

# 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2）

——閉塞限界開口寸法の推定法の提案——

茶 谷 文 雄      宮 崎 祐 助

## Study on Flowability of Granular Material at the Outlet of Silo Hopper (Part 2)

——Proposal of Method of Estimating Minimum Size of Hopper Outlet  
for Free Flow of Coal——

Fumio Chatani      Yusuke Miyazaki

### 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 in Part 1 carrying out model tests on a coal silo. The flowing and clogging mechanisms of coal at the outlet of the silo hopper were studied conducting model tests, and an improved method for estimating the minimum size of the hopper outlet for coal to flow freely is proposed in this report.

### 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こ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。既報では、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対する諸因子の影響について基本的な性質を調査した。本報では、模型実験によって、サイロの払い出し口における石炭の流動と閉塞のメカニズムを調査するとともに、この調査結果に基づき、既往の閉塞限界開口寸法の推定法を改善した、より合理的な推定法を提案した。なお、閉塞限界開口寸法とは、サイロ内の粉粒体が払い出し口で閉塞を起こすことなく流動するために必要な最小の開口寸法を言う。

## 1. まえがき

既報<sup>1)</sup>では、石炭サイロを対象とした模型実験を行ない、石炭の流動性に対する諸因子の影響、すなわち、ホッパーの傾斜角、石炭の積付け高さ(上載圧)、石炭の細粒分含有率、および含水比などの影響を調査した。

本報では、初めに、模型実験によって下記の3状態を再現し、各状態におけるホッパー部の圧力測定を行なう。

- (1) サイロ内に石炭を積付け静置した状態（静置時）
- (2) 払い出しによってサイロ内の石炭が流動している状態（流動時）
- (3) 払い出し口で石炭が閉塞している状態（閉塞時）

次に、この圧力測定結果に基づいて、払い出し口における石炭の流動と閉塞のメカニズムを検討し、既往の閉塞限界開口寸法の推定法を改善した、より合理的な推定法を提案した。なお、本報でいう閉塞限界開口寸法とは、粉粒体が払い出し口で閉塞を起こすことなく流動するために必要な最小の開口寸法をいい、以下、単に限界開口寸法と略記する。

## 2. 模型実験の概要

### 2.1. 実験装置、および実験に使用した石炭

実験装置は、無限に続く平面ホッパーの一部を切取った形状で、その寸法は実大ホッパーの1/10～1/20程度である。ホッパーのライニング材は、ステンレス、SUS304となっている。なお、実験装置の詳細については既報<sup>1)</sup>を参照されたい。

装置の各部には、図-1に示すように、圧力測定用の土圧計を設置した。土圧計は、外径36mm、受圧部の直径25mm、厚さ5mmのゲージタイプで、容量は1kg/cm<sup>2</sup>である。

実験に使用した石炭は豪州産のワララ炭で、比重は1.45、水分、粒度などの調整を行なわない自然状態における含水比は8.5%、粒度組成は図-2に示すとおりである。実験の実施上、支障が生じないように、この石炭の粒度、および水分調整を行ない、表-1、または図-2に示す石炭S、石炭LSの2種類の試料を作成し、これらを実験に使用した。

2.2. 実験内容

実験は、表-2に示す A, B の 2 シリーズに分けて実施した。A シリーズは、サイロ内に石炭を積付け静置したときの圧力測定を目的としたシリーズで、ホッパー側壁部、およびホッパー底部における垂直圧の測定を行なう A1 シリーズと、サイロの筒体底部における鉛直圧の測定を行なう A2 シリーズに分けられる (図-1(a), (b)参照)。

B シリーズは、サイロ内に石炭を積付け静置したとき、ホッパー底部から石炭を払い出したときのホッパー部における圧力の変化を調査することを目的としたシリーズである (図-1(c)参照)。このシリーズでは、各実験ケースについてあらかじめ限界開口寸法を求めておき、初めに、払い出し口の開口寸法をこの限界開口寸法に設定し、石炭を積付け静置したときと払い出しによって流動させたときの圧力を測定した。次に、開口寸法を限界開口寸法より約 5 mm 小さく設定し、石炭を積付け静置したときと払い出し時に石炭を閉塞させたときの圧力を測定した。これらの測定によって、石炭が流動するケースと閉塞するケースのそれぞれについて、積付け静置時と払い出し時における圧力変化の状況を調査することができる。なお、B シリーズの実験結果を検討する際、ホッパー最上面に作用する鉛直圧は、A2 シリーズで測定したサイロの筒体底部における平均鉛直圧に等しいと仮定した (図-1(b), (c)参照)。

3. 模型実験結果と検討

3.1. 石炭の積付け静置時において、ホッパー各部に作用する圧力について

A1 シリーズにおける測定例として、石炭 S を使用し、ホッパーの傾斜角を 60°, 50°, および 45° としたときの圧

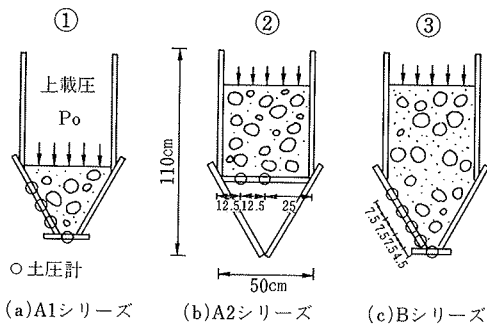


図-1 実験ケース、および土圧計の設置位置

石炭試料名	粒 径	含 水 量
石炭 S	1.05mm アンダー	12.6%
石炭 L S	4.76mm アンダー	10.2%

表-1 実験に使用した石炭 (豪州産ワララ炭)

力測定結果を図-3に示した。これによると、ホッパー側壁部の圧力分布形状は、ホッパーの傾斜角によって異なっている。すなわち、ホッパーの傾斜角が 60°, および 50° と比較的大きいケースについては、圧力はホッパー上部で大きく、ホッパー最上部からの深さの増加に伴い減少する傾向が認められる。これに対して、ホッパーの傾斜角が 45° と小さいケースについては、圧力はホッパー最上部からの深さに関係なく一定か、もしくはホッパー下部でやや大きくなっている。

一方、同図に示すように、ホッパー底部の鉛直圧は、ホッパー傾斜角によらず、ほぼ一定であった。

上載圧を 4 t/m<sup>2</sup>, および 8 t/m<sup>2</sup> としたケースについて、Walker, 綱川, および DIN1055 の各圧力算定式を用いてホッパー各部の圧力を求め、図-3中に示した。なお、Walker, および綱川の算定式は、ともに力の釣合いに基づく理論式であり、いずれもホッパー最上部からの深さの増加に対してほぼ一定か、もしくはわずかに増大するような圧力分布を与えるという類似の特徴を有している。従って、両算定式による計算値は、ホッパーの傾斜角が 60°, および 50° のケースについては、圧力がホッパー最上部からの深さの増加に伴って減少するという実測の圧力分布と対応せず、ホッパー下部で実測値よりかなり大きな値となっている。また、ホッパー傾斜角が 45° のケースについては、計算値は実測値よりやや小さいが、実測値と類似の圧力分布形状を示している。

一方、DIN1055 の改訂案式は経験式であり、圧力がホ

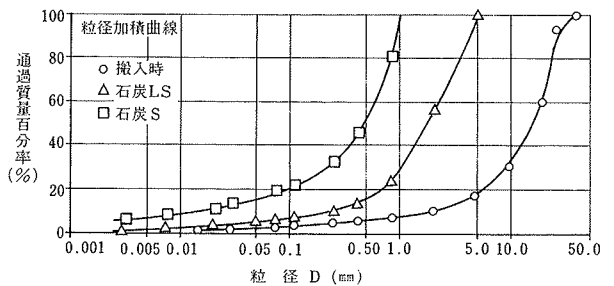


図-2 実験に使用した石炭の粒径加積曲線

実験シリーズ	圧力の測定部位	ホッパー傾斜角	払い出し口の開口寸法(mm)	上載圧 (t/m <sup>2</sup> )	使用した石炭
A	ホッパー側壁部、およびホッパー底部	60°	50, 100	0, 2	石炭 S
		50°			
		45°	150	4, 6	および石炭 L S
A2	ホッパー最上部			8	
B	ホッパー側壁部、および	60°	145, 150	8	石炭 S
		45°			
	ホッパー底部	60°	130, 135	8	石炭 L S
		45°			

表-2 実験内容

ホッパー最上部からの深さの増加に伴い、減少するような分布形状を与えるという特徴を有している。従って、ホッパーの傾斜角が60°、および50°のケースについては、この算定式による計算値は実測値よりやや過大ではあるが、実測値と類似の圧力分布形状を示している。また、ホッパー傾斜角が45°のケースについては、計算値は実測の圧力分布と対応せず、値自体も全体的に過大となっている。

ホッパー底部の鉛直圧については、図-3に示すように、各算定式による計算値は、いずれも実測値より過大な値となっている。

以上、各算定式による計算値は、いずれも実測値と良好な対応を示さない。そこで、模型実験結果に基づき、下記のようなホッパー部の圧力算定式を提案した。但し、下式の適用範囲は、石炭サイロで一般的に使われている傾斜角が60°前後のマスフローホッパーとする。

$$P_{vu} = \beta_1 (P_{vo} + rh) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$P_{wo} = \beta_2 P_{vo} (K_0 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$P_{wu} = \beta_3 P_{vu} (K_0 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

- $P_{vo}$  : ホッパー最上部の石炭表面に作用する鉛直圧
- $P_{vu}$  : ホッパー頂点における鉛直圧 (t/m<sup>2</sup>)
- $P_{wo}$  : ホッパー最上部において、ホッパー壁面に作用する垂直圧 (t/m<sup>2</sup>)
- $P_{wu}$  : ホッパー頂点において、ホッパー壁面に作用する垂直圧 (t/m<sup>2</sup>)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  : 補正係数で、本実験結果に基づき、

$$\beta_1 = 0.6, \beta_2 = 1.5, \beta_3 = \cos \alpha \text{ とする。}$$

$\alpha$  : ホッパー傾斜角

$K_0$  : Jaky の静止土圧係数で、下式で与える。

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

$\phi$  : 石炭の有効内部摩擦角

$\gamma$  : 石炭のかさ密度 (t/m<sup>3</sup>)

$h$  : ホッパーの頂点から最上部までの高さ (m)

なお、(2), (3)式中の  $P_v (K_0 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)$  は、ホッパー内の鉛直圧を  $P_v$  としたときの、ホッパー壁面に作用する垂直圧成分を表わしている。また、本提案式による圧力は、実測の圧力分布と対応するよう、図-4に示すように、ホッパー上部で大きく、下部で小さくなるよう設定してある。本提案式によって求めたホッパー部における圧力の計算値を図-3中に示した。

図には示していないが、ホッパーの傾斜角を一定として払い出し口の開口寸法のみを増大させると、ホッパー底部の鉛直圧、および底部付近の側壁における垂直圧が大きくなる傾向が認められた。なお、ホッパー部の圧力に対する石炭の粒径の影響は認められなかった。

サイロの筒体底部における鉛直圧の測定例として、石炭Sを用いたケースの測定結果を図-5に示した。なお、同図中には、Janssen 式、および弾性理論に基づく長方形分割法による鉛直圧の計算値も示した。この図によると、鉛直圧は、サイロ側壁の摩擦抵抗の影響によって、サイロの中央部で大きく、端部で小さくなる傾向が認められる。また、弾性理論による計算においては、サイロ側壁の影響を無視し、サイロ内の石炭を半無限弾性体として扱ったにもかかわらず、計算値は実測値と比較的良好に対応している。これに対して、Janssen 式による計算値は実測値よりかなり過大な値となっている。

### 3.2. 石炭の払い出し時におけるホッパー部の圧力分布について

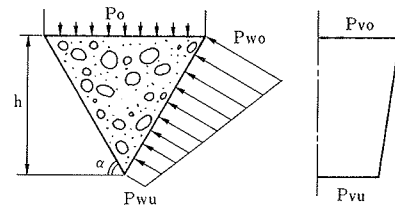


図-4 筆者らの実験式によるホッパー部の圧力分布

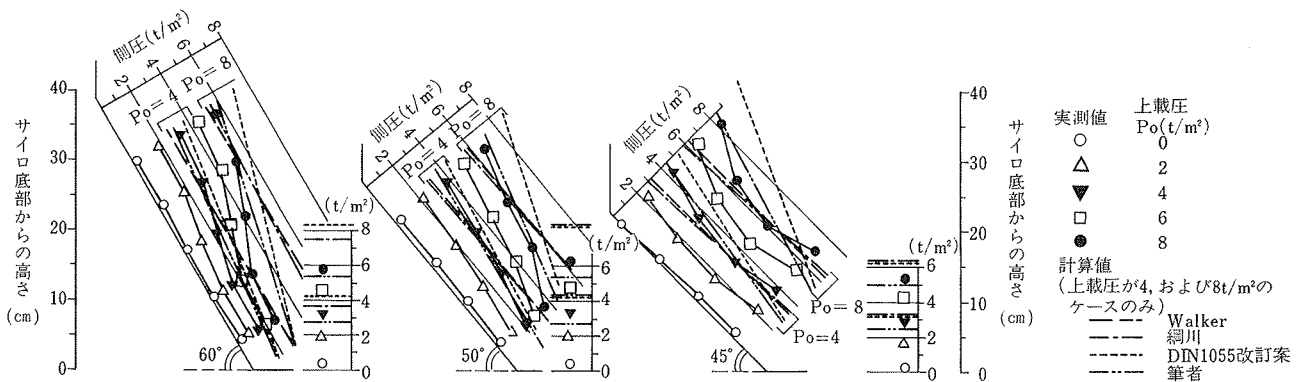


図-3 ホッパー側壁部、および底部の圧力測定結果 (サイロ内の石炭の平均かさ密度はホッパーの傾斜角に関係なくほぼ一定で、上載圧が 8 t/m<sup>2</sup> のとき約 0.78 t/m<sup>3</sup>)

石炭の払い出し時における圧力測定結果の一例を図-6に示した。図-6(a)は、払い出し時に石炭を流動させたときの圧力分布であり、また、図-6(b)は、払い出し時に石炭を閉塞させたときの圧力分布である。なお、いずれの図中にも、払い出し直前の石炭の積付け静置時における圧力分布も示してある。これらの図によると、石炭の流動時、および閉塞時とも、払い出し直後の圧力は、払い出し直前の圧力と比較して、ホッパー下部では減少し、ホッパー上部では増大する傾向が認められる。これは、実大サイロの払い出し時においても観測されている現象であって、払い出しによって、鉛直圧の一部を負担していたホッパー底部の支えが消失するので、払い出し口付近では圧力が減少し、これを補うかたちでホッパー上部における圧力の負担が増大するためと考えられる。なお、このような石炭の払い出し時における圧力分布は図-6中に示すように、流動時および閉塞時とも、Walkerの流動時における圧力算定式で、ほぼ近似することができる。

石炭の払い出し直後における、ホッパー部圧力の経時変化の1例を図-7に示した。この図によると、払い出し直後にホッパー上部の圧力は増大し、そのまま安定するが、払い出し口に最も近い位置の圧力は、払い出し直後に減少した後、すぐに上昇し、再び減少する点が注目される。この現象は以下のように説明することができる。

石炭の払い出しに伴い、ホッパー底部の支えが消失するので、払い出し口付近の圧力は一度は減少するものの、石炭表面に作用する上載圧の効果によって、石炭がホッパー側壁に押しつけられ、再び上昇する。この上昇した圧力によって払い出し口付近の石炭が崩壊し、石炭が流動すると、払い出し口付近の圧力は再び減少する。

なお、図には示していないが、石炭の閉塞時においても、払い出し口付近の圧力は、流動時とほぼ同様な経過をたどることから、上記のような圧力変化が瞬時に起こり、最終的にはホッパー底部の支えが消失して安定したときの圧力分布に移行するものと考えられる。

上記の払い出し口付近において、圧力が再上昇したときの値を図-6中に+印で示した。この値は Jenike の提案するホッパー内に形成されるアーチにおける最大応力の算定式によって計算した値、 $0.12 \text{ t/m}^2$  より極めて大きく、むしろ Walker の石炭の流動時における圧力算定式による計算値に近い値となっている。

### 3.3. 払い出し時における石炭の流動と閉塞のメカニズムに関する検討、および限界開口寸法の推定法の提案

3.1.および3.2.に示したホッパー部の圧力測定結果に基づき、サイロの払い出し口における石炭の流動と閉塞のメカニズムを以下のように考えることとする。

(1) 石炭の積付け静置時において、払い出し口付近の石炭はある上載圧を受けて締固められ、その上載圧に見合った強度を保有する。なお、石炭の強度は Jenike、網川らと同様、単軸崩壊強度  $q_u$  で表わすこととする。

(2) 払い出し直後に、石炭は静置状態から流動、または閉塞状態に瞬時に移行し、払い出し口付近の石炭にこの状態に対応する圧力が作用する。

(3) 払い出し口における上記の圧力が、同位置における石炭の  $q_u$  より大きいとき石炭は崩壊して流動し、小さいとき石炭は崩壊せず閉塞する。なお、上記の圧力  $P_w$  を理論式から、また、石炭の  $q_u$  を物性試験結果から、ともにホッパー頂点からの距離の関数、すなわち開口寸法

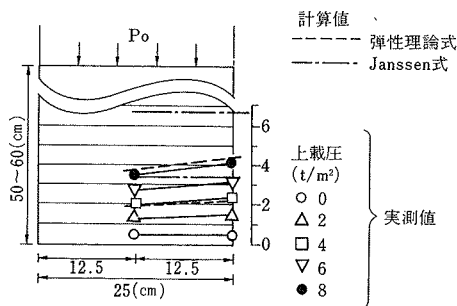


図-5 サイロの筒体底部における鉛直圧の測定結果 (石炭 S)

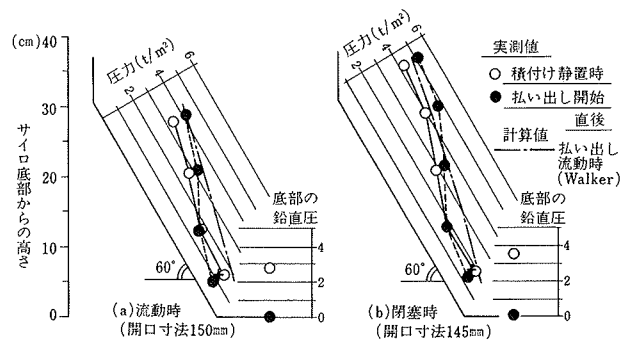


図-6 石炭の積付け静置時、および払い出し時におけるホッパー側壁部の圧力分布の比較 (石炭 S, ホッパー傾斜角 $60^\circ$ )

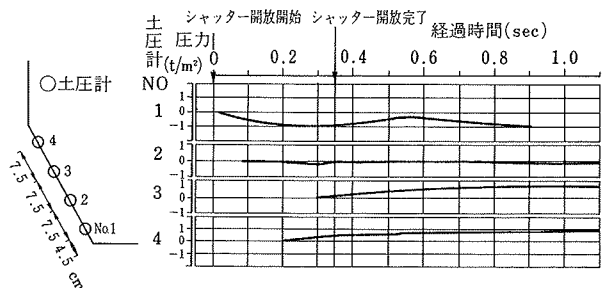
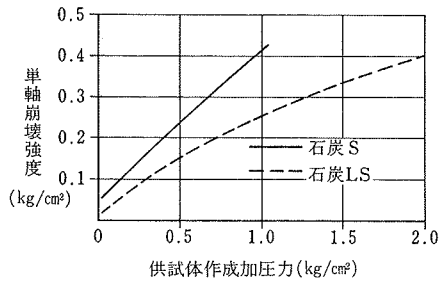
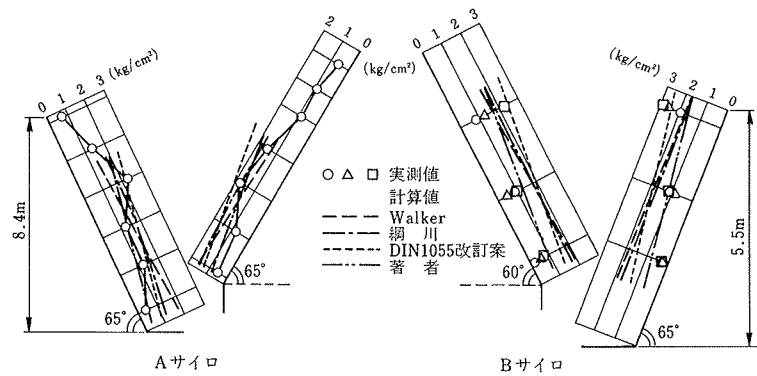


図-7 払い出し直後におけるホッパー部圧力の経時変化



図一八 実験に使用した石炭の単軸崩壊強度



図一九 実大サイロにおけるホッパー部圧力の実測値と計算値の比較 (石炭の積付け静置時)

の関数として求めると、 $P_w \geq q_u$  の条件式から、限界開口寸法を算定することができる。

以上の考え方は、基本的に Jenike, 綱川らの流れをくむものであるが、下記の点で異なっている。

(1) 石炭の積付け静置における圧力算定式として、模型実験結果に基づく既述の半経験式を採用する。なお、この圧力を受けて締固められた石炭の単軸崩壊強度  $q_u$  は別途に求める。参考として、石炭 S, および石炭 LS の  $q_u$  を図一八に示した。

(2) 払い出し時に、払い出し口付近の石炭に作用する圧力の算定式として、Jenike が提案するホッパー内に形成されるアーチにおける最大応力の算定式ではなく、Walker の石炭の流動時における圧力算定式を採用する。

本模型実験結果から得られた限界開口寸法の実測値と計算値との比較を表一三に示した。この表によると、計算値は実測値とほぼ良好な対応を示している。

#### 4. 実大サイロへの適用

既往の文献<sup>2),3)</sup> から、実大ホッパーにおける石炭の積付け静置時の圧力測定結果を2例ピックアップし、これらの実測値と既往の提案式、および本提案式による計算値との比較を図一九に示した。なお、Aサイロについては、ほぼ円筒状のサイロ内に直線スリット状のホッパーが設置されており、ホッパーの高さがサイロ中央部と端部とで異なっている。そこで、本報告では、ホッパーの平均的な高さをホッパーの最大高さの約2/3として圧力計算を行なった。図一九によると、本提案式は、模型実験結果に基づく半経験式であるにもかかわらず、その計算値は実測値と比較的良好な対応を示すことが分かる。

また、上記の実大サイロ A, B, および、最近建設された実大サイロ C の3例について、実際の払い出し口の開口寸法と、3.3.に示す考え方に基いて求めた限界開口寸法の比較を表一三中に示した。実大サイロの払い出し

		使用した石炭	ホッパー傾斜角	限界開口寸法(cm)	
				実験値	計算値
模型実験結果	B1シリーズ	石炭 S	60°	14.5	16
	B2シリーズ	石炭 LS	60°	13.5	13
実大サイロでの払い出し実績	Aサイロ	各種石炭	65°	(120*)	93
	Bサイロ		60~65°	(70*)	58
	Cサイロ		60°	(70*)	46

\*実大サイロで設定されている開口寸法であり、限界開口寸法そのものではない。

表一三 限界開口寸法の実測値と計算値の比較

口は、設計上、かなり大きめに設定される傾向があるので、計算値と直接比較はできない。しかしながら、これらのサイロでは、現在までに閉塞のトラブルを起こすことなく操業が続けられていることから、本推定法は、おおよそ妥当な値を与えよう。

#### 5. まとめ

模型実験結果に基づいて、マスフローホッパーの払い出し口における石炭の流動と閉塞のメカニズムを検討し、既往の限界開口寸法の推定法を改善した、より合理的な推定法を提案した。さらに、この推定法を実大サイロに適用し、おおよその妥当性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 金谷, 茶谷: 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), 大林組技術研究所報, No. 35, (1987), pp. 124~128
- 2) 広瀬, 表, 他: 大型貯炭サイロの技術開発, 建築技術, No. 389, (1984. 1), pp. 83~93
- 3) 末兼, 表, 他: 石炭サイロの構造特性に関する研究 (その2), 日本建築学会大会学術講演概要集, (昭和58. 9), pp. 2443~2444