巨大砂時計

— 細孔からの完璧な流れ —

A Big Hour Glass

— Perfect Flowing through the Small Orifice —

志 波 靖 磨*
Yasumaro SHIWA

Key Words : Hour Glass, Critical Orifice Diameter, Repose Angle, Washing Sand

1. はじめに

砂時計は、ある事象の継起を実行する大きさを規定するための装置である。日頃はあまり見かけない砂時計であるが、実際に製作してみると興味あるところが多い。粉体が孔から漏れる現象は日常よく経験する。砂糖の袋に開いた小さな孔からは、サラサラとこぼれ落ち、また胡椒や調味料は強制的に振り出される。粉体プロセスではホッパーからの定量供給にオリフィス(孔)が用いられている。砂時計をつくり上げるには粉体処理技術を駆使しなければならない。例えば、研磨材のプロセスは厳格な粒度規格に合わせるために木目細かな工程管理がなされ、高度に行き届いた品質管理の厳しい粒度検査がなされている粉体プロセスの代表的なものの一つである。砂時計のための砂の製造は研磨材の品質と全く同じように厳しく、粗大粒子が一個でも混入することは絶対に許されない。砂時計の砂は100.0%合格しなければならない厳しい品質規格である。また、ふるいでは取り除くことのできない空气中に浮遊している糸屑の混入が在っては成功しない。

砂の物性は、流動性をよくするような方向に調整し

なければならない。さらに、砂の品質だけではなく、大きなガラス容器の中のほこりや異物の除去、砂投入時の異物混入がないような工程の検討などが重要である。一年という巨大とも思える砂時計の製作過程を粉体処理工程の木目細かな検討から述べてみた。

2. 一年計砂時計の設計条件

巨大砂時計の製作にあたり、技術的、経済的、砂時計のイメージなどを考慮して以下のような設計条件をたてた。

(1) できるだけ少ない砂で、小さな砂時計を作る。オリフィス径を0.85~0.60mmφを目標とする。流量範囲は、120~60g/hとなる。

(2) 砂が細かい孔に閉塞しないよう、また、偏析には粒度の系統的变化を避けるためシャープに、例えばサイズ比 $2^{1/2}$ とする*)。

(3) 長期間使用により、ガラス内面がほこりで汚れないよう、砂の表面を十分に洗浄する。

(4) 人工の鉱物やガラスなどを使用せず、天然の砂を使い、砂のイメージを出す。砂は珪砂とする。

(5) 1トンの砂を1年間流し続ける。

砂の流出としての研究で、1mm以下の孔を長時間にわたって連続して流しつづけることは粉体技術的な点からも意義あることである。(5)の条件からすると、114.16g/hであるが、ここでは、さらに小さな孔

平成3年8月5日受付

* (株)徳寿工作所(〒254 平塚市大原3-19)

TEL 0463-32-1840 内線 61

<著 者 紹 介>

昭和46年同志社大学工学部化学工学科卒業。同年昭和電工(株)入社、塩尻工場に勤務。その間、研材および研磨微粉のプロセス改善を担当。昭和60年(株)徳寿工作所に転勤、現在に至る。

*) サイズ比 $2^{1/2}$: ふるい網の目開き比。標準数R20/3に相当する。

の通過を目標にたて、困難さの限界にも挑戦し、どのような問題が浮き彫りにされるかの情報を得ることにした。

自然の砂の表面は粘土や有機質で汚れているため、砂をまず洗浄することが必要である。また、巨大砂時計では、小さな砂時計と違って環境温度の影響を受け、時間の推定が不可能に近く大きくずれてしまうことが分ってきた。そして、巨大砂時計の設計には温度管理等の計画をおこなわなければならない。これらのことを逐次解決していった過程を以下に述べる。

3. 砂時計の性質

砂時計を作るに当たって考えることは、当然のごとく大きなものが混在していないこと、粒子を転び易いようにすることである。次に、目標とした時間をできるだけ正確に創るということであろう。我々も同様にこの手順を踏んだが、最初に、通過させるための砂つくりの研究に開発の力を注いだ。

3.1 粒度と流出速度

砂の重量流出速度におよぼす粒度の影響を見たのが図1である。粒度が粗くなるほど速度は大きくなることが分る。このことは、砂が粒度偏析すると速度が変わることをあらわしている。すなわち、砂を一定重量とした砂時計では粒度により時間が違ってくることを意味し、砂の粒度調整が重要であることが分る。(粉体プロセスで流速を重量でコントロールしているようなところでは検討の余地がある)。

3.2 環境温度の影響

砂時計の時間を測定していると微妙に時間の違いが現われてくることが分ってきた。図2は、1時間計に

図1 流出速度におよぼす粒度の影響

図2 砂時計の流出時間

よる時間の測定の一例であるが、午前中から午後になるにしたがって終了する時間が次第に長くなってきていることが分る。午後でも、後半になるとまた終了する時間が速くなってきていることは興味ある現象である。

そこで、環境温度を操作因子にとって砂時計の時間を測定してみた。結果、冷蔵庫と恒温槽を使って環境温度を -7°C から 55°C の範囲で変化させた。図3に示したように、流出時間は砂時計の方向に関係なく、直線的な関係にあることが分った。図4は、長期にわたっての卓上に置かれている砂時計の時間の測定である。この結果でも時期的な違いと思われる現象が現われており、環境温度の低い時期の砂時計は、速く流れ落ち

図3 砂時計におよぼす環境温度の影響²⁾

図4 長期にわたる砂時計の時間変化²⁾

る性質を有しているといえる。

3.3 急激な環境温度変化影響

砂時計の置かれている環境温度が急激に変化した場合、砂時計はどのような影響を受けるであろうか。小さな砂時計であれば上下の温度差が少ないから、特別なことがないかぎり環境温度は一定と考えてよいであろうが、大きな砂時計になると流れ切る時間も長くなり、しかも部屋の上下の温度は大きく変化してくる。このような温度差によって、上下容器内の空气の膨張による差圧が生じ、ノズルを介して空气の移動が起こる。この空气の移動をどのように処理するかで砂の流れは変わってくる。図5は空气の流れを変えた実験結果である。安定した砂の流れを作るには、砂時計の上下をオープンにしておけば良いことが分った。しかし、このような開放では、砂時計として密閉形にした場合よりも、同じオリフィス口径で2倍以上の速度で流れてしまう。また、下の容器のみに孔をあけた場合、急激な温度上昇が起これと、上の容器の空气の膨張分が下の容器にノズルを介して勢いよく流れ込むために、砂は空气の流れに助けられて多く流れ出ることになる。逆に、急激な冷却となると、下の容器からノズルを介

して上の容器へ空气の逆流が生じ砂は一時的に流れなくなる。このような状況では、砂の流れ落ちる時間の予測はできなくなる。これを防ぐためには、環境温度を一定にするか容器内の压力をコントロールするかの対策が必要となる。巨大な砂時計の環境温度を一定に保つことは建物の構造上不可能に近く、また砂時計の一部を温度コントロールすることでも大変なことで、上下容器の温度差を無くすることは現実的ではない。ここでは、次に示すような容器内の压力をコントロールする方法を採用した。

3.4 容器内の压力と流出速度

容器内の压力変化の第一の原因は、環境温度の変化によるものである。砂時計の上下容器の压力が同じ値であれば砂の流れには問題ないと考えられるが、実際の環境では容器上下の温度差が生じ両容器間に压力差が生じる。容器の上下の環境温度を変えたとしても砂時計の内部の温度を正確に測定することは不可能に近いので、砂時計内の压力を操作因子として砂の流出速度を測定した。実験装置を図6に示した。密閉した容器から6mmφのビニールパイプを引き出し、その先端にフィルターを通過した清浄空气を一定位置から衝突さ

図5 環境温度変化と流れ状況²⁾
(下室に0.9mmφ孔)

図6 压力操作による砂流出実験装置

図7 圧力と砂流出速度の関係

図8 流出速度におよぼす容器内圧力の影響²⁾

せる構造である。圧力計にしたがってバルブの開度を調整して容器内の圧力を変化させて砂の流出量を計測した。負圧の場合は、送風機を吸引に変えてパイプの先端から吸引し、圧力計を監視しながら実験を行なった。この圧力調整法により、実験中、安定した圧力を得ることができた。圧力を大きく変化させてみると(図7)、流量は圧力の増加に対して圧力の平方根で増加することがわかる。この関係は、使用するノズルや砂の粒度によって変化してくるが、砂が細かい場合、ノズル径によって圧力の影響力が変わってくる。図8から分るように粒度は粗い方が圧力に対して安定している。

4. 異物の除去作業

巨大な砂時計が閉塞することなく流れ続けるには、どのような異物が何処から侵入しているか、また侵入するかの検討を行ない、その対策をとらねばならない。砂の粒度調整とその中の異物除去には、網を用いたふ

るい分けが行なわれる。粒度調整には丁寧なふるい分けを実行すれば達成することができるが、異物の除去に際しては、砂時計に悪影響をおよぼす異物の分類をおこなわなければ、完全には取り除くことができない。図9に砂の中や工程の途中から侵入したと思えるような異物を示した。粗大異粒子や木屑、凝集粒子、水分があると凝集すると考えられる鉄粉、それに網では取り除くことのできない糸屑、虫の死骸などさまざまである。図10は、巨大砂時計を完成させるために必要な工程の検討をするためのフローである。粉体プロセスの工程からは異物や汚れが簡単に侵入することが考えられる。前工程で完全に異物などが除かれていたとしても、後の工程で思わぬところから侵入してしまうことも考えておかねばならないことは当然のことである。実際の工程を考えると、各工程の機能の処理が終わってそれから異物等の侵入や汚染がないように注意しておくことは大変な労力と費用が掛かってしまう。例えば、図の最初のふるい分けの目的は、必要粒度のためのサイジングであり、次のふるい分けは、異物や粗大粒子の除去である。この場合、最初のふるい分けでは異物の侵入にはさほどの注意は払わない。そして、後のふるい分けには分布の調整は行わず、異物の除去に最善を尽くすことになる。目に見えにくく、しかも莫大な砂粒の中に含まれる、小さく僅か1本あるか無いかの糸屑を検査して除去する対策は最も大変で悩まされた。この対策は、最終的には砂調整中は全く考慮しないことにし、砂投入に際して、完全な糸屑除去対策とその進入防止対策をとった。

5. 砂の洗浄—流動性と汚れ—

砂の洗浄は汚れの除去を第一の目的とし後処理などの問題から水のみで行なう。砂時計の砂は充分な洗浄を行なうことが望まれるが、実は洗浄を続けていくと、孔からの流出ができなくなっていくのである。基礎実験で、砂の洗浄時間とオリフィスからの流出現象を検討してみると、一般に言われているオリフィス限界径は、粒子径の6倍であるという常識をはるかに越えてしまい、15倍以上でも流れなくなってくる(表1参照)。これは粉体の摩擦係数が大きくなっていくのがその原因である。洗浄時間(距離)と安息角の関係を図11および表3に示す。洗浄時間が長くなるにつれて安息角が大きくなっているのがわかる。図12はその一例である。洗浄による濁りの除去と安息角の関係をみたのが図13であるが、濁りが取れていくと安息角も大きくなっていく。砂時計に使用する砂の表面は粘土質の微塵に覆

図9 砂の中の各種の異物

図10 砂時計完成のための検討(完全な異物混入防止を考慮して)

表1 オリフィスからの流出速度 (g/分)¹⁾, (フラタリーサンド, 150~425 μ m)

洗浄時間 (分)		0	15	45	90	150	240	580
オリフィス径 (mm)	7.665	-----	-----	-----	-----	-----	798	678
	6.100	-----	-----	-----	390	385	375	***
	5.611	266	254	330	326	315	314	
	5.006	191	221	254	249	252	***	
	4.025	127	140	152	152	154		
	3.268	84.5	84.6	88.0	$\times 71.3$	***		
	2.490	37.5	37.6	39.6	***			
	1.975	18.3	19.5	***				
	1.752	13.1	12.8					
	1.401	7.2	$\times 6.2$					

注) $\times$ は流出困難, ----- は未測定, ***は流出しない。n=5.

図11 総延長移動距離^{*}による安息角の変化¹⁾

^{*}距離 $=\pi \times D$ (洗浄容器直径) $\times N$ (回転数) $\times t$ (洗浄時間)

図13 濁度と安息角の関係¹⁾

a) 2時間洗浄安息角=31.0°

b) 102.5時間洗浄安息角=54.0°

図12 洗浄時間による安息角の相異

われているからできるだけ取り除くことが必要であるが、先に述べたように洗浄をやり過ぎると流れなくなる。したがって、1mm以下のオリフィスを通させるには、洗浄条件の十分な検討が重要である。

6. ガラスの洗浄

砂時計のガラス表面は、ほこりや油分などで汚れている。小さな粒子はその汚れによって、流れが大きく

左右されてくるから、砂の洗浄のみならずガラスの洗浄は重要な工程である。使用する水は、水道水では残留物がガラス表面に付着するから使用すべきではない。洗浄には界面活性剤を使用するが、この使用条件によって砂がガラス表面に付着する程度が大きく異なってくるのが分った。図14はその状況を撮った写真であるが、界面活性剤の濃度が高い方が綺麗なガラス表面になっていることは、洗浄の条件の設定として重要なことである。

表2はガラスの洗浄方法によりガラスの摩擦係数が違ってくることを示しており興味あることである。

7. 砂の製造工程

砂の製造は異物の除去、砂表面の洗浄と乾燥などの工程に、先に述べた粒子の特性を組み込まなければならない。図15は砂つくり工程のフローであるが、ここでは糸くずの侵入には全く考慮していなく、逆に『侵入はご自由にどうぞ』という考えにしている。糸くずのような軽いほこりは、どこからでも砂の中に入り込むことができる。

この工程で重要なところは、ふるい分けと洗浄条件の設定および乾燥方法である。オリフィス径が0.85mm

a) 10倍希釈 b)原液

図 14 洗剤濃度と砂の附着状況

表 2 ガラス洗浄方法と摩擦係数³⁾

洗 浄 操 作	静	動
1. 洗剤 (Teepol) で洗浄後布で拭き取り乾燥	0.07	0.04
2. イソプロピルアルコールグロー放電処理乾燥	0.8	0.6
3. 洗剤で洗浄後アルコールとチョークで乾燥, 綿布で拭き取り	0.33	0.27

図 16 砂の投入方法

であるからこの値の6分の1として、粒子の最大径は142 μm が限界粒子となる。ふるい網は、ふるいの効率を考慮すると167 μm 程度になる。粗ふるいでは160 μm の網を通し、精製ふるい出しは150 μm を通した。下網は106 μm を用いた。普通、機械メーカーの工場における砂作り工程では、微量の異物が確率的に混入することを防ぐことは不可能に近いと判断される。そのため、必要粒度の網目よりも大きな粒子が確率的に飛び込むような量に対しては、今回用いたふるい分け工程ですのような気の使い方はしなかった。要は、最終工程の砂投入では絶対に混入しないような工程を組み込んだ。図16のふるいは二段の網がセットされ、振動をやや強くした状態で全通ふるい分けをしながら砂の投入がおこなわれている。

洗浄機は、海岸で洗われる砂の洗浄条件を再現できるような機構の“旋回式洗浄機MP-WASHER”を用いた。1回で90kgのバッチ洗浄が行なえる。洗浄後、乾燥は棚型電気乾燥機を用い、木屑や糸くず、油分の焼却を行なうためにも高い温度350 $^{\circ}\text{C}$ 、10時間キープで行なった。このような棚型皿乾燥では普通、乾燥後、凝集粒子が発生するが、実はこの凝集粒子の発生がメリットになったのである。図17に示したのはその凝集粒子であるが、これは鉄粉がさびて粒子と凝集しているのである。この凝集粒子は、精製用のふるいで完全に除去することができたのである。除鉄機が必要ではなくなったことは大きなメリットであった。凝集粒子が鉄によるものであるということは、磁石で確認することができた。

8. 砂の投入と砂時計のサイズ

砂時計は、床から最大高さ13.55mの空間(実測)にセ

図 15 砂作り工程²⁾

図 17 乾燥凝集粒子

図 18 仁摩町一年計砂時計サイズ

ットされた後、砂の投入が行なわれた。砂時計の内部は、界面活性剤と精製水で洗浄し、組み立てられた後、糸屑の除去作業を行なった。

砂の投入に際しては、

- 1) 粗大粒子の混入防止と除去
 - 2) 砂の中の糸屑除去と侵入防止
 - 3) 使用する空気清澄(フィルター使用)と空気系配管の清掃作業
 - 4) 一日の作業のスタートと終了時の糸屑の侵入防止
 - 5) 最終のノズルセット時のほこり侵入防止
- についての充分な配慮を行った。

これは工場での一年計砂時計実験機で検討され、そ

表 3 洗浄時間と安息角の変化(大型MP)

$D=545\text{mm}$, $N=128\text{rpm}$, $A=180\text{mm}$, $d_p=0.21\text{mm}$, 砂=25kg, 水=25L.

洗浄時間 (hr)	洗浄距離* (km)	安息角 (°)	かさ密度 (gr/cm ³)	堆積量 (gr)
0	0	40.5	1.206	22.8
1	13.1	44	1.298	26
3	39.4	45	1.305	—
7	92	47	1.317	28.25
14	184.1	47.5	1.34	29
28	368.2	48.5	1.23	29.5
76	999.4	49	1.311	31.5
122	1604.2	48.8	1.254	31
172	2261.7	48	1.231	29.5
220	2892.9	49.5	1.263	31.55
282.67	3717.0	50.5	1.259	32.05

*) 距離 = $\pi \times D \times N \times t \times 60 \times 10^{-6}$ (km) (*60/80珪砂)

れをそのまま実行した。実際の砂時計への砂の投入方法を、図 16 に示した。砂時計は、図 18 のような形と大きさを有している。

9. むすび

この一年計巨大砂時計は、ふるさと創生の一環として島根県の仁摩町が仁万町内に設立したものです。1991年1月1日、午前零時にスタートし、3月3日にオープン、3月4日から一般公開されています。本製作レポートが粉体処理の、砂時計としての問題解決としてではなく、製薬、食品、化粧品、セラミックスなどの異物混入防止の工程の検討に少しでも御参考になればと思う次第であります。

この砂時計は、同志社大学の三輪茂雄教授をマネージャーとした研究体制のもとで実行されたものであります。教授には、砂時計の基礎実験から一年計の実験機までの実験的検討、砂の製造工程等の検討に際しては、多大なる御指導と御鞭達を頂きました。さらに生活文化研究所(所長:三輪茂雄)の井上良子さんには基礎実験の担当として数多くの無理な実験や有意義な議論を交わして頂きましたことを感謝致しますと共に皆様方にお礼申し上げます。また砂製造の実務研究は徳寿工作所研究所の王勇君の功績が大きいことを申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 志波靖磨, 溝口忠一, 三輪茂雄: 化学工学協会第53年会講演要旨集, 東北大学(1988)
- 2) 志波靖磨: ふるい分け混合合同分科会発表講演要旨集, 出雲市(1991)
- 3) 大場洋一: “ガラス表面の洗浄設計” 表面, No. 11, 59~86(1989)