

岩石・土砂の大規模水力輸送システム —ハイドロホイストの適用—

Large Scale Hydraulic Transportation System for Stone and Sand —Application of HYDROHOIST—

この論文は、石炭の水力輸送用として開発されたハイドロホイストを、岩石、土砂などの粗粒子のスラリー輸送に適用した場合の得失について検討し、その結果、輸送効率やメンテナンスの面で、ハイドロホイストは従来の往復動形若しくは遠心形スラリーポンプよりも有利であることを示した。

更に、高効率・無公害の新システムとして、微粒子を含む擬似重液によって岩石、土砂などの粗粒子を輸送するシステムの構想及び基礎実験について述べた。輸送液に重液を使用する場合は、清水の場合と比較してトン・キロメートル当たりの輸送動力費が半減できる可能性があることを示した。またトラック、コンベヤなどが使用されている分野にも適用の可能性があると述べた。

坂本正克* Sakamoto Masakatsu

真瀬正弘** Mase Masahiro

名川泰正** Nagawa Yasumasa

内田健二* Uchida Kenji

1 緒 言

従来、浚渫などで採取される砂礫の多くは、スラリーとして管路により輸送されてきたが、それらの大部分は輸送距離が数キロメートル以下であり、これより長距離の例としては、鹿児島与次郎ヶ浜埋立工事などごく少数例がみられるにすぎない。しかも数十キロメートル以上の砂礫スラリー輸送の例は皆無である。その理由としては、砂礫の管路輸送では粒径が大きいため管内流速を大きくする必要があり、動力消費量、管摩耗が大きく、他の方法に比べて経済的でないことなどの理由とともに、砂礫スラリーを高圧輸送するのに適したポンプがなかったことも主な原因であったと考えられる。

近年、ダムに堆積した砂の除去や沖合に埋立による人工島

を作る構想が注目されており、それらに使用する砂礫の輸送方法の一つとしてスラリー輸送も考えられるが、前述の理由から従来の方法そのままでは実現が困難と思われる。

このような砂礫の長距離輸送に適したポンプ輸送システムとして、ハイドロホイストがある。ハイドロホイストは炭鉱での原炭輸送用として開発され、その後種々の研究や経験¹⁾を踏まえて改良されてきた。日立製作所はこれらの成果をもとに、昭和37年に実際規模研究用として古河鉱業株式会社好間鉱業所に建設された石炭技術研究所のハイドロホイスト本体を受注製作した²⁾。更に、そこでの研究結果を採り入れて改良を加えたものが、昭和40年に三井鉱山株式会社砂川鉱業所に

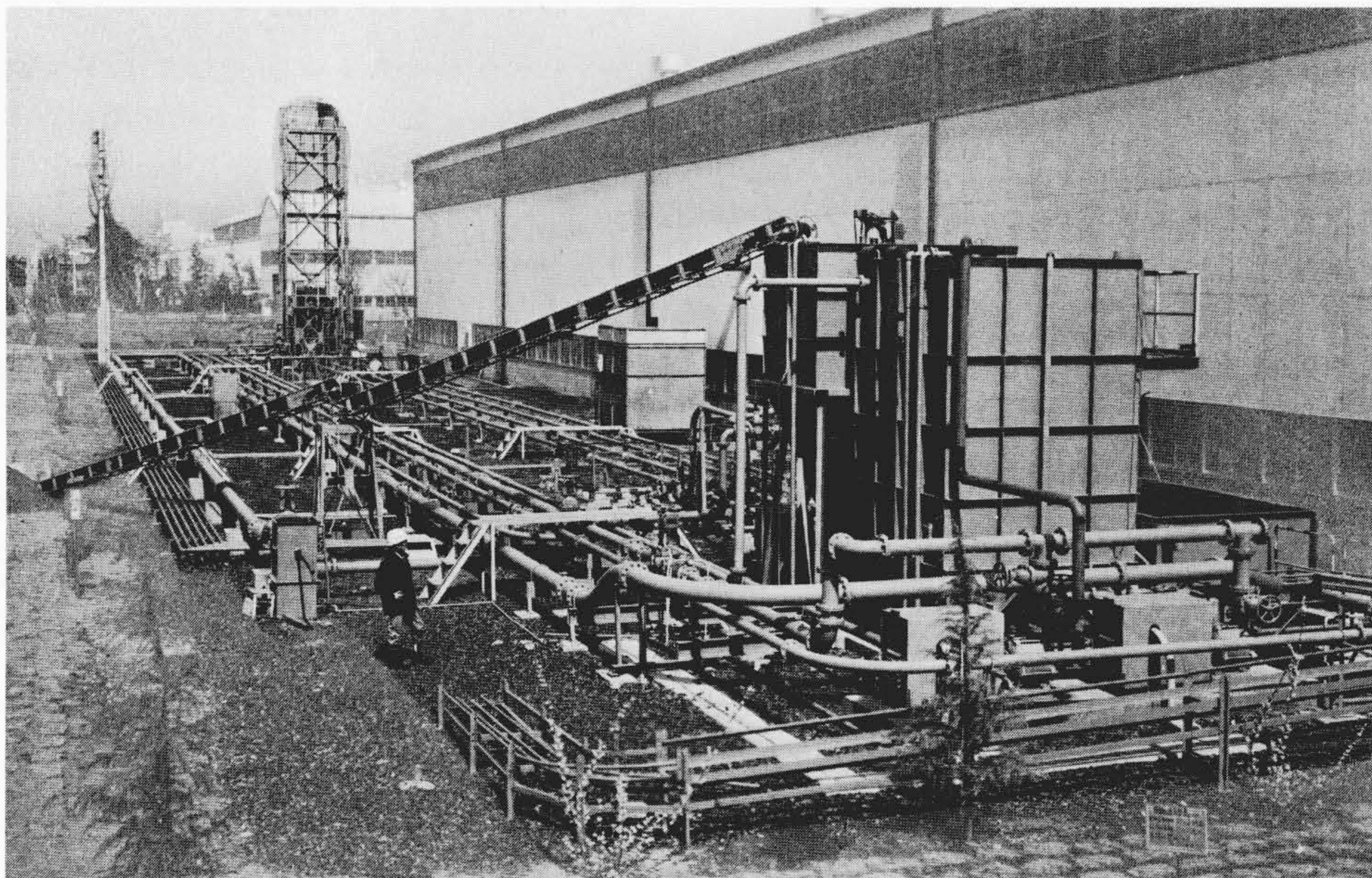


図1 ハイドロホイストの実験設備全容 輸送管100mm, 流量100m³/h, 圧力5~10kg/cm²の各種輸送物用実験設備を示す。

* 日立製作所土浦工場 ** 日立製作所機械研究所

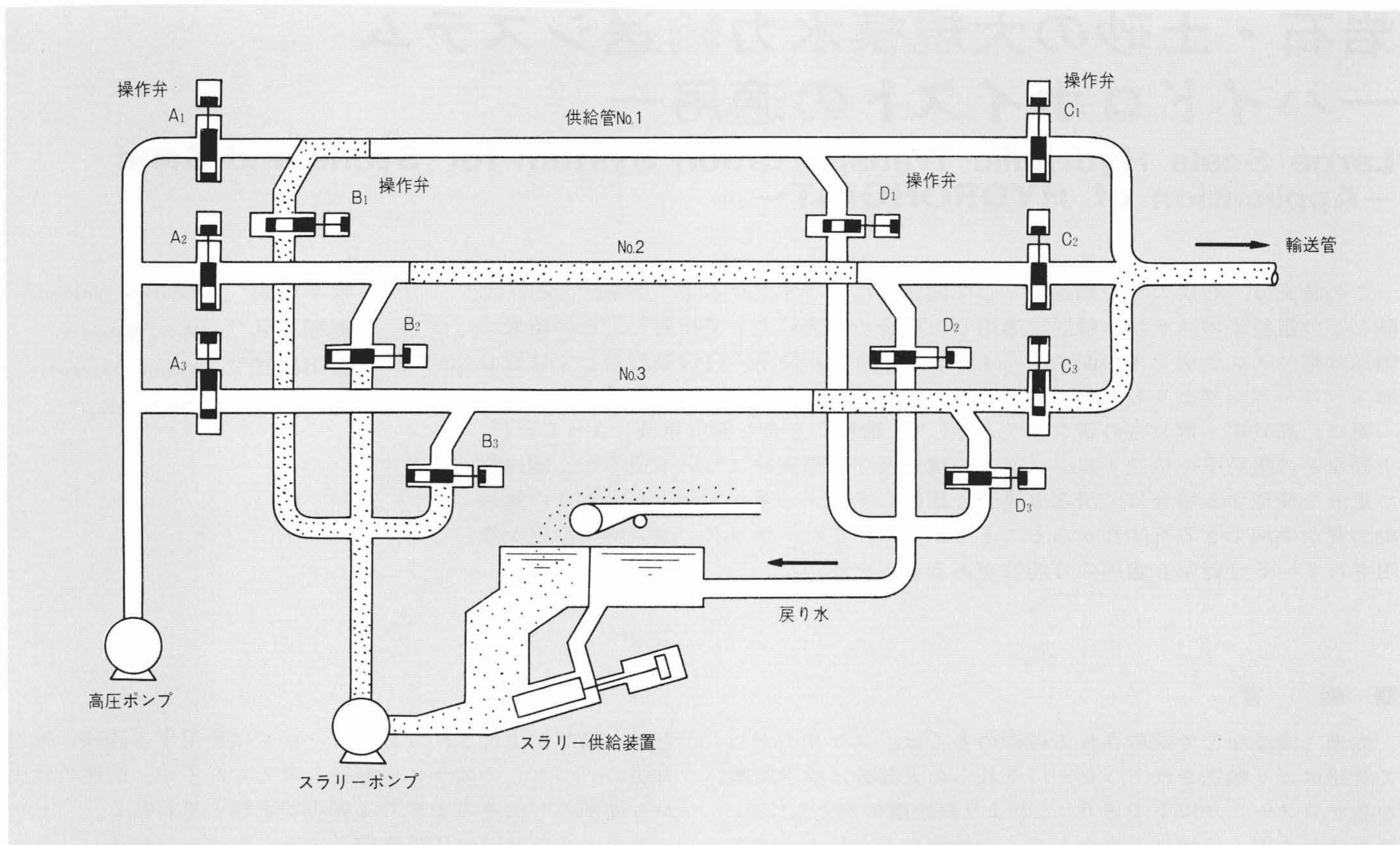


図2 横形ハイドロホイスต์原理図 ハイドロホイスต์は、高圧ポンプ、低圧スラリーポンプ、3本の供給管それにA, B, C, Dの各操作弁から構成される。

納入した主管圧送式ハイドロホイスต์であり³⁾、現在のハイドロホイスットの基本形となっている。このハイドロホイスットは塊炭輸送用として設計製作され、実際の操業を通じてその実用性が証明された。この形のハイドロホイスットが実用化されたのはこれが世界で初めてであり、その後世界各国で追随するところが出始めている。

日立製作所はその後、上記タイプのハイドロホイスットを発展させ、微粒子スラリー輸送用としての立て形ハイドロホイスット⁴⁾、カプセル輸送用ハイドロホイスットなども開発した⁵⁾。土砂及び礫の輸送用としては自社工場内にハイドロホイスットの実験設備を設け、研究を行なっている^{5), 6)}。図1にその全容を示す。

これらの研究結果や実績を基礎に、砂礫スラリーの長距離大容量輸送システムに対するハイドロホイスットの適合性、及び種々の新機軸を採り入れることにより、従来システムの問題点を解決できる新構想のシステムについて以下に述べる。

2 ハイドロホイスットの原理及びその動作

ハイドロホイスットとは3本の水平管(供給管)にスラリーポンプによってスラリーを順次充填していき、充填を完了した供給管は弁を切り替えた後、高圧ポンプの圧力水によりスラリーを輸送管へ送り出すことを基本原理とした固形物の水力輸送装置である。主要機器は3本の供給管、各供給管に付属するA, B, C, Dの各操作弁、高圧ポンプなどから成る。具体的な動作は次の順序で行なわれる(図2)。

- (1) A弁とC弁を閉じ、B弁とD弁を開く。
- (2) スラリーが供給管に完全に充填された後、B弁とD弁を閉じる。

- (3) A弁とC弁を開く。供給管に充填されているスラリーは高圧ポンプの清水によって輸送管へ送り出される。

以上の動作を3本の供給管ごとに交互に繰り返すが、これらのすべての動作は制御装置によって自動的に行なわれる。

3 砂礫スラリー輸送に対するハイドロホイスットの適用

ハイドロホイスットは前述したような動作でスラリーを圧送するので、一般のスラリーポンプにない種々の優れた特性をもっている。砂礫スラリーの輸送を念頭において、ハイドロホイスットと他の方式とを比較すると次に述べるとおりである。

- (1) ハイドロホイスットは輸送管径の約 $\frac{1}{3}$ までの粒径の粒子を長距離(高圧)輸送することができる。往復動形スラリーポンプでは、高圧輸送は可能であるが、逆止め弁を使用するので微粒子だけの輸送しかできない。ハイドロホイスットでは粒子の通過性の良いプレート弁を採用しているので、輸送管を通過可能な粒子(一般に管径の $\frac{1}{3}$ といわれている)ならば輸送することができる。また遠心形スラリーポンプでは、低圧輸送しかできないので例えば数キロメートルごとに中継ポンプを必要とするが、ハイドロホイスットでは数十キロメートルまでは中継を必要としない。

- (2) ハイドロホイスットは往復動形スラリーポンプと比較して摩耗が非常に少ない。供給管充填用のスラリーポンプだけは一般の低圧スラリーポンプと同程度の摩耗があるが、弁など他の部分の摩耗はこれに比べてはるかに少ない。したがって、スラリーの高圧輸送装置としては、ハイドロホイスットの耐摩耗性は非常に優れている。

- (3) ハイドロホイスットは高圧発生源が効率の良い清水ポンプなので、一般のスラリーポンプと比較して輸送効率が良く、

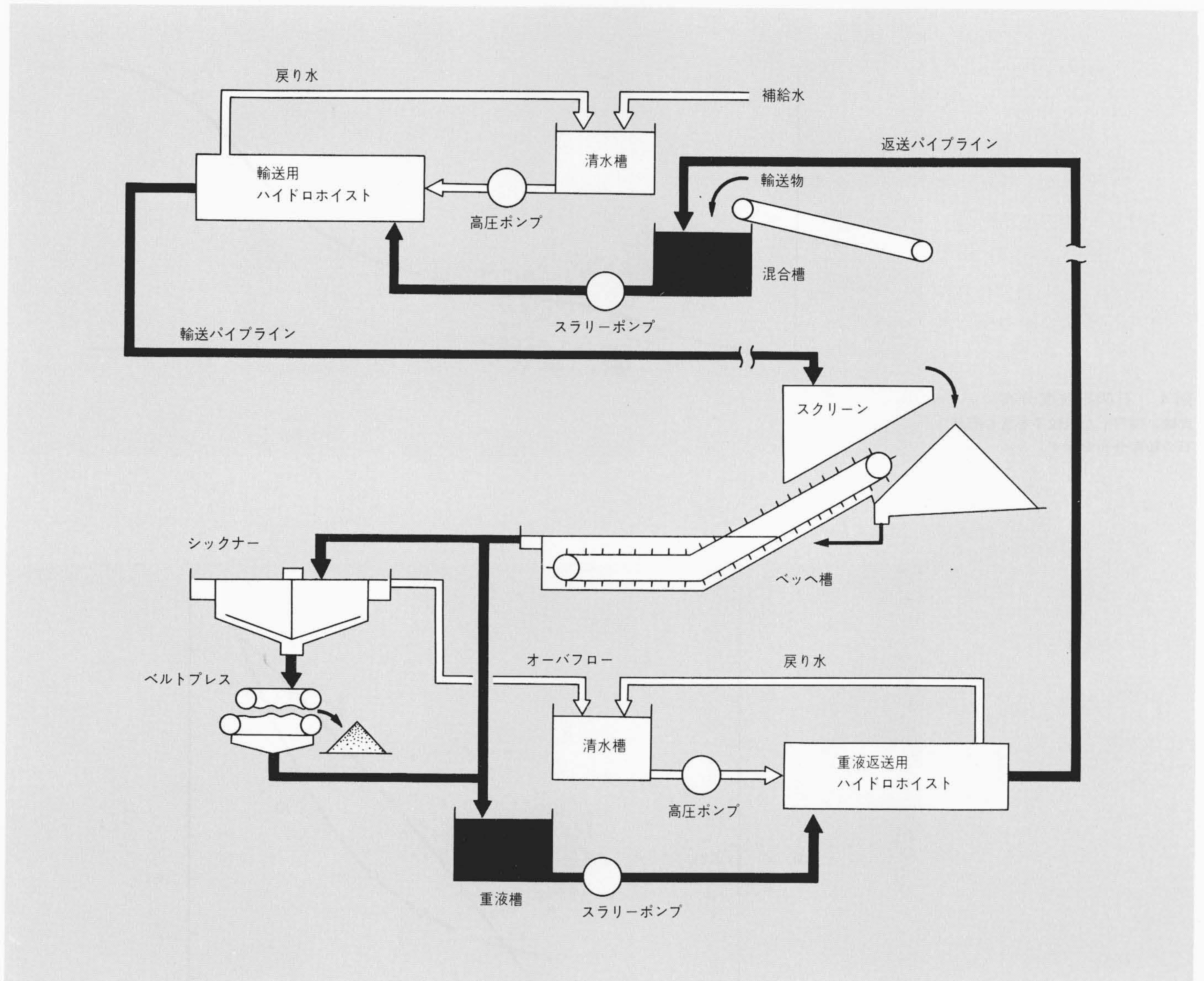


図3 新スラリー輸送システム 50 μ 以下の微粒子により擬似重液を作り、この中に粗粒子を浮かべて輸送する方式で、重液は汚染のないよう循環使用される。

またスラリー濃度が高くなってもスラリーポンプにみられる効率低下は生じない。したがって、ハイドロホイストは、総合して10%ないし20%以上効率が低い。

(4) ハイドロホイストは重量濃度47%ないし60%(含泥率40%ないし60%)の極めて高濃度の輸送が可能である。遠心形スラリーポンプでは重量濃度15%ないし26%(含泥率10%ないし20%)で使用されている。濃度を上げることにより余分な水を輸送する必要がないため、輸送動力が少なくて済み、また流量もその分だけ減るので配管などの設備費が大幅に減少する。

4 新スラリー輸送システムの研究

4.1 構想

従来の遠心形スラリーポンプを直列に中継して運転する方式に比較して、ハイドロホイストを使用する方式には、3章で述べたような多くの利点があり、スラリー輸送の経済性の向上に貢献すると考えられる。しかし、岩石などのスラリー輸送では次のような点が大きな問題である。

- (1) パイプが数年以内で摩耗する。
- (2) トン・キロメートル当たりの動力消費量が、コンベヤ、

トラックなどに比較して数倍である。

(3) 排水による環境汚染

これらの問題により、山岳部など特別の条件を除き、必ずしも経済的とは言えない場合が多い。以上の問題を解決するために日立製作所は、水の代わりに微粒子スラリーの擬似重液を輸送液として使用し、かつこの輸送液を循環使用するシステムを考案した。

以下この構想及び関連研究の結果について説明する。

このシステムは、50 μ 以下の微粒子に清水を加えた擬似重液(以下、重液と呼ぶ)を作り、その重液を清水の代わりに使用することを基本的な考えとしたものである。更に、濃度を高めることにより、重液はビンガム流体若しくは擬塑性流体となり、砂礫の沈降が極めて遅い状態となる。したがって、適当な重液濃度を与えることにより、スラリーの管内流速を極めて低速とすることができ、輸送動力はもちろん、管摩耗も著しく減少させることが可能となる。また重液は返送して循環使用することになるので、排水による汚染の恐れもない。

図3に、新システム構想の一例を示す。輸送砂礫は混合槽

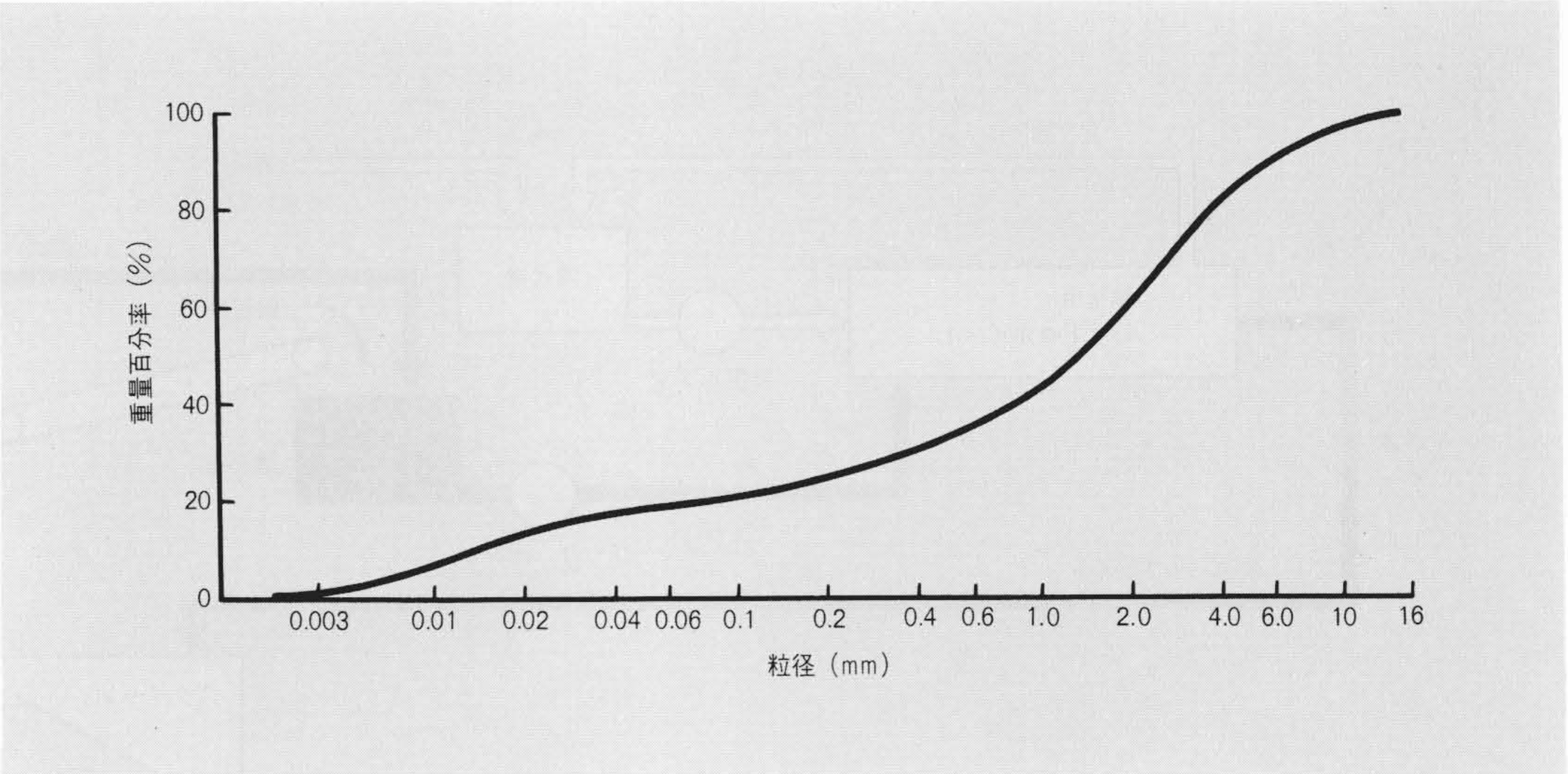


図4 石灰石粒度分布
実験に使用した粗粒子を含む石灰石の粒度分布を示す。

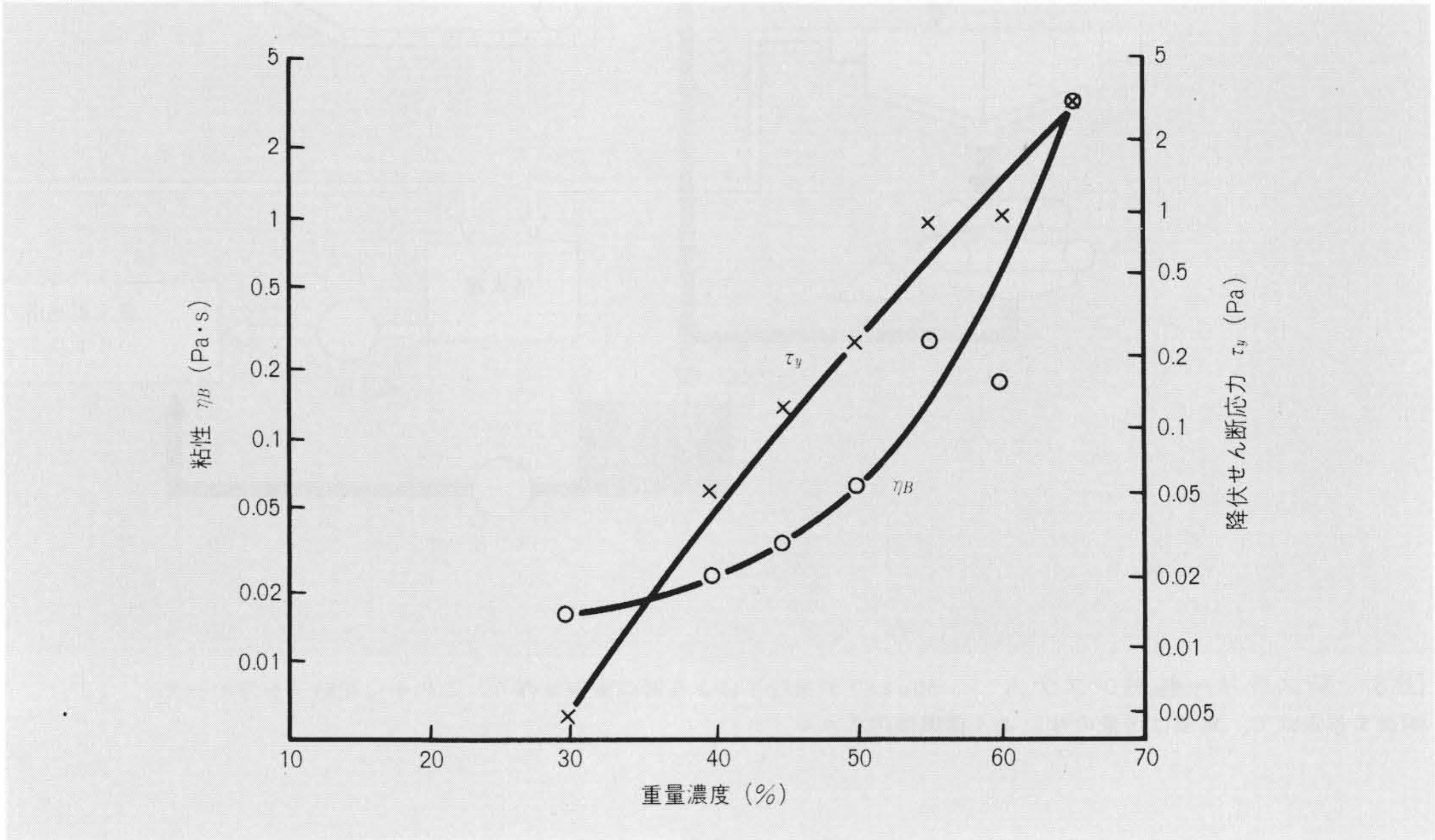


図5 微粉スラリーの粘性
と降伏せん断応力 重液の濃度を変化させた場合の粘性及び降伏せん断応力を示す。

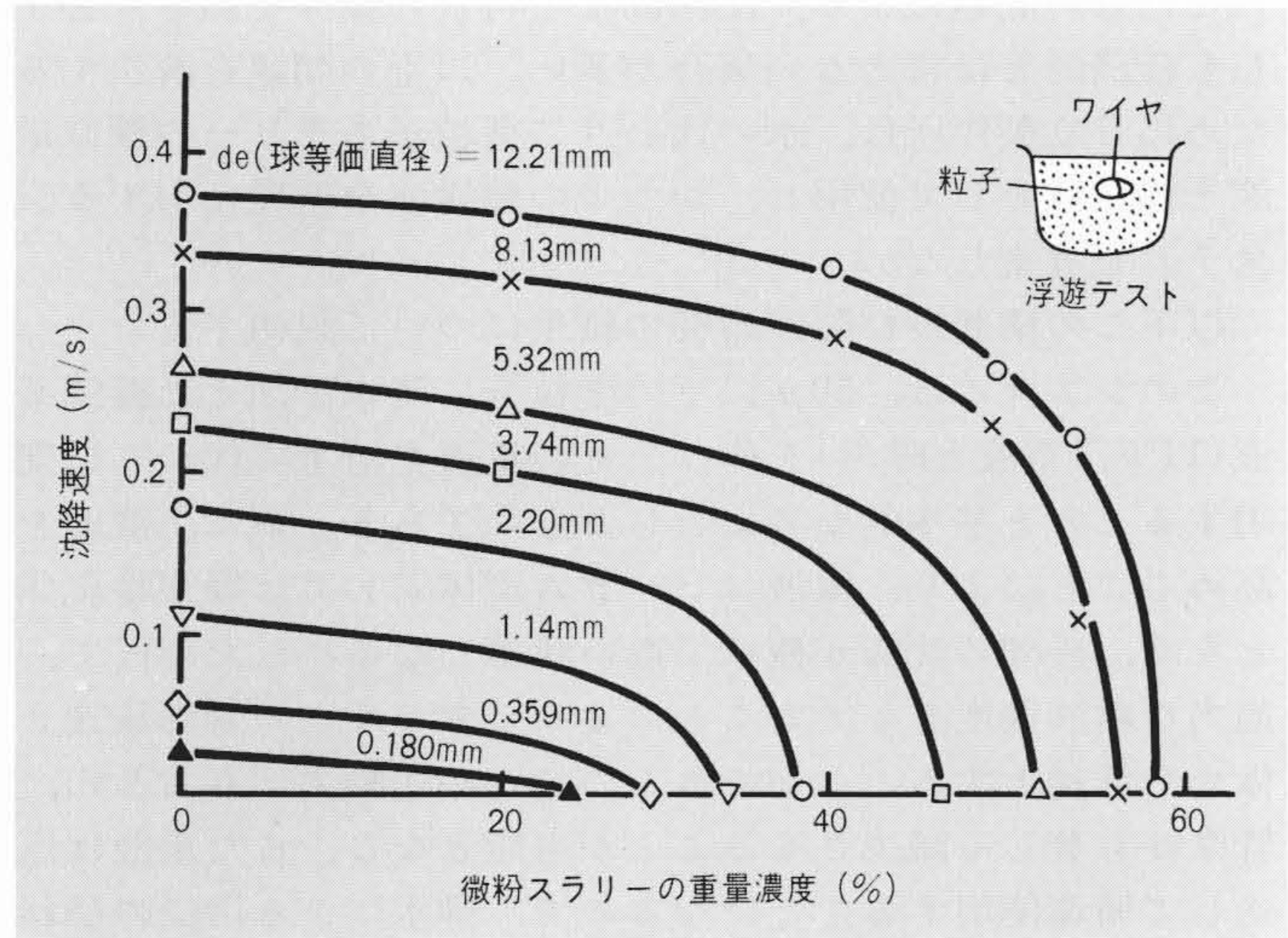


図6 微粉スラリー中における粗粒子の沈降速度
石灰石で作った重液中での石灰石粗粒子の沈降速度を示す。

で重液と混合され、低圧のスラリーポンプを経て輸送用ハイ
ドロホイストの供給管に入る。次に高圧清水により、輸送用
ハイドロホイストの供給管から送り出されたスラリーは、輸
送パイプラインを通して目的地まで輸送される。輸送パイ
プライン出口ではスクリーン又はベッヘ槽などで砂礫だけを分
離し、重液だけは返送パイプラインで循環使用する。微粒分
は砂礫に付着若しくは混合しているものによって、重液中の
微粒分の濃度はしだいに増加するので、重液中のごく一部を
分流し、シックナー及びベルトプレスなどによって微粒分の少
量を除去し、返送重液の濃度を常に一定に保つ。一方、分離
した砂礫に付着したり、若しくは蒸発などによって失われる
水分は、重液槽の水位などによって検出し、輸送用ハイドロ
ホイストの高圧清水ポンプの流量を増加させることによって
損失分を補給する。

このスラリー輸送システムにより、4.1で述べた問題点は解
消できると考える。すなわち、
(1) 管摩耗は、一般に流速の2～3乗に比例すると言われて

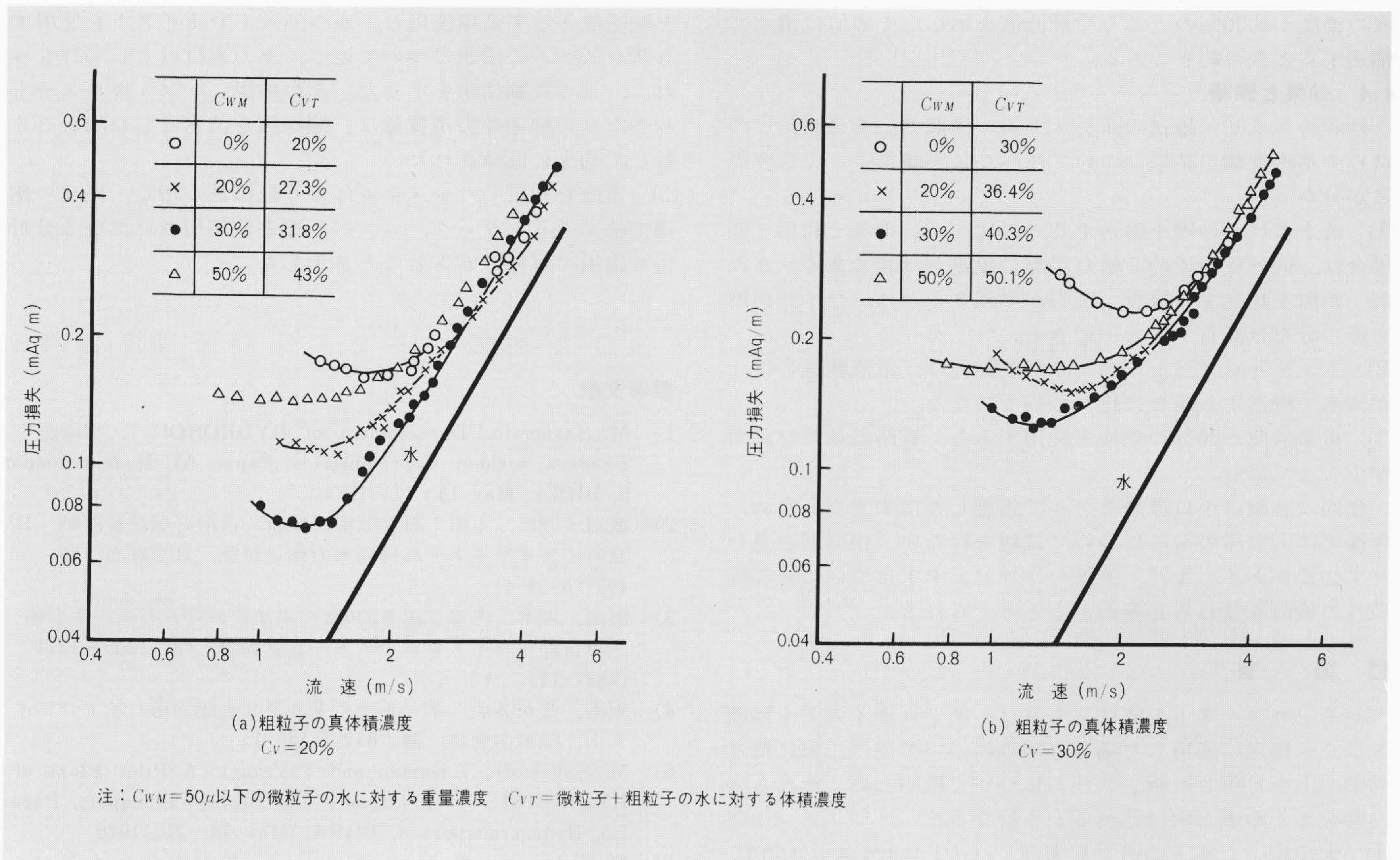


図7 粗粒子濃度を一定として重液濃度を变化させた場合の圧力損失のとき、圧力損失が最小となることを示している。

重液の重量濃度が30%

おり、重液を使用した場合、流速は清水の $\frac{1}{2}$ 以下にできるので清水で輸送したときに比べ数分の一、10年あるいはそれ以上の寿命が期待できる。

(2) トン・キロメートル当たりの動力消費量は、清水の場合の約 $\frac{1}{2}$ となり、トラック、コンベヤなどと同程度になる可能性がある。

(3) 排水を外部へ出さないで環境汚染の心配がない。

4.2 物性試験

試験には典型的な岩石や土砂の一種と考えられる石灰石を使用した。図4に粒度分布を示す。

最大粒径は約16mmで、 50μ 以下の粒子を約19%含む。石灰石の比重は2.75である。この試験では 50μ 以下の微粒子をふるい分け、 50μ 以上の粒子との混合割合を種々変化させて試験した。図5は重液の濃度を变化させた場合の粘性 η_B 及び降伏せん断応力 τ_y を示す。この重液中に石灰石の粗粒子を沈降させた結果を図6に示す。同図から分かるように、例えば粒径12mm以下の粒子は、重液の重量濃度が60%になれば沈降しないことが分かる。同様に2.2mm以下の粒子は重液重量濃度が40%になれば沈降しない。

もしこれらの重液濃度で運転すると、粒子は沈降しないので、流速を低くとることができる。しかし一方、粘性が増加するので、逆に抵抗が増大するものと考えられる。実際の管路輸送での重液の最適濃度は、これらの値よりも低いところに存在すると思われる。

4.3 輸送試験

試験は直径50mmの輸送管を使用して行なった。試験結果の例を図7に示す。(a)は 50μ 以上の粒子の真体積濃度 C_v が20%、(b)は C_v が30%の場合、重液の重量濃度を種々変えた際の管路

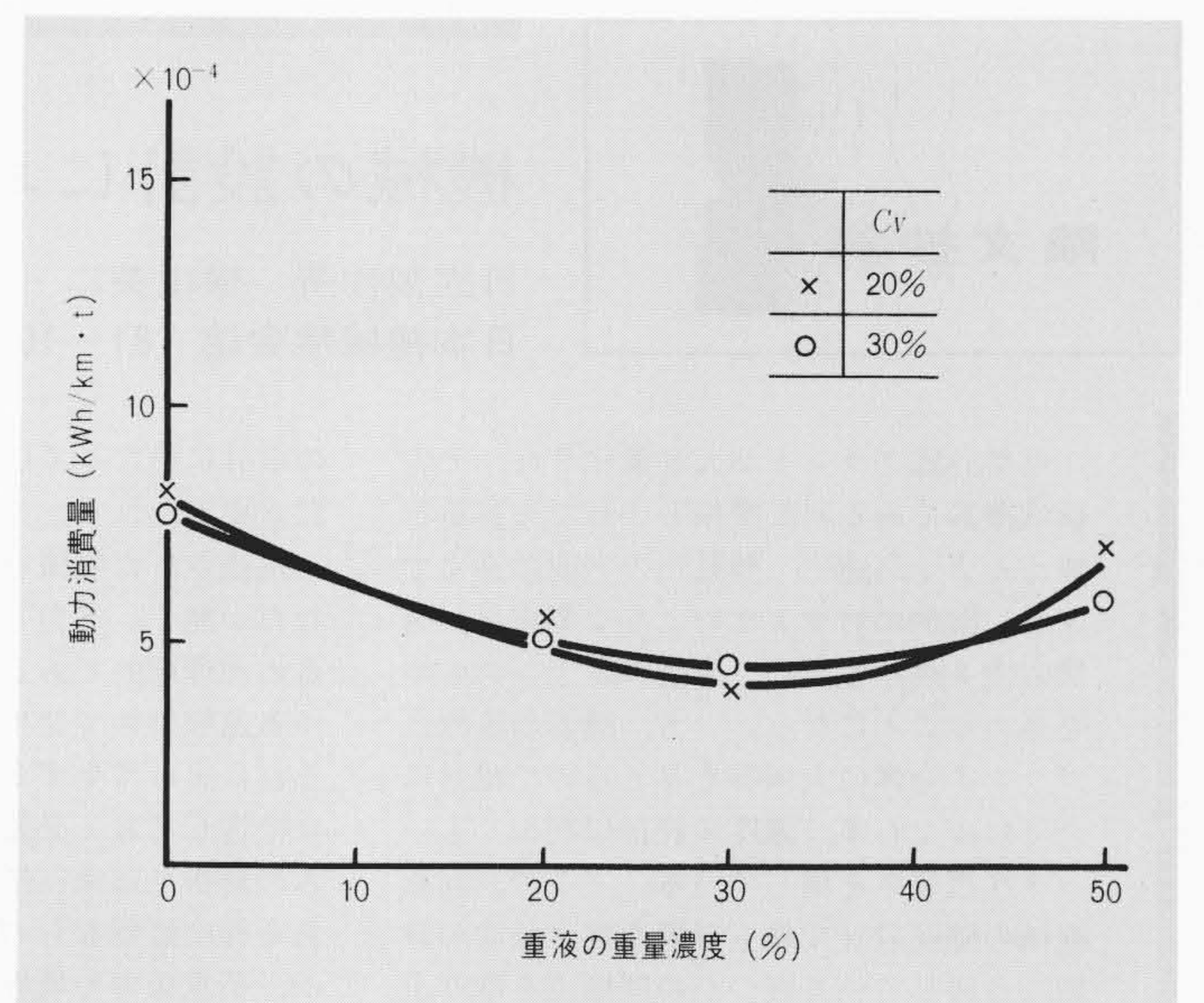


図8 50mm管における粗粒子の水力輸送動力 重液の重量濃度が30%のときトン・キロメートル当たりの動力消費量が最小となることを示す。

抵抗を示す。いずれの場合にも重量濃度を上げていくと管路抵抗が減少するが、重液の重量濃度が30%のところで管路抵抗は最小となり、更に重液濃度が増えると管路抵抗は再び増加する。その値は重量濃度0、すなわち重液を全く使用しない清水だけの場合に比較して、管路抵抗が半減若しくはそれ以下に低下していることが分かる。この結果を、トン・キロメートル動力消費量で比較すると図8に示すようになる。重

液の濃度が約30%のところで最低値を示し、その値は清水で輸送するときの約半である。

4.4 効果と課題

砂礫のスラリー輸送の新システムの構想と、その裏付けのための基礎実験の結果について述べた。実験によって次のことが分かった。

- (1) 清水だけで砂礫を輸送するのに比べて、重液を利用する場合は、同一圧力で約2倍の距離の輸送が可能である。また同一距離を輸送する場合、圧力が半減するため、パイプ肉厚をその分だけ減らすことができる。
- (2) トン・キロメートル当たり所要動力は、重液輸送のほうが清水で輸送する場合に比べて約半になる。
- (3) 重量濃度が30%の重液を使用すると、管路抵抗及び動力が少なくて済む。

今回の試験は小口径のモデルで実施したにすぎないため、今後更に大口径のものについて試験を行ない、相似則を見いだす必要がある。また、実際のプロジェクトについて更に経済性の検討を重ねる必要があると考えられる。

5 結 言

ハイドロホイストの成り立ち及びハイドロホイストを砂礫スラリー輸送に適用した場合の利点について述べ、更に輸送効率向上を目指した新システムについて説明した。それらの内容をまとめると次に述べるようになる。

- (1) 大径粒子を高圧輸送する場合、ハイドロホイストは効率、メンテナンスの面で従来の遠心形スラリーポンプよりも有利である。
- (2) 清水の代わりに 50μ 以下の微粒分を清水に混入した重液

を輸送液として循環使用し、かつハイドロホイストを使用する新システムの構想について述べ、その裏付けとして行なった二、三の実験結果を示した。その結果、トン・キロメートル当たりの輸送動力消費量は、輸送液を清水とした場合と比較して約半に低減された。

- (3) 重液を利用したシステムにより経済性が増し、従来の輸送方法であるトラック、コンベヤなどが使用されている分野にも適用の可能性があることを示した。

参考文献

- 1) M. Sakamoto: Development of HYDROHOIST, Slurry Feeders without Contamination, Paper A1, Hydrotransport 3, BHRA, May 15-17, 1974
- 2) 渡辺, 寺田, 坂本: 石炭技術研究所, 古河好間試験所納, 日立ハイドロホイスト高揚程水力輸送試験, 日立評論, 45, 495 (昭38-4)
- 3) 渡辺, 坂本, 内田: 深さ500mの立坑における石炭の水力輸送用自動化ハイドロホイスト, 日立評論, 48, 1305-1311 (昭41-11)
- 4) 坂本, ほか3名: ボーキサイトスラリー圧送用ハイドロホイスト, 機械学会誌, 73, 612 (昭45-1)
- 5) M. Sakamoto, T. Karino and T. Takagi: A Pilot Plant of HYDROHOIST for Capsule and Slurry Transport, Paper E6, Hydrotransport 4, BHRA, May 18-21, 1976
- 6) M. Sakamoto, M. Mase, Y. Nagawa, K. Uchida and Y. Kamino: A Hydraulic Transport Study of Coarse Material Including Fine Particles with HYDROHOIST, Paper D6, Hydrotransport 5, BHRA, May 8-11, 1978

論文抄録

機械の設計における疲労強度の幾つかの問題点

日立製作所 横山英二・鯉渕興二
日本機械学会誌 81-10, 710 (昭53-1)

近年各種プラントが大容量化され、その構成機器である回転機械も小形で大容量を扱えるよう高速化、軽量化の方向に進んできた。機械に対するこのような要求は、当然応力レベルを高め、事故のポテンシャルを高めることになる。一方、機器の事故はプラント全体に大損害を与えるので絶対に避けねばならず、強度設計は以前よりもいっそう重要さを増している。そこで、回転機械の強度設計で最も重要な疲労強度の評価で当面している幾つかの問題点を取り上げてみた。

回転機械の設計では、以前には主要諸元の決定、内部の詳細な性能計算、強度や振動の解析といった手順を設計者が計画図を描きながら部分的に電子計算機の助けを借りて進めてきたが、最近はその手順をそのまま踏襲し、電子計算機により一貫して行なわせ、更に計画図まで作図させる段階にきている。しかし、これらの設計法は、従来の実績内でのインタポレーションに過ぎず、新製品の開発や実績値を超えた特殊品

の設計に当たっては、より厳密な強度の検討が要求される。

洗練された機械を設計するには、各部にむだが無く、応力レベルが均一化されているのが理想的である。そのためには、あらゆる運転条件で発生する外力・加振力と、それによって生ずる応力の因果関係を正確に把握しておく必要がある。応力とひずみの解析では幸い有限要素法が実用化され、ある程度難解なものでも計算可能となったが、荷重条件や境界条件の設定が難しく、有限要素法で求めた結果が実際に生ずる応力とどれほど一致するかについては、まだまだデータ不足である。

製品の疲労強度を予測するために、疲労き裂の発生する応力集中部の局部ひずみ ϵ によって、その箇所での疲労き裂発生寿命 N_c を予測する方法がとられるようになってきた。このような方法は、精度も高く便利であるが、 ϵ と N_c の関係を小形の試験片で予測するにはまだまだ問題があり、実物疲労試験を欠かすことができない。更に、製品

の疲労強度を低下させる腐食の影響に関してもいっそう研究を進める必要がある。

製品の疲労強度は、製造技術によっても相違する。最近は残留応力と疲労強度の関係、欠陥サイズと疲労強度の関係も定量的に把握できるようになってきたので、今後信頼度の高い製品を製作するには、このような関係をよく把握し、製造技術を的確に管理するとともに、製品のできばえを検査する方法を確立しておく必要がある。

今後、疲労設計をますます高度のものにしていくためには、実物強度の解析に必要な切欠き、多軸応力、寸法効果などの理論の不備を補うとともに、電子計算機シミュレーションの導入などの合理化を図り、更に疲労強度などのばらつき要因を考慮した信頼度設計の具体的手法を確立する必要がある。またこのような疲労強度設計の電子部品など、新分野へのいっそうの発展が望まれる。