

サイロの払い出し口における粉粒体の流動性に関する研究 (その1)

——流動性に対する諸因子の影響——

金谷 祐二 茶谷 文雄

Study on Flowability of Granular Material at Outlet of Silo Hopper (Part 1)

——Influences of Various Factors on Flowability——

Yuji Kanatani Fumio Chatani

Abstract

The outlet of a silo hopper should be designed so that granular material contained will be discharged steadily without clogging. The basic characteristics of the flowability of granular materials were studied by carrying out model tests for a coal silo and the following results were obtained. (1) The minimum size of the hopper outlet needed for coal to flow freely without clogging varies depending on the following factors, i.e., hopper slope angle, overburden pressure, fine content of coal, and water content of coal. (2) The flow pattern of coal near the outlet of a silo depends mainly on the hopper slope angle.

概 要

サイロの払い出し口は、サイロ内の粉粒体を払い出す際、粉粒体が払い出し口で閉塞を起すことなく、スムーズに流動するように設計することが必要である。石炭サイロを対象として模型実験を行ない、このような粉粒体の流動性について基本的な性質を調査したところ、以下の点が明らかになった。

(1) 石炭が払い出し口で閉塞を起すことなく流動するために必要な最小の開口寸法(限界開口寸法)は、ホッパーの傾斜角、石炭の積付け高さ、石炭の細粒分含有率、および石炭の含水比などの影響を受けて大きく変化する。

(2) 払い出し時における石炭の流動形態は、ホッパーの傾斜角によって変化し、ホッパーのライニング材としてステンレスを使用した場合、ホッパーの傾斜角が水平面に対して 50° 以上のとき、mass flow、 40° 以下のときfunnel flowとなる。

1. まえがき

サイロの払い出し口は、サイロ内の粉粒体を払い出す際、粉粒体が払い出し口で閉塞を起すことなく、スムーズに流動するように設計することが必要である。このような払い出し口の設計施工の実績は、既に多数あるものの、従来から払い出し口における粉粒体の流動性を対象とした研究、特に、これを実験的かつ系統的に扱った研究は、きわめて少ないのが実状である。この研究は、上記の粉粒体の流動、もしくは閉塞に関する基礎的な性質を実験的に明らかにし、設計上、より有効な資料の蓄積を図ることを目的としている。

ここでは、その第1ステップとして、粉粒体が払い出し口で閉塞を起すことなく流動するために必要な最小の開口寸法(以下、限界開口寸法と呼称する)、および払い

出し時における粉粒体の流動形態に影響を与えると考えられる種々の因子を取り上げ、模型実験によって、各因子が与える影響を調査した結果について報告する。なお、この模型実験は、石炭サイロを対象としており、粉粒体としては豪州産のワララ炭を使用した。

2. 調査概要

2.1. 実験装置

実験装置は、図-1に示すように、無限に続く平面ホッパーの一部を切り取った形状となっており、その寸法は実大ホッパーの $1/10 \sim 1/20$ 程度である。ホッパーのライニング材はステンレス(SUS 304)であり、ホッパーの傾斜角は、水平面に対し、 $30^\circ \sim 70^\circ$ の範囲内で、また、払い出し口の開口寸法は $0 \sim 250$ mmの範囲内で任意に設定することができる。装置の上蓋にはゴム製のエア-

バックが取付けてあり、これにコンプレッサーからエアを送ることによって、装置内の石炭に最大 0.8 kg/cm² の圧力を加えることができる。ホッパー底部には、エアシリンダーに接続されたシャッターが設置されている。また、装置内の石炭の流動状況を観察できるよう、装置の前後面はガラス面になっている。

2.2. 調査方法、および調査内容

2.2.1. 限界開口寸法に関する調査 調査の手順を以下に示した。①実験装置のホッパーの傾斜角、および開口寸法を設定する。②石炭を入れたバケットを装置の上部に組まれたフレーム上にセットし、バケット底部のスリット状の排出溝を開いて、石炭を装置内に落下させる。なお、装置最上部からバケット底部までの高さは約 50 cm である。③所定量の石炭を積付け、表面を平にならした後、装置底部のシャッターを開いて石炭が流動するか否かを確認する。なお、装置内での石炭の積付け高さは 70~80 cm である。④開口寸法を変えて、②~③の操作を繰返し、限界開口寸法を 5 mm の精度で求める。例えば、開口寸法が 150 mm のとき石炭が流動し、145 mm のとき閉塞した場合には、限界開口寸法は150mmとする。

上記の方法によって、ホッパーの傾斜角、上載圧（石炭の積付け高さ）、および石炭の粒径、含水比などを種類に変えて実験を行ない、限界開口寸法に対してこれらの因子が与える影響について調査した（表-1 参照）。

2.2.2. 流動形態に関する調査 調査の手順を以下に示した。①実験装置のホッパーの傾斜角、および開口寸法を設定する。②装置内にハンドスコープを用いて、少しずつ石炭を積付ける。その際、装置前面のガラス面に沿って、高さ 5 cm ピッチで白く着色した石炭の薄層をはさみ込み、所定の高さまで黒白の縞模様を形成させながら積付ける。③シャッターを開いて石炭を流動させ、上記の縞模様の変化となって現れる石炭の流動形態を、モータードライブ付きカメラで撮影する。

上記の方法によって、ホッパーの傾斜角、払い出し口の開口寸法、および石炭の含水比を種々に変えて実験を行ない、流動形態に対してこれらの因子が与える影響について調査した（表-1 参照）。

3. 調査結果と検討

3.1. 限界開口寸法について

3.1.1. ホッパーの傾斜角（水平面に対する傾斜角）の影響 調査結果の一例を図-2 に示した。同図中の

白丸記号は、ホッパーの傾斜角、および払い出し口の開口寸法を、記号の位置に対応する値に設定したとき、石炭が流動したことを示しており、黒丸記号は逆に石炭が閉塞したことを示している。なお、この項のホッパー傾斜角の影響に関する調査、および次項で述べる石炭の含水比の影響に関する調査においては、粒度調整をしない現状のままの石炭を JIS の標準網フルイでふるい、粒径が 4.76 mm 以下の石炭を選別して使用した。この報告では、このような石炭を 5 mm アンダーと呼称している。

現状のままの石炭、5 mm アンダーの石炭、および後述の調査で使用する 1 mm アンダーの石炭の粒度加積曲線を、まとめて図-3 に示した。

石炭の含水比を変えて図-2 と同様な調査を行ない、含水比をパラメーターとしたときの限界開口寸法とホッパー傾斜角との関係を求め、図-4 に示した。この図によると、気乾状態の石炭は、きわめて流動しやすく、払い出し口の開口寸法が 10 mm と石炭の最大粒径より大きければ、ホッパーの傾斜角に関係なく流動している。一

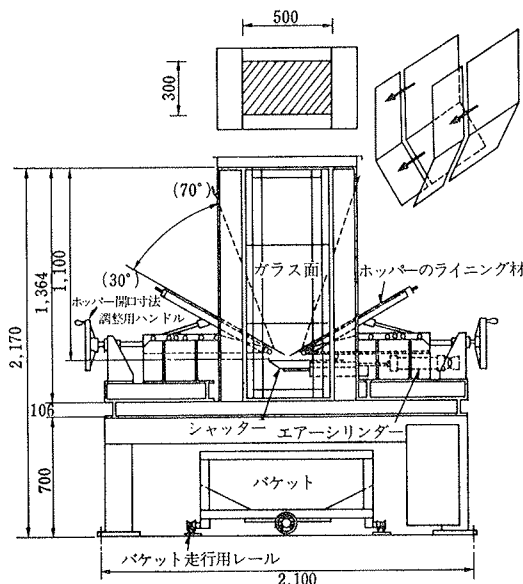


図-1 実験装置

調査項目	実験ケース番号	各実験ケースで調査の対象とした主な影響因子	ホッパーの傾斜角 (度)	上載圧 (積付け高さ) (kg/cm ²)	石炭の最大粒径 (実験ケース②のみ細粒分含有率)	石炭の含水比 (%)	払い出し口の開口寸法 (mm)
閉塞限界開口寸法の調査	①	ホッパーの傾斜角	30°, 40°, 45°	0	4.76mm	4*, 10, 15, 20	
		石炭の含水比	50°, 60°, 70°	0.4, 0.8	4.76mm	15	
	②	石炭の細粒分含有率	60°	0, 0.8	10, 25, 35, 50, 70, 100%	15	
流動形態の調査	③	上載圧	60°	0, 0.2, 0.4	1 mm	15	
				0.6, 0.8	4.76mm		
	④	ホッパーの傾斜角	30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70°	0	4.76mm	4*	30
						15	140
⑤	石炭の含水比	30°, 45°, 60°	0	4.76mm	4*, 10, 15, 20	140	
					4*	30, 60, 90, 140	
⑥	開口寸法	30°, 45°, 60°					

*気乾状態

表-1 調査内容

方、含水比が10%以上の湿潤状態の石炭は、気乾状態の石炭と比較してきわめて流動しにくく、限界開口寸法も大きな値になっている。また、湿潤状態の石炭の流動性は、ホッパーの傾斜角の影響を受け、ホッパーの傾斜角が大きくなるほど流動しやすくなる傾向が認められる。

含水比が15%の石炭を用いたときの、限界開口寸法とホッパー傾斜角との関係を、上載圧をパラメータとして図-5に示した。この図から、限界開口寸法は、上載圧の有無に関係なく、ホッパーの傾斜角が増大すると小さくなるのが分かる。なお、図には示していないが、気乾状態の石炭については、上載圧の有無に関係なく、限界開口寸法は10mmであり、きわめて流動しやすい。

なお、参考として図-4、および図-5の各実験ケースについて、実験装置内の石炭の平均かさ密度を求め、これとホッパー傾斜角との関係を図-6に示した。この図によると、石炭の平均かさ密度は、石炭の含水比、および上載圧が一定であれば、ホッパーの傾斜角に関係なく、ほぼ一定になっている。

3.1.2. 石炭の含水比の影響 限界開口寸法と石炭の含水比との関係を、ホッパーの傾斜角をパラメータとして図-7に示した。これによると、限界開口寸法は、各ホッパー傾斜角の場合とも、含水比が15%程度のとき最大値を示しており、最も流動しにくくなっている。

また、装置内に積付けた石炭の平均的なかさ密度と含水比の関係を、ホッパーの傾斜角をパラメータとして図-8に示した。この図によると、石炭のかさ密度は、各ホッパー傾斜角の場合とも、含水比が10~15%程度のとき最小値を示しており、最も締固まりにくくなっている。このことは、既述の、石炭が最も流動しにくくなる時の含水比が10~15%であることに対応していることから、含水比がある特定の値のとき、石炭の見かけの粘着力が最も大きくなり、石炭の締固まり易さや流動性に

影響を与えるものと考えられる。

3.1.3. 石炭の細粒分含有率の影響 粒度調整によって、図-9に示すような細粒分含有率の異なる5種類の石炭試料を作成した。なお、この報告では、粒径が1mm以下の石炭を細粒分と呼称しており、細粒分含有率を次式で定義した。

$$\text{細粒分含有率 (F.C.)} = \frac{\text{細粒分のみ重量}}{\text{石炭の全重量}} \times 100$$

上記の石炭を用いて、ホッパーの傾斜角を60°、また、石炭の含水比を15%と一定にし、上載圧を加えない場合と、0.8 kg/cm²の上載圧を加えた場合とについて、それぞれ限界開口寸法と細粒分含有率との関係を求め、図-10に示した。さらに、粒度調整前の現状における石炭の細粒分含有率がほぼ10%であるので、図-10中の各細粒

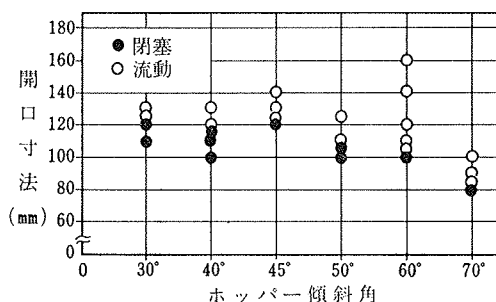


図-2 限界開口寸法の調査例 (石炭の含水比: 15%, 上載圧: 0)

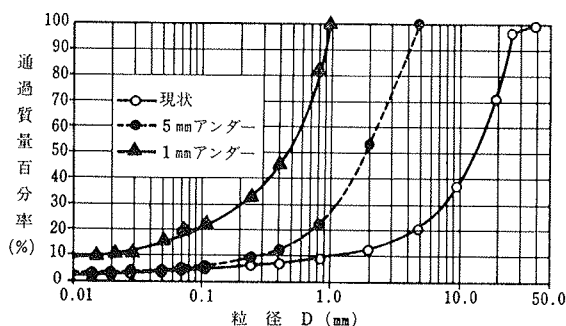


図-3 現状, 5mmアンダー, および1mmアンダーの石炭の粒径加積曲線

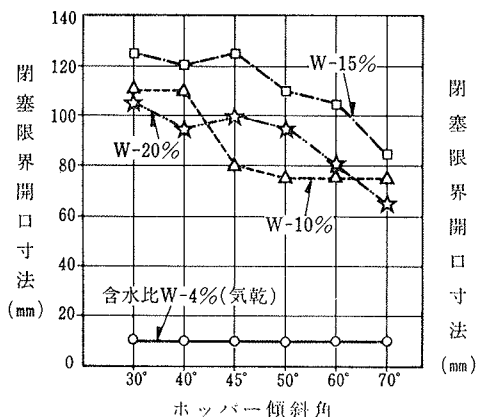


図-4 限界開口寸法とホッパー傾斜角との関係(上載圧: 0)

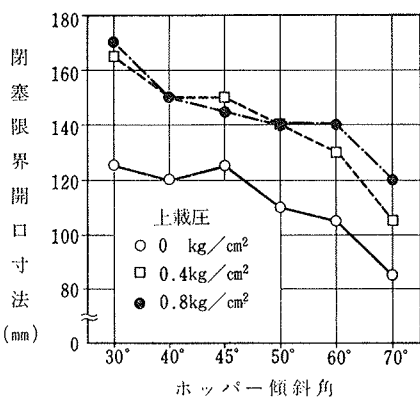


図-5 限界開口寸法とホッパー傾斜角との関係(石炭の含水比: 15%)

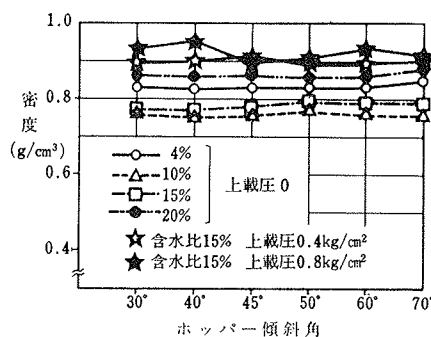


図-6 実験装置内の石炭の平均かさ密度とホッパー傾斜角との関係

分含有率における限界開口寸法を、細粒分含有率が10%のときの限界開口寸法で除して規準化し、この値と細粒分含有率との関係を図-11に示した。

これらの図によると、上載圧の有無に関係なく、細粒分含有率が50%以下の範囲内においては、細粒分含有率の増加に伴い、石炭は著しく流動しにくくなって限界開口寸法は急増するものの、細粒分含有率が50%を超えると、限界開口寸法はほぼ一定になる傾向が認められる。

以上から、細粒分含有率は石炭の流動性にきわめて大きな影響を与えることが分かる。

3.1.4 上載圧 (石炭の積付け高さ) の影響 1 mm アンダー、5 mm アンダー、および 40 mm アンダーの各石炭を用いて、ホッパーの傾斜角を 60°、また、石炭の含水比を15%と一定にしたときの、限界開口寸法と上載圧の関係を探り、図-12に示した。さらに、同図中の各上載圧における限界開口寸法を、上載圧を加えないときの限界開口寸法で除して規準化した値と、上載圧との関係を図-13に示した。

これらの図によると、各石炭とも、上載圧がほぼ 0.6 kg/cm² 以下の範囲内では、上載圧の増加に伴って流動しにくくなり、限界開口寸法は増大するが、上載圧が上記の値を超えると、限界開口寸法は一定になる傾向が認められる。また、このような上載圧の増加に伴う限界開口寸法の増大の割合は、粒径の大きい 40 mm アンダーの石炭について、最も大きくなっている点が注目される。

実験装置内に積付けた、各石炭の平均かさ密度と上載圧との関係を図-14に示した。この図によると、かさ密度と上載圧との間には、図-12に示す限界開口寸法と上載圧の傾向に類似の傾向が認められる。

3.2. 流動形態について

3.2.1. ホッパーの傾斜角の影響 ホッパーの傾斜角を 30°、45°、および 60°、開口寸法を 30 mm とし、払い出し時における石炭の流動形態を調査した結果を写真-1~3に示した。なお、使用した石炭は気乾状態であり、粒径は 5 mm アンダーで、ホッパーのライニング材はステンレスである。

写真-1によると、ホッパーの傾斜角を 30° とした場合、払い出し口直上の石炭が、周囲の石炭を残したまま先行落下して流路を形成し、この流路に向かって周囲の石炭が最上部から順次落ち込んでいくという、いわゆる funnel flow の形態を示す傾向が

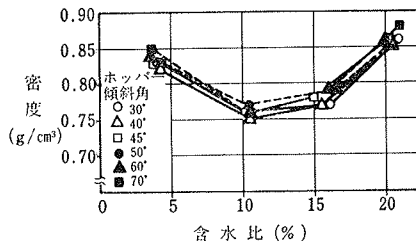


図-8 実験装置内の石炭の平均かさ密度と含水比との関係

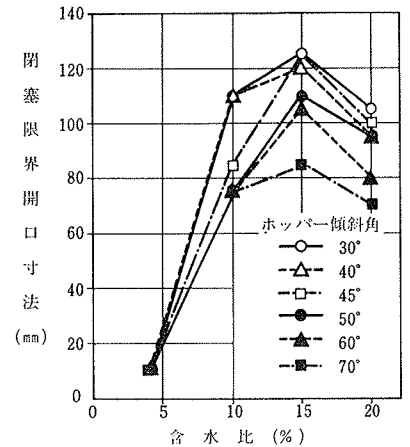


図-7 限界開口寸法と石炭の含水比との関係 (上載圧: 0)

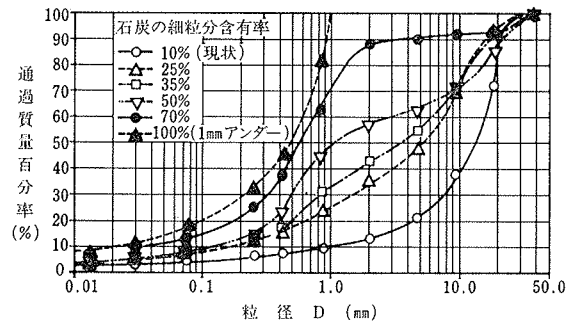


図-9 粒度調整後の各石炭の粒径加積曲線

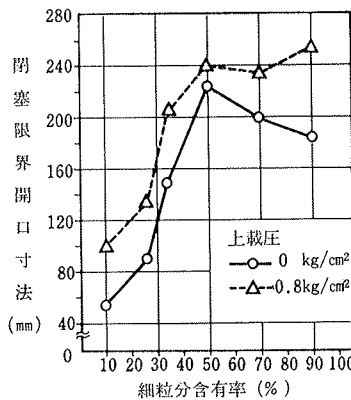


図-10 限界開口寸法と石炭の細粒分含有率との関係

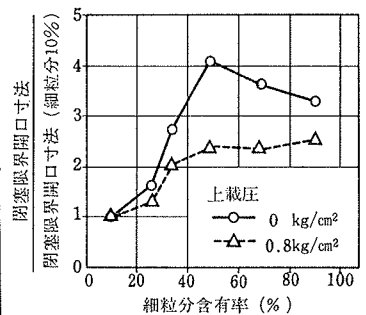


図-11 限界開口寸法 (細粒分10%) と細粒分含有率との関係

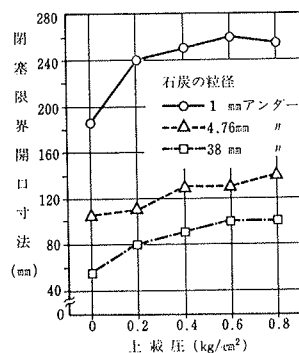


図-12 限界開口寸法と上載圧との関係

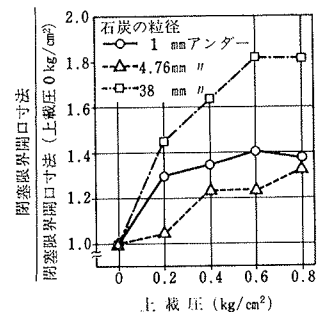
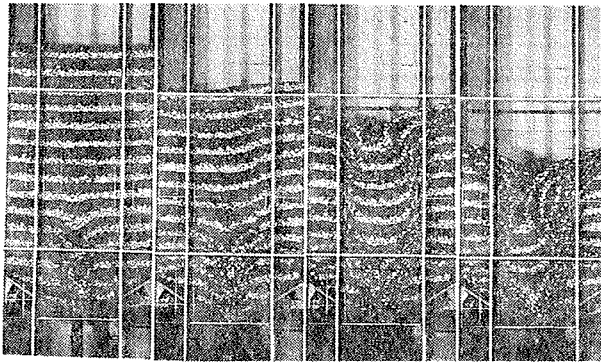
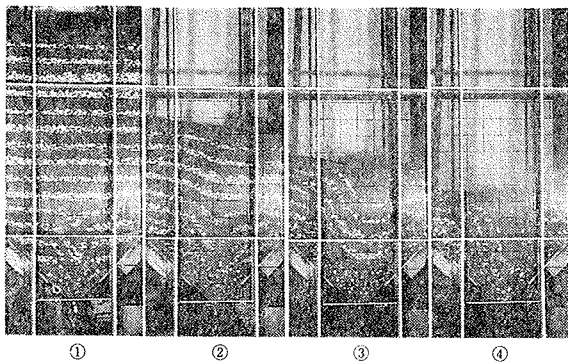


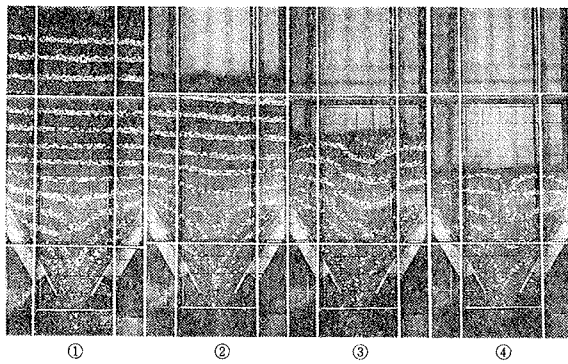
図-13 限界開口寸法 (上載圧=0) と上載圧との関係



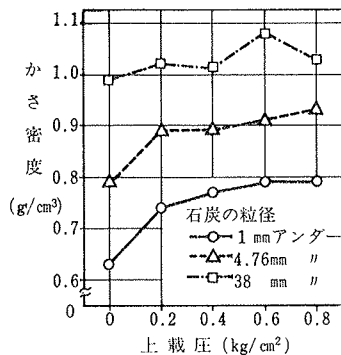
写真一 流動形態 (ホッパー傾斜角30°, 石炭: 気乾)



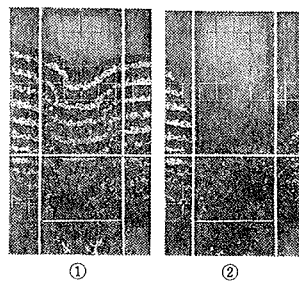
写真二 流動形態 (ホッパー傾斜角45°, 石炭: 気乾)



写真三 流動形態 (ホッパー傾斜角60°, 石炭: 気乾)



図一四 平均かさ密度と上載圧との関係



写真四 流動形態 (ホッパー傾斜角: 30°, 石炭の含水比: 15%)

認められる。

一方、写真一 3 によると、ホッパーの傾斜角を 60° とした場合、石炭の最上面は水平を保持したまま、石炭がホッパー底部から順次払い出されていくという mass flow の形態を示す傾向がある。ホッパーの傾斜角を 45° とした場合については、写真一 2 に示すように、石炭は funnel flow と mass flow の中間的な流動形態を示している。

また、写真一 1 ~ 3 によると、流動形態に対する石炭の積付け高さの影響が認められ、ホッパーの傾斜角に関係なく、払い出し初期の積付け高さがかかなり高い間は、石炭は mass flow 的な流動形態を示すが、払い出しが進行して積付け高さが低くなると、funnel flow 的な流動形態へと移行する傾向がある。

上記の写真に示さなかった調査結果も含めて、ホッパーの傾斜角の影響について検討すると、流動形態は、おおよそ、ホッパーの傾斜角が 40° 以下のとき funnel flow, 50° 以上のとき mass flow になるといえる。

3.2.2. 払い出し口の開口寸法、および石炭の含水比の影響 この調査の範囲内では、流動形態に対する払い出し口の開口寸法の影響は認められなかった。また、石炭の含水比を変えても、流動形態に基本的な変化は認められないが、ホッパーの傾斜角が 40° 以下の場合、湿潤状態の石炭は、写真一 4 に示すように、払い出し完了後も、その一部が払い出し口付近に残存する傾向が認められた。

4. 結語

以上、払い出し口の限界開口寸法は、ホッパーの傾斜角、上載圧 (積付け高さ)、石炭の含水比、細粒分含有率の影響を、また、払い出し時におけるサイロ内の石炭の流動形態は、ホッパーの傾斜角の影響を大きく受けて変化することを実験的に明らかにした。今後は、限界開口寸法と石炭の力学的性質との関係について、検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Jenike, A. W.: Storage and flow of solids, Bulletin 123, Engineering Experiment station, Utah State University, (1964)