

遮蔽効果を伴う物体初期移動過程に対する MICS による数値計算

NUMERICAL PREDICTION FOR INCIPIENT MOTION OF BODIES
UNDER SHIELDING EFFECTS WITH MICS

山田 修三¹・牛島 省²・瀬津 家久³

Syuzo YAMADA, Satoru USHIJIMA and Iehisa NEZU

¹ 学生員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 修士課程

² 正会員 工博 京都大学大学院助教授 社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ フェロー会員 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻

The applicability of the computational method for multiphase flows, MICS (Multiphase Incompressible flow solver with Collocated grid System), is investigated for the incipient motion of a cylinder under the shielding effects in a duct flow. In order to understand the actual phenomena, hydraulic experiments are conducted with two cylinders, one fixed and another movable. In the experiments, the distance of the two cylinders are widely changed and critical flow rates that rotate the movable cylinder are measured. As a result, resistance force and sheltering coefficients are derived and the defects of the usual evaluation method to derive these values are pointed out. The incipient motion of the cylinder is numerically investigated with MICS. As a result of the computations, it is shown that the behaviors of the movable cylinder are reasonably predicted with MICS, while MICS needs no empirical coefficients regarding the resistance force and sheltering effects.

KeyWords : MICS, incipient motion, resistance force,
sheltering effects, multiphase flows

1. はじめに

水流による大粒径の砂礫の移動, また津波などによって自動車や船などの物体が流される現象や土石流の発生条件等を評価することは水工学上非常に重要な課題である。このような問題では, 通常対象とする物体が流体中に単独で存在することは希であり, 周囲には乱れを助長したり, あるいは遮蔽効果をもたらすような他の物体が存在しているのが普通である。このような状況においては, 対象とする物体に対する流体力を見積もったり, また初期移動過程を評価する場合には, それらの効果を考慮することが重要となる。

しかし, 物体の初期移動に対する従来の評価手法では, 物体が存在しない条件で評価された流速を用いて流体力を算出し, 周囲に存在する他の物体の影響は遮蔽係数という 1 つのパラメータに集約させてしまっていることが多い。このような評価法は, 取り扱いの難しい実用的な問題に対しては有用であったと思われるが, 冒頭で述べた理由から, 必ずしも現象を適切に取り扱っておらず, より正確な評価法の開発が望まれる。

本研究では, 上記のような問題を考慮して, 物体初期移動過程に関するより適切な評価を数値計算により行う方法について検討する。本研究で取り上げる MICS (Multiphase Incompressible flow solver with Collocated grid System)¹⁾ という粒子-流体系に対する数値解法は, 抗力係数や遮蔽係数などの経験定数や未知パラメータを一切用いないことに特徴がある。

本報では, 最初に現象を把握し, 検証データを得ることを目的として, ダクト流れにおける基礎的な水理実験を行う。実験では, ダクト内部の上流側に固定円柱, またその下流側に可動円柱を設置し, 両者の中心間距離と流量を変えた場合の円柱の移動開始状況を把握する。この実験結果に対して既往の評価手法に従って流体力と遮蔽係数を算出し, 従来の手法の問題点について検討を加える。次に, この実験結果を対象として, MICS による計算を行い, 各実験条件における物体の初期移動過程の再現性等に関する検討を加える。計算結果から, 上流側の固定粒子から放出された高渦度領域が可動粒子の初期移動過程に影響を与える可能性があることなどを示す。

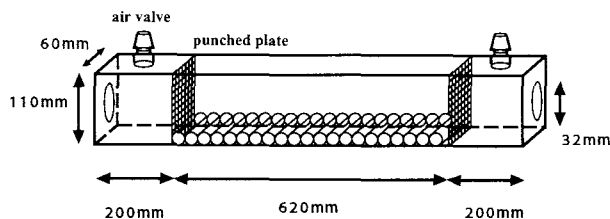


図-1 実験装置

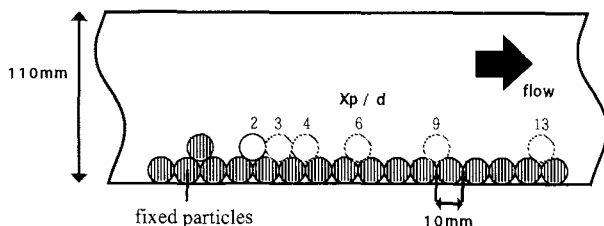


図-2 円柱（粒子）の配置

2. 初期移動過程に関する水理実験

(1) 円柱の初期移動過程に関する可視化実験

底部に静止した物体が水流により移動を開始する過程を把握するため、図-1に示すようなダクト模型を用いた水理実験を行った。ダクトの底部には直径 $d = 10\text{mm}$ の円柱が隙間なく敷き詰められて固定されている。別途行った予備実験により、ダクト中心より下流側では流下方向にほぼ一様な流速分布が形成されることを確認している。

実験では、図-2に示すように、底部に固定された円柱の上に同一直径の亚克力円柱を2つ設置する。亚克力円柱の比重は約1.2である。2つの円柱のうち、上流側のものは床面に固定されている。一方、下流側の円柱は流れによって移動可能な可動円柱である。固定円柱と可動円柱の流下方向の水平距離を x_p と表す。実験では、ダクト内の流量と水平距離 x_p を変化させて、可動円柱の移動状況を調べた。この場合には、ダクトに流入する水の流量を十分長い時間をかけて徐々に増加させ、可動円柱が移動開始するときの流量 Q を求めた。次に、可動円柱が移動しないように固定した条件で、流量を Q としたときの円柱周りの流況を画像処理手法を用いて計測した。画像の取得には、毎秒150フレームの画像を取得できる高速度ビデオカメラを用いた。得られた画像をPCに転送し、画像を数値的に処理して流速ベクトルを算出した。流速算出の原理としては、各トレーサ粒子を追跡するPTV(Particle Tracking Velocimetry)の原理に基づく手法²⁾を利用した。

表-1 実験条件と遮蔽係数

case	A	B	C	D	E	F
x_p/d	2	3	4	6	9	13
Q/Q_A	1	0.95	0.88	0.77	0.66	0.61
Rep	1158	1097	1020	892	761	708
ϵ_0	0.61	0.68	0.78	1.03	1.41	1.63
ϵ_0^*	0.37	0.42	0.48	0.63	0.87	1

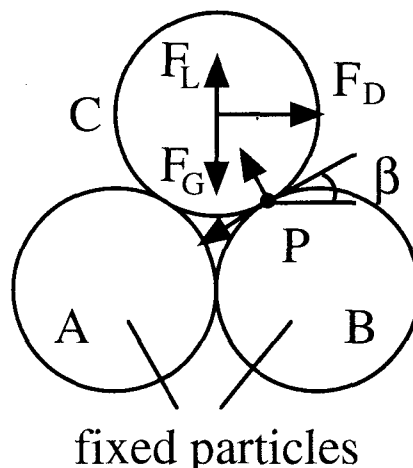


図-3 単一粒子に作用する力

(2) 実験結果

各実験ケースにおける、2粒子の水平距離 x_p と移動限界時の流量 Q 、また粒子レイノルズ数 Rep およびその流れにおける遮蔽係数 ϵ_0 と ϵ_0^* をまとめて表-1に示す。ここで、 ϵ_0^* は、case-Fの遮蔽係数で正規化した値である。また、 Q_A はcase-Aの Q であり、 $1,225\text{ (cm}^3/\text{s)}$ である。

以下では、表-1に示された粒子レイノルズ数と遮蔽係数の算出方法を述べる。底部に静止する単一の砂礫が離脱するときの形態として、滑動形式、転動形式、リフトアップ形式などが考えられている。本報で行った水理実験では、円柱は転動形式で初期移動を開始した。古典的なモデルでは、転動形式で移動する場合の円柱には、図-3に示すような力が作用すると考える。静的な釣り合い条件に基づけば、P点回りのモーメントを考慮することにより、粒子が転動を開始する限界は次式の D が負から正の値となる瞬間とされる。

$$D = F_D \cos \beta - (F_G - F_L) \sin \beta \quad (1)$$

ここに、 F_D 、 F_L および F_G は、それぞれ粒子が流体から受ける抗力と揚力、そして水中の重力である。

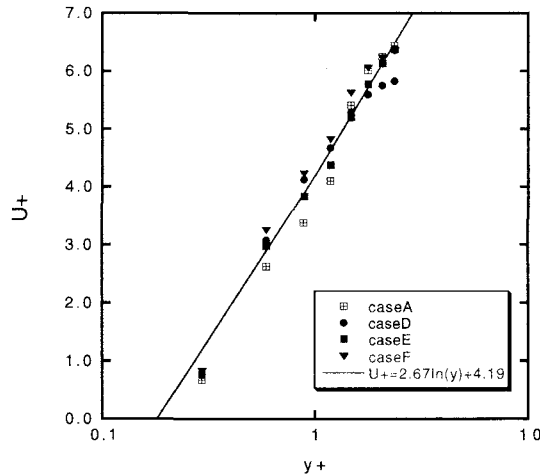


図-4 $U+$ と $y+$ の関係

粒子に作用する力のうち、 F_G は粒子の比重から定められるが、流体力 (F_D および F_L) は、容易には求められない。このため、古典的なモデルあるいは実用的な手法では、対数則分布などの流速分布を仮定して、円柱中心に作用する代表流速を定め、別途実験的に得られた抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を用いて流体力を算出するという方法が取られることが多い。

本実験では、このような評価手法の妥当性を検討する意味も含めて、既往の手法と同様の考え方に基づく流体力の算出を行った。すなわち、固定円柱と可動円柱が存在しない、底部に敷き詰められた円柱のみが存在する条件の下で流量を各ケースの Q としたときの流速計測を画像処理手法を用いて行った。表-1 の粒子レイノルズ数は、この流速を用いて算出したものである。図-4 は代表的な実験ケースにおける無次元流速 $u+ = u/u_*$ と無次元鉛直距離 $y+ = y/k_s$ の関係を示すものである。ここに、 u_* は摩擦速度、 $k_s = d$ は相当粗度である。

これらの結果を用いて、可動円柱中心高さにおける流速 U_c を算出し、次式より抗力を求めた。

$$F_D = \frac{\epsilon_0}{2} C_D \rho U_c^2 d \quad (2)$$

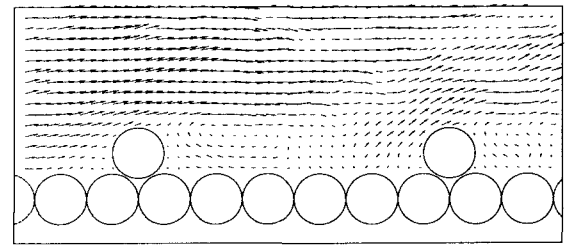
抗力係数 C_D の算出には、一様流中で得られた円柱に対する次式の近似式³⁾を用いた。

$$C_d \approx 1 + 10.0 Rep^{-2/3} \quad (3)$$

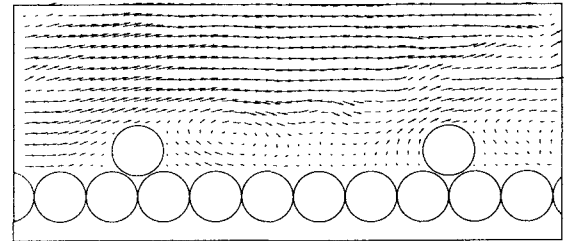
また、揚力は次式より推定する。

$$F_L = k_L F_D \quad (4)$$

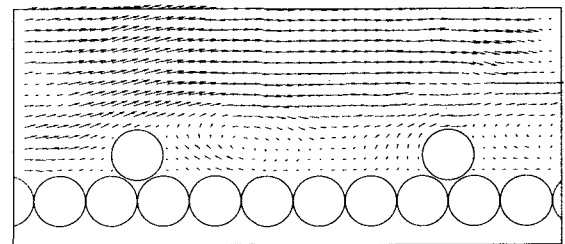
ここで、 k_L には、既往研究で用いられる 0.85 という値を用いた。上記のようにして算出された結果を式 (1) へ代入して、表-1 の遮蔽係数 ϵ_0 を求めた。 ϵ_0 は本来



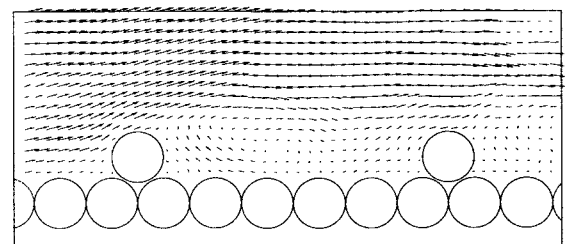
(a) $t = 0.0(s)$



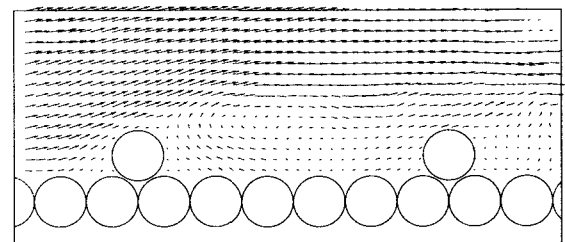
(b) $t = 0.1(s)$



(c) $t = 0.2(s)$



(d) $t = 0.3(s)$



(e) $t = 0.4(s)$

図-5 実験で得られた瞬時的な流況
(case-D, $t = 0$ は適当な基準時刻を表す)

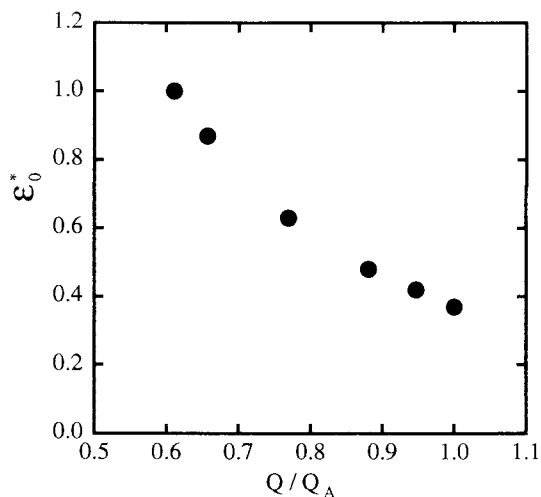


図-6 遮蔽係数と移動限界流量の関係

1より大きくなり得ない係数であるが下記に述べるような原因で、表-1では過大な値が得られている。

以上の評価手法では、1) 物体、すなわち可動円柱が存在するときの流速分布は、それが無いときの流速分布とは明らかに異なるが、前者を流体力の評価に用いている、2) 底面上に存在する円柱に対しては一様流中で得られた抗力係数の使用は適切でない、などの問題点がある。特に、対象とする物体の周囲に他の物体があるときには、流れの擾乱や、遮蔽効果が発生するといった影響があるはずだが、これらの効果は遮蔽係数というパラメータに集約されて取り扱われることになる。表-1で ϵ_0 が過大であることも上記が原因であると考えられる。

画像処理により得られた瞬時的な流況の一例としてcase-Dにおける流速ベクトルを図-5に示す。固定粒子の下流側に渦ができていたことが確認でき、この渦が下流へ移動して、可動粒子に衝突する状況が観察されている。

図-6に、case-Fの ϵ_0 で正規化した ϵ_0^* と流量の関係を示す。正規化することにより、表-1に示されるcase-Aの遮蔽係数 ϵ_0^* は従来用いられる0.4という値に近いものとなっている⁴⁾。

3. MICSによる円柱初期移動過程の計算

本章では、前章の水理実験を対象として、著者らが提案する粒子-流体混合系の解法であるMICSを用いて、上流側に固定円柱が存在する場合の円柱の初期移動過程の計算を行う。

MICSの詳細な計算手順に関しては、既報¹⁾で述べられている。図-7に概略的に示すように、MICSでは、物体よりも細かいEuler格子を空間に配置し、流体と固体領域を区別せず、最初にすべての領域に対して非

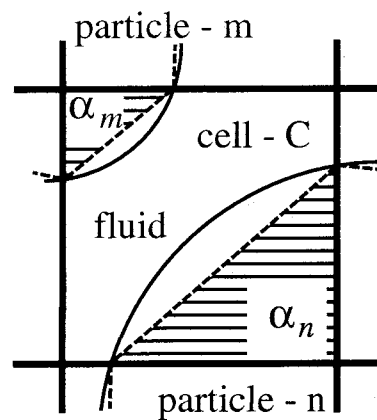


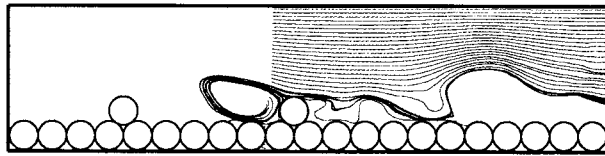
図-7 計算セルと物体との関係

(α はセル中の近似された粒子面積比率)

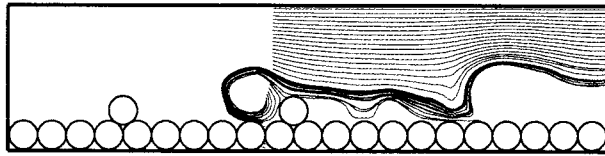
圧縮性流体計算を行い、この結果を用いて粒子に作用する流体力を求め、粒子運動の計算を行う。この流体計算には、コロケート格子配置に基づく非圧縮性流体解析法が利用され、流体の連続性に対する配慮がなされた圧力解法(C-HSMAC法)や高精度のスキームが用いられている。物体の接触力の評価には、個別要素法モデルを利用している。粒子運動に関する計算結果は流動場に反映され、連続相と分散相の相互作用が適切に考慮された現象予測が可能である。

既報⁵⁾において、MICSをダクト内に設置された単一円柱の初期移動過程に適用し、水理条件に近い条件で円柱が移動開始することが再現されている。単一円柱の場合には、その上部および背後に形成される低圧渦の影響が大きいことが数値計算結果から推測されている⁵⁾。しかし、本報で対象とする条件では、上流にある固定円柱によって乱された流体中に可動円柱が置かれているため、初期移動過程が単一円柱の場合とは大きく異なる。この場合には、特に固定円柱表面から離脱した渦の挙動などを適切に再現することが求められる。MICSをこのような対象に適用して、固定円柱による遮蔽効果、あるいは物体の移動に対する流れ場の擾乱の影響をどの程度再現可能であることを確認する。

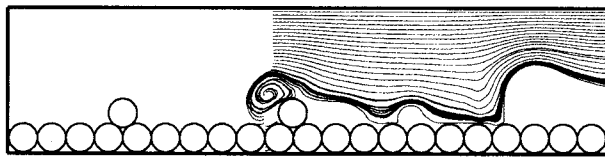
計算では、固定円柱を上流端から $3.5d$ の位置に設置し、流下方向に $21d$ 、鉛直方向に $5d$ までの2次元領域を計算対象とした。計算格子幅 Δ は $d/8$ とした。この格子幅では、一様流中におかれた円柱に対する抗力係数が適切に再現できることが確認されている¹⁾。上流端では、実験で得られた流速分布を与え、最初に可動円柱を固定した状態で十分発達した流れ場を求めた。次に、その計算結果を初期値として、可動円柱の拘束を解除して非定常計算を行った。



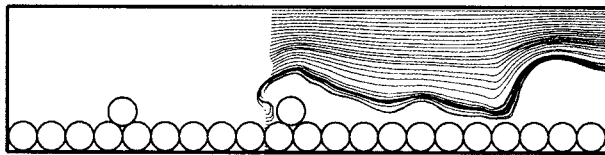
(a) $t = t_0$



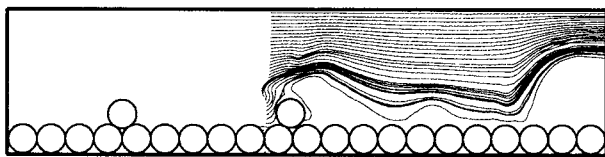
(b) $t = t_0 + 2\delta t$



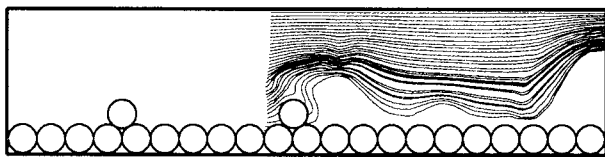
(c) $t = t_0 + 4\delta t$



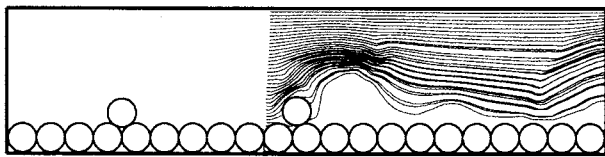
(d) $t = t_0 + 5\delta t$



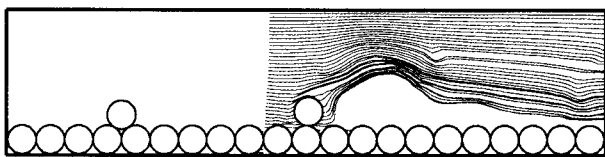
(e) $t = t_0 + 6\delta t$



(f) $t = t_0 + 7\delta t$

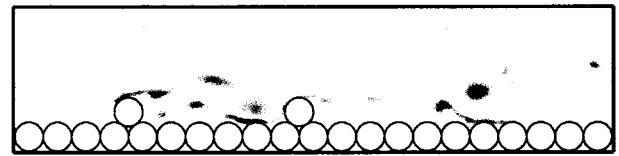


(g) $t = t_0 + 8\delta t$

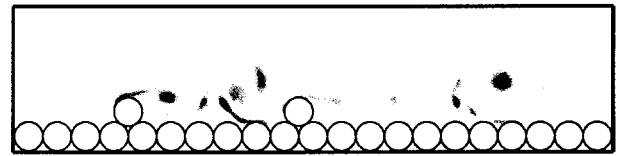


(h) $t = t_0 + 10\delta t$

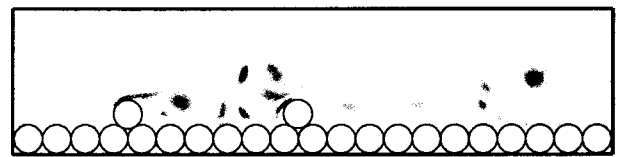
図- 8 初期移動過程における流線と粒子の挙動
(case-D, $t_0 = 0.55(s)$, $\delta t = 5 \times 10^{-2}(s)$)



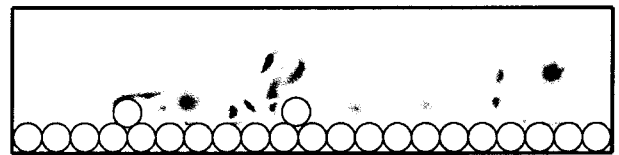
(a) $t = t_0$



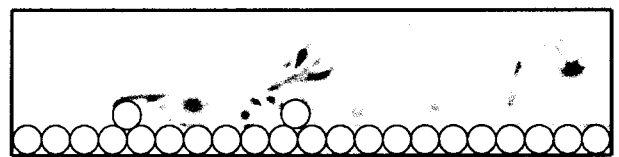
(b) $t = t_0 + 2\delta t$



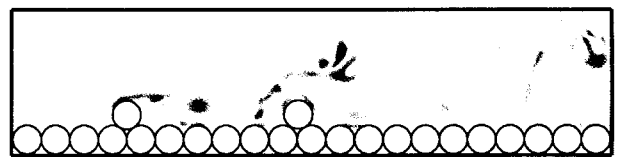
(c) $t = t_0 + 4\delta t$



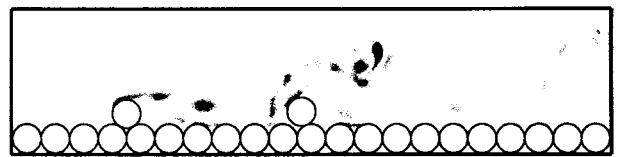
(d) $t = t_0 + 5\delta t$



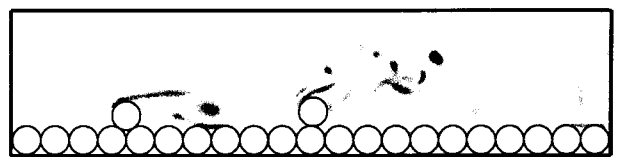
(e) $t = t_0 + 6\delta t$



(f) $t = t_0 + 7\delta t$



(g) $t = t_0 + 8\delta t$



(h) $t = t_0 + 10\delta t$

図- 9 初期移動過程における渦度と粒子の挙動
(case-D, $t_0 = 0.55(s)$, $\delta t = 5 \times 10^{-2}(s)$)

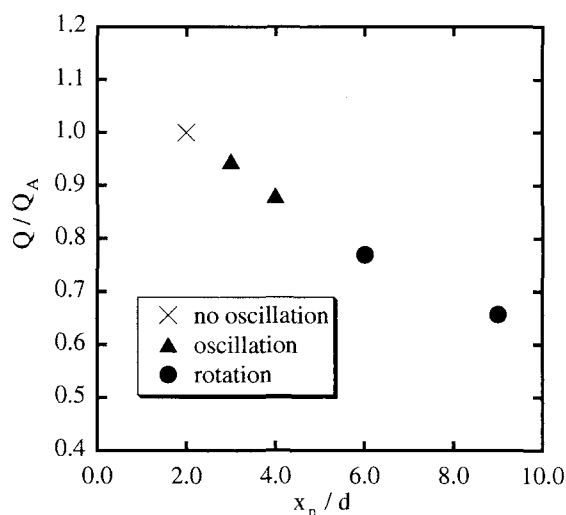


図-10 数値計算による粒子の挙動

各実験ケースを対象とした数値計算を行った結果、大別すると、1) 実験と同一の水理条件で円柱が移動を開始する場合、2) 激しく振動するが転動までには至らない場合、また、3) 振動も顕著には見られない場合、という3つの傾向が見られた。これらの結果をとりまとめて図-10に示す。この図は、可動粒子と固定粒子の中心間距離 x_p/d と、表-1に示した case-A の流量 Q_A で正規化された移動開始時の流量 Q の関係に対して、上記の3種類の傾向を示したものである。この結果から、数値計算では、上流側に置かれた固定円柱からの距離が大きい場合に、可動円柱の移動開始を比較的良好に再現する傾向があることがわかる。一方、可動粒子と固定粒子の中心間距離が小さい場合には、可動円柱に作用する流体力が過小評価され、物体は動きにくい傾向にある。特に $x_p/d = 2$ の条件では円柱の振動も顕著ではなかった。しかし、可動円柱が振動する挙動を示した $x_p/d = 3$ および 4 のケースでは、わずかな計算条件の変化により、円柱が転動開始すると考えられることから、全般的には可動粒子の初期移動過程を概ね再現すると判断される。今後、計算条件を増やして転動・非転動の判定をより明確にしたい。

次に、円柱が転動するときの過程を詳細に表す結果を図-8と図-9に示す。これらは、 $x_p/d = 6.0$ のケースで得られたもので、流線と渦度の計算結果が円柱の挙動と合わせて示されている。図中の時刻 t_0 は可動円柱の拘束条件をはずしてから経過時刻である。円柱の挙動を見ると、上流側の固定粒子によって生じた渦度の高い領域が固定粒子上部から放出され、図-9(d)に示されるように、これが可動粒子の直上流域に達したときに、可動粒子が上流側に動く。これは渦度が高い低圧領域に可動円柱が引き寄せられるためであると考えられる。この高渦度領域が可動円柱の上部を通過

するとともに、可動円柱はもとの静止状態を越えて下流側へ動く。図-8と図-9に示した $x_p/d = 6.0$ のケースでは、そのまま円柱が下流側へ転動する。一方、振動が見られた $x_p/d = 3$ および 4 のケースでは、円柱が転動までに到らず、次に上流側から来る高渦度領域に再び引き寄せられて、振動を繰り返す。このように、上流側に高渦度領域を放出する物体がある場合には、単一円柱の初期移動過程とは大きく異なるプロセスが生じていることが明らかとなった。特に、流下して来る高渦度領域によって、可動円柱が一旦上流側に動く挙動は興味深い。この点に関しては今後実験的な検討を加える必要がある。

4. おわりに

本報では、流体中で静止した物体に流体力が作用する場合に、その初期移動過程を精度良く評価するための数値解法に関する検討を加えた。現象を把握するため、ダクト模型内部の上流側に固定円柱、またその下流側に可動円柱を設置し、両者の中心間距離と流量を変えた場合の円柱の移動開始状況を実験的に調べた。この実験結果から、既往の評価手法に従って流体力と遮蔽係数を算出し、従来の手法の問題点について検討を加えた。次に、この実験結果を対象として、著者らが開発した粒子-流体混合系の数値解法である MICS による計算を行った。その結果、MICS では遮蔽係数や抗力係数などを使わないにもかかわらず、各条件における物体の初期移動過程をほぼ再現可能であることが示された。また、上流側の固定粒子から放出された高渦度領域により、下流側の可動粒子が影響を受け、転動を開始する契機を与えるなど、興味深い結果も数値計算結果に見られた。

参考文献

- 1) 牛島省, 竹村雅樹, 山田修三, 瀬津家久: 非圧縮性流体解析に基づく粒子-流体混合系の計算法 (MICS) の提案, 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 121-130, 2003.
- 2) Ushijima, S. and Tanaka, N.: Three-dimensional particle tracking velocimetry with Laser-light sheet scanings, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 352-357, 1996.
- 3) White, F. M.: *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill, 1991.
- 4) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する流体力学的研究, 土木学会論文集, Vol. 41, pp. 1-21, 1956.
- 5) 牛島省, 竹村雅樹, 山田修三, 瀬津家久: 流体力評価精度の高い DEM の提案と底質粒子初期移動過程への適用, 海岸工学論文集, Vol. 50, No. (1), pp. 506-510, 2003.

(2004. 9. 30 受付)