

脈動流中の粒子抵抗*

坂本定男・金沢康次**・近藤 徹***・生田和宏****

Particle Resistance in Pulsation Flow*

Sadao SAKAMOTO, Koji KANAZAWA**, Toru KONDO***
and Kazuhiro IKUTA****

(Received May 21, 1990)

Resistance coefficient of particle was measured in pumping flow added pulsation by piston-crank mechanism. As the result of experiment, it was found that resistance coefficient of particle was remarkably increased by 7Hz and was considerably increased by 15Hz before 25Hz of pulsation frequency of pumping fluid. In these conditions, the increasing amplitude of flow rate fluctuation of pumping fluid was appeared experimentally. Also it was cleared by the result of simple theoretical calculation that the frequency at which resistance coefficient of particle increase is equal to pressure wave propagating frequency of pumping fluid in pipe.

Key Words : terminal velocity, particle Reynolds number, pulse amplitude

1. はじめに

輸送流体中の粒子抵抗は, 一般に静水中を自由落下する粒子 (または粒子群) の終速度 (または平均終速度) から得られる抵抗係数 (または平均抵抗係数) を用いて求められる. 終速度は, 静水中の粒子速度 (粒子と流体の相対速度) が一定のときの速度であるので, 定常流動中の流動抵抗 (これは粒子を加速するための力となる) は, もし流れの乱れや揺らぎ等の影響がなければ, 静水中で求められた抵抗係数を用いて充分正確に求められる. しかしながら粒子のパイプ輸送では, 粒子はパイプ壁に衝突して減速し, それが反撥して管中央近くを飛行する際に加速され, そしてまた管壁に衝突して減速するというように, たえず加速減速を繰り返しながら輸送されている¹⁾. このようなときの粒子抵抗は, 粒子と流体の相対速度 (ひいては粒子レイノルズ数) が常に一定の時のものと必ずしも等しいとは考えられないが, 流体輸送では輸送動力 (従って圧力損失) を正確に推定することが最も重要な課題であるので, そのもっとも効果的な方法として, 普通は粒子の加速損失, 管壁との摩擦損失その他粒子の相互衝突損失なども, すべて粒子による付加圧力損失に含めて取り扱われている²⁾. 最近ほとんど完成の域に達している粒子の希薄輸送³⁾では, そのような取扱で特に問題は生じなかったが, 脈動はともなう輸送効率が高い点で工業的に重要な高濃度低速輸送⁴⁾では, 輸送中に粒子沈積による管閉塞の問題が生じてくる. 管閉塞防止には粒子抵抗, 特に脈動流中の粒子抵抗の知識が必要であるので, 本研究では脈動周波数を人為的に 0~25Hz に変え, 若干の

* 日本産業技術教育学会第2回九州支部大会 (1989) で講演

** 熊本大学工学部大学院博士課程

*** 熊本大学工学部機料開発工学科

**** 産山中学校

種類の粒子の平均粒子レイノルズ数に対する抵抗係数を測定し、定常流のそれと比較検討した結果を報告する。

2. 実験装置および使用粒子

静水中の終速度の測定は容易であるが、脈動している平均静水中の終速度の測定は容易でない。それで終速度としては、ともに粒子の自由落下速度でなく、粒子が上昇流体中に平均的に一定高さを保つときの流体速度（浮遊速度）を求めることにした。このため図1に示す実験装置で定常・脈動両方の浮遊速度を測定した。内径50mm長さ2mの亚克力管(18)…測定管…を鉛直に立て、その上端と下端にそれぞれ水槽を接続し、上水槽(5)は管系に加わるヘッドが一定に保つためと、流量測定(A), (B)が可能になるようにオーバフロータイプにした。下水槽(4)の出口絞り部（鉛直亚克力管の入り口）にはメッシュをはめ込み、上水槽下端に開口している亚克力管上端、より供給された粒子の溜り場を兼ねた始動位置とした。輸送流体は貯水タンク系(1), (2), (3)からポンプ(7)を介して下水槽(4)に送り込まれる。その際の流量調整と測定は弁(9)と流量計(11)…丸ノズル…でなされ、脈動は流量計と下水槽の配管に接続したピストンクランク機構(12)で発生される。なお(8)はポンプ、(10)はバルブ、(13)は給水管、(16)はノズル取り付け管、(17)は圧力損失による流量検定管である。

脈動発生装置は図2に示す。脈動周波数（すなわちクランクの回転数）はクランク軸…クランク板(22)にクランクピン(26)を取り付けて構成…に直結した可変速モータ(20)およびシリンダ(23)に内蔵しているピストン(25)のピストンクランク機構で発生される。図中の(27)はエア抜き穴である。そして周波数の測定は図3に示すように光電式周波数カウンタ(24)により行われた。脈動発生装置のピストン(25)の往復運動による計算吐出流量（付加流量） Q_2 はクランク角 θ によって変動し、それがポンプから送り出される流量 Q_1 に付加されるので、粒子を輸送する流量 Q は式(1)によって図4に示すように変動し、脈動周波数が増えれば脈動量の変動も大きくなる。

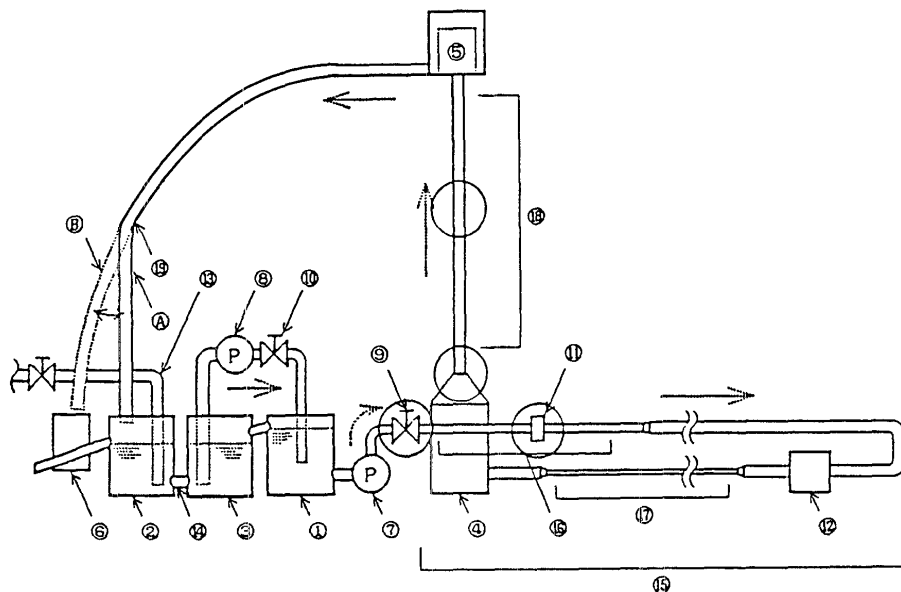


図1 実験装置

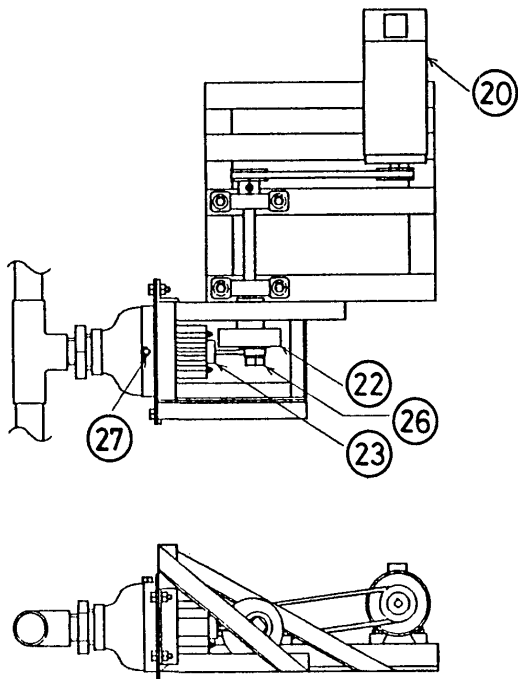


図2 脈動発生装置

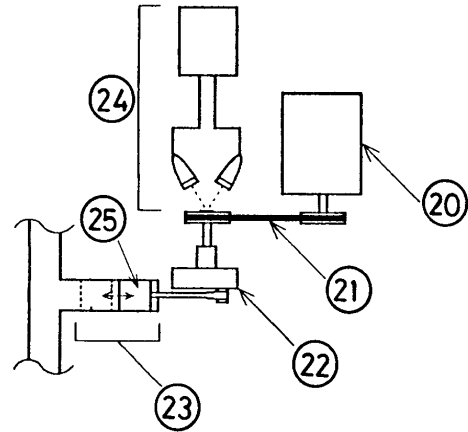


図3 計測機構

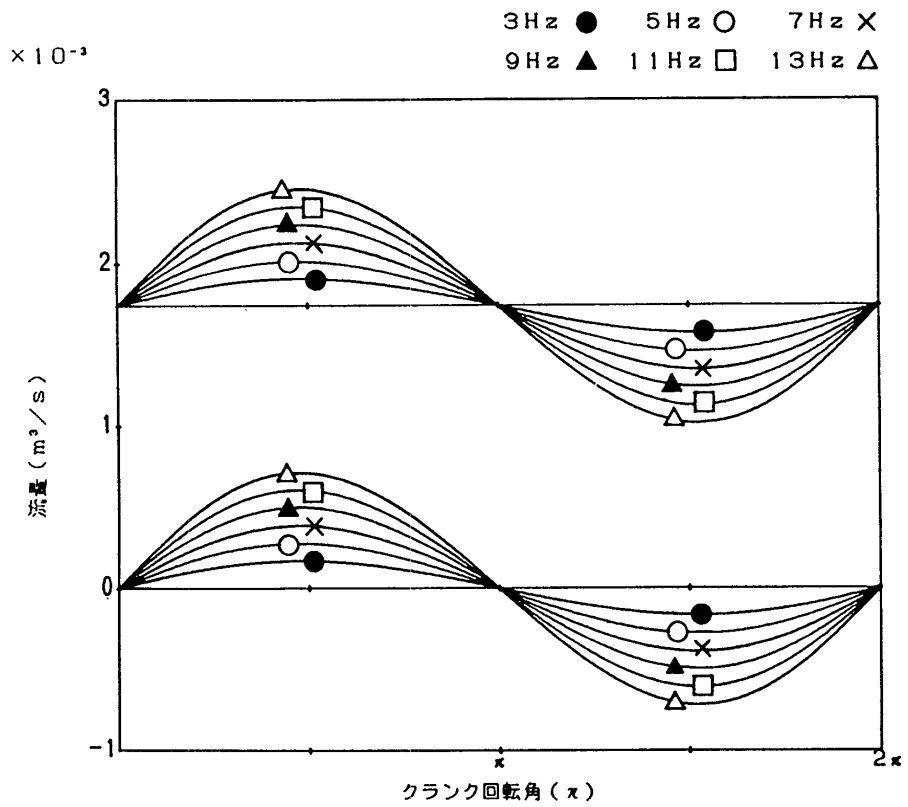


図4 脈動流におけるクランク回転角と流量の関係

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_1 + A_c \cdot a \cdot \omega \left\{ \sin \theta + (\lambda \cdot \sin 2\theta) / 2 (1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta)^{1/2} \right\} \quad (1)^5$$

ただし、 A_c はシリンダー断面積、 a はクランクアームの長さ、 ω はクランク軸の回転角速度、 θ はクランクの回転角、 $\lambda = a/b$ 、 b はコネクティングロッドの長さである。

自作丸ノズルの流量係数 (α) は、定常流で管レイノルズ数 (Re) によりわずかに変化し、図5のようになる。定常流での丸ノズル前後の圧力差一定の状態で絞り弁開度を固定し、その後脈動発生機の周波数 (定常流への付加流量の周波数) のみを変化させ、メジャリングタンク法、U字管マンメーターの平均差圧 (直読による凡その平均差圧) による方法および絶対圧電気測定器を用いた平均

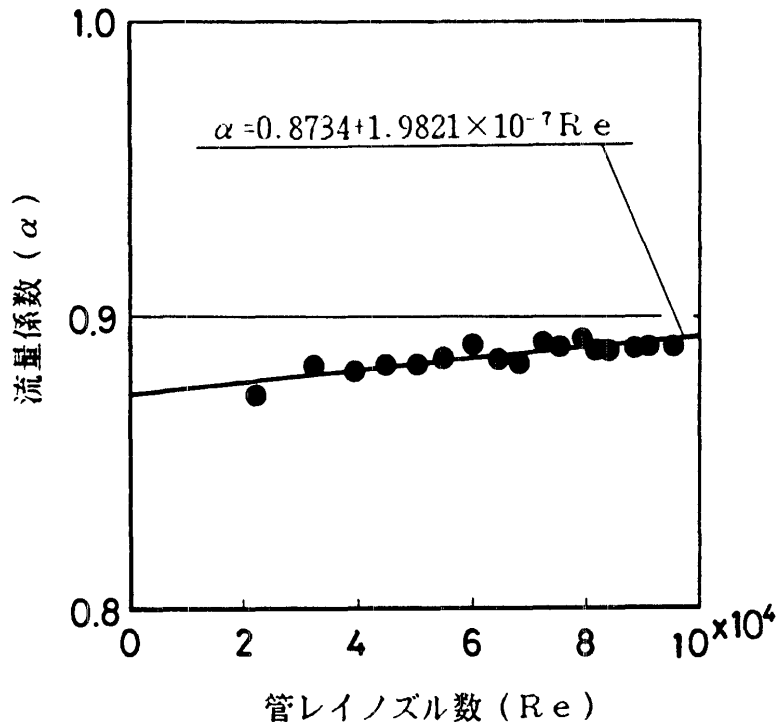


図5 製作丸ノズルの流量係数

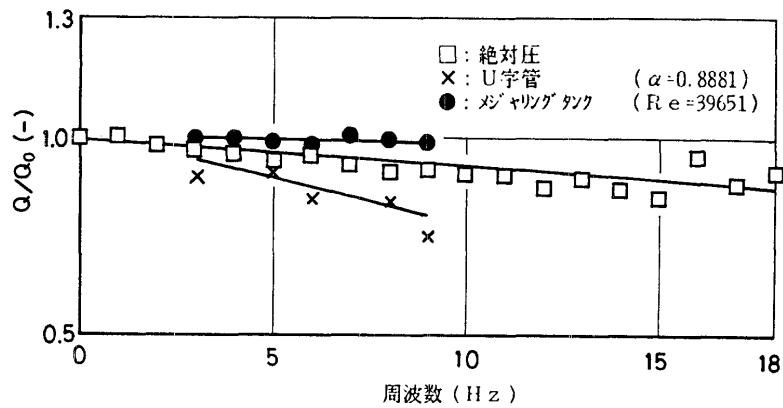


図6 付加脈動周波数と流量変動

差圧法それぞれによる流量の測定結果と周波数の関係は図6に示されている。図中の Q_0 は周波数ゼロの場合の、そして Q は任意の周波数の時の測定流量を示す。メジャリングタンク法による測定値は、脈動を付加することによる真の流量変動状態を示している。図では脈動付加による真の流量変動はほとんどないことが示されている。したがって脈動付加時の任意流量は、脈動を切った定常状態の自作丸ノズルによる量流で求めることが出来る。他の方法による流量は補正の必要がある。変動圧力の電氣的測定には、圧力変換器、デジタルストレージスコープ、(横川電気製DS-6411)と電算機(PC-9801)を組み合わせて用いた。その計測システムを図7に示す。

また使用粒子の物性値は表1に示すとおりである。

表1 使用粒子の物性値

粒子の種類	平均粒子径 $\times 10^{-3} \text{ m}$	最大投影面積 $\times 10^{-6} \text{ m}^2$	平均体積 $\times 10^{-8} \text{ m}^3$	平均密度 kg/m^3
ガラスビーズ	3.33	8.50	1.86	2450
砂 レ キ	----	26.07	5.48	2787
鋼 球	3.97	12.38	3.28	7523
ガ ン 玉	4.01	12.63	3.38	11262
割 菱	----	17.00	3.10	9923

各粒子はテラふるいを用い、細かくふるい分けたものを、球形のものはマイクロメータで平均径を求め、他は質量平均径で粒子径を求めた。特にガラスビーズは、ふるいの網目の間に留まったもののみを選び出して用いた。平均体積は平均密度と任意個数の粒子の質量とから求めた。平均密度の測定には、高周波数発生機で粒子表面に付着している気体層を除去し、比重瓶を用いて求めた。投影面積は顕微鏡撮影法によった。

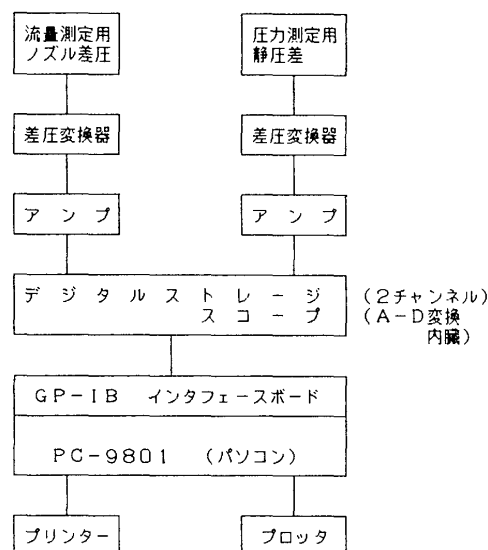


図7 計測システム

3. 実験方法

まず実験技術を保証するため、鉛直測定管（アクリル製）に静水を蓄え、その上部より表1に示す粒子を供給し、それぞれの粒子の終速度 U_g より式(2)によって抵抗係数 C_d を求め、球形粒子（ガラスビーズ）が図8中の実線で示す Lapple の実験結果に一致することを確かめ、浮遊速度の実験に移った（図中の破線は落下方向に垂直な円盤の実験結果を示す）。

$$C_d = 4 g \{ (\rho_s / \rho) - 1 \} d_s / 3 U_g^2 \quad (2)^6$$

式(2)中の g は重力の加速度、 ρ_s は粒子の密度、 ρ は水の密度、 d_s は粒子の平均径である。

全装置の性能の安定化の為に、推定終速度より低めの流量で30分以上継続運転し、その後一時流量を下げて粒子を測定管（アクリル製）下部のメッシュ上に管上部端から供給し、再び流量を上げて定常流での終速度の測定を行った。その後輸送流体に脈動を付加し、脈動流による実験を行った。脈動流での浮遊速度実験では、輸送流速の変動について粒子の運動も変動するので、粒子は管内を絶えず上下する。そこで平均終速度は、測定管下部よりの高さ20～40cm内に約50個の粒子が流出することなく、といて沈積することもなく留まるように絞り弁開度を調節し、丸ノズル差圧変動の瞬間値の測定が可能な電気式測定器と、U字管マンメータによって流量を求めた。マンメータによる測定は、圧力差のおよその平均値を視覚的に捕らえて、実験中の状態の確認を容易にするので、電気測定器の誤操作による測定ミスの防止にも役立てた。

終速度相当流量は、絞り弁開度を変えずに周波数発生器の駆動を止め、周波数ゼロの状態の丸ノズル前後の差圧を再び電気式測定機とU字管マンメータによる差圧より求めた。終速度は丸ノズルによる平均流量より求めた管内平均速度を当てた。

4. 実験結果及び検討

表1の粒子について脈動実験で得られた終速度（浮遊速度）と脈動周波数の関係を図9に示す。それぞれの終速度の絶対値は異なるが、脈動周波数7および12, 15Hz付近で終速度の著しい落込み

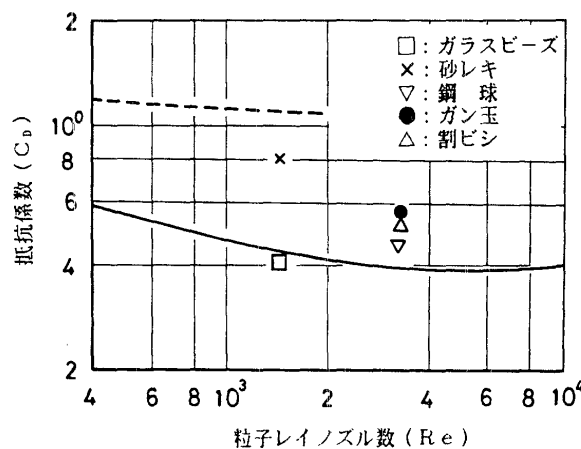


図8 各種粒子の抵抗係数

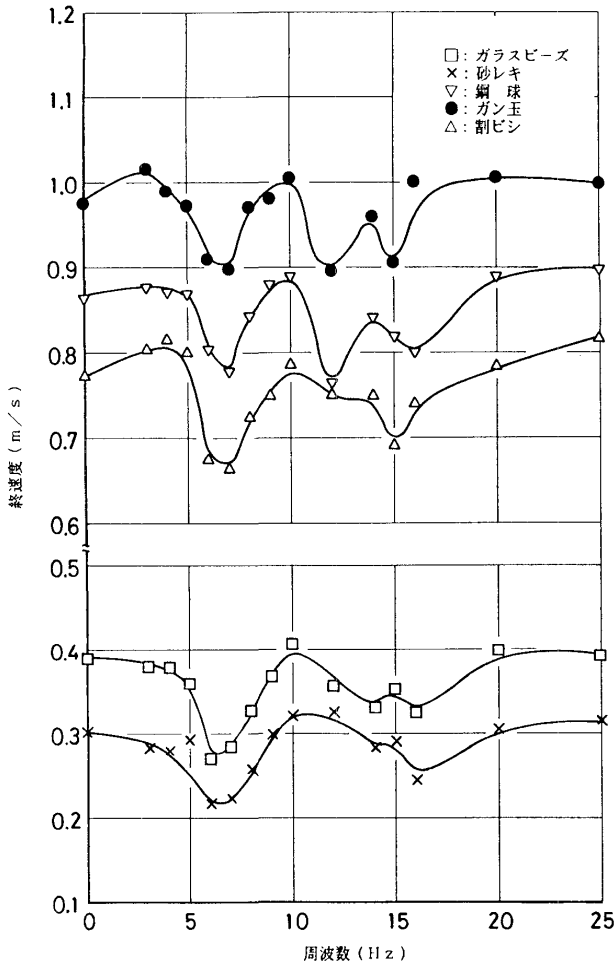


図9 脈動周波数と粒子の終速度

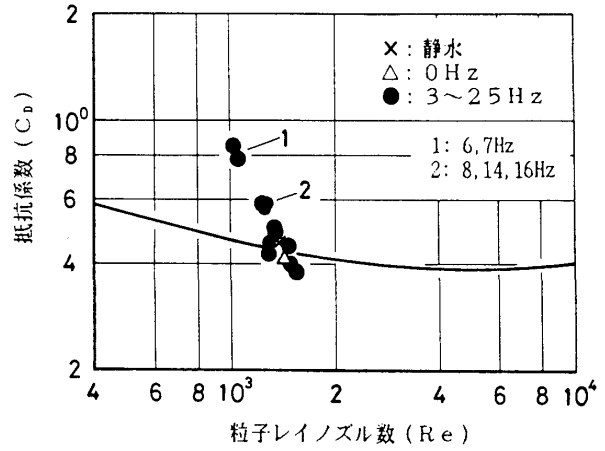


図10 脈動流中のガラス粒子の抵抗係数

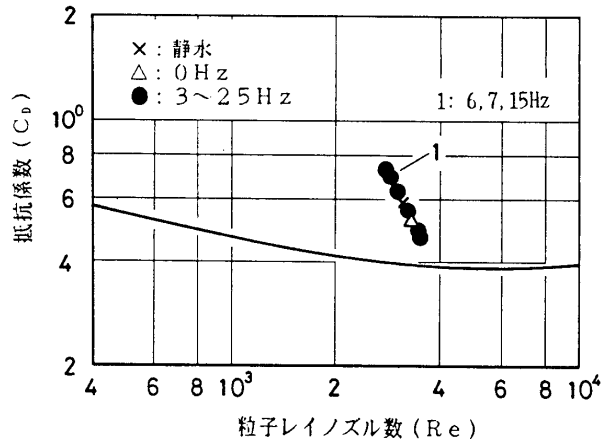


図11 脈動流中の割菱の抵抗係数

がみられる傾向はすべて一致している。すなわち特定周波数に向かって、その付近の終速度は減少している。その傾向は7 Hz付近のほうが15 Hz付近より著しい。図9中のガラスビーズと割菱の抵抗係数を式(2)で求め、粒子レイノルズ数 Re_s との関係で示せば、図10および11のようになる。これらの図では図9の傾向がそのまま表れていて、粒子の抵抗係数は輸送流体の特定の脈動周波数に向かって増加している。そして勿論周波数の大きい15 Hzのものでは、7 Hzの付近のものより傾向そのものが弱まっている。他の粒子についてもほぼ同様な結果が得られている。同一粒子の u_g に対する Re_s の値が脈動周波数により異なるのは、図9に示されているように脈動周波数により u_g が変化しているためである。脈動周波数7 Hz付近および15 Hz付近での抵抗係数が定常流 (Hz) のそれより相当増加している原因を探るために、変化の著しい7 Hz前後の脈動流量の変動状態を調べた。その結果を図12に示す。図は縦軸に丸ノズル前後の圧力、横軸に時間が取られている。そして高周波成分が重ね合わさっているのが上流側、除去されているものが下流側の圧力である。高周波成分はポンプの羽根車の羽根一枚一枚から出ている圧力波によるものである。脈動発生機の性能からは、図4に示されているように、周波数の増加で流量の変動が増加するので、当然流量計丸ノズル前後の圧力差の変動も増加することになる。実際の流れでも0~3 Hz間は周波数の増加で圧力変動振幅

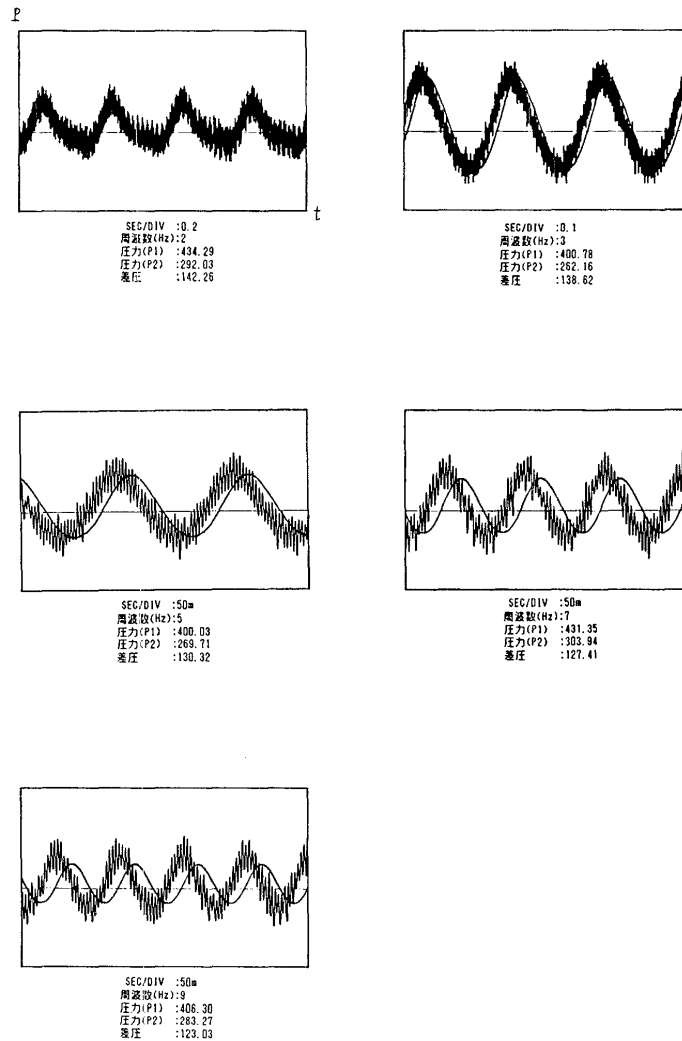


図12 付加脈動数と流量変動

(図中のスケールは上下方向のみ皆等しい) 増加の傾向がよく現れている。そして測定管は脈動源からの距離が大きく、また曲がり、拡張収縮などのエネルギー損失部分も少なからず持っているので、3 Hzと9 Hzの測定例にみられるように、脈動周波数が大きくなれば粘性損失の為に圧力変動の振幅はかえって減少している。しかしながら7 Hzのものの圧力変動の振幅は5 Hzのものにほぼ等しい。15 Hz付近の傾向は7 Hz付近に似ているが、前者の傾向ほど著しくはない。これも粘性損失による影響と思われる。したがって粒子の抵抗係数は、圧力変動すなわち輸送流体の速度変動の振幅が急激に増加しているところで増加していることになる。また、振幅が減少すれば周波数が増加しても抵抗係数は増加していないことから、抵抗係数の増加は脈動による単位時間内の粒子の持ち上げ仕事に関係あるものと考えられる。特定周波数で輸送流体速度の脈動成分の増加は、管内流体を往復する圧力波の周波数と脈動発生機による付加周波数との共振が考えられるが、形状が複雑なために詳細な検討⁷⁾は容易ではなく、そのため管路を一次近似し、更に圧力波の往復を単純水撃現象と考え、その水撃の周期を T 、相当管全長を l 、輸送流体の音速を u_a とし、次式(3)で周期 T を求めたところ、 $T = 0.118$ を得た。この周波数 $f = 8.4$ Hzは、数値7 Hzに近い値である。したがって、脈動発生機によって付加された流量の脈動が、輸送管内流体の水撃周波数と共振を起し、粒子の

$$T = 4l/u_a \quad (3)^8)$$

抵抗係数を増加させたものと考えられる。

おわりに

ポンプより送出される流量に、脈動発生装置により脈動を付加し、球状および不規則形状の粒子についてその終速度を測定し、粒子の抵抗係数と輸送流体の脈動周波数との関係を調べた。その結果周波数0～25Hzの間では、特定の周波数の付近で、その周波数に向かって粒子の抵抗係数は増加し、それも高周波領域での増加は、低周波数領域の傾向より小さいことが判明した。そして抵抗係数を増加せしめる周波数では、流量変動振幅に急激な増加が認められ、またその周波数は、単純理論推定で輸送装置内流体の水撃周波数にほぼ等しいことが判明した。

文 献

- 1) Ernst Kriegel und Heinz Brauer : Hydraulischer Transport Körniger Feststoffe durch waagerechte Rohrleitungen VDI-Forschungsheft 515 1966.
- 2) 植松時雄, 狩野武: 空気による粉粒体の輸送に関する研究 機械学会論文集27-183pp. 1748 1966.
- 3) 森川敬信: 流体・固体二相流 日刊工業新聞 1979
- 4) 森川敬信: 低速高濃度空気輸送 粉砕 No. 34 pp. 66 1990
- 5) 森田鈞: 機構学 実教出版 1974
- 6) 井伊谷鋼一: 粉体工学ハンドブック 朝倉書店 1970
- 7) R. S. Benson, R. D. Garg and D. Woolatt : A Numerical Solution of Unsteady Flow Problems Int. J. Mech. Sci. vol. 6, no. 1, pp. 117-144 1964
- 8) 森川敬信, 鮎川恭三, 辻 裕: 流れ学 朝倉書店 1982