じた重要課題となってきた。しかし、現在の日本の鑄物産業界は安価な海外製鑄物の氾濫により年々その生産量を圧迫されており新たな技術の開発が難しい状況となっている。

現行の主流鑄物技術の一つに、砂に添加した硬化剤により鑄型を製作する鑄造法がある。この鑄造法は付加価値の高い製品が生産可能であるが、硬化剤の費用と砂の回収・再生工程で発生する産業廃棄物処理費用等により国内生産価格が年々高騰している。さらに、砂の回収・再生工程で微粒子化した硬化剤等の粉塵は空气中に漂い、工場周辺の環境悪化に繋がるため国内においては集塵機などの環境保全設備を完備する費用も嵩むこととなる。また、厳しい作業環境を嫌う若手労働者の確保にも問題を抱えている。

これらの問題点を改善する一つの回答として、現在

開発を進めている冷凍機を用いた凍結鑄型鑄造法は、砂に添加した硬化剤により鑄型を製作する鑄造法の問題点である砂を硬化させるプロセスを砂中の水分を凍結することで代替する技術である。

現行の鑄造技術は一連の作業要素(混練、型込作業等)および鑄物砂中に何らかの結合剤を含有させて砂を硬化させる考え方に対して、本システムでは水分がその役割を果たし、結合剤が可逆変化することによる以下の特徴を有している。

(1)温度上昇による良好な自然崩壊性により型ばらし時のエネルギーが極小となる、鑄型はそのまま再利用でき、廃砂が減量できる。(2)砂処理や環境保全機器が小型化できる。(3)作業環境が改善される。

以上の特徴により現行の鑄造法が抱える問題点をほぼ改善できることがわかる。凍結鑄型鑄造システム構成の外観を図2に示す。今回開発した装置は凍結装置のみで、その他は既存設備を用いている。

造型作業は、ベントホール付きの木型模型(図3参照)に鑄型枠(図4参照)を取り付け、水分を含有した砂を充填することから始まる。図5に減圧凍結法の仕組みの概略図を示す。鑄型の凍結技術は、ある程度の通気度が砂に存在することを利用し、凍結庫内の低

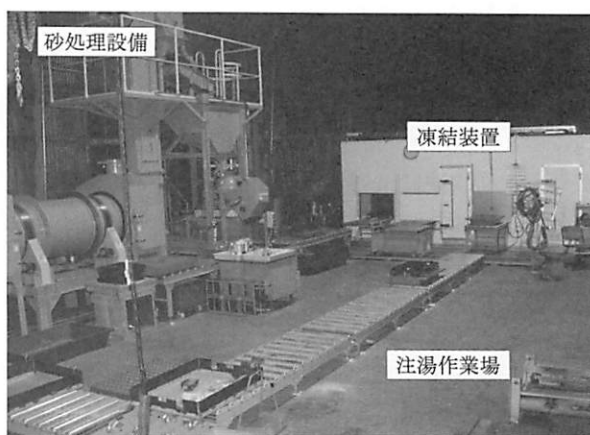


図2 本システム装置の外観

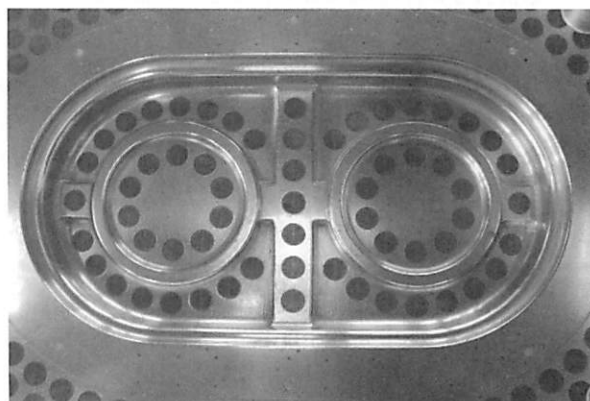


図3 ベントホール付きの木型模型

温空気を砂中に通過させることで砂中の含有水分を凍結させる技術である。砂を込めた模型は庫内を -40°C に保たれた凍結装置内の減圧吸引装置にて急速凍結し、その後、模型から凍結鑄型を抜型する。鑄型表面は高温の溶融金属と接触するため耐熱塗料を塗布（図6参照）した後、上下の鑄型を合わせて湯鉢をセットして凍結鑄型が完成（図7参照）する。予め溶解炉にて溶解した溶湯を凍結鑄型内に注湯（図8参照）して鑄物を製作する。凍結鑄型は内包する高温金属により昇温し、水蒸気を発散させながら自然崩壊（図9参照）を起こす。製品を取り出した後、最後にこの砂を砂処

理装置に戻して作業終了である。尚、この一連の作業内容は凍結装置を用いて鑄型を製作する以外は現行の鑄造法と変わらない。

圧縮強度：凍結鑄型の強度は、砂の粒度や水分添加量によって異なり、しかも鑄型強度は凍結時の鑄型拘束状態によっても変化すると考えられる。本システムでは水分含有量の増加および凍結温度の降下に伴って凍結鑄型の圧縮強度が増大する傾向を示し、水分含有量4.0~5.0%、凍結温度 $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ 付近で現行の鑄造法で使用される鑄型強度を達成できる。

変形：凍結時の鑄型の拘束の様式ならびに水分量に



図4 鑄型枠の取り付け状況

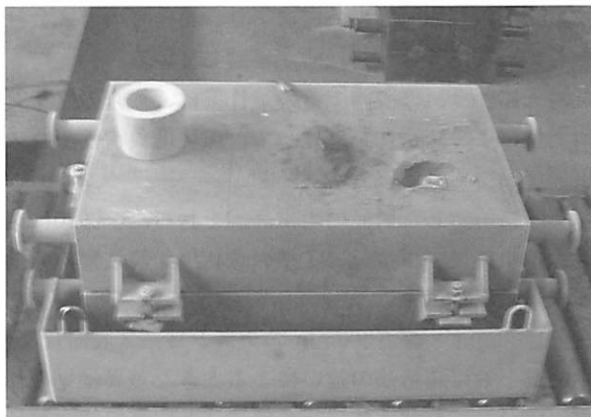


図7 湯鉢セット後の完成凍結鑄型

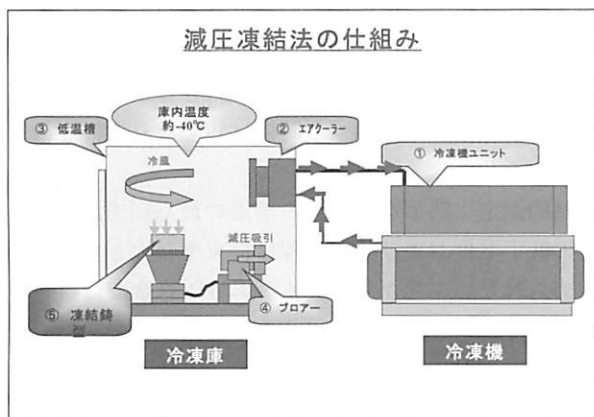


図5 減圧凍結法の仕組み図



図8 凍結鑄型への注湯状況



図6 耐熱塗料の塗布



図9 鑄型の自然崩壊（水蒸気の発散）

よって変形量が異なることが予想されるため、複雑形状の砂型を型枠内とともに凍結させるには、鑄型の反りや型抜き抵抗に対処する方法を考慮する必要がある。

通気度：凍結鑄型の通気度は、鑄型の造型、凍結条件によって変化するが、注湯時に発生する水蒸気の膜が鑄肌の保護およびチル防止に役立つともいわれている。

本システムの評価：本システムは、地域新生コンソーシアム研究開発事業として経済産業省の支援により完成したものである。本システムは基本実施権を有する(株)前川製作所との共同により、第一号の導入会社として、(株)三共合金鑄造所が稼働している。

導入に伴う試作段階での鑄造作業は、従来のフラン樹脂型による鑄造作業に比して、環境低負荷性やコスト面においても優位である。

実際に鑄造した製品の組織評価を行った。図10にダクタイル鑄鉄（ブルーアイ型の球状黒鉛鑄鉄）の光学顕微鏡組織を示す。

直径30mm × 長さ300mm のテストピース表面及び中心部ともに鑄造法の違いによる大きな差異は見られず、概ね良好な状態で現行の鑄造法と同等の鑄物製品の生産が可能であるといえる。これまでに試作した非鉄材質はアルミ合金、アルミ青銅、銅合金など現在市

場において主に使用されている材質をほぼ網羅している。

しかし、凍結鑄型製作に掛かる凍結時間の更なる短縮および模型の大型化に対する本システムの適用限界の把握さらには、薄肉部、中子や鑄物の厚肉部に接する鑄型の凍結が早く溶けることに起因する、荒サレや砂カミ欠陥に対する鑄造方案の工夫が必要になると考えられる。

さらに、減圧凍結鑄型の基礎特性である通気度を調べ、鑄鉄とアルミニウム合金溶湯を用いて、減圧凍結鑄型への鑄込み時の湯流れ、鑄型および溶湯のガス圧ならびに熱的測定から鑄型の特性を評価した。また、得られた鑄物についてカラーチェック、組織観察ならびに硬さ測定を行い、他の空洞鑄型と比較、検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

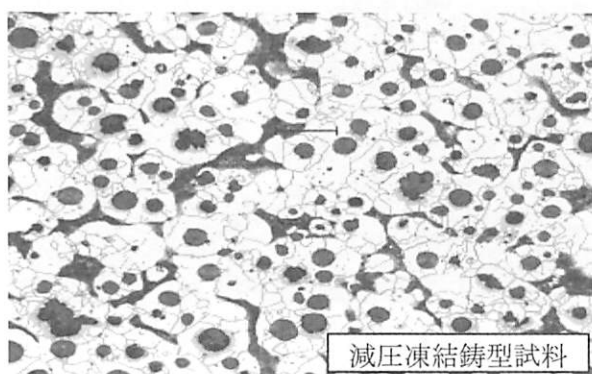
通気度：6号新砂、5号新砂およびライン砂を用いた減圧凍結鑄型の通気度はいずれの場合も他の鑄型に比べて大きく通気性は良好である。これは、減圧凍結鑄型では、通気性を阻害する水以外の粘結材がなく、鑄型を通過する空気粘性が低くなるために、良好な通気性を持つと考えられる。

湯流れ：ボス付板状試験片を用いて湯流れ性を検討した結果、コンピュータ解析による湯流れシミュレーションに比べて、溶湯の流動速度は異なるが流動・充満挙動に大きな違いは認められない。また、他の鑄型とでも、溶湯の流動・充満挙動に大きな差異は認められず、鑄型全体を充満する時間は短くなり良好な湯流れ性を示した。

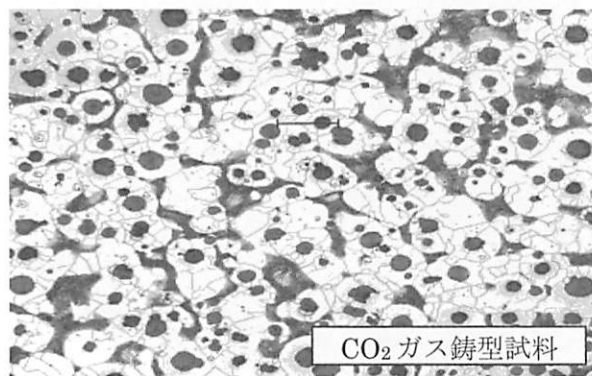
熱的測定：鑄型を流動する溶湯の最高到達温度、湯先の低下温度および凝固過程に従来型と大きな差異は認められない。しかし、アルミニウム合金では鑄物の冷却速度が若干速くなる。また、鑄込み後の鑄型の最高到達温度および昇温速度は従来型に比べて若干低い傾向を示す。

ガス圧：減圧凍結鑄型では主に水分に起因するガス圧ピークを示し、型内および鑄型の最大ガス圧は従来型に比べて低くガス抜けが良好である。このことから、減圧凍結鑄型ではガス抜けが良好であり、他の鑄型に比べて溶湯の流動を妨げる型内の背圧が低くなることおよびガス欠陥が発生しにくくなることが示唆される。

鑄物の評価：鑄物表面部にチル組織はみられず、鑄鉄では表面層に無黒鉛層が見られ、アルミニウム合金では鑄物表面付近で若干共晶シリコンが細くなる。そのため、減圧凍結鑄型で作製した鑄鉄の硬さは従来型と大きな差異はなく、アルミニウム合金では若干高い値を示す。また、アルミニウム合金の内引け巣およ



減圧凍結鑄型試料



CO₂ ガス鑄型試料

—| 100μm

図10 ダクタイル鑄鉄製品の光学顕微鏡組織

びガス欠陥は、従来型と比べて少ない傾向を示す。

以上のことより、減圧凍結鑄型では界面に無黒鉛層が見られることから、鑄型中の水分に起因する水蒸気中での凝固冷却であると考え、水蒸気膜の断熱作用により鑄型が低温にもかかわらず流動する湯先の低下温度、鑄物の凝固過程および組織に大きな差異がなく比較的チルを生じないと推察される。さらに、鑄型が低温であるという特徴から通気性が良好であること、および鑄型の昇温速度が遅いためガス発生速度が遅くなるのが相俟って、ガス圧が低くなったと考えられる。以上のことから、減圧凍結鑄型の特性は他の鑄型と基本的には大きな差異はなく、湯流れ性およびガス抜けに優位性が見られ、廃砂の低減や作業環境の改善が可能であることから、今後各種製品への適用が期待できる。

ここで、デジタルマイクロスコープによる凍結鑄型表面のその場 (in-situ) 観察を行った。図11にその場観察に用いたデジタルマイクロスコープ装置の外観を示す。本装置は対象物を高精度 CCD カメラ (211万画素) で二次元観察し、内臓の液晶モニターにて表示およびハードディスク等に記録可能なシステムから構成されている。

デジタルマイクロスコープ (VHX-500F) 装置 (図

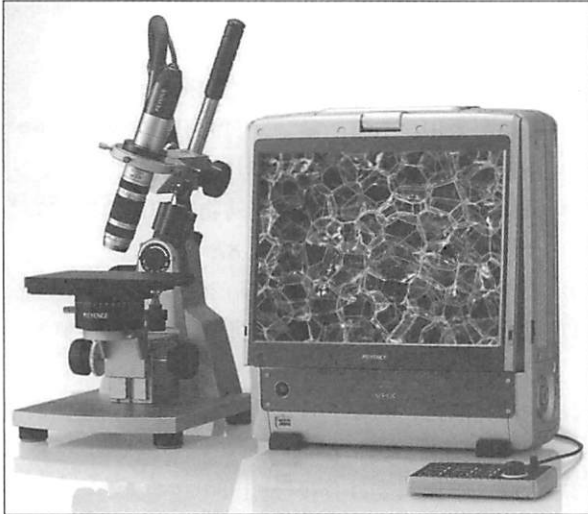


図 11 デジタルマイクロスコープの外観

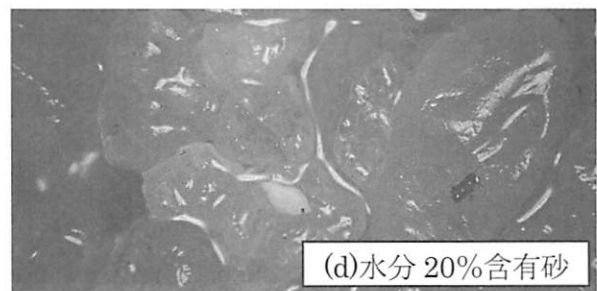
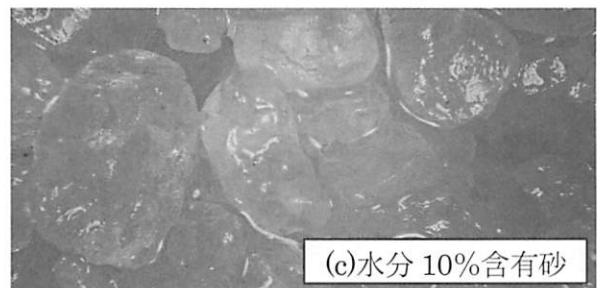
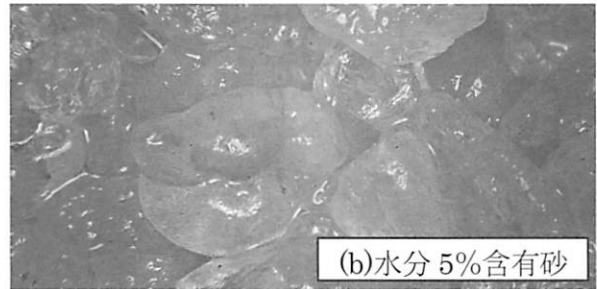
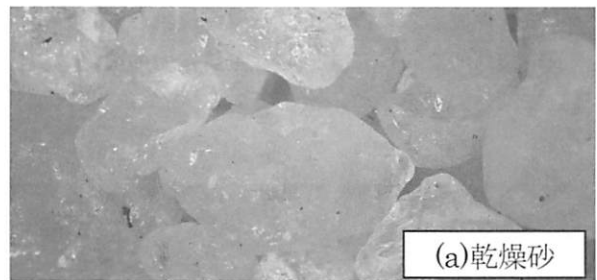
11参照) を基本に、レンジ保持台兼試料台である「耐振・高倍率観察システム (VH-S5)」および100~1000倍での観察を可能にするレンズユニット「ワイドレンジズームレンズ (VH-Z100R)」を組み込んだ。すなわち、二次元 (表面) 観察には鑄型表面の凹凸に対して有効となる「デジタルフォーカス (深度合成)」を併用した。なお、「デジタルフォーカス (深度合成)」機能とは、焦点位置の異なる画像を合成し、全焦点一致画像が得られるように深度合成「高画質深度合成」

することである。

また、補助的な機能として、合成の際に、写真同士の位置のズレを自動で調整する「倍率位置補正」機能も使用した。

三次元観察における「3D表示」機能とは、「高画質深度合成」機能の一つである。すなわち、焦点のあった像部分を、それぞれの撮影時のレンズ高さにしたがって、3次的に合成して3D画像として表示するものである。合成された3D画像は、回転、拡大および縮小などが可能である。本実験では、斜め上方の4方向からその場観察した画像の「3D表示」を行なった。

図12に JIS5号ケイ砂 (JIS 粒度指数: 59.2) の新砂を用いて、水分20%まで含有させた生型砂 (水分付着



→ | | ←1mm

図 12 JIS5号ケイ砂のその場観察状況

砂)の二次元(表面)その場観察状況を示す。写真(a)に示す乾燥砂の表面はケイ砂特有の滑らかな褐色光沢(本写真ではモノクロ表示では黒色)を呈している。5%水分添加・写真(b)で砂の表面は水に濡れたような模様を呈し、写真(c)には水分添加量が多くなるにつれて砂粒間を繋ぐように白く筋状に水分が付着している個所が多くなる。その傾向は20%水分含有砂・写真(d)で顕著に認められ、余分な水分は表面張力により砂粒間の隙間を満たすように見える。

図13ならびに図14に新砂およびライン砂により造型した水分5%含有・減圧凍結300sec後の三次元(「3D表示」)画像を示す。三次元での4方向からの減圧凍結鑄型表面の「3D表示」状況を明瞭に現しており、詳細については今後の検討課題である。

本稿を作成するに際して、資料を提供して頂いた、(株)前川製作所ならびに(株)三共合金鑄造所の関係者の皆様方に深謝の意を表する次第である。

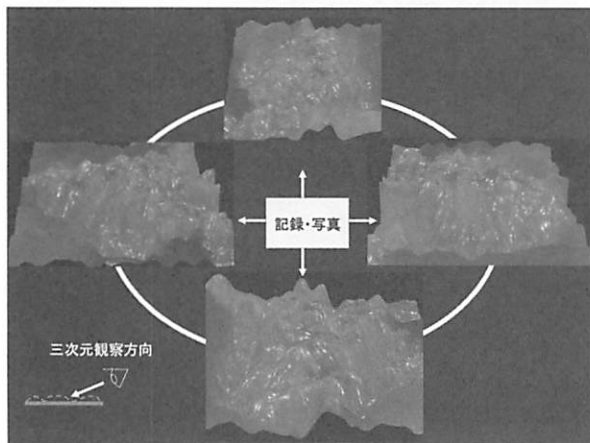


図13 水分5%含有(新砂)・「3D表示」

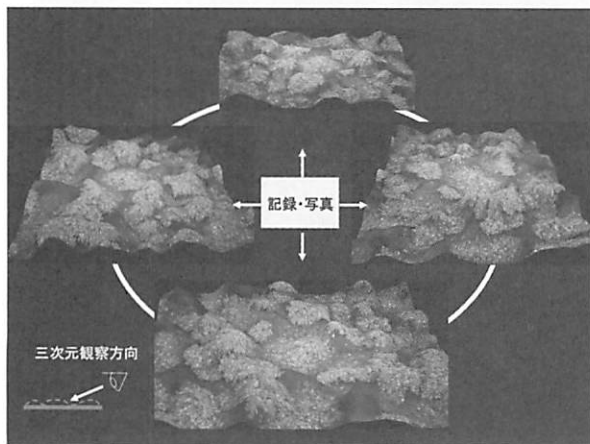


図14 水分5%含有(ライン砂)・「3D表示」

おわりに

従来の熟練された技術者によるものづくりの常識は、凍結鑄型鑄造法には全く当て嵌まらない。なぜ引けが発生しないのか、寸法精度がなぜ確保できるのか、さらに押し湯(あがり堰)がなくても形状ができるなど、これらの鑄造法の機構解明が待たれる。

完全な鑄物を経済的にしかも安定的に生産するためには、管理された清浄な溶湯を溶製し、それぞれの鑄造法の長所と特異性を把握して、それぞれの製品に応じたプロセスを選択する必要があることを理解すべきである。

最後に本解説の内容は、平成23年度関西大学 大学院理工学研究科高度化推進研究費の助成によって達成された研究成果の一部を纏めたものである。関係者の皆様方にここに謝意を表します。

文献

- 1) C.Moore, D. Beat: Foundry Trade J., May (1979)1049.
- 2) 小林一典: JACT NEWS, No.253(1978)14.
- 3) 喜多清、日野春樹、富永昌武: 鑄物52(1980)1, 28.
- 4) 鹿島次郎、他: 冷熱鑄造技術開発に関する研究補助事業研究報告書(1981-3)
- 5) 喜多清、他: 金属(特集56-1)2.
- 6) 蓑輪、太田、二宮: 鑄物52(1980)9, 530.
- 7) 蓑輪、二宮、太田: 鑄物53(1981)1, 15.
- 8) 蓑輪、二宮、太田、高柳: 鑄物54(1982)5, 309.
- 9) 今村: 食品と科学(1978)4, 87.
- 10) 小林一典: JACT NEWS, No.262(1978)44.
- 11) 近藤: 日本鑄物協会第104回全国講演大会概要集(1983)p.84.
- 12) 太田、二宮、蓑輪: 日本鑄物協会第96回全国講演大会概要集(1979)p.69
- 13) 近藤: 学振24委員会報告(1980)
- 14) 川村邦明、徳永延夫、首代英樹: 日本鑄造工学会関西支部「平成17年度春季支部講演大会」概要集(2005), 6月, p.21-p.28