氏　　　　名	益（ます）　山（やま）　　忠（ただし）
授　与　学　位	工　学　博　士
学位授与年月日	昭和 56 年 3 月 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最　終　学　歴	昭和 44 年 3 月 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻修士課程修了
学位論文題目	**擬塑性流体による粗粒子群の輸送に関する基礎的研究**
論文審査委員	東北大学教授　川島　俊夫　　東北大学教授　下飯坂潤三 東北大学教授　大谷　茂盛　　東北大学教授　斎藤正三郎

論　文　内　容　要　旨

第1章　緒　　論

水力輸送時における固液混合体は，流送の条件等により，均質なニュートン流れ，均質な非ニュートン流れ，非均質なニュートン流れおよび非均質な非ニュートン流れの状態を呈するが，既往の研究は，主として，非均質な非ニュートン流れ以外の上述の流れを解析の対象としてきた。

一方，輸送の対象となる固形物は，近年とみに多種多様化しつつあり，また，これらの混合体は，非均質な非ニュートン流れを呈する場合が少なくないのが現状である。それゆえ，非均質な非ニュートン流れに関する研究，特に，圧力損失に関する研究は，今後の水力輸送システムの設計のためにも，不可欠なものであると考えられる。

本研究は，非均質な非ニュートン流れに関する研究の一環として，擬塑性流体を搬送流体とし，粗粒子群を摺動状態で水平管により輸送する場合の混合体の圧力損失について検討を加えるとともに，この流れに関する基礎資料を得ることならびに擬塑性流体による粒子群の輸送システムの設計に指針を与えることを目的としたものである。このため，搬送流体の圧力損失の算出に指針を与える臨界レイノルズ数の値を流れ安定係数より求め，かつ，擬塑性流体の管摩擦係数とレイノルズ数との関係を混合長理論により考察している。さらに，搬送流体と粒子群との相対速度を考慮に入れた粒子の運動方程式から，擬塑性流体の非均質な流れの圧力損失を検討した。また，

擬塑性流体として取り扱えるベントナイトスラリーを搬送流体とし，粒子群を水平管により輸送した場合の混合体の圧力損失を測定し，附加圧力損失係数と修正フルード数との関係ならびに附加圧力損失係数の表示式との関係を検討するとともに，粗粒子の下限粒子径，限界速度ならびに下限実用輸送速度など水力輸送システムの設計に必要な基礎資料を求めたものである。

第2章　非ニュートン流体の臨界レイノルズ数に関する研究

水力輸送における混合体の圧力損失は，搬送流体の圧力損失と粒子による附加圧力損失との和と考えられているので，搬送流体の流れの状態は，混合体の圧力損失に大きな影響を与えることになる。それゆえ，搬送流体の臨界レイノルズ数の値を求めることは，搬送流体の流動状態を明らかにするとともに，混合体の圧力損失の算定に指針を与えることになる。

本章は，非ニュートン流体の臨界レイノルズ数に関するRyan，HanksならびにMishraらの理論的研究結果を参考にして流体の管内流れの状態を考慮に入れ，かつ，Hanksが提示した局所流れ安定係数を基に新たに流れ安定係数を定義し，ニュートン流体ならびに擬塑性流体の管内流れの臨界レイノルズ数の値について検討を加えたものである。さらに，著者の推定値と上述の3者の解析値との比較を行うとともに，著者の推定方法の妥当性を検証するため，ビンガム流体についても検討を行っている。

その結果，ニュートン流体の平行平板内流れの場合，Hanksならびに著者の推定値は，Beaversの実験値の平均値に近い値となるのに対し，Mishraの推定値は，実験値よりかなり大きい値となることが分かった。また，同心二重円管内流れの場合，Hanksが提示した推定値は管径比の小さい所で極大値を有するのに対し，著者の推定値は管径比の増加に伴ない単調に増加するが，両者の推定値は，実験値を比較的よく表わしうる。なお，この場合のHanksの局所流れ安定係数には，内管側にも極値が存在し，この値より求められる臨界レイノルズ数の値はHanksが提示した値より小さい値となり，臨界レイノルズ数の概念を基にすれば，この値が臨界レイノルズ数に相当すると考えられる。それゆえ，Hanksの推定値には，論理的な問題を有していることが分かった。

一方，擬塑性流体の円管内流れの場合，Mishraならびに著者の推定値は，ほぼ等しい値になるのに対し，Hanksの理論に包括されるRyanの方法による推定値は，著者の推定値の傾向とは異なり，かつ，レオロジー定数の小さい範囲では，非常に小さい値となることが分かった。また，平行平板内流れの場合，著者の推定値は，レオロジー定数の値が小さい範囲においては，Mishraの推定値に近い値を示し，かつ，レオロジー定数の値が1.0に近い範囲においては，Hanksの推定値に近い値を示すことが分かった。

なお，著者の推定方法の妥当性を検証するために行ったビンガム流体の場合，著者の推定値は，円管内流れならびに平行平板内流れの実験値とよく一致することが分かった。

以上の結果より，著者の流れ安定係数を用いて時間依存性のない流体の直管内流れの臨界レイノルズ数を推定すれば，従来の方法では十分に説明しえなかった管断面形状の異なる場合ならびに流体の流動特性の異なる場合の実験値をよく説明しうることを明らかにしえた。

第3章　擬塑性流体の円管内流れに関する研究

本章は，擬塑性流体の円管内流れの圧力損失を推定するため，混合長理論により，ニュートン流体を含めて擬塑性流体の乱流速度分布ならびに管摩擦係数とレイノルズ数との関係について検討し，得られた数値計算結果と既往の研究結果との比較検討を試みたものである。

擬塑性流体の円管内混合長分布は，擬塑性流体の特別な場合すなわち，レオロジー定数の値が1.0の場合にはニュートン流体に相当することを考慮に入れ，Nikuradseの混合長分布の実験式ならびにVan Driest の修正混合長およびHanks が提示した擬塑性流体の混合長を参考にし，仮設した6項目の条件より次のように求められた。

$$\frac{\ell}{r_o}=0.4\frac{y}{r_o}\exp\left(-\frac{y}{r_o}\right)\left[1-\exp\left\{-\frac{y}{r_o}\quad\frac{\alpha^{\frac{1}{n}}F\ (\alpha,\alpha_c,n)}{26\ B\ (n)}\right\}\right]$$

ただし，

$\alpha=\rho U^{*2-n}\quad r_o^{\,n}\ /\mu_p$

$\alpha_c=\{280(2n+1)(3n+2)/n^2\}^{n/2}$

$B\ (n)=1/n$

$\alpha>\alpha_c$ の場合，$F\ (\alpha,\alpha_c,n)=1-(\alpha_c/\alpha)^2$

$\alpha\leqq\alpha_c$ の場合，$F\ (\alpha,\alpha_c,n)=0$

この混合長分布を用いて得られるニュートン流体ならびに擬塑性流体の乱流速度分布に関する計算結果は，十分な精度で実験結果と一致し，かつ，既往の混合長分布では十分に説明しえなかった管中央部付近の速度分布ならびに最大流速の値をも十分に説明しうることが分かった。さらに，数値計算によって得られた管摩擦係数とレイノルズ数との関係は実験結果とよく一致し，かつ，従来の研究結果では十分に説明しえなかった臨界レイノルズ数に近いレイノルズ数の範囲における管摩擦係数の値を比較的よく説明しうることが分かった。また，上述の管摩擦係数とレイノルズ数との関係は，次式により$\pm$2.5％以内で近似しえた。

$$f_p=\frac{0.035n+0.044}{N_{Rep}^{\ 0.25/n^{0.2}}}$$

ただし，

$f_p\geqq 0.0015,\quad 3000\,n^{-0.75}\leqq N_{Rep}\leqq 10^5$

$0.4\leqq n\leqq 1.0$

以上の結果より，擬塑性流体を搬送流体とし，粒子群を輸送する際の搬送流体の圧力損失を十分な精度で，かつ，簡単に算出することが可能となった。

第4章　非均質な擬塑流体の圧力損失に関する理論的研究

擬塑性流体を搬送流体とし，粒子群を水平管により輸送した場合の混合体の流動状態は，擬塑性流体の非均質な流れとなるが，この流れの圧力損失を十分な精度で推定するために，擬塑性流体の特別な場合すなわち，レオロジー定数の値が1.0である場合にはニュートン流体に相当することから，水を搬送流体とした場合の粒子群の挙動について検討した野田の研究結果を参考にし，

擬塑性流体と粒子との相対速度を基にして求めた粒子の運動方程式より，圧力損失の基礎式ならびに附加圧力損失係数の表示式について理論的な検討を加えた。さらに，上述の式をニュートン流体に適用した場合とニュートン流体について求められたGraf ならびに野田の式との比較検討を試みた。

その結果，圧力損失の基礎式ならびに附加圧力損失係数の表示式として，それぞれ次のように得られた。

$$\varDelta P = \varDelta P_f + \frac{2\mu_s}{F_{rm}} \frac{C}{\zeta} \frac{L}{D} \frac{\gamma_f V_m^2}{2g}$$

$$\phi = \frac{i - i_f}{i_f C} = \frac{2\mu_s}{\lambda_f F_{rm}} \frac{1}{\zeta}$$

ただし，粒子の速度比 $\zeta (= V_s / V_m)$ は，次のように与える。

$$\zeta = \frac{1 - \delta + \sqrt{(1-\delta)^2 + 4C\delta}}{2}$$

ここに，δ は，次式に示す通りである。

$$\delta = \left\{ \frac{4}{3} \frac{N_{Rep}{}^{\varepsilon}}{\alpha_p} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{1+\varepsilon n} \frac{\mu_s}{F_{rm}} \right\}^{\frac{1}{2-\varepsilon(2-n)}}$$

なお，指数 ε は，粒子レイノルズ数の大きさによって，0.0 から 1.0 の値を与える。

さて，粒子と管壁との摩擦係数 μ_s が分かれば，上述の式より，混合体の圧力損失ならびに附加圧力損失係数の値を推定することが可能となるが，この摩擦係数については，第5章において述べている。

一方，ニュートン流体について求められたGraf および野田の式と上述の式をニュートン流体に適用した場合とを比較検討した結果，Graf の式は，均質な流れの圧力損失の算定には有用であるが，非均質な流れの場合には，計算値と実験値とには相違を生じることならびに野田の式は，著者の式の特別な場合であることが分かった。

第5章　粗粒子を含む擬塑性流体の圧力損失に関する実験的研究

水ならびに擬塑性流体として取り扱えるベントナイトスラリーを搬送流体とし，6種の粒子径の安山岩の砕石 d_s = 0.96〜5.68 mm ならびにビニールペレット d_s = 3.80 mm を水平管によって輸送した場合の混合体の圧力損失を測定し，粗粒子として取り扱える下限粒子径について考察し，かつ，第4章で得られた附加圧力損失係数の表示式との関係について検討を行った。さらに，限界速度ならびに下限実用輸送速度についても考察を加えた。

本実験結果では，擬塑性流体を搬送流体とした場合の粗粒子の下限粒子径は，ニュートン流体の場合と同程度であり，約2 mm であることが分かった。また，混合体の圧力損失は，附加圧力損失係数により整理できることを明らかにし，かつ，附加圧力損失係数の実験式として，次式を得た。

$$\phi = \frac{A_o}{\lambda_f} F_{rm}{}^{-1.25}$$

ただし，実験定数A_oは，粒子径の影響を受けるが，粗粒子の粒子径の範囲では，2.0とほぼ一定であることを明らかにしえた。

さらに，第4章に示した著者の式より混合体の圧力損失を推定する際に必要な摩擦係数μ_sは，附加圧力損失の表示式と実験値との比較検討から，次式のように示しえた。

$$\mu_s = 1.1 F(x) \left\{ \frac{V_m{}^2}{gD(\gamma_s/\gamma_f - 1)} \right\}^{-m}$$

ただし，F(x)ならびmは，次の通りである。

$d_s \geqq 2 \times 10^{-3}$ (m)

$$F(x) = 1 - (1 - C) \left[\frac{4}{3\alpha_p} \left(\frac{\gamma_f D^n}{g K' 8^{n-1}} \right)^{\varepsilon} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{1+\varepsilon n} \times \left\{ gD(\gamma_s/\gamma_f - 1) \right\}^{\frac{\varepsilon(2-n)}{2}} \right]^{\frac{1}{2-\varepsilon(2-n)}}$$

$d_s < 2 \times 10^{-3}$ (m)

$$F(x) = 22.5\sqrt{d_s} \left[1 - (1 - C) \left[\frac{4}{3\alpha_p} \left(\frac{\gamma_f D^n}{g K' 8^{n-1}} \right)^{\varepsilon} \left(\frac{d_s}{D} \right)^{1+\varepsilon n} \times \left\{ gD(\gamma_s/\gamma_f - 1) \right\}^{\frac{\varepsilon(2-n)}{2}} 22.5\sqrt{d_s} \right]^{\frac{1}{2-\varepsilon(2-n)}} \right]$$

$$m = \frac{0.055}{d_s{}^{0.25}}$$

また，附加圧力損失係数の値は，著者の式ならびに上述の摩擦係数の実験式とから，±15%以内で推定しうることが確認された。

一方，擬塑性流体を搬送流体とし，粗粒子群を水平管によって輸送した場合の限界速度として，次式が得られた。

$$V_{mc} = \left\{ \frac{4n^{0.2}C}{(0.14n + 0.176)(8n^{0.2} - 2 + n)} \right\}^{\frac{4n^{0.2}}{(10n^{0.2} - 2 + n)}} \times \left(\frac{\rho D^n}{K' 8^{n-1}} \right)^{\frac{1}{(10n^{0.2} - 2 + n)}} \left\{ gD \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_f} - 1 \right) \right\}^{\frac{5n^{0.2}}{(10n^{0.2} - 2 + n)}}$$

また，限界速度の値は，上述の式より十分な精度で推定しうることが分かった。さらに，上述の式をニュートン流体に適用した場合，得られる限界速度の推定値は，吐出体積濃度の小さい範囲においては，Wilson ならびにBrain の推定値に，また，吐出体積濃度の大きい範囲においては，Kriegel ならびに都田の推定値に近い値を示した。

一方，微粒子の沈降を防ぎ搬送流体自体の安定性を乱流流れの乱れより得る場合の下限実用輸送速度は，搬送流体が擬塑性流体の流動特性を有する場合には，第2章において述べた臨界レイ

ノルズ数の値より次式のように示しえた。

$$V_{mtc} = \left\{ \frac{2240\,(2n+1)\,(3n+2)}{(3n+1)^2} \quad \frac{K' 8^{n-1}}{\rho D^n} \right\}^{\frac{1}{2-n}}$$

第6章　結　　論

以上，各章で述べたように，本研究は，擬塑性流体を搬送流体とし，粒子群を水平管によって輸送する場合の混合体の圧力損失を十分な精度で推定するため，まず，搬送流体の圧力損失を明らかにする必要があると考え，流れ安定係数ならびに混合長理論により，擬塑性流体の円管内流れの臨界レイノルズ数ならびに管内乱流速度分布および管摩擦係数とレイノルズ数との関係を求め，さらに，粒子の運動方程式を基にして求めた圧力損失の基礎式を提示し，かつ，実験結果との比較検討を行ったものである。この結果，擬塑性流体による粗粒子群の管路輸送における圧力損失を十分な精度で推定することが可能となり，かつ，圧力損失，粗粒子の下限粒子径，限界速度などの基礎資料を得たことは，水力輸送に関して新らしい知見を得たものと考える。

審 査 結 果 の 要 旨

固形物を管路により水力輸送する際の流動抵抗を的確に知ることは，所要動力の算定等流送設計に極めて重要である。近年，輸送対象物の多種多様化により，混相流れは，非均質な非ニュートン流れ，特に擬塑性流れとなることが少なくないが，この流れの流動抵抗の推定に供しうる資料はほとんど提示されていないのが現状である。

本論文は，擬塑性流体を搬送流体とし，粗粒子群を摺動状態で，水平管により輸送する場合の混合体の流動状態ならびに圧力損失等を明らかにすることを目的とし，併せて擬塑性流体による粗粒子群の輸送システムの設計に指針を与えようとしたもので，全篇6章よりなる。

第1章は，緒論である。

第2章では，著者が新たに定義した流れ安定係数を基に，擬塑性流体等の直管内流れの臨界レイノルズ数の値を推定し，実測値との比較検討を行っている。この結果，管断面形状や流動特性の異なる場合にも実験結果をよく説明しうることを明らかにしている。

第3章では，擬塑性流体の円管内流れについて，著者の新たに導いた混合長分布を用い，管内速度分布ならびに管摩擦係数とレイノルズ数との関係を求めている。この結果，既往の混合長分布では十分に説明しえなかった管中央部附近の速度分布ならびに臨界レイノルズ数に近いところの管摩擦係数の値の推定をも可能にしている。さらに，管摩擦係数に関する近似式を求めて，圧力損失の算出を容易ならしめている。これは有用な成果である。

第4章では，非均質な擬塑性流れに関し，搬送流体と粒子との相対速度を基にした運動方程式により，流れの解析を行い，理論的検討の結果，圧力損失を求める基礎式ならびに附加圧力損失係数の表示式を提示している。

第5章では，擬塑性流体として取り扱えるベントナイトスラリーを搬送流体とし，安山岩砕石ならびにビニールペレットを水平管により輸送した場合の圧力損失を実測し，かつ前章において求めた圧力損失に関する基礎式による推定値と実測値とを比較し，両者がよく一致することを見出している。さらに，この実験結果を基に，擬塑性流体を搬送流体とした場合の粗粒子の下限粒子径ならびに限界速度などを明らかにしている。これは，優れた成果である。

第6章は結論である。

以上要するに，本論文は著者の新たに定義した流れ安定係数ならびに混合長分布により，擬塑性流体の臨界レイノルズ数および管摩擦係数とレイノルズ数との関係を明らかにするとともに，非均質な擬塑性流れの圧力損失の基礎式を提示し，これにより，流動抵抗を推定できることを明らかにしている。さらに，粗粒子の下限粒子径および限界速度を求め，擬塑性流体による粗粒子群の輸送に関する新知見を得たものであり，資源工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。