水-微細固体粒子懸濁液の抵抗減少効果*

渡辺敬三^{*1}, 大平浩之^{*2}, 加藤 宏^{*1}

Drag Reduction Phenomenon in Water/Fine Solid Particle Suspensions

Keizo WATANABE, Hiroyuki OHIRA and Hiroshi KATO

Drag reduction on the pressure loss of a circular pipe and the drag of a free-falling sphere in water/fine solid particle suspensions has been shown experimentally. The tested suspensions were carbon black, kaolin and SiO_2 suspensions. The pressure loss data of the pipe flows in the laminar and turbulent flow ranges were obtained, and the rheological equation of these suspensions was decided by the flow curve. The experiment for the drag of a sphere was performed on the free-falling sphere in the suspensions. Twenty spheres between 6.35 mm and 14.96 mm in diameter were tested. Four ultrasonic transducers, which were set facing and in contact with the side wall of the vessel filled with the test suspensions in pairs of ultrasonic transmitter and ultrasonic receiver, were used for the falling velocity measurement. It has been shown from this study that the drag reduction of a sphere occurs in carbon black suspensions, and the range of Reynolds numbers obtained for the reduction is $Re \geq 8 \times 10^3$.

Key Words: Multiphase Flow, Water/Fine Solid Particle Suspensions, Pressure Loss of Pipe Flow, Drag of Sphere, Drag Reduction

1. 結 言

流体中にある物質を添加することによって、乱流域における圧力損失や抵抗を流体のみのそれと比較して減少させることは可能である。この現象は抵抗減少効果と呼ばれ、従来から多くの研究がなされている。また最近ではこの抵抗減少効果について、工業的応用の観点のみならず、乱流の組織構造や乱れと混入された物質との相互干渉を明らかにする視点からも注目されつつある。

現時点で報告されている液体に対する抵抗減少効果は添加される物質の性質によって、以下の三つに分類することができる。すなわち、(1)水溶性のあるいは多糖類などの高分子、(2)ファイバあるいは石綿などの微細繊維、そして(3)微細固体粒子である。一般に、(1)の場合は溶液として、(2)および(3)の場合は懸濁液あるいはスラリーとして扱われる。

周知のごとく、高分子溶液の抵抗減少効果はトムズ効果⁽¹⁾と呼ばれ、多くの実験的および解析的研究がな

されている。また、微細繊維懸濁液についても円管内⁽²⁾や回転円板⁽³⁾の流れに対してその報告がなされている。

一方、微細固体粒子のスラリーや懸濁液の抵抗減少効果は土砂や粗粒子などを搬送する際に水を搬送流体とする場合よりも圧力損失が低減する結果⁽⁴⁾が経験的に得られ、水力輸送との関連から管内流^{(5)~(7)}を中心として研究されてきたと言える。さらに、微細固体粒子懸濁液それ自体の抵抗減少効果の実験的な報告は比較的濃度の高い場合に限定されているので、DodgeとMetznerの研究⁽⁸⁾に代表されるように、その現象を擬塑性流体モデルやその粘性挙動の非ニュートン性を基に議論されてきた。そして、外部流を対象とした研究は比較的低レイノルズ数域の抵抗係数をビンガム流体として整理したもの⁽⁹⁾やフライアッシュスラリー中の球の加速特性を調べたもの⁽¹⁰⁾などが報告されているが、現時点で抵抗減少効果は明らかにされていない。

よって、本研究は乱れや境界層のはく離に及ぼす液体中の微細な固体粒子の影響を明らかにすることを目的として、水-微細固体粒子懸濁液中の比較的高レイノルズ数域における球の抵抗係数を実験的に調べ、その抵抗減少効果の特性を明らかにしたものである。

* 平成3年6月27日 第1回 ASME-JSME 流体工学会議において講演、原稿受付 平成3年9月11日。

^{*1} 正員、東京都立大学工学部 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)。

^{*2} 正員、(株)東芝 (〒230 横浜市鶴見区末広町2-4)。

記 号

- C_{dn} : 水道水中の球の抗力係数
 C_{ds} : 懸濁液中の球の抗力係数
 C_w : 懸濁液の重量濃度
 d : 円管直径
 d_e : 微細固体粒子の平均粒径
 d_s : 球の直径
 n : 指数則流体の指数
 Re : レイノルズ数
 Re^* : 指数則流体のレイノルズ数 $= \rho_f d^n v^{2-n} / \eta_{ck}$
 T_h : 式(3)で定義される流れの特性時間
 T_r : 式(4)で定義される粒子の緩和時間
 v : 円管内の平均流速
 v_t : 自由落下する球の終速度
 $\dot{\gamma}$: 管壁におけるずり速度
 η_{ck} : 擬塑性粘度
 λ : 管摩擦係数
 ρ_f : 懸濁液の密度
 ρ_s : 球の密度
 ρ_e : 微細固体粒子の真密度
 τ_w : 管壁におけるせん断応力
 ϕ : 抵抗減少率 $= (C_{ds} - C_{dn}) / C_{dn}$

2. 実験装置と方法

実験は自由落下する球の抗力係数と円管内の圧力損失測定について行われた。図1に落球実験装置の概略を示す。供試球は供試液体で満たされたアクリル樹脂製の水槽中へ落下させられ、球の抗力係数の値は標点間距離 $l=300$ mm を通過する時間を測定することにより求められた。供試懸濁液は不透明な液体であり、目視や光学的方法を用いることができないので、本研究ではその測定に超音波トランデュサを用いた。図

図1 落球試験実験装置

示されるように、それらのトランデュサは送信と受信一組ずつ水槽の外壁に対向してセットされ、その信号はペンレコーダに記録した。また、供試懸濁液に対しては供試液体を均質に安定な状態を維持しながら測定を行った。供試球は直径 $d_s=6.35\sim 14.96$ mm 範囲の計20個が用いられた。表1にそれらの諸元を示す。実験から得られた速度は供試球のタングステン球Cでは終速度の約91%、それ以外の供試球では終速度の約97%以上であった。一方、計算された供試CB, SiO₂ および KA 粒子の単粒子沈降速度は $6.80 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-5}$ m/s の範囲であるので、供試球の落下速度と比較して十分小さいものと考え、粒子沈降の影響は無視した。

供試懸濁液の粘性挙動と圧力損失特性を調べるために直径 $d=3\sim 8$ mm の4本の円管の圧力損失を層流から乱流域にわたって測定した。図2に管路実験装置の概略を示す。供試液体はポンプによって循環させら

表1 供試球の諸元

		Diameter d_s (m) $\times 10^{-3}$	Density ρ_s (kg/m ³) $\times 10^{-3}$
Nylon	A	7.98	1.144
	B	9.56	1.135
Acrylic resin	A	9.39	1.177
	B	9.85	1.182
	C	14.96	1.187
Teflon		9.54	2.164
Glass		9.53	2.518
Aluminum		9.77	2.718
Stainless steel	A	7.94	7.617
	B	9.52	7.645
Copper	A	6.35	7.790
	B	9.52	7.786
	C	11.11	7.787
Brass	A	6.36	8.458
	B	7.95	8.462
	C	9.54	8.449
	D	12.70	8.458
Tungsten	A	6.35	15.005
	B	7.93	14.947
	C	12.70	14.855

図2 円管の圧力損失測定管路

れ、500 mm の測定区間の圧力差を微小圧力変換器あるいはマノメータで測定した。測定孔の直径は 0.5 mm である。

本研究に用いた微細固体粒子はカーボンブラック、 SiO_2 、カオリン、そしてフライアッシュ粒子である。供試粒子の諸元を表 2 に示す。表 2 でカーボンブラック (CB と記す)、 SiO_2 およびカオリン (KA と記す) 粒子の平均粒径 d_e は電子顕微鏡写真から得られた 100 個の粒子の平均値である。

図 3 にカーボンブラックおよびカオリン粒子の電子顕微鏡写真を示す。これより、カーボンブラック粒子は球形の粒子形状をもっていることがわかる。

表 3~5 に供試懸濁液の濃度と物性値を示す。落球実験では超音波の減衰のため、カーボンブラックおよびカオリン懸濁液においてはいずれも $C_w \leq 1.0\%$ の範囲である。

3. 実験結果と考察

3.1 円管内流れの圧力損失

(1) 供試懸濁液のレオロジー特性 層流域における圧力損失の実験値から供試懸濁液の流動曲線を求めた。一例として、カーボンブラックおよびカオリン懸濁液の流動曲線をそれぞれ図 4 (a) と 4 (b) に示す。カーボンブラック懸濁液においては、図 4 (a) から明らかなように濃度増加に伴って非ニュートン性が生ずる。ざり速度が $10^2 < \dot{\gamma} < 3 \times 10^3$ の範囲で直線のこう配が 1 より小さい値すなわち、そのレオロジー特

表 2 微細固体粒子の物性値

Particle	Mean diameter $d_e (\mu\text{m})$	Density $\rho_e (\text{kg/m}^3) \times 10^{-3}$
CB	1.29	1.75
SiO_2	1.40	1.95
KA	4.65	2.74
FA	22.0	2.19

→ 1 μm

→ 0.1 μm

(a) カーボンブラック粒子 (b) カオリン粒子

図 3 微細固体粒子の電子顕微鏡写真

表 3 カーボンブラック懸濁液の物性値

Weight fraction $C_w(\%)$	Volume fraction $C_v(\%)$	Density $\rho_r (\text{kg/m}^3) \times 10^{-3}$	Consistency index $k' (\text{Pa} \cdot \text{s}) \times 10^{-3}$	Exponent of power-law model $n(-)$	Temperature $t(^{\circ}\text{C})$
0.1	0.06	0.998	1.33	1.00	9.5
0.3	0.17	0.999	1.33	1.00	10.0
0.5	0.29	1.000	0.90	1.00	25.0
1.0	0.57	1.002	1.00	1.00	25.0
2.0	1.15	1.007	1.84	0.96	24.8
3.0	1.74	1.011	4.29	0.87	21.0
5.0	2.92	1.015	27.5	0.73	18.5

表 4 SiO_2 懸濁液の物性値

Weight fraction $C_w(\%)$	Volume fraction $C_v(\%)$	Density $\rho_r (\text{kg/m}^3) \times 10^{-3}$	Viscosity $\mu (\text{Pa} \cdot \text{s}) \times 10^3$	Temperature $t(^{\circ}\text{C})$
0.5	0.26	1.004	1.33	10.5
1.0	0.52	1.005	1.39	11.0
1.5	0.77	1.005	1.50	10.0
3.0	1.56	1.015	1.65	9.2

表 5 カオリン懸濁液の物性値

Weight fraction $C_w(\%)$	Volume fraction $C_v(\%)$	Density $\rho_r (\text{kg/m}^3) \times 10^{-3}$	Viscosity $\mu (\text{Pa} \cdot \text{s}) \times 10^3$	Temperature $t(^{\circ}\text{C})$
0.5	0.18	1.001	1.20	14.5
1.0	0.37	1.004	1.37	10.0
3.0	1.07	1.012	1.30	12.5

(a) カーボンブラック懸濁液

(b) カオリン懸濁液

図 4 供試懸濁液の流動曲線

性を擬塑性として近似できることがわかる。表3に示したように、本論文においては $C_w \geq 2\%$ の場合を指数則流体として扱うこととした。一方、カオリン懸濁液においては、図4(b)から明らかなように本実験の濃度範囲では非ニュートン粘性は生じていないことがわかる。また、 SiO_2 懸濁液についても同様であった。

(2) 管摩擦係数 実験結果を図5~7に示す。図はいずれも見やすくするため、それぞれの濃度ごとに上方へずらしてある。

得られた実験値についてその有効性を確認するため、圧力損失測定の不確かさ解析を水の場合について行った。層流域において、ひずみゲージ式差圧形微小圧力変換器を用いた場合の不確かさはかたより誤差と偶然誤差を総括して約99%包括度で8.72%、そして約95%包括度で6.64%であった。また、乱流域において、水銀柱マンオメータを用いた場合の不確かさは約99%包括度で8.72%、そして約95%包括度で4.51%であった。それゆえ、実験値は十分な精度で得られている。

図5 カーボンブラック懸濁液の管摩擦係数

と言える。図5のカーボンブラック懸濁液においてはすでに述べたように、 $C_w \geq 2\%$ の濃度範囲では指数則流体として扱ったので横軸は指数則流体のレイノルズ数 Re^* がとられている。また、図5中の実線①は次式で与えられる層流域の指数則流体の解析解である。ここで、式中の n は $\tau = \eta_{ca} \dot{\gamma}^n$ で表される指数則流体の指数である。

$$\lambda = \frac{4\{(3n+1)/n\}^n 2^{n+1}}{Re^*} \dots\dots\dots (1)$$

さらに、実験②および破線③はそれぞれブラジウスおよび次式で与えられる Dodge-Metzner の式を示す。

$$\frac{1}{\lambda^{1/2}} = \frac{2}{n^{0.75}} \log \left\{ Re^* \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^{-n} 8^{1-n} \left(\frac{\lambda}{4} \right)^{1-n/2} \right\} - \frac{0.2}{n^{1.2}} \dots\dots\dots (2)$$

図6 SiO_2 懸濁液の管摩擦係数

図7 カオリン懸濁液の管摩擦係数

図5から明らかなように、カーボンブラック懸濁液の λ は濃度増加に伴ってブラジウスの式よりも低減する。そして、それらの実験値が式(2)と一致することから、この圧力損失における抵抗減少効果は懸濁液の擬塑性で説明できる。

一方、 SiO_2 およびカオリンの懸濁液においては図6および図7から明らかなように、いずれもニュートン流体の結果とよく一致し、抵抗減少効果は生じていないことがわかる。

3・2 球の抗力係数 図8に水道水の抗力係数の実験結果を示す。図8中の実線は従来から得られているニュートン流体の実験結果に対するLapple-Shepherdの総合曲線⁽¹¹⁾である。また、破線は本実験結果から得られる曲線でLapple-Shepherdの総合曲線と比較して約3%以内で一致することがわかった。

一方、得られた実験値の有効性を確認するため抗力測定の不確かさ解析を行った。解析対象とした供試球は表1で示されるタングステンAの球で供試液体は水道水である。計測過程をペンレコーダの読取長さを代入した球の抵抗係数の算定式で決定し、要素誤差要因として超音波発信機、同受信機およびペンレコーダのデータ収集に伴う誤差を考えた。計算結果から、本実験の超音波計測法によって測定した球の抗力係数の

不確かさはかたより誤差と偶然誤差を総括して約99%包括度で7.99%、そして約95%包括度で5.79%であることがわかった。

図9から図11に微細固体粒子懸濁液の結果を示す。すでに述べたように、抗力係数の測定対象とした濃度範囲ではいずれも非ニュートン粘性が無視できるので図9～11の実線および破線は図8のものと同じ、それぞれ、Lapple-Shepherdの総合曲線および本実験のニュートン流体の実験結果を示している。

図9のカーボンブラック懸濁液の C_d は $Re \geq 8 \times 10^3$ の領域でニュートン流体のそれと比較して、重量濃度が $C_w \leq 0.5\%$ 範囲で減少することがわかる。その低減量は本実験の水道水の結果と比較して最大約15%である。この抵抗減少は微細固体粒子の種類によって異なり、 SiO_2 懸濁液では非常にわずかで、図11からも明らかなように、カオリン懸濁液では逆に増加する。この抵抗減少効果は懸濁液の濃度や Re 数のほかに水の中に懸濁する微細固体粒子の粒子径や粒子形状あるいは密度などに依存するものと考えられる。結果として、平均粒子径 $d_e \leq 1.5 \mu\text{m}$ で球形粒子が最も効果的であることがわかった。

一方、希薄高分子溶液中の球の抵抗減少^{(12)~(14)}はす

図8 水道水中の球の抗力係数

図10 SiO_2 懸濁液の球の抗力係数

図9 カーボンブラック懸濁液中の球の抗力係数

図11 カオリン懸濁液中の球の抗力係数

図 12 セパラン水溶液中の球の抗力係数

図 13 抵抗減少率と無次元特性時間の関係

で報告されている。それらの結果と本実験結果を比較し、得られた微小固体粒子懸濁液の抵抗減少効果のメカニズムを考察するために、本実験装置を用いて希薄高分子溶液中の球の抵抗係数の測定を行った。供試高分子添加剤はセパラン (AP-30) である。

その結果を図 12 に示す。溶液の非ニュートン粘性は無視され、横軸の Re 数における粘度はウベローデ粘度計で測定した値が用いられている。図 12 より明らかに、50 ppm および 100 ppm のいずれの溶液においても C_d に対する抵抗減少効果が生じていることがわかる。100 ppm 溶液では $Re \geq 7 \times 10^3$ の領域で抵抗減少効果が生じており、この領域では 0.3% カーボンブラック懸濁液のそれとほぼ等しい。この Re 数範囲における球の周りの境界層は層流域と考えられ、その流れの可視化⁽¹⁴⁾からはく離点の移動に伴う後流の減少が抵抗減少に起因することが確認されている。それゆえ、微細固体粒子懸濁液の球の周りの流れについても希薄高分子溶液のそれと類似な現象が微細固体粒子の混入によって生じていることが類推できる。

次に、この境界層特性に着目して、抵抗減少率を球の境界層の特性時間⁽¹⁵⁾、 T_h と微細粒子の緩和時間、 T_r を用いて整理したのが図 13 である。ここで、 T_h および T_r はそれぞれ次式で表される。

$$T_h = \left(\frac{d_s}{v_t} \right) R_e^{-2} \quad (3)$$

$$T_r = \frac{d_s^2}{18\mu} (\rho_s - \rho) \quad (4)$$

式(4)の μ および ρ はそれぞれ水道水の粘度および密度である。式(3)および式(4)から明らかなように、この無次元時間のパラメータ、 (T_r/T_h) は二相流で用いられる慣性パラメータの一つと言える。また、図 13 には粘度を著者らのデータ⁽¹⁶⁾から外挿して、フライアッシュの $C_w = 1.0\%$ の結果も記されている。

図 13 から明らかなように、抵抗減少を生ずる微細固体粒子では (T_r/T_h) が約 10^3 以上で低減が始まることがわかる。

4. 結 論

水-微細固体粒子懸濁液中を自由落下する球の抵抗係数を超音波センサを用いて測定し、以下の結論を得た。

(1) 非ニュートン粘性を生じない比較的低濃度範囲の平均粒子径が $1.5\mu\text{m}$ 以下の微細固体粒子懸濁液で球の抗力係数が $Re \geq 8 \times 10^3$ の領域において、最大約 15% 減少する抵抗減少効果を明らかにした。

(2) 希薄高分子溶液のトムズ効果の実験結果と比較してその抵抗減少効果が生ずる Re 数域がほぼ等しいことを示し、抵抗減少率を緩和時間と境界層の特性時間の比、 (T_r/T_h) で整理して、 $(T_r/T_h) \geq 10^3$ の領域で低減が始まることを明らかにした。

本研究の一部は平成元年度科学研究費 (一般 C, No. 01550155) の援助を受けた。また、実験で久保勝彦、平良英人および藤井 淳 (当時いずれも東京都立大学学部学生) の各氏の協力を得た。ここに記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Toms, B. A., *Proc. Int. Congr. Rheol.* II, (1949), 135.
- (2) 加藤・水沼, 機論, 48-430, B (1982), 1066.
- (3) 水沼・加藤, 機論, 48-430, B (1982), 1075.
- (4) Kazanski, I., ほか 2 名, *Hydrotransport*, 3 (1974), D2.
- (5) Kemblowski, Z. and Kolodgiejski, *Int. J. Chem. Eng.*, 13 (1973), 265.
- (6) Quader, A. K. M. A. and Wilkinson, L., *Int. J. Multiphase Flow*, 7-5 (1981), 545.
- (7) 渡辺・ほか 3 名, 機論, 53-495, B (1987), 3236.
- (8) Dodge, D. W. and Metzner, A. B., *AIChE J.*, 5-2 (1959) 189.
- (9) Dedegli, M. Y., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 109 (1987), 319.
- (10) 朝倉・武内・渡辺, 日本鉱業会誌, 98 (1983), 457.
- (11) Lapple, C. E. and Shepherd, C. B., *Ind. Eng. Chem.*, 32-5 (1940), 605.
- (12) Ruszczycky, M. A., *Nature*, 206 (1965), 614.

- (13) White, A., *Nature*, **212** (1966), 294.
 - (14) 加藤・立花・及川, 機論, **38-308** (1972), 809.
 - (15) 日野・長谷川, 東京工業大学土木工学研究報告, **6** (1968), 123.
 - (16) Watanabe, K., Kamoshida, T. and Kato, H., *Proc. 1st World Conf. Exp. Heat Trans., Fluid Mech. and Thermody.*, (1988), 693.
-