

鉛直上昇流中における粒子沈降に関する 実験およびポンプ船吸込管に関する考察

小 川 元

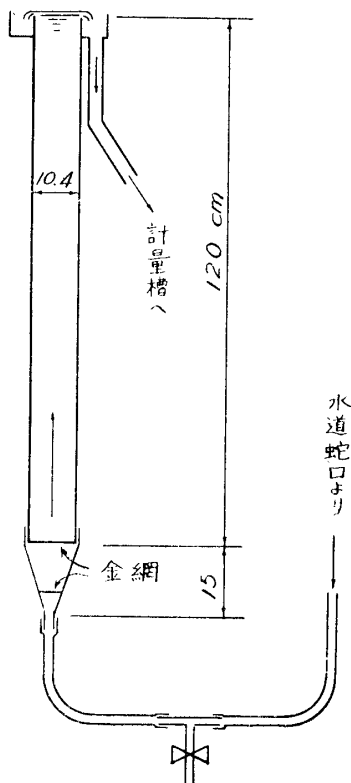
1. 緒 言

ポンプしゅんせつ船の排砂管内の流れ、すなわち、水平な円管内の砂水の流れの、水理学的機構は、一般的な浮遊砂に関する研究としても、またポンプしゅんせつ船としても、従来最も解明の遅れていた部分であるが、筆者は数年来これに関する研究を行って来て、工学的見地からほぼこれを解明し得たと考えている。この機構が判明するにつれて、次に問題となるのは吸込管内の機構である。これについても従来は特別な解明がなされておらず、ただ欧米において、吸込管径を排砂管径より多少大にした方が、しゅんせつ効率がよくなることだけが経験的に見出されていた。本研究はこの事情を明らかにする目的で行った実験であり、かつそれに基づいて吸込管の効率要素を究明したものである。

2. 実験およびその考察

(1) 設備および方法

実験設備は第一図に示すようである。その主体は、内径 10.4cm、長さ 120cm の、鉛直に立てられた硝子管で、その下端にロートをとりつけ、この部分に金網を 2 重に張って整流させ、ロートの下端に直接水道蛇口からゴム管で水を送った。硝子管の上端には越水受けをとりつけ、越水した水を計量槽へ導いて、計時と併せて流量を測定し、硝子管内の平均流速を求めた。沈降に用いた粒子は、鉍石、石炭、砂であって、それらの比重は第一表に、粒径は第二表に示すようである。ただし粒径は、通過したフルイ目盛寸法をとってある。なお鉍石粒は Pyrites sinter (黄鉄鉍焼滓) の微粒である。



第1図 実験設備

第一表 粒子の比重

種 類	鉍石粒	石 炭	砂
比 重	3.8	1.8	2.6

これらの粒子を、硝子管内の流速をいくつかに変化させて沈降させ、その見かけ上の沈降速度を測った。沈降速度は、硝子管の上下各 30cm を除いて、中央部 60cm で測り、3～5回の平均をとった。この場合の水温は常に 7.5°C であった。

第2表 見かけ沈降速度

種類	粒徑 mm	見かけ沈降速度 cm/sec							
		cm/sec V=0	V=0.5	V=1.5	V=3.3	V=7.1	V=8.7	V=8.8	V=10.0
鉍石粒	0.10	1.4	0.9	—					
	0.15	1.9	1.6	1.8	—				
	0.25	3.5	3.3	3.3	—				
	0.35	5.3	4.9	4.3	3.2	3.1	—		
	0.83	8.8	8.5	7.3	5.2	5.8	0	—	
石炭	2.5	12.0	11.5	9.4	9.1	5.8	5.5	4.7	—
	5.0	14.3	14.6	12.2	12.0	10.2	6.1	5.6	5.1
	10.0	19.4	19.4	17.6	13.3	16.7	11.1	9.8	6.9
砂	0.3	3.9	3.5	2.6	—				
	0.6	7.3	7.7	5.9	4.7	0	—		
	1.2	9.0	8.1	6.5	5.2	4.7	—		

(2) 実験結果

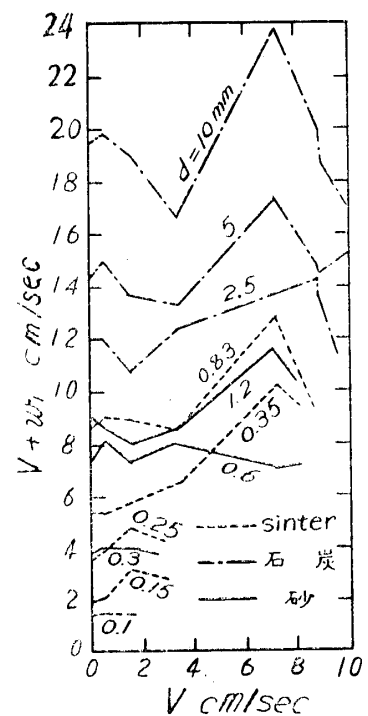
以上によって測定した平均上昇流速の値および各場合の見かけ沈降速度は第2表のとおりである。第2表中の値で0は、硝子管の途中で砂粒が静止状態になったことを意味し、—は粒子が上向きに流出したことを意味している。

しかしながらこの実験の目的は、砂粒を鉛直に上昇させるためには、実地上いかなる流速が必要であるかを調べることにあるので、実験結果を次のようにして表現する。すなわち、平均上昇流速 V と、上昇流中における見かけ沈降速度 w_1 との和をとり、これを各上昇流速に対して図示すると、その結果は第2図のようになる。第2図において、 $V=0$ のときの $V+w_1$ の値は、すなわち静水中における沈降速度である。故にもし沈降速度が上昇流速の値だけ減少するものとすれば、図中の各曲線は水平な直線になる。これが図のように上に向くのは、それだけ上昇流速との間にズレを生じたことを意味している。なお各曲線の末端が下がっているのは、その次の段階の流速では、砂粒が上向きに流出してしまったことを意味する。なお図中の d の値は、各砂粒が通過したフルイ目盛寸法である。

(3) 考察

いま第2図によって、粒子の沈降速度が管内の平均上昇流速に等しいだけの減少を来さない理由を考えることにするが、その前に、第2図を見ると砂、石炭、鉍石粒の各曲線は性格的な差異が見られない。すなわち、比重が異なっても、上昇流に対する沈降の傾向は同じであるといえよう。

ついで上記の、沈降のズレの原因について考えると、第一



第2図 上昇流速と見かけ沈降速度との関係

に管内流速分布の不均一性があげられる。流速分布が典型的であれば対数法則による分布をしているわけであるが、この場合でも粒子の沈降は周壁部において速くなるはずである。これがさらに本実験では、助走区間が僅かであるために、流速分布が非常に不規則であったことが、沈降現象の視察によって明らかであった。すなわち、同径の粒子が、大部分は途中で釣合って沈降しないのに、一部分の粒子だけがそのまま沈降し、あるいは一部の粒子が上向きに流出する場合でも、一部には沈降する部分があった。そしてこの不均一性は、水の流入口近くになるほど著しい。しかして沈降速度は、これらのうち最も速く沈降した粒子についてとったので、それだけ平均流速に対してはズレを生じたものと思われる。また第2図の沈降のズレが、上昇流速が大になるほど著しいことは、上昇流速が大になるほど流速分布の偏差量が大きになると考えられることから、容易に説明つけることができる。

第2図の各曲線の、静水中の沈降速度からの偏差量は、最大で静水中の沈降速度の2倍以下である。しかもその原因の主要なものが、上記のように流速分布の不均一から説明づけられるとすれば、静水中の沈降速度の何倍という程度の単位で考えるとき、粒子の沈降は大体その周囲の上昇流速に等しいだけ遅くなる、いいかえれば、沈降速度に等しい流速の上昇流の中では粒子は沈降しないということが許されよう。

本実験の目的は、ポンプ船吸込管内の流速の適値を求めることにあるが、現行通常その流速は、沈降速度の30~100倍程度であり、従って吸揚げの可能性という点から見ればその流速は非常に余裕に富んだものであることは上の実験結果から明らかであるといえよう。実際のポンプ船の吸込口にはカッターが回転しており、そのために吸込管内の流速分布は本実験で経験したものよりさらに大であるかも知れない。しかしながらそれを考えても、なお充分の余裕があると考えられる。ただし吸込管は傾斜管であって鉛直ではないが、それについては後記する。

元来粒子を上昇輸送する力の要素としては、上昇流速と、上昇流によって引き起される乱流拡散とが考えられる。乱流拡散は鉛直方向の場合でも、水平方向の場合でも、その性質が同様であることは、理論的に考えられるが、さらに Sherwood & Woertz¹⁾ および Kalinske & Pien²⁾ などによって実験的にも証明されている。ところで水平円管内の流れにおける拡散係数は、筆者の浮遊砂に関する実験的研究によって、式(1)のようであることが見出された³⁾。

$$\frac{\epsilon_{ave}}{\nu} \propto f^{0.2} Re^{0.4} \dots\dots\dots (1)$$

ここに ϵ_{ave} は円管内の拡散係数の平均値、 ν は動粘性係数、 f は摩擦損失係数、 Re はレイノルズ数 VD/ν である。

故に鉛直管内においても、粒子の浮遊に関して式(1)が成立するものと思われる。しかしながらこの乱流拡散による作用は、直接の上昇流による浮遊作用に比べて、その力が非常に小さいことは、筆者がかって行った水平管による実験によっても、また本実験において沈降現象が、大体上昇流速のみによって説明づけられることから考えられる。しからばいま対象としている吸込管内における必要な吸揚流速という問題に関しては、前記の現行の吸揚流速の程度からして、この乱流拡散は無視してよいと考えられる。しかもこの拡散作用は、砂の鉛直輸送に対して安全側として働らく。

そこで上昇流の場合には、拡散係数を無視することにすれば、水平管の場合のように管径の作用による浮遊作用を考える必要がなくなってくる。すなわち、水平管の場合には、式(1)に

よる拡散係数によって浮遊作用が行われるが、式(1)は管径の影響を大きく受けるので、水平管輸送全体が管径の影響を大きく受ける³⁾⁴⁾。これに対して鉛直管輸送では、式(1)を無視してよいので、管径の作用を考える必要がない。故に、水平管の場合には、管径の増大が濃度の減少を来たしたけれども、鉛直管の場合には、流速が同一であれば、管径が大になっても濃度を一定に保つことができ、輸送量は管断面積に比例することになる。

以上の諸点を考慮して、次にポンプしゅんせつ船の吸込管について考えてみよう。

3. ポンプ船吸込管に関する考察

わが国のポンプしゅんせつ船では、吸込管径を特に排砂管径と異なったものは用いていない。しかしながら欧米においては、吸込管の断面積を、排砂管断面積より1.14~1.56倍大きくしたものが用いられている⁵⁾⁶⁾。これは全く鉛直および水平方向の、土砂流の持つ特性から生じた現象であって、清水ポンプにおいては考慮の必要のない問題である。

ポンプしゅんせつ船のポンプ前後にとりつけられた吸込負圧計と排砂圧力計とは、次のような波状的变化を繰返している。すなわち、その両者とも読みが絶えず変動して、ある範囲で波動を描くが、吸込負圧が大になったときは排砂圧力が減少し、排砂圧力が大になったときには吸込負圧が減少して、常に相反する動きかたをする。

この理由は上記の実験の結果から次のように推定することができる。すなわち、鉛直上昇輸送の場合には、土砂の輸送は水平輸送に比べて小流速で可能である。なぜならば、水平輸送の場合には土砂を浮遊させる作用は鉛直方向の乱流拡散だけであり、この拡散作用は前述のように主流の作用に比してはるかに小さい。故にその主流の作用を全面的に受ける鉛直輸送の場合には、水平輸送に比べてはるかに輸送が容易であり、そこでいま吸込管と排砂管とに同径の管を用いたとすると、吸込管の方は排砂管が流送し得る以上の土砂を吸揚げることができる。

しかして土砂吸込の濃度は、実地の経験上流速が大になるほど大になるので、吸込管と排砂管とが同径、すなわち同流速であれば、吸込管には排砂管の流送能力以上の土砂が吸揚げられる。この土砂はポンプから排砂管に圧送され、排砂管内では浮遊能力不足のために掃流あるいは沈澱を起し、排砂圧力上昇の原因となる。ポンプは自己の揚程曲線に従って作動するので、排砂圧力が上昇すれば流量、従って流速が減少する。流速が落ちれば吸込濃度が減少して、吸込負圧は小になるとともに、小濃度の流れが排砂管に送られて排砂管内の土砂はしだいに清掃される。排砂管内の土砂が清掃され終ると流速は再び大となり、しかしこのときは、排砂圧力は土砂濃度の減少のために下がっていて、吸込負圧は反対に吸込土量が増加するために再び大になる。

このようにポンプは自律的に吸込土量を加減しながら作動を継続するもので、従来はこの間の究明が放置されて、吸込管と排砂管との摩擦抵抗が同一性質のものとして考えられていた。しかしながらこれらの摩擦抵抗は、前記したような、鉛直管と水平管の土砂浮遊能力の違いから、かなり異なった性質を持っているものであって、分離して考えなければならないものである。前記の欧米の経験的結果は、この両管の流送能力の相違を、経験から見出したものであるということが出来る。

ただし吸込管は実際は傾斜管であって鉛直ではない。かつ多少の水平部および彎曲部をふくんでいる。従って鉛直管における現象が完全には適用できないであろうが、ある程度その傾向があることも確かであろう。その程度は経験的に知るより外はないが、その結果が上記欧米の

標準値であるものと考えられる。

ポンプの出力は、吸込管と排砂管とに分離されるのであるが、その両者とも出力消費の主体は摩擦抵抗である。しかして排砂管の摩擦抵抗の総量は、それが水平輸送であることと、長さが長い点とからして、吸込管の摩擦抵抗よりかなり大になる。故にポンプの作動は、主として排砂管の摩擦抵抗によって支配されて、上記のように排砂圧力が主体となり、これが上昇すれば吸込負圧が減少し、これが下降すれば吸込負圧が上昇する。

このようにしゅんせつポンプは、出力を二つの部分に分離するが、これが動揺することは、一方に過分の力を用いて他方に過少の力を出していることを意味し、それだけ効率を落すことになる。理想的には出力の動揺がなく、常に一定の状態でしゅんせつが行われることがよい。そのためには吸込管の吸揚能力が、排砂管の排砂能力と釣合っていればよいわけで、それには排砂流速を吸込流速より大にしておけばよく、すなわち、吸込管径を排砂管径より多少大にすればよい。こうするとポンプは、常に排砂管に最大限の出力を消費していることにもなり、吸込管には排砂管能力に応じた最小限の出力しか用いていないことになる。このような吸排砂管径の比率の適値が前記欧米の標準値であって、これによってかなりのしゅんせつ効率の上昇を見ているのである。

ところで上記の検討は、排砂管断面積に対する吸込管断面積の割合のみであって、排砂管径自体については何らふれていない。この排砂管径の適値については、ポンプの出力、流送土砂の粒度、排砂管の長さなどによっておのおの変わり、かなり複雑な問題になってくる。筆者はこれらについても標準値を与えたが⁷⁾⁸⁾、この場合にも、吸込管に消費される出力は、はじめに仮定してポンプ出力から差引いて、排砂管とは別個に考慮されなければならない。一般に水平管においては、管が細いほど粒子に対する浮遊能力は大であって、従って管はなるべく細くする方がよいが、これはポンプ出力、砂粒の粒度、管の長さなどによって適当な限界があって、その細くし得る限界が、すなわち排砂管径の適値である。ポンプしゅんせつは、このような排砂管径と、それに対して適当な吸込管径とを設備したときに、はじめて完全に合理的に、経済的にしゅんせつを行うことができるものである。

参 考 文 献

- 1) T. K. Sherwood and B. B. Woertz: Mass Transfer between Phases, Role of Eddy Diffusion, Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society, Vol. 31, 1939.
- 2) Kalinske and Pien: Experiments on Eddy-Diffusion and Suspended-Material Transportation in Open Channels, Transactions A. G. U. 1943, Part II, p. 530.
- 3) 内田黍郎・加藤正晴・小川元: ポンプ船排砂管内の土砂濃度 および 乱流交換係数について, 土木学会論文集第35号(昭31.6) pp. 48~54.
- 4) 小川: 管による砂輸送における管径の影響について, 山口大学工学部学報, 4-1, 昭28.
- 5) The Hopper Drege, Its History, Development and Operation. A Review of a Publication by The Office of The Chief of Engineers, U. S. Army. The Dock & Harbour Authority Jan. 1956. p. 290.
- 6) Ole E. Erickson: The Hydraulic Dredge, Its History, Development and Operation, 1855-1956, Dock & Harb. Auth. Aug. 1956. p. 134.
- 7) 小川: 管輸送における経済的管径, 土木学会第13回年次学術講演会講演概要, 昭33.5.25.
- 8) 小川: ポンプしゅんせつ作業の効率化に関する研究, 土木学会誌に投稿中(昭33.8)