

# 固体と液体

愛媛大学工学部機械工学科 鮎川 恭三

## §1. はし が き

固体と液体の二相流いわゆる固液二相流は、自然現象として、河川の浮遊流砂や海岸の漂砂などの現象として土木工学において古くから関心をもたれているのみならず、生体内の血液の流れで血球を粒子として固液二相流的な取扱いをする研究などあり、また、これに関連した技術的な問題として流動層や攪拌などの化学装置や後に述べるスラリー輸送など機械工学、化学工学、土木工学をはじめとする広い範囲においてとくに最近多くの関心を集めている。

液体をパイプラインで輸送するとき、連続的な輸送が可能であり、また輸送物を外部の環境と隔絶させた輸送ができるなど多くの利点があることに着目して、固体と液体の混合物の輸送あるいは、固体の輸送のために固体と液体と混合してパイプラインを通じて輸送する技術がスラリー輸送として近年とくに多方面で興味もたれてきている。

スラリー輸送は、土木建設関係や化学装置で従来からしばしば用いられており、さらには、鉍石や石炭などの原材料の輸送手段としてもかなり以前から関心もたれ、一部では実施に移されている。さらに近年とくに生活環境の保全と関連して、社会的な問題として注目を集めている都市廃棄物の集中処理システムにもスラリー輸送の可能性が考えられてきている。

固液二相流は、輸送される固体と媒体としての液体との間の相互作用がきわめて複雑でありまたそれが固体の性状によっても異なってくるなどのことから、単に水や空気のような日常みかける流体の性質とはかなり違う性質を示し、さらにスラリー輸送においては、固体を輸送可能な大きさにし、液体とできるだけ均質に混合

するスラリーの調製と輸送管路での固体の管壁への衝突や付着、さらにはスラリーによる管の腐蝕など管材料に関連した問題、輸送のための加圧に用いるポンプ、固体の混入方法、粒子の分離、輸送系のシステムとしての安全性など多くの問題を含んでおり、このような点から、固液二相流の研究と、その技術的な応用は、従来の理学工学上の多くの専門分野にまたがった問題であり、これらの各分野での研究成果や技術的な成果の交流と協力がとくに求められる。国際的にはイギリスのB. H. R. A. (The British Hydromechanics Research Association) が1970年に、管内での固体粒子の輸送についての国際会議をはじめ組織し、その後、隔年ごとに開催するというので昨年、第2回の会議を開催し、このような各分野の交流と協力への努力をすすめており、またIUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) でも、固液、固気の二相流についてのさまざまな問題を取りあげてシンポジウムを開催するなどの努力がなされている。わが国でも近年、二相流全般にわたって同様な努力が各方面においてなされはじめてきている。

ここでは、固液二相流の応用技術としてのスラリー輸送に関連した最近のいくつかの話題について述べるとともに、固液二相流の研究の現状と問題点について思いつくまま述べてみたいと思う。

## §2. 最近の話題

固液二相流に関連した技術として最近関心をもたれているものに、輸送対象物を容器に入れて、この容器をパイプラインを通じて液体と共に輸送するカプセル輸送、先に述べた都市廃棄物の処理システムの一環としてのニューモスラ

リシステム (Pneumo-slurry system) , スラリー一運搬船を用いて鉍石などの長距離輸送などの問題がある。ここではこれらについて、その考え方の由来や、問題点についていくつか述べてみたいと思う。

## 2. 1 カプセル輸送

通常のスラリー輸送では、輸送する固体の大きさが制限され、また輸送物が輸送媒体の水などによって変質を起さないような性状のものに限られるなどの欠点を持ち、さらに前にも述べたようにスラリーの調製や脱水などに多額の費用を要するなど多くの困難な問題が伴い、さらに輸送は一般に微細な粒子の方が容易であるがこのような微細な粒子ほど水との分離がむづかしいなどのいくつかの欠点をもっている。このような欠点を克服するために固体を容器に入れて液体中に混入して輸送することで、輸送物の性状を問わず、また高濃度輸送が可能で調製脱水が不要であるようなパイプラインによる連続的な輸送を可能にする技術がカプセル輸送である。古くから書類を容器に入れ、管を通じて空気によって圧送する移送装置が用いられているが、この考え方を固形物などの連続輸送システムとして用いようとするものと考えてよい。

カプセル輸送は、上述のスラリー輸送の欠点を補うにとどまらず、外的環境との直接接触がなく、輸送物の性状をえらばないことから、気候条件などが苛酷で道路を通過する輸送や、鉄道輸送などでトラブルが多い地区間の貨物輸送システムとしての将来が有望であり、また流体と輸送物が直接接触することがないので、固体液体を問わず資源や生産物の輸送ラインとして今後ますます発達すると考えられる石油のパイプラインを用いることも考えられる。さらに産業廃棄物や都市廃棄物など道路や鉄道での輸送では、悪臭、騒音、交通渋滞などが起り、また有害物質を含むことへの危惧などから住民感情や環境保全上問題が多いような場合に、カプセル輸送ではこれらの問題が生じず、また、輸送物と流体の直接接触による水の二次汚染の懸念がないことなどから、廃棄物処理施設の大型化集中化とともに、これら廃棄物の処理システム

の一環としてカプセル輸送は、当然今後開発がすすめられるべき技術であろうと思われる。

カプセル輸送は、現在主にカナダを中心にして精力的な研究がすすめられている<sup>1)</sup>。この発端となったのは、1959年のカナダにおける水と油の二相流についての研究であり、このときの油の挙動が固体と類似していることから、管のまった容器に輸送物を入れて送ることが考えられ、主に円柱形と球形のカプセルについての実験が行われている。

1960年にはカプセル輸送についての包括的な研究計画が Research Council of Alberta においてつくられ、1965年には、管径 20" のパイプラインで 16" で 514 ポンドの油を入れたカプセルを 109 マイル移動させるなどの大がかりな研究開発を行っている。この間政府と多数企業、大学などのこの問題に対しての協力態勢がつくられ、1967年にはこれらの合意の下に多額の研究費を得て、4" 管で 3900 ft の管路をつくり、この管路での一応の研究成果を1968年にまとめるなど組織的な研究を、単一のカプセルのみならず、カプセルを 50~100 個つないだものを移動させ、カプセルの移動速度と平均流速、圧力降下と平均流速、消費動力と移動速度などの関係や、移動時や過渡状態での圧力変動の影響、また固体容器だけではなく、微粉炭をペース状にねったものを油の輸送ラインの中に入れて送ったときの安定な輸送の可能性、さらにこれらの実用的な研究に併せて 偏心円柱のすき間の流れの理論的研究などの基礎的な研究などを多方面にわたって非常に精力的におし進めている<sup>1),2)</sup>。

今後に残された問題点としては、管内流れとシリンダ、球の相互作用や、広い速度範囲での管内の物体の運動をもっと詳しく知ること、シリンダや球が列をなしているときの運動、この流路での弁の急閉鎖やポンプの始動などのおきの水圧変動の特性、カプセルがある間隔でつぎつぎにラインに送られるときのカプセル運動の安定性、管やカプセル表面の摩耗、腐蝕、カプセルの形状のうちどのようなものが有効か、などがあり理論的実験的に解決することを求めら

れている。また、機構上の問題として、カプセルへの輸送物の封入、とり出し機構、管路への供給とそれからのとり出し機構、流体を加圧するためにカプセルを通すことができるポンプ、あるいはバイパスを設けてカプセルを加圧部で分離して再び加圧された管路にもどすための適当な機構などの開発研究が求められている。

## 2. 2 廃棄物輸送システム

現在の都市廃棄物や産業廃棄物の収集と輸送は、発生源が個人の住居や工場などにあるため一般にはトラックが用いられる。ところが前にも述べたようにトラック輸送では、収集個所で悪臭や害虫、ねずみなどの発生など住民に不快感を与えるとともに非衛生的である場合が多いこと、ひんぱんな収集が必要であり、またこのような非生産的な仕事に貴重な人力を使わなくてはならないこと、最近の車の増加による都市交通の渋滞現象と、それに伴う排ガス騒音による生活環境の悪化の問題が生じている中でこの輸送を行わなくてはならないことなど、多くの悪条件を供えており、他の輸送手段より弾力性はあるというもの、この輸送方法は多くの問題をはらんでいる。さらに近年の産業の発達と生活水準の向上に伴って廃棄物の量は急激に増加してきており、また質的にも多様性を増してきているので、輸送手段についての矛盾はますます激化していくものと考えられる。このような現在の主としてトラック輸送に頼っていることより生じる矛盾を解決する一方法として、外的環境との接触がないというパイプライン輸送の特質を生かすことが考えられる。この方法は廃棄物を収集してこれをスラリーに調製して下水とともにパイプライン輸送を行って下水処理施設で処理を行うというもので、これが実施されれば、上記のトラック輸送に伴う問題点は解消し、環境保全対策も有効な手段となると考えられる。

このような廃棄物輸送システムにおいて、空気輸送を用いる場合には、かなりの大きさの物質までは、破碎などを行う必要がなくそのまま輸送できる利点があるが、一般には1~2 km位までの近距離輸送でないと経済性がなく、また

廃棄物の量が多量の場合には、実施することができないなどの欠点がある。空気輸送による廃棄物輸送としては、20ないし24 inの地下に埋没された管で1.7マイル離れたごみ焼却施設まで各住居の廃棄物を収集輸送し、そこで発生した熱を住宅地域に送っている実施例がある<sup>3)</sup>。

ところで、スラリー輸送やカプセル輸送の場合には、空気輸送の欠点である輸送距離は、長距離であることでむしろ経済性が上り、また空気輸送に比して多量の輸送でも耐え得る利点がある。しかしながら、空気輸送に比して輸送される物質の大きさに制限があり、破碎機や切断機を設置し、輸送できる状態に調製することが求められる。ところでこのような破碎、切断機は一般に大きくまた高価であり、騒音の発生も大きいなどの点から、またカプセル輸送の場合のカプセルへの廃棄物の封入装置も同様な理由から廃棄物発生源である各住居、工場にこれを設置することはむづかしい。

以上の両者の利点、欠点を組合せた形で、廃棄物輸送システムとして考えられたのがニューモスラリーシステムである。このシステムでは、廃棄物の発生源である各住居や、工場などからの収集には空気輸送を用いて、廃棄物を1ヶ所に集めここで破碎してスラリーに調製し、長距離パイプラインを通じて輸送を行うことで両者の利点を生かすことを考えている。このシステムは、廃棄物発生源である各住居に投入口を設けるときはトラック輸送より高価になるが、団地などの場合や何戸かの住居をまとめて投入口を設けるようにすればトラック輸送よりも経済性が良いという試算がある<sup>4)</sup>。

このような廃棄物のスラリー輸送の実験によると、管路での圧力降下は一般に水の場合に比してかなり大きい。これを実験に用いた廃棄物の構成成分別にその割合に応じて、単独にその成分を混入して流した結果と比較するとき図1に示すように廃棄物の圧力降下の大きさはその成分中紙類の単独での輸送の際の大きさとはほぼ同じであり、圧力降下には紙の影響が大きいことが報告されている<sup>4)</sup>。

このような廃棄物輸送システムでは、投入時

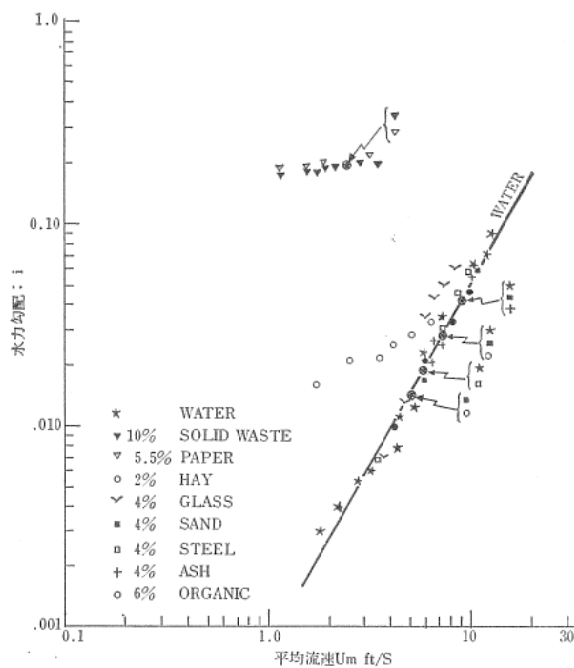


図1 廃棄物輸送における圧力降下

における廃棄物の性状の管理が一般になされにくいと、とくに健康や生活環境上有害な廃棄物の投入されたとき、最終的な処理施設においてこれを無害化し、有害物質を排出しないような汚泥および排水処理を行うことがとくに求められる。このためには、スラリーに調製して輸送する形式よりもカプセル輸送が廃棄物を水と混合しない点で有利であろうが、カプセル輸送の場合、容器やそれへの封入装置などが必要である。さらに破碎・切断機の設置場所や設置方法なども、それらから発生する振動や騒音が、周辺環境に害を及ぼさないような配慮が必要であり、以上を考え合せてシステム全体としてなお一層の検討が求められる。

### 2. 3 鉍石輸送

鉄鉍石などの産地とそれを利用する製鉄所など工場群の間の距離は一般に非常に遠く、特にわが国においては外国からの輸入がきわめて多い。このような場合の輸送手段は船であるが、石油輸送にみられるタンカーによる輸送が経済的に有利であることは周知のことであり、鉍石などの輸送にも、この方法が考えられ始めて来ている。このような輸送の際には、船泊停泊時間をみじかくするために港での荷役を容易にか

つ早く行うこと、原産地から積出港までまた荷揚げから工場までの鉍石類の輸送を容易にすることが求められる。このような目的のために従来は、製鉄所などの工場内に阜頭をつくって荷揚げするなどの方法がとられてきたが、大型タンカーによる輸送では、どこにでもこのような阜頭をつくるわけにはいかず、また荷揚、積出しに、今迄のやり方をとれば長時間を要することになる。このような問題を解決するために、鉍石などの輸送に荷積、荷揚げが容易で、連続輸送が可能な特長を生かしてスラリー輸送を用いることが考えられ、各方面で開発をめざして検討がすすめられている。

この考え方<sup>5)</sup>によれば、原産地で破碎されスラリーに調製された鉍石をパイプラインで積出港の貯蔵地に送り、ここよりタンカーにやはりパイプラインで積込みを行い、タンカーで輸送して、積おろし港に送り、タンカーの船槽内で高圧の水を噴出してスラリーを流動化したのちパイプラインを通じて工場に送って脱水し、生産工程に原材料を供給するというものである。このような輸送の場合、実験によれば最も高濃度に、しかも適当な流速で送ることができる粒子径の範囲がある<sup>5)</sup>ようで、これより粒子径が大きいときは濃度を高くすることができず、また粒子の移動に高速流を必要とすることから損失が大きく、また粒子径が小さすぎるときは、スラリーの粘度が大きくなることから可能な輸送濃度が低い値に制約されることになると報告されている。また粒子径が小さすぎるときには脱水の過程にも多くの困難を伴っている。

### §3. 固液二相流の性質

前節でスラリー輸送を中心として最近話題になっているいくつかの実験的な技術について述べてきた。

ところで、スラリー輸送の管路系の設計に当たっては、流れの圧力降下や水平管で粒子が管底に沈澱し静止層をつくりはじめる限界流速、系の安度性などが重要な問題になる。本節ではこのような問題にとり組むための基本となる固液二相流の性質についてその研究の現状や問題点

について述べることにする。

固液二相流は、流体中に固体粒子が懸濁して流れているわけであるが、これを流体の運動という観点からみると固体粒子の表面は、流体の運動に対しての境界になり、ここで流体と固体表面との相対速度が0であるという条件を満足することが求められ、しかもこの境界面に働く流体による圧力と粘性摩擦力の合力という形で粒子が力をうけることから境界条件を与えるべき境界面である固体粒子が運動方程式に従った形で運動を行い、しかも一般には境界面の形状は複雑であるなど流体と粒子の運動が結合したきわめて複雑な現象を呈することになる。

単純な形状の境界面をもつ流体の流れに対してすら、流体運動を理論的に厳密に解析することは困難な場合の多いことからみて固液二相流では、厳密な解析的な議論を現段階で期待することは困難である。

二相流を取扱う近似的な考え方は、大別して二つに分かれる。その一つは、固体粒子とその近傍での流体の相対速度が一般には小さく、また粒子径が小さく濃度が低いときは一つの粒子に着目するとき、この粒子のまわりの流体運動が他の粒子の存在の影響をあまり受けないので着目している粒子のまわりの流れを流体の慣性力を無視して運動方程式を線型化した形で求めこれをさらに多くの粒子を含む大きな体積要素で平均化して、固液二相流を粒子の存在の影響を平均化して、水や空気のような一成分の流体として扱う方法である。この考えは、粒子径  $d$  に比して、平均化する体積要素の大きさ  $l$  は、平均化が十分意味がある程度に十分大きく、さらに問題にしている系の大きさ（例えば管の直径） $L$  がこれに比してさらに十分大きいときのみ用いることができる。

この考え方に従って、低濃度の固体粒子の懸濁液で、粒子が混入したことによる見掛けの粘性係数の増加を示す関係式を得たアインシュタインの研究<sup>6)</sup>が古くから有名である。スラリーを速度勾配と摩擦応力の関係すなわち流動特性が水や空気のようなニュートン流体とはちがう性質をもつ流体であると考え、この流動特性を

実験から求め、ニュートン流体と同様な計算法に従って、圧力降下などの算定をするしばしば用いられる方法<sup>7)</sup>もここで述べた考え方に基礎をおくものであるが、最近スラリーの流動特性を単に実験的に求めるのではなく、この方法に従って解析<sup>8)</sup>を行い、今までの結果を基礎づけるとともに粒子の性状による流動特性のちがいにメスを入れ、将来への展望をひらく努力がなされてきている。

もう一つの考え方は、粒子と流体とをわけて取扱い、粒子を点と考えると粒子が流体からうける力を、この点に働く力として考える近似で上に述べた考え方に比べればやや近似の程度は粗いが、かなり大きな粒子の場合にまで適用することができるものである。流れの中にある物体がうける力は、物体の抗力係数や揚力係数といった形で理論的にも実験的にも多くの場合に従来から結果が得られているのでこの結果を用いることができる場合が多い。この考え方に従えば、流体の運動と粒子の運動は、それぞれ別個の基礎方程式で記述され、流体と粒子の相互作用は、粒子が流体からうける力と流体に対するその反作用という形でこれらの方程式系に入ってくる。この考え方に立つものに、管路内での二相流の圧力降下の解析に、管断面上の速度分布を考慮せず平均流として取扱う一次元的な考え方で、粒子が付加されたことによる圧力降下の変化すなわち付加圧力降下を、粒子に加わる力と付加圧力降下の釣合という形で解析し、この簡単化からのずれをうめるために修正係数を導入し、流れの相似関係から求められるパラメータの関数としてこれを決定するという方法が従来からしばしばとられ、二相流の圧力降下の解析に有用な実験式が多く得られている。しかしながらこの解析の多くは、粒子が流体からうける力の反作用を流体に対して考慮しておらない点で、力学的には不完全であり、また、粒子がうける力に一樣流中の単一粒子がうける力を用いていること、モデルが簡単すぎることなど固液二相流の流動機構に立入った本質的な探究にはかなり遠いものである。

これとは別の方向として、やはりこの考え方

に立って固液二相流を、液相と固相にわけて連続体として扱う二流体モデルの取扱いがなされており、管内の二相流の流動状況<sup>9)</sup>や、流れの中での粒子の拡散問題<sup>10)</sup>などに多くの成果<sup>11)</sup>をあげつつある。この方法では、前の一流体のモデルよりは近似は粗いが、一流体モデルでの、粒子径の制限を越えても扱い得ること、一流体モデルで得られる流れの流動特性が、実際上の計算ではかなり面倒な表式になり、これを管内流れなどに適用することはむづかしい場合が多く、このようなときに、二流体モデルは有効な役割を果すことができるものと考えられる。この二流体モデルを、例えば管内流などに適用する場合の問題点としては、粒子に働く力が、他の粒子の存在の影響をうけること、流体の流れに速度勾配がある中で力を考えなくてはならないこと、後に述べるように流れが乱流であるときに殆んどであること、重力場の中での流れであり、粒子が重力をうける結果として水平管などでは管壁と粒子との衝突を考慮しなくてはならないことなど未だ単一粒子の場合についても十分な知識がない事柄が解析に含まれて来るので粒子の運動方程式を扱う際、現在の知識ではかなり限られた範囲での取扱いしかできないことがあげられる。

実際にわれわれが遭遇する二相流では流れが乱流状態の場合が多いが、管内流れでは一相流の場合に、乱流状態での多くの実験的なデータは得られ、かなりその機構は、明らかにされているが、未だ理論的に確立された結論が得られていない現在、粒子の混入による乱れの機構の変化を議論することは、かなりの困難を伴っている。ところで固液二相流では、固気二相流と異って、慣性力と、粒子が流体からうける力が、ほぼ同程度なので流体に対する粒子の追従性が良く、流れの中で、固体粒子は乱れによって拡散され、粒子に働く力と、この拡散のバランスが断面上での濃度分布を形成することになるので、固液二相流が乱流状態にある場合、流れの機構は乱れによって非常に大きく影響される。このような乱れによる粒子の拡散は、当然乱れのスケールや粒子径などの粒子性

状に関連してくるが、拡散係数についていくつかの研究<sup>12)</sup>がみられるものの、乱流現象の複雑さを反映して、まだ十分な結果が得られているとはいえない。さらに粒子の存在は、粒子が流体からうける力の反作用のほかに、流れを連続体として取扱うとき、粒子の存在する部分は乱れのエネルギー散逸に関与しないなど流体の乱流構造そのものにも大きな影響を与えることが予想される。この問題についての実験的理論的研究も<sup>12),13)</sup>かなり行われてはいるが、粒子の混入による乱流測定のみづかしさや、一相流の場合の乱れの構造そのものが十分明らかではないことを反映して、今後一層の研究がなされる必要があると考えられる。

以上述べたように、固液二相流の性質についての研究はかなり広くなされてはいるものの、現象の複雑さを反映して、その全貌を把握するにはほど遠い状況であり、今後の多くの研究の積重ねが必要と思われる。

このような状況にも拘らず、スラリー輸送系の設計に有用である圧力降下の実験式などは、従来からいくつか与えられているので、以下では管路とくに水平管路での圧力降下を中心に今までに知られている結果のいくつかを、それらの問題点を含めて簡単に紹介することにする。

水平管路での管断面上での固体粒子の濃度分布は前にも述べたように、乱流拡散と粒子に働く重力などの力のバランスによって、定常的な分布が構成されるが、粒子径が大きいときには重力の作用が大きく、管底に近いほど高い濃度を示し、とくに粒子が大きく乱れによる拡散がなされないときは、粒子は管底をとびはねあるいは、すべりころがる状態での輸送がなされる。これに反し、粒子径が小さくなるにつれて、重力の影響は小さくなり拡散が大きく作用する結果、濃度分布は一様になる。このような濃度分布の変化<sup>14)</sup>は、単に粒子径にのみ依るのではなく同一粒子径でも流速が大きくなるときは、乱れが強くなる結果として乱れの拡散作用が大きくなり、濃度分布は一様に近づく。また輸送濃度が高いときは、一般に乱れは抑制されると考えられているが、流体と粒子の相互作用に対す



る他の粒子の存在の影響が強くなる結果、重力の粒子に対する影響が弱まり、この影響の方が乱れの抑制よりも強く、結局、同一粒子径、同一流速でも濃度分布は、濃度が高いほど一様に近づくようになることが知られている。実用的に用い得るような圧力降下の実験式は、現在の段階では、一次元的な解析の上で修正係数を実験的に定めるやり方のものが殆んどであるが、これらの解析においては、上のような濃度分布をモデル化して、流れの流動様式を次のようにわけている。

- (i) 一様浮遊流： 管断面で固体粒子、濃度分布が一様であるもので、粒子径が小さく濃度が高いようなときに、この状態が実現される。
- (ii) 不均質浮遊流： 固体粒子は浮遊して流れてはいるが、管断面上のその濃度分布が一様でないもので粒子の比重にもよるが、粒子径が数mm以下で流速が低くないときには一般に実現できる。
- (iii) しゅう動流： 固体粒子の殆んどが管壁に層をなしてすべりながら輸送される状態で、低速流の場合や粗大粒子の場合にこの状態が実現される。

このうち一様浮遊流の場合は、その流動特性さえ知ることができれば流れを非ニュートン流体として取扱うことができる。この場合の取扱いは、多くの研究もあり、文献も多いのでここでは省略する。不均質浮遊流や、しゅう動流の場合、圧力降下は、図2にその例を示すようになる<sup>15)</sup>。この図よりみて、しゅう動流では、水力勾配  $i$  (管の単位長さ当りの圧力降下を水頭で示した量) は濃度  $C$  の増加とともに大きくなり、また平均流速  $U_m$  の低いところで最小値が存在し、この点での平均流速  $U_m$  の値は、濃度の増加とともに大きくなること、さらに不均質浮遊流では、 $U_m$  の増加に伴う  $i$  の変化は、清水の場合の変化よりもゆるやかで、この傾向は

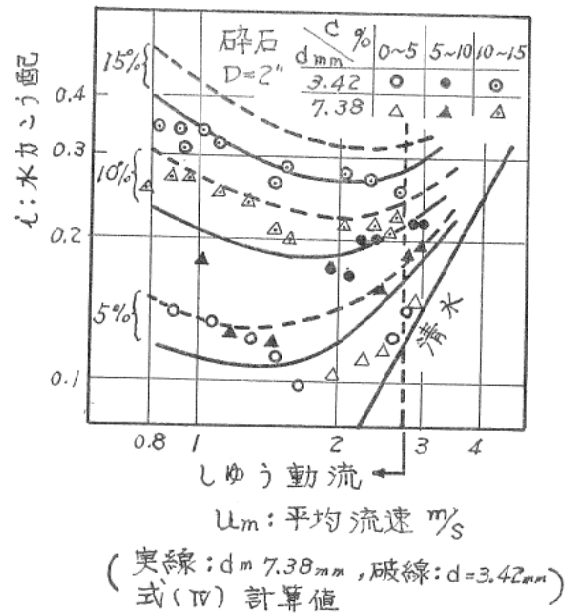


図2 水平管の圧力降下

濃度  $C$  が大きいほど著るしいことを知ることができる。

これは、通常のスラリー輸送にみられる圧力降下の特徴的な変化である。圧力降下が最小であるときの流速は限界流速と呼ばれているが、この限界流速より低い流速では、固体は管底に沈澱し、静止した層を形成しはじめるといわれている。したがってスラリー輸送では、限界流速以上の平均流速を与えることが必要である。

圧力降下を計算する実用的な実験式としては水平管について、フランスの Sogreah 社で、粒子径 0.2~20 mm 程度、砕石を中心に、実際に用いられる程度の、管径 600 mm 近くまでの種々の管路で、多数の実験を重ねて得られ、Durrant<sup>16)</sup>によって発表されたものが、砕石、石炭などの通常しばしば輸送対称になる比重 1.4~3 程度で、形状が塊状のものに対して大よその結果を与えるのに式も簡単で有用であることが知られている。従来得られている圧力降下を与える諸式を表1に管のいろいろな配置に関して示している。水平管の場合にはとくに、多くの研究者によってそれぞれの立場からいろいろな形に、圧力降下の実験式がまとめられているが、これらの間の比較検討については、著者が別の機会<sup>23)</sup>にこれらの式の導出にあたっての考え方と、いろいろな粒子、管についての実験結

果との比較によって行っているの、これを参照していただくことにしてここでは多くを触れない。

ただ、扁平な平板状プラスチックなど特殊な形状の粒子では、水平管圧力降下の実験結果はいずれの式ともかなりかけ離れており<sup>24)</sup>、粒子形状の影響についての考慮が一層必要であること、また、ここに実験例として、ポリカーボネイトペレットを流した固液二相流の水平管圧力降下の例を、図3<sup>25)</sup>に示すが、これによればある流速以上では圧力降下は流体のみを流したときよりも低い値を示している。このことは、ここに示した単純なモデルから導かれていずれの実験式で説明できない。この現象は粒子が混入の結果、流れの乱れ構造が変化したものと

して、捉える必要があることを示しており、前にも述べた二相流の流動機構が、単純なモデルでは捉え得ない複雑さをもっていることの片鱗をのぞかせたものとして興味深い。

ところで、浮遊状態にあるときは、粒子の混入は一般に流れの圧力降下をさほど大きくせず上述のように場合によっては、小さくする可能性もあること、粒子を浮遊状態にしておけば、沈澱層による閉塞や流れが不安定性を起す危険がなく、限界流速を小さくすることができること、また管壁の摩擦も小さくすることができることに着目して、強制的に粒子群を浮遊状態させ限界流速と圧力降下を下げる試みがなされている。このために、流れの脈動による粒子のわき上り効果を利用する方法、管底をはじめ壁面

表1 圧力降下を与える諸式

番号	管	研究者	圧力降下を与える式	備考
I	水平管	Durand ら	$\phi = 81(\sqrt{C_d}\Psi)^{-3/2}$	
II		Newitt ら	(1)不均質流 $\phi = 1100 \frac{v_t}{\sqrt{gD(\sigma-1)}} \Psi^{-1.5}$ , (2)しゅう動流 $\phi = 66\Psi^{-1}$	
III		Kriegel ら	$\phi = \frac{0.282}{\lambda_w} (\sigma-1)^{1/3} \left(\frac{v_t^3}{g\nu}\right)^{1/3} \left\{1 + 2.7\left(\frac{C}{C_m}\right)^4\right\} \Psi^{-4/3}$	$C_m = 50\%$
IV		鮎川 ら	$\phi = \frac{1.80g\xi(\sigma-1)D}{\lambda_w v_t^2} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.653} \Psi^{-1.36}$	$\Psi < 8.41$
V		Barth	$\phi = 2 \frac{u_m}{u_s} \frac{\xi}{\lambda_w} \Psi^{-1} + \frac{\lambda_s^*}{\lambda_w} \sigma \frac{u_s}{u_m} + \frac{(u_m/u_s - 1)(1-C)}{1 - u_m/u_s C} - 1$	
VI		岩浪 ら	$\Delta p_s = 0.069 \frac{u_m^2}{gD} C_d' \mu_s^{1.01} \frac{(1-\zeta)^{2-\varepsilon}}{\zeta} \left(\frac{D}{d}\right)^{1+\varepsilon} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{1}{1-\gamma_w/\gamma_s} \frac{l}{D} \frac{\gamma_w u_m^2}{2g}$	$C_d' = k/\left(\frac{v_m D}{\nu}\right)^{\varepsilon}$ $\varepsilon, k$ : 定数
VII	傾斜管	川島 ら	$\phi = \frac{2}{\lambda_w} (\xi \cos \theta + \sin \theta) \left[ \left\{ 1 - \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d}{C_d} (\xi \cos \theta + \sin \theta)} \right\} \Psi \right]^{-1}$	
VIII	バンド	鮎川	$\Delta p_{bs} = \left[ \frac{2(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_s F_R^2} \{ \cos \theta_1 - \cos \theta_2 + \xi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \} + 2\xi \theta_0 \left( \frac{1 - \gamma_w}{\gamma_s} \right) + \left\{ \left( \frac{u_{s2}}{u_m} \right)^2 - \left( \frac{u_{s1}}{u_m} \right)^2 \right\} + k(\Psi) \right] \frac{\gamma_s C}{\gamma_w} \frac{\gamma_w l u_m^3}{2g}$	$I = \int_{\theta_1/\theta_0}^{\theta_2/\theta_0} \left( \frac{u_s}{u_m} \right)^2 d\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) \div \left(1 - \frac{v_t}{u_m}\right)^2$ $F_R = u_m/\sqrt{gR}$ , $k = -0.27 (\Psi > 25)$
IX	鉛直管	Worster ら	$i - i_w = C(\sigma - 1)$	

記号:  $i$ : 水力勾配  $D$ : 管径  $C_d$ : 抗力係数  $u_s$ : 粒子速度  $\theta$ : 傾き角  
 $i_w$ : 清水の水力勾配  $u_m$ : 平均流速  $v_t$ : 終速度  $\lambda_s^*$ : 粒子流の管摩擦係数  $R$ : 曲率半径  
 $C$ : 輸送濃度  $\sigma$ : 比重  $\lambda_w$ : 管摩擦係数  $\gamma_w$ : 水の比重  $\theta_0$ : 曲り角  
 $\phi = \frac{i - i_w}{i_w C}$   $g$ : 重力加速度  $\nu$ : 動粘性係数  $\gamma_s$ : 粒子の比重 添字 1: バンド入口  
 $\Psi = \frac{u_m^2}{gD(\sigma-1)}$   $\xi$ : 管と粒子の摩擦係数  $\zeta = 1 - \sqrt{\xi} \frac{v_t}{u_m}$  2: バンド出口  
 $d$ : 粒子径  $l$ : 管長さ  $\mu_s$ : 重量濃度 (混合比)



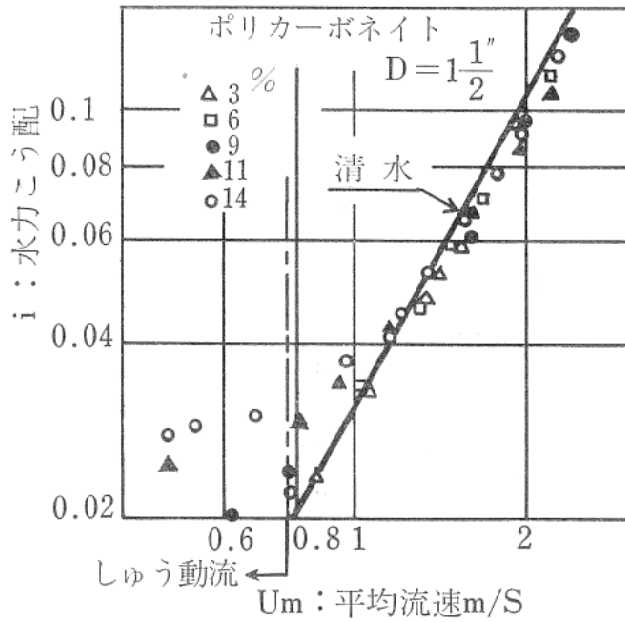


図3 水平管の圧力降下

に適当にじま板を置くことで粒子を跳ね上げる方法、管内に螺旋状のリブを設けて、ここで旋回流をつくり、この旋回流にのせて、粒子をまき上げる方法などが提案されている。図4には、管内に螺旋状のリブをつくったときの平均流速と圧力降下の関係を示している<sup>26)</sup>が、リブの適当な配置では、リブのない通常の管の場合よりも限界流速が低く、圧力降下も小さい流速範囲が存在することを知らることができる。

以上、水平管の圧力降下を中心に、実用上も重要な諸点について概観したが、鉛直管、バンドについてもまだまだ多くの問題があり、これらの固液二相流の管内流動についての相似則も限られた範囲でしか明らかでないため、実験結果をスケールアップして、長距離ラインをつくることは残念ながら現在のところ、簡単ではなく、かなり詳細かつ大がかりな実験的検討が求められるようである。

#### §4. あとがき

固液二相流に関する諸問題を大急ぎで、ざっと一なでという感じで述べたので、舌足らずの箇所が多く、読みづらいところが多かったことと思うが、固液二相流が、将来各方面でますます有用なものとして、技術的に応用される分野が拡大していく、将来性に富んだ領域であり、

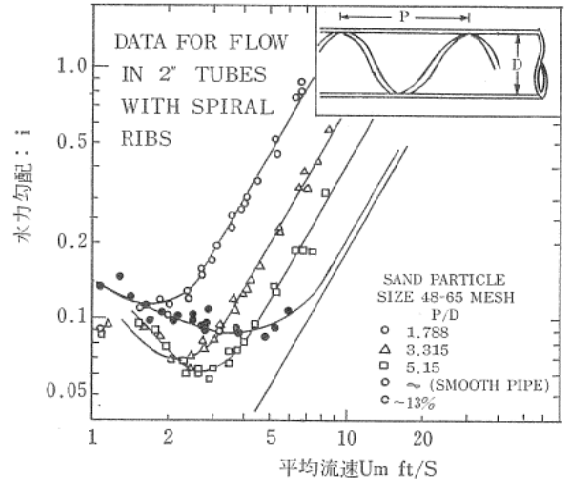


図4 スパイラルリブをもつ水平管の圧力降下

また学問的には未開拓の部分が多く、興味深い分野であることを理解していただき、これに興味をもたれる方が一人でもふえれば、著者としては、これに過ぎる喜びはない。

おわりに、著者の固液二相流の研究にあたって、常々力強い激励と御協力をいただき、また本文を書くことを勧めて下さった、大阪大学工学部森川敬信教授に、ここをかりて厚く感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

1. Round, G. F.: South African Mech. Engr. **20-3** (1970), p. 80.
2. Jensen, E. J. & J. Bruce: Proc. Hydrotransport 1. (1970) C1-1.
3. Zandi, I.: "Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application" (1971) Pergamon Press, p. 237.
4. Zandi, I. & J. A. Hayden: Proc. Hydrotransport 1 (1970) J 1-1.
5. Condolios, E. & P. Courtin: 同上, K 1-1.
6. Landau, L. D. & E. M. Lifshitz: "Fluid Mechanics" (1959) Pergamon Press, p. 76.
7. 例えば、平井：別冊化学工業 **12-3** (1968) (粉粒体の輸送) p. 158.
8. Batchelor, G. K.: J. Fluid Mech. **41-3** (1970) p. 545.
9. 鮎川：機械学会論文集 **38-315**(昭47) p. 2863.
10. Ahmadi, G. & V. W. Goldschmidt: Proc. Hydrotransport 1. (1970) F 5-57.

11. Soo, S. L.: "Fluid Dynamics of Multiphase Systems" (1967) Blaisdell Pub. Co
12. 日野：土木学会論文集 92 (昭38) p. 11.
13. Daily, J. W.: 土木学会誌 49-6 (1964) p. 42.
14. Wasp, E. J. et al: Proc. Hydrotransport 1. (1970) H 4-53.
15. 鮎川, 越智：機械学会論文集 33-254 (昭42) p. 1625.
16. Durand, R.: Proc. Minnesota Intern. Hyd. Convention 1 (1953).
17. Newitt, D. M. et al: Trans. Instn. Chem. Engrs. 33-2 (1955) p. 93.
18. Barth, W.: Chemie-Ing. Techs. 32-3 (1960) p. 164.
19. 岩浪ほか：機械学会論文集 29-207 (昭38) p. 1735.
20. Kawashima, T. & K. Noda: Proc. Hydrotransport 1. (1970) J 6-97.
21. 鮎川：機械学会論文集 35-271(昭44)p. 563.
22. Worster, R. C. & D. F. Denny: Proc. Inst. Mech. Engr. 169-32 (1955) p. 563.
23. 鮎川：機械学会関西支部 13回講義会 テキスト。 p. 27.
24. Faddick, R. R.: Proc. Hydrotransport 1. J 4-65.
25. 鮎川：ポンプ工学 8-12 (昭47) p. 3.
26. Charles, M. E.: Proc. Hydrotransport 1. A 3-25.