

# 大型貯炭サイロの構造特性に関する実験的研究（その2）

——振動実験と解析——

此上典文 鈴木哲夫  
渡辺清治 中川恭次

## Structural Characteristics of Existing Large-scale Coal Storage Silos (Part 2)

——Vibration Tests and Theoretical Calculations——

Norifumi Konoue Tetsuo Suzuki  
Seiji Watanabe Kyoji Nakagawa

### Abstract

This report (Part 2) describes the results of vibration tests and simulation analyses of the coal storage silo discussed in Part 1. Forced vibration tests by use of a large capacity shaker were performed under conditions of the base slab only, and emptying, half filling, and filling of coal in the silo, respectively. Test results were summarized in the form of natural frequency, damping coefficient, vibration mode, etc. An elastic response analysis was carried out to simulate test results by employing a finite element method, and good correlations with test results were obtained, especially regarding response characteristics of the principal first vibration mode which is most important in aseismic design.

### 概 要

本報告（その2）では、サイロ構造体と石炭との連成系における動的特性を大型起振機を用いた強制振動実験によって実験的に把握するとともに、そのシミュレーション解析結果について述べた。振動実験は、工事の進捗状況にあわせて、基礎盤だけの状態、石炭積付前の空サイロ、石炭積付途上の半杯サイロ、積付終了後の満杯サイロの各状態において実施し、微小振動レベルでの振動性状（固有振動数、減衰定数、振動モード等）を明らかにした。シミュレーション解析では、軸対称回転体有限要素法によって単体サイロとしての弾性解析を行なった。石炭の諸定数は、室内試験による石炭の物性試験結果に基づく数値を用いた。この結果、耐震設計において重要となる1次共振点付近の応答特性は良くシミュレートされ、本解析法は、設計手法として有効であることが確認された。

### 1. 序

本報告（その2）は、大型貯炭サイロの構造特性に関する一連の実験的研究のうち、サイロ構造体と石炭との連成系における動的特性について、大型起振機を用いた強制振動実験結果およびそのシミュレーション解析結果を中心に記述したものである。

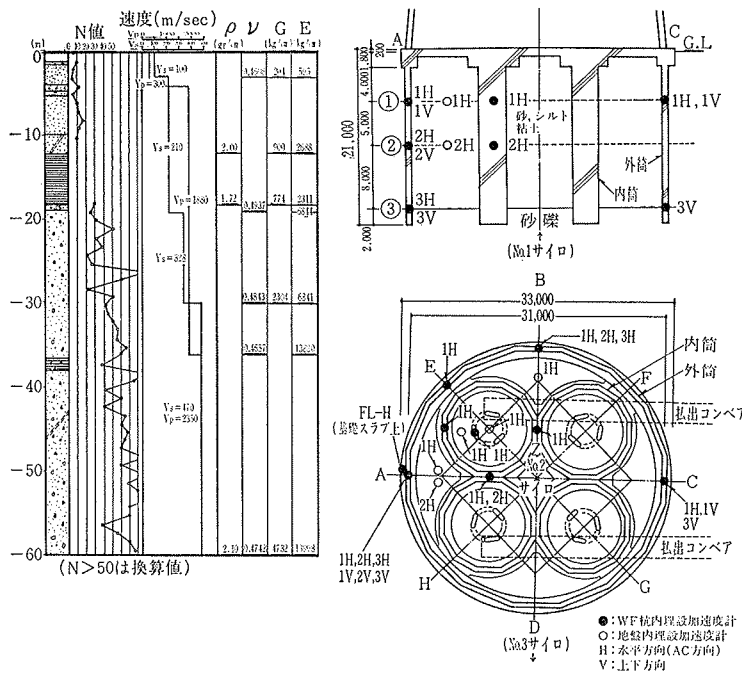
振動実験では、3基のサイロのうち中央の1基（No. 2サイロと称す）を利用し、サイロ基礎盤上に設置した起振機によって水平方向の正弦波加振を行ない、サイロ筒体—石炭—基礎盤—WF 杭—地盤等の連成した微小振動レベルでの振動性状を実験的に把握するとともに、他の2基の隣接サイロの影響についても検討した。次に、

シミュレーション解析では、石炭の物性試験結果に基づく諸定数を用いた軸対称 FEM モデルでの解析結果と実験結果との比較検討を行なった。

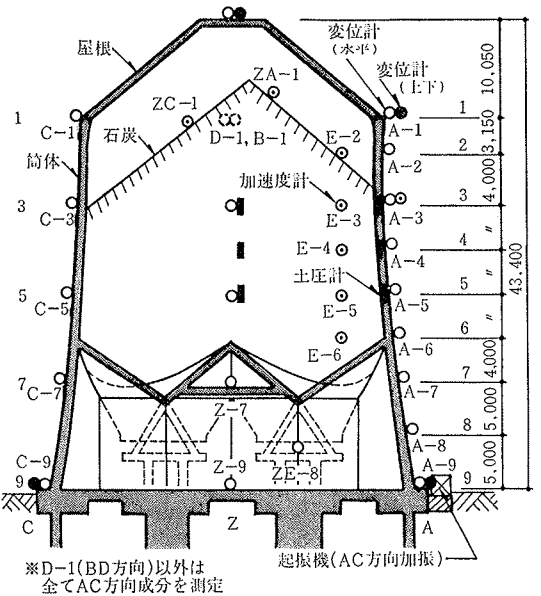
### 2. 振動実験の概要

まず、当地盤の層構造は図-1のごとく推定され、表層地盤の1次固有振動数は2.2 Hz 付近にある。なお、同図には、WF 杭と地盤内に埋設した加速度計の位置も示した。振動実験は、工事の進捗状況に呼応して、次の4状態について実施した。

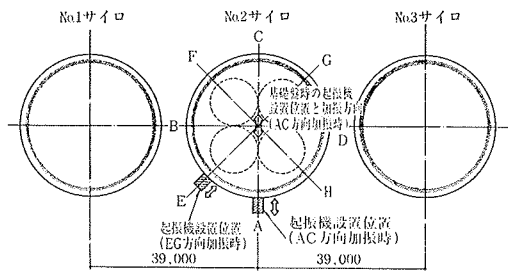
- (1) 基礎盤の振動実験（昭和57年4月実施）  
地上部サイロ筒体のない状態
- (2) 空サイロの振動実験（昭和58年3月実施）



図一 地盤の層構造と振動測定位置



図三 振動測定位置 (満杯サイロ)



図二 起振機設置位置と加振方向

石炭の積付量が零の状態

(3) 半杯サイロの振動実験 (昭和58年4月実施)

石炭積付量が全貯炭量の約半分 (6,500 ton) の状態

(4) 満杯サイロの振動実験 (昭和58年4月実施)

目標とする全貯炭量 (13,000 ton) を積付けた状態

図-2に、起振機の設置位置と加振方向を示した。起振機は、(財)電力中央研究所所有の10 ton型および50 ton型起振機で、基礎盤実験時には両者を、他の実験時には50 ton型のみを使用した。加振方向は、空および半杯サイロの場合には、図-2に示すAC方向、基礎盤および満杯サイロの場合には、ACとEGの各方向である。振動測定位置は、サイロ構造体の地下部分については図-1に、地上部分は、1例として満杯サイロの場合を図-3に示した。このうち石炭の振動測定では、石炭積付時に遠隔操作によるロボット機械によって所定の位置にセットされた鋼製カプセルに内蔵した小型の高感度ひずみゲージ式加速度計を使用した。

### 3. 実験結果とその検討

#### 3.1. 基礎盤の振動実験

ここでは、10 ton型起振機によるAC方向加振結果について記す。1例として図-4にWF杭および基礎盤上での水平方向加速度についての共振曲線を、後述の解析結果によるものも併せて示した。なお、共振曲線は、全加振振動数に対して起振力を1 tonに規準化して表示している。本基礎の固有振動数は、4~5 Hz, 10~11 Hz, および16 Hz付近と考えられる。図-5, 6は、4 Hzと10 Hz時のWF杭深さ方向の振動形を、また、図-7は16 Hz時の基礎盤の面外方向振動形をそれぞれ示している。4 Hzでは、基礎全体が1次の振動形を呈しており、地盤-基礎連成系の1次と考えられる。10 Hzについては、WF杭が深さ方向に2次の振動形を示し、また基礎盤の面外方向にも若干の弾性変形が生じていた。16 Hzの振動形は、深さ方向には、10 Hz時と比較的類似していたが、基礎盤の面外変形は著しく異なっており、図-7に示すようにWF外筒位置と内筒位置では、180度の位相のずれがみられる箇所もあり、複雑な回転運動を呈している。

一方、減衰定数は、上記三つの共振振動数に対しての1質点系回帰分析結果の平均値を表-1に示したが、1次で大きく、2次、3次で小さくなる傾向がみられる。これは、連成系1次は基礎一周辺地盤全体が一体となって振動しているのに対し、2次、3次は基礎のある一部が共振するいわゆる部分共振的な振動形を呈しているためと

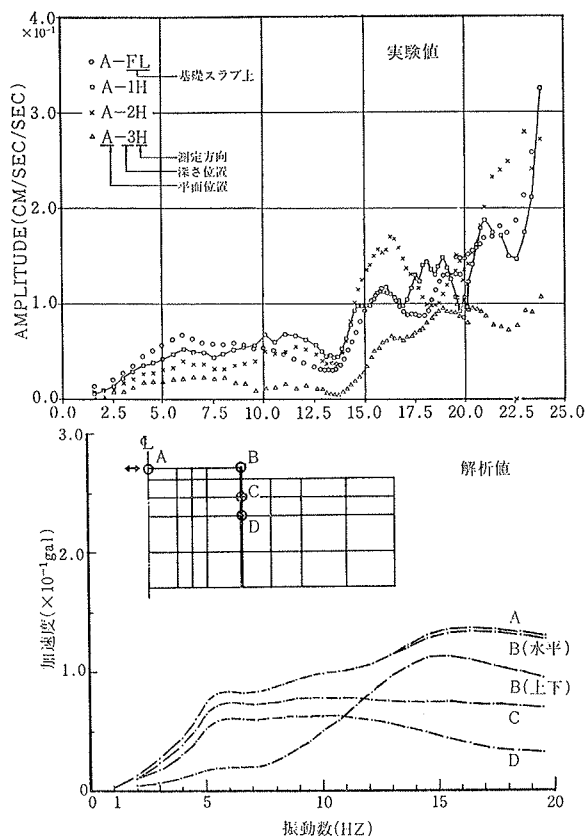


図-4 WF 杭加速度共振曲線

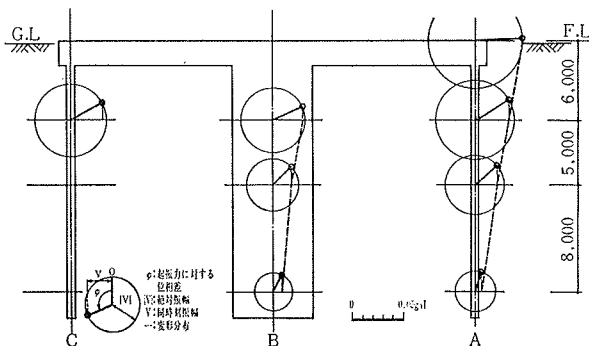


図-5 WF 杭振動モード (4Hz時)

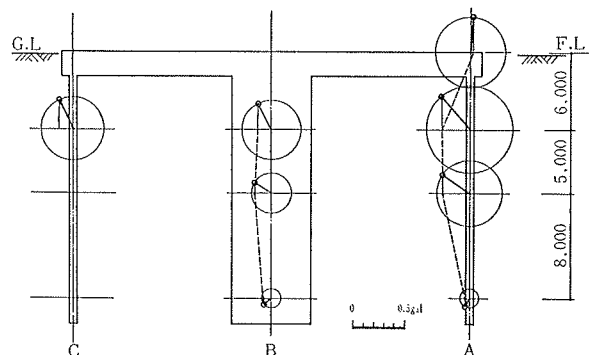


図-6 WF 杭振動モード (10Hz時)

と思われる。実験で求められる共振曲線には、各固有振動系の間である程度の相互干渉があると考えられるため、ここで求めた減衰定数の値は、実際よりも若干大きめ

に評価していると思われる。

なお、50 ton 型起振機を使用した実験結果、さらに EG 方向加振実験結果は何れも上述の結果と同傾向であり、加振力の差によって生ずる非線型性等の影響あるいは、本基礎の方向性はほとんど認められなかった。

### 3.2. 空サイロの振動実験

図-8に1例としてサイロ筒体A列測点での共振曲線を解析結果も含めて示した。起振力をすべて1 ton に規準化している。同図では、3~4 Hz および 8 Hz 付近にピークがみられる。前者は、図-9に示した振動形のように、サイロ-基礎-地盤が連成した1次の固有振動数と考えられ、

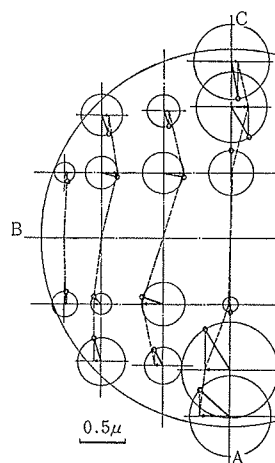


図-7 基礎盤モード

次数	固有振動数 (HZ)	減衰定数 (%)
連成系1次	4.5	50~60
連成系2次	10.5	20~30
連成系3次	15.5	10

表-1 固有振動数と減衰定数

図-10のようにスウェイ・ロッキング成分が全体の約8割を占めており、剛体的な振動性状を呈している。なお減衰定数は20~30%であり、ほとんどが地盤によるものと考えられる。後者は、他の測点でのデータ等を考慮すると、円周方向2次のオーバリングが誘発されたものであり、WF 杭頭部付近では、外筒部の水平振動が対称位置間で逆位相を呈するなどの影響が生じていた。オーバリング振動の減衰定数は1~3%である。なお、サイロ頂部の鉄骨屋根では、5 Hz 付近に上下方向の共振点があることを付記しておく。

### 3.3. 半杯サイロの振動実験

半杯サイロの他に、半杯からさらに約 2,200 ton の石炭を積付けた状態 (2/3杯サイロと称す)、およびさらに約 2,200 ton 積付けた状態 (5/6杯サイロ) について各各振動実験を実施したが、次項の満杯サイロの場合と同傾向であるため結果の詳細は省略し、各ケースの固有振動数と減衰定数の推移を1次共振時について表-2に示した。

### 3.4. 満杯サイロの振動実験

この実験では、図-2に示すAおよびE位置において AC および EG 方向に加振したが、本報では AC 方向の振動実験結果について記す。代表的な共振曲線として、図-11にサイロ筒体A列を、図-12に石炭中央付近の表面を、図-13にはサイロ壁体近傍の石炭内でのものを解析結果とともに示した。同図においてピークを示す 2.1 Hz と 5.5 Hz 時のサイロ全体の振動形を図-14に示し

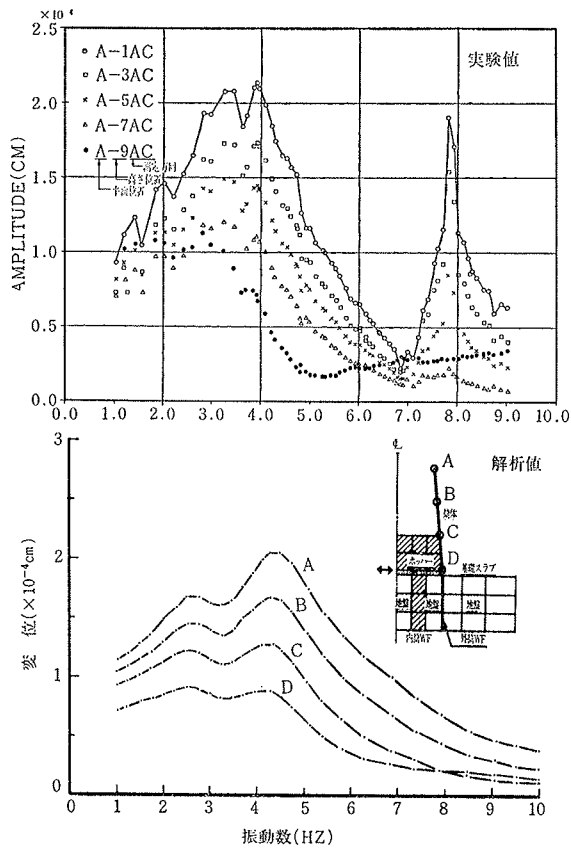


図-8 サイロ筒体変位共振曲線(空サイロ)

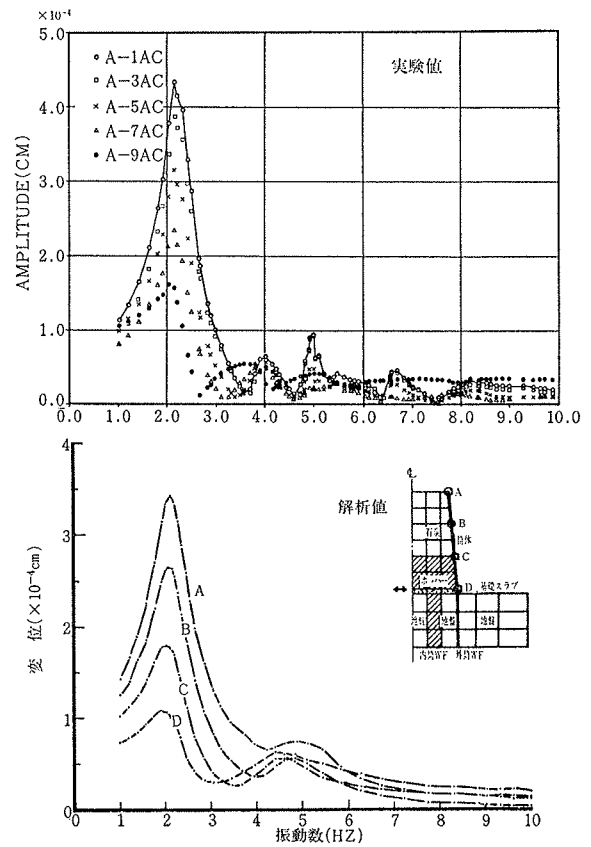


図-11 サイロ筒体変位共振曲線(満杯サイロ)

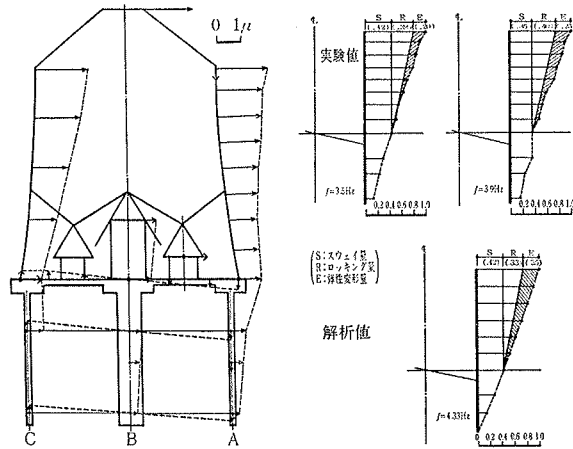


図-9 振動形(3.5 Hz)  
(空サイロ)

図-10 応答モード  
(空サイロ)

	1次固有振動数(HZ)	減衰定数(%)
基礎盤	4.5	50~60
空サイロ	3.5	20~30
半杯サイロ	2.7	8~9
3/4杯サイロ	2.5	10~11
5/8杯サイロ	2.3	12~15
満杯サイロ	2.1	10~15

表-2 各石炭積付状態時の固有振動数と減衰定数

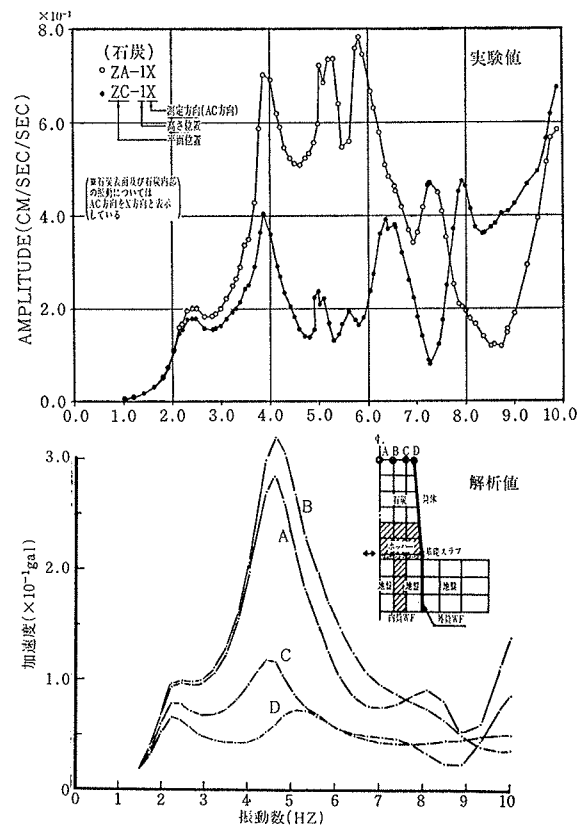


図-12 石炭表面加速度共振曲線(満杯サイロ)

た。なお、共振曲線では、3.9 Hz 時にもピークを示しているが、振動形は 2.1 Hz 時とほぼ同形であるため、

この二つのピークは単一ピークの間わかれ現象によって生じたものと判断される。この原因としてサイロ内部の

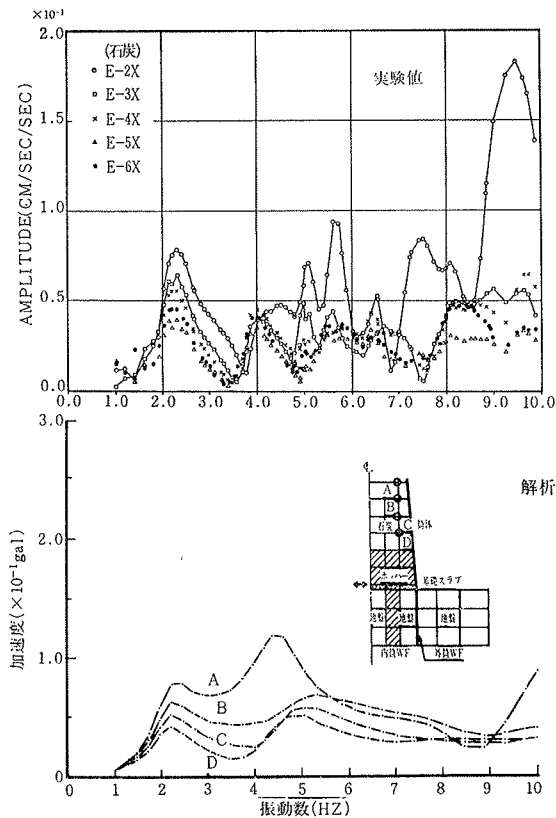


図-13 石炭内加速度共振曲線 (満杯サイロ)

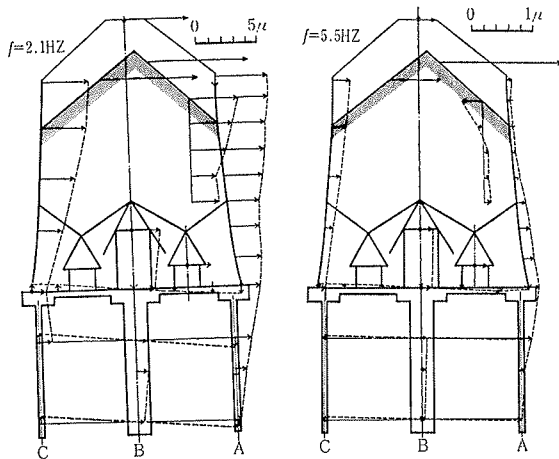


図-14 振動形 (満杯サイロ)

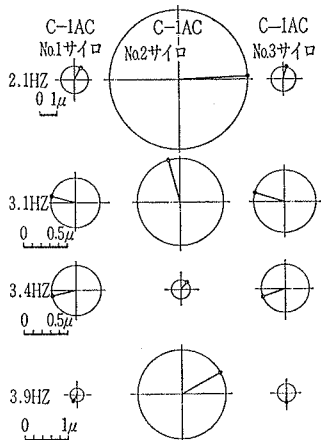


図-15 3サイロの相互関係

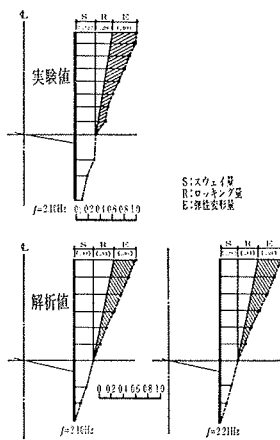


図-16 応答モード (満杯サイロ)

石炭, WF 杭内部の土, 隣接サイロなどの振動による影響が考えられるが, 種々検討の結果, 隣接サイロの影響と判断された。

図-15は3基のサイロの同時刻での相互関係を位相時計にて表示したものであり, 3.4Hzにおいて隣接サイロの振幅の方が大きく, また位相関係も実験サイロと他のサイロとの間にほぼ180度の位相差があって完全な逆位相となっている。従って, この単一ピークの間わかれ現象は, 3.4Hz付近に隣接サイロの共振点が存在し, このため実験サイロの振動エネルギーが地盤を介して隣接サイロに吸収されたためと考えられる。ちなみに, この時の隣接サイロの貯炭量は2基とも約4,000 tonで満杯時の約1/3量である。空サイロの実験時には両サイロとも貯炭量は零であった。

以上の結果, 満杯サイロのみかけ上の1次固有振動数は2.1Hzであり, 減衰定数は10~15%である。また図-16に示すようにスウェイ・ロッキングによる変形は全体の約6割を占めていた。

次に, 5.5Hz付近の共振振動数については, 図-14に振動形を示すように, 内部の石炭が2次モードを呈している。また, 6Hz以上になると, 石炭の振動は加振直交成分の方が加振方向成分よりも卓越する場合もあり, 石炭の局所的な共振など非常に複雑な振動性状を示している。一方, 空サイロでみられた8Hz付近のオーバリングは, 満杯サイロにおいても誘発されているが, 量的には非常に少なくなっている。なお, EG方向加振結果は, AC方向の場合と大差なく, サイロ構造体の方向性は認められなかった。

#### 4. シミュレーション解析

文献1), 2)で述べた軸対称回転体有限要素法によって, 単体サイロとしての解析を基礎盤, 空サイロ, 満杯サイロの各場合について行なう。また隣接サイロの影響については簡単な力学モデルを用いて検討する。

図-17に満杯サイロの場合についての解析モデルと入力諸定数を示す。このうち, 地盤については, 表層地盤の1次振動数が実測値(約2.2Hz)と合致するように剛性を決めた。また, 石炭の諸定数は, 動的三軸圧縮試験結果に基づいた値を採用している。図-18は石炭の上載圧とせん断剛性, 減衰定数との関係を示したものであり, 本解析では歪レベルが $10^{-3}$ の値を用いたが,  $10^{-4}$ の場合の解析結果と大差ないことが確かめられている。

##### 4.1. 1次共振振動数

表-3に1次共振振動数についての実験値と解析値を各ケース一括して示した。基礎盤の場合には, 共振曲線からは明確なピークは見いだせないが, 位相特性から5

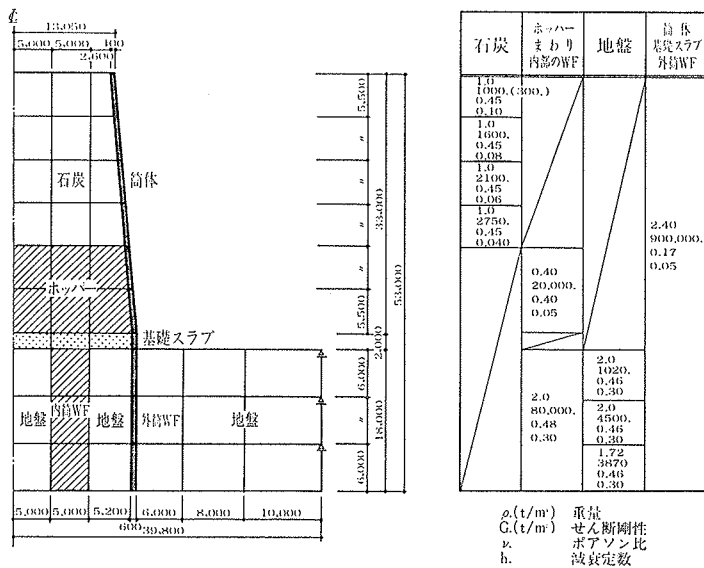


図-17 解析モデルと入力諸定数 (満杯サイロ)

Hz 付近に共振点があると思われる。なお、解析値は実験値に比べて各ケースとも高めな共振振動数となっているが、その差は比較的小さく、解析における剛性評価はほぼ妥当であったと考えられる。

#### 4.2. 応答曲線

図-4 の基礎盤の場合、10 Hz 付近までは、解析結果は実験結果と共振曲線の形状及び応答値においてほぼ合致している。図-8 の空サイロにおいては、8 Hz 付近のオーバリングのモードを除くと、実験結果をよくシミュレートされているといえよう。なお、解析ではオーバリングは考慮していない。図-11 の満杯サイロでは、3.5 Hz 付近の落ち込みは解析ではみられないが、その他の部分については実験と解析は比較的良く一致している。3.5 Hz 付近の落ち込みは、隣接サイロの影響と考えられ、文献2)と同手法によって簡単な力学モデルを設定し検討した結果の共振曲線を図-19に示した。隣接サ

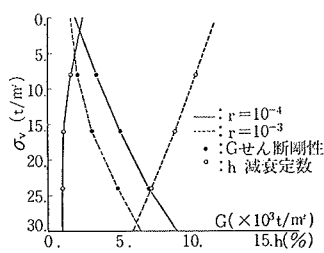


図-18 石炭の物性値

	実験値(HZ)	解析値(HZ)
基礎盤	4.5	5.35
空サイロ	3.5	4.15
満杯サイロ	2.1	2.20

表-3 1次共振振動数

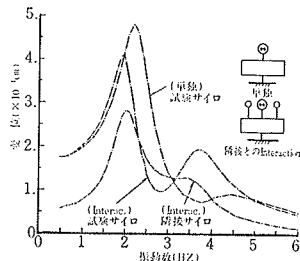


図-19 隣接サイロを考慮した共振曲線

イロを考慮することによって1次共振振動数が単体サイロの場合に比べ低下するが、3.5 Hz 付近に落ち込みが生じ、実験結果と同傾向となることが認められる。図-12, 13は石炭の加速度共振曲線の実験結果との比較であり、2.3 Hz 及び5 Hz 付近で応答が大きくなるなど定性的な傾向は掴めていよう。

#### 4.3. 振動モード

1次共振点付近のサイロ筒体部応答モードを、図-10には空サイロの場合、図-16には満杯サイロの場合についてそれぞれ示したが、何れも解析結果は実験結果と良い対応を示している。

### 5. むすび

大型起振機を用いた今回の大型貯炭サイロの動的特性に関して貴重なデータが多々捉え得たと考える。また、単体サイロとしての応答解析結果は、実験結果と細部においては異なるところもみられるが、耐震設計において重要となる1次共振点付近の応答特性については実験結果を良くシミュレートできている。本報で示した実験的研究成果及び動的解析手法が今後の大型貯炭サイロの耐震設計において有益な資料となれば幸甚である。

### 謝辞

実機大型貯炭サイロの振動実験という貴重な機会を与えて下さった四国電力(株)総合技術開発研究所土木研究所の関係各位には心から御礼申し上げます。また(財)電力中央研究所土木技術研究所 立地部次長 江刺靖行博士、土質基礎研究室主査研究員 吉田保夫氏、耐震構造部担当研究員 矢島 浩氏には同所の大型起振機を使用させていただいたのみならず、本実験の計画から考察に到るまで終始貴重な御助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、技術研究所振動研究室 若松邦夫職員および土木第一研究室 鳥井原 誠職員には多大な御協力を得ました。あわせて謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 表, 此上, 茶谷, 鈴木: 石炭サイロの動的挙動に関する基礎的研究, 大林組技術研究所報, No. 26, (1983), pp. 15~22
- 2) 表, 此上, 茶谷, 鈴木: 工業用原料サイロの構造特性に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No. 26, (1983), pp. 23~30