

港灣技研資料

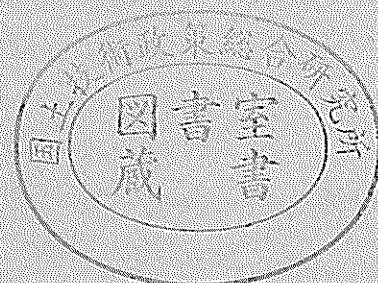
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 267 Sept. 1977

土運船実船調査報告
—土砂投下時の船体挙動—

早乙女 保 二
石 塚 浩 次
松 本 茂

運輸省港灣技術研究所



目 次

1. ま え が き	3
2. 調 査 概 要	4
3. 供 試 土 運 船 概 要	5
4. 測定項目および測定要領	6
5. 測 定 結 果	6
5.1 積込み土砂について	6
5.2 土運船浮力曲線	7
5.3 土砂投下時喫水変化	7
5.4 土砂投下時加速度	8
5.5 加速度の測定結果による土砂投下時フルード数	9
5.6 土砂投下時流出土量	10
6. 土運船土砂投下の模型実験縮率の検討	11
7. 結 論	12
8. あ と が き	12

A Report on the Field Test of Barges
— The Behavior of the Barge with its Sand and Soil
being dumped the Sea —

Yasuji SAOTOME*

Koji ISHIZUKA **

Shigeru MATSUMOTO ***

Synopsis

This paper describes field test on behavior of the large barge when its sand and soil is dumped the sea for getting the fundamental data on the occurrence of turbidity adopted to model-tests.

The test was carried out at Rokko Island in Kobe City on two barges, a 2000 t barge and a 2500 t barge. The rising acceleration and the change of draft of the barges under the operation were measured.

The rising velocity was obtained directly by integrating the rising acceleration, which was resulted to find the Froude Number under the dumping situation. It is cleaned that the change of the amount of its sand and soil with time is equivalent to the change of a decrease in buoyancy. The test showed that it took about 11 sec for the 2500 t barge to unload all its sand and soil.

The results of the test gives the scale ratio based on the Froude's Law for the model-tests.

* Chief of Sludge Treatment Laboratory

** Member of Dredger and Construction Equipment Laboratory

*** Member of Working Craft Development Laboratory

土運船実船調査報告

一土砂投下時の船体挙動一

早乙女 保 二 *
石 塚 浩 次 **
松 本 茂 ***

要 旨

土運船土砂投下時の濁り発生研究の模型実験基礎資料を得るために、大型土運船土砂投下時の船体挙動について実船調査を行った。調査は神戸市六甲アイランドにおいて実施し、2,000 t積、2,500 t積土運船の通常作業土砂投下における土運船浮上加速度、喫水変化などの測定を行った。

調査の結果、土運船浮上時速度は加速度の測定データの直接積分によって求まり、土砂投下時のフルード数が明らかになった。また、流出土量の時間的变化は、土運船浮上に伴う浮力の減少量の変化によって代表させることができると考えられ、その結果、土砂流出に要する時間は、2,500 t積土運船の場合、約 11 秒と推定された。

今回の調査結果をもとに当研究所機材部で進める模型実験の縮率をフルード則によって算出した。

1. ま え が き

最近、埋立地の大規模なこととあいまって、数千トンクラスの大型土運船が用いられるようになった。この大型土運船によって高能率な埋立作業がなされるために、今後さらに大型の土運船の建造も予想される。

一方、このような大型土運船による1回の大量土砂投下は、環境面で埋立地周辺水域に与える影響も大きくなることも考えられる。また、大型化に伴う船体構造、強度の改善、流出土砂の堆積形状の把握も今後なされなければならない問題といえる。これら土運船の大型化に伴う諸問題のうち、投入土砂堆積形状については模型実験

の報告¹⁾がなされているが、土砂投下時に発生する濁りの発生量、環境への影響については、今後研究などによって明らかにする必要がある。

本調査は当研究所機材部の土運船土砂投下時の濁り発生に関する研究を進める上で、実船の土砂投下状態を明らかにし、模型実験土砂投下(模型土運船縮尺1/16、水槽幅 2 m、水槽長さ 26 m)の相似律などの基礎資料を得ようとして2、3の大型土運船について試みたものである。

なお、本調査は埋立工事に付随して行ったもので、実施にあたっては神戸市の協力を得た。

* 機材部 汚泥処理研究室長
** " 作業船研究室
*** " 特殊作業船開発室

2. 調査概要

土運船の土砂投下開始後の浮上現象、土砂落下現象は、この運動系に作用する力が主に重力と慣性力であり、模型実験との相似則はフルード数が考えられる。したがって、模型実験の土砂投下時間、土運船浮上速度などの実験条件および模型土運船の形状の実船との相似はフルード則によって求められるものと考えられる。今回の調査は模型実験相似則の基となる実船土運船の通常作業時に

おける土砂投下時間、土運船浮上速度、流出土量などについて主に調査の対象とした。また、調査した土運船は2,000 t 積、2,500 t 積土運船であり、調査場所は現在大型土運による埋立工事が行われている神戸市の六甲アイランドを選び、調査した土運船はこの埋立工事に使われている2,000 t、2,500 t 積土運船である。六甲アイランドおよび周辺地域の概略図を図-1 に示す。写真-1 は土砂積込みの様子を示す。

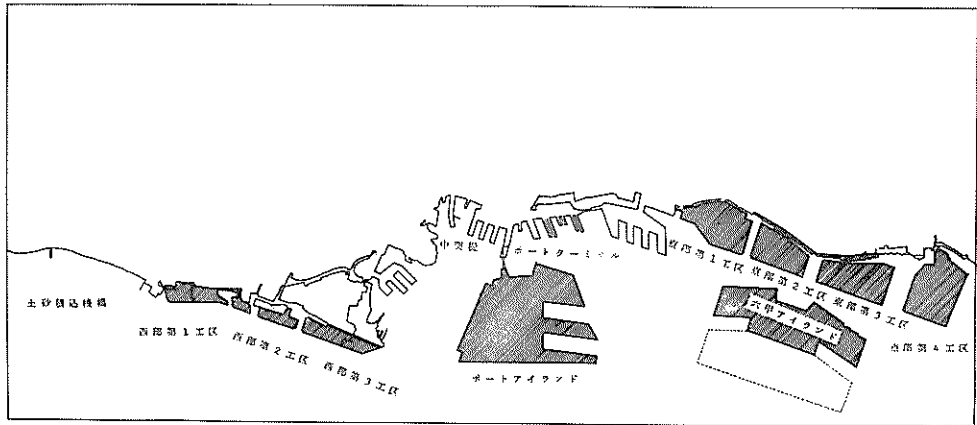


図-1 六甲アイランド周辺図



写真-1 土砂積込み

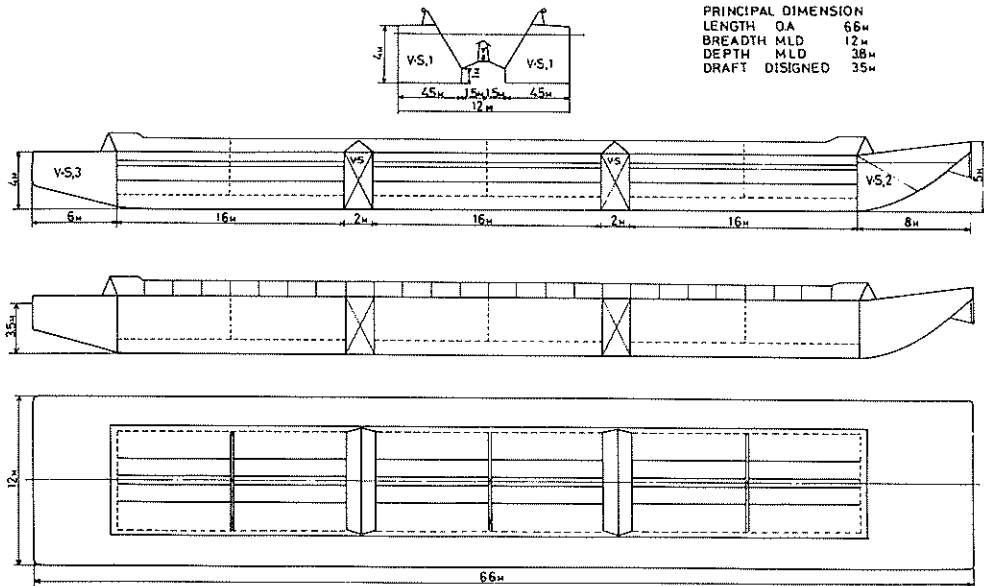
3. 供試土運船概要

今回調査した2,000 t、2,500 t 積土運船は3つの船艙を有し、各船艙には左右に油圧駆動底開き式ホッパードアを持っている。2,000 t、2,500 t 積土運船の概略を図-2、3に示し、表-1に概要を示す。図-2,3のV・Sはポイドスペースを表わし、2,000 t 積土運船と2,500 t 積土運船の船首、船尾のポイドスペースは多少異なっている。

また、2,000 t、2,500 t 積土運船とも表-1に示すサイクルタイムによって埋立工事を行っている。写真-2は土運船の押航の様子を示す。

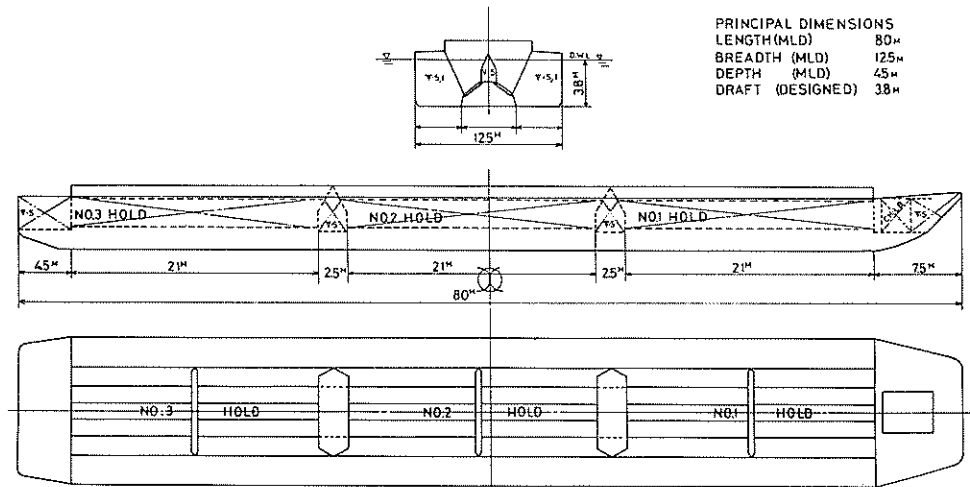
表-1 船体概要および埋立サイクルタイム

土運船種別	船体概要		埋立サイクルタイム				埋立用土砂
	船艙容量	船体自重	土砂積込み	往路航行	土砂投下	復路航行	
2,000 t	1,000 m ³	571 t	20~30分	140分	2~3分	110分	神戸市周辺山砂
2,500 t	1,500 m ³						



PRINCIPAL DIMENSION
 LENGTH GA 66M
 BREADTH MLD 12M
 DEPTH MLD 38M
 DRAFT DESIGNED 35M

圖-2 2,000t 積土運船



PRINCIPAL DIMENSIONS
 LENGTH (MLD) 80M
 BREADTH (MLD) 12.5M
 DEPTH (MLD) 45M
 DRAFT (DESIGNED) 38M

圖-3 2,500t 積土運船

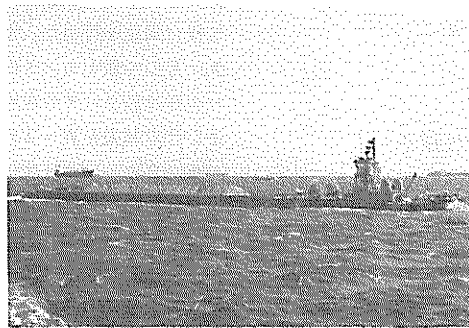


写真-2 土運船押航

4. 測定項目および測定要領

土運船の土砂投下時のホッパードアの開放操作は通常1回であるが、埋立水深が浅い場合には2回以上に分けて行われることがある。しかしながら、ホッパードアの2回以上の開放操作は、土運船土砂投下の現象が複雑になることなどにより、今回の測定はホッパードア1回の開放時に実施した。測定項目および測定要領は次の通りである。

(1) ホッパードア開放時間

ホッパードア開放時間の測定は、ホッパードア開閉操作ロッドの開放時くり出し量を変位計(ポテンシオメータ)を介し、電磁オシロ記録器に記録し、記録紙の送り速度から算出した。変位計の取付様子を図-4に示す。

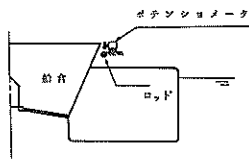


図-4 ポテンシオメータ取付様子

(2) 土砂投下時の土運船浮上加速度および変位

土砂投下時における土運船の浮上加速度、変位は、土運船の船首、船尾に取付けた加速度計、圧力計によって検出し、電磁オシロ記録器に記録した。加速度計の取付け状態を図-5に、圧力計の取付状態を図-6に示す。

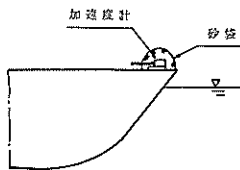


図-5 加速度計取付様子

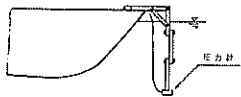


図-6 圧力計取付様子

(3) その他

以上の主な測定項目の他に、土運船船内土砂の写真撮影、および船内の土砂を採集し、後日分析を行った。

計器の取付け場所、配置を図-7に示す。(1)~(3)の測定は土運船が埋立水域に停船状態で行った。

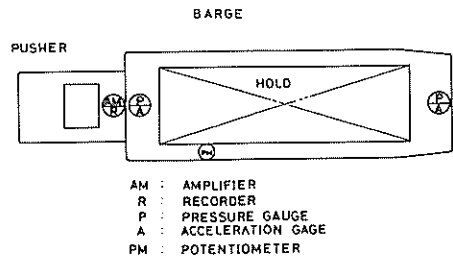


図-7 計器の取付配置

5. 測定結果

5.1 積み込み土砂について

土運船積み込み土砂の粒度分布、真比重、単位体積重量、また船艙壁との摩擦などは、土砂の流出状態に影響を及ぼす。また、土運船の積み込み土砂は、ホッパードア隔間からの海水の浸入による含水比、航行中の船体動揺による間引き率なども変化し、土運船の土砂流出に影響すると考えられる。写真-3に土運船船内の土砂を示す。

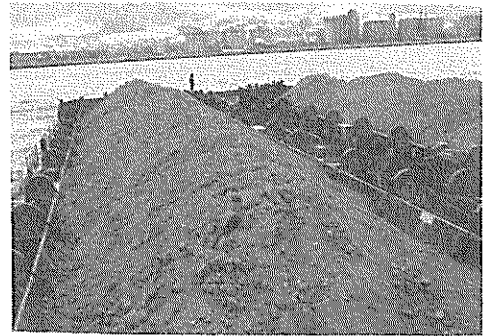


写真-3 積み込み土砂

しかしながら、今回調査した土運船の積み込み状態の土砂性を調べることは測定上から難しいために、船艙内で採集し、ビニール袋に入れ密封して持帰った土砂について後日測定を行った。土運船船内の積み込み土砂には大きいもので数十センチの岩石が混入しているが、採集した土砂は数センチの岩石混入のものである。測定項目および測定結果を表-2に示す。

表-2における単位体積重量の測定は、約500cm³の鉄容器に適度に詰込み状態を変えて行ったもので、“ゆるい”は10cm前後の高さから土砂を落下させた時の詰込み状態、“中”は容器にハンマー等で打撃振動を与えた詰込み状態、“締った”はハンマーで締固めた状態である。

表-2 積込み土砂の物性値

測定項目	測定値					備考
真比重	2.64					500 ml ルンチャテリヤ
単位体積重量	ゆるい	1.197 $\frac{g}{cm^3}$	中	1.447 "	縮つた	500 cm^3 鉄容器
含水率	11.3%					
摩擦角	約 26°					錆た鉄板
安息角	約 34°					乾燥状態

図-8は粒度分布の測定結果を示すが、試料には粘性土が含まれ乾燥状態では固結し脆いこと、試料中の岩石に微粉子が付着していることなどの影響があったものと考えられる。

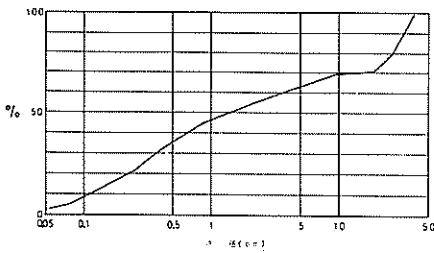


図-8 粒度分布

5.2 土運船浮力線図

突船土運船における土砂投下時の流出土量は、土運船の浮力を基に考えることができる。すなわち、土砂投下時土運船の浮上速度、加速度がそれほど大きくない場合には、ほとんど喫水変化に伴う土運船の浮力の減少量が流出土量を代表することができると考えられる。

今回調査した土運船の浮力線図は入手できなかったため、土運船の一般配置図により求めた。なお、今回求めた土運船の浮力は次の計算式および値により、土運船深さ方向に5cmきざみに計算した。

$$V = (\sum V \cdot S + \text{船艙容量}) \times \gamma$$

ここで、 V : 土運船浮力 (t)

γ : 海水の単位体積重量 (1.025 t/m^3)

図-9, 10に2000t積, 2500t積土運船の代表的 $V \cdot S$ 船艙および土運船全体の浮力線図を示す。2000t積, 2500t積土運船の喫水と浮力の関係はほぼ同様のもので、土砂投下時の喫水変化(約1~4m)においてはおよそ直線的な比例関係にあるといえる。

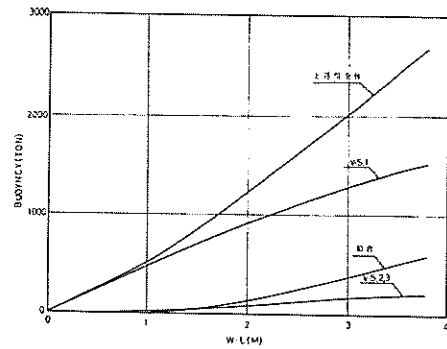


図-9 2000t積土運船浮力線図

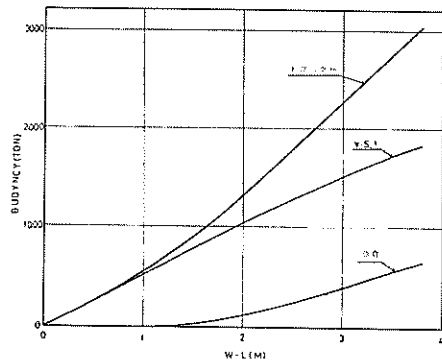


図-10 2500t積土運船浮力線図

5.3 土砂投下時の喫水変化

今回調査した2000t積, 2500t積土運船の実績積込み土量と中央喫水を表-3に示す。

ホッパードアは船艙内の土砂の土圧によって、左右同時に、しかも短時間に開くものと考えられるが、開放時間は測定上のトラブルもあって測定できなかった。土運船関係者の報告によると1秒以下の瞬間的な時間と言っている。一方、ホッパードア開放後の土砂の流出は、今回の調査時において船艙全長にわたって一様に流出しないケースがあった。この不均一土砂流出は同一船艙内の

左右舷においても見られる。写真4, 5 に不均一土砂流出時の船内土砂の様子を示す。

表-3 土運船積み土量および喫水

土運船種別	積み土量	中央喫水
2,000 t 積	1,906 t	3.370 m
2,500 t 積	2,500 t	3.725 m



写真-4 土砂投下時船内土砂

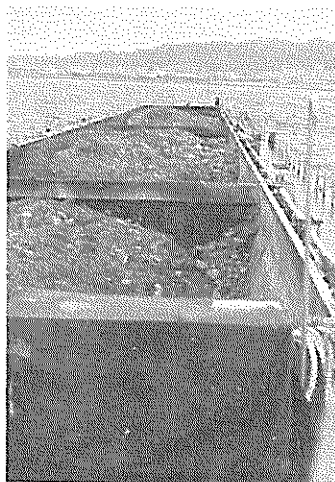


写真-5 土砂投下時船内土砂

今回測定した土砂投下時の喫水変化を表-3の中央喫水からの減少量とし、また、船首、船尾喫水量から求めた土運船長手方向の傾きを表わしたものが図-11, 12で

ある。図-11の2,000 t 積土運船の喫水変化は、上記不均一土砂流出を生じた時のものである。すなわち、船尾が2段階に浮上し、浮上終了までの時間が約25秒に対して、船首は3段階に浮上し、浮上終了までの時間は約48秒であった。この時土運船船尾は軽荷喫水線を越えて浮上し、船首の浮上終了するにつれて正常の喫水線に戻る。この不均一土砂流出により、土運船は長手方向に最大2°の傾斜が生じた。

次に2,500 t 積土運船の喫水変化は船首、船尾の時間的な差はなく、浮上終了までの時間も約11秒と2,000 t 積土運船の半分以下の時間であった。

今回の調査中に生じた2,000 t 積土運船の不均一土砂流出の原因は測定結果からでは不明であるが、2,000 t 積土運船と2,500 t 積土運船の船艙構造（例えば船艙壁の傾斜、2,000 t 積土運船 60°, 2,500 t 積土運船 67.5°）が異なっており、土砂の流動性が2,500 t 積土運船に比べ悪いことも原因の一つと考えられた。

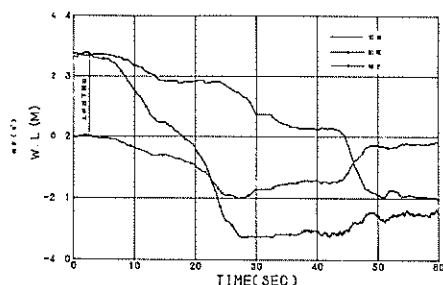


図-11 2,000 t 積土運船喫水変化、傾き

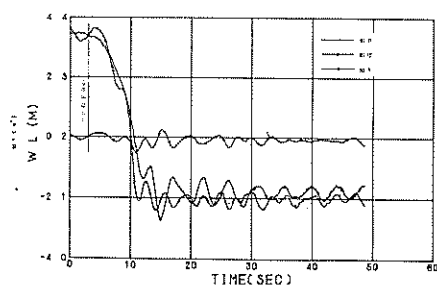


図-12 2,500 t 積土運船喫水変化、傾き

5.4 土砂投下時加速度

土運船土砂投下時の加速度測定結果を図-13, 14に示す。土砂投下時の土運船浮上中に生じる加速度のうち、ホッパードア開放時、流出土砂の急激な変化時、土砂流出完了時などにおいては土運船の浮上状態が大きく変化するのために、大きな値になっている。

2500 t 積土運船測定結果によれば、A-B 間がホッパー開放時加速度、B-C 間が土砂流出中加速度、C-D 間が土砂流出の終了時点において生じた加速度と考えることができる。D 点以後の加速度は波浪によっても生じていると考えられるが、時間経過と共に減衰傾向にあることから土砂流出に起因しているものと考えられる。すなわち、土運船は初めホッパーの開放によって積み土砂のホッパーに作用した土圧を瞬間的に取除かれるために急激に浮上し、その後はほとんど流出土量に応じて浮上する。そして土砂流出終了時において、それまでの運動エネルギーによって軽荷喫水線付近において上下動すると考えることができる。2500 t 積土運船の平均浮上加速度は、浮上距離約 2.7m、浮上時間約 11 秒として 4.45 cm/sec^2 である。一方、土運船浮上中の最大加速度は土砂流出終了時に生じ、マイナス側（土運船浮上速度の減速方向）に 130 cm/sec^2 であった。

2000 t 積土運船の土砂投下時加速度は、2500 t 積土運船に比べて土砂流出終了までの時間が長かったこともあり、それほど大きな加速度は生じなかったが、ホッパー開放時、急激な土砂流出時付近では約 60 cm/sec^2 の値の加速度が生じた。

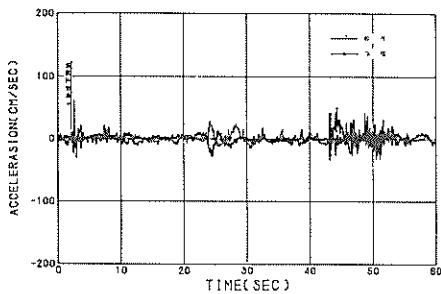


図-13 2000 t 積土運船加速度変化

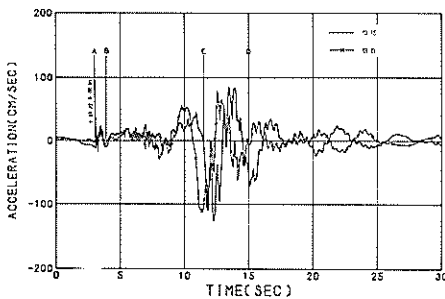


図-14 2500 t 積土運船加速度変化

5.5 加速度の測定結果による土砂投下時フルード数

今回の調査目的の一つである実船土運船土砂投下時のフルード数を得るために、均一な土砂流出の 2000 t 積土運船の加速度測定データにより求めてみた。すなわち、加速度を積分し、速度を算出してフルード数を求めた。

加速度を積分し速度および変位を求める場合、データの零点、零点シフト量が問題となる。これらの誤差は積分の範囲が大きくなるに従って数値積分誤差が大きくなり、最終的には発散する。今回の測定データの零点の取り方は、土砂投下前 60 秒間の土砂積み状態の加速度（データ数 614 個）の平均値を算出し、更に喫水変化の測定データと照合しながら発散を少なくするよう修正し求めた。

加速度の積分により求めた喫水変化と圧力計による測定で得られた喫水変化を図-15, 16 に示し、図-17 は船首、船尾喫水変化の平均値を示す。なお、測定された加速度は機械的に 10 Hz 以上の周波数をカットし、積分上の微小時間間隔は 0.0515 秒（記録紙送りスピード 9.71 mm/sec）としている。

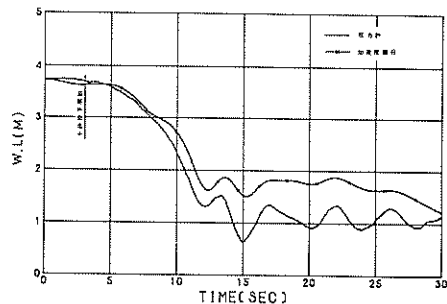


図-15 船首喫水変化の比較

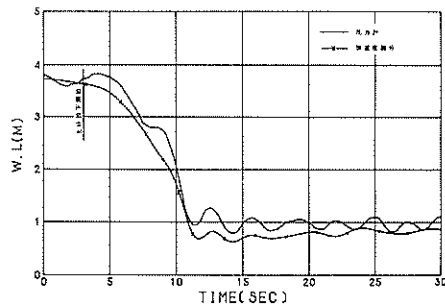


図-16 船尾喫水変化の比較

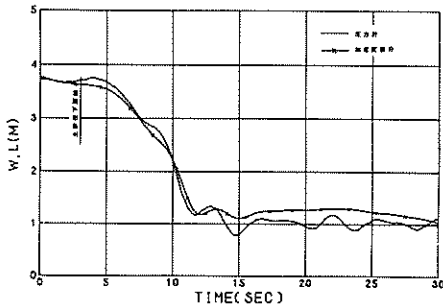


図-17 船首、船尾平均喫水変化の比較

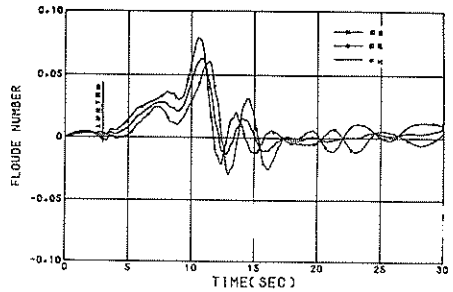


図-19 フルード数の変化

加速度の積分結果による喫水変化と圧力計の測定値の喫水変化は船首の場合多少異なっているものの、おおよそ一致しているといえよう。したがって、フルード数を算出する場合の速度を加速度を積分によって求めることができると考えられる。加速度の積分によって求めた土運船浮上時の速度変化を図-18に示す。

フルード数は上記土運船速度および土運船の代表寸法としての船体幅により次のように表わされる。

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F : フルード数

U : 土砂投下時土運船速度 (cm/sec)

L : 土運船代表寸法 (1,250 cm)

g : 重力加速度 (980 cm/sec²)

図-18の土運船浮上時速度によって求めたフルード数が図-19である。

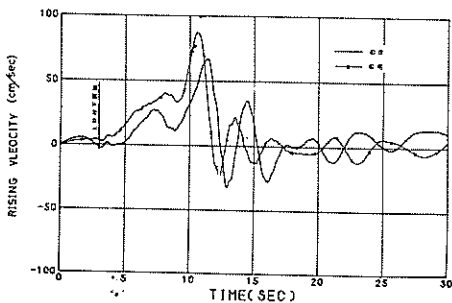


図-18 速度変化

5.6 土砂投下時流出土量

土運船のホッパードア開放後の流出土量の変化は、土運船の浮上現象の基となるが、流出土量を直接測定することは難しい。ここでは土運船の浮上の様子から、流出土量の時間的変化を推定してみる。

まず図-20を参照して、土砂流出中の土運船は次の釣合式によって表わすことができる。

$$m_1 \alpha + m_2 (\alpha - \alpha') + f(v) - kx = -m_1 g - m_2 g \dots\dots (2)$$

ここで、 m_1 : 土運船質量

m_2 : 船艙内土砂質量

α : 土運船加速度

α' : 土砂流出により船艙内の土砂に生じた加速度

g : 重力の加速度

$f(v)$: 土運船の速度による抵抗

kx : 土運船の浮力

x : 喫水

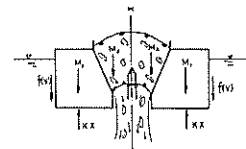


図-20 浮上中土運船模図

上記釣合式において $f(v)$ は粘性係数と速度係数を含むものと考えられる。そのうち速度係数を含む抵抗は、今回の土運船の浮上中に生じた最大の速度によっても 1 t 以下の値となり、ほとんど無視し得るものと考えられる。一方、(2)式においては粘性係数を含む速度抵抗、 α' およびホッパードア開放後の土運船船艙の浮力変化について、今回の速定結果からでは不明であった。まず粘性係数を

含む速度抵抗は、粘性係数の値が不明なことである。粘性係数は土運船浮上完了後の船体上下動の減衰量によって算出し、浮上途中の粘性係数を代表しても、波浪による上下動も重なっていることも考えられ、現象が複雑であった。また、 α' は流出土砂量に応じて船艙内の土砂が下方に移動した時に生じた加速度で、船艙内土砂の見掛け上の荷重軽減を起こすと考えられる。すなわち、流体力学上問題とされる近より速度と同様なものと考えられる。しかし、土砂の場合、船艙内と流出中の単位体積重量は異なること、土砂の流出速度の算出が難しいことにより、一般的な扱いが困難であった。土運船船艙の浮力はホッパードアの閉じた状態では海水の浸水があっても積載荷重の増加として、喫水線までの船艙容積によって求められる。しかし、ホッパードア開放後は船艙出口の仕切面がホッパードアによるものと異なっているものと考えられる。

以上の詳しい検討は今後の研究に待つものとして、今回は粘性係数を含む速度抵抗 $\equiv 0$ （土運船浮上完了後の上下動の減衰はそれほど強くない）、 $\alpha' \equiv 0$ とし、また、ホッパードア開放後の船艙浮力は喫水線までの容積の浮力として(2)式の計算を行ってみた。すなわち、土運船浮上時加速度のみを考慮すると、(2)式は次のように簡略できる。

$$m_1 \alpha + m_2 \alpha - kx = -m_1 g - m_2 g \quad \dots\dots (3)$$

加速度の測定データと図-10の浮力線図により、船体自重を571 tとして船艙内の土量を求めると図-21のようになり、更に流出土量（初期積込み土量-船艙内土量）を求めると図-22のようになる。また図-23は単位時間当りの流出土量変化で、計算上から表われるマイナス流出土量は零とした。

図-21, 22, 23は土運船の浮上時加速度を考慮しない場合、すなわち(3)式において浮力と船体重量および船艙内土量のみ釣合いによって求めた場合についても併せて表わした。

今回の計算結果によれば、土運船からの流出土量の時間的变化は、ほとんど喫水変化に伴う浮力の減少量によって代表することができ、土砂流出の終了は図-21において14秒付近にあるといえる。したがって、ホッパードアの開放は同図の3秒付近にあり、2500 t積土運船の土砂投下に要する時間は約11秒と推定できる。

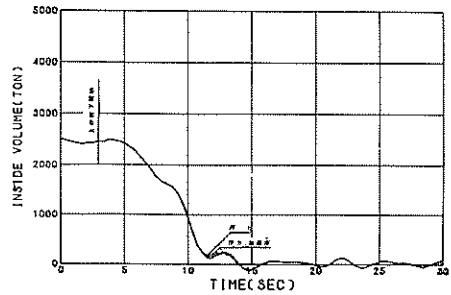


図-21 船艙内土量変化

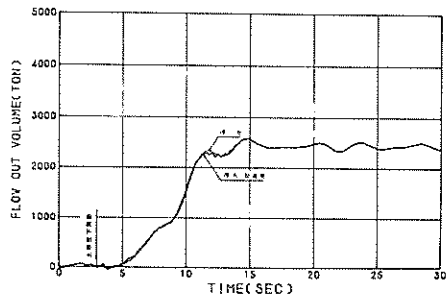


図-22 流出土量変化

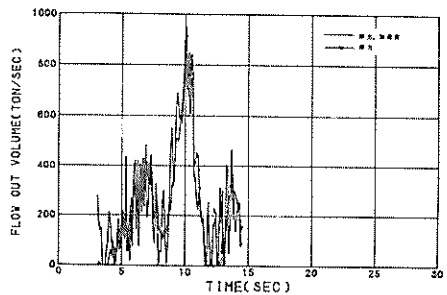


図-23 単位時間流出土量

6. 土運船土砂投下時の模型実験縮率の検討

同様な土砂性状の同型土運船による土砂投下時土運船浮上現象、土砂落下現象はそれほど大きな差はないものと考えられ、2500 t積土運船の測定結果はほぼ代表的な土砂投下の例といえよう。この2500 t積土運船および土砂投下の測定結果によって、当研究所機材部の土砂投下時濁り発生模型実験の縮率を求めてみた。模型比を m としてフルード則としての(1)式より、以下の諸式を得る。

$$L_r = m, v_r = \sqrt{m}, t_r = \sqrt{m},$$

$$Q_r = m^2 \frac{2}{L_b}, W_r = m^2 \frac{2}{L_b}$$

ここで、 L ：代表長さ (m)

v ：速度 (m/sec)

t ：土砂投下時間 (sec)

W ：土運船重量＋土砂重量 (t)

Q ：船艙容積 (m³)

r ：実船と模型との比 (添字)

L_b ：実船船身長 (m)

なお、 $2/L_b$ は模型土運船船身長さを 2 次的に扱い、当研究所の水槽幅に合わせ 2 m としたことによる。模型実験の模型比 $m=1/16$ として、表-4 の模型実験諸元を得る。表-4 の模型実験諸元によれば、模型実験における土砂投下は実船の場合と同様になるが、これらの他にも土砂の比重量、粒径および物性値の相似率も併せて考慮する必要がある。

表-4 模型実験諸元

諸元	模型比	実船	模型
船体幅	1/16	12.5 m	0.78 m
浮上時速度	1/4	平均 0.25 m/sec	0.06 m/sec
投下時間	1/4	11 sec	2.75 sec
船艙容積	1/8704	1500 m ³	0.17 m ³
重量	1/8704	3070 t	0.35 t

7. 結 論

土運船土砂投下時の調査結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) 土運船の土砂投下時間は、2,500 t 積土運船の場合約 11 秒要した。
- (2) 土運船からの流出土量の時間的変化は、土運船の浮力の減少量によって代表できると考えられた。
- (3) 土砂投下時の加速度はホッパードア開放時、土砂流出終了時に大きな値となった。特に土砂流出終了時において最大の値となり、平均浮上加速度の約 30 倍の値となった。
- (4) 測定した加速度の積分によって、土運船浮上時速度およびフルード数が求められた。

上記結論は 2,500 t 積土運船の測定結果によるものである。

8. あとがき

土運船土砂投下時の実船調査は今回始めて試みたもので、測定の不慣れやトラブルがあり測定できなかった項目もあったが、一応の成果は得られたものとする。今後、測定法の拡充を図り、今回不均一な土砂流出となった 2,000 t 積土運船およびより大型土運船の調査を重ね、土運船土砂流出の様子を明らかにしたいと考える。特に、今回の調査期間中荒天のため運行が不能となり、調査できなかった 6,000 t 積土運船などの大量土砂投下時に調査の必要があると考える。また、今回の測定上のトラブルとして、折たたみ記録紙の折目が記録器内でつまり、記録の一部がとれなかった。今後記録紙メーカーの改善を求めたい。

最後に、今回の調査に協力していただいた神戸市の関係者、神戸機械整備事務所の関係者、測定機器の取付けを手伝っていただいた土運船乗組員に対して、心より感謝する次第である。

(1977年6月21日受付)

参 考 文 献

- 1) 武藤碩夫・吉井総介・石田 勉：大規模埋立用底開ページによる土砂投下の研究，三菱重工抜報，Vol. 11，ND. 1，1974年1月。

港湾技研資料 No. 267

1977・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有) 葵印刷工業

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.