吹出し口を備えたサンドコレクタの基礎研究*

(回収濃度に及ぼす副口の影響)

福原 稔^{*1}, 野崎 勉^{*1}, 遠矢 伸隆^{*2}
加藤 隆樹^{*3}, 猿渡 芳文^{*4}

Fundamental Experiments on Sand Collector with Injection Port (Effect of Sub Port on Concentration of Collected Particles)

Minoru FUKUHARA^{*5}, Tsutomu NOZAKI, Nobutaka TOOYA,
Takaki KATOU and Yoshifumi SARUWATARI

^{*5} Faculty of Engineering, Kagoshima University,
1-21-40 Korimoto Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

As fundamental experiments of a sand collector with an injection port, the effect of the dimension of the sub port (the length of the sub hole and the radius of the main hole) in establishing the sub port in the injection port was examined on the collecting performance and flow visualization. As a result, the improvement on the collecting volume concentration was obtained, when the sub port was established in the injection port further than the conventional case. The concentration rises, as the length of the sub hole is shorter, and as the radius of the main hole is smaller. From the visualized image of the fluidized region of collected particles, the fluidization of the jet blown out from the sub port was able to be observed, and it was possible to prove the relation between the above-mentioned concentration.

Key Words: Fluid Machinery, Environmental Engineering, Flow Visualization, Multi-phase Flow, Jet, Liquid-Solid Flow, Slurry, Fluidization

1. ま え が き

各種ダムの浅底化問題やヘドロ対策などにおいて、水底に沈積している砂泥などを回収する作業の必要性が今後高まるものと予想される。そこで、著者らはこれまでにサンドコレクタの吸込口に吹出し口を設けることを提案し⁽¹⁾、砂泥を回収する際に吹出し口を備えない従来の場合に比べて回収性能に優れていることを報告した⁽²⁾。しかし、この吹出し流は鉛直下向きに吹出されるため、この流れの及ばない半径の大きい領域では流動化が行われず、流動化された半径の小さい領域での回収しか望めないのが実状である⁽³⁾。これまで実験用粒子として球形のガラスビーズを用いた場合、自然界に存在する非球形の粒子に比べて接触抵抗が小さいので、流動化されない半径の大きい領域の表層部分の一部の粒子は流動化された半径の小さい領域へ崩落する。そのため、この崩落による回収は可能となる

が、大幅な改善には至らない。一方、自然界に沈積した砂泥は球形のガラスビーズに比べて接触抵抗が大きいため、半径の大きい領域での崩落はほとんど起こらず、この領域の回収はほとんど望めない。

このような流動化されない半径の大きい領域での回収(崩落)の状況を踏まえ、本実験では吹出し口に新たに副口を設け、半径方向の大きい領域を流動化させ、回収体積濃度のさらなる向上を計ることを目的とする。ただし、副口を設けたことにより沈積層の流動化が促進できたとしても、流動損失が変化することも予想されるので前報⁽²⁾で用いた管路系の損失ヘッドおよび回収効率も求め、サンドコレクタのシステムとしての性能評価を行う。また、可視化装置を作製し、副口のうち主孔および副孔からそれぞれ吹出される噴流による回収粒子の流動化領域を可視化し、上述した回収体積濃度との関係を裏付けることができるかどうかを調べる。さらに、高速度ビデオカメラを用いて得られた可視化画像からそれぞれ主孔および副孔の出口端近傍の噴流速度を求め、上述した流動化領域との関係についても明らかにする。

2. おもな記号

a : 副孔の長さ mm

* 原稿受付 2000年4月18日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部(〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)。

^{*2} 准員、トヨタ自動車九州(株)(〒823-0015 福岡県鞍手郡宮田町大字上有木字平山1)。

^{*3} 正員、鹿児島大学大学院。

^{*4} 学生員、鹿児島大学大学院。

E-mail: fukuhara@mech.kagoshima-u.ac.jp

- C_v : 回収体積濃度
 H : 損失ヘッド m
 Q : 流量 m^3/s
 r : 流動化半径 mm
 r_i : 吹出し口半径 mm
 r_{im} : 主孔の半径 mm
 r_s : 吸込口半径 mm
 t : 回収時間 s
 v_i : 副口を設けない場合の吹出し口の管断面積平均流速 m/s
 v_{im} : 主孔の噴流速度 m/s
 v_{is} : 副孔の噴流速度 m/s
 z : 流動化高さ mm
 η_c : 回収効率

3. 実験装置および方法

3.1 回収性能 回収性能実験装置の概略を図1に示す。吹出し口②からの水噴流により流動化された砂泥①は、吸込ユニット③から吸込管④を通してセパレータ⑤へ流入する。ここで砂泥は水と分離され、砂泥だまり⑦そして集泥タンク⑩へ送られた後、ひょう量される。一方、セパレータを出た清浄水は主ポンプ⑪を経て吹出し流として再度利用される。この装置の詳細については前報⁽²⁾を参照いただきたい。

吹出し口の先端部に副口を新たに設けた吸込ユニット(図1中③)の概略を図2に示す。副口(図2中①)は

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus for collecting performance

主孔および副孔からなる。吹込口半径 r_s は 50 mm とし、吹出し口半径 r_i は回収効率の高い値を示した 10 mm を用いた⁽²⁾。副口円筒部に副孔を開けた場合、吹出し流と吸込流との干渉が従来の副口を設けない場合(鉛直下向き流れのみ)よりも強くなるであろう。そこで、副孔の寸法のうち、図2の右側に示すように円周方向の影響を考慮して副孔の幅を 4 mm, その個数を十字方向に 4 個と各条件において同一とし、副孔の長さを変化させた。また、副孔を開けてもそこからあまり流出しないことも予想されるので、厚さ 5 mm のスパーサ(図2中斜線)を挿入し主孔の径を小さく変化させ、副孔からの流速も上げられるようにした。図2に示すように円筒座標の軸方向および半径方向にそれぞれ z および r をとり、副口を設けない場合の管出口中心を原点とした。

性能実験は JIS B 8301 に準拠し、全揚程すなわち管路系の損失ヘッド H は真空計(図1中⑭)および圧力計(図1中⑮)を用いて計測した。流量 Q はパドル式流量計(図1中⑯)を用いて清浄水の水量を計測した。前報⁽²⁾のようにガラスビーズを回収した場合には流量計は正常に作動したが、今回の場合流量計は正常に作動しなかった。それは回収粒子として用いた火山性降灰の中で微細な粒子がセパレータで分離されずに流量計に混入したためである。そのため、回収粒子が存在しない状態で種々の流量においてあらかじめ電動機の周波数を求めておき、本実験ではこの値を設定して計測を行うことにした。この場合、副口を設けた場合の流動損失は考慮されるが、回収粒子の濃度増加分の流動損失は考慮されないので、この流量は見掛け上の値となる。真の流量との差は最大約 15% 程度存

Fig. 2 Schematics of suction unit

在することが前報⁽²⁾において示されているが、ここでは見掛け上の流量同士を比較するので後述する議論の範囲内ではあまり影響ないといえる。また、回収効率 η_c は前報⁽²⁾で定義した式、すなわち

$$\eta_c = \frac{1}{1 + \frac{\rho_w H}{\rho_s C_v h}} \dots \dots \dots (1)$$

を用いて求めた。ここで、 ρ_w は水の密度 ($9.98 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$)、 ρ_s は回収粒子の密度 ($2.59 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 C_v は回収試料の体積流量を水の体積流量で除した回収体積濃度、および h は砂泥表層からセパレータ入口までの鉛直高さを表す。本実験では、この値を 1.4 m とした。上式は、管路系の損失ヘッドが小さいほど、しかも回収体積濃度が高いほど回収効率が高くなることを意味する。

3.2 流れの可視化 3.1 節の性能実験で定量的に得られた回収体積濃度において、どのような流動様相を呈しているかを調べる必要がある。今回円周方向に副孔を設けるので、吹出し流は十字方向へ吹出され、その間から砂泥が吸込管へ吸込まれるという三次元的な流動様相を呈する。そのため、二次元可視化断面による計測によって回収体積濃度との関係をとらえられるかどうか疑問が残るが、今回においても前報⁽³⁾と同じ手法を用いて可視化実験を試みることにした。その実験装置の概略を図 3 に示す。吹出し管①からの水噴流により流動化された砂泥は、吸込口②から吸込管③を通してセパレータ④へ流入する。ここで砂泥と水は分離され、清浄水のみがポンプ⑤を経て、流量計⑥を通り再び吹出し口から流出する。この装置の詳細については前報⁽³⁾を参照いただきたい。

円管を半割にして取付けた可視化用吸込口(図 3 中②)の概略を図 4 に示す。各寸法は図 2 と同一である。ただし、吸込管の形状は、その作製が容易でないため、

Fig. 3 Schematics of experimental apparatus for flow visualization

図 2 で示した形状とは異なり同軸二重円管としたが、その形状による影響は吹出し流速に比べて吸込流速のほうが約 1/24 倍と低いいため小さいものとする。流動状態はデジタルビデオカメラ(フレームレート: 1/30 s)を用いて撮影した。また、各孔から流出する噴流速度は高速度ビデオカメラ(フレームレート: 1/250 s)を用いて可視化画像により計測した。吹出し口の上方約 50 r_i の位置からガラスビーズ(平均粒子径 102 μm)を注入し、2 時刻間の粒子を追跡して瞬時流速を算出した。その 1 時刻目の計測位置は各孔の出口中心近傍とした。実験開始後 10 s 付近の時間において、10 個分の瞬時流速を加算平均することにより噴流速度(精度: $\pm 5\%$)を求めた。なお、上述した種々の条件(計測位置、サンプリングの個数およびカメラのフレームレート等)による解析においても、後述する議論の範囲内で信頼性のある結果を得ることができた。

3.3 実験条件 性能実験では副孔のうち、副孔の長さ a を 3, 5, 7 mm および 9 mm、主孔の半径 r_{im} を 2, 4, 6 mm および 8 mm に変化させ、合計 16 条件について計測を行った。可視化実験では性能実験の結果を踏まえ、それぞれ副孔の長さを 3 mm および主孔の径を 2 mm に一定とした場合のみについて計測した。両実験とも従来形の副孔を設けない場合についても計測した。回収試料には火山性降灰を用い、その平均粒子径(球相当直径)は前報⁽³⁾において最も回収量の高い値を示した 210 μm を用いた。前報⁽³⁾では粒子間の接触抵抗の違いを定量的に示すため、内部摩擦角を試料中に水分を十分含ませた状態で一面せん断試験を行い、クーロンの破壊基準より求めている。すなわち、火山性降灰およびガラスビーズの内部摩擦角はそれぞれ 41° および 29° 程度であり、火山性降灰のほう

Fig. 4 Schematics of suction port

が表層部の崩落現象が起きにくいことを表している。この粒子の浮遊速度は文献(4)から求められ、その際の流量は $0.23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ となる。これを目安に、流量は $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ から $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 刻みに5点計測した。可視化実験では装置寸法の制約から流量は $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ のみとし、この流量は性能実験での $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ に相当する。また測定時間は前報⁽²⁾と同様、本実験においても10sとした。

4. 実験結果および考察

4.1 回収性能 回収体積濃度の流量変化について調べた結果を図5に示す。図5中の横軸は流量 $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ 、縦軸は回収体積濃度 $C_v [\%]$ を示す。なお、図5中の実線については、図面を見やすくするため、副孔を設けない場合と副孔を設けた場合には副孔の長さが $a/r_i = 0.3$ および 0.9 の条件のみを示す。従来形の副孔を設けない場合(図5中記号◎)には、前報⁽²⁾で示したように回収体積濃度は流量の増加に伴い増加している。吹出し口に副孔を設けた場合には、すべての実験条件において回収体積濃度は流量の増加に伴い増加し、副孔を設けない場合とほぼ同様な傾向を示していることがわかる。そのため、各条件の主孔および副孔の寸法の影響については流量を一定として比較を行うことにした。その結果を図6に示す。図6中の横軸は吹出し口半径で無次元化した副孔の長さ a/r_i 、縦軸は図5と同様に回収体積濃度 $C_v [\%]$ を示す。一例として、ここでは流量は $Q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合について示す。吹出し口に副孔を設けた場合、副孔を設けない場合(図6中記号◎)に比べてすべての条件に

おいて回収体積濃度は高い値を示す。本実験条件の範囲では、主孔の径が $r_{im}/r_i = 0.2$ の場合でしかも副孔の長さが $a/r_i = 0.3$ の場合に回収体積濃度(約31%)が最も高く、副孔を設けない場合(約17%)に対し、約14%の改善が得られた。図6からわかるように、副孔の長さが短くなるほど回収体積濃度は高くなる傾向を示し、特に主孔の径が小さい場合にそのこう配は大きくなる。つまり、副孔の長さが短いほどしかも主孔の径が小さいほど回収体積濃度が高くなることがわかる。これらの効果は粒子の性状(粒子径、粒子形状、粒子密度等)、副孔の形状(副孔数、副孔幅等)および吸込口径等によって種々異なることが予想されるが、今回一条件のみを取り上げて実験を行った中で、副孔を設けたことによる回収体積濃度改善の有効性を示すことができた。

このような回収体積濃度の増加や主孔および副孔の形状変化に伴い、これらの流動損失が変化するものと

Fig. 6 Effect of length of sub hole on collecting volume concentration

Fig. 5 Relations between collecting volume concentration and flow rate

Fig. 7 Relations between pressure loss of piping system and flow rate.

考えられる。そこで、管路系の損失ヘッドの流量変化について調べた結果を図7に示す。図7中の横軸は流量 Q [m³/s]、縦軸は管路系の損失ヘッド H [m] を示し、実線は二次曲線で表している。なお、図7中の実線については、図面を見やすくするため、副孔を設けない場合と副孔を設けた場合には副孔の長さが $a/r_i = 0.3$ および 0.9 の条件のみを示す。従来形の副孔を設けない場合(図7中記号◎)には、前報⁽²⁾で示したように損失ヘッドは流量の二乗に比例して増加している。吹出し口に副孔を設けた場合には、すべての実験条件において損失ヘッドは流量の二乗に比例して増加し、副孔を設けない場合とほぼ同様な傾向を示していることがわかる。図6と同様、損失ヘッドについても各条件の主孔および副孔の寸法の影響を調べる。その結果を図8に示す。図8中の横軸は吹出し口半径で無次元化した副孔の長さ a/r_i 、縦軸は図7と同様に管路系の損失ヘッド H [m] を示す。図6と同様、流量は $Q = 1.0 \times 10^{-3}$ m³/s の場合について示す。副孔の長さが短くなるほど損失ヘッドは高くなり、特に主孔の径が小さい場合その傾向は大きくなる。この傾向は、前述した回収体積濃度の分布と定性的に同様である。

このように回収体積濃度の増加した条件では損失ヘッドも増加するため、回収効率の増減について調べる必要がある。その結果を図9に示す。図9中の横軸は流量 Q [m³/s]、縦軸は回収効率 η_c [%] を示す。なお、図9中の実線については、図面を見やすくするため、副孔を設けない場合と副孔を設けた場合には副孔の長さが $a/r_i = 0.3$ および 0.9 の条件のみを示す。従来形の副孔を設けない場合(図9中記号◎)には、前報⁽²⁾で示したように回収効率は流量の増加に伴い低下して

いる。吹出し口に副孔を設けた場合、副孔を設けない場合と比較すると、すべての実験条件において各流量毎にほぼ一致していることがわかる。つまり、回収体積濃度が高くなるとそれに相当する分の管路系の損失ヘッドが増加することによって、回収効率はほとんど変化しないことを表している。よって、副孔を設けない場合に比べて副孔を設けた場合に回収体積濃度が高くなる一方、回収効率はほぼ一致することから副孔を設けたことによる有効性を示すことができた。言い換えると、この条件では単位時間当たりの回収処理能力が向上したといえる。

副孔の長さおよび主孔の径が、本実験条件の範囲内で回収体積濃度の最大値を得た寸法 ($r_{im}/r_i = 0.2$, $a/r_i = 0.3$) からさらに小さくなると、その際の濃度は高くなるであろう。しかし、その寸法が小さすぎると損失ヘッドが急激に増加することから、回収効率は低下するものと予想される。この特性は、前報⁽²⁾において管径比が小さすぎると損失ヘッドが急激に増加し回収効率が低下したことから推測できるであろう。以上より、今後副孔の最適設計を行う場合には、回収効率を低下させないように注意を払う必要がある。

Fig. 8 Effect of length of sub hole on pressure loss of piping system

Fig. 9 Relations between collecting efficiency and flow rate

Fig. 10 Visualized image ($Q = 0.25 \times 10^{-3}$ m³/s, $t = 10$ s)

4・2 流れの可視化 可視化実験から得られた火山灰沈積層の流動化領域の可視化画像を図10に示す。それぞれ図10(a)および図10(b)に副口の有無について示し比較する。流量は $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合であり、回収時間は4・1節の性能実験と同様10sとし、副口を設けた場合の条件は最も回収体積濃度の高い条件($r_{im}/r_i=0.2$, $a/r_i=0.3$)とした。図10(a)に示すように従来形の副口を設けない場合、半径の大きい領域($r/r_s > 1$)において流動化はもちろん、崩落現象もほとんど見られない。一方、図10(b)に示すように副口を設けた場合には、副孔から吹出される噴流によって半径の大きい領域での沈積層の流動化が行われ、流動化領域を拡大させる様子が観察できた。

ここで、この吹出し流によって流動化されている領域と静止している沈積層との境界を流動境界と呼ぶことにする⁽³⁾。この流動境界について、主孔および副孔の寸法の影響を調べた結果を図11に示す。図11中の横軸および縦軸はそれぞれ吸込口半径 r_s で無次元化した流動化半径 r/r_s および流動化深さ z/r_s を示す。図11(a)および図11(b)にそれぞれ主孔の径を $r_{im}/r_i=0.2$ および副孔の長さを $a/r_i=0.3$ に一定とした場合について示す。なお、これらの寸法は4・1節で述べたようにそれぞれ濃度変化の最も大きい条件である。図11(a)に示すように主孔の径を一定とした場合、副孔の長さが短くなるにつれ、流動境界の流動化深さおよび流動化半径はいずれも大きくなる。また図11(b)に示すように副孔の長さを一定とした場合、主孔の径が小さくなるにつれ、流動化深さは小さくなるが、流動化半径は大きくなる。これらの流動境界の流動化深さおよび流動化半径の値を各条件についてプロットした結果を図12に示す。図12中の横軸および縦軸はそれぞれ吸込口半径 r_s で無次元化した流動境界の流動化深さ z_{ro}/r_s および流動化半径 r_{zo}/r_s を示す。

Fig. 11 Fluidized boundary ($Q=0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $t=10 \text{ s}$)

界の流動化深さ z_{ro}/r_s および流動化半径 r_{zo}/r_s を示す。主孔の径を $r_{im}/r_i=0.2$ に一定とした場合、副孔の長さが短くなるにつれ、その流動化深さおよび流動化半径は同程度ずつ増加している。また、副孔の長さを $a/r_i=0.3$ に一定とした場合、主孔の径が小さくなるにつれ、流動化深さは減少する。しかし、流動化半径は増加し、その増加率は前述の条件($r_{im}/r_i=0.2$)に比べて大きくなる。流動境界を円周方向に積分して流動化体積を求めるとすれば、半径のより大きいほうがそれに影響を及ぼすことは自明であり、上述の変化量では流動化深さよりも流動化半径のほうが流動化体積に寄与すると考えられる。よって、それぞれ副孔の長さおよび主孔の径がいずれも小さくなるほど、流動化半径は大きくなることから、上述した回収体積濃度との関係を裏付けることができた。3・2節で述べたように試みとして図4で示した二次元可視化断面における流動様相を調査したわけであるが、上述の可視化結果は回収体積濃度との関係を定性的に示している。

高速度ビデオカメラを用いて得られた可視化画像か

Fig. 12 Fluidized depth and radius

Fig. 13 Jet velocity of main hole and sub hole

ら、それぞれ主孔および副孔の出口端近傍の噴流速度を求め、上述した流動化領域との関係について検討する。噴流速度の結果を図13に示す。図13中の横軸および縦軸はそれぞれ主孔の噴流速度 v_{im} および副孔の噴流速度 v_{is} を示し、副口を設けない場合の吹出し口の管断面積平均流速 $v_i (=1.59 \text{ m/s})$ で無次元化している。各条件における v_{im} および v_{is} の流出角はそれぞれ z 軸に対して約 0° および約 65° であった。ここで、従来形の副口を設けない場合(図13中記号○)の噴流速度は $1.35v_i$ の値となることから、計測精度の信頼性をおおよそ確認できた。図13からわかるように、主孔の径を $r_{im}/r_i=0.2$ に一定とした場合に副孔の長さを短くすると、副孔の噴流速度は増加し、主孔の噴流速度も増加する。また、副孔の長さを $a/r_i=0.3$ に一定とした場合に主孔の径を小さくすると、主孔の噴流速度は増加せず逆にやや減少する。この現象は主孔での流動損失の急激な増大が要因として考えられる。一方、副孔の噴流速度は増加し、その増加率は前述の条件($r_{im}/r_i=0.2$)に比べて大きい。これらの噴流速度をそれぞれ図12に示す流動境界の流動化深さおよび流動化半径の結果と比較する。図12および図13の両者からわかるように、主孔の噴流速度が大きければ流動化深さは大きくなり、また副孔の噴流速度が大きければ流動化半径は大きくなる。よって、主孔および副孔の噴流速度はそれぞれ流動化深さおよび流動化半径と密接な関係にあることがわかった。さらに上述と関連して、各孔から流出する流量が求められれば、それらの流量が沈積層内の粒子の流動化にどう関与するかについて考察できるであろう。しかし、この分配流量の計測は容易でないため、本実験では計測していない。今後PIV等の計測手法を用いて速度分布を求めたうえで、より詳細な流動解析を進める必要がある。

今回、吹出し口に副口を設けることにより回収体積濃度を改善できることがわかったが、図10(b)に示すように可視化画像を見ると表層部付近の流動化が激しくなり、粒子が周囲に巻き上げる現象も観察された。環境上この現象を最小限に抑える必要がある場合には、この点について課題が残ることになる。その場合には、副口の形状を何らかの方法で工夫して副孔から吹出される噴流の角度をより下方に調節できれば、極力抑えられると考える。そうすることにより、二次汚

染を最小限に食い止めることができるとともに、回収体積濃度のさらなる改善も期待できるであろう。

5. む す び

吹出し口を備えたサンドコレクタの基礎研究として、吹出し口に副口を設けた場合の副口の寸法(副孔の長さおよび主孔の径)の影響について回収性能および流れの可視化実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 吹出し口に副口を設けた場合、従来形の副口を設けない場合よりも回収体積濃度の改善が得られた。その場合、副孔の長さが短いほど主孔の径が小さいほど回収体積濃度が高くなる。

(2) 上述の回収体積濃度の高い条件では管路系の損失ヘッドも同様に高くなるが、回収効率は減少しないことから副口を設けたことによる有効性を示すことができた。言い換えると、この条件では単位時間当たりの回収処理能力が向上したといえる。

(3) 可視化画像による回収粒子の流動領域から、副口から吹出された噴流の流動化の促進状況を観察できた。つまり、それぞれ副孔の長さおよび主孔の径が小さくなるほど流動化半径が大きくなるため、前述した回収体積濃度との関係を裏付けることができた。

(4) 可視化画像から主孔および副孔の出口端近傍の噴流速度を求めた結果、それらはそれぞれ流動境界の流動化深さおよび流動化半径と密接な関係にあることがわかった。

終わりに、本実験を遂行するにあたり文部技官 木通克男氏に協力を得た。また、本研究は平成11年度文部省科学研究費補助金[基盤研究C(2)(11650183)]の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 野崎勉・中西賢二・永崎靖・福谷隆博, 機論, 56-522, B (1990), 514-517.
- (2) 福原稔・野崎勉・加藤隆樹・椎保幸, 機論, 61-581, B (1995), 181-185.
- (3) 野崎勉・福原稔・川崎慎一朗・椎保幸, 機論, 63-605, B (1997), 243-248.
- (4) Bain, A.G. and Bonnington, S.T., *The Hydraulic Transport of Solids by Pipeline*, (1970), 33, Pergamon Press.