

# 粉粒体の投入速度と粉体圧の研究

高木 史人  
杉田 稔

## § 1. はじめに

穀物・飼料等の粉粒体貯槽の大型化と粉粒体輸送機器類の進歩によって、粉粒体の投入速度（本稿では単位時間当りの投入重量をいう）がいちだんと大きくなった設備をもつ貯槽が出現してきている。多くの穀類を輸入しているわが国においては、港での荷揚げをできるだけ短時間でこなすための高速度輸送設備が設置されてきている。穀物貯槽を例にすると、従来 30~50 ton/hour であったものが近年では 200~300 ton/hour になり、さらに 500~600 ton/hour を越えるものまで出現してきている。

このように大きな投入速度で粉粒体が投入される時貯槽内壁に作用する粉体圧は Janssen の理論値の数倍に達する値が実測<sup>1)</sup>されている。特に貯槽底部では、排出時の動的内圧力値よりもこの投入時の値の方が大きくなり、このためにホッパーが崩落したり、鋼製のクロスビームが切れるなど幾つかの障害が発生している。

この投入速度の問題は従来の貯槽設計ではあまり考慮されなかった問題であり、新しく改訂された ACI 313 委員会のサイロ設計基準<sup>2)</sup>では投入時の最小衝撃圧係数が考慮されている。また、日本建築学会の容器構造設計基準案作成委員会においても、現在同様な動きがある。

ここでは、今後の貯槽設計において無視できない重要な問題である投入速度の粉体圧への影響について、模型サイロによって検討を行なったものを報告する。実験の結果では、投入速度の増加にともなって粉粒体による垂直圧力値は大きくなるのが分かった。投入速度が粉粒体の充填構造に与える影響について、かさ密度に着目し、投入速度と垂直圧力値とかさ密度の関係について検討した。粉体圧とかさ密度の関係については、既に1972年に英国の P.L. Bransby らがモデルビンから流出する砂のかさ密度を X 線撮影によって調べ、かさ密度の小さなところに大きな圧力値が測定されたことを報告している<sup>3)</sup>。

## § 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置

実験装置は、図-1 に示すように底を抜いたガラス製シリンダー（内径約 80mm・高さ 430mm）の底部に受感部径 55mm の東洋ポルドウィン製微圧力変換器 LPU-0.02 型を取付けて、垂直圧力値を測定した。圧力センサーの受感部面積は全底面積の約 46% であり、この部分の平均圧力値を検出している。圧力センサーの定格圧力値は 20 g/cm<sup>2</sup> で、U ゲージ（非接着型ストレーンゲージ）タイプの変換器である。U ゲージタイプの変換器は、断面図を図-2 に示してあるように、ダイヤフラムにかかっ

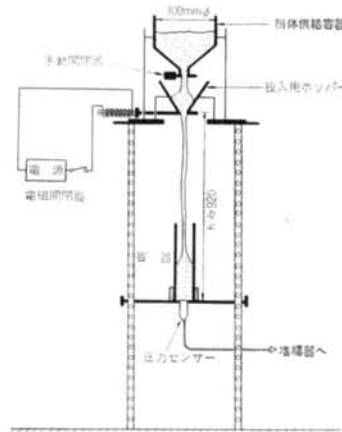


図-1 実験装置

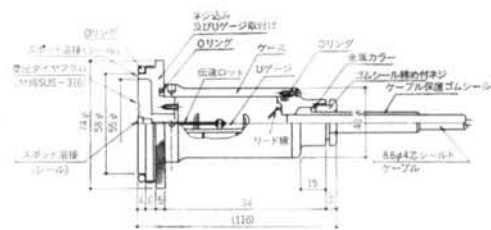


図-2 圧力センサー（Uゲージタイプ）の断面図



写真-1 実験装置全景 (恒温恒湿室内)



写真-2 投入用ホッパー周辺

た圧力は圧力伝達ロッドを通してホイートストンブリッジを組んであるストレインゲージに伝わり、その抵抗変化から圧力を検出するものである。

圧力センサーによって検出された応力(粉体圧)は、増幅器を通してデジタルマルチメーター、およびXYレコーダーに接続して読み取った。

写真-1に実験装置の全景を、写真-2に投入用ホッパー周辺を示す。

## 2.2 試料

本実験では、試料として完全球形のガラスビーズ2種と、でこぼこ形状粒子の標準砂2種、計4種類の試料を使用した。4種類の試料の物性の比較を形状・粒子・真密度について表-1に示した<sup>4)</sup>。粒度はガラスビーズ、標準砂ともに小さい粒子に対する大きい粒子の比は3~4倍になっている。

## 2.3 実験方法

粉粒体の投入速度は、9種類の口径の異なる投入用ホッパーによって変化させた。表-2に各試料ごとのホッ

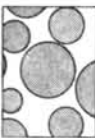
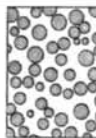


	ガラスビーズ GB201MS	ガラスビーズ GB739	相馬標準砂	豊浦標準砂
形状	 0 0.5 1.0mm	 0 0.5 1.0mm	 0 0.5 1.0mm	 0 0.5 1.0mm
粒度 ( $\mu$ )	590~1000	177~250	590~840	105~297
真密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.3~2.5	2.3~2.5	2.62~2.63	2.63

表-1 試料の物性

ホッパー 口径	ガラスビーズ GB 739	豊浦 標準砂	ガラスビーズ GB 201 MS	相馬 標準砂
4 mm $\phi$	3.0 g/s	2.3 g/s	—	—
6	8.6	6.7	5.1 g/s	4.2 g/s
8.5	18.9	14.6	12.7	10.3
10	29.0	21.8	21.0	16.8
12.5	49.0	37.2	36.8	29.7
14	63.1	47.6	49.2	40.1
16	102.3	77.5	84.0	67.5
18	124.0	93.5	101.7	82.1
19	164.8	125.2	139.0	111.7

表-2 ホッパー口径と平均投入速度

パー口径と平均投入速度の関係を示す。実験はあらかじめ計量した試料(約2,800g)を粉体供給容器に入れ、投入用ホッパーに供給される粉体が一定量となるように手動開閉器を調整した後、電磁開閉器を開いて投入を開始した。実験では、湿気などの環境条件の違いによって粒子の充填構造が変わり粉体圧に影響することが考えられる。そこで、図-1に示した実験装置を恒温恒湿室(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ・湿度 $60 \pm 5\%$ )の中へ入れ、実験に用いる試料はドライヤーで乾燥させた後、1昼夜以上放置してから使用した。

同じ実験条件で4回ずつ測定を行ない、測定値の再現性を確かめながら実験した。

投入速度が大きくなるにつれて、一度に多くの粉体が直接センサー受感部に当たり、その衝撃力によって受感部にひずみが残る、正確な粉体圧を示さない可能性がある。そこで、はじめに述べた実験装置により19mm $\phi$ のホッパーを用いて4種類の試料について予備実験を行なって検討した。その結果、投入速度が大きい場合は粉粒体の投入直後(数秒間)は異常に高い圧力値を示すことはあるが、それ以降は本来の圧力値を示すことが確認され

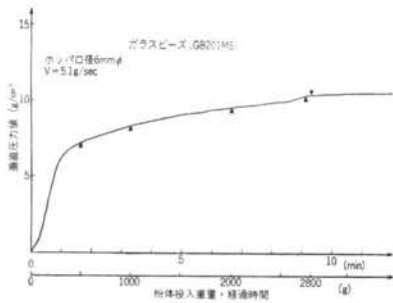


図-3 測定結果例 (GB 201 MS)

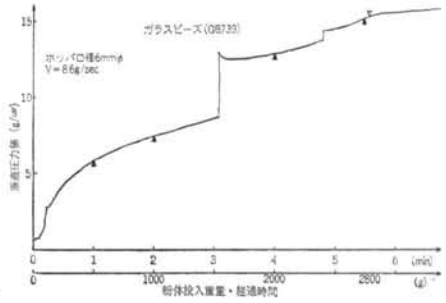


図-4 測定結果例 (GB739)

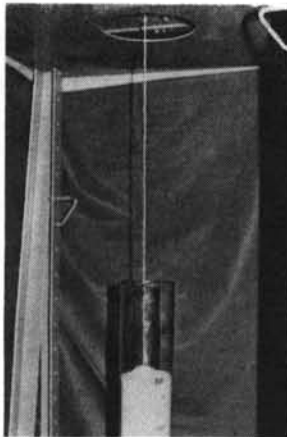


写真-3 容器へ投入中の豊浦標準砂

た。そこで投入速度が大きい場合の粉体圧は、投入数秒後の正しい圧力値を読み取った。写真-3に、容器へ投入中の豊浦標準砂を示す。

### § 3. 実験結果および検討

#### 3.1 投入速度と垂直圧力値

図-3、図-4にガラスビーズ GB 201 MS と GB 739 による測定結果の例を示す。どちらも投入開始とともに圧力値は急激に上昇し投入重量が 500 g くらいに達すると圧力の上昇はゆるやかとなる。GB 739 の場合、約 1,500 g 投入したときに急激な圧力値の増大を示している。これは粉体層と粉体層、あるいは粉体層と壁面でのすべりが原因と思われる、すべりの起こる時間と大きさが一定でないために同一実験条件での測定値のばらつきとなって表われてくる。今回の恒温恒湿室内の実験において、GB 739 ではすべりによるばらつきが観察

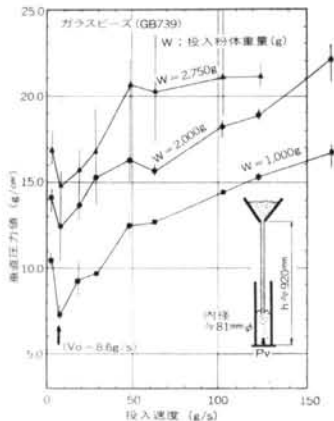


図-5 投入速度と垂直圧力値 (GB739)

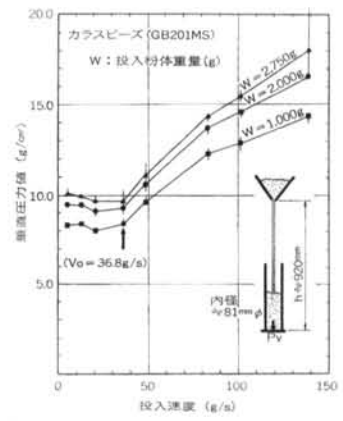


図-6 投入速度と垂直圧力値 (GB201MS)

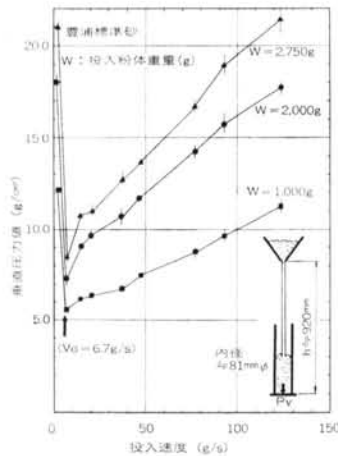


図-7 投入速度と垂直圧力値 (豊浦標準砂)

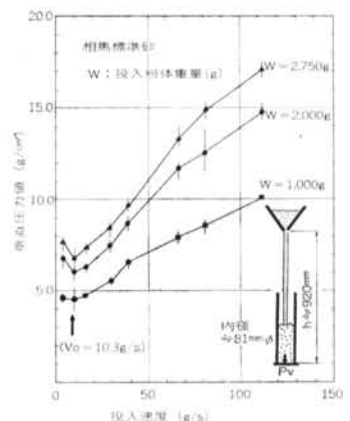


図-8 投入速度と垂直圧力値 (相馬標準砂)

されたが、他の3種類の試料ではほとんど見られなかった(粉体層のすべり現象について3.2で詳しく述べる)。

図-5～図-8に各試料の投入速度と垂直圧力値の関係を示す。図はそれぞれの投入速度において、粉体投入重量が 1,000 g・2,000 g・2,750 g のときの圧力値を読

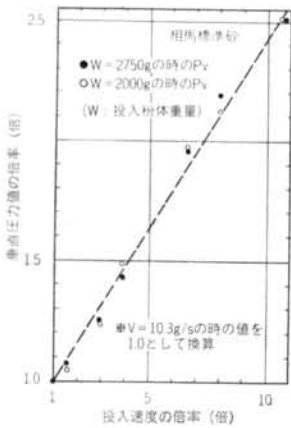


図-9 投入速度と垂直圧力値の倍率

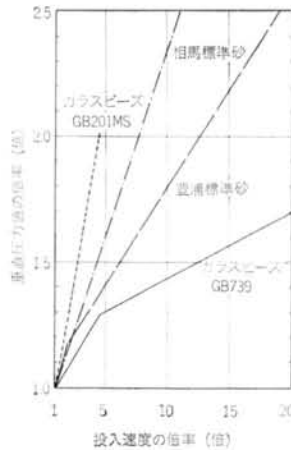


図-10 投入速度と垂直圧力値の倍率(まとめ)

み取り、4回の測定の前平均値を結んで示した。同一実験条件での値のばらつきを見るために、測定値の最大値と最小値を縦線で結んで示してある。先に述べたとおり、ガラスビーズ GB 739 (図-5) が粉体層のすべりによって測定値のばらつきが最も大きい。

測定結果から、各試料とも一樣にある投入速度 ( $V_0$ : ここでは基準投入速度と呼ぶ) よりも大きな投入速度では、その増加にともなって垂直圧力値も増加している。しかし、今回の実験の範囲内では一定値に収束する傾向はあらわれていない。各試料の基準投入速度を図に矢印で示したが、ガラスビーズ GB 201 MS だけが他と比べて大きな値になっている。

次に投入速度と垂直圧力値との相関をみるために、基準投入速度のときの垂直圧力を基準垂直圧力値 ( $P_0$ ) として、それぞれの倍率を表示した。相馬標準砂による結果を図-9 に示す。図より、投入速度が10倍になると垂直圧力値は約2.5倍となり、その間はほぼ直線関係が成立している。他の試料についても、同じことを行なった結果を図-10 にまとめて示す。図より、比較的粒径の大きな試料の方が小さな試料より、投入速度の増加にともなう垂直圧力値の増加割合が大きいことが分かる。

### 3.2 粉体層のすべり現象について

3.1 で述べたように、粉体層のすべりの有無は粉体圧力値に大きな影響を与えるため、環境条件の異なった実験室で数回測定を行ない、すべり現象の原因について検討した。実験は、今回測定を行なった恒温恒湿室を環境 I とし、環境 II は実験室で人の出入りが多く、I に比べると大きな環境の変化がある。実験装置は図-1 に示したものをを用い、4種類の試料を 6mmφ、10mmφ、19mmφの

条件	環境 I (恒温恒湿室内)	環境 II (実験室内)
試料		
ガラスビーズ GB 739	あり	あり
豊浦標準砂	なし	あり
ガラスビーズ GB 201 MS	なし	なし
相馬標準砂	なし	なし

表-3 環境条件と粒体層のすべり

ホッパーによって投入した。同一実験条件で3回以上測定し粉体圧力値の変化から、図-4 に示すような粉体層のすべりの有・無を観察した。測定結果を表-3 に示してある。

表-3 より、環境 II ではガラスビーズ GB 739 と豊浦標準砂ですべり現象が観察された

が、ガラスビーズ GB 201 MS と相馬標準砂では観察されなかった。環境 I ではガラスビーズ GB 739 だけしかすべり現象が観察されなかったことと、試料の物性(表-1)の比較と合わせて考えると、粉体層のすべり現象は粒径は小さいほど、形状は球形であるほど起こりやすいことが分かる。

粉粒体は、きわめて多数の固体粒子の集合体であるため、通常の固体に比べて、単位重量中の表面積は非常に大きく、球形粒子では粒径の小さいほど面積は大きくなる。表面積が大きくなるほど周囲の環境(温度・湿度など)の影響を受けやすくなり、西野・荒川<sup>9)</sup>による粒径の小さなガラスビーズを用いた等温吸着の実験では、湿度が60%以上になると、水分吸着量が徐々に増加することを示している。粒径の小さな粒子を用いた粉体圧測定などの実験においては、測定値のばらつきを主要な原因となる粉体層のすべり現象について検討しておく必要があると思われる。

### 3.3 投入速度とかさ密度

3.1 の実験結果から基準投入速度を境として、それよりも大きな投入速度においては、その増加にともなって垂直圧力値も増加することが分かった。しかし、基準投入速度の物理的意味が明らかではない。粉粒体の容器への投入速度の増加にともなってその充填構造が異なり、内部摩擦角や壁面摩擦角など粉体層の応力状態が変化し、その結果として垂直圧力値が変化すると考えられる。そこでこの充填構造の変化について、特に投入終了時におけるかさ密度に着目して実験を行ない、投入速度とかさ密度の関係を検討した。

図-1 に示した実験装置を用いて、内径約 80 mm、容積

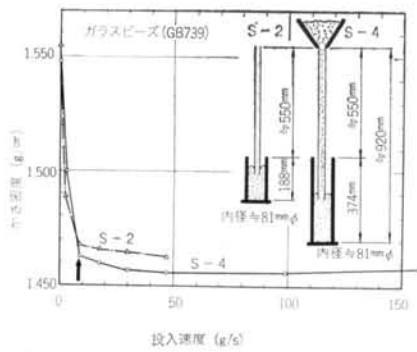


図-11 投入速度とかさ密度 (GB739)

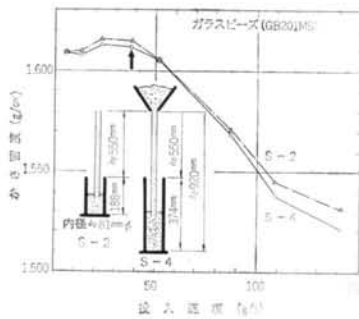


図-12 投入速度とかさ密度 (GB 201 MS)

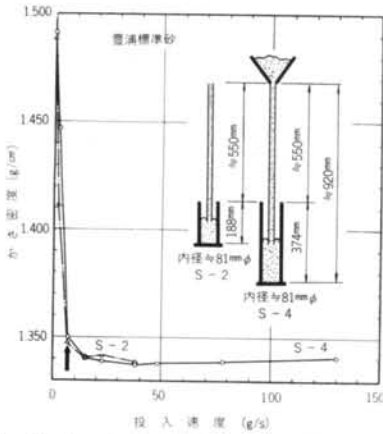


図-13 投入速度とかさ密度 (豊浦標準砂)

1,000cm<sup>3</sup> および 2,000cm<sup>3</sup> のガラス製シリンダーに種々の投入速度で4種類の試料を投入し、投入終了後の容器内試料のかさ密度を測定した。容器の容積は水を満たして、あらかじめ測定しておき、容器に投入された試料を容器口表面ですり切って体積を決め、重量は上皿天秤によって測定した。

図-11~図-14に測定結果を示す。容器の容積の違いによってかさ密度はあまり変化していないが、どの試料の場合も投入速度増加にともなって、かさ密度は減少す

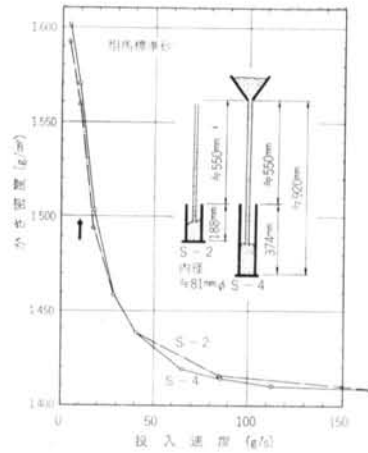


図-14 投入速度とかさ密度 (相馬標準砂)

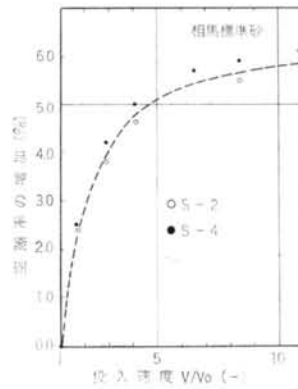


図-15 投入速度と空隙率 (相馬標準砂)

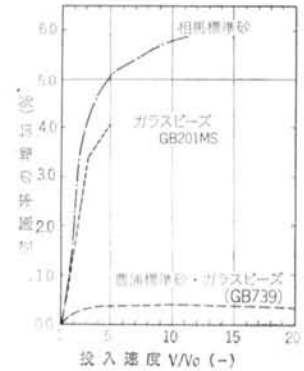


図-16 投入速度と空隙率 (まとめ)

る傾向がある。投入速度と垂直圧力値の結果と比較するために、それぞれの基準投入速度を図に矢印で示す。ガラスビーズ GB 739 と豊浦標準砂は、基準投入速度よりも大きな投入速度ではかさ密度はほとんど変化していないが、ガラスビーズ GB 201 MS と相馬標準砂は、投入速度の増加にともなってかさ密度は減少している。

表-1 に示す真密度によって空隙率を計算し、投入速度と空隙率の増加の関係を相馬標準砂について図-15 に示す。図より投入速度の増加にともなって空隙率は増加してゆき、約6%増加したところでほぼ一定値に収束する傾向を示した。この結果を4種類の試料についてまとめて、図-16 に示す。

### 3.4 投入速度と垂直圧力値とかさ密度

3.1 および 3.3 より、投入速度と垂直圧力値とかさ密度の関係をまとめると次のようになる。

図-10 と図-15 から、基準投入速度よりも大きな投入

速度では、

(1)比較的粒径の大きな粒子では、投入速度増加にともなって垂直圧力値は増加し、空隙率も増加（かさ密度は減少）する傾向がある。

(2)粒径の小さな粒子では垂直圧力値は増加するが、空隙率（かさ密度）はほとんど変化しない。

図一5～図一8と図一11～図一14から、基準投入速度よりも小さな投入速度では、

(3)比較的粒径の小さな粒子では、投入速度の減少にともなって垂直圧力値とかさ密度ともに増加する。

(4)粒径の大きなガラスビーズは、垂直圧力とかさ密度はほぼ一定の値となる。

投入速度と垂直圧力値とかさ密度の関係を、粒径の大小および基準投入速度によって分類すると、このように4つの傾向を示すことが分った。しかし、基準投入速度の物理的意味や粒子の種類の違いによる投入速度と粉体圧の関係については、まだあまり明らかになったとはいえない。

投入状態における粉体層の挙動に関する研究のうち、最近の研究では次のものがある。

(1)綱川・浅野・青木のバンカーの鉛直壁部における粒体の応力の研究<sup>6)</sup>では、投入状態では粒子層の応力状態および充填構造は投入速度によって複雑に影響され、鉛直応力に対する水平応力の比も投入速度に依存することを報告している。(2)上滝・森山による円筒形容器内粉体層の底圧分布に関する研究<sup>7)</sup>では、容器の寸法、供給方法、供給速度によって底圧分布が変化することを報告している。(3)筆者らは、容器の容積と投入高さをパラメ

ーターとして投入速度とかさ密度の関係を検討し、粒子群が重力落下してから堆積するまでの過程の違いが、投入終了時のかさ密度の違いに影響を与えていることを報告<sup>8)</sup>している。

以上の研究結果を参考にして、基準投入速度の物理的意味や粒子の違いによる投入速度と粉体圧の関係について検討してゆくためには、容器内粉粒体の物性値の非均一性について考慮してゆく必要があると思われる。

## § 4. まとめ

今回の実験結果から次のことが分かった。

(1)粉粒体の容器への投入速度が増加すると、ある（基準）投入速度よりも大きな投入速度では、容器底面での垂直圧力値は増加する。

(2)投入速度と垂直圧力値とかさ密度の関係を粒径の大小および基準投入速度によって分類すると、4つの傾向を示す。

(3)粒子の形状や径の違いによって粉体層のすべりが起こり、垂直圧力値が大きく変化する場合がある。

今回の実験の範囲内では、基準投入速度の物理的意味はまだ明らかでない。基準投入速度の物理的意味や、粒子の種類の違いによる投入速度と粉体圧の関係について検討してゆくためには、容器内粉粒体の物性値の非均一性について考慮してゆく必要があるだろう。

実験の実施に当って多くの援助のあった今野美紀夫、福田浩男両氏に対して謝意を表します。

## ＜参考文献＞

- 1) 杉田 稔：“サイロ壁体に加わる粉体圧の測定（1300 t 大豆サイロの粉体圧）” 化学工学協会第5回秋期大会講演要旨集（大阪）（1971）pp. 305～306
- 2) “Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77) and Commentary”
- 3) P.M. Blair-Fish & P.L. Bransby: “Flow Patterns and Wall Stress in a Mass-Flow Bunker” ASME Publication Paper, No. 72, MH-6, 2nd Symposium on Storage and Flow of Solids.
- 4) 粉体工学研究会・日本粉体工業協会編：“粉粒体物性図説” 産業技術センター（1975）
- 5) 西野・荒川：“粉体粒子の凝集性に対する湿度の影響” 材料22巻238号（1973）pp. 663～667
- 6) 綱川・浅野・青木：“バンカーの鉛直壁部における粒体の応力” 粉体工学研究会誌 Vol. 14, No. 9（1977）pp. 497～502
- 7) 上滝・森山：“円筒形容器内粉粒体層の底圧分布に関する研究” 粉体工学研究会誌 Vol. 14, No. 11（1977）pp. 609～617
- 8) 高木・杉田：“粉粒体の投入速度とかさ密度についての検討” 第16回粉体に関する討論会講演要旨集（大阪）（1978）pp. 64～66