

合衆  
神倉

# 港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第6巻3号

Vol. 6 No. 3

(通巻第40号)

## 浚渫用グラブの研究 (第3報)

グラブの部材強度および水中における巻

上げ時の抵抗について……………岩田尚生

## 浚渫用噴流装置に関する研究 (第3報)

噴流装置を用いた港湾工事事用機械につい

ての2, 3の実験……………岩田尚生

## ホッパーの沈澱効果に関する研究

ホッパーの積込効率について……………入江義次・青木幸男

1967年1月

運輸省港湾技術研究所



# 浚渫用グラブの研究（第3報）

—— グラブの部材強度、および水中における巻上げ時の抵抗について ——

## 目 次

要 旨	1
1. ま え が き	2
2. グラブの着地時の衝撃応力についての実験および実験結果	
2.1 実験の目的、および実験	2
2.2 実験結果、および考察	3
3. グラブのつかみ過程における部材応力についての実験、および実験結果	
3.1 実験の目的、および実験	6
3.2 実験結果、および考察	6
4. 水中からグラブを巻上げる際に、グラブが受ける抵抗力についての実験、および実験結果	
4.1 実験の目的、および実験	8
4.2 実験結果、および考察	8
5. グラブ部材の応力計算について	
5.1 浚渫用グラブ計画の手順	10
5.2 着地時の衝撃応力の計算	10
5.3 つかみ過程中の部材応力の計算	12
5.4 巻上げ時の部材応力の計算について	14
6. 本報告の結論	15
7. 総 括	15

# STUDY OF SEDIMENTATION EFFECTS OF SOIL IN HOPPER

## (ON THE LOADING EFFICIENCY OF SOIL IN HOPPER)

YOSHITSUGU IRIE \*  
YUKIO AOKI \*

### Synopsis

Drag suction dredgers are actively used at various places today, especially for the dredging in the route where marine traffics are frequent or in the narrow water ways.

The problem on the operation of these drag suction dredgers is that numerical values for the loading efficiency of soil into hopper are not known yet.

So the designers and operators of drag suction dredger have often been troubled and took pains over this problem. In order to solve this problem, we experimented by using model hoppers, the same type of which are contained in the drag suction dredger Kaiho-maru and Kairin-maru, and formularized the loading efficiency of soil into hopper as follow ;

$$\eta = 1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)}$$

Where  $V_s$  is settling velocity of particles,  $\bar{U}_H$  is the average horizontal velocity in hopper,  $\alpha$  is a constant, that is  $\alpha \approx 2.5$ , and was determined from the experimental results using model hoppers and from those of performance tests of drag suction dredgers.

But this equation can be used only for loading sands, and it must be corrected when it is applied to mud.

Moreover, the average loading efficiency and loading time in hopper were formularized theoretically.

We don't show here in this report the research how to determine the capacity of dredging pump. Considering only through the relation of volume of the hopper and other important factors, the capacity of dredging pump was determined from the average loading efficiency and minimum loading time, and found to be proportioned according to the settling velocity of particles.

---

\* Research Engineer, Fluid Transportation Laboratory.

# ホッパーの沈澱効果に関する研究

— ホッパーの積込効率について —

入 江 義 次 \*  
青 木 幸 男 \*

## § 1. ま え が き

ドラグサクシオン浚渫船は現在数隻が各地で活躍しており、特に海上交通の頻繁な航路や狭隘水路での浚渫作業に、著しい能力を発揮している。ドラグサクシオン浚渫船建造に当っては、浚渫場所の諸条件に対して、最も適した、浚渫能力が出せるよう、航行、浚渫作業の両面にわたって、計画がなされる。浚渫部門の設計技術は他の船体、機関および電気部門等に比較して、非常に立ち遅れていて、建造上ネックになっている。

この浚渫船の設計上大きな問題として、ホッパーの大きさとポンプ容量の関係があげられる。たとえばアメリカ工兵隊では浚渫ポンプ容量とホッパー水平面積の関係は  $1\text{ft}^2$  のホッパーの水平面積に対し、 $2.5\text{ft}^3/\text{min}$  のポンプ容量が適当だといわれているが、その数値の出所は明らかでない。これらの数値の適、不適は別として、最初の数値のとり方如何により、能率的、非能率的な浚渫船を建造する岐路になる。

また数値のとり方は良くても実際に浚渫する場合を考えれば、浚渫現場においてホッパー積込状態を直接目で見て判断することは困難な場合が多く、特に浚渫対称土質が変わった場合には著しい積込効率の増減があるにもかかわらず、数値的には全く不明で、工事担当者を苦慮させる例も度々ある。

このように我々が設計や工事を担当する場合には、充分に考慮すべき積込効率を解析した例は少い。この理由として、ホッパーの積込効率を解析する場合にトラフからの落下土砂による攪乱、このために起る複雑な土砂の沈澱過程や、さらには土砂の分配装置、オーバーフロー機構、あるいは静止装置の相違による扱い方等難かしい問題が多いためであろう。

本研究ではモデルタイプとして、第一、第四港湾建設局所属の海鱗丸、海鵜丸型の模型ホッパーを使用して実験を行い、積込効率とそれにおよぼす諸因子と考えられ

るポンプ容量、砂の沈降速度、ホッパー形状との関係を実船の場合と比較検討をしたものである。さらにいままでの考え方との比較も併せて行なった。実船試験、室内試験のデータを使用して、設計や工事に参考になると思われる数値として、平均積込効率、積込時間等も式を誘導することにより求められるようにした。

なお、本報告はホッパーの大きさとポンプ容量の求め方については深く言及せず、単にこれらの関係を求めるに際しての必要なる値の計算方法を見出したものである。

## § 2. 実験装置および供試材料

実験装置は図一、写真一に示すように砂槽、サンドポンプ、吐出管、模型ホッパー、および計測装置からなる。砂槽は模型ホッパーに土砂水を積込み、さらにはオーバーフローさせても十分な砂が保てるような大きさ（約  $2.4\text{m}^3$ ）とした。また砂槽には濃度が調節できる吐出ゲート、ならびに噴出ノズルを備えている。サンドポンプは流量  $0.165\text{m}^3/\text{min}$ 、揚程  $10\text{m}$  の片側吸込式で、吐出管との間にバルブを設け、流量はこれで調節する。吐出管は内径  $38\text{mm}$  の鋼管で立上り部分と水平部分とに分かれる。水平部分の途中にビニール製の透明管を備え、流動状況は直接目で観察できるようにした。さらに水平部分には濃度計（含泥率計）（写真二）を備え、記録器に導くことにより連続的に濃度変化を測定できるようにし、また吐出口の手前に三方コックを備え、一方は砂槽へ、他方は模型ホッパーに流下するようにした。

本実験に用いた模型ホッパー（写真三）は表一の三種類とした。この大きさ決定の目安はポンプ容量とホッパー水平面積の比を  $\text{ft}$  単位で  $2$ 、 $2.5$ 、 $3.5$  を目標にしたが、実際はポンプ容量が設計値より大きかったため、この比は目標値を上廻った。

\* 機材部 流体輸送研究室

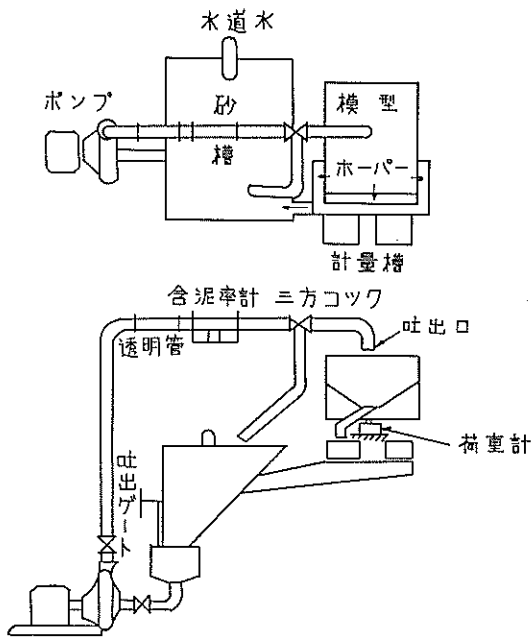


図-1 実験装置

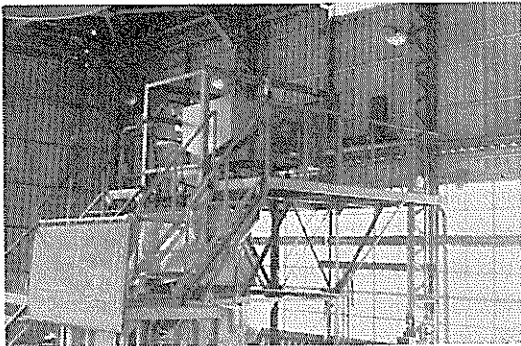


写真-1 実験装置

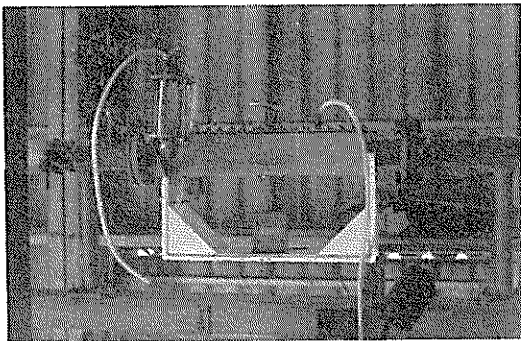


写真-2 濃度計 (含泥率計)

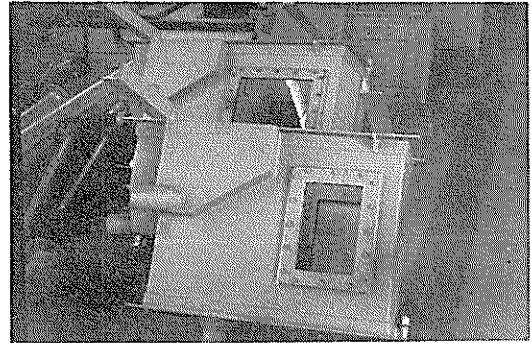


写真-3 模型ホッパー

表-1 模型ホッパー

種類	長さ L cm	巾 B cm	深さ H (オーバー フロレベル) cm	水平面積 cm <sup>2</sup>
大	83.0	27.7	42.0	2,300
中	73.5	24.8	42.0	1,820
小	62.7	20.9	42.0	1,310

模型ホッパーの積込土量の増加は圧縮型ロードセル(写真-4)を2個取付けることにより、記録器に導き濃度計と同様に連続的に記録がとれる。またこのホッパーは外から積込状況を観察できるように、ガラス製の測定窓を設けた。

供試材料は高萩産の砂で粒径加積曲線を図-2に示す。この図からも明らかのようにかなり均一な粒径分布を示している。真比重は2.61、ホッパーに積込んだ時の見掛比重は1.9であり、沈降速度は50%粒径の速度として0.037m/secを採用した。

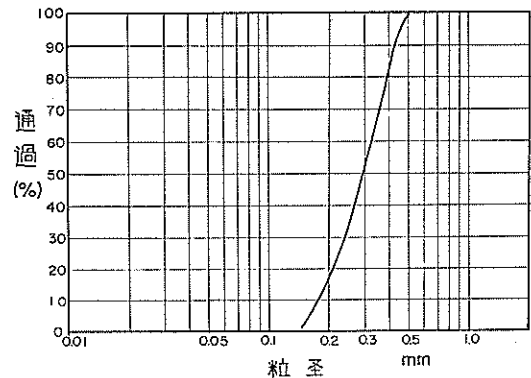


図-2 粒径加積曲線

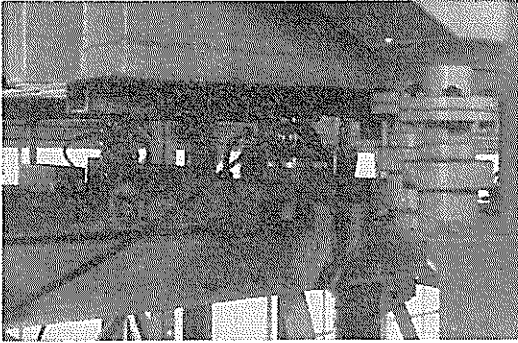


写真-4 圧縮型ロードセル

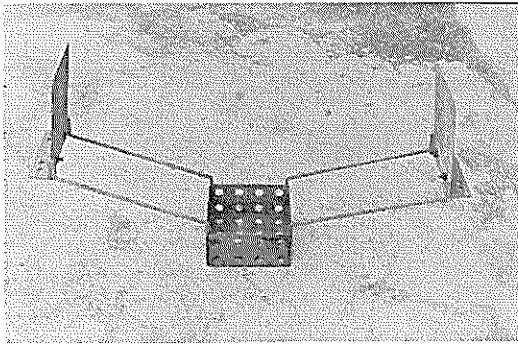


写真-5 静止装置

実験に用いた静止装置は写真-5に示すものである。

### § 3. 実験方法

実験は砂混入試験に入る前に、バルブ開度による流量を計量槽、あるいは模型ホッパーを併用して計測してお

き、その後適当なる流量を示すバルブ全開とバルブ4回絞り（バルブ開度2）について実験を行うことにした。なお流量はなるべく高範囲にとるのが望ましいが、パイプのつまり等の限界があるためこの値に抑えたものである。

バルブ開度と流量との関係は図-3に示す。

砂混入試験はバルブで流量をセットし、その後吐出ゲートで濃度を調節して、適当なる濃度を示した時（すなわち濃度は5%~27%程度までの範囲で変化させた）に吐出ゲートをセットとした。ただし、濃度は真体積濃度である。

次に、吐出口の手前の三方コックを模型ホッパーに切換えることにより計測を開始した。なお吐出口の位置はホッパー外に水があふれない程度にオーブフロー位置より遠ざけた。計測は積込開始からホッパー積込土量飽和状態に達するまで続け、その間積込開始からオーバ

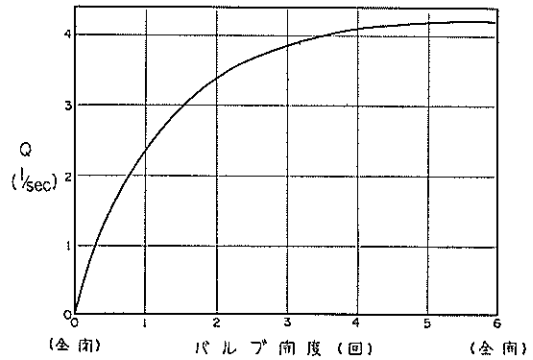


図-3 バルブ開度と流量

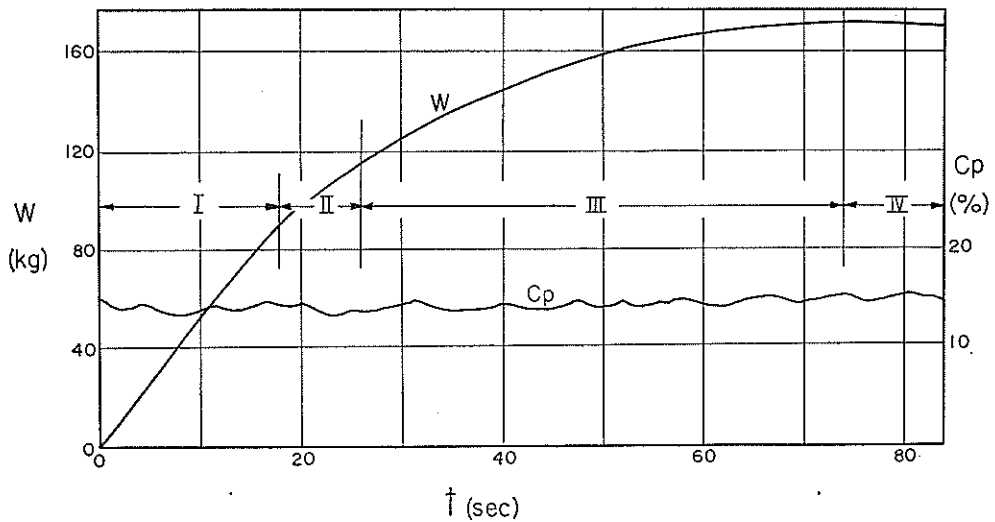


図-4 記録例

ーフロー直前までの時間を計測し、さらに濃度計と荷重計は連続的に記録した。オーバーフロー以降はオーバーフロー土砂水を全て砂槽へ循環するようにして、繰り返して使用できるようにした。

積込状況等については模型ホッパーの観察窓から直接目で見るか、あるいは8mm撮影機で撮影しておき、あとで解析の指針とした。

表一2 実験方法

静止装置の有無	ホッパーの種類	バルブ開度	試験 No.
有	大	全開	1, 2
		4回絞り	3, 4
	中	全開	5, 6, 7
		4回絞り	8, 9
	小	全開	10, 11
		4回絞り	12, 13
無	大	全開	14, 15
		4回絞り	16, 17
	中	全開	18, 19
		4回絞り	20, 21
	小	全開	22, 23
		4回絞り	24

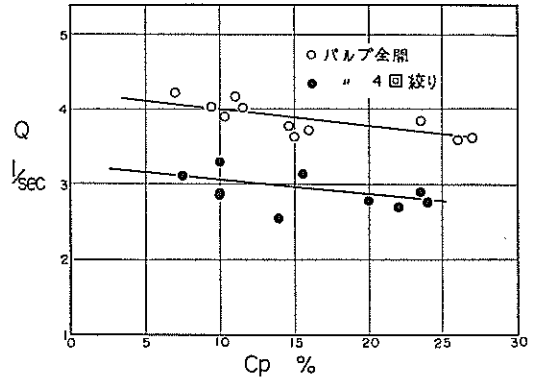
また実験は静止装置を取り付けた場合と取り付けない場合、両方について表一2に示す組合せで行なった。

#### § 4. 実験結果

今回の実験で得た代表的な記録例を図一4に示す。実際の記録は圧縮ロードセル2個のため、荷重曲線は2本になるが、この図では2つの合計を記した。

荷重曲線は図のようにI, II, III, IVの領域に分けられる。Iの領域は積込開始からオーバーフローするまでで、荷重曲線は流量あるいは濃度が大きく変化しなければ直線的变化を示す。そこで、この領域で平均流量と平均濃度の関係をバルブ全開、および4回絞りについて求めたのが図一5である。この図から砂混入時の濃度に対する流量を求めることができる。

IIの領域はオーバーフロー開始後、オーバーフローレベルよりある程度水面が上昇するため、(オーバーフロー厚さhまで)荷重増加を示すもので、実際はホッパー容積が増加したと同様な傾向となる。この盛り上がり高さは四角せきとして計算すると



図一5 濃度(含泥率)による流量低下

$$Q = Kbh^{3/2} \dots\dots\dots (4-1)$$

これを変形して

$$h = \left( \frac{Q}{Kb} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (4-2)$$

ここに b:せき巾

K:係数

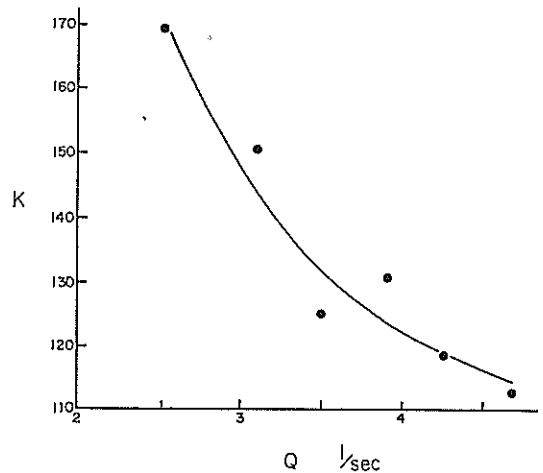
Q:ポンプ容量

h:オーバーフロー厚さ

Kの値を実測から計算した結果は図一6に示す。

IIIの領域は積込効率は減少しているが、砂はまだ積込まれている状態で、最も重要な領域となる。なお土砂容積の増加は、全て重量変化となって表われるので、次の式より重量を容積に換算した。

$$\left. \begin{aligned} r_{II} &= \frac{W}{V + V_0} \\ C_{II} &= \frac{r_{II} - 1}{r_b - 1} \\ V_{II} &= (V + V_0) C_{II} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4-3)$$



図一6 K の 値

ここに、W : ホッパー内重量

V<sub>0</sub> : オーバーフローレベル上の増加  
容積=BLh

L : ホッパー長さ

B : ホッパー巾

r<sub>H</sub> : ホッパー内混合比重

r<sub>b</sub> : ホッパー内土砂の見掛比重

V : ホッパー容積

V<sub>H</sub> : 土砂容積

IVの領域は飽和した状態で、これ以上積込みを行っても、全て流出し、土砂はホッパーには積込めない状態である。この状態における積込状況は図-7-1~2に示す。

静止装置付の場合、窓から観察した結果ではかなり平均的に積込みが行なわれており、最終的な積込状態も図-7-1のようにホッパー全面にわたり、大きな凹凸はできない。またこの図で明らかなように、静止装置の無い場合は吐出エネルギーの減衰度合が少く、かなり大きくえぐられている。写真-6に静止装置の無い場合の吐出状況を示すが、かなりの波立ちが見られることから、攪乱が大きいものと推察される。

この最終積込土砂容積は、静止装置付の場合ホッパー容積に約1倍、静止装置の無い場合は約0.89倍程度まで積込まれた。

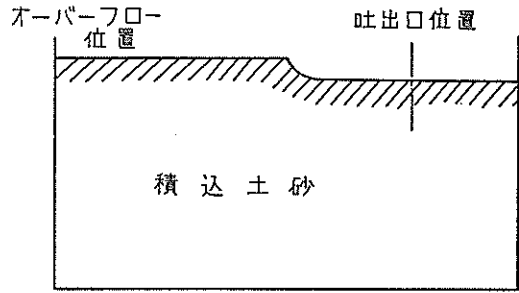


図-7-1 最終的積込状況  
静止装置付

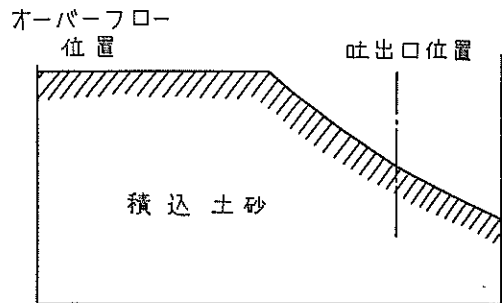
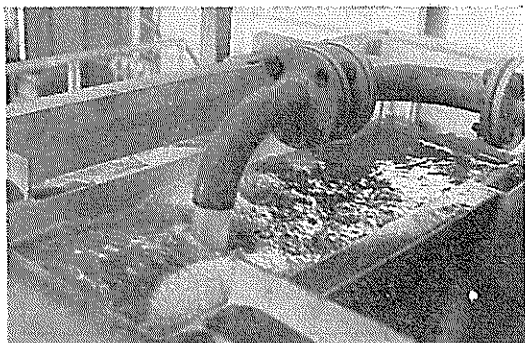


図-7-2 最終的積込状況  
静止装置なし

表-3 実験結果平均値

試験No.	$\bar{C}_p$	$\bar{Q}$ (l/sec)	$\bar{g}_m$ (m <sup>3</sup> /sec)	G <sub>H</sub> (m <sup>3</sup> )	t (sec)	G <sub>H</sub> /V	$\bar{g}_H$ (m <sup>3</sup> /sec)	$\eta_m$ (%)
1	0.258	3.63	16.7×10 <sup>-4</sup>	0.0994	72	1.032	13.8×10 <sup>-4</sup>	82.5
2	0.088	4.03	6.3	0.0885	340	0.918	2.6	41.2
3	0.107	3.06	5.9	0.0903	185	0.937	4.87	82.6
4	0.103	3.08	5.7	0.0929	193	0.964	4.79	84.1
5	0.179	3.82	12.2	0.0826	265	1.080	3.12	25.5
6	0.048	4.12	3.5	0.0835	328	1.093	2.55	72.8
7	0.154	3.84	10.5	0.0760	161	0.993	4.71	44.8
8	0.169	2.95	8.9	0.0821	124	0.982	6.02	67.6
9	0.070	3.16	4.0	0.0443	302	1.072	2.72	68.0
10	0.053	4.11	3.9	0.0596	122	0.805	3.64	93.3
11	0.104	3.99	7.5	0.0550	123	1.082	4.84	64.7
12	0.086	3.12	4.8	0.0499	177	1.000	3.1	64.5
13	0.088	3.11	4.9	0.0764	234	0.907	2.13	43.5
14	0.065	4.08	4.8	0.0745	257	0.794	2.97	61.8
15	0.111	3.98	7.9	0.1000	228	0.772	3.27	41.4
16	0.271	2.75	13.3	0.0787	102	1.035	9.84	73.9
17	0.069	3.14	3.9	0.0713	248	0.815	3.17	81.2
18	0.085	4.04	6.2	0.0716	271	0.931	2.64	42.6
19	0.107	3.98	7.6	0.0645	237	0.936	3.02	39.7
20	0.120	3.04	6.5	0.0720	106	0.843	6.05	93.0
21	0.136	3.01	7.3	0.0645	145	0.941	4.96	68.0
22	0.318	3.49	19.8	0.0539	66	0.980	8.22	41.5
23	0.177	3.83	12.1	0.0519	95	0.937	5.43	44.8
24	0.099	3.08	5.4	0.0473	185	0.860	2.56	47.3





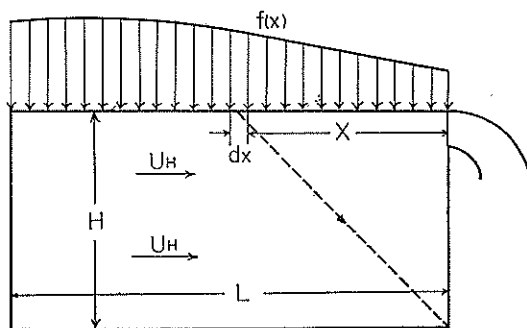
写真—6 吐出状況  
静止装置無し

次に実験結果の一部を表—3に示す。ここでポンプ流量、ポンプ濃度、毎秒当り土量は積込開始から終了までの平均をとったものである。ポンプ濃度はなるべく高範囲にとるため5%~30%近くまでを目標にしたが、予定どおりの値に抑えることができた。なお濃度は真比重で、毎秒当り土量、最終積込土量は見掛比重で計算したものを記した。積込開始から終了までの時間 $t$ 、最終的積込土量とホッパー容積の比 $G_H/V$ 、および毎秒当り平均ホッパー積込土量 $\bar{g}_H$ 、ならびに後述するように満載までの平均積込効率の結果も表—3に示す。

### § 5. 実験結果の考察

#### 5-1 常流ホッパーの積込効率

長方形断面で常流式のホッパーについて考える。すなわち流体は水平に流れ、その水平流速 $U_H$ はホッパー内どこでも一定であり、渦乱や偏流はないものとする。また流入砂粒子はホッパー底部に達したとき沈澱したものとし、一度沈澱したものは再飛散しないものとする。また供給土砂は一ヶ所に集中して落下するものではなく、図—8に示すようにホッパー長さ方向を $x$ 軸にとれば、単位時間、単位巾、単位長さ当りの供給土砂量 $g_0' = f(x)$ と表わされる分布で落下するものとする。



図—8 供給土砂落下分布図

したがって単位巾、単位時間当りの供給土量は

$$g_0' = \int_0^L f(x) dx \dots \dots \dots (5-1)$$

また図—8のように粒子が点線で示す軌跡を画いて落下するものとし、オーバーフロー位置から距離 $x$ にある粒子は前の仮定よりオーバーフロー位置に到達する間に底部に沈澱するものとするれば、次の関係式が成立する。

$$\frac{H}{V_s} = \frac{x}{U_H} \dots \dots \dots (5-2)$$

(5-2)式を変形すれば

$$V_s = \frac{H}{x} U_H = \frac{H}{x} \frac{Q}{BH} = \frac{L}{x}$$

$$\frac{Q}{BL} = \frac{L}{x} \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (5-2)'$$

- ここに  $V_s$  : 粒子の沈降速度
- $U_H$  : ホッパー内流速
- $Q$  : ポンプ容量
- $A$  : ホッパー水平面積 =  $BL$

一方粒子の沈降速度は

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d} \dots \dots (5-3)$$

- ここに  $\rho_s$  : 粒子の密度
- $\rho_w$  : 流体の密度
- $C_D$  : 抵抗係数
- $d$  : 粒径
- $g$  : 重力の加速度 =  $980 \text{ cm/sec}^2$

(5-3)式と(5-2)'式から限界粒径 $d_c$ は

$$d_c = \frac{3}{4} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \frac{C_D}{g} \left( \frac{L}{x} \frac{Q}{A} \right)^2 \dots \dots \dots (5-4)$$

上式から限界粒径は水深 $H$ に無関係に決定される。

また粒子の粒度組成を沈降速度別に図—9のように与えた場合、前の仮定より(5-2)'式で与えられる沈降速度 $V_s$ 以下の粒子が流出するものとするれば、 $V_s$ 以下の粒子の割合を $P$ として考えると、 $P$ は $V_s$ の関数として表わされる。

$$P = F(V_s) = F\left(\frac{L}{x} \frac{Q}{A}\right) \dots (5-5)$$

このことから、 $x$ 位置における微小供給土砂 $f(x)dx$ に対するオーバーフロー土砂量は $P f(x)dx$ であるから、単位巾、単位時間当りのオーバーフロー土量は

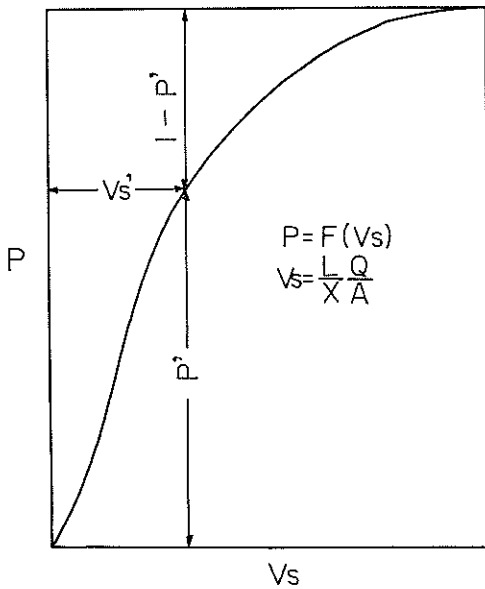


図-9 沈降速度別粒度組成

$$g_o = \int_0^L P f(x) dx$$

$$= \int_0^L F\left(\frac{L}{x} - \frac{Q}{A}\right) f(x) dx \quad \dots\dots (5-6)$$

ここに  $g_o$  : 単位巾, 単位時間当りオーバーフロー土量

以上のことから供給土砂量とオーバーフロー土量は説明できた。ここで積込効率を求めるのであるが、積込率は供給土砂量に対する積込土量の比でもって表わされる。

すなわち積込効率  $\eta$  は

$$\eta = \frac{g_H}{g_p} = \frac{g_p - g_o}{g_p}$$

$$= 1 - \frac{g_o}{g_p} \quad \dots\dots (5-7)$$

ここに  $g_H$  : 単位巾, 単位時間当りホッパー積込土量

(5-1) 式と (5-6) 式から

$$\eta = 1 - \frac{\int_0^L F\left(\frac{L}{x} - \frac{Q}{A}\right) f(x) dx}{\int_0^L f(x) dx} \quad \dots\dots (5-8)$$

供給土砂落下分布を求めることにより (5-8) 式から図積分して積込効率を求めることができる。

ここで  $f(x) = g_p' = \text{一定}$  として考えると

$$\eta = 1 - \frac{\int_0^L F\left(\frac{L}{x} - \frac{Q}{A}\right) dx}{L} \quad \dots\dots (5-9)$$

上式より積込効率を良くするには  $Q/A$  を小さくするか、あるいは  $L/x$  を小さくするのも考えられるが、これは  $L/x$  の最小値は 1 であり、この値を小さくするよりもむしろホッパー長さ  $L$  を大にすればよい。

次に考え方を単純化するため、供給土砂落下分布の平均位置を求め、全体の土砂量はその位置に集中して落下すると考える。落下平均位置  $l$  は落下分布図の重心にあたりとすれば

$$l = \frac{\int_0^L x f(x) dx}{\int_0^L f(x) dx} \quad \dots\dots (5-10)$$

(5-5) 式と (5-10) 式から

$$P = F\left(\frac{L}{l} - \frac{Q}{A}\right) \quad \dots\dots (5-5)'$$

ゆえに積込率は

$$\eta = 1 - P = 1 - F\left(\frac{L}{l} - \frac{Q}{A}\right)$$

$$= 1 - F\left\{\frac{\int_0^L f(x) dx}{\int_0^L x f(x) dx} L\left(\frac{Q}{A}\right)\right\} \quad \dots\dots (5-11)$$

ここで  $f(x) = g_p' = \text{一定}$  とすれば

$$\eta = 1 - F\left(2 - \frac{Q}{A}\right) \quad \dots\dots (5-12)$$

(5-12) 式は (5-9) 式を一ヶ所に集中する場合と  
 考えて  $x=L/2$  としたときも導かれる。

一般に  $L/l = 1/m$  と表わして次の式によって代表さ  
 れる。

$$\eta = 1 - F \left( \frac{1}{m} - \frac{Q}{A} \right) \dots\dots\dots (5-13)$$

上式における  $m$  は、オーバーフロー位置からホッパ  
 ー長さ  $L$  の  $m\%$  の位置に落することを意味する。

今回の実験においては、 $1/m \approx 1.5$  であるから、図  
 一2の粒度組成を基にして (5-13) 式で計算すれば表  
 一4のようになる。表一4による実測値は満載までの平  
 均積込効率を採用した。ただし平均積込効率は後述する  
 ように積込開始から終了までの積込効率の平均である。  
 この平均積込効率を採用した理由は、(5-13) 式から  
 解るように、水深  $H$  に無関係に効率が決定してしまうの  
 で、積込開始から満載までの積込効率は等しいものとし  
 たためである。(5-13) 式で計算した値はかなりの大  
 きめに表われることが表一4で明らかであるが、実際の  
 流動は渦乱や偏流等のため、かなり複雑であり、また積  
 載土砂面上昇によって積込効率は大きく変動するもの

表一4 実測値と計算値

ホッパーの 種 類	バルブ開度	計 算 値 $\eta$ %	実 測 値 $\eta_m$ %
大	全 開	76	42.1
	4 回絞り	98	69.4
中	全 開	75	58.3
	4 回絞り	81	64.9
小	全 開	55	51.3
	4 回絞り	68	53.9

であるから実測値の小さいのは当然であろう。しかし一  
 般に流量の少い4回絞りが計算値、実測側とも積込効率  
 は良好でなる。

なお、実船と模型ホッパーにおける  $Q/A$  を表一5に  
 示す。模型ホッパーはバルブ全開の時の値である。

5-2 濃 度 分 布

ホッパー内濃度分布を知るには一瞬数ヶ所の濃度を測  
 定する必要があり、さらには適度な濃度測定器が見あた  
 らない等の理由から、計測するのは困難で、このために

表一5 実船と模型ホッパーの  $Q/A$  の比較

	船名およびホッ パー種類	ホッパー水平面 積 $A$ $m^2$	ポンプ容量 $Q$ $m^3/min$	$Q/A$		ホッパ ー容積 $m^3$
				$m/sec$	$ft/min$	
実	ESSAYONS	931	453	0.0080	1.6	6,275
	COMBER	339	349	0.0173	3.4	2,690
	MACKENZIE	194	150	0.01297	2.55	1,265
	LYMAN	125	89	0.01167	2.3	703
	PACIFIC	87	72.2	0.01373	2.7	382
船	海 竜 丸	360	136.5	0.00632	1.245	1,702
	海 鵬 丸	297	167	0.00938	1.85	2,050
	海 麟 丸	237	100	0.00703	1.384	1,300
	大 山 丸	91.2	75	0.01373	2.7	388
模 ホ ッ パ ー 型	大	0.23	0.246	0.0178	3.5	0.0965
	中	0.182	0.246	0.0225	4.42	0.0765
	小	0.131	0.246	0.0313	6.15	0.0550

開水路の濃度分布式を使用して考える。しかし開水路と違い攪乱が大きいので、砂の場合でもかなり平均化された濃度分布を示すと思われる。開水路の濃度分布基礎方程式は(文献-3)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(CU) + \frac{\partial}{\partial y}(CV) + \frac{\partial}{\partial z}(CW) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + V_s \frac{\partial c}{\partial z} \dots \dots \dots (5-14)$$

ここに U, V, W : それぞれ x, y, z 方向の流速成分  
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  : それぞれ x, y, z 方向の渦動拡散係数  
 C : 濃度

流れの方向に x 軸をとり、等流の場合を考えると  $V = W = 0$  であるから

$$\frac{d}{dz} \left( \epsilon_z \frac{dc}{dz} \right) + V_s \frac{dc}{dz} = 0 \dots \dots (5-15)$$

$z = 0$  のとき  $C = C_0$ ,  $\epsilon_z = \text{一定}$  として、さらには落下土砂のために起る乱れの干渉と底面の粗度のために、渦動拡散係数は相当一様に近いと考えて  $\epsilon_z$  を次の式で表わす。

すなわち Rouse は  $\epsilon_z$  として運動量の渦動粘性係数  $\epsilon$  を用いた。

$$\epsilon = V_* k z \left( 1 - \frac{z}{H} \right) \dots \dots \dots (5-16)$$

(5-16) 式の平均をとると

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^H V_* k z \left( 1 - \frac{z}{H} \right) dz}{H} = \frac{1}{6} k V_* H \dots \dots \dots (5-17)$$

ここに k : Karman 常数  
 $V_*$  : 摩擦速度 2 次元等流では  
 $V_* = U_{it} \sqrt{f'/2}$   
 $f'$  : 摩擦係数

いま上式を  $\epsilon = \beta k V_* H$  とおいて (5-15) 式を解くと Ismail の実験によく適合している式として (5-18) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{C}{C_0} &= e^{-Z\epsilon} \\ Z &= \frac{V_s}{\beta k V_*} \\ \epsilon &= \frac{z}{H} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5-18)$$

ここに  $C_0$  : 底面濃度  
 $\beta$  : 常数

底面附近の濃度計測は困難であるが、ホッパーの場合はポンプから混合土砂水が供給されるため、浮遊断面平均濃度がポンプ濃度  $C_p$  に等しいと仮定すれば

$$C_p = \bar{C} = \int_0^1 C_0 e^{-Z\epsilon} d\epsilon \dots \dots \dots (5-19)$$

ここに  $C_p$  : ポンプ濃度  
 $\bar{C}$  : 断面平均濃度

(5-19) 式から  $C_0$  は

$$C_0 = \frac{Z C_p}{1 - e^{-Z}} \dots \dots \dots (5-20)$$

(5-20) 式から底面濃度はポンプ濃度に比例することになる。よって

$$\frac{C}{C_p} = \frac{Z}{1 - e^{-Z}} e^{-Z\epsilon} \dots \dots \dots (5-21)$$

(5-21) 式からポンプ濃度が解れば濃度分布を計算できるが、実際にはホッパー長さ L 方向に流下する間に土砂が沈澱堆積してゆく管であるから、L 方向の濃度分布は一樣ではない。しかし距離によって濃度分布が変化することは、計算上非常に難かしくなるので、ここでは各断面の濃度分布は一樣であるとして (5-21) 式を用いることにした。

### 5-3 積込効率

ホッパー積込みの一番大きな問題は、オーバーフロー土量を如何に少くするかということである。この舷外に無駄に捨てられる土量は静止装置を取付ける事によりある程度減少させることができるが、この量を零にすることはオーバーフローさせる限り無理である。そこでオーバーフロー土量を求めるにあたって図-10のように簡易化し、水深 H なる断面からオーバーフロー水厚 h に分布している土砂がオーバーフローすると考える。

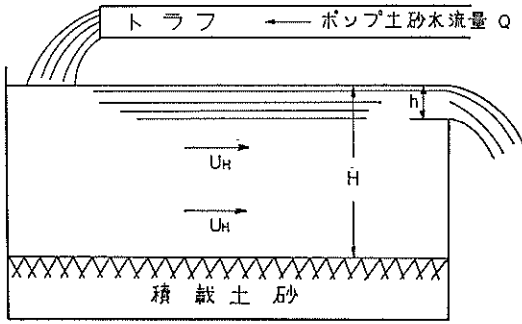


図-10 理想的ホッパーの流動

単位巾, 単位時間当りオーバーフロー土量は

$$g_o = \int_{H-h}^H C U_{nz} dz \quad \dots\dots\dots (5-22)$$

ここでホッパー内流速は, 攪乱が大きいため上下流が激しく, 速度分布を考慮する必要はないと考えて平均流速  $\bar{U}_{II}$  を用いる。  $h/H = \xi h$  と表わして無次元表示をすると

$$g_o = \int_{1-\xi h}^1 C_p \bar{U}_{II} H \frac{Z}{1-e^{-Z}} e^{-Z\xi} d\xi$$

積分すると

$$g_o = \frac{g_p \left\{ e^{-Z(1-\xi h)} - e^{-Z} \right\}}{1-e^{-Z}} \quad \dots\dots\dots (5-23)$$

$$g_p = C_p \bar{U}_{II} H \quad \dots\dots\dots (5-24)$$

上式における水深  $H$  は積載土量の増加と共に減少するものであるが, いま任意の時刻においてホッパー内土量を  $V_a$ , オーバーフローレベル上に盛り上った部分の容積を  $V_o$  ( $BLh$ ) とすれば次の式から計算することができる。

$$H = \frac{V + V_o - V_a}{A} \quad \dots\dots\dots (5-25)$$

また (5-24) 式における  $e^{-Z}$  の値は, 沈降速度大なるとき, 一般に砂の場合においてもこの値を無視できる程度に小さい。(今回の実験で使用した砂の場合は平均して  $Z$  の値は 5 である) 以上のことから (5-24) 式は次のように簡略化される。

$$\frac{g_o}{g_p} = e^{-Z(1-\xi h)} \quad \dots\dots\dots (5-26)$$

ここで  $Z(1-\xi h)$  は次の式で表わせる。

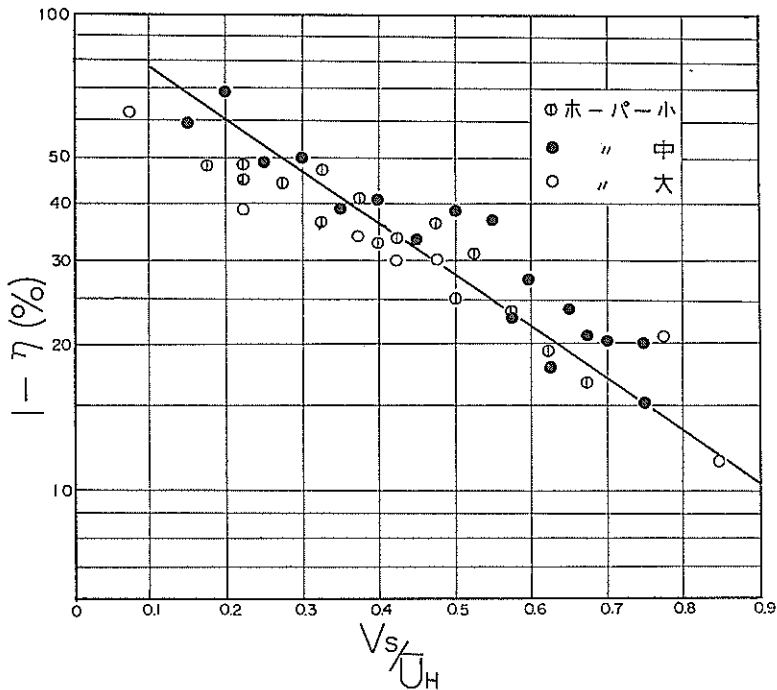


図-11-1 1-η と  $V_s/U_{II}$  の関係  
 静止装置付バルブ全開  
 直線は  $\alpha=2.5$  で計算した。

$$Z(1-\xi h) = \frac{V_s}{\beta k V_*} (1-\xi h) \quad \dots\dots\dots (5-27)$$

これに  $V_* = \bar{U}_H \sqrt{f'/2}$  を代入して整理すると

$$Z(1-\xi h) = \frac{1}{\beta k} \sqrt{\frac{2}{f'}} (1-\xi h) \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right) \quad \dots\dots\dots (5-28)$$

(5-28) 式の係数を一つにとりまとめ  $\alpha$  で表わすと  
(5-26) 式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{g_o}{g_p} &= e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)} \\ \alpha &= \frac{\delta}{\beta k} \sqrt{\frac{2}{f'}} (1-\xi h) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5-29)$$

ここに  $\delta$ : オーバーフローによる粒子の吸上げ係数

(5-29) 式で表わされた  $g_o/g_p$  は積込効率に対して流出率といえるものである。またこの式における  $\alpha$  なる係数は、オーバーフローによる粒子の吸上げをも考慮したもので、 $\delta$  なる係数で示した。以上の式から積込効率は

$$\eta = 1 - \frac{g_o}{g_p} = 1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)} \quad \dots\dots\dots (5-30)$$

結局積込効率は沈降速度  $V_s$  と水平流速  $\bar{U}_H$  との比によって決定され、ホッパー長さには無関係であることを示している。しかしこれは各断面濃度を一定としたため、5-2項で述べたように実際にはL方向の土砂の堆積により濃度は変るものと思われるので、 $\alpha$  はホッパー長さの大小により多少異なった値をとるものと思われる。

また  $\bar{U}_H$  は積込土砂が増加すれば、それに伴う水深Hの減少により当然増加するわけで、言い換えれば積込効率は水深Hに大きく左右されることになる。これは(5-13)式と比較すれば大分趣きの異なるものであることが判る。

また  $e^{-Z}$  が無視できぬ場合、すなわち  $V_s$  が微粒子の場合積込効率は

$$\eta = 1 - \frac{e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)} - e^{-Z}}{1 - e^{-Z}} \quad \dots\dots\dots (5-31)$$

さて実験値を(5-30)式と比較するため、(5-30)

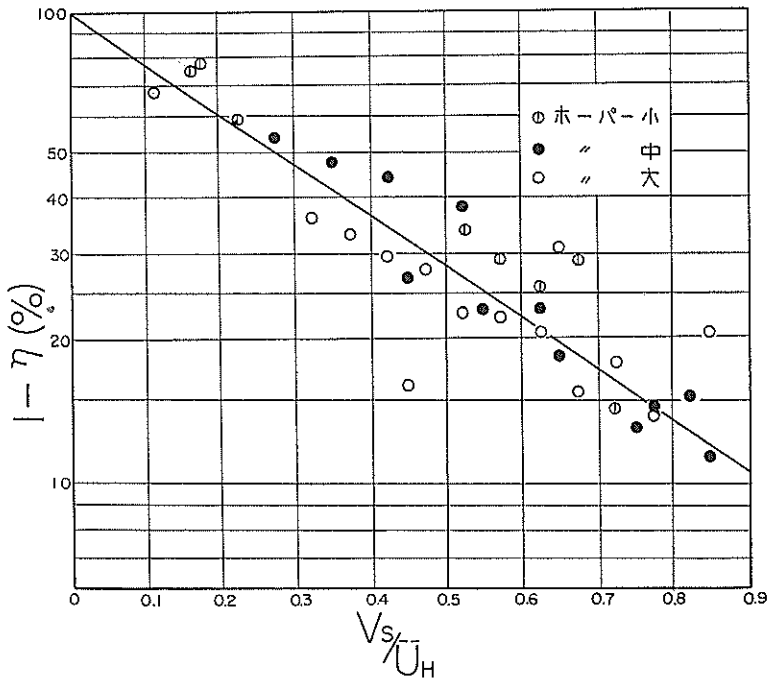


図-11-2 1- $\eta$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係  
静止装置付バルブ4回絞り  
直線は  $\alpha=2.5$  で計算した

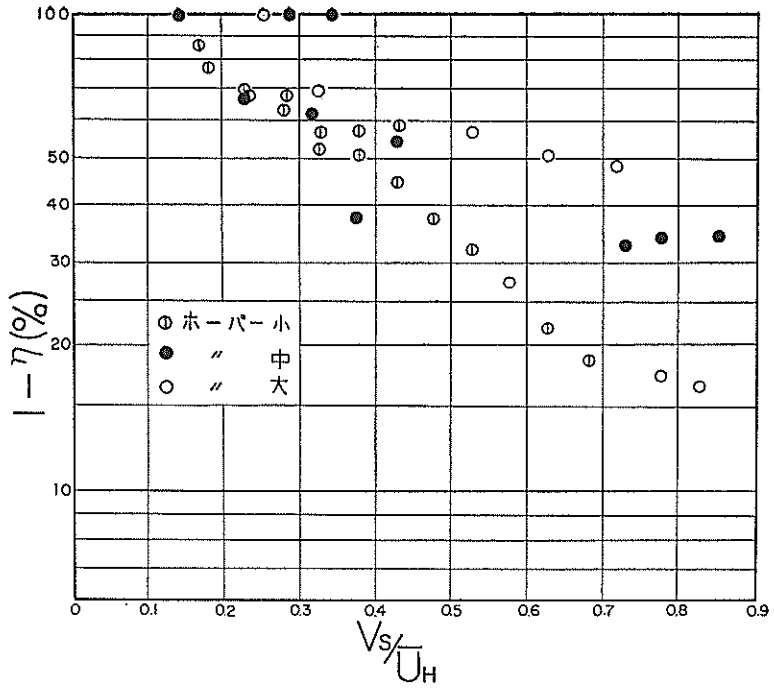


図-11-3  $1-\eta$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係  
 静止装置無バルブ全開

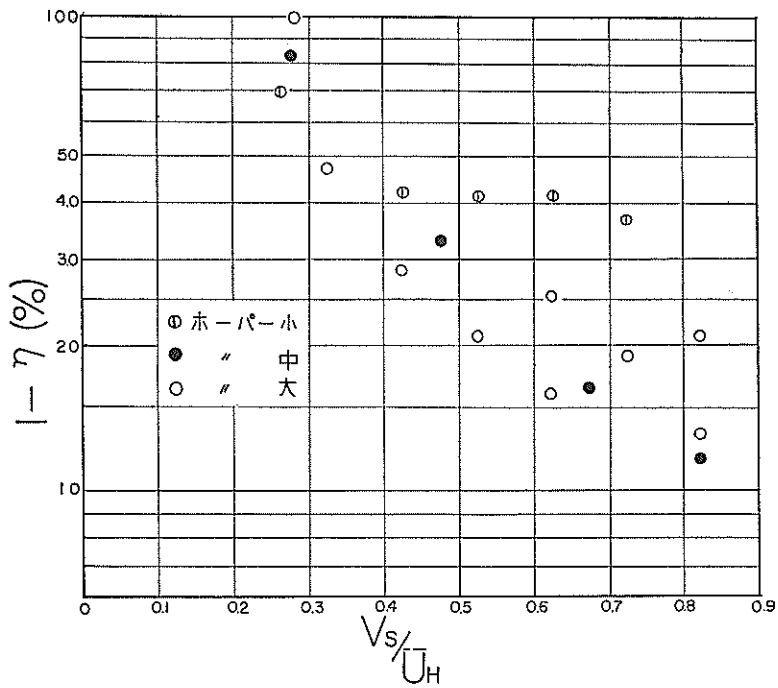


図-11-4  $1-\eta$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係  
 静止装置無バルブ4回絞り

式を次のように変形する

$$1-\eta = e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)} \dots\dots\dots (5-30)'$$

(5-30)' 式から  $1-\eta$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係を図示すると図-11-1~11-4 のようになる。図-11-1~2 は静止装置を取り付けた場合であるが、 $1-\eta$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係は略々直線的傾向を示し、バルブ全開、バルブ4回絞りについて  $\alpha$  を求めるとホッパーの大きさには無関係に  $\alpha \approx 2.5$  となる。ここで  $\alpha$  が一定となることは、オーバーフローによる粒子の吸い上げ係数  $\delta$  が (5-28) 式の (1-fh) に反比例する大きさとなるためであろう。

次に図-11-3~4 は静止装置を取り付けない場合であるが、ここにおける  $H$  も (5-25) 式で計算した。ところが図-7-2 で判るように最初から大きな積込土砂の勾配ができるために (5-25) 式で計算される平均水深  $H$  を用いることは少し無理があると思われる。以上のことから測定値がかなり散乱しており、判断し難いが、大体直線傾向を示している。また  $\alpha$  を 2.5 に近似させると丁度図-11-1~2 を平行移動させたようになり注目に値する。なおこの図で  $V_s/\bar{U}_H = 0.2$  附近で  $(1-\eta)$  が 100% になること (すなわち全て流出する) は満載前に

飽和状態に達することを示すものである。

この関係をさらに実船と比較するため文献(4)および(5)から海鵬丸、海麟丸についても同様に計算してみた。この時の粒径加積曲線を図-12に示す。

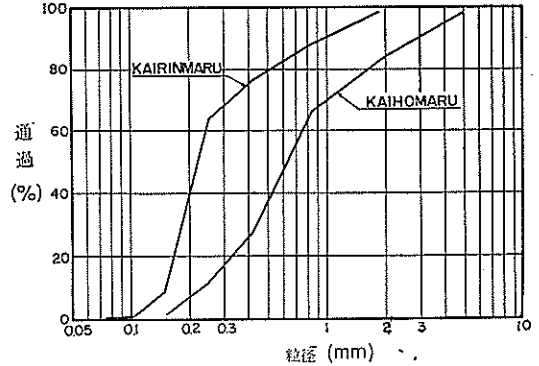


図-12 粒径加積曲線

なお海鵬丸の土砂粒子は貝殻が多いため40%粒径の沈降速度を採用した。以上のことから同様に  $(1-\eta)$  と  $V_s/\bar{U}_H$  の関係を図示すると図-13になる。この図も同様に略々  $\alpha \approx 2.5$  で整理されることが判った。ここで  $V_s/\bar{U}_H$

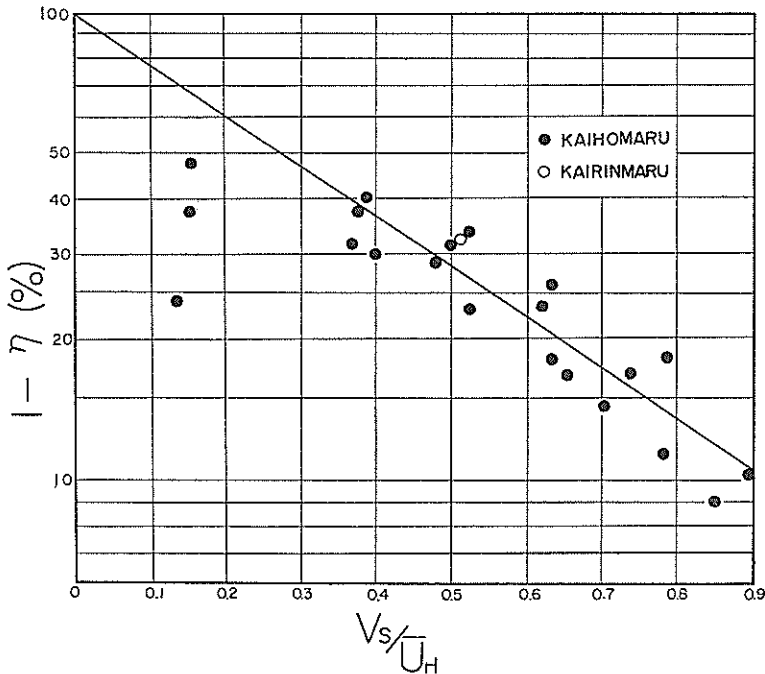


図-13  $1-\eta$  と  $U_s/\bar{U}_H$  の関係  
実船の場合  
直線は  $\alpha = 2.5$  で計算した。



=0.15附近で大きく直線より下廻った値を示したが、この附近では積込土砂の山ができ、流れを遮るため積込効率が一時的に上昇すると考えられる。この傾向は模型試験でも同様であるが、実船のように顕著ではない。

以上のように静止装置を取り付けた場合は実船と同様に整理されるが、取り付けない場合は  $V_s/\bar{U}_H$  で整理するのは誤差が大きくなると思われる。しかし次の式に書き換えることにより全てを代表させることができる。

$$\eta = 1 - ne^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)} \dots \dots \dots (5-32)$$

ここに n : 係数

次に軟泥（微粒子）の場合を考える。「軟泥をホッパーに積込む場合はオーバーフロー後の積込量の増加をあまり望めないことから、オーバーフローするまでに如何に高含泥率の泥水を吸込かが問題である」とは文献(5)に述べてあるが、実際にはオーバーフロー後でも若干の積込量の増加は考えられるから、ここでは敢えてオーバーフロー後の状態の解析を試みてみよう。

軟泥の場合は  $e^{-z}$  が無視できないので (5-31) 式で整理される。合田氏は浮遊流砂を取扱うにあたり、いわゆる「砂」と「泥」とを或程度区別して論ずる必要があり、すなわち  $V_s/\varepsilon=3.0$  を境にして、それより  $V_s/\varepsilon$  が小になると、流砂量が急増することを示している。

(文献-7)

結局この値を境にして (5-30) 式か、(5-31) 式によるかに別けられる。また軟泥の場合は粒子の沈降速度による整理が難しい。何故ならば濃度による沈降の干渉、あるいは粒子同志の凝集現象が著しいために、実際の沈降速度はつかみ難い。濃度による干渉沈降速度は H. H. Steinour によれば次の式で表わされる。(文献-8) 粒子群の沈降速度  $V_s'$  は

$$V_s' = V_s (1 - C_H)^2 10^{-1.82C_H} \dots \dots \dots (5-33)$$

ここに  $C_H$  : ホッパー内濃度

さて我々は  $(1-\eta)$  と  $V_s'/\bar{U}_H$  の関係を求めたいのであるが、軟泥の沈降速度  $V_s$  が未測定なとき、一般的な傾向だけを考えるならば、 $V_s$ —一定として  $V_s'$  の代わりに  $(1 - C_H)^2 10^{-1.82C_H}$ 、 $\bar{U}_H$  の代わりに  $Q$  をとって差し支えない。何故ならば積込開始から積込終了まで粒子の堆積は考えられず、ただホッパー濃度を増すだけであると推測されるからである。以上のことから、海鷗丸の実船試験を例にとって  $(1-\eta)$  と  $\{(1 - C_H)^2 10^{-1.82C_H}\} / Q$  の関係を図示すると図-14になる。図-14で示す実線は  $V_s = 0.003m/sec$  を与えて、(5-31) 式で整理したものである。この図で次のことが推察

される。(5-31) 式で計算した結果は  $\{(1 - C_H)^2 10^{-1.82C_H}\} / Q$  の値がある範囲に達するまで flat であることから、オーバーフロー開始後の積込効率は、あるホッパー濃度までは一定であるが、その濃度よりも大きくなった場合は積込効率は零に近づく傾向がある。なお実測値は大分積込効率が良いが、この軟泥は凝集し易い粒子のため積込効率が上昇したためと思われる。海鷗丸の実船試験を例にとれば、ほとんどオーバーフロー後の積込土量は零であるが、これは粒子の沈降速度も小さいためと、凝集し難い粒子のため積込効率が上昇しないものと思われる。

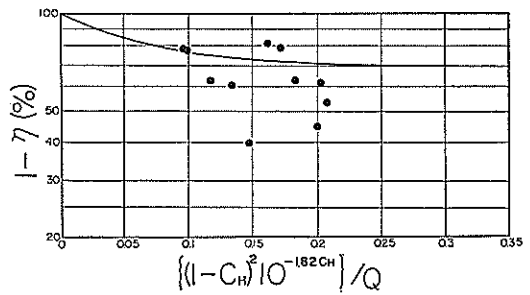


図-14  $1-\eta$  と  $\{(1 - C_H)^2 10^{-1.82C_H}\} / Q$  の関係

#### 5-4 平均積込効率

前記の積込効率は微少時間におけるもので、すなわち瞬時の積込効率であるが、実際の浚渫作業中にこの積込効率を知ることは困難で、浚渫作業後における荷重曲線の解析により求められる。しかし荷重曲線の拡大率の小さい場合、たとえば記録紙に表われる荷重変化が、狭い記録紙のため小さな変位にしか表われない場合は、この解析した値の誤差は大きくなる。

このため比較的簡単に、正確に求めることのできる平均積込効率が工事担当者が知りたいものの一つとしてあげられる。平均積込効率は瞬時の積込効率に対し、全体の積込効率と云えるもので、積込開始から終了までホッパーに積込まれた土量を  $G_H$  とすれば

$$\eta_m = \frac{G_H}{G_p} = \frac{G_H}{g_p B t} \dots \dots \dots (5-34)$$

ここに  $G_p$  : 積込開始から終了までの総供給土量

$t$  : 積込開始から終了までの積込時間

上式で表わされる  $\eta_m$  が平均積込効率といえるもので、単に積込んだ全体のホッパー土量とその時間までに供給



降速度，ホッパー内水深に反比例する。また  $Q/BH_0 = U_{H_0}$  を一定とすれば粒子の沈降速度が小さい時は  $\eta_m$  は小，大きい時は  $\eta_m$  は大になる。なお(5-40)式を使用する場合は次の点に注意せねばならない。すなわち  $Q/(\alpha BV_s H_0)$  が1に近づくに従い  $\eta_m$  は小さくなるが，ここで  $Q/(\alpha BV_s H_0) = 1$  になった時は勿論  $\eta_m = 0$  となり，全然ホッパーに積込めない状態である。しかし  $Q/(\alpha BU_s H_0) = 1$ ，すなわち  $Q = \alpha BV_s H_0$  の時が  $\eta_m = 0$  になることは，海鷗丸を例にとって計算すれば粒径 0.1 mm，(約沈降速度で 0.01m/sec) のとき  $Q = 6740 \text{ m}^3/\text{h}$  となるが，実際にこの流量ではホッパーに全然積込まれ

ないことはありえないことで，このような時には

$e - \alpha \left( \frac{V_s}{U_{H_0}} \right)$  を無視できない場合であるため，一応は  $e - \alpha \left( \frac{V_s}{U_{H_0}} \right)$  を計算して無視できるか，できないか確かめるべきである。

次に(5-39)式に  $\alpha = 2.5$  を代入して計算した値と，実測値とを比較すれば図-16になる。  $H_0 = H_0'$  でない時は補正を施して計算したものである。しかし実船の場合には(5-3)項で図-13について述べた理由により平均積込効率を計算値を上廻ることは明らかである。

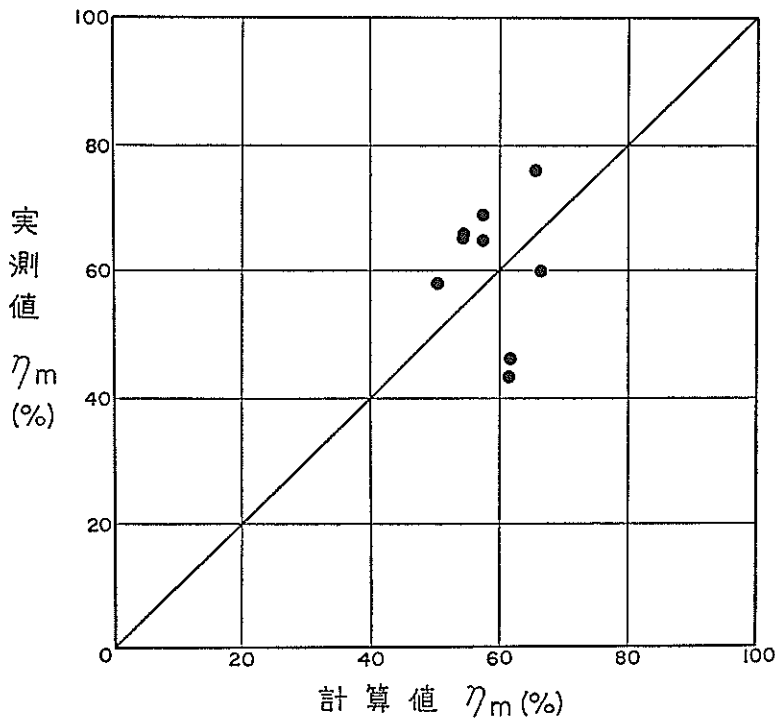


図-16 平均積込効率  
(実測値と計算値の比較)

### 5-5 積込時間

(5-39)式および(5-40)式により平均積込効率と水深Hの関係，また(5-30)式により水深Hによる積込効率を計算できることが判明したが，積込時間tの要素は入っていない。実際には水深Hを測定することは，積載土砂面が上昇するため困難で，水深Hの代わりに積込時間tで表せば，文献(4)のエコノミックローディングを考える上にも，また浚渫工事にも好都合である。平均積込効率，積込効率とHの関係を積込時間tとの関

係に置き換えるには水深Hと積込時間tとの関係を求めればよい。この関係はポンプ濃度に大きく左右されるが，一般に積込時間はなるべく少ないのが望ましく，そのためにはポンプ濃度を高めることにより，著しく減少させることができる。またポンプ容量を加減することによっても減少させることもできる。

ここで積込時間を求めるには，平均積込効率でも同様であるが，積込土砂が堆積される場合だけを考えるもので，軟泥のように浮遊状態のものは考えないことにす

る。積込状態を図-17のように模型化すると、dt 時間における水深の減少量は  $dH$  と考えられるから

$$Bg_H dt = AdH \dots\dots\dots (5-41)$$

ここに  $g_H$  : 単位巾、単位時間当りホッパー積込土量

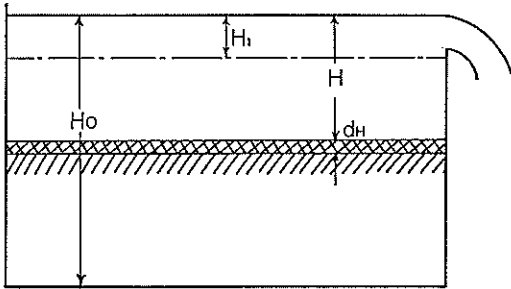


図-17 ホッパー積込図

また  $g_H = \eta g_p$  であるから

$$dt = \frac{L}{g_p} \frac{dH}{\eta} \dots\dots\dots (5-42)$$

いま  $H_0$  から  $H_1$  までの積込時間を求めれば

$$t = - \int_{H_0}^{H_1} \frac{L}{g_p} \frac{dH}{\eta} \dots\dots\dots (5-43)$$

ここで  $\eta = 1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)}$ ,  $\bar{U}_H = Q/BH$  および

$g_p = \text{一定}$  とすると (5-43) 式は

$$t = - \frac{L}{g_p} \int_{H_0}^{H_1} \frac{dH}{1 - \exp \left( - \frac{\alpha B H V_s}{Q} \right)} \dots\dots\dots (5-44)$$

(5-44) 式を積分すれば

$$t = \frac{L}{g_p} \left\{ H_0 - H_1 - \frac{Q}{\alpha B V_s} \ln \right.$$

$$\left. \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_{H_1}} \right)}}{1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_{H_0}} \right)}} \right\} \dots\dots\dots (5-45)$$

オーバーフロー土量が零のとき、積込時間は

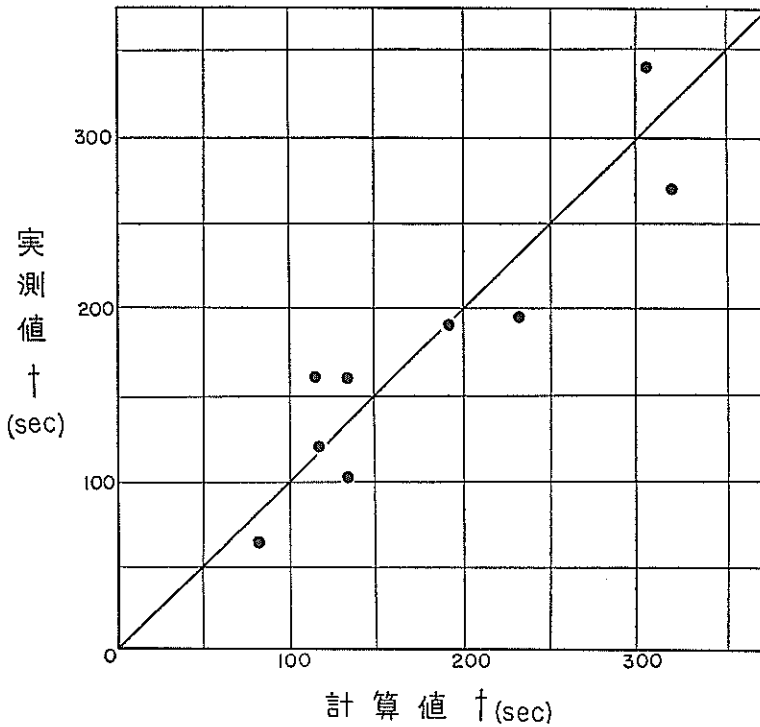


図-18 積込時間 (実測値と計算値の比較)

$$t = \frac{L}{g_p} (H_0 - H_1)$$

で表わされるが、(5-45)式で  $H_0 - H_1$  以降の項は丁度水深が増加したと同様な傾向となるため(5-45)式を書き換えて

$$t = \frac{L}{g_p} (H_0 - H_1 + H_{eq})$$

$$H_{eq} = -\frac{Q}{\alpha B V_s} \ln \left\{ \frac{1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{U_{H1}} \right)}}{1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{U_{H0}} \right)}} \right\}$$

..... (5-46)

さらに(5-40)式と同様に  $e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{U_{H0}} \right)} \approx 0$  とすると(5-46)式において  $H_{eq}$  は

$$H_{eq} = -\frac{Q}{\alpha B U_s} \ln \left\{ 1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{U_{H1}} \right)} \right\}$$

..... (5-47)

次に満載までの積込時間を求めることにする。 $H_1 = 0$  をもって満載とすれば積込時間は無限大になる。そのた

めオーバーフロー厚さ  $h$  までで満載されるものとすれば、満載までの積込時間は

$$\left. \begin{aligned} t &= \frac{L}{g_p} (H_0 - h + H_{eq}) \\ H_{eq} &= -\frac{Q}{\alpha B V_s} \ln \eta h \end{aligned} \right\} \dots\dots (5-48)$$

$$\text{ここに } \eta h = 1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{U_n} \right)}$$

(5-48)式に  $\alpha = 2.5$  を代入して計算した値と実測値を比較すれば図-18のようになり、かなり良く一致している。ここで  $g_p$  は積込開始から終了までの平均をとった。

以上のことから単にオーバーフロー厚さ  $h$  における  $H_{eq}$  を求めれば(5-48)式から簡単に満載までの積込時間を求めることができる。

### 5-6 ポンプ容量

ホッパーの大きさとポンプ容量の関係を決定する方法は色々あるものと思われる。たとえばアメリカ工兵隊によるものとして、浚渫ポンプ容量とホッパー水平面積の関係は  $1 \text{ ft}^2$  のホッパーの水平面積に対し、 $2.5 \text{ ft}^3/\text{min}$  のポンプ容量が適当だといわれている。

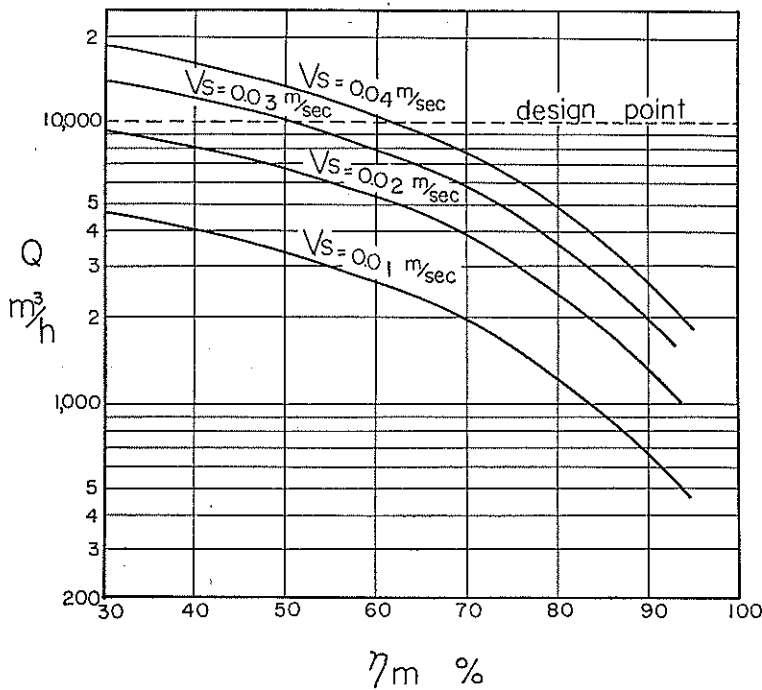


図-19 海鰐丸における  $Q$  と  $\eta_m$ ,  $V_s$  の関係

我々はこの関係を決定するものとして、略々次の三つの考え方に大別した。

- 1) 満載までの平均積込効率をある値に抑えてポンプ容量を決定する方法
- 2) ホッパーに最少の時間で積込みを行うポンプ容量
- 3) 船全体の経済性を併せ考慮してポンプ容量を決定する方法

以上考えられる三方法のうち、最終的には(3)の方法で行うのが当然と考えられるが、ここでポンプ容量の求め方については深く言及しない。すなわち3)項については解析しない。

最初に1)について考えると(5-40)式から

$$Q = \alpha (1 - \eta_m) V_s B H \sigma \dots\dots\dots (5-40)'$$

上式からポンプ容量Qは平均積込効率  $\eta_m$  が分れば簡単に求めることができる。この関係を海鵬丸を例にとって計算すれば図-19のようになる。

図-19は沈降速度別にポンプ容量と平均積込効率を示したものである。また海鵬丸の設計ポンプ容量は  $10,000\text{m}^3/\text{h}$  であるが、この大きさにおける沈降速度別の平均積込効率は  $V_s=0.04\text{m}/\text{sec}$  で  $\eta_m=62\%$ 、 $V_s=0.03\text{m}/\text{sec}$  で  $\eta_m=50\%$ 、 $V_s=0.02\text{m}/\text{sec}$  では  $\eta_m=25\%$  程度になる。このように粒径が広く変化する場合にはポンプ容量の大きさを決定する時、単に  $\eta_m$  を与えてポン

プ容量を決定することは難しくなる。これがその土質専用のドラグサクシヨン後漕船ならば、このような不都合は生じない。しかし実際に土質が広い範囲にわたって変わるとき、ある土質の沈降速度を基礎として設計することになるが、ではその土質はどのように決定するか、あるいは  $\eta_m$  を何%に抑えたら良いかは3)項を加味して決定すべきものである。平均積込効率  $\eta_m$  はなるべく高いのが望ましいが、種々の制限を受けたり、積込時間の関係

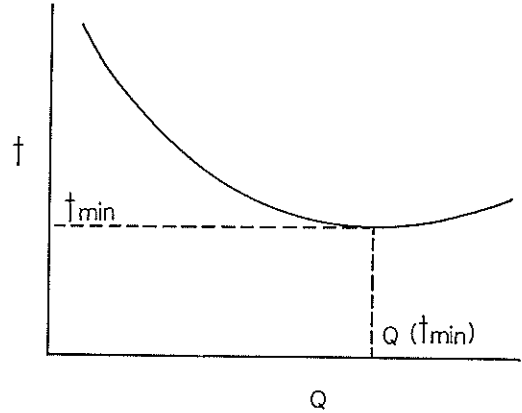


図-20 t と Q の関係

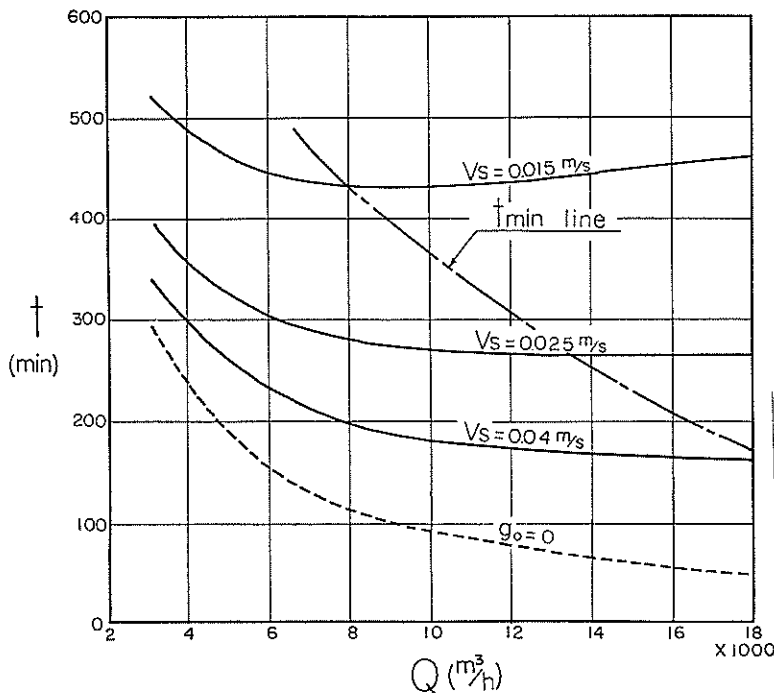


図-21 海鵬丸の積込時間と流量の関係

から何%に抑えるかが決るものである。

しかし実船の平均積込効率  $\eta_m$  は計算値を上廻ることが考えられるので  $\eta_m=60\sim 70\%$  にすれば、 $\alpha=2.5$  から

$$Q = (0.75 \sim 1.0) V_s B H_o \dots\dots\dots (5-49)$$

(5-49) 式の中間をとり、 $Q/BH_o = \bar{U}_{H_o}$  と表わすと  

$$\bar{U}_{H_o} = 0.85 V_s \dots\dots\dots (5-50)$$

(5-50) 式のような簡単な式でもって表わされ、最初の水深  $H_o$  によるホッパー内水平流速は沈降速度  $V_s$  の85%の大きさでよいことが分る。

次に2)項について考察する。ここで満載までの時間  $t$  の最小値を与えるポンプ容量を求めてみよう。一般に  $t$  と  $Q$  の関係を示すと図-20のようになる。また(5-48)式から海鵬丸を例にとって計算すれば図-21のようになる。図-20, 21から、ある程度流量が増せば積込時間は減少するが、それ以上の流量になると積込時間は、かえって増加する。この傾向は沈降速度の小さい粒子ほど顕著である。

いま  $B_{gp} = C_q Q$  と表わして(5-48)式を  $Q$  について微分する。

$$\frac{\partial t}{\partial Q} = -(H_o - h) + h \frac{e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}h} \right)}}{1 - e^{-\alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}h} \right)}} = 0 \dots\dots\dots (5-51)$$

(5-51) 式から

$$Q = - \frac{\alpha V_s B h}{1/n \left( \frac{H_o - h}{H_o} \right)} = - \frac{\alpha V_s B h}{1/n (1 - \xi h)} \dots\dots\dots (5-52)$$

(5-52) 式が積込時間を最小にするポンプ容量である。模型ホッパーの場合は  $h=3$  cm,  $B=24.8$  cm,  $V_s=0.037$  m/sec,  $H_o=45$  cm から  $1-\xi h=0.933$  となる。よって最小積込時間のポンプ容量は

$$Q = - \frac{2.5 \times 3.7 \times 24.8 \times 3}{1/n (0.933)} = 9.94 \text{ l/sec}$$

最小積込時間を与える流量はこの実験装置では9.94 l/sec, 約バルブ全開の2倍の値となり、かなり大きめに表われる。

図-21の実船の例はポンプ濃度10%を与えて計算したもので、(5-52)式から最小積込時間におけるポンプ容量はポンプ濃度には無関係になるため、ポンプ濃度を変えても最小積込時間のポンプ容量は変らない。

そのために、図-21において最少積込時間を示す点を一点鎖線で示しておいたが、沈降速度が変れば最少積込

時間のポンプ容量も大きく変動することが解る。すなわち(5-52)式より沈降速度に比例した大ききとなる。また海鵬丸の設計ポンプ容量は10,000 m<sup>3</sup>/hであるが、このポンプ容量により積込時間を最少にする沈降速度は略々  $V_s=0.02$  m/sec となる。粒径にして約0.2mmの粒子の沈降速度に値する。

しかしながら、1)項と同様に土質が広い範囲にわたっているときには同じ不都合が生じる。これもその土質専用のドラグサクシヨン浚渫船なら問題はないことはいうまでもないが、船の経済性を考慮して検討した場合には次のようなことがいえる。すなわち、図-21において  $V_s=0.025$  m/sec の積込時間とポンプ容量について考えると、積込時間を最少にするポンプ容量は略々13,500 m<sup>3</sup>/hである。しかし、ポンプ容量10,000 m<sup>3</sup>/hにおける積込時間と最小積込時間との差は僅少で、この程度の差ならば、最小積込時間のポンプ容量でポンプ動力を大きくするよりも、むしろ10,000 m<sup>3</sup>/hのポンプ容量で設計の方が経済的な見地から好ましいといえる。

以上のように1)項および2)項を考える上にも必ず3)項の経済性を考慮すべきことは明らかである。船の経済性を併せ考慮する場合は、諸々の要素が重なり合い、簡単に論じることはできない。特にポンプ容量、ホッパーの大きさに対する船価、あるいは浚渫単価等の関係を求めることは容易ではない。しかしながらこれは今後の残された問題でもある。

1)および2)項はポンプ容量、あるいはホッパーの大きさを求める一つの目安となるもので、設計する場合には十分に利用できる計算式である。

## § 6. 結 論

ドラグサクシヨン浚渫船のホッパー積込みに際し、土質の相違、ポンプ容量の大ききと積込効率の関係は最も重要なものであるが、これらの関係を求めるには種々の要素が混り合い、非常に複雑になる。本実験はこれらの複雑な機構を簡略化し、積込効率を求めてみたもので、限られた条件から得られたものであるため、正確なる数値ではないかも知れぬが、(たとえばホッパー長さの違いによる $\alpha$ の値等)しかしながら一つの目安として十分に利用できるものと思われる。

以上、模型ホッパーの実験と実船試験から得られた内容を要約すると、次のとおりである。

- (1) 最終積込土量は、静止装置を取り付けた場合、平均してホッパー容積の約1倍、静止装置のない場合は約0.89倍程度まで積込まれた。
- (2) 常流ホッパーで計算した積込効率は概して高く、

一般に2~3割高めに表われる。しかし $L/l=1/m$ の値の補正を施すことにより、平均的な積込効率が得られるが、この関係式で計算した積込効率は積込土量の増加に関係なく一定となり、実際の傾向とは合致しない。

(3) 渦乱を考慮して積込効率を求めると  $\eta=1-$

$$e - \alpha \left( \frac{V_s}{\bar{U}_H} \right)$$

で表わされ、常流ホッパーの積込効率の式と比較すれば大分趣きの異なるものとなる。すなわち、積込土量の増加により水深が減少するために、積込効率は漸次減少するもので、一定にはならない。この式における $\alpha$ の値を求めると、静止装置付、静止装置無しにかかわらず常数となり、略々 $\alpha=2.5$ であった。これはホッパーの大きさ、バルブ開度に関係なく成立することが判明した。

(4) 実船試験の結果は砂質土の場合  $V_s/\bar{U}_H=0.35$  付近までは前の式で表わされ、 $\alpha$ は2.5で整理されるが  $V_s/\bar{U}_H>0.35$  ではこの式が成立しなくなる。しかし実船試験例が少いために確言はできない。

軟泥の場合の沈降速度は粒群のものを採用すべきである。しかし(5-31)式から計算した結果からも判明するように、オーバーフロー後の積込効率は略々一定となり、あまり増加は望めない。

(5) 満載までの平均積込効率、最小積込時間からポン

プ容量を求めれば、ポンプ容量は粒子の沈降速度  $V_s$  に比例した大きさとなる。

最後に本報告をまとめるにあたり、図面あるいは表の作成に小島正雄君の協力を得た。また八木室長には種々御助言を頂いている。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) Applid Hydraulics in Engineering Henry M. Moris 1962年
- 2) 浮遊流砂が流れに及ぼす影響について 椿東一郎 土木学会誌40-9
- 3) 水理会式集 土木学会 昭和38年
- 4) ドラグサクシヨン浚渫船、海鵬丸のエコノミックローディング 近藤基、木原純考、青木幸男、菊谷徹 港研資料No. 23 昭和41年
- 5) 海鵬丸実船試験報告 八木得次、早乙女保二、笹谷哲也、入江義次、青木幸男、石塚浩次 港研資料No. 23 昭和41年
- 6) 沈降分離、濃縮装置の理論と設計(その1) 角田省吾、エハラ時報 第13巻、第52号 1964年
- 7) 開水路における浮遊流砂の分布について 合田健 土木学会誌35-10 昭和25年
- 8) 化学工学便覧 化学工学協会編、丸善株式会社 昭和39年

(昭和41年12月28日受付)