

# 固形物輸送用ポンプの性能に関する研究

## Investigations on Performance of Pump for Transporting Liquid-Solid Mixture

井上 幸作\* 青山 肇\*

Kôsaku Inoue

Hajime Aoyama

### 内 容 梗 概

固形物輸送用ポンプの性能に影響を及ぼす要因は非常に多く考えられる。本研究では、口径 100 mm サンドポンプを用いて、固形物の粒径、固形物の比重、混合液の濃度およびポンプの回転数がポンプの性能に及ぼす影響を調べた。実験に用いた固形物は、石炭(比重≒1.4)、砂(比重≒2.65)、ジルコンサンド(比重≒4.6)の3種類である。

### 1. 緒 言

固形物の水力輸送は砂、石炭、フライアッシュ、鉄鉱石などきわめて広範囲の固形物を取り扱っており、これらを輸送するポンプも種々な形式<sup>(1)</sup>のものが用いられている。またその輸送規模も大形化する傾向にあるので、これらの装置の設計に関してはより詳細な資料が必要とされてきている。

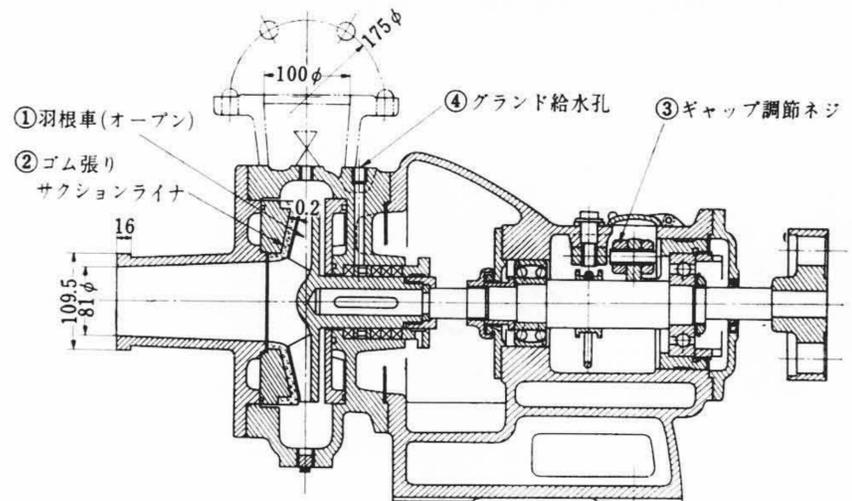
現在までに報告されているおもなサンドポンプの研究としては堀田<sup>(2)</sup>、長谷川<sup>(3)</sup>氏らの研究がある。これらの報告はサンドポンプに特定の砂を供給した場合の性能を調べたものである。しかし実際には砂以外にも種々の固形物を扱っているため、固形物の比重および粒径などの変化に対する資料が必要となってきた。

そこで本研究では比重および粒径の異なった固形物(石炭、砂、ジルコンサンド)を口径 100 mm のサンドポンプ(オープン羽根車)に供給し、固形物の粒径、比重、混合液の濃度およびポンプの回転数の変化がポンプの性能に及ぼす影響を調べた。

### 2. 記 号

本報告に使用する記号は次のとおりである。

$Q$	ポンプの吐出量 (m <sup>3</sup> /min)
$\gamma$	混合液の比重量 (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma_w$	清水の比重量 (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma_s$	固形物の比重量 (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma_{Hg}$	水銀の比重量 (kg/m <sup>3</sup> )
$d$	固形物の粒径 (mm)
$d_m$	固形物の平均粒径 (mm)
$W$	測定用タンクに吐出された混合液の重量 (kg)
$V$	測定用タンクに吐出された混合液の容積 (m <sup>3</sup> )
$V_s$	測定用タンクに吐出された混合液の砂の容積 (m <sup>3</sup> )
$V_w$	測定用タンクに吐出された混合液の清水の容積 (m <sup>3</sup> )
$C_v$	吐出混合液の体積濃度(正味)
$ll$	羽根車とサクシヨンライナとの間げき (mm)
$H$	全揚程(液柱表示) (m)
$p$	全揚程(圧力表示) (kg/m <sup>2</sup> )
$P$	軸動力 (kW)
$\eta$	ポンプ効率
$P_s$	吸込圧力(ポンプ軸心基準) (kg/m <sup>2</sup> )
$P_d$	吐出圧力(ポンプ軸心基準) (kg/m <sup>2</sup> )
$N$	ポンプ回転数 (rpm)
$C_H$	揚程比 = $\frac{\text{混合液時の全揚程(液柱表示)}}{\text{清水時の全揚程(液柱表示)}}$



第1図 実験用ポンプ組立図

$$C_\eta \quad \text{効率比} = \frac{\text{混合液時の効率}}{\text{清水時の効率}}$$

$$C_P \quad \text{動力比} = \frac{\text{混合液時の軸動力}}{\text{清水時の軸動力}}$$

$$C_{Pr} \quad \text{圧力比} = \frac{\text{混合液時の全揚程(圧力表示)}}{\text{清水時の全揚程(圧力表示)}}$$

$$K_H \quad \text{揚程係数} = \frac{1 - C_H}{\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1}$$

$$K_P \quad \text{動力係数} = \frac{C_P - 1}{\frac{\gamma}{\gamma_w} - 1}$$

### 3. 実験装置および実験方法

#### 3.1 実験用ポンプ

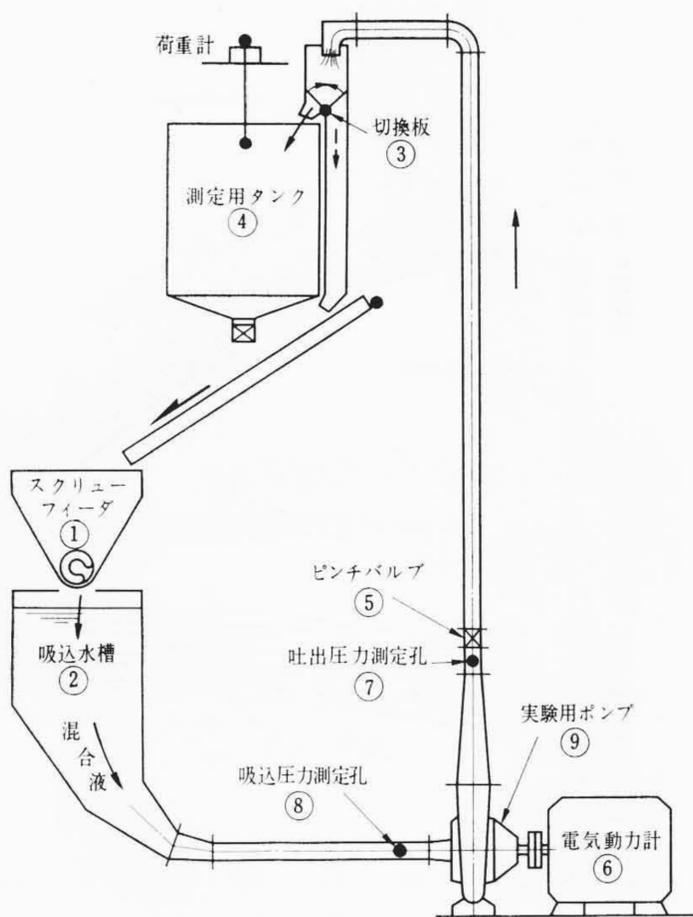
実験に用いたポンプは口径 100 mm のサンドポンプであり、その構造は第1図に示すとおりである。羽根車①はオープン形で、その材質は 24Cr 鋳鋼である。この羽根車に相対するサクシヨンライナ②にはゴム(耐摩耗ゴム)張りのものを使用した。羽根車とサクシヨンライナとの間げきはネジ③により調節されている。また実験中圧力水は給水孔④から 2 kg/cm<sup>2</sup> の圧力でグランドに供給されている。

#### 3.2 実験装置

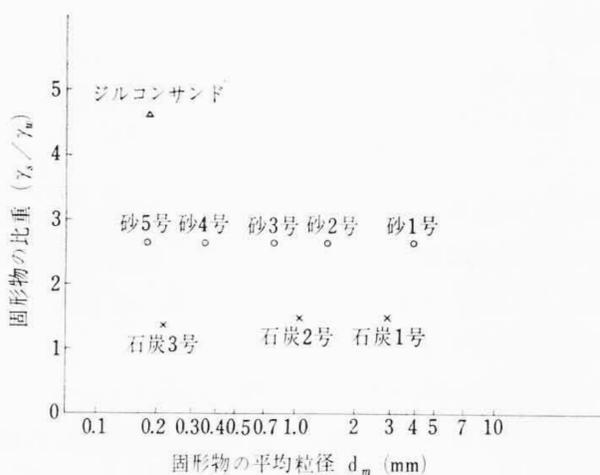
実験装置の概要は第2図に示すとおりである。この図に示すように固形物混合液の流れる管路は循環式となっている。すなわちスクリュフィーダ①から供給された固形物は吸込水槽②を通り実験用ポンプ③に吸い込まれる。固形物混合液はこのポンプにより加圧されて約 4.5 m の垂直直管を上昇し、切換板④の操作により混合液測定用タンク⑤を通り、もしくは直接スクリュフィーダに戻る。

実験用ポンプの口径は 100 mm であるが配管には内径 80.7 mm の鋼管を使用した。これは管内流速を大きくし、固形物による管内閉

\* 日立製作所亀有工場



第2図 実験装置



第3図 固形物の比重と粒径

塞を防ぐためである。

固形物混合液の濃度はスクリーフィーダに供給する固形物の量とスクリーフィーダの回転数の変化により調節された。またポンプを通過する混合液の流量はポンプ吐出部にあるピンチバルブ⑤の操作により調節されている。

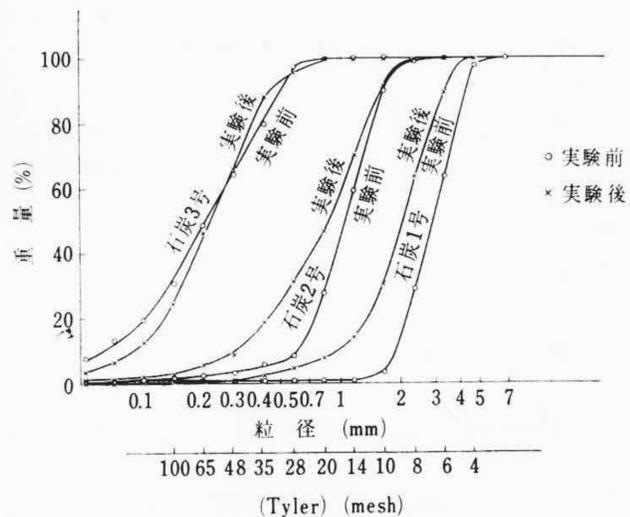
### 3.3 実験方法

まず実験用ポンプを清水で運転しておき、スクリーフィーダを回転させ固形物を供給する。混合液を回数循環させるとその濃度が一樣となるから、ここでポンプの性能の測定を開始する。

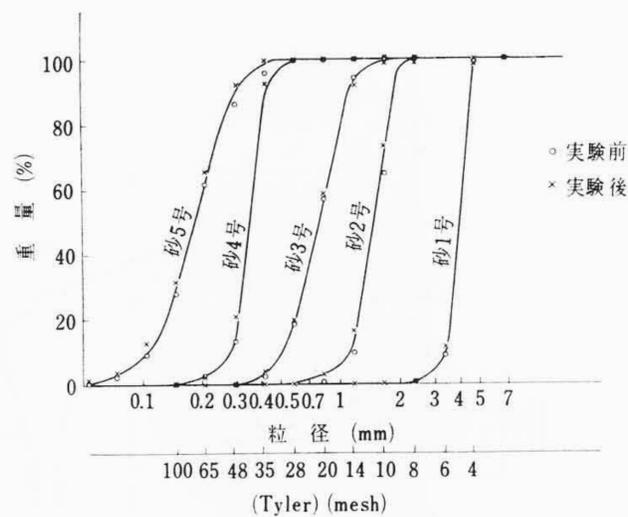
実験ではポンプの吐出量調節バルブの開度を一定に保ち、混合液の濃度を变化させて、そのつどポンプの軸動力、全揚程、吐出量および吐出濃度を測定した。また種々のバルブの開度に対してこれらの測定を繰り返した。

ポンプの軸動力はポンプを駆動している可変速の11kW交流電気動力計⑥(第2図参照)によって測定されるトルクと電子管式回転計によって測定されるポンプの回転数とから算出された。ポンプの全揚程の測定は水銀柱マンメータを用いて⑦と⑧の測定孔により行なわれた。

管内濃度の測定方法としては重量式<sup>(3)</sup>、放射能密度計、パーティクルカウンタフローメータ<sup>(5)</sup>などが知られているが多少問題があると



第4図 石炭の粒度分布



第5図 砂の粒度分布

考えられるので、本研究では吐出濃度を次に述べる方法により測定した。すなわち測定用タンク④内に吐出された混合液の体積、その重量および吐出に要した時間から混合液の吐出量および吐出濃度を算出した。

混合液の濃度は石炭で体積濃度  $C_v=48\%$  (混合液の比重  $\gamma=1,190\text{kg/m}^3$ ) まで、砂で  $C_v=28\%$  ( $\gamma=1,480\text{kg/m}^3$ ) まで、ジルコンサンドで  $C_v=24\%$  ( $\gamma=1,870\text{kg/m}^3$ ) まで種々变化させた。

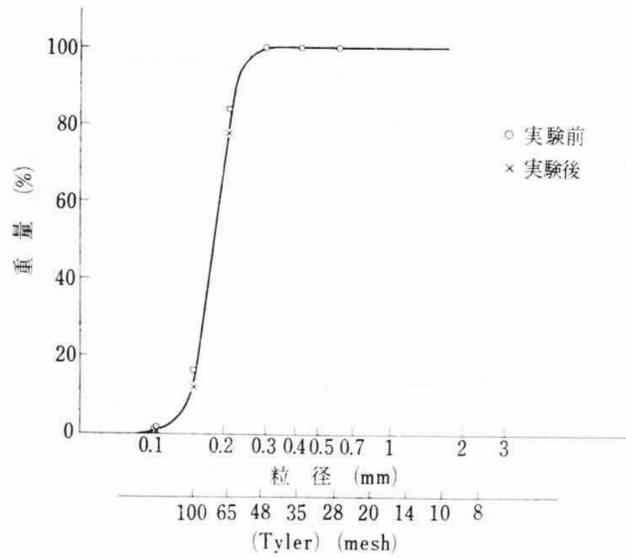
固形物混合液による実験中、羽根車とサクシヨンライナとの間げきに砂がはいり込み両者が多少摩耗し、ポンプの性能が変化するのでおのおのの混合液による性能をそのまま比較することは不合理である。したがっておのおのの実験前に測定した清水性能を基準として、同じ吐出量に対する清水特性値と混合液の特性値との比、すなわち揚程比  $C_H$ 、動力比  $C_P$  および効率比  $C_\eta$  (以後一括して清水比と称する) によりそれぞれの結果を比較した。

### 3.4 実験に使用した固形物

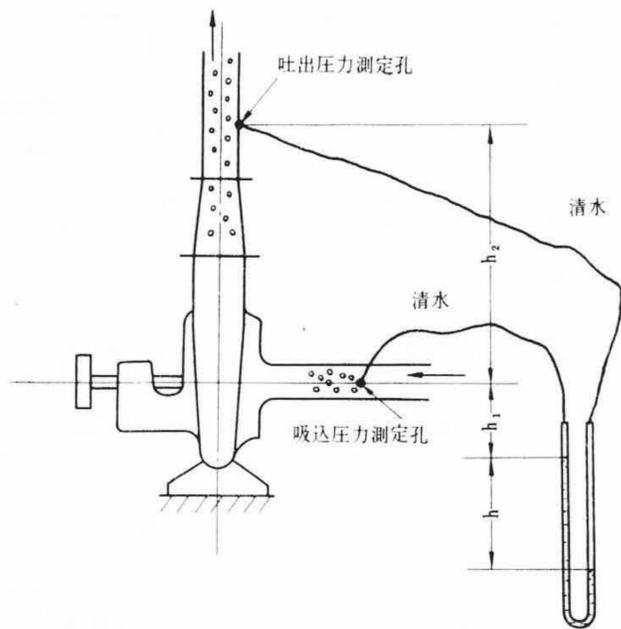
実験に使用した固形物は石炭(3種類)、砂(5種類)、ジルコンサンド(1種類)である。これらの比重と粒径を第3図に示す。

石炭は三池特上粉炭(発熱量  $6,930\text{kcal/kg}$ ) を粒径によりあらかじめ3種類に選別したものを購入した。これらを石炭1号(平均粒径  $d_m=2.9\text{mm}$ )、石炭2号( $d_m=1.05\text{mm}$ )、石炭3号( $d_m=0.22\text{mm}$ )と本報告では名付けてある。またそれぞれの粒度分布は第4図に示すとおりである。

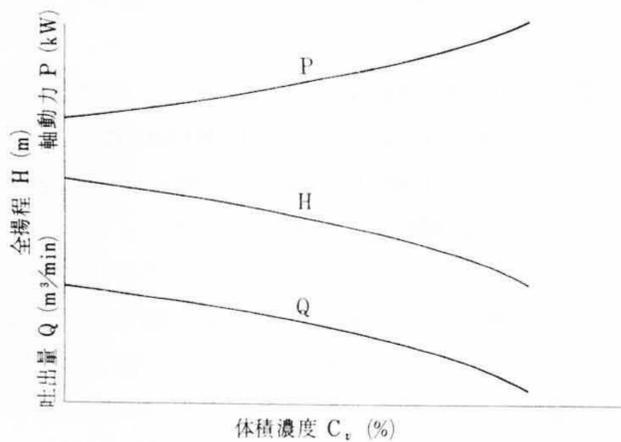
砂は第3図に示すように、砂の粒径により5種類に分類された。これらを本報告では砂1号(平均粒径  $d_m=3.9\text{mm}$ )、砂2号( $d_m=1.45\text{mm}$ )、砂3号( $d_m=0.78\text{mm}$ )、砂4号( $d_m=0.35\text{mm}$ )および砂5号( $d_m=0.18\text{mm}$ )と名付けた。第5図はこれらの粒度分布である。砂1号、砂2号、砂3号および砂4号は福島県久野浜海岸のものであり、砂5号は一般に鑄物砂の瀬戸6号として使われているも



第6図 ジルコンサンドの粒度分布



第7図 マノメータ接続図



第8図 実験結果(バルブ開度が一定の時)

のである。

ジルコンサンドは第3図に示すように非常に重い砂で比重が4.63である。また平均粒径は  $d_m=0.18$  mm であり、粒度分布は第6図に示すとおりである。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 データ整理に用いた計算式

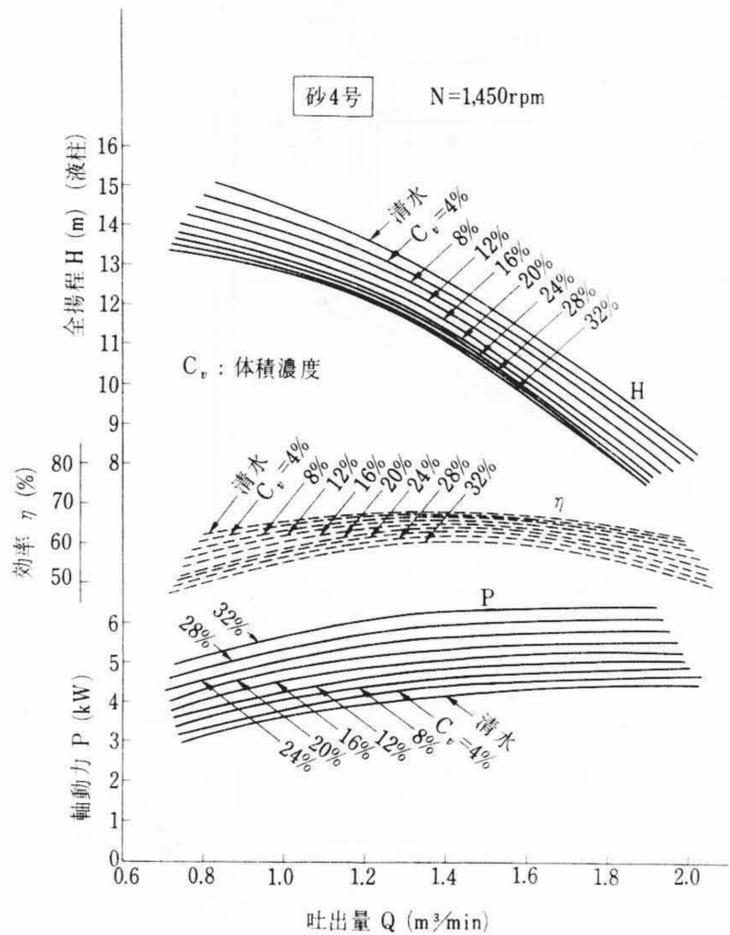
本研究においてデータ整理に用いた計算式は次のとおりである。

(1) 混合液の比重

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (1)$$

(2) 混合液の体積濃度(正味)

混合液の体積濃度は  $C_v = V_s / (V_w + V_s)$  と定義される。この式



第9図 砂混合液を輸送する場合の性能

を変形すると、

$$C_v = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

(3) ポンプの全揚程

ポンプの全揚程は第7図に示すように、吸込圧力測定孔と吐出圧力測定孔との間に水銀柱マノメータを入れて測定した。したがって次の式が成立する。

$$P_d - \gamma h_2 + \gamma_w (h_2 + h_1 + h) = P_s + \gamma_w h_1 + \gamma_{Hq} \cdot h \dots\dots\dots (3)$$

また吸込圧力、吐出圧力測定位置の管径が等しいため、圧力で表わされたポンプの全揚程  $P$  は  $P_d - P_s$  に等しい。したがって(3)式から

$$P = h(\gamma_{Hq} - \gamma_w) + h_2(\gamma - \gamma_w) \dots\dots\dots (4)$$

となる。これは液柱で表わすと

$$H = \frac{1}{\gamma} \{h(\gamma_{Hq} - \gamma_w) + h_2(\gamma - \gamma_w)\} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

(4) ポンプ効率

$$\eta = \frac{0.163 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{P} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (6)$$

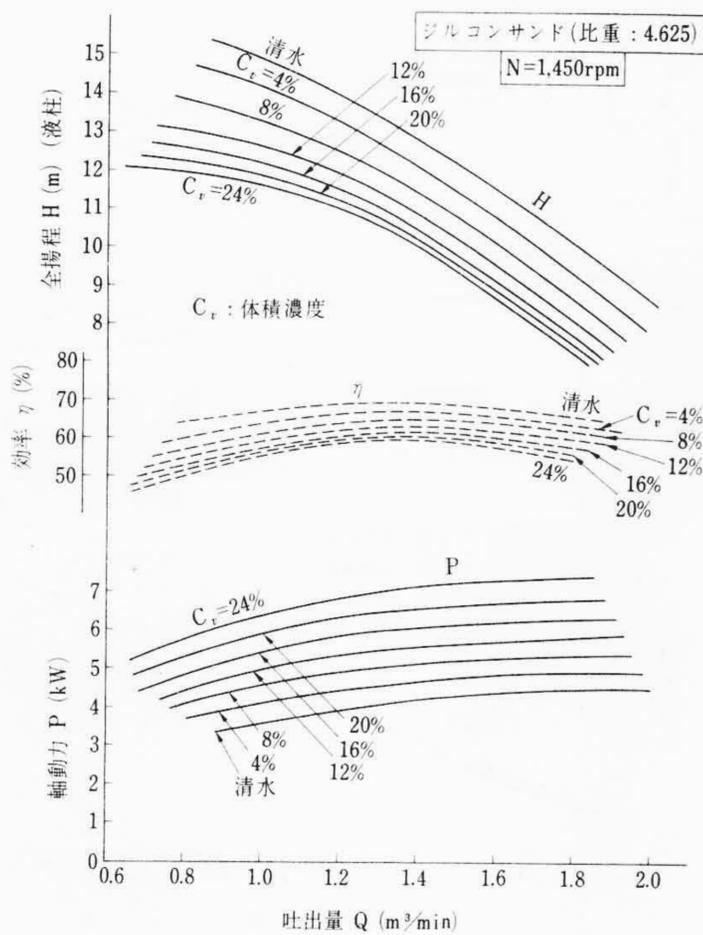
##### 4.2 混合液の濃度が性能に及ぼす影響

実験に際しては3.3項に記したように、あらかじめ吐出量調節用バルブの開度を数種にきめておき、おのおのの開度において混合液の濃度を变化させ、そのときの全揚程、軸動力および吐出量を測定した。測定結果は、吐出バルブの各開度ごとに第8図のような線図で表わされる。これらの図を基として体積濃度をパラメータとしたときの諸数値の变化状態を求めた。

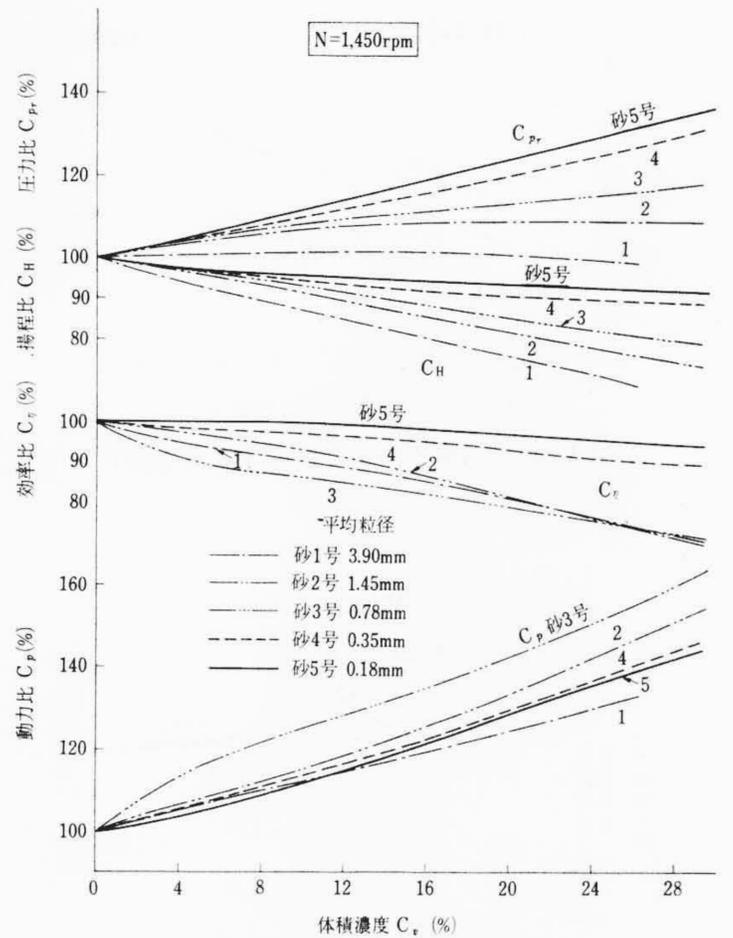
第9,10図はその結果の一部である。これらの図は横軸に吐出量を取り、縦軸に全揚程(液柱表示)、軸動力および効率をとったものである。

##### 4.3 固形物の粒径が性能に及ぼす影響

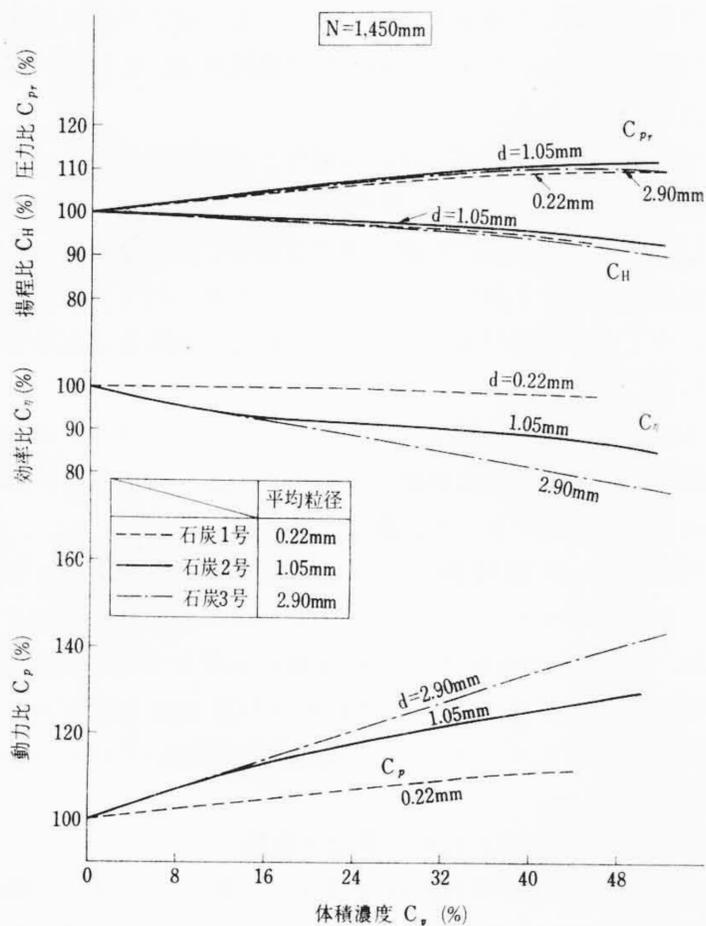
第11図は石炭1, 2, 3号を使用した実験結果を基として粒径の变化に対する性能の变化を図示したものであり、横軸には体積濃度



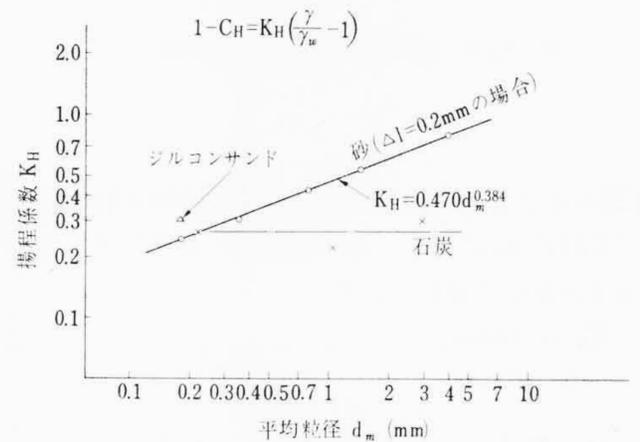
第10図 ジルコンサンド混合液を輸送する場合の性能



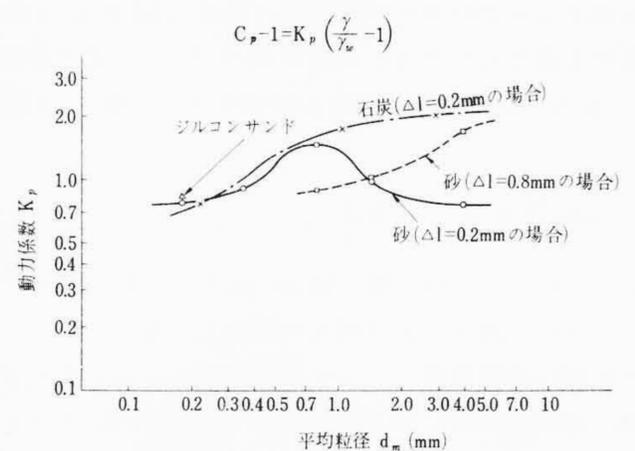
第12図 砂の粒径の変化に対する性能の変化



第11図 石炭の粒径の変化に対する性能の変化



第13図 固形物の粒径と揚程係数との関係



第14図 固形物の粒径と動力係数との関係

$C_V$  を、縦軸にはそれぞれの清水比をとった。これによると揚程比  $C_H$  および圧力比  $C_{Pr}$  は粒径の変化にかかわらずほぼ一定である。しかし動力比  $C_P$  は粒径が大きくなるに従って大となり、効率比  $C_\eta$  は粒径が大きくなるに従って小さくなっている。

第12図は砂1, 2, 3, 4, 5号の実験結果を基にして粒径の変化に対する性能の変化を図示したものである。この図によると揚程比  $C_H$  および圧力比  $C_{Pr}$  は砂の粒径が大きくなるに従って小さい値を示している。これに対し動力比  $C_P$  および効率比  $C_\eta$  の大小の順序は砂の粒径の大小の順序と一致していない。

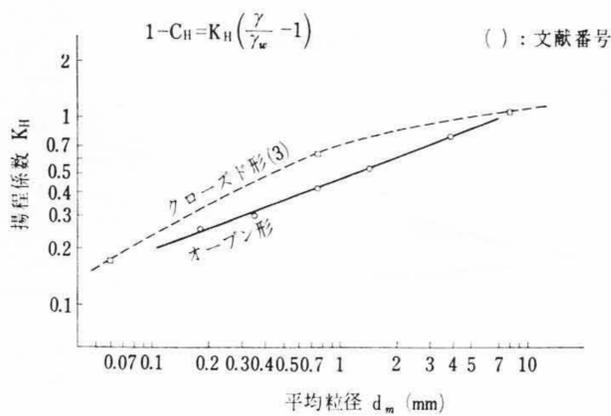
これらの結果から、次式で定義された揚程係数  $K_H$  および動力係

数  $K_P$  を算出し図示すると第13, 14図のようになる。

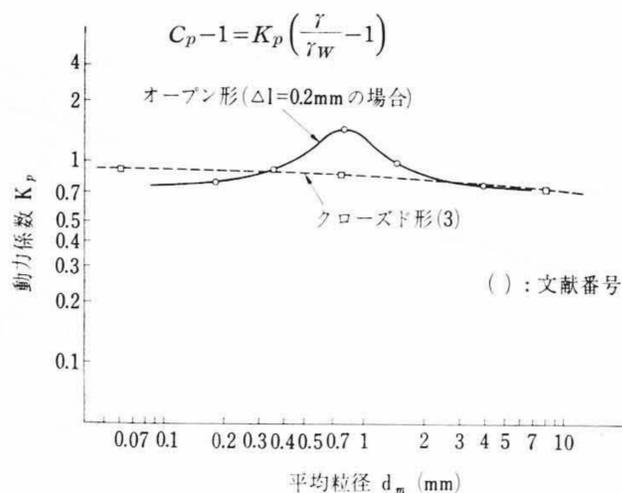
$$1 - C_H = K_H \left( \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$C_P - 1 = K_P \left( \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right) \dots\dots\dots (8)$$

これらの図では横軸に固形物の平均粒径  $d_m$  をとり、縦軸に揚程係数  $K_H$  および動力係数  $K_P$  をとった。ただしこれらの  $K_H$  および  $K_P$  の値は数個所の濃度におけるおのおのの値を算術平均したもの



第15図 羽根車形状と揚程係数との関係



第16図 羽根車形状と動力係数との関係

である。

第13図に示すように砂の揚程係数  $K_H$  ( $\Delta l = 0.2 \text{ mm}$  の場合) は固形物の平均粒径  $d_m$  に対してほぼ直線的に変化している。これを直線とみなすと次式で表わされる。

$$K_H = 0.470 \cdot d_m^{0.384} \dots\dots\dots (9)$$

(7) 式と (9) 式から

$$H = H_w \left\{ 1 - 0.470 \cdot d_m^{0.384} \left( \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

となる。  $H_w$ : 清水時の全揚程

砂を輸送する場合のポンプ全揚程の低減に関する (10) 式と水平管内を流れる混合液の圧力こう配に関する (11) 式との関係を考えてみる。長谷川氏は水平管内における圧力こう配を (11) 式で表わした<sup>(3)</sup>。

$$i = i_w \left\{ 1 + \beta \left( \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

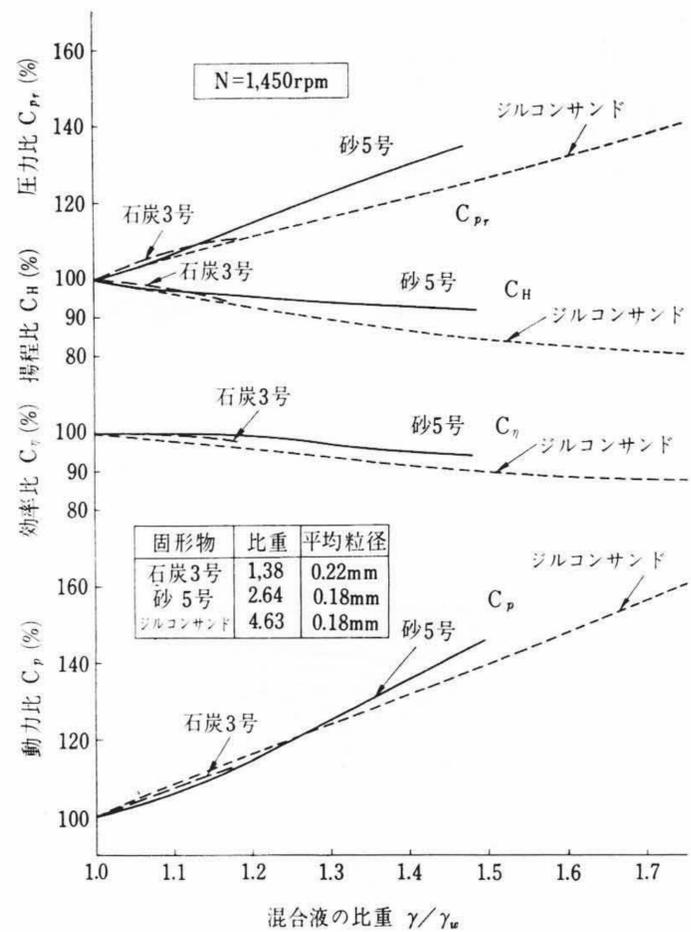
ただし、  $i$ : 混合液を流す場合の圧力こう配

$i_w$ : 清水を流す場合の圧力こう配

この  $\beta$  の値は土質係数といって砂の粒径によって変化する値で軟泥 ( $\beta=2$ )、細砂 ( $\beta=3$ )、粗砂 ( $\beta=4$ )、砂利 ( $\beta=5$ ) と与えられている。(10) 式と (11) 式とを比較すると、砂を輸送する場合のポンプの全揚程の低減量と、水平管の圧力こう配の増加量とが同じ形で表わされていることがわかる。

砂 ( $\Delta l = 0.2 \text{ mm}$  の場合) の動力係数  $K_P$  は第14図に示すように、ある範囲の粒径に対して急激に増加している。このように  $K_P$  が急激に増加する粒径の範囲は羽根車とサクシヨンライナとの間げき  $\Delta l$  の約3~5倍となっている。この原因を調べるため、羽根車とサクシヨンライナとの間げき  $\Delta l$  を  $0.2 \text{ mm}$  より  $0.8 \text{ mm}$  に広げて実験を行なった。その結果によると  $K_P$  は平均粒径  $d_m$  が間げき  $\Delta l$  の2倍付近より増加しはじめている。

結局これらの原因として次のことが考えられる。羽根車の羽根先



第17図 比重に対する性能の変化

端部の角が摩耗して多少丸みをもってくる。そこへある特定の粒径をもつ固形物がいり込み破砕または摩耗する。これらの現象により動力が吸収される。

また石炭の動力係数  $K_P$  は砂の場合と同様粒径が大きくなるに従って増加している。しかし砂の場合  $d_m = 1 \sim 2 \text{ mm}$  付近より  $K_P$  は減少しているのに対し、石炭の場合は減少していない。これは石炭の形状が砂の場合と異なって細長いものが多いので、羽根車とサクシヨンライナとの間げきに相当大きな粒でもかみ込まれるものと考えられる。

第15, 16図は本実験結果とほかのクローズド形サンドポンプの性能を揚程係数および動力係数に関しておのおのの清水時における最高効率点の吐出量において比較したものである。

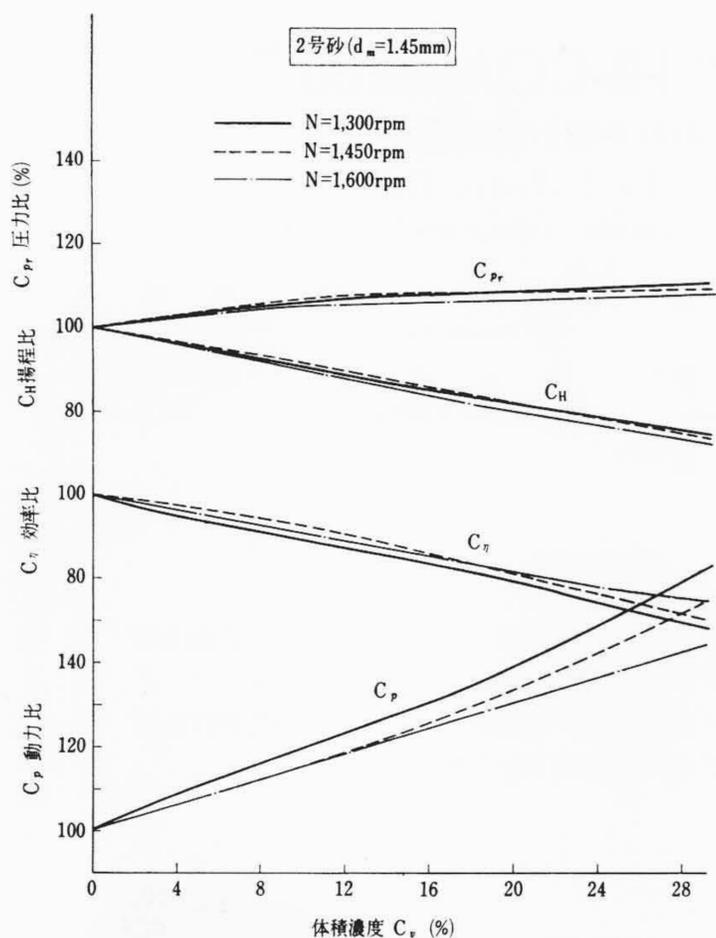
揚程係数  $K_H$  は第15図に示すように粒径  $d_m = 0.7 \text{ mm}$  付近において、本研究のオープン形よりもクローズド形のほうが大きくなっている。また動力係数  $K_P$  は第16図に示すように本実験のオープン形羽根車の場合には砂の平均粒径  $d_m$  が  $0.7 \text{ mm}$  付近において局部的に増加しているが、クローズド形羽根車においてはそのような現象は見られない。

#### 4.4 固形物の比重が性能に及ぼす影響

第17図は固形物の粒径がほぼ等しい石炭3号(比重=1.38)、砂5号(比重=2.64)およびジルコンサンド(比重=4.63)を用いたそれぞれの実験結果を基にして比重に対する性能の変化を図示したものである。横軸に混合液の比重  $\gamma/\gamma_w$  をとり、縦軸に最高効率点の吐出量における各清水比をとったものである。

もしこの固形物混合液が均質であり、粘性の影響が無視できるものと仮定すれば、第17図のおのおのの清水比の曲線は比重の相違にかかわらず一致するはずである。第17図の実験結果からは多少の差は認められるが、実用上は一致しているとみなしても大過はないと思われる。

本研究では比重一定の固形物を用いて実験したのであるが、ポンプを実際に使用する場合には種々の比重をもつ固形物が同時にポンプに供給されることになる。これらが混合して流動するとき、比重の相違により生ずる粒子の速度差から粒子相互間の衝突を招



第 18 図 回転数に対する性能の変化

く<sup>(6)</sup>ことなどにより、さらに付加的な損失が加わるものと考えられる。

#### 4.5 ポンプの回転数に対する相似性

砂の粒度を一定 (2号砂  $d_m = 1.45 \text{ mm}$ ) に保ちポンプの回転数を  $N = 1,300, 1,450$  および  $1,600 \text{ rpm}$  の 3 種類に変化させて実験を行った。これらの結果を第 18 図に示す。この図は横軸に砂混合液の体積濃度を取り、縦軸にそれぞれの回転数の清水時の最高効率点における清水比をとったものである。この図においてそれぞれの清水比の曲線が一致すれば、一般に清水を扱うポンプに用いられている相似法則の関係、すなわち  $Q \propto N, H \propto N^2, P \propto N^3$  の関係が混合液を取り扱う場合にも成立することになる。第 18 図の結果では揚程比  $C_H$  および圧力比  $C_{pr}$  はほぼ一致しているとみなして実用上さしつかえない程度である。したがって本実験の範囲 ( $N = 1,300 \sim 1,600 \text{ rpm}$ ) では、清水時に成立するポンプの相似法則をそのまま混合液の場合にも成立するとみなして実用上さしつかえないと考えられる。

## 5. 結 言

固形物輸送用ポンプに固形物(石炭, 砂, ジルコンサンド)を供給し、固形物の粒径および比重がポンプの性能に及ぼす影響を実験により調べた結果を取りまとめると次のとおりである。

- (1) 砂の粒径を変化させた場合、揚程比  $C_H$  は粒径が大きくなるに従って減少する。羽根車とサクションライナとの間げき  $\Delta l$  が  $0.2 \text{ mm}$  の場合、この関係は次式で表わされる。

$$1 - C_H = 0.470 \cdot d_m^{0.384} \left( \frac{\gamma}{\gamma_w} - 1 \right)$$

- (2) 石炭の粒径を平均粒径  $0.22 \sim 2.9 \text{ mm}$  の範囲で変化させた場合、揚程比  $C_H$  は粒径の相違にかかわらずほぼ等しい値を示している。動力比  $C_p$  は粒径が大きくなるに従って増加している。
- (3) 平均粒径一定 ( $d_m = 0.18 \sim 0.22 \text{ mm}$ ) において、比重の異なる固形物(石炭, 砂, ジルコンサンド)のそれぞれの混合液を輸送する場合のポンプ性能の変化は、同一混合液比重に対してそれぞれほぼ等しい。
- (4) ポンプの回転数を  $1,300 \sim 1,600 \text{ rpm}$  の範囲で変化させた場合の  $Q \propto N, H \propto N^2, P \propto N^3$  なる相似法則は清水時と同様、砂混合液時(砂の平均粒径  $1.45 \text{ mm}$ )に対しても成立すると考えても実用上さしつかえない。

なお本研究の企画推進に当たっては、日本大学寺田進教授にご教示をいただいた。また実験に当たっては園田保博君のご協力をいただいた。以上のかたがたに対して深甚の謝意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) 寺田： ハイドロリックコンベア，日刊工業新聞社，p. 122～169 (1962)
- (2) 堀田： 日立評論 22, 447 (昭 14-7)
- (3) 長谷川, 八木, 徳永： サンドポンプの性能ならびに管抵抗の実験，運輸技研，研究報告第 7 巻第 6 号 (1957)
- (4) スモルツイレフ (外尾, 永井共訳)： パイプ輸送，技術書院，p. 265 (1953)
- (5) N. Brook： Flow Measurement of Solid-Liquid Mixtures using Venturi and Other Meters, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 176, No. 6. p. 127 (1962)
- (6) Edgar Muschelknautz： Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Drukverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht, VDI-Forschungsheft 476, p. 14 (1959)