パ ル プ の 管 流 送

三 雲 英 之 助 *

Pipe Line Transportation of Pulp

Einosuke mikumo

(浮選研究会第23回例会特別講演に取捨加筆したもの)

1. 緒 言

固体粒または粉をパイプ内のガス（空気が普通）または液体（水が普通）の流動によつて輸送する方法は古くから行われているが、ここでは水による方法に限定してのべる。従つて運搬される材料は水に不溶解性のものに限ることはもちろんであり、また水に触れたために化学的变化を受けないことを前提としている。

粒のサイズとしては、炭鉱の採掘跡空洞を水力で充填したり、また石炭を水力で運搬するような場合、 2 mm 程度の細かいものから $40\sim 50\text{ mm}$ のような大粒に至るものもあるが、これからのべるのはつぎの群についてである。

不均等混合物 (a)	$0.2\sim 2.0\text{ mm}$
砂、粉炭、選鉱サンドなど
(b)	$50\mu\sim 0.2\text{ mm}$
細砂、微粉炭、泥鉱など
均等混合物 (c)	$30\sim 50\mu$
泥鉱、泥滓など
(d)	$20\sim 30\mu$
粘土、微粒灰など

これらのうち (a) は水流によつて押し流されると考えるべきであるが、(c)、(d) などは水と一体になつて混合泥状のものが、動かされると考えるのが自然であり、(b) はその中間と見るべきものである。

2. 管内流送機構

不均等混合物の上記 (a) のような程度については、管内での運動の様子は著しく複雑である。1個の粒についても進行中に管壁に度々衝突したり、水平に近く設置された管路では管底を滑つたり、あるいは転がつたりして動き、多量の粒子では管の横断面の下半部にほとんど

集中するなどのため解析的取扱は困難である。このような場合、運動状況にある仮定を設けて解析式をたて、その解析式の結果と、実験結果とを比較して両者間に著しい食違いがなければ、その解析式は妥当であり、従つてこの解析式で上述の実験以外の場合を推論できると考える以外に適当な説明はできない。

たとえば炭鉱の採掘跡空洞を岩石破片や砂で充填する方法として管内水流で、これらを流送する水力充填法あるいは同様の方法として水の代りに空気を使う空気充填法がある。

これらにおいて、水平あるいは傾斜管内の底部を岩石片が摺動しながら進行する速度は、水や空気の水速よりも遅いのでその速度差が、流体のセキトメ圧 (Staudruck) となる。このセキトメ圧を管横断面積に分布して考えた圧力と、水や空気だけが流れるための管の摩擦抵抗圧との合計が流送所要圧力であると考えてある解析式をたてる。この解析式の結果が割合に実際に適合するというので、この種のプラント設計にはこの解析式を採用する。

均等混合物の (c)、(d) の場合も、静かに放置すれば器底や管底部に沈殿するが、管内で相当な速度を与えれば前述のようにほとんど沈殿せず、1つの懸濁液として輸送される。その管内流送機構は考え方により不均等混合物の場合より一層複雑になるが、実用的には、水、油あるいは空気など均等流体の流動機構に準じて考えることで単純化している。

すなわちこれら均等流体の水平円管内流動についてつぎの Fanning の式

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} \gamma \dots\dots\dots (1)$$

が使われる。ここで l は管長 (m)、 d は管径 (m)、 w は流量を管横断面積で除した速度 (m/sec)、 g は (9.8 m/sec^2)、 γ は流体の密度 (kg/m^3)、 λ は抵抗係数、 Δp は l の間での圧力降下 (kg/m^2) である。なお上式の λ

受理 昭和35年2月16日

* 京 都 大 学 名 誉 教 授

はレイノルズ数 Re の関数で、

$$\lambda = \phi(Re) \dots\dots\dots(2)$$

で表われ、 Re は流体の動粘性係数 ν (m^2/sec) と上記 w および d との間のつぎの関係で示される。

$$Re = \frac{wd}{\nu} \dots\dots\dots(3)$$

ν はたとえば水について $0^\circ C$ から $20^\circ C$ の間では 1.8×10^{-6} から 1.0×10^{-6} の間に変化する。このような ν を(3)に入れて Re を求め、さらにこの Re を(2)に入れて求めた結果、均等流体でありさえすれば、また Re さえ等しければ、水、油、空気などの区別なしに λ は等しい値になるから(理論省略)、内面が円滑な円管なら(1)の値は計算できる。

ところが泥鉱などが水と混合した上述の均等混合物については(3)→(2)→(1)の順序での計算ができないのは(3)での w と ν との値が物理的に明確でないからである。

すなわち微粒とはいえ、水平管内なら泥の密度は管底と管上面とで異なり、また ν は、均等流体のように実験で値を測定することは困難のためである。

しかし従来(1)を使っているのは実験あるいは実際プラントでの成績から逆に λ を求め類似のプラント設計の参考としているに過ぎない。換言すれば整然とした共通理論と順序とから(2)の λ の推定ができない現状である。そこで上のように実際の成績から λ を求める場合でも、できるだけその λ が共通性があるようにしたいので種々の考慮が払われている。

たとえば Tilloston の Pipe Line Transportation of phosphate (Mining Engineering, March, 1952) の記述がそれである。すなわち、一般的に均等流体では

$$\nu = \eta / \rho \dots\dots\dots(4)$$

で表われ、 η は粘度 ($kg \cdot sec/m^2$)、 ρ は密度 ($kg \cdot sec^2/m^4$) であるが、Tilloston の記述では、 η として泥を形成する液体たとえば水だけの粘度をとり、密度として均等混合物の γ (kg/m^3) $\div g$ (m/sec^2) = ρ をとつて(4)の ν を計算しこれを(3)に入れている。

このように ν は本当の意味ではなく見掛け上のものであるが、種々の混合物についての λ をこのような考え方で統一しておけば比較上便利であると思われるが、なお研究の余地が大に残されている。

そこで結局上述のように一般的でない λ の値を実際の成績からなるべく多く集計して、これによつて(1)を使い設計に役立てるのである。

3. 実験および実地データ

主として(1)での λ についてのデータを数例についてのべる。

第1例 京都大学での実験

真比重3.5、粒度タイラメッシュ [m (%)]
+48 m (29.5)、65~80 m (20.8)、80~100 m (17.5)
100~150 m (10.4)、-200 m (7.4)

のような黄銅鉱精鉱を内径42 mm のガス管を使いつぎのような重量比濃度% (パルプ比重) で流送したとき

2% (1.02)、12% (1.1)、19% (1.16)、27% (1.24)、35% (1.33)

$$H_p = \frac{\Delta p}{\gamma} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}$$

の式での H_p と見かけパルプ速度 w m/sec (=パルプ流量を管横断面積で除したもの) との関係は第1図のようであつた。 γ は上記のパルプ比重にもとづいている。

第 1 図

別に同じ装置で清水 ($\gamma = 1000 kg/m^3$) について求めた $H_w = \Delta p / \gamma$ は図の実線のようにあつた。

すなわち実験範囲では $H_p / H_w \cong 1.0$ の結果になつたことは λ として純流体のそれをとつてもよいことになつたが、実験の範囲よりも w をなお低く、濃度をなお高くとれば、後述のような $H_p / H_w > 1.0$ のような部分が現われてくるであろうことを見逃した。

第2例 日立製作所での実験

堀田氏は内径100 mm の管を使い、 $w = 1.5 \sim 4.0 m/sec$ の範囲で $l = 6 m$ の間の流動実験で(岩石、粒度等詳細不詳)

重量比濃度%	パルプ比重
9.03	1.103

22.65	1.157
26.29	1.184
31.16	1.27

について、やはり第1図と同様の結果すなわち $H_p/H_w \cong 1.0$ を得ている。すなわち λ は清水の場合のそれをとればよいことである。

第3例 A 鉱山での実験

選鉱廃滓を坑内に充填するための管流予備実験で m (メッシュ)と(%)とが+65 m (23.3)、-65+100 m (11.3) -100+200 m (17.4)、-200+400 m (29.7)、-400 m (18.3) のものを流体サイクロンで重量比濃度 66.5% (59.0%のときもある) に濃縮し、これを内径1、2お

第 1 表
 λ in Formula (1)
66.5% pulp

1" pipe		2" pipe		3" pipe	
w m/sec	λ	w	λ	w	λ
9.98	0.014	2.62	0.028	1.1	0.062
4.39	0.019	1.32	0.086	0.43	0.081
1.91	0.073	0.55	0.443	0.30	0.144

第 2 図

よび 3 inch 管で、流速を変えて測定した結果(1)での λ は第1表のようになった。

このうち 1 inch 管を例にとり図示すれば第2図であり $H_p/H_w > 1.0$ であり、高速になれば H_p は H_w に近づく。この現象は、管径が細く、濃度が高く流速が低ければ一般的にほとんどいつも起る。

この原因はつぎのように考えられる。すなわち水平あるいは水平に近い管では、比較的粗大な粒が管底に近いところに集中し、 w (=水量/管横断面積) が低くなれば管底附近では堆積する傾向が起り、比較的細かい粒はこの堆積層の上の狭められた通路で、堆積物と摺動あるいは転がりながら運動することが考えられるからである。

第4例 B 鉱山での実測

尾鉱真比重2.8、(粒度および分布はつぎの数字以外不詳)

+65 m (10%以内)、-325 m (20%以内) のものを流体サイクロンで重量比濃度65%に濃縮し、3 inch 管で $w \cong 1$ m/sec 程度で流送した成績は $\lambda = 0.05 \sim 0.1$ であつたという。

第5例 C 鉱業所プラント

従来山許で脱水した銅精鉱の真比重 4.8で、65~325 mesh、ただし50% は -325mesh のものを脱水して3.6 km の距離の間索道で輸送していたが、これを重量比濃度68~72%に濃縮し、2.5 inch Pipe で流送することに変更した。

管路は161m の下り勾配、長さ3619m であるが、実流送に先立ち、試験として 濃度 52~59% のパルプを $w = 0.93 \sim 1.3$ m/sec で通したとき $\lambda = 0.023 \sim 0.045$ の範囲であつたという。

第6例 D 鉱業所プラント 1.

真比重 3.0、サンド70%、スライム30% (サンド、スライムの限界は200mesh) の選鉱尾鉱を重量比濃度 65% (パルプ比重1.8)に濃縮し、ポンプから内径 4 inch パイプを175m の間で65m 立ち上らせ、あとは1320m の坑道を同径のパイプで輸送し(終点近くで水平に 3 inch パイプが約40m 接ぎたされているが、この 3 inch パイプ内は自然流下) 坑内充填を行つている。ポンプの圧力計および送泥流速 $w = 1.3$ m/sec から(1)によつて逆算すれば $\lambda \cong 0.05$ となる。

第7例 D 鉱業所プラント 2.

上記尾鉱の重量比 29% (パルプ比重 1.24) のものを

延長920m、上り285m の地形で 5 inch パイプを使つて
第3図のように $w \cong 2 \text{ m/sec}$ で流送したとき $\lambda \cong 0.02$
であつた。

某選鉱場

Slime 30% -200 mesh } Tailing
Sand 70% (10%) -200 mesh }

$S = 3.0$

Pulp density 1.24

濃度 29.0 %

$w \cong 2 \text{ m/s}$

Pressur 35~40 kg/cm^2

Emsco pump

$$P = \lambda \frac{L}{\alpha} \frac{w^2}{2g} r + k r$$

$\lambda \cong 0.02$?

第 3 図

第8例 E 製錬所プラント

真比重2.7で、粒度メッシュ (%) が+20m (40)、+35m (19.5)、+48(18.5)、+100 (31.0)、+150(13.0) -150 (14.0) のニッケル鉱石の水砕を第4図のように延長約 830m (ポンプから立上り約 3m 以外はほとんど水平) の内径 6 inch、肉厚 5 mm のガス管で海へ捨てているが、(1)で計算すれば $w \cong 2 \text{ m/sec}$ のとき $\lambda \cong 0.02$ になる。

このプラントで 5 inch 管ではときどき閉塞したので 6 inch に変更した。また管の寿命は、直線部分 3~4 年(曲管部不詳)と見込んでいる。

第 4 図

4. 大規模の応用例

以上3の第1~第8例は全部わが国の鉱山や製錬所などの実例であるが、つぎにのべるのはアメリカでの例である。

粉炭長距離輸送

これは本文表題の「パルプ」には該当しないが参考のため掲げる。原料炭なら塊炭である必要がないので、粉炭を従来のように列車で運搬する代りに水パイプで輸送を行うことが考えられる。

アメリカで経済的見地から列車運搬とパイプ輸送との比較が行われた。すなわち 5 mm 大までの粉炭を標準とし 28~86mm 径のパイプで 200~1500 ton/hr (アメリカ・トン) を石炭と水との重量比が 25:75 ないし 40:60 の範囲で扱う 100mile (62km) 単位の輸送距離について 鉄道運賃に対し十分に勝っていることが強調されていた。(A Survey on the Hydraulic Transp. of Coal. R.W. Dougherty, Bureau of Mines. Report of Investigation. 4799, 1951) このような研究から、実際のプラントが実現した。

すなわち Ohio 州 Cadiz から Cleveland まで 110mile の間に トップサイズ 4 mm の石炭を水と 50:50 の割合で 4000ton/day の割合で輸送するプラントで 1956年9月に完成した。これは 35mile の節にわけてポンプ場を設け、混合物を内径 10inch 管で 3.5mile/hr の速さで輸送するものである。(Coal Pipe Line, Colliery Engg., Jan. 1957.)

坑内充填送泥

Idaho 州 Burke の鉛、亜鉛を産する Star 鉱山で、選鉱場から乾鉱量 19.7ton/hr の尾鉱を重量比濃度 48% のパルプで 3 inch 管により水平坑道内を 8600ft 送り、これからさらに立坑を利用して上部採掘跡および下部採掘跡へ送泥する例がある。(Hydraulic Fill pumped over 900 ft. distributed under high head., World Mining. Nov. 1959)

下部採掘跡充填には、上記水平坑道と立坑と連絡するところで、3 inch 管から放出されたパルプを流体サイクロンで重量濃度比 70% まで濃縮し、2 inch 管で 3700ft 3900ft、および 4300ft の下部坑道まで自然流下させ、上部採掘跡充填には、上記 3 inch 管終点から弁の切換えにより立坑内の等径管により、濃縮せずしてさらに鉛直 300ft だけ上げる。上記水平坑道より 300ft 上部の、この坑道からさらに上部 500ft、700ft、850ft、および 1000ft の 4 坑道に押しあげている。

大体の系統は上のようなものであるが、尾鉱真比重2.75、選鉱場からの送泥は -325mesh を相当に除きたいいわゆる de-slimed tailing で、比重 $\gamma = 1.43$ のものであるという。

ちなみに選鉱場から立坑までの 3 inch 管内の流速は 5.2ft/sec とのことであるから、 $l=8600ft$ に管路の勾配を加味して(1)により逆算すれば $\lambda=0.028$ になる。

5. ポンプ

普通の尾鉱スライムの重量比濃度40%程度までなら遠心ポンプで大した困難なく扱いうるが、サンドを相当量含む場合ことに真比重の大きい精鉱で比較的粗粒が多い場合は、遠心ポンプの性能は相当に低下する。第5図は

第 5 図

3の第1例で使った清水用遠心ポンプが濃度が増すに伴ない、等回転数について、ヘッドが低下する有様(単に傾向だけ表示)である。

泥鉱用あるいはサンド用として特別設計になるもの、例えばウィルフレ形サンドポンプにしても濃度が高い場合は類似の傾向を免れない。なお高圧を要するときには数個のポンプを直列に配置しなければならない。

つぎに相当に高圧を要するときはダイヤフラムポンプが適当するが、サンドが多いときは弁や弁座の摩耗は免れない。さらに高圧を要するときは往復ピストン、あるいは往復プランジャのポンプたとえば Emsco ポンプがわが国で使われる。4でのべた Star 鉱山での充填用ポンプも最高 $47kg/cm^2$ に達するので往復ピストンポンプ (Gardner Denver 社製) を採用し、わが国でも類似の用途の Emsco ポンプを $45kg/cm^2$ で使っている例もある。サンドを相当に含む尾鉱をこの種のポンプで扱うのに最も大きい欠点はポンプピストン、シリンダ内筒、弁および弁座の摩耗であり、ことにシリンダ内筒の摩耗の

ため、たとえば 100~200hr で使用できなくなるための取換費が最も大きい。この寿命は、内筒を窒素硬化、クロム鍍金、高周波焼入その他種々の方法で硬化しても、著しい差は見られない。Star 鉱山ではクロム鍍金 (Polished Chrome、或いは Etched Chrome) 内筒最長寿命は 5 inch 内径のもので400時間と発表している。

サンドポンプやダイヤフラムポンプを直列に多数配列しない限り、現在のところ上述のような G. Denver 形あるいは Emsco 形のほか適当したものが見当らない。

送泥管が鉛直あるいは鉛直に近い場合は、管下端に圧縮空気を吹込む「気泡ポンプ」として揚泥できる場合もある。ただし下端は相当に深く吸水槽に浸っていることを必要とするから、そのような工事のできる所に限る。また鉛直または鉛直に近い揚泥管なら管途中1ヶ所または数カ所に圧縮空気を吹込むことで泥の比重を小さくし往復ポンプの負担を軽く従って部品の摩耗を軽減することも考えられる。何とならば、サンドがピストンと内筒との摺動部分に入り込むのは泥の圧力が高いほど多いし、また強く突入するからである。

つぎに重量比濃度が65%程度になれば、容器に入れたこのパルプに茶サジを突込んでも容易に倒れないほどの粘度(従来の粘度計ではパルプ中の粗粒と細粒との平均粒度を測ることは困難である)なので、すべての種類のポンプで吸入側はいわゆるプラスバックにするが、それでもポンプ内への流入は容易でない。そのため往復ピストンポンプにしても極端な例ではピストン押のけ容量の12%しか流入しない場合がある。これに対しプラスバックの中へプロペラを入れ積極的にパルプをポンプに押込むような構造を試しているところもある。

つぎに相当に粗な粒子たとえば製錬所から出る水砕鍍のようなものを水で運ぶのに、その量が余り多くなく従って間歇的処理 (Batch system) で差支えないような場合には、粒群を貯槽に装入してから密閉し圧力水を貯槽に通じることにより、槽に設けられた吐出管の相当な管抵抗に打勝って輸送できる。

6. 管の摩耗

パルプ流送の歴史は比較的新らしいので管の寿命に關する数字の発表されたものはほとんど見当らない。しかもプラント設計に際し経済的に最も問題になるのは長距離輸送なら、管の寿命である。種類としては木管、セメント管 (ヒューム管)、エタニット管、鑄鉄管、鋼管 (ガスパイプを含む) などであるが、直管としてはやはり鋼管が(ことに小径の場合)最も広く使われる。水平直線管ではパルプ中の比較的粗粒が、管底部に集中して動くことすれば底部の摩耗が最も多いはずであるが、流速がある程度

低い場合には粗粒が沈殿するかあるいは動いても平均流速 w よりも低速で動くため、底部が保護される傾向もある。このため w をえらぶにはこのことも考慮に入れる必要がある。また直線管では数カ月あるいは数年毎に軸回りに、たとえば 90° 回転させて再設置することもある。

鋼管内部に玄武岩、あるいは銅緩などで裏付（鋼管を高速で軸回りにまわし、溶かしたこれらを遠心力ではりつける）したものなどが他の用途に使われているがこのようなものも参考になる。しかし $5 \sim 6 \text{ inch}$ 径までの鋼管（なるべく肉厚の出来合品）を直線部に使っているところで、特別に流速が高いとか粗粒が多いとかでない限り、予想寿命（この寿命で尾鉱処理費を最初に見積る）を概して上回っているようである。

7. 試 験

3 での多数の実例で(1)での λ を挙げたが、純流体と異なり一般的にその値を表わす公式などが未だないので、新しいプラント設計に際しては、実験的に λ を見出す必要がある。すなわちプラントに使用しようとするのと同じ直径の管につき $l(m)$ へだてて圧力測定孔を設け、予定の w で泥を通し差圧 Δp ををはかることにより(1)での λ を求めるのである。しかしこれは原理であり、実測にあたって、液体圧力計、丸形圧力計などのどの種類を使っても、管壁に設けた圧力測定孔から圧力計までの間の連絡管に泥が侵入するなどのため測定結果に誤差を生じ易い。

管壁の 1 部分に圧力により変形する部分を設けてこの変形量を予め既知圧力で検正した圧力計を使えば上述の欠点はないが、僅少の変形であるからこれを拡大する機

構などでやはり相当の誤差を生じる。そこで、圧力計を用いないひとつの方法を提唱する。この方法は太いパイプについては装置が大きくなりすぎるので実施困難であるが、細いパイプについては比較的簡単に行いうる。

第 6 図

第 6 図はそれで、溢流装置によつて任意の深さ H_p に保ちうる攪拌槽 A の下端に供試パイプを連絡し、泥流が定常状態になつてから、受槽 R をパイプ出口に持ち来たして流量を測定し、これと所要時間から w を算出することで H_p/γ から(1)より λ を求める。溢流高さを加減することにより H_p を変更し異なつた w に対する λ を求めうる。パイプは空気の溜らないように僅か上り勾配にセットする。

このようにして求めた λ には攪拌槽 A の出口の抵抗を含むが、これは僅少であり、またプラント実施に当つては安全側の誤差なので無視できる。（終り）