水平輸送管路における混合粒子径スラリーの 水力勾配に関する研究*

佐藤 博¹ 大塚 一雄²
崔 玉順³ 寺尾 俊明⁴

[UDC 621.6.04]

Study of the Hydraulic Gradient of Slurry Flow Containing Mixed Size Particles in a Horizontal Pipeline

by Hiroshi SATO¹, Kazuo OTSUKA², Yushun CUI³ and Toshiaki TERAOKA⁴

The hydraulic gradient in slurry transportation has been practically discussing with the data on the single size particles. However, the most economic conditions are obtained in the case of the slurries mixed of different size particles. While the Wasp's method has been comprehensively used for prediction of hydraulic gradient on the slurries containing various size particles, the authors had already pointed out that the method should provide sufficiently accurate predictions for the hydraulic gradient under the limited transport conditions.

In this paper, the size distribution of materials were estimated with the distribution constant n and basic constant b associated with the specified residue, Rosin-Rammler's distribution law and median size diameter d_{50} , and the influence of size distribution on the hydraulic gradient in systems were investigated analytically. Moreover, experiments to ascertain the results of the analytical studies were performed using sand particles, whose size laid between 0.42 and 2.83 mm, in transparent plastic recirculating pipeline loops with 25.9 and 31.9 mm diameter.

The principal results of this study may be summarised as follows:

- (1) As the distribution constant n decreases at a given basic constant b , the hydraulic gradient decreases at lower mean velocities, whereas it increases at high velocities.
- (2) The effect of n value on the hydraulic gradient is dependent not on the pipe diameter and delivered volume concentration, but highly on the median size diameter d_{50} .
- (3) The exponent in Durand-Condolios equation for the nonuniform solids tend to be lower than the one for the uniform solids if the median size diameter is selected as the representative diameter of solids of distributed size.

KEY WORDS: Mixed Size Particles, Slurry Flow Transportation, Hydraulic Gradient

- (1, 2. Mining College, Akita University. 1. Assoc. Prof., Dr. 2. Prof., Dr.)
(3. Graduate, Faculty of Engineering, Tohoku University.
(4. Engineer, Dowa Mining Co., LTD.)

1. はじめに

粗粒子スラリーに微細粒子を混入すると、水平管路内の流動時における圧力損失が低下することは、よく知られている事実である。とくに、微・粗混合粒子径スラリーについては、これまで Condolios¹⁾, Bruhl²⁾ の砂スラリーの実験を始め、種々の固体粒子を用いた実験結果が報告されている³⁾。また、沈降性スラリーの挙動を示す粒子径 d が 0.05 mm 以上で、径の異なる 2 種の細・中粒子と粗粒子を混合して濃度調整したスラリーについては、吐出し濃度 C 、平均流速 V などの輸送条件が一定な場合の、その混合率と水力勾配 i との関係を実験的に調べた研究が発表されて

おり^{4)~6)}、永田⁴⁾ は i を最小とする混合率の存在を確認している。しかし、圧力損失 ΔP の低減機構は輸送条件によって異なるなど極めて複雑であり、現在、その理論的な解明が十分とは言えず、前述の混合粒子径スラリーの ΔP を高い精度で評価できるまでには至っていない。

著者らは、先に⁷⁾⁸⁾ 比較的広い粒度分布の固体粒子を含む混合粒子径スラリーの水力勾配 i は、粒子の沈降速度等の因子を適切に評価するならば、基本的に Wasp の計算方法⁹⁾ で算定できることを報告した。本報では、その結果を基礎に、スラリー輸送の輸送対象物として最も一般的な破碎産物の粒度特性が水力勾配に及ぼす影響について検討し、スラリーに含まれる固体粒子の代表粒子径の大きさおよび異径粒子の混合率の違いによる水力勾配 i の変化を明確にした。また、その i の変化と管径 D や濃度 C 、流速 V 等との関係も明らかにし、理論的な解析上の問題点について考察した。

2. 混合径粒子群の粒度特性

* 1989年8月2日受付 10月12日受理 昭和63年度日本鉱業会春季大会および平成元年度資源・素材学会春季大会にて一部講演

1. 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部採鉱学科

2. 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部採鉱学科

3. 正会員 東北大学大学院生 工学部資源工学科

4. 正会員 同和鉱業(株)

キーワード: 混合粒子径スラリー, 水平輸送, 水力勾配

図1 Rosin-Rammler線図

図2 均等数 n と R_d との関係

石炭など種々の砕けやすい粉体の粉砕物の粒度分布は以下のRosin-Rammlerの式でよく表されると言われている¹⁰⁾¹¹⁾。

$$R = 100 \cdot e^{-bd^n} \quad (1)$$

ここに、 R ：ふるい上重量％、 d ：粒子径、 n ：分布の広がりを表す均等数、 b ：分布状態の基準を与える定数。

Shookら¹²⁾が実験に用いた砂粒子および市販の川砂のふるい分けの結果をRosin-Rammler線図にプロットすると図1が得られ、粒度分布の特性は(1)式の n と b で表現できることが明らかである。なお、この図において直線の傾きから n 値が求まり、 $d=1$ mmに対応する R の値 R_1 を用いて b 値は次式で計算される。

$$b = 2.303 (2 - \log_{10} R_1) \quad (2)$$

また、代表粒子径として使用されることの多い平均粒子径 $\bar{d}$ および50%粒子径 d_{50} はそれぞれ次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\bar{d} = \Gamma(\frac{1}{n}) / nb^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$d_{50} = (0.693/b)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

さらに、図1のRosin-Rammler線図において $d=\bar{d}$ に対応する R_d の算定式が(1)式と(3)式を用いて導かれ

$$R_d = 1 / \exp \{ [\Gamma(\frac{1}{n}) / n]^n \} \quad (5)$$

となる。この式を用いて R_d と n との関係を図に示すと図2が得られる。この図によると、Kaoら¹³⁾が報告している $d_{35}=\bar{d}$ の結果

表1 最密充填率の測定に使用した試料の混合率

粒子径(mm)	混合率(%)
2.38～2.00	20
2.00～1.41	30
1.41～1.00	30
1.00～0.71	10
0.71～0.42	10

表2 固体粒子の面積指数 κ と固有粘度 $[\mu]$

種類	κ	$[\mu]$
球形粒子	1.00	2.5
砂粒子	1.49	3.57
石炭	1.60	3.8

図3 径比 $\bar{d}/D$ と最密充填率 C_{max} との関係

は $n=0.8$ の場合にのみ適用されることがわかる。

3. スラリーの相対粘度式

3.1 計算式に基づく検討

前報⁷⁾では、スラリーの相対粘度 μ_r を、径が $10^{-4} \sim 0.1$ mmの均一な球形粒子の懸濁液¹⁴⁾に適用されるThomas¹⁵⁾の式

$$\mu_r = 1 + 2.5C + 10.05C^2 + 0.00273e^{16.6C} \quad (6)$$

で計算した。しかし、Yucelら¹⁶⁾は、 μ_r の評価が、Waspの計算方法による水力勾配の計算結果に大きく影響することを報告している。それゆえ、粒子の形状および粒度分布を考慮したKrieger¹⁷⁾の式

$$\mu_r = (1 - C/C_{max})^{-[\mu]C_{max}} \quad (7)$$

ここに、 C ：スラリーの体積濃度 (%)

C_{max} ：最密充填率 (%)

$[\mu]$ ：固有粘度 (-)

を用いて μ_r を計算し、それらの因子が計算結果に及ぼす影響を検討した。図3は、本実験で使用した試料の最密充填率 C_{max} を調べた結果であり、十分にふるい分けされた均一粒子および表1に示した混合率を有する粒子に対し、粒子径の平均値 $\bar{d}$ として d_{50} を用い、測定管の内径 D との比 $\bar{d}/D$ を変えて、 C_{max} の平均値を求めると、それぞれ、54.4%、59.8%の値が得られた。なお、この最密充填率 C_{max} の測定に当たっては、内径2.59、3.18、4.01 cmの透明な円筒容器に試料を少量ずつ投入しながら、これを突き棒にて十分締め固め、投入した試料の全重量、密度、および円筒容器の底面から試料層の表面までの高さ等を測定し、計算によって算出した。また、固有粘度 $[\mu]$ は、粒子の形状に係る値である。砂粒子の $[\mu]$ については、表2に示したように、著者が求めた面積指数 κ の実験値⁽¹⁸⁾とKaji¹⁹⁾らが与えた結果から一次補間によって、 $[\mu]=3.57$ と定めた。なお、球形粒子のランダム充填の場合、 $C_{max}=0.637$ ²⁰⁾、 $[\mu]=2.5$ ¹⁷⁾の値を使用し、Kriegerの式で、球形粒子が混入したスラリーの μ_r を計算すると、図4に示したように、Thomasの式で計算される値にほとんど

 図4 Kriegerの式とThomasの式を用いた相対粘度 μ_r の計算結果

 図5 相対粘度 μ_r に及ぼす固有粘度 $[\mu]$ と最密充填率 C_{max} の影響

ど一致することがわかる。さらに、砂粒子の μ_r と濃度 C との関係はKriegerの式で計算し、球形粒子の計算値に対比させて、図5に示した。この図によると、本実験で用いた試料の粒度分布が相対粘度 μ_r に及ぼす影響は、実質的に無視し得るほど小さい。

3.2 相対粘度 μ_r の測定結果

均一な球形粒子のスラリーの相対粘度 μ_r は濃度だけの関数として表されることが多い^{21)~23)}が、 μ_r は粒子径の関数であるとする報告^{24)~27)}もあり、Thomasは粒子径の影響を除去した結果として(6)式を提示している。しかし、粒子径の影響を考慮した μ_r の研究は少なく、特に径が0.05 mm以上の粒子を含む沈降性スラリーの μ_r と濃度との関係については、特殊な粘度計²⁸⁾²⁹⁾を必要とすることから十分に解明されていない。一方、混合粒子径スラリーの水力勾配 i に関するWaspの計算方法では、管内を流動するスラリーの均質成分の粘性係数を算定する必要があり、前報⁷⁾では、便宜上、(6)式を使用した。本報では、沈降性スラリーに対する(6)式の適合性を確認するため、回転振動型粘度計(山一電気工業K.K.製)を用いて、表3に示した試料のスラリーの相対粘度を実測し、図6の結果を得た。なお、図7は μ_r 測定用実験装置の概略図である。測定は、マグネットスターラーによりビーカー内のスラリーを懸濁状態に保ち、これに粘度計の検出子を挿入して、粘度計から出力される電圧をA/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに記録する方法によった。図6によると、粒子の形状の違いによる粘性係数の変化はほとんど認められず、 μ_r の測定値は図中に破線で示したThomasの式による値に近似できることがわか

表3 スラリーの相対粘度の測定に使用した試料

種類	粒子径 d (mm)	比重 δ
砂粒子	0.297~0.42	2.74
ガラスビーズ	0.295~0.49	2.49

 図6 回転振動型粘度計によるスラリーの相対粘度 μ_r の測定結果

図7 スラリーの相対粘度測定用実験装置の概略図

った。なお、図中の高濃度域でデータの大きなバラツキが表れるのは、懸濁状態が安定せず、粘度計からの出力電圧の変動が大きかったためと考えられる。

4. 水力勾配 i に及ぼす粒度特性の影響に関する解析的考察

4.1 Waspの計算方法の適用限界

(1) 均質流の流動挙動の変化 Waspは、均質流をニュートン流体として解析した。一般に、スラリーに含まれる固体粒子の径 d が小さくなり、濃度 C が増大すると、非ニュートン流体の挙動を示すが、ニュートン流体から非ニュートン流体への変化は、粒子の種類によって異なる。砂粒子のような単分散系粒子の場合には、粒子径 d が20~30 μm 以下の微粒子スラリーのとき、体積濃度20~30%の程度までニュートン流体としての取り扱いが可能とされている³⁰⁾³¹⁾。従って、本研究では、 $d < 20 \mu\text{m}$ の粒子が30%以上含有されない範囲で解析した。

(2) スラリーの流動状態の変化 沈降性スラリーの場合は、吐出し濃度 C が一定のとき、流速 V の減少に伴って、擬均質流、懸濁流、摺動流そして堆積層を伴う流れへと流動状態が変化することはよく知られている事実である³²⁾³³⁾。著者らは、流速 V が浮遊限界速度 V_B 以下に低下するとWaspの方法の前提条件である懸濁流の流動状態が保持できないことに着目し、その適用限界を表す式として次式を与えている⁷⁾。

$$V_i/V_* = 0.152 (Re_p^*)^{0.460} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 V_i 、 V_* はそれぞれ単粒子の終速度、摩擦速度であり、 Re_p^* は50%粒子径 d_{50} と干渉終速度 V_h を基準にした粒子レイノ

図8 粒度分布に及ぼす均等数 n の影響
($b = 2.00$ の場合)

図9 粒度分布に及ぼす均等数 n の影響
($b = 4.00$ の場合)

図10 水力勾配 i に及ぼす粒度分布の影響
($b = 2.00$ の場合)

図11 水力勾配 i に及ぼす粒度分布の影響
($b = 4.00$ の場合)

ルズ数である。

4・2 水力勾配 i に及ぼす粒度特性値 b の影響

図8および図9は、定数 b を変えて(1)式により計算で求めた粒子径の頻度分布曲線ならびに重量百分率曲線である。両図によると、 n 値が一定のとき、 b 値の増加とともに微細粒子の混入率は増大することがわかる。また、図中に示したそれぞれの粒度分布

に対応した粒子群を含有するスラリーを、一定な条件下で水平管内に流送したときの水力勾配 i は、前報⁷⁾で与えた Wasp の計算手順に従って計算され、図10および図11の結果を得た。これらの図によると、 b 値が一定な場合、 n 値が減少し、粒度分布の幅が大きくなると、水力勾配 i は低流速域において減少することがわかる。このとき、 b 値が大きいかほどその減少量は増大する。こ

図12 粒度分布に及ぼす均等数 n の影響
($d_{50} = 0.10$ mm の場合)

図13 粒度分布に及ぼす均等数 n の影響
($d_{50} = 0.30$ mm の場合)

図14 水力勾配 i に及ぼす粒度分布の影響
($d_{50} = 0.10$ mm の場合)

の結果は, Bruhlら²⁾, 久光ら³⁴⁾, 朝倉ら³⁵⁾が微・粗混合粒子径スラリーにおいて実験的に確認している結果に類似する。一方, 高流速域になると, Bruhlら²⁾が報告しているように n 値が減少するにつれて水力勾配 i が増大する傾向が表れる。なお, 図中の $\bar{d}$, d_{50} の値はそれぞれ(4)式および(5)式によって求めた計算値である。また i - V 曲線を横切る曲線は Wasp の計算方法の適用

図15 水力勾配 i に及ぼす粒度分布の影響
($d_{50} = 0.30$ mm の場合)

限界を著者ら⁷⁾の与えた(8)式で計算した結果である。

4・3 水力勾配 i に及ぼす均等数 n の影響

代表粒子径として50%粒子径 d_{50} を採用し, d_{50} および均等数 n が変化したときの粒子径の分布状態の代表例を頻度分布曲線と重量分布曲線によって図12および図13に示した。また, これらの粒度分布の変化に対応した水力勾配 i の変化を計算し, 図14お

図16 濃度Cが減少したときの水力勾配*i*と粒度分布との関係 ($b=2.00$ の場合)

図18 管径Dが減少したときの水力勾配*i*と粒度分布との関係 ($b=2.00$ の場合)

図17 濃度Cが減少したときの水力勾配*i*と粒度分布との関係 ($b=4.00$ の場合)

図19 管径Dが減少したときの水力勾配*i*と粒度分布との関係 ($b=4.00$ の場合)

よび図15に実線で示した。これらの図から、水力勾配*i*に及ぼす*n*値の影響は50%粒子径 d_{50} によって大きく異なり、 d_{50} が増大し、頻度分布曲線が右に水平移動したとき、低流速域における水力勾配*i*の変化量は、Bruhlら²⁾の実験結果の示す傾向に一致して低下することが認められる。ただし、低流速域における計算の適用限界は d_{50} を基準にして算定されるため、図14および図15に実線で描いた*i*-*V*曲線の場合には、水力勾配*i*の精度の確定領域を十分に示し得ていない。なお、比較のために、 d_{50} の均一粒径スラリーに対する水力勾配*i*を計算し、両図中に破線で与えた。粒度分布を考慮せずに代表粒子径 d_{50} で*i*を算定するとき、その値は実際に比べて約30%小さく評価されることが推測される。

4・4 水力勾配*i*と粒度分布との関係に与える濃度Cおよび管径Dの影響

図16および図17の計算結果は、図10および図11に示した場合と同じ輸送条件で、吐出し体積濃度Cを18%から10%に減少させて水力勾配*i*を計算した結果であり、水力勾配*i*と*n*との関係に及ぼす濃度Cの影響は極めて小さいと言える。また、図18および図19は、図10および図11と同じ輸送条件で、管径Dを5.245 cmから2.59 cmへ変化させたときの結果であり、低流速域における*n*値の減少に伴う*i*値の低下率は、管径Dが変化してもほとんど違いが認められない大きさであり、水力勾配*i*と*n*との関係に及

ぼす管径Dの影響は、濃度Cの影響と同様に、極めて小さい。

5. 流送実験に基づく実験的考察

5・1 実験試料

実験に用いた試料は、JIS規格の標準ふるいによって入念にふるい分け、粒度をそろえた市販の川砂粒子である。なお、ふるい分けはRo-Tap シューカによって行い、シューカが1度に取り扱う量を約100g、ふるい分け時間を約5分とした。この粒度測定の結果はすでに図1のRosin-Rammler線図にプロットして示したとおりである。

また、混合粒子径スラリーは、ふるい分け後の粒度の異なる数

表4 流送実験に用いた試料の物性値

No.	ふるいの目開き (mm)	ふるい粒子径 d (mm)	比重 δ (-)	抵抗係数 C_0 (-)	終速度 V_t (cm/s)	粒子レイノルズ数 Re_p (-)
1	0.42~0.71	0.565	2.69	2.09	7.72	43.6
2	0.71~1.00	0.855	2.67	1.62	10.72	91.7
3	1.00~1.41	1.205	2.66	1.42	13.55	163.3
4	1.41~2.00	1.705	2.66	1.31	16.81	286.7
5	2.00~2.38	2.190	2.65	1.26	19.38	424.4
6	2.38~2.83	2.605	2.65	1.23	21.35	556.2

図20 流送実験に用いた輸送システムの概略図

種の粒子を、所定の粒度特性値 b および均等数 n になるように、混合して作成した。

表4には、実験試料の粒子径 d 、比重 δ 、抵抗係数 C_D 、終速度 V_t ならびに粒子レイノルズ数 Re_p の値を示した。なお、表中の C_D 、 V_t 、 Re_p は、砂粒子の面積指数 $\kappa=1.49$ ⁷⁾ を用いて Swanson の式⁷⁾ で求めた計算値であり、混合粒子径については、 d_{50} に対応した C_D 、 V_t 、 Re_p の値を与えた。

5・2 実験装置および実験方法

図20は流送実験に用いた輸送システムの概略図である。管路は、内径 D が2.59 cm と3.19 cm の2種の透明アクリル樹脂管を並列して高架台上に敷設し、三方バルブの開閉によって、どちらか一方を容易に選択できるようになっている。なお、混合槽には、濃度調整用のスライディングチューブ^{36) 37)} を備え、濃度 C が大きい粗粒子スラリーの場合でも微妙な濃度調整が可能である。

圧力損失 ΔP は、透明アクリル樹脂管路のリターン側配管部に挿入した長さ約2 m のガラス管路（管径 $D=2.59, 3.19$ cm に対し、圧力損失測定区間 L はそれぞれ $L=196.5, 198.5$ cm）において測定した。 ΔP の測定と同時に、流量、水温、および吐出し口で固体粒子を受けた計量容器の重量の値が、それぞれ電磁流量計、温度

センサー、ロードセルによって電圧値に変換された後、A/Dコンバータを介してパソコンに入力され、記録・計算・作図が行われた。

5・3 実験結果とその考察

(1) 均一粒子径スラリーの流送結果 表4の粒子径の異なる試料(1), (3), (4)を管径 $D=2.59$ cm および $D=3.19$ cm の水平輸送管路に流送し、そのときの水力勾配 i を圧力損失係数 ϕ と修正フルード数 ψ で整理して図21および図22に示した。流送実験の範囲は、いずれも $V > V_d$ の領域である。また、図中にプロットした実験結果から最小2乗法によって

$$\phi = K \psi^{-m} \quad (9)$$

の係数 K および指数 m を算定し、その計算結果と管径 D 、粒子径 d との関係をもとめて表5に示した。なお、図中の破線は比較のために与えた Durand-Condolios の式³⁸⁾

$$\phi = 82 \psi^{-1.5} \quad (10)$$

を表す。

これらの図によると、本実験範囲内で(9)式における係数 K および指数 m に及ぼす粒子径 d の影響を明らかにすることは困難であり、図に示したように、粒子径 d が0.565 mm 以上のとき ϕ - ψ 曲

 図21 均一粒子径スラリーの流送結果 ($D=2.59$ cm)

 図22 均一粒子径スラリーの流送結果 ($D=3.19$ cm)

表5 係数 K および指数 m の計算結果

管径 D (cm)	粒子径 d (mm)	K (-)	m (-)
2.59	0.565	152.12	1.52
	1.205	124.34	1.35
	1.705	169.99	1.50
3.19	0.565	193.73	1.73
	1.205	125.65	1.32
	1.705	183.15	1.53

表6 混合粒子径スラリーの流送実験に用いた試料の粒度特性値

試料 No.	管径 D (cm)	実験前		実験後		流送時間 (min)
		n	b	n	b	
7	2.59	2.03	1.50	2.97	1.81	120
	3.19	2.03	1.50	2.95	1.90	185

図23 混合粒子径スラリーの流送結果 ($D=2.59$ cm)

線は、次式で近似できることがわかった。

$$\phi = 168.52 \psi^{-1.55} \quad (D=2.59 \text{ cm}) \quad (1)$$

$$\phi = 174.91 \psi^{-1.59} \quad (D=3.19 \text{ cm}) \quad (2)$$

(2) 混合粒子径スラリーの流送結果 径が0.42~2.00 mm, 0.25~1.41 mmで、(1)式の n , b がそれぞれ表6の値を有する試料7の混合粒子スラリーについて流送実験を行い、図23および図24の結果を得た。図中の破線は粒子径0.565 mm, 1.205 mm, 1.705 mmの均一粒子径スラリーの流送実験によって得た(1)式および(2)式による計算値を表す。なお、Waspは非均質流の場合の水力勾配 i の計算にDurand-Condoliosの式を用いているが、この式の係数 K , 指数 m は、実験条件によって異なり、著者らは、Waspの計算方法の適用範囲外の輸送条件に対して、計算値と実験値との誤差を大きく左右する要因は、(1)式にあることをすでに報告している⁸⁾。それゆえ、本実験で確認された(1)式、(2)式を用いて、粒

度特性値 n , b の固体粒子を含む混合粒子径スラリーの i 値を計算し、図23および図24に実線で与えた。これらの図によると、混合粒子径スラリーの場合には、低流速域で、均一粒子径スラリーの結果に比較して約30%の水力勾配の低下が認められ、前章で解析的に確認された結果に一致する。また、混合粒子径スラリーの水力勾配 i の計算方法は実測値をよく満足していることがわかる。

なお、流送実験の前後で調べた粒度分布をRosin-Rammler線図にプロットして比較するとわずかの差異が認められたが、この実験中の粒度分布の変化が i - V 曲線に及ぼす影響を表6の n , b 値を用いて計算すると、5%程度であった。

また、図23の i - V 曲線の結果を ϕ と ψ で整理すると図25が得られ、低流速域で i 値の低減現象が認められるため、Wagner⁵⁾らの結果と同様に、混合粒子径スラリーの場合には、両対数紙上で均一径粗粒子スラリーの ϕ - ψ 直線に比較してその傾きは減少することが確認される。

6. む す び

混合粒子径スラリーの水力勾配 i の評価において、現在、最も合理的な計算方法として認められているWaspの計算方法に不可欠な粒度分布、Durand-Condoliosの式、スラリーの相対粘度 μ_r

図24 混合粒子径スラリーの流送結果 ($D=3.19$ cm) 図25 混合粒子径スラリーの修正フルード数 ϕ と圧力損失係数 ψ との関係

等について考察した。その結果を基に、スラリー輸送の輸送対象物として最も一般的な破砕産物の粒度特性が水力勾配に及ぼす影響について詳細な検討を加え、スラリーに含まれる固体粒子の代表粒子径の大きさおよび異径粒子の混合率の違いによる水力勾配 i の変化を明確にした。また、その i の変化と管径 D や濃度 C 、流速 V 等との関係を明らかにするとともに、理論的な解析上の問題点ならびにその検証実験結果について考察し、以下の結論を得た。

(1) 砂粒子を含むスラリーの μ_r と濃度 C との関係を Krieger の式で計算した結果、本実験範囲内の粒度分布および粒子の形状が相対粘度 μ_r に及ぼす影響は無視し得るほど小さく、Thomas の式で近似できることがわかった。また、この結果を回転振動型粘度計で確認した。

(2) スラリー輸送の一般的な輸送対象物である破砕産物を Rosin-Rammler の式で表示するとき、 b 値が一定な場合、 n 値が減少し、粒度分布の幅が大きくなると、水力勾配 i は、低流速域において減少する。しかし、逆に、高流速域になると i 値は増大する傾向を示す。

(3) 代表粒子径として 50% 粒子径 d_{50} を採用して、粒度分布の変化に対応した水力勾配 i の変化を計算すると、 n 値の影響は、50% 粒子径 d_{50} によって大きく異なり、 d_{50} が増大し、頻度分布曲線が座標上において右側に水平移動した場合には、低流速域における水力勾配 i の減少量が低下する。

(4) 体積濃度 C を 18% から 10%、管径 D を 5.245 cm から 2.59 cm と変化させて混合粒子径スラリーの水力勾配 i を計算した結果、水力勾配 i と n との关系到及ぼす濃度 C および管径 D の影響は極めて小さいことが確認された。

(5) 均一粒子径スラリーの流送実験によって定められた $\phi = K\phi^m$ の関係を、Durand-Condolios の式の代わりに、Wasp の計算方法に組み入れて混合粒子径スラリーの水力勾配 i を計算すると、実測値を十分に満足する結果が得られ、その i 値は低流速域で均一粒子径スラリーの値よりも小さくなる。

(6) 混合粒子径スラリーの場合、濃度 C が一定な $i-V$ 曲線において、低流速域で i の低減現象が認められるため、水力勾配 i の結果を両対数紙上で圧力損失係数 ϕ と修正係数 ϕ' で整理するとき、均一粒子径スラリーに対応した ϕ と ϕ' との关系到比べてその直線の傾きは減少する。

参 考 文 献

- Condolios, E. and Chapus, E. E.: Chem. Eng., 70, 131~138, (1965)
- Bruhl, H. and Kazanskij, I.: Proc. 4th Int. Tech. Conf. on Slurry Transport, B2-19~B2-28, (1978)
- スラリー輸送研究会: 微粒子と粗粒子が混在するスラリーの流動特性小委員会報告書, (1983)
- 永田健一・永森 茂: 流体工学, 13 [3], 169~176, (1975)
- Wagner, K.: Bulk solids handling, 2 [2], 249~252, (1982)
- Shook, C. A., Gillies, R., Haas, D. B., Husband, W. H. W. and Small, M.: J. Pipelines, 3, 13~21, (1982)
- 佐藤 博・大塚一雄・崔玉順: 日本鉱業会誌, 104 [1207], 567~573, (1988)
- 佐藤 博・大塚一雄・寺尾俊明: 日本鉱業会春季大会講演要旨集, 101~102, (1988)
- Wasp, E. J., Kenny, J. P. and Gandhi, R. L.: Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, 94~98, (1977), Trans. Tech. Publication (Clauthal)
- 三輪茂雄: 粉粒体工学, 85~120, (1972), 朝倉書店 (東京)
- 久保輝一郎・水渡英二・中川有三・早川宗八郎: 粉体理論と応用, 81~83, 丸善 (東京), 1962
- Shook, C. A., Schriek, W., Smith, L. G., Haas, D. B. and Husband, W. H. W.: Experimental Studies on Solid Pipelining of Canadian Commodities for the Canadian Transport Commission and the Transportation Development Agency, Report M, Saskatchewan Research Council, (1973)
- Kao, D. T. Y. and Hawang, A. L. Y.: J. Powder Bulk Solids Technol., 4 [1], 31~40, (1980)
- 河村三郎: 土砂水理学 1, 39~40, (1982), 森北出版 (東京)
- Thomas, D. G.: J. Colloid Sci., 20, 267~277, (1965)
- Yucel, O. and Hugh, M. R.: Proc. of 9th Int. Tech. Conf. on Slurry Transportation, 251~257, (1984)
- Krieger, I. M.: Adv. Colloid Interface Sci., 3, 111~136, (1972)
- 佐藤 博・大塚一雄・宮腰 宏: 日本鉱業会春季大会講演要旨集, 90~91, (1977)
- Kaji, R., Muranaka, Y., Miyadera, H. and Hishinuma, Y.: AIChE Journal, 33 [1], 11~18, (1983)
- 前掲 10), pp. 127~130
- 森 芳郎・乙 竹直: 化学工学, 20 [9], 488~494, (1956)
- Govier, G. W. and Aziz, K.: The Flow of Complex Mixtures in Pipes, 97~100, (1972), Robert E. Krieger Pub. Co. (Malabar)
- Papachristodoulou, G. and Trass, O.: Can. J. chem. Engng., 65, 65, 177~202, (1987)
- Daravalle, J. M.: Micromeritics, 2nd ed., 351~353, (1948), Pitman Pub. Co. (New York)
- Clark, B.: Trans. Instn. chem. Engrs, 45, T251~T256, (1967)
- D. C. ボープ, J. L. ホワイト (三石・山中訳): レオロジーの理論と応用, 74~76, (1972), 工業調査会 (東京)
- 前掲 14), pp. 40~41
- スラリー輸送研究会: スラリー・カプセル輸送技術要覧, 47~49, (1984), 開発問題研究所 (東京)
- Overend, I. J., Horsley, R. R., Jones, R. L. and Vinycomb, R. K.: Proc. 8th Int. Congress on Rheology, 583~590, (1984)
- 寺田 進: 固体混合液の管路輸送-流動理論と抵抗計算法-, 34~38, (1973), 理工図書 (東京)
- Darby, R.: (Cheremisinoff, N. P. ed.) Slurry Flow Technology, 49~91, (1986), Gulf Pub. Co. (Houston)
- Vocadlo, J. J. and Charles, M. E.: Can. Min. metall. Bull., 65 [726], 113~122, (1972)
- 前掲 28), pp. 77~92
- Hisamitsu, N., Shoji, Y. and Kosugi, S.: Proc. 5th Int. Conf. on Hydraulic Transport of Solids in pipes, D3-29~D3-50, (1978)
- 朝倉国臣・渡辺典輝: 昭和 61 年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料 [L], 5~8, (1986)
- 加藤真蔵・佐々木和郎: 採鉱と保安, 5 [12], 19~24, (1961)
- 横田 章・山田則行: 日本鉱業会誌, 91 [1043], 19~25, (1975)
- 前掲 9), pp. 93~94