

鑄造欠陥の現場的要因とその対策 — 生型造型プロセスを中心に —

竹本 義明

TCT 鑄造技術事務所

中小型鑄物に生じる鑄造欠陥対策推進に当たり、最も重要なことは、真の原因究明にある。原因究明法と原因に潜む現場的な要因について、また、類似の欠陥予防に必要な工程の体質強化について、具体例をもとに説明した。

1. はじめに

鑄造現場には、人・材料・工法に関わる多くの要因があり、その要因が毎日のように変動している中で、鑄物が生産されている。これらの要因の変動幅が最小になるよう管理しているが、鑄物はその意を無視するように、突然不良が多発し、我々を悩ます。しかし、そこに原因があるから不良が発生する。

不良対策の中で最も効果的な対策は、真の原因究明とその対策であることは周知のとおりである。ここでは、鑄造工程のうち生型造型プロセスを中心に、その工程で最も多い「もの噛み」を中心に、その真の原因究明方法に対し、長年鑄造現場に携わったものとして、解決策と思われる2、3の知見を述べたい。

2. 鑄造欠陥対策の原則と進め方

鑄物はその金属の融点以上に過熱し、鑄型に鑄込み、凝固させて造られる。その鑄込み過程でガスや空気を巻込み、溶湯と反応して砂噛みやガス欠陥などが生じ、ひいてはひけ巣まで至る。このように複雑な工程を経て欠陥になるため、それぞれの欠陥の真の原因究明を難しくしている。しかしながら、欠陥によっては真の原因が特定できるものもあり、意外とこの種の欠陥が多いのが実態である。

第一の原則は、真の原因が一つの工程に特定できるものとできない物に分別する。前者に対しては、その原因となる工程の是正活動を行い、不良率を押し下げることである。一方、一つの工程に特定できないうち、複数の工程が関与すると推定されるものに対しては、特性要因図からいくつかの要因に絞込み、個々の要因について鑄込みで確認し、真の原因を見つけ、是正活動する。多くの場合、1つの要因を対策しても、不良は半減する程度でなくなる。絞

り込んだ別の要因についても、鑄込みで確認し、その要因が真の原因の1つになっているときは、是正活動で対策を進める。他の要因についても同様な調査・対策を行い、不良率を押し下げる。一般的に不良対策が進んだ工場では、この種の欠陥が多い。

第二の原則は「生産する鑄物に必要な技術水準まで鑄型および溶解工程能力や方案技術を上げ、欠陥発生を予防することだ」。いわゆる鑄造工場の体質強化である。前項で述べたように、上記生産工程は多くの要因に支配されているので、ある変動幅を持つ。変動幅が大きければ大きいほど、第一の原則で進めた対策結果に一喜一憂することになり、最悪の場合は、対策を重ねるうちに、最初に行っていた条件に戻る場合さえ起こる。また、他ライン・他工場の条件をそのまま真似ても、生産する鑄物に必要な条件が異なるので、良い結果が得られないか、あるいは過剰な生産条件になる。例えば、生型造型でド

ラムを生産する場合とエンジブロックを生産する場合は、その鋳込み重量差で鋳込み時間が異なる。鋳込み時間が鋳型の耐熱時間より長い時は、生型が受ける熱負荷が大きくなり、生型は拗われや物理的な鋳型破壊が起こる。したがって、生型はこの曝熱時間に耐える鋳型強度が必要となる。

この体質強化策の中で、溶解や造型工程は、多くの工場でかなり進んでいる。特に、高圧造型技術の導入以来、造型工程の高度化が進んでいる。また、溶解工程についても、製品の材質に直結するだけに、多くの配慮がなされている。しかしながら、造型工程の高度化がなされていても、生型砂については、ほとんど改善がなされないままになっている工場が多い。これは生型砂の回収工程が既存設備や建物に規制され、大幅な改善が難しいことも一因になっている。しかし、最も重要なことは、生型砂が鋳物づくりの基盤であることを企業トップは銘記すべきである。

第三の原則は、「対策結果の横通しと工程への反映、製造条件の順守」である。作業方法を標準化しても、作業員一人一人にその背景や目的を十分に伝

えないと、形だけの作業になり、極端な場合、誤った解釈をして作業する場合が起こる。作業を行うのは人間であり、そこには意識が働く。意識が積極的になるか否かは、結果に大きな影響を与える。

以上3つの原則が十分に機能するために、日頃から心すべき点は「目で見える管理」の推進である。一つ目は、工程の単純化と整理整頓である。工程が複雑になれば、原因が見えにくくなる。工程を直線またはU型にして単純化を推進する。金型、治具や中間仕掛品には看板をつけ、どの工程まで完了したかを明示する。設変を繰り返した金型は、誤組が生じやすい。誤組ができないような金型構造にすることも必要である。二つ目は、各工程の管理項目の明確化である。各工程で守るべき事項のみを簡潔に明示することや数値化できる工程は、X-R管理図を現場掲示し、作業員全員が共有できるようにすることが必要である。三つ目は機械故障の最小化である。「チョコ停」といっても品質に大きな影響を与える。これは作業ミスを生じやすく、不良原因究明の大きな支障となる。特に、鋳込み工程で鋳込温度・時間管理に影響を与える。

3. 個別欠陥是正活動

3.1 真の原因究明法

個別に鋳造欠陥を対策する上で、まず行うことは、鋳造欠陥の層別である。部品毎に作ったポンチ絵に、不良情報を3WH（どんな不良が、どこに、いつ、どれだけ）の要領で整理する必要がある。その一例を図1、2に示す。前者はピンホール欠陥のみの例で、後者は複数の欠陥層別例である。これらの欠陥のうち、押込み、打傷や中子折れのように肉眼で現象が分かるものは、これらの不具合が起こった原因物の調査に入ればよい。例えば、押込みは、明らかに鋳型の寸法不具合から生じるので、中子や主型の寸法

が大きくなっているのでは、計画より大きい原因を追究することで不良対策が完了する。しかし、異物噛みやピンホール欠陥のように、欠陥の原因物質が何であるかが定かでない。このような欠陥に対しては、顕微鏡やEDXのような手段で原因物質を特定する必要がある¹⁾。現場では、迅速な対応が求められるので、顕微鏡検査が基本となる。顕微鏡で特定でき

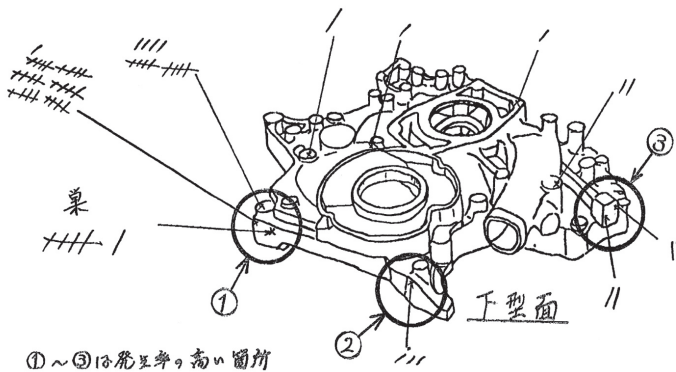


図1 機械加工後に発生したピンホール欠陥

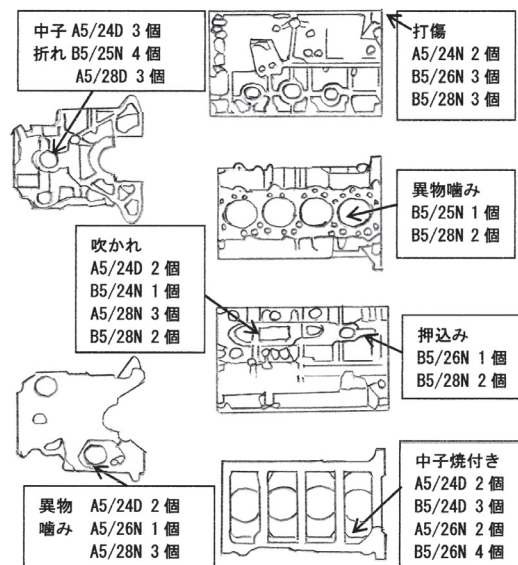


図2 複数の鋳造欠陥が発生した鋳物の層別例

ない時のみ、EDX 検査に頼るようすべきである。このためには、日頃から顕微鏡による観察力を上げるよう心掛ける必要がある。

原因物質が特定できた段階で、発生した工程の推定または特定が必要である。この詳細は事例の中で説明するが、異物噛み欠陥の例では、原因物質の反応状態で、被せ工程の前で起こった欠陥の注湯中に溶湯と鑄型材や塗型材と反応してできたものの区別が可能である。通常前者は、現場観察で工程を特定できるが、後者は複数の工程に関与するので、特性要因図から要因の特定を行う必要がある。要因特定の思考に有効な手段として、「比較法」²⁾、「ばらし場の観察」、「欠陥に一番近い中子が犯人」がある。「比較法」は、主として方案の違いを金型で比較しようとするものである。類似の鑄物で成績の良いものがある。これが先生で、湯口系の僅かな違いを修正する手法である。「ばらし場の観察」は、ガス抜き穴に溶湯が回って、ガス道を塞ぐとき欠陥が出やすくなる。この現象は、ショット後の不良品をいくら丁寧に観察しても分からないからである。最後の、「欠陥に一番近い中子が犯人」としたのは、鑄型ガスがガス欠陥のもとになることを多く経験したからである。中子の場合、ガス抜きが不十分な時、鑄物を通過してその上面にガス欠陥ができやすい。中子ガスは溶湯と反応し、酸化被膜を形成しやすく、紐状に痕跡を残し、圧漏れ欠陥を誘発する。したがって、中子ガスが溶湯を通過して排出しないよう、十分なガス抜きを確保すると同時に、短時間鑄込みで、ガス圧が高まらないうちに中子を覆うようすべきである。

このように欠陥の真の原因が特定・推定できた後は、鑄込み試験で確認をする必要がある。その際、心すべきは、鑄込みに際し「一貫番号付け」した鑄込みで、各鑄物の製造条件をしっかりと押さえておくことだ。そうしないと、鑄込み温度など本来原因となっていない要因のばらつきで、誤った判断を下して迷宮する場合があるからである。

3. 2 真の原因が特定できた欠陥対策例

砂噛み欠陥の真の原因が特定できた事例を写真1に示す。欠陥部を顕微鏡観察した結果、砂粒は原形状をほぼ保ち、鑄物と砂粒接触面で僅かな反応が認められる。このような状態が認められるときは、比較的小さな砂塊がキャビティ表面に付着した状態で鑄込みが行われている。端的にいうと、鑄込み前に砂噛み欠陥が約束されている。したがって、上下枠が被せられる工程を含めて、その前工程で起こったと言える。この事例では、調査の結果、上枠を反転する時、小さな砂塊がキャビティ表面に付着してい

ることが分かった。枠反転フレームに砂が付着しないようテフロンシートを張り付けて対策できた。

フライホイールに生じた滓噛み欠陥の事例を写真2に示す。滓は取鍋から入ったもので、滓はガラス状半透明の中に小さな鉄粒子が穴周辺に散在している。これは明らかに砂粒と溶鉄との反応物とは異なっていた。注湯中に取鍋から滓が入り込まないように、注湯口周辺にセラミックファイバーを浮かせ、補足することで対策した。

塗型剥離に伴う圧漏れ欠陥例を写真3に示す。シェル中子近傍に数mmの大きさの気泡欠陥があり、気

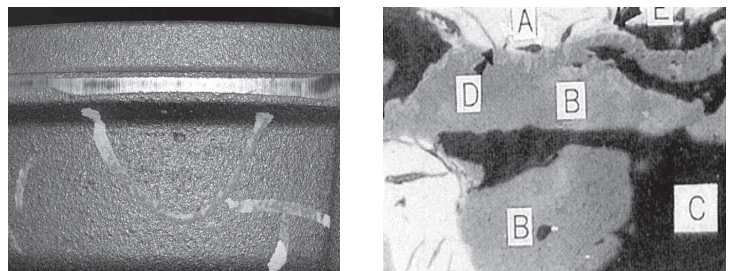


写真1 プレーキドラムに発生した砂噛み欠陥
(A: 鑄鉄、B: 砂粒、C 空隙、D 反応生成物)

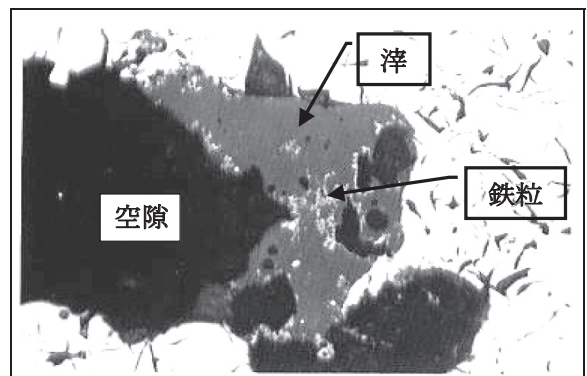


写真2 フライホイールに生じた滓噛み欠陥

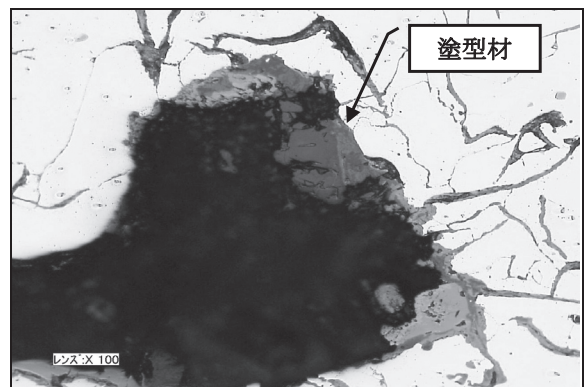
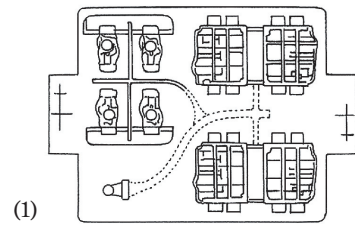


写真3 油圧部品に生じた圧漏れを伴う気泡欠陥

泡周辺に塗型微粒子が付着していた。シェル中子はアルコール性塗型、着火乾燥品である。中子内のガス抜きが不足しているため、塗型膜がガス圧に耐えられなく剥離し気泡欠陥を生じ、圧漏れに至ったと推定された。水溶性塗型と乾燥炉による乾燥などで不良の発生は治まった。この場合、ガス抜き強化のみでも欠陥防止ができた可能性がある。

3.3 真の原因が複数複合する欠陥対策例

複合する原因で欠陥が発生する場合、いくつかの施策で欠陥が減少する比較的単純な事例を図3に示す。対象となった鑄物は、トランスミッションケースで、主型面に発生する焼付きが対象である。ミッションケース4個込めに、リヤカバーを4個配置している。堰位置は、図3(2)に示すようにギヤ、挿入口の下側に設置し(a)、上型から吐かせ、開放揚がりから排出する(b)。改善前は、鑄込み後、開放揚がりから、爆発的に溶湯が噴き出す状態であった。中子からのガスは、前後面にある丸穴(c)から逃げようとして設計したが、中子空隙部の高い部分にガスが残り、これに引火してガス爆発を起こすと考えられる。したがって、図3(3)に示すようにガス濃度が爆発限に至る前に着火しようと考えた。いわゆる呼び火の考えである。焼付きは、3%から1%に低下した。それでも1%の焼付きが残るので、上部への解放揚がりをやめ、部分的な吐かせだけにし、図3(4)に示すようなガス穴2箇所設置し、中子の高い部分からガスが排出できるようにした。図3(5)に対策結果を示す。



(1)
 粗材重量：T/Mケース 20.6kg/個、
 リヤカバー 4.8kg/個
 鑄込重量：148.8kg/枠
 鑄込時間：15～18秒/枠
 鑄込温度：1663～1723K (1390～1450°C)
 T/M中子重量：29.6kg (2個一体)

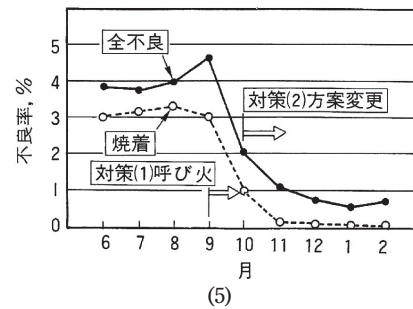
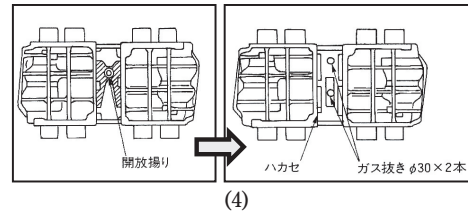
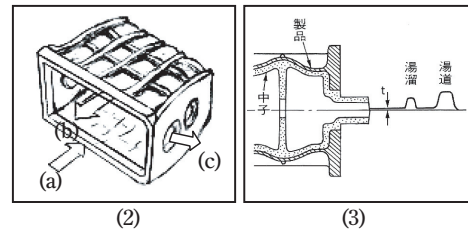


図3 トランスミッションケースの不良対策

4. 鑄造工場体質強化のための欠陥予防活動

4.1 生型サンドシステムの強化

鑄物の品質が安定しない原因に、生型砂のばらつきが大きいことに気づかなく、鑄造方案の改善で凌いでいる工場が多い。そこでは、方案変更で一喜一憂し、数回の変更でもとに戻った話をよく聞く。このような工場は、まず混練前回収砂の温度（雰囲気温度も合わせて）、水分、粘土量を数日間連続または混練バッチ毎に計測してみる必要がある。砂温が45℃以上になっていないか、雰囲気と温度差が10℃以上でないか、水分が混練目標水分の70%以下になっていないか、粘土量が混練目標粘土量の90%以下になっていないか診断することである。仮にいずれかに不具合があるなら、その原因を排除することである。

(1) 比較的軽度な症状を示すシステム

砂温が問題にならない時でも、温度差が大きい時は、回収砂水分が低いことが多い。この状態では、混練時水分が自由水のままにおかれやすく、コンパクトビリティの低下が激しい。極端な場合、10%以上低下し、脆い砂になり、溶湯に浸食されやすい。このような場合は、ばらし時やダマ分離後に散水を繰り返し行う。ベルト上でも構わないが、ベルト乗り移りなどを利用し、攪拌が必要である。温度がそれほど高くないのに、雰囲気との温度差で、ホッパーやバケットエレベータなどに付着する。これを避けるためには、付着する搬送機を加熱することである。加熱によって、水分添加が可能になり、システムサ

ンドのばらつきを抑えることができるが、これだけでは回収砂水分条件 (>混練砂水分の70%)を達成することは難しいことが多い。このようなシステムには、攪拌式加水機が必要である。

(2) 比較的重度な症状を示すシステム

造型時の中子砂比率が5%を超えやサンドメタル(以下S/M)比が6以下になるシステムでは、回収砂温度が高く、水分が低い、粘土量ばらつきが大きい状態が起きやすい。このような時は、中子砂や焼け砂を意識的にシステム外に取り出し、冷却・加水工程を加える必要がある。以下に事例を表1に示す。

表1 造型ラインのニーズ変化

	当初	Step1	Step2
主要部品	ドラム、ヘッド	+小C/B	+中大C/B
S/M比	7~15	5~15	2.5~15
中子使用率	Max. 6%	Max. 8%	Max. 25%

当初から砂噛み、焼付きといった不良が多かったが、Step1の段階で、これらの不良が経営的にも耐えられない程度に悪化した。これは生型回収砂の砂温が50℃を超える時間帯が多くなり、回収砂水分が0.8%程度になることが多くなり、かつ粘土量も目標値の90%に達しない場合が多発したからである。特に冬季この傾向が強く、品質低下が顕著になった。これを打開すべく、表2に示すように、シェイクアウト砂中心に改善した。

表2 砂回収システムの改善 (Step1)

改善点	施策
中子砂混入量制御	イ. シェイクアウト砂の選択的回収 ロ. 鋳物付着砂の選択的回収
砂温低下	上記分離砂に冷却装置の導入
水分・粘土量制御	上記分離砂を予備混練 (マルチマルにて加水+ベントナイト添加)
砂平準化	上記分離砂の均一回収
ダマ砂分離+温度差対策	イ. 振動コンベヤをジャンピングスクリーンに転換 ロ. サンドホッパーとダクト排熱予熱

シェイクアウト砂から中子砂の選択的分離は、図4に示すように、中子砂や焼けた砂は、単粒化しやすい性質を利用して分離した。

これらの対策を行った結果、回収砂の砂温は15~54℃から15~35℃に、水分は1.3~1.8%から2.1~2.5% (目標水分の70~83%)となり、混練砂の特性のば

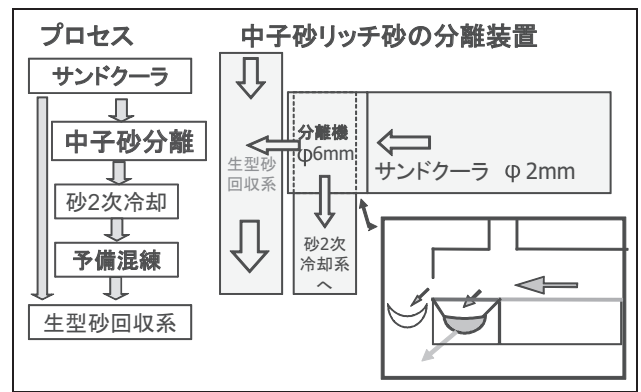


図4 中子砂・焼け砂の選択的分離

らつきが、図5に見るよう大幅に改善した。その結果、鋳物の品質も図6に見るよう大幅に向上した。しかしながら、約10年後、小型を含む中・大型シリンダーブロック導入(Step2)で、生型砂が急激に悪化し、鋳物の品質も悪化した。これは、冷却設備や予備混練設備の能力以上品質の悪いシェイクアウト砂や製品付着砂が回収されたためである。この問題に対処するため、予備混練機をマルチマルからサンドミキサーに変更し、処理能力も40T/Hか

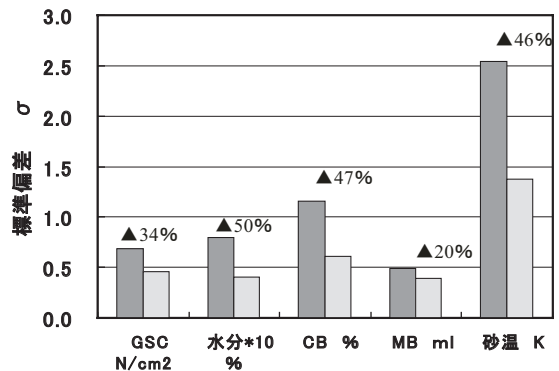


図5 混練砂特性のばらつき改善 (Step1)

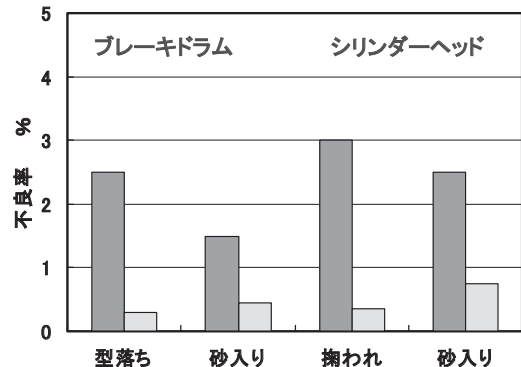


図6 代表的な鋳物の品質向上 (Step1)

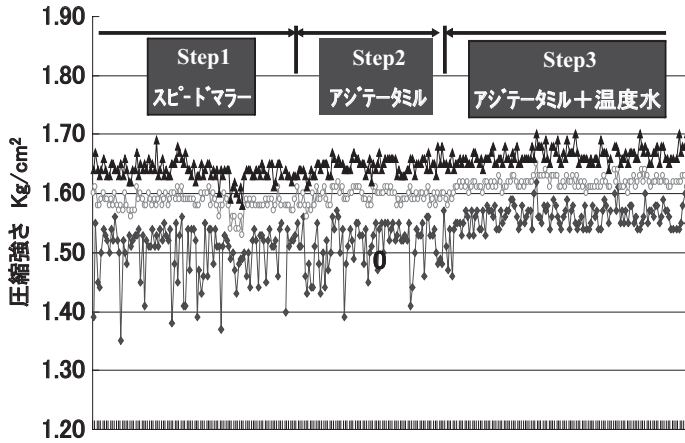


図7 混練砂強度のばらつき低減 (Step2)

ら60T/Hに能力を上げた。加えて、砂温管理ができるようにした。その結果、図7に示すように、混練砂の圧縮強さのばらつきが小さくなり、品質も回復した。

4.2 粉粒体の計量誤差

計量器は、生産活動が計画通りに進んでいることを保証する重要な指標であることは、論を待たない。鑄物工場では、鑄物砂や粘結材をはじめ、接種剤など多くの粉粒体材料が使われる。その計量は、多くの場合、容量式が使われる。しかしながら、その計

量精度はホッパー内の保有量などによって大きく異なることはあまり知られていない。一般的に、ホッパーに一杯入ったときは、ベルトコンベヤへの搬出量が落ち、ホッパー内の保有量が少なくなると急激に増加する。この現象は、ホッパーの壁が垂直ではあまり差がないが、勾配が強くなると、搬送量が少なくなる。このほか、空気輸送操作時の搬出量が大きく変化する。図8にコールドボックス用混練機への搬出量の経時変化を示す。大きく変動していることが分かる。

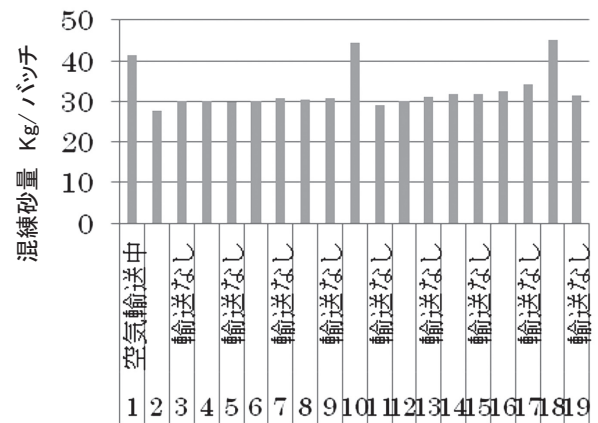


図8 コールドボックス混練砂のばらつき

5. おわりに

不良対策の原則について私見を述べたが、これを参考に、真の原因解明に、粘り強く立ち向かってほしい。その有力な手掛かりは、工程のばらつき調査である。これらの活動に欠かせないのが、鑄造工場のトップの支援である。工場トップの方が、どれだけ真剣に考えるかで、工場の品質レベルが大きく変わることを付言したい。

参考文献

- 1) 竹本義明：鑄物 53 (1981) 8, 425
- 2) 田中 隆：福島鑄物研究会 (1993, 11)
- 3) 事例 M. Mroczek 他：Modern Casting 2011, 7