

# 大型貯炭サイロの構造特性に関する実験的研究 (その1)

——サイロ概要と圧力・応力測定——

表 佑太郎 武田 寿一  
中川 恭次 末兼 正純  
(本社エンジニアリング事業部)

## Structural Characteristics of Existing Large-scale Coal Storage Silos (Part 1)

——Measurement of Pressure, Stress and Flowability——

Yutaro Omote Toshikazu Takeda  
Kyoji Nakagawa Masazumi Suekane

### Abstract

The first commercial coal storage silo for a power generating plant in Japan, whose storage capacity is 13,000 t×3 units, was completed at Saijo Power Station of Shikoku Electric Power Co. in July 1983. In order to verify the design criteria of the silo, and also with the aim of obtaining relevant information for future development of silo design, the following series of studies was carried out: (1) measurements of pressure and stress, and observation of flowability of coal, (2) vibration tests by a shaker, (3) measurements of differential settlements and pile stresses, and (4) laboratory tests of coal properties. This report, Part 1, particularly discusses Item (1) mentioned above, and the results show adequate pressure distributions, both at hoppers and walls, under static and flow conditions of the coal, and also good performance of the mass-flow discharging system.

### 概 要

昭和58年7月に当社は、日立製作所と共同開発したダブルコンカル方式払出装置を有する、我国初の本格的実機大型貯炭サイロ(13,000t×3基)を愛媛県西条市、四国電力(株)西条発電所に建設した。これを機会に、設計・施工されたサイロ構造体の構造的諸特性を検証すると共に、将来のより良い設計の為の有効なデータを蓄積する目的で以下の諸試験を実施した。(1)石炭圧によるサイロ各部の圧力・応力測定と石炭の流動性の観察、(2)地盤・基礎—構造体—石炭の連性振動系における大型起振機による振動実験、(3)サイロ自重と石炭積載荷重とにより生ずる荷重—沈下性状の測定、(4)石炭の物理的、力学的、動的性質に関する室内試験。

本報告(その1)では、サイロ概要と、特に(1)の圧力・応力測定と石炭の流動性状について述べる。測定結果とその考察とから、本サイロは設計時に予想したような圧力分布を示すと共に、流動形態はマスフロー流動で良好な払出性能を有することが確認された。

### 1. 序

石油代替エネルギーとして石炭の利用が見直されつつあるのに伴って、従来の野積ヤード貯炭方式にかわる種々な形式の屋内貯炭方式が国内外で検討、実施されているが、その中でも敷地の有効利用、環境保全、安全性、運転の自動化、経済性等の面で多くの利点を有する貯炭サイロの総合的な技術開発が急がれている。

大型貯炭サイロの建設、実用化には多くの技術的裏付けが必要であることは言うまでもないが、既往の知見、

模型実験による確認、各種基準との対応などによって実際に設計、施工されたサイロでの建設中及び建設後の現場実測等が設計の検証と共に将来的なデータの蓄積という意味でも非常に大切なことと考えられる。

当社では、(株)日立製作所と共同開発したダブルコンカル式払出装置を有する我国初の本格的発電所用石炭サイロを、昭和58年3月に愛媛県西条市にある四国電力(株)西条発電所に建設した。これを機会に昭和58年7月の運転開始までの試運転期間を利用して、(1)石炭圧力によるサイロ構造体各部の圧力・応力測定と石炭の流動性

状の確認、(2)地盤・基礎—構造体—石炭の連成振動系における振動実験、(3)サイロ自重と石炭の積載荷重により生ずる荷重—沈下性状の測定 及び(4)石炭の静的及び動的な性質を調べる室内物性試験を実施した。

本報告(その1)では、サイロの概要及び上記(1)の圧力・応力測定結果と石炭の流動性について述べ、(その2)では、サイロ構造体の動特性に関する一連の振動実験結果とその解析結果について考察する。

尚、(1)~(4)に亘る諸試験は本報末尾に記載の担当部門が実施した。

## 2. 石炭サイロの概要

本サイロは、四国電力(株)西条発電所1.2号機(総出力 40.6万kW)の石油から石炭焚への転換工事に伴って建設された鉄筋コンクリート製石炭サイロであり、コールセンターから供給される石炭を貯蔵し10日間発電可能とする13,000t×3基の貯炭容量を有する。完成後のサイロ全景を写真-1に示す。写真右から、No. 1, No. 2, No. 3サイロと称する。各サイロの形状・寸法は同一で、その概要を図-1に示す。

構造は、屋根が正16角錐台形、鉄骨造で最高高さは、43.4m、筒体は鉄筋コンクリート造の双曲線回転シェル形で、円周方向にはプレストレスが導入されている。施工はスリップフォーム工法による。ホッパーは図-2に示すようなダブルコニカルホッパーをサイロ1基に4個設置した鉄筋コンクリート造で、円周方向、母線方向共にプレストレス補強がしてある。ホッパー部の角度は60°、コーンの部の角度は65°で、ステンスライニング(SUS 304-2B)である。払出能力は100~500t/hrの範囲で可変である。基礎は3基が各々独立してGL-19m以深の砂礫層を支持地盤とし、GL-21mを先端とする壁厚60cmの連続地中壁工法(WF杭)によっている。

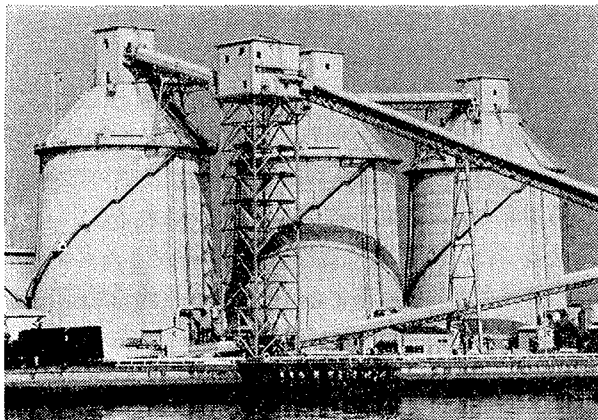


写真-1 サイロの全景

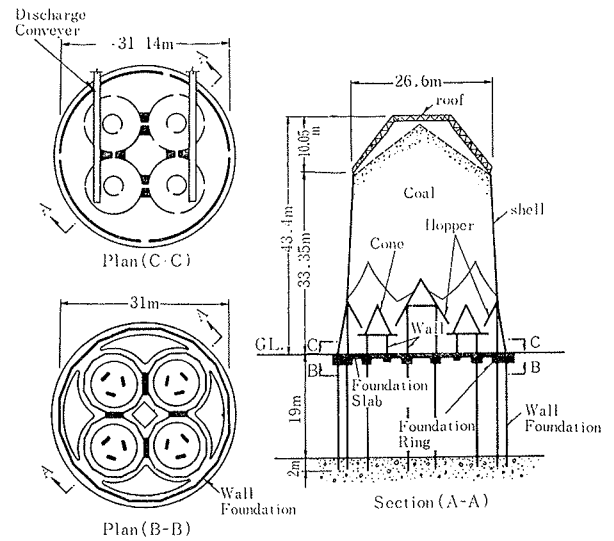


図-1 サイロ概要

## 3. 圧力・応力測定

石炭圧力によるサイロ構造体各部の圧力と応力とを測定し設計時荷重の検証を行なうと共に払出時における石炭の流動性状の観察、確認を行なうことを目的として以下の諸項目について昭和58年

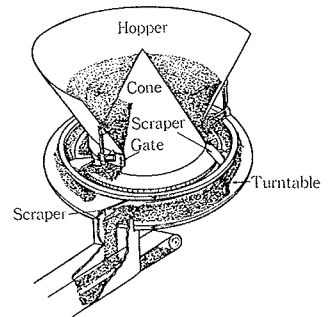


図-2 W-コニカル払出装置

3月~5月に測定を実施した。

- (1) 石炭積付時の衝撃圧力測定
- (2) 石炭積付時の静置圧力と応力測定
- (3) 石炭払出時の流動圧力と応力測定
- (4) サイロ内石炭の流動性状の観察

図-3には、以上の試験項目の実施時期をNo.2サイロ内の貯炭量と対比して示した。

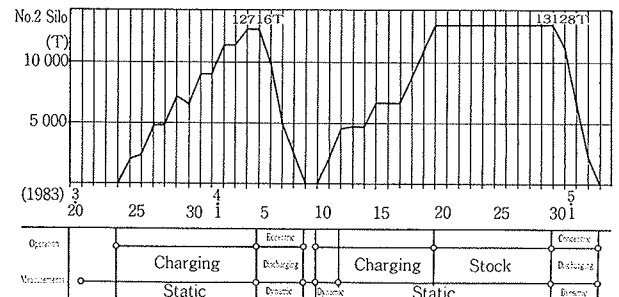


図-3 試験実施工程と貯炭量

### 3.1. 測定方法

圧力測定はサイロ壁面及びホッパー部に土圧計を取付け、石炭投入開始時から全量払出による試験終了迄の全期間に亘り前述の試験項目について実施した。使用した土圧計は、ロードセル型(共和電業製)で受圧面 SUS

ライニングとし、壁面には容量  $3 \text{ kg/cm}^2$ 、ホッパー部には容量  $4 \text{ kg/cm}^2$  (一部  $5 \text{ kg/cm}^2$ ) を施工時に埋設した。図-4 に土圧計の配置図と記号を示す。土圧計の総数は壁面16箇所、ホッパー部29箇所、合計45箇所である。

応力測定は、石炭圧によるサイロ構造体の各部応力を測定する目的で、施工時に、筒体壁部、ホッパー部、隔壁部の鉄筋などに温度補償をしたワイヤーストレインゲージを貼り測定した。測定点数の総計は98点である。

流動性の観察は、サイロに設置されているサウジングベル計及び手検尺によるサイロ内石炭の炭錐測定、屋上に据付けたカメラによる撮影をモニター TV によりビデオ記録、手動カメラ及び目視による観察などで行なった。

測定記録は長期に亘る経時変化をスキャナーを介して万能デジタル測定器 (UCAM-8BL) で原則として1日2回 (7:00, 19:00) デジタルプリントすると共に、積付時衝撃圧の測定及び払出時の流動圧力の測定では動的歪測定器を介して熱ペン型レコーダーで連続記録した。

石炭払い出し時の動的測定は図-3 に示したように2回にわけて実施した。すなわち、均等払出時測定は、満杯時から図-4 中に示した (A+C) ホッパーと (B+D) ホッパーを約 400 t 払い出す毎に交互に切替え、サイロ内石炭が一樣に沈降してゆく払出方式での測定である。偏心払出時測定は、満杯時から (A+C) ホッパーのみを連続運転で払い出す時の測定で、通常の運転方法ではないが、事故時偏積による偏った流動の影響を調べる為のものである。

本報告では紙数に制限があるので、以上の内均等払出時の圧力測定結果と流動性状について主に述べる。

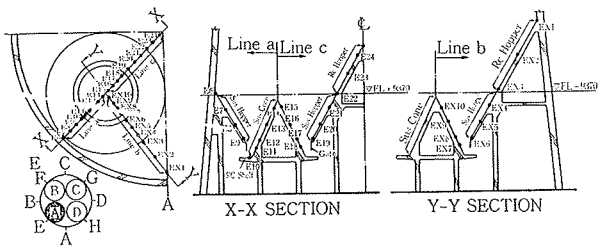


図-4(1) ホッパー部土圧計配置図

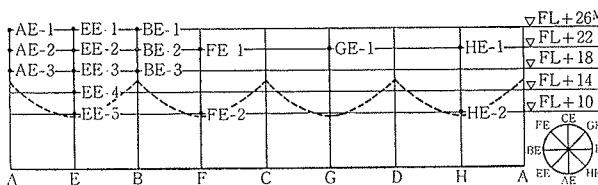


図-4(2) 壁面土圧計配置図

### 3.2. 積付時の衝撃圧力

石炭投入時に石炭の落下によるホッパー面で衝撃圧力を測定した。図-5 には測定間中での最大衝撃圧力の例

を図-4(1)のCラインの場合について示した。これらの値は後述する静置時及び流動時最大圧力と比較すると無視できる値であり、従って設計時にホッパー部の満杯静置時圧力、流動時圧力を正しく評価できれば積付時の衝撃圧力は特に考慮しなくてもよさそうである。

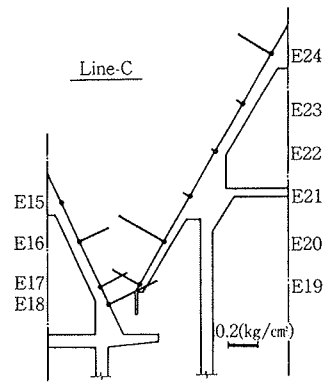


図-5 積付時衝撃圧力

### 3.3. 積付時の静置圧力

図-6 には壁面の満杯静置時圧力分布を2回の満杯時について示す。壁面静置時圧力はほぼ高さに比例して下方へ増大することがわかる。図-7 には同じくホッパー部の満杯静置時圧力分布を示した。積付中に少量の払い出しがあった為、払出口付近での圧力は小さく、全体的な圧力分布は後述する流動時圧力分布に近い傾向にある。

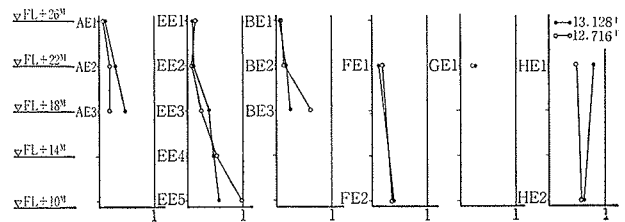


図-6 壁面静置時圧力 (単位  $\text{kg/cm}^2$ )

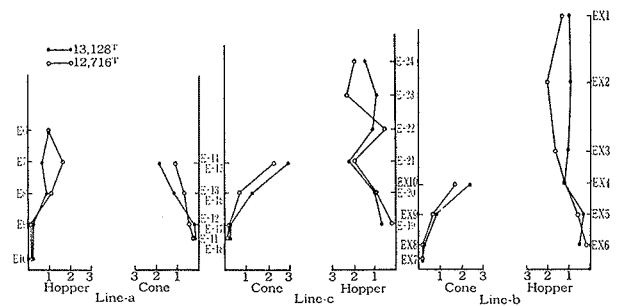


図-7 ホッパー部静置圧力 (単位  $\text{kg/cm}^2$ )

### 3.4. 払出時の流動圧力

3.4.1. 変動圧力波形 動的測定結果の代表例として壁面Eライン (EE1~EE5) 及びホッパー部 b ライン (EX1~EX10) について図-8 に示す。壁面波形をみると大きな周期で圧力が漸増したり減少したりする傾向と細かく壁面を滑っている様子が特徴的である。ホッパー部波形をみると、払出口付近 (EX6) ではスクレーパーの動きに対応した規則的な波形であるのに対して、上部付近では全く異なる大きな周期の波形を示し、ホッパー内部での流動時の石炭の応力状態が上方と下方とは異なる現象であることを示唆している。

3.4.2. 流動時圧力の変動幅 均等払出期間中における

る壁面圧力の変動幅を毎日の最大値と最小値を結んだ棒グラフで図-9に、同じくホッパー部について図-10に示す。図中点線は満杯静置時圧力分布である。これらの図より石炭払出中の圧力については以下の傾向がある。

- (1) 壁面、ホッパー部共に静置時圧力に対して流動中の圧力はかなり変動する。
- (2) 圧力変動は壁面では下方で、コーン・ホッパー部では上部で大きい。
- (3) 払出口付近では変動幅も圧力絶対値も小さい。

### 3.4.3. 過圧係数

一般に石炭流動時には静置時に較べて大きな圧力を示すことが知られていて、各種基準等ではこれを過圧係数 (Cd) と定義している。

過圧係数 (Cd) = (流動時圧力) / (静置時圧力)  
測定値から過圧係数の全平均を壁面とホッパー部にわけそれぞれ算出した結果、今回の測定範囲では両者共に約 Cd ≒ 2.0 程度と考えられる。

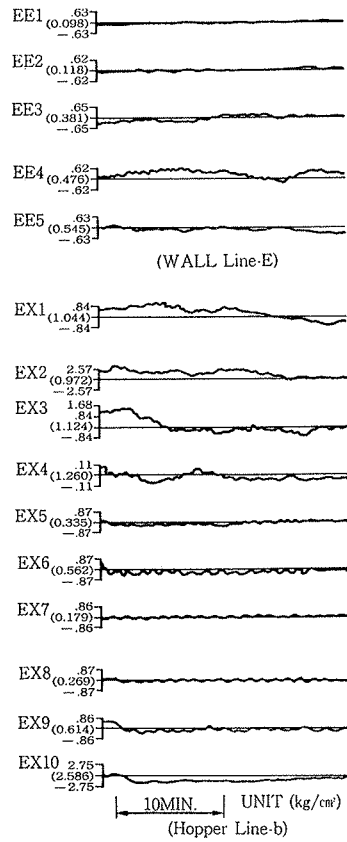


図-8 変動圧力波形

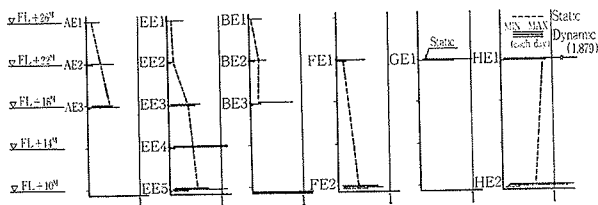


図-9 壁面の圧力変動 (単位 kg/cm<sup>2</sup>)

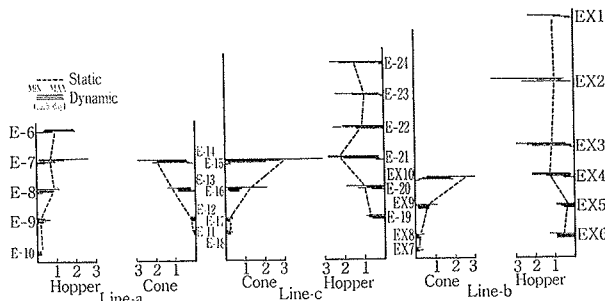


図-10 ホッパー部の圧力変動 (kg/cm<sup>2</sup>)

### 3.5. 圧力測定結果と計算値との比較

圧力測定結果の内、満杯静置時圧力及び流動時最大圧力を各種基準や計算式によって算定した結果を図-11、図-12に示す。計算に用いた諸数値は試験時石炭の物性試験結果を参考にして以下の数値を用いた。

- 単位体積重量 = 0.95 t/m<sup>3</sup>      石炭内部摩擦角 = 35°
- 対 RC 摩擦角 = 35°              対 SUS 摩擦角 = 13°

図-11, 図-12より以下傾向がみられる。

- (1) 壁面の静置時圧力の測定結果はランキン土圧理論 (AIJ 浅槽) ではばあらかわされる。
- (2) 壁面の流動時圧力の測定結果はかなりばらついてはいるが、平均的にみると過圧係数 Cd = 2.0 としてランキン土圧理論の2倍を考えればほぼ妥当であろう。
- (3) ホッパー部の流動時最大圧力も測定値にばらつきはあるが、大旨ウォーカー理論であらわされよう。

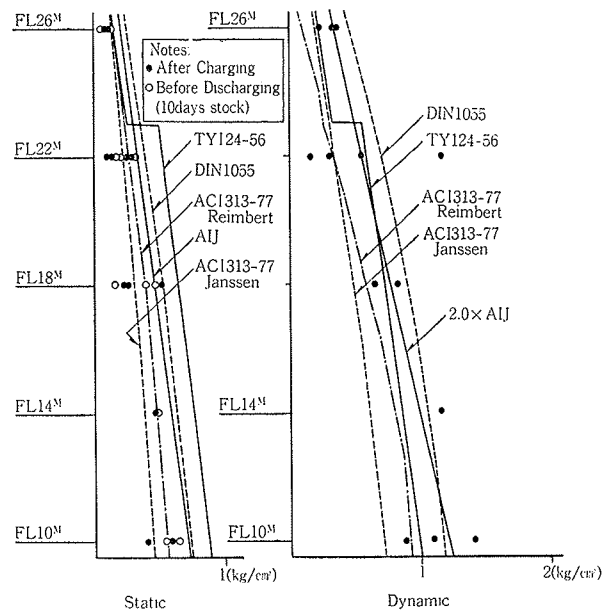


図-11 壁面圧力の計算値との比較

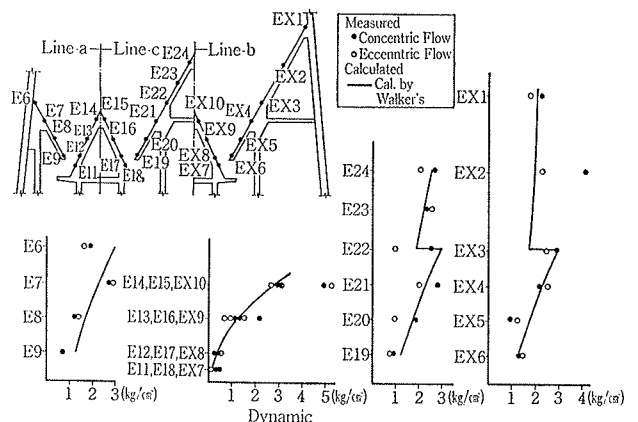


図-12 ホッパー部流動圧力の計算値との比較

### 3.6. 石炭圧による構造体の応力

満杯静置時の石炭圧力によるサイロ構造体各部の応力

の内、紙数の関係でその1例として特にホッパースラブでの周方向鉄筋歪の測定結果を図-13に示す。歪測定は、プレストレス導入後、サイロ内石炭が空の状態を初期値としているから、みかけ上引張歪を示すが、実際のコンクリート応力は、導入プレストレスを考慮した同図シャド-の範囲にあり、石炭圧力によるひびわれを防止するのに有効なプレストレス効果が示されている。

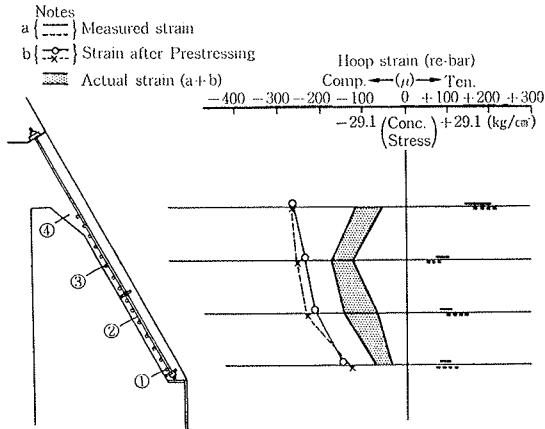


図-13 ホッパー部周方向歪

### 3.7. 石炭の流動性状

図-14にレベル計と手検尺とから推定した均等払出時の炭錐変化を示した。払出開始時には安息角 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ で積まれていた石炭が、払い出しの進行によって炭錐は平坦化し、かつE~G断面、F~H断面共にほぼ均等に沈降していく全体的なマスフロー流動が観察される。全量払出後のホッパー内部の目視調査により、サイロ内には残炭、付着炭が全くないことも確認した。図-15には石炭流動時の代表的な1サイクルでのコーン・ホッパー部の圧力分布の変化を示した。部分的なアーチの形成と崩壊とが繰り返されながら石炭が払い出されていく様子がよく表わされている。

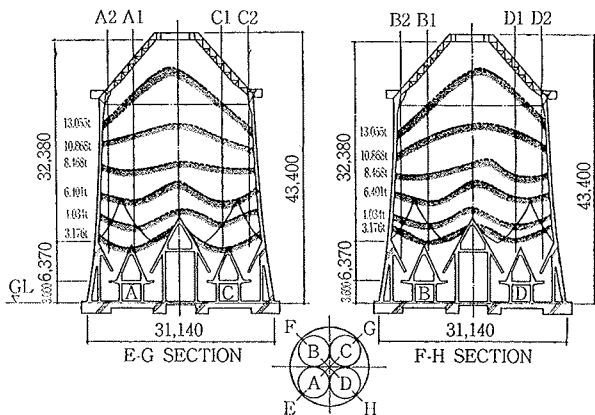


図-14 均等払出時の炭錐変化

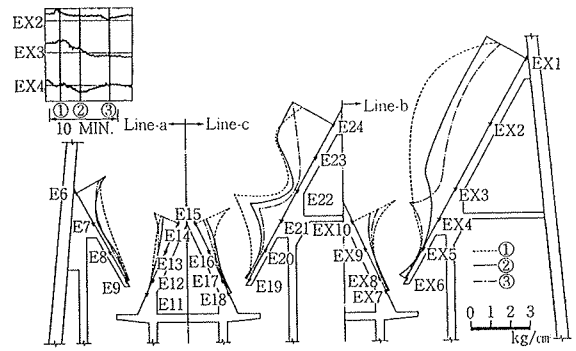


図-15 石炭流動中の圧力変化

## 4. まとめ

13,000 t 貯炭サイロの圧力測定結果とその考察及び石炭の流動性状について報告した。本サイロの圧力設計は、既往の知見や模型実験等による確認を踏まえて行なわれたが、得られた測定結果はほぼ設計値を満足するものであった。また、サイロ内石炭の流れはマスフロー流動で、良好な払出性能を有することが確認された。

将来のより大型な貯炭サイロに対する設計に際して、本測定結果が有益な資料となれば幸いである。

## 謝辞

本報告に関連する一連の実験は、四国電力(株)総合技術開的研究所土木研究所の御依頼により、同研究所の井上主席研究員、広瀬副主席研究員の御指導の下に(株)大林組と(株)日立製作所とが共同で行なったものである。

諸試験の遂行に当っては西条石炭転換建設所の御協力を、又、実験結果の考察には、(財)電力中央研究所土木研究所の関係者各位及び東京大学畑村助教授に貴重な御助言をいただいた。あわせて厚く御礼申し上げます。

諸試験の実施と解析は以下の担当で行なった。関係各位の御協力に感謝します。

圧力測定; (株)大林組 技術研究所構造第二研究室, 東京本社エンジニアリング事業部, (株)日立製作所機械研究所第七部

振動実験; (株)大林組 技術研究所振動研究室

沈下測定; (株)大林組 技術研究所土質・基礎研究室, 四電西条工事事務所

物性試験; (株)大林組 技術研究所土質・基礎研究室, 土木第一研究室, 振動研究室

解析担当; 上記各担当及び(株)大林組東京本社設計第三部, 技術研究所構造第二研究室