

# 水圧吸引土砂排除システムの土砂流送機能について

## Studies on Dredging in a Reservoir using HSRS (Hydro-Suction sediment Removal Systems)

片山裕之<sup>1</sup>・田島芳満<sup>2</sup>  
 Hiroyuki KATAYAMA, Yoshimitsu TAJIMA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 五洋建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)  
<sup>2</sup>正会員 Ph.D 東京大学大学院助教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

This paper shows dredging using HSRS ( Hydro-Suction sediment Removal Systems ) which is one of countermeasures for removable sedimentation in a dam reservoir. Since HSRS can also use power other than water head, it is the technology in which expansion of scopes, such as not only dam reservoirs but river channel, a seashore region, etc., is expectable.

This paper is examined about the function of pipe-line sand transportation. Therefore, it reexamined about experiment data from a viewpoint of sediment discharge and flow state of sediment in a pipe-line. Consequently, the fundamental knowledge about sediment transportation by pipe-line was acquired.

**Key Words :** HSRS, Sediment discharge, Dredging in a dam reservoir, Pipe-line transportation, Flow state of sediment in a pipe-line

### 1. はじめに

近年, ダム貯水池の機能維持管理の重要性や, 限られた予算と管理体制の中でいかに効率的に維持管理を行っていくかが課題となっている. 岡野<sup>1)</sup>は貯水池の堆砂をダム下流に流す技術を図-1のようにまとめている. これらの技術の一つに, 水圧吸引土砂排除システム (HSRS) がある. これは, 管内外の圧力差で吸引力を発生させ, 管に設けられた吸引口から水とともに土砂を吸引・

排除し, 管路により土砂輸送を行うものである. この技術は水位差以外の動力も使用可能であるため, ダム貯水池だけでなく河道や海岸域など適用範囲の拡大が期待できる技術である.

水圧吸引土砂排除システムは, ①集砂や堆積土砂の性状に関する課題, ②土砂を吸引口から吸引する過程の現象の把握, ③吸引した土砂を管路輸送する機能の把握, ④下流河川への放流および下流環境に与える影響と効果の把握, などの課題をもつ.

水圧吸引土砂排除システムの機能は, ③の管路の土砂

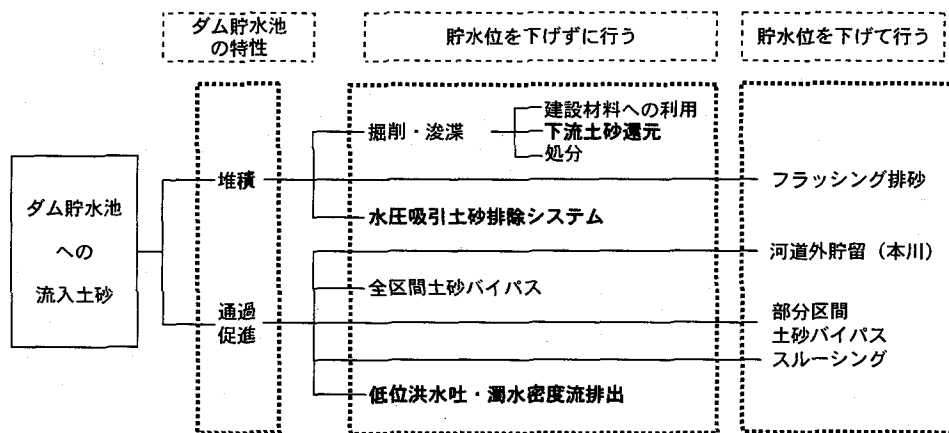


図-1 ダム貯水池流砂技術の構成<sup>1)</sup>

輸送機能で輸送能力の上限が規定され、①あるいは②の条件によって能力が決定される。

本研究では③の課題をとりあげ、水圧吸引土砂排除システムの土砂輸送機能について、既往の実験データを用いて検討する。そして、現状では定量的な評価が難しいと考えられている排砂量の観点から考察を加え、低流速の安定的な管路輸送機能を把握することを目的とする。

## 2. 水圧吸引土砂排除システムの既往の研究

### (1) 管路土砂輸送に関する研究事例

例えばDurand<sup>2)</sup>、八木<sup>3)</sup>に見られるように、1950年台から管路を利用したスラリー輸送の観点からの研究が行われてきている。特に、土砂輸送時の管内圧力損失、流動形態、各流動形態に応じた限界流速についての研究が多くなっている。

沈降性スラリーの流動状態については、流速が大きいと均質流（浮遊流）となるが、流速の低下とともに、下層が高濃度となる不均質流、下層に摺動層が生じる摺動流、下層に堆積層が生じる堆積流、と変化する。それぞれの状態変化点における流速を浮遊限界流速、摺動限界流速、堆積限界流速と定義される。またスラリー輸送時では清水より圧力損失が大きくなるが、流動形態の変化に伴う圧力損失最小点（最小エネルギーとなる点）があることも知られており、対応する流速を臨界流速と定義されている。

Durand<sup>2)</sup>は、摺動層を伴う二層流として取り扱えるスラリーに対して、水平管の場合の圧力損失について次式を与えている。

$$\phi = \frac{i - i_w}{i_w C} = K \left[ \frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gD(s-1)} \right]^{-n} \quad (1)$$

ここで、 $\phi$ ：圧力損失係数、 $i$ ：スラリーの水力勾配、 $i_w$ ：清水の水力勾配、 $C$ ：真体積濃度、 $V$ ：管内流速、 $C_D$ ：土粒子の抗力係数、 $g$ ：重力加速度、 $D$ ：管径、 $s$ ：土粒子と水の比重の比（ $=\gamma_s/\gamma_w$ ）である。

(1) 式中の $K$ と $n$ について、多くの研究者が実験などから提案している（例えば野田<sup>4)</sup>）。ただし、どれも一般性はなく粒子の影響を考慮していないこともあり、粒度分布を考慮した圧損係数の提案（Kazasnskiij<sup>5)</sup>）もある。

各限界流速についてもいろいろな研究者によって提案されているが、代表的なものはDurand<sup>2)</sup>による次式である。これは堆積限界流速に相当するものと考えられる。

$$V_L = F_L \sqrt{2gD(s-1)} \quad (2)$$

ここで、 $V_L$ ：堆積限界流速、 $F_L$ ：土粒子径と濃度によって決まる係数である。

また八木<sup>3)</sup>は、臨界流速について、Durandの圧力損失式を微分することによりエネルギー最小点の流速を求め、

実験から求めた $C_D$ と土粒子径 $d_s$ との関係を用いて次式を提案している。

$$V_C = 5C_V^{1/3} D^{1/2} \left[ 4.5 - 1/\sqrt{d_s} \right]^{5/6} \quad (3)$$

ここで、 $C_V$ ：体積濃度、 $d_s$ ：土粒子径である。ただし、式の形から分かるように、この式は土粒子径 $d_s$ が0.05 (mm) 程度以上の場合にしか適用できない。

限界流速式の代表的な二つを紹介したが、その他も含め提案されている式はそれぞれ適用範囲があるものと考えられ、同じ条件で計算をしてもかなりのばらつきがある。流動状態の指標としては、条件に応じて使い分ける必要があると考えられる。また、種々の条件による実験結果などから研究されているにも関わらず、排砂量あるいは排砂濃度について汎用的な整理をされたものは今のところ見当たらない。これは、流動形態、管径、流速、輸送対象物質の特性などパラメーターが多く、定量的評価が難しいためと考えられる。

### (2) 吸引による土砂排除事例

水圧吸引土砂排除システムは、土砂吸引部と排出先の水位差またはポンプによる負圧を動力として利用できる。水位差を動力とする場合、地形を利用したダム浚渫の事例がいくつか見られる。例えば国内ではHydro工法<sup>6)</sup>、SY工法<sup>7)</sup>、MHS排砂管工法<sup>8)</sup>などがある。Hydro工法は、吸引口を移動しながら浚渫するHydro-J工法、吸引部を土中に埋設した状態で、その上に堆積した土砂を吸引するHydro-P工法に大別される。本論文では前者を吸口移動型、後者を埋設固定型と分類する。前者は広い範囲を移動しながら浚渫できる反面、下流への土砂排出が許容される可能性が高い洪水時の移動が困難である。後者は吸引土砂をいかに効率的に排砂管上の空間に確保するかが課題となる。SY工法は前者に分類されるが、吸引口を土砂堆積面付近で上下に移動させ脈動流を発生させる特徴がある。MHS排砂管工法は後者に分類されるが、吸引口の形状が異なるなど違いがある。しかしながら国内では試験施工などは実施されているものの、いずれも残念ながらまだ実用化までは到っていない。海外では、Batuca<sup>10)</sup>に見られるように、東欧、中国などで比較的古くからオーソドックスなサイフォン浚渫が実施されている。ポンプを動力とした事例は、ダム浚渫でもいくつか報告はあるものの、大半は港湾における航路浚渫などの事例<sup>11)12)</sup>である。港湾では水位差を確保することが通常難しく、ポンプを動力とした浚渫が主流である。

岡野<sup>1)</sup>はダム堆積土砂の排除に水圧吸引土砂排除システムを利用する場合、細粒土砂が集中するエリア、または予め集砂したエリアへの適用を提案している。

ダム浚渫における水圧吸引土砂排除システムの課題としては、堆積土砂が固結した場合の吸引不能、管路内閉塞によるシステム停止、堆積土砂に含まれる流木などの障害物による吸引口の閉塞の問題などがあげられるが、

実績がないことも実用化へ踏み切れない一つの要因になっていると思われる。

### 3. 既往の実験データによる検討

#### (1) 収集データ一覧

水圧吸引土砂排除システムの土砂輸送機能について検討するために、既往の実験データを収集した。収集したデータの浚渫形式としては、吸口形式としては埋設固定型の排砂管を利用したものと吸口移動型の2種類について、動力としては水位差およびポンプ動力の2種類について、表-1に示すように計6種類の実験データを収集した。収集データは、対象土砂の性状（代表粒径）、排砂管径、平均流速、平均土砂濃度あるいは排砂量である。流速、濃度データについては、例えば吸口移動型の浚渫位置移動時、ポンプ動力の場合の圧力変動なども考えられるため、時間変化の中から整理した平均的な値であることに留意して扱うものとする。これらのデータから土砂輸送能力、管内流動形態、動力、吸口形状などの違いが排砂量に及ぼす影響について比較、検討した。また管内流動形態の指標としての限界流速式の適用性についても考察を加えた。

表-1 検討対象データ一覧

No	形式	動力	浚渫方式	実験スケール
①	埋設固定型	水位差	Hydro-P工法 <sup>6)</sup>	室内実験
②			MHS排砂管工法 <sup>8)</sup>	室内実験及び現地試験
③	吸口移動型	ポンプ	サイフォン浚渫 <sup>9)</sup>	実規模試験
④			Hydro-J工法 <sup>6)</sup>	佐久間貯水池における試験
⑤			SY工法 <sup>7)</sup>	実規模試験
⑥			ポンプ浚渫 <sup>10) 11)</sup>	実規模試験

#### (2) 各形式の土砂吸引の特徴

##### a) 埋設固定型

埋設固定型の一例として、MHS排砂管工法の室内実験データを示す（図-2）。特徴としては、排砂初期に高濃度ピークが見られ（Phase1）、その後緩やかに濃度が低下していき低濃度の定常排砂状態（Phase2）に落ち着いているのが分かる。また、高濃度時には圧力損失が大きくなり、その影響で管内流速も大きく低下している。図-3に示す埋設固定型では、Phase1では吸引口周辺の土砂を吸引するため能力に応じた土砂が管内に流入するが、その後は吸引口周辺にできた空隙に崩壊・沈降してくる上部の土砂を吸引するため、吸引口への土砂供給が能力より少ない可能性が高い。このケースを含め数ケースの流速と濃度時系列データのスカタープロットを図-4に示した。これからも高濃度となると流速が低下することが明らかであり、両者に高い相関があることがわかる。

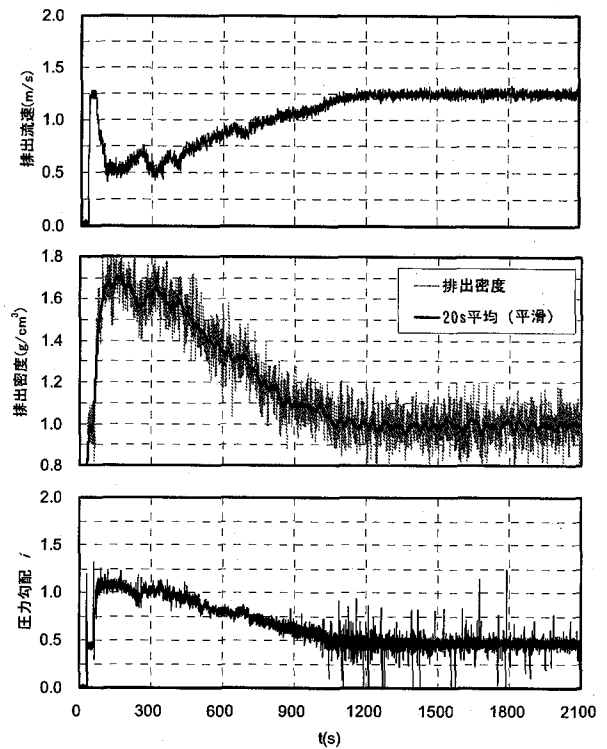


図-2 埋設固定型②の流速、密度、圧力勾配の変化例

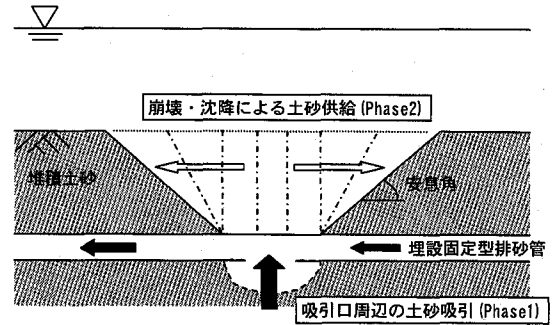


図-3 埋設固定型の排砂模式図

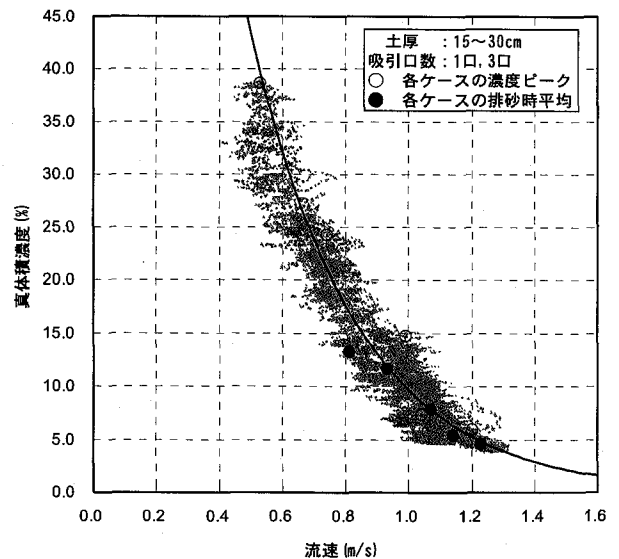


図-4 埋設固定式②の流速と濃度の相関例

## b) 吸口移動型

吸口移動型は、吸引口を堆積土砂の表面から近づけるため、常に埋設固定型のPhase Iに相当すると考えられる。しかしながら、堆積面と吸引口を適当な距離に維持するための吸引口位置管理が必要であるとともに、排砂終了後には土砂供給がないため吸引口を次の排砂点に移動しなくてはならない。そのために吸引口を一度上昇させ、水平移動後、再び堆積面近くへ下降させる動作が必要になる。そのため、管内流速や排出密度とも埋設固定型と比べて比較の変動が多くなる。また、吸引口位置管理が可能であることや土砂を崩す機能を併有しやすいこともあり、埋設固定型に比べ吸引能力に応じた土砂供給が期待できると考えられる。

## (3) データによる検討

### a) 流速と濃度の関係

まずは、収集したデータの流速と濃度の関係について整理した(図-5)。全体の分布としては、ポンプ動力を用いると高流速、高濃度な浚渫となっているのに対して、水位差による浚渫は吸引口形式により若干の違いはあるものの概ね流速3.0 (m/s)以下の範囲のデータがほとんどであることが分かる。また、流速、管径、対象土砂の性状などによって値は異なるが、概ね動力の種類、吸引口形状に寄らず流速が大きくなるほど土砂濃度が小さくなる傾向が見られる。これは、濃度増大により圧力損失が増加することによる流速低減と考えられる。しかし、いずれのデータも閉塞などはなかったと考えられるため、排出実績のある濃度帯がこの図から概ね把握できる。

### b) 既往の管路土砂輸送の限界流速式の適用性

既往の実験データを用いて限界流速式の適用性を確認した。ここでは、管径、濃度だけでなく、土粒子径の効果を簡単に取り込める八木<sup>3)</sup>の式を用い、流速と限界流速との比と土砂濃度の関係を調べた(図-6)。なお、ポンプ動力のデータの一部はシルト粘土に対する浚渫のため、式(3)が適用できないため除外した。また吸口移動型⑤で他のデータよりやや右側に分布しているが、脈動流によるデータ変動の影響および対象土砂がシルト質土のため式(3)の適用に問題がある可能性があり、この後の検討から除外した。これらを除いて見ると、若干のばらつきはあるものの、概ね比が1~2を下回ると高濃度となる傾向が見られた。管内流速が限界流速以下となると、輸送能力は低下するが、流動形態が褶動流あるいは堆積流となることにより下層に高濃度層が生じる。この影響で濃度が高くなっているものと考えられるが、水平管における二層流の濃度計測精度にも留意する必要がある。なお、データからは吸引口形状や動力の種類による明確な違いまでは見られなかった。

### c) 土砂輸送能力の評価

次に、水圧吸引式土砂排除システムの土砂輸送機能について検討した。

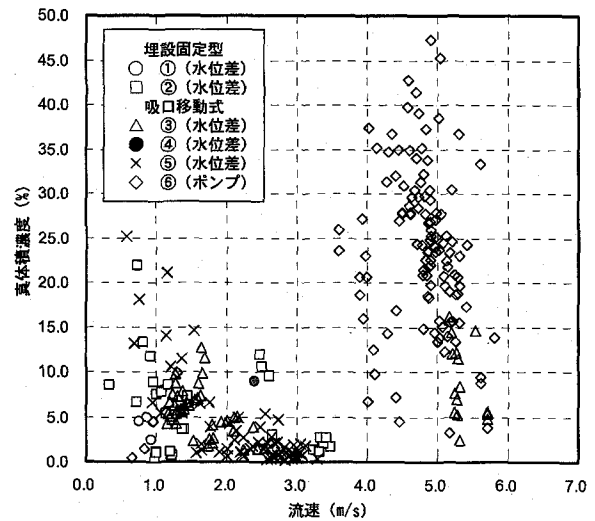


図-5 流速と濃度の関係

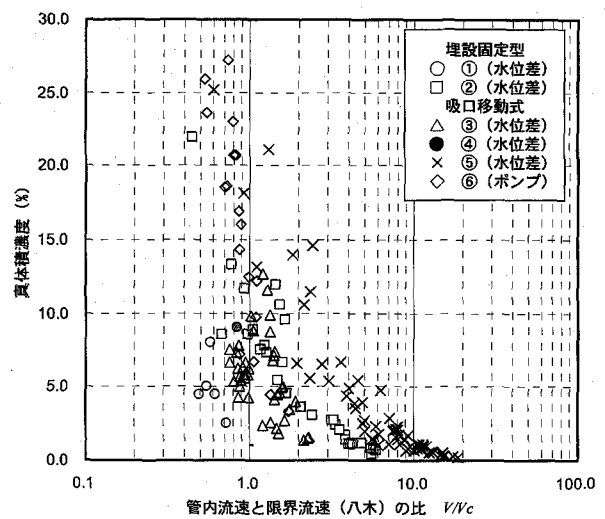


図-6 流速と限界流速との比と濃度の関係

既往の管路土砂輸送の中で用いられている土砂輸送能力を表すパラメータとして、Durandの圧力損失式(1)に見られる粒子フルード数  $F_r^*$  (式(4))がある。これは土粒子の抗力係数  $C_D$  が含まれるが、収集したデータには平均的な粒径情報しかないため、ここでは粒子の影響を含まないフルード数  $F_r$  を用いて土砂濃度について整理した。

$$F_r^* = \frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gD(s-1)} = F_r \frac{\sqrt{C_D}}{(s-1)} \quad (4)$$

ここで、 $C_D$ : 抗力係数である。

なお、フルード数  $F_r$  自体は通常、開水路の水理現象に用いるパラメータである。管路における土砂輸送力が摩擦損失により発生する圧力差と考えると、式(5)に示すようにフルード数  $F_r = V^2/(gD)$  がパラメータになることが分かり、式(4)はこれに粒子の影響を考慮したパラ

メターへと拡張したものと考えられる。

$$\Delta P = f \frac{V^2 \Delta x}{2g D} \gamma \quad (5)$$

一方、水理的には管路流のパラメータとしてレイノルズ数  $R_e$  があり、管内流が乱流になるほど土砂輸送能力が増加すると考えることもできる。

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

ここで、 $\nu$ : 渦動粘性係数である。

ここでは、代表的なパラメータとしてフルード数、レイノルズ数、および流速に着目し、排砂量との関係を調べた。まず、フルード数と排砂量との関係を図-7に示した。ここで渦動粘性係数については一律  $\nu = 0.01 \text{ (cm}^2/\text{s)}$  とした。データはかなりばらついており、今回の収集データの中では相関は高くないと考えられる。

次に流速と排砂量との関係を整理したものを図-8に示した。明らかに流速が大きくなると排砂量も大きくなる傾向が見られる。個々のデータについて見ると、埋設固定型③は非常に高い相関が見られるが、②は分布が上下に分かれており、比較的下側に分布するものは流動状態が均質流（浮遊流）に近く、上側に分布するケースは摺動あるいは堆積状態の流れであった。即ち、下側に分布するケースは吸引能力に対して吸引口からの土砂供給量が少なく、上側に分布するケースは吸引能力に応じた土砂供給があったものと推定できる。埋設固定型③も摺動あるいは堆積流となった可能性の高いケースがあるが、分布からは差異は分からない。また、ポンプを動力とすると、高レイノルズ数領域、即ち高エネルギーにより排砂効率も高いことが分かる。

図-9はレイノルズ数と排砂量との関係を示したものであり、流速をパラメータとしたものよりも相関係数が一番高くなった。この結果では、③だけでなく②でも堆積流と考えられるケースは上側に、浮遊流と考えられるケースは下側に分布する傾向が確認され、流速をパラメータとした場合よりも流動状態による分布が見られるようになった。逆に吸口形式による違いは明確には見られなかった。即ち、吸口形式に寄らず、流動形態に応じて吸引口に土砂輸送能力に応じた十分な土砂供給がある場合は摺動・堆積流のような不均質流となり、吸引口への土砂供給が、例えば埋設固定型のように周辺の土砂崩壊や沈降に支配される不十分の場合は浮遊流となると考えられる。

次に、レイノルズ数との関係において、流速と限界流速との比が2を境界として分類したものを図-10に示す。全てのデータで、概ね上下に分類されており、限界流速が流動状態および排砂量の定量的評価に重要な指標であることが示された。また、レイノルズ数と排砂量との関係から、概略の土砂濃度を推定できることになる。

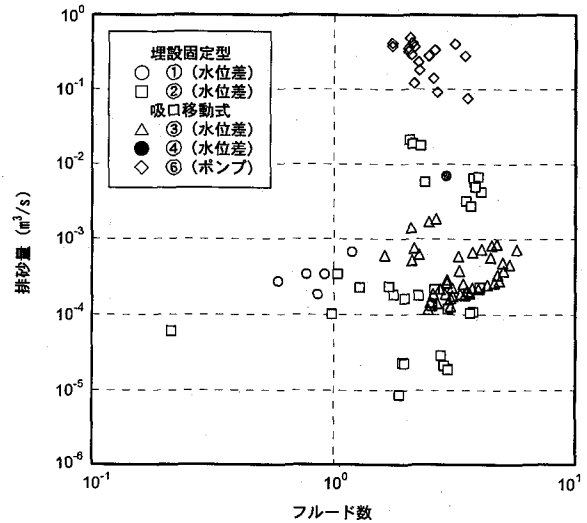


図-7 フルード数と排砂量の関係

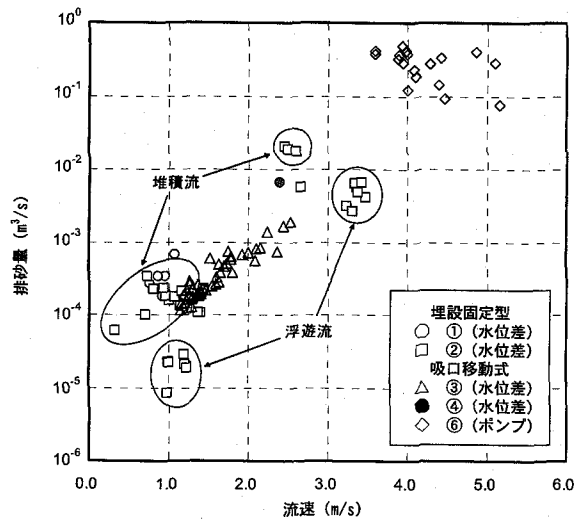


図-8 流速と排砂量の関係

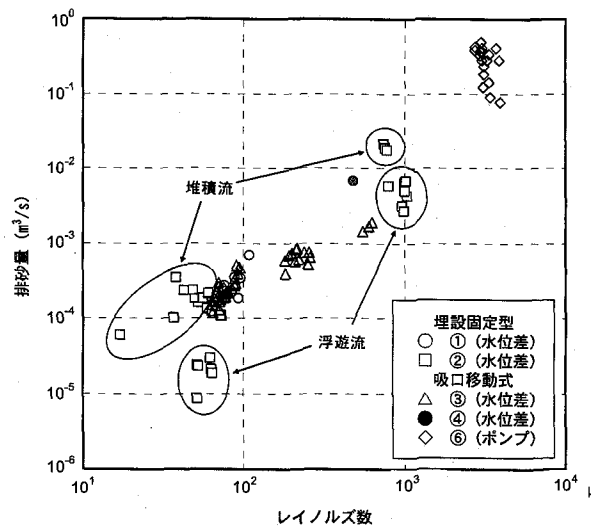


図-9 レイノルズ数と排砂量の関係

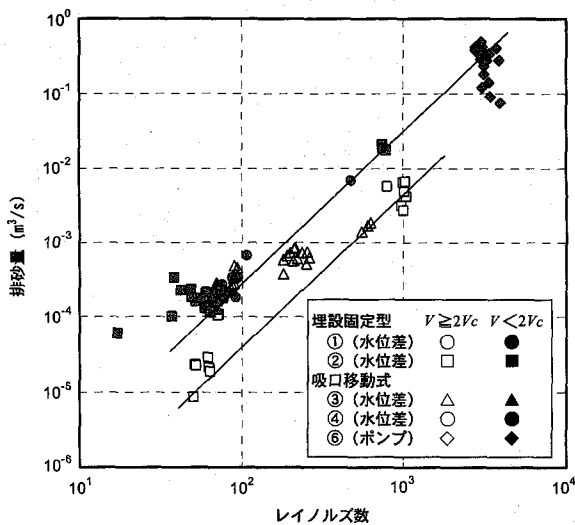


図-10 レイノルズ数と排砂量の関係（限界流速比別）

#### 4. 結論と今後の課題

##### (1) 水圧吸引式土砂排除システムの土砂輸送機能

水圧吸引土砂排除システムの土砂流送機能について、吸口形状、動力の異なる既往の実験データを整理することにより検討した。その結果、以下のことが示された。

- ①土砂濃度と流速の相関は高い。流速、管径、対象土砂の性状などによって濃度値は異なるが、動力、吸引口形状に寄らず流速が大きくなるほど濃度が小さくなる。
- ②流速と限界流速の比が1～2程度を超えると高濃度排砂となる。
- ③排砂量はレイノルズ数との相関が高く、またその分布は土砂供給量により二分される。吸引能力に対して吸引口からの土砂供給量が少なく浮遊流状態となる条件では排砂量の下限を示し、吸引能力に応じた土砂供給量があると摺動流あるいは堆積流となり上限の排砂量を示す可能性が高い。

##### (2) 今後の課題

水圧吸引土砂排除システムの4つの課題のうち、吸引した土砂を管路輸送する機能について検討し、概略の土砂流送機能を把握した。今後は残りの3つの課題のうち、吸引過程の現象の把握について検討を進め、本システムの実用化に向けた支援を進めていく予定である。

謝辞：本研究にあたり、有限責任中間法人ダム水源地土砂対策技術研究会（土砂研）よりデータを提供して頂いた。ここに記し、感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 岡野真久：粒径集団別流砂技術による貯水池土砂管理の提案、平成17年度ダム水源地環境技術研究所所報、pp.32-41, 2006.
- 2) Durand R.: Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research, IAHR 5<sup>th</sup> Congress, Minneapolis, pp. 89-103, 1953.
- 3) 八木得次：スラリー輸送の動向について、埋立と浚渫、No. 109, pp. 32-36, 1983.
- 4) 野田佳六：土砂の管路輸送、1986年度（第22回）水工学に関する夏季研修会講義集 Aコース、土木学会水理委員会、pp. A-3-1～A-3-16, 1986.
- 5) Kazanskij, I.: Scale-up effects in Hydraulic transport theory and practice, Hannover, Federal Republic of Germany, pp. B-3-47～B-3-79, 1978.
- 6) 橋本 徹・熊谷修治：貯水池等の堆砂排出に関するHydro技術、土砂管理とダムに関する国際シンポジウム論文集、pp. 183-188, 2005.
- 7) 横森源治・福本晃久・土屋良明・渋谷扔州：美和ダム貯水池内堆積土の効率的な排出工法の開発、ダム技術、No. 205, pp. 47-63, 2003.
- 8) 有限責任中間法人ダム水源地土砂対策技術研究会：平成17年度マルチホールサクション（MHS）排砂管によるダム堆積土砂排除に関する室内実験 報告書、2006.
- 9) Dan G. Batuca & Jan M. Jordaan (Jr) : Silting and Desilting of Reservoirs, A. A. Balkema, pp. 282-291, 2000.
- 10) 八木得次・宮崎昭児・入江義次・奥出律：鹿島港におけるポンプ船試験報告、港湾技研資料、No. 45, 52p, 1968.
- 11) 八木ら：ポンプ浚渫船の運転条件が浚渫能力及び濁りに及ぼす影響、港湾技研資料、No. 228, 41p, 1975.

(2007.4.5受付)