

泥水式シールドチャンバー内における掘削土砂の挙動に関する基礎的研究

— 単一粒子挙動の数値シミュレーションと模型実験との比較 —

FUNDAMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF EXCAVATED SOIL

IN SHIELD CHAMBER OF SLURRY SHIELD MACHINE

- COMPARISON OF THE SIMULATED RESULTS OF A SINGLE PARTICLE BEHAVIOR
WITH ONE OF MODEL EXPERIMENTS -

杉山 茂雄* ・高橋 弘** ・益山 忠*** ・高橋 均****

Shigeo SUGIYAMA, Hiroshi TAKAHASHI, Tadashi MASUYAMA and Hitoshi TAKAHASHI

The purpose of this study is to carry out the numerical simulation of excavated soil in shield chamber of slurry shield machine. Numerically Lagrange method was adopted in this study. A trajectory of a single particle in the chamber was simulated and compared with one obtained in the model experiment. From the comparison, it was confirmed that simulated results agreed well with the experimented ones for small diameter particles.

Keywords: behavior of excavated soil, Lagrange method, numerical simulation,
shield chamber

1. はじめに

トンネル工事に使われる掘進機としては、泥水式シールド掘進機、土圧式シールド掘進機、およびTBM(Tunnel Boring Machine)などがある。泥水式シールド掘進機が他の2つの掘進機と比較して大きく異なる点は、シールド機前部の泥水室(以下チャンバーと記す)に泥水を圧送し、泥水圧とカッタ面盤とによって切羽土圧および地下水圧に対抗させながら地中を掘進する点である。

トンネル掘削あるいは地下空間の開発に際し、泥水式シールド工法のみならずNATM工法においても掘削土砂あるいは破砕物の円滑な排出は非常に重要である。今後、泥水式シールド掘進機の大型化ならびにマルチフェイス化による切羽断面形状の複雑化が考えられており¹⁾、この複雑な切羽断面から最適に排泥を行うには、チャンバー内の流動状態を明らかにすることが必要不可欠である。しかしながら、チャンバー内の流動状況がまだ正確には把握されていないため、チャンバー内の掘削土砂の挙動は十分には明らかにされていない。また、実機を用いた実験はコスト的に困難であるため、チャンバー内の流動状況および掘削土砂の挙動を数値解析および模型実験などにより的確に把握する必要がある。

* 学生 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻

** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科

*** 工博 東海大学教授 海洋学部海洋資源学科

**** 日立建機(株)トンネル工場部設計部

近年、コンピュータの発達にともない、チャンバー内の泥水の流動解析が行われている²⁾。また、混相流の分野において粒子の挙動を数値的に解析しようとする試みが活発に行われており³⁾、シールドの分野でも一部にオイラー法を適用して解析を行っているものが見られる⁴⁾⁵⁾。しかしながら、オイラー法は粒子が比較的均一に分散するという仮定が必要であり、微粒子を含んだ流れに適用されることが多い。また、シールドチャンバー内では掘削土砂の粒径が大きく、均一に分散されることが少ないことから、オイラー法が適さない場合もあり、この場合は、個々の粒子の軌跡を追跡するラグランジュ法の方が適していると言われている⁶⁾。

それゆえ、本論文では、シールド掘進機チャンバー内の流動状況および緑り粉挙動の解明に資するため、個々の粒子を追跡するラグランジュ法を用いた掘削土砂挙動のシミュレーションを行い、さらに、シミュレーションの整合性を評価するため実験との比較検討を行った。

2. シールドチャンバー内の数値シミュレーションについて

シールドチャンバー内の粒子挙動の解析のためには、流れ場であるシールドチャンバー内の泥水流動の解析と、運動方程式に基づく粒子の挙動の解析が必要である。粒子は流れ場から抗力を受けて移動するので、流れ場の検討は非常に重要である。それゆえ、はじめにシールドチャンバー内の泥水の流動について検討する。

2.1 シールドチャンバー内の流動解析

2.1.1 流動解析のためのモデル

図1に示すようなシールドチャンバーを模擬したチャンバーモデルを考え、片側の円盤と中心軸（図中斜線部）が一定の回転数 ω で回転した場合のチャンバー内の流動を数値解析する。ここでは解析を簡単化するため泥水の送排水口やカッタ、アジテータは無いものとする。図1では斜線部の円盤がカッタ面に相当し、シールド機は-x方向に進行することになる。

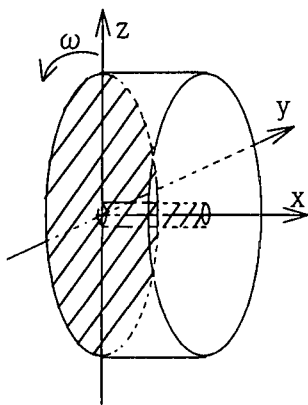


図1. チャンバモデル

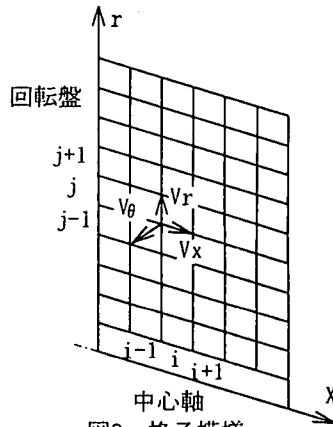


図2. 格子模様

2.1.2 数学モデル

図1に示したチャンバー内の流動は軸対称流れとし、図2に示すような x - r 平面のみを考える。そのためこの数値解析で用いる式は円筒座標系の連続の式およびナビエーストックスの方程式である。これらの諸式を(1)式ないし(4)式に示した。ただし軸対称流れであることから、周方向の偏微分項は消去してある。これらの諸式を差分法を用いて離散化し、数値解析により流れ場を求める。なお、後述する実験では非ニュートン流体を用いているが、計算の簡単化のため、このシミュレーションでは回転盤の回転数に応じたずり速度における見かけ粘度を有するニュートン流体を用いる。

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} = \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

ここに v_x, v_r, v_θ : 流体速度、 p : 圧力、 ρ_f : 流体密度

2.1.3 計算手順

ナビエーストークスの式と連続の式とを離散化するため x, r 平面を図2に示すように x 方向と r 方向とに分割し、格子を形成した。図3のように4つの格子点で囲まれたセルにおいて、計算で用いる流体速度 v_x, v_r はセルの境界を横切るように、また、流体速度 v_θ および圧力 p はセルの中心に設定した。

(2)式ないし(4)式の時間微分項だけ離散化し、変形すると次式が得られる。ただし、上付き添字の無いものは時刻 t の値、上付き添字*の有るものは時刻 $t+dt$ の値を示している。

$$v_r^* = A(r) - \frac{dt}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

$$v_\theta^* = A(\theta) \quad (6)$$

$$v_x^* = A(x) - \frac{dt}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

ここで

$$A(r) = v_r + dt \left\{ -v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta^2}{r} - v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} \right) \right\} \quad (8)$$

$$A(\theta) = v_\theta + dt \left\{ -v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_r v_\theta}{r} - v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial x^2} \right) \right\} \quad (9)$$

$$A(x) = v_x + dt \left\{ -v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} - v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho_s} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right) \right\} \quad (10)$$

(5)式ないし(7)式を(1)式に代入し、さらに圧力項の離散化を考慮し整理すると(11)式が得られる。

$$\frac{P(i,j+1) - 2P(i,j) + P(i,j-1))}{dr^2} + \frac{P(i+1,j) - 2P(i,j) + P(i-1,j))}{dx^2} + \frac{1}{\rho} \frac{P(i,j+1) - P(i,j-1)}{2dr} = \frac{\rho_f}{dt} \left(\frac{\partial A(r)}{\partial r} + \frac{\partial A(x)}{\partial x} + \frac{A(r)(i,j)}{r} \right) \quad (11)$$

(11)式をガウスサイデル法によって解き、時刻 t の速度を基に時刻 t の圧力を求める。この時刻 t における速度、圧力を(5)式ないし(7)式に代入することにより時刻 $t+dt$ の速度場を算出する。速度、圧力の初期値を与え、さらに、この一連の計算を繰り返すことによって、繰り返し回数 m と時間間隔 dt から得られる計算時間 $m*dt$ の速度、圧力が得られることになる。計算の終了は $m*dt$ が所定の時刻に達したとき、または時刻 $t+dt$ の速度と時刻 t の速度の差が許容誤差 ε 内に入った時 ($|v^* - v| < \varepsilon$ ε : 許容誤差) とした。

境界条件は回転盤と中心軸上の流体速度 v_θ のみ回転数に基づく一定値を持ち、壁面上では滑りが無いものとする。

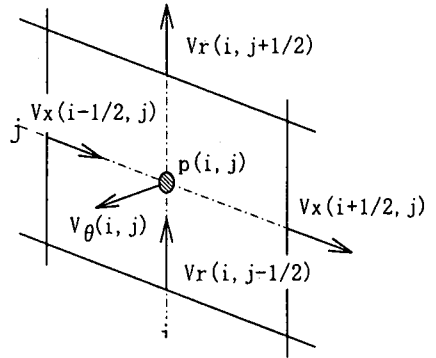


図3. セルにおける速度、圧力

2.2 粒子の運動方程式について

粒子の運動方程式は、HINZE⁷⁾が与えている流れ場中の運動方程式を基に、次式で与えることにする。

$$\frac{\pi}{6}d^3\rho_p\frac{\partial u_i}{\partial t}=F_{1i}+F_{2i}+F_{3i}+F_{4i}+F_{5i} \quad (12)$$

$$i=x, r, \theta$$

右辺のF1ないしF5はそれぞれ重力、浮力、抗力、仮想質量力および圧力勾配による力であり、粒子が図4のような位置にある場合、次式で与えられる。

$$F_{1x}+F_{2x}=0 \quad (13)$$

$$F_{1r}+F_{2r}=-\frac{\pi}{6}d^3(\rho_s-\rho_f)g\cos\theta \quad (14)$$

$$F_{1\theta}+F_{2\theta}=\frac{\pi}{6}d^3(\rho_s-\rho_f)g\sin\theta \quad (15)$$

$$F_{3i}=C_D\frac{\rho_f}{2}(v_i-u_i)|v_i-u_i|\frac{\pi}{4}d^2 \quad (16)$$

$$F_{4i}=C_a\frac{\pi}{6}d^3\rho_p\left(\frac{\partial v_i}{\partial t}-\frac{\partial u_i}{\partial t}\right) \quad (17)$$

$$F_{5i}=\frac{\pi}{6}d^3\rho_f\frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (18)$$

$$i=x, r, \theta$$

u : 粒子速度、 d : 粒子径、 ρ_p : 粒子密度、 ρ_f : 流体密度、 g : 重力、 C_D : 抗力係数、 C_a : 仮想質量力係数

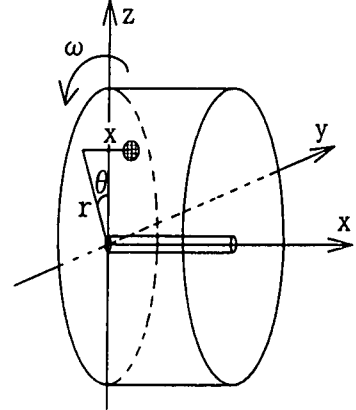


図4. 粒子座標

ところで、抗力係数は定数とはならず、粒子レイノルズ数の関数となることはよく知られている⁸⁾。ここで球形粒子を考えているため、MORSIらが与えている粒子レイノルズ数と抗力係数との関係⁹⁾を用いた。また、仮想質量力係数は球形粒子を考えているため0.5とした。流れ場が円筒座標系で算出されることから、この運動方程式にも円筒座標系を用いた。

流体と粒子は相互に干渉するため、本来は流れ場と粒子の運動方程式を同時に解き進むべきであるが、基礎研究として、まず単粒子を取り扱うため、流体と粒子の相互干渉は極めて小さいと考え、ここでは、簡単のため、はじめに流れ場を求め、次に流れ場の速度を用いて粒子の運動方程式を解くといった方法を用いることにする。

(13)式ないし(17)式を(12)式に代入し、差分法を用いて離散化した。粒子の初期速度、粒子径、粒子密度および粒子の初期座標(x, r, θ)を与え、2.1で求めた流れ場より粒子位置の流速ベクトルを選び、各時間ステップごとの粒子速度を計算する。得られた粒子速度と時間間隔 dt から図1に示すチャンパーモデル内の粒子の挙動をシミュレートする。

3 模型実験について

従来の研究では、シールドチャンパー内の泥水環流実験も見られる¹⁰⁾が、前述したように実機レベルの模型を用いた実験はコスト的に困難である。そのため小規模な模型実験により実機における値を推定する必要性が生じてくるが、模型の製作には相似則に従ったスケールに合わせることが重要である¹¹⁾。本実験ではレイノルズ数とフルード数の2つの相似則を合わせる必要がある。しかし、レイノルズ数とフルード数の2つを合わせることは実機以外には不可能であるため、本実験ではフルード数の代わりとして粒子の沈降速度と回転円盤の周速度との比を用いてシールドチャンパーの模型を作製し実験を行った。ただし、その詳細については紙面の関係上、割愛する。

想定した実機は日立建機（株）製の8.25mφシールド掘進機であり、回転盤の回転数は0.61rpmを想定した。掘削土砂としては直径1.35mm、密度1.25g/cm³とした。本実験では約1/25スケールのチャンバモデルを作製した。なお、表1にモデルの諸元を示す。粒子としては表2に示すように、密度および粒径の異なる3種類の球形粒子を用い、また供試流体については見かけ粘度 0.1754Pa・S、比重 1.009g/cm³のCMC溶液を用いた。

図5に実験装置の概略図を示した。はじめにチャンバモデル内にCMC溶液を満たし、回転盤を回転させる。その後、粒子投入孔より粒子を投入し、チャンバ内の粒子をNAC（株）社製のハイスピードビデオカメラで撮影し、X-Yコーディネータを用いて粒子の軌跡を求めた。測定結果の一例を図6に示す。ステンレス球は沈降速度が大きいため、流れ場の影響を受けずほぼ鉛直方向に落下しているが、ガラスビーズ及びテフロン球は流れ場の影響を大きく受け、回転により上部まで巻き上げられていることがわかる。

表1. チャンバモデル

チャンバ径[m]	0.32
チャンバ幅[m]	0.03
中心軸径[m]	0.01
回転数[rpm]	22.3

表2. 供試粒子

	粒径[mm]	密度[g/cm ³]
ガラスビーズ	2.09	2.43
ステンレス球	2.04	7.64
テフロン球	3.18	2.28

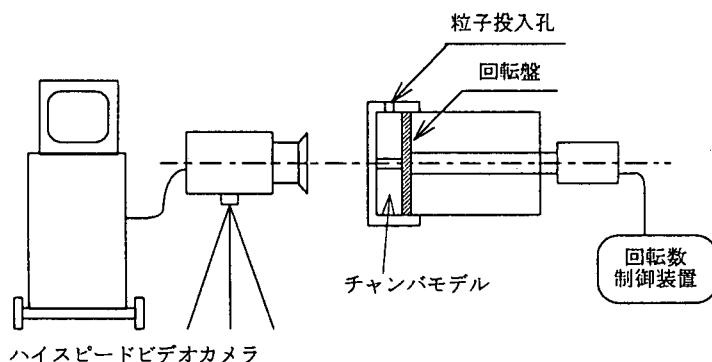


図5. 実験装置概略図

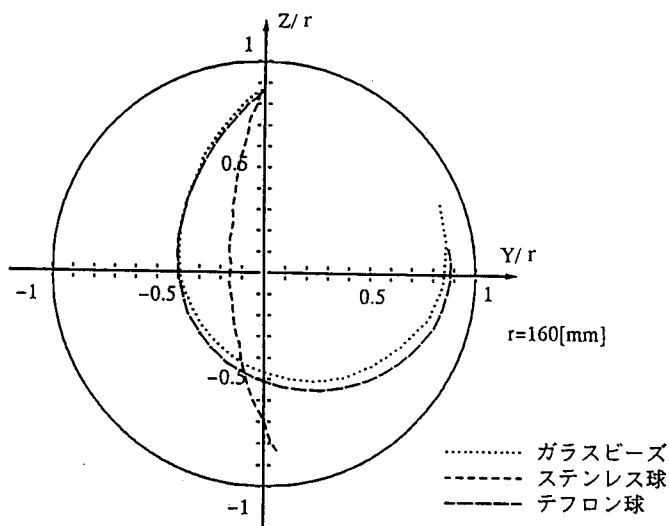


図6 実験による粒子軌跡

4. シミュレーション結果と実験結果との比較

4.1 シミュレーションの条件

シミュレーションで得られる粒子軌跡と実験結果との比較を行うため、シミュレーションでは、チャンバーモデルおよび供試粒子については実験と同じ条件を用いた。ただし、シミュレーションにおける供試流体は前述したように見かけ粘度を用いてニュートン流体を仮定した。ずり速度に応じた適切な見かけ粘度を用いることができれば非ニュートン流体をニュートン流体として扱っても大きな誤差は生じないと思われるが、ここでは簡単化のためチャンバー内における平均の見かけ粘度を用いることにし、粘度 0.1754Pa・S、比重 1.009g/cm³のニュートン流体とした。

流動解析の計算では計算領域をx方向に30分割、r方向に40分割し、時間間隔dtを0.0001sとした。また上述したように計算の終了条件は時間ステップごとの速度差が設定した許容誤差εより小さくなる時とした。

定常状態における流れ場が計算された後に粒子挙動のシミュレーションを行ったが、粒子挙動のシミュレーションでは時間間隔を0.005sとし計算を行った。計算の終了は粒子が壁面に到達するか、指定した時間に達した時とした。なお、粒子の初期座標は(x, r, θ)=(0.002m, 0.138m, 0rad)、初期速度は0[m/s]とした。

初期条件として回転盤と中心軸上の流体速度V₀のみを与え、それ以外の速度成分はすべて0とした。圧力は実験条件と等しくするために1atmで一様に分布しているものとする。

4.2 シミュレーション結果

2.1で得られた流れ場における粒子の挙動をシミュレーションにより求めた。図7-aないし図7-cにシミュレーションにより得られた粒子の軌跡と実験によって得られた軌跡との比較を示した。流動解析において終了条件である許容誤差εの違いにより多少異なる軌跡となったが、ガラスビーズとステンレス球においては、シミュレーション結果と実験結果とはほぼ一致した。しかしながら粒径が3.18mmのテフロン球では両者に差が見られた。この原因としては、シミュレーションでは粒子を点として計算しているが、実際には粒径に応じた大きさがあり、粒径が大きくなるほど粒子周りの流れの影響を大きく受けること、粒子と流体との相互作用が解析モデルでは考慮されていなく、粒径が大きくなるとこの影響が大きくなること、および一定の見かけ粘度を用いたことなどが考えられるが、その詳細は不明であり、今後さらに検討する予定である。

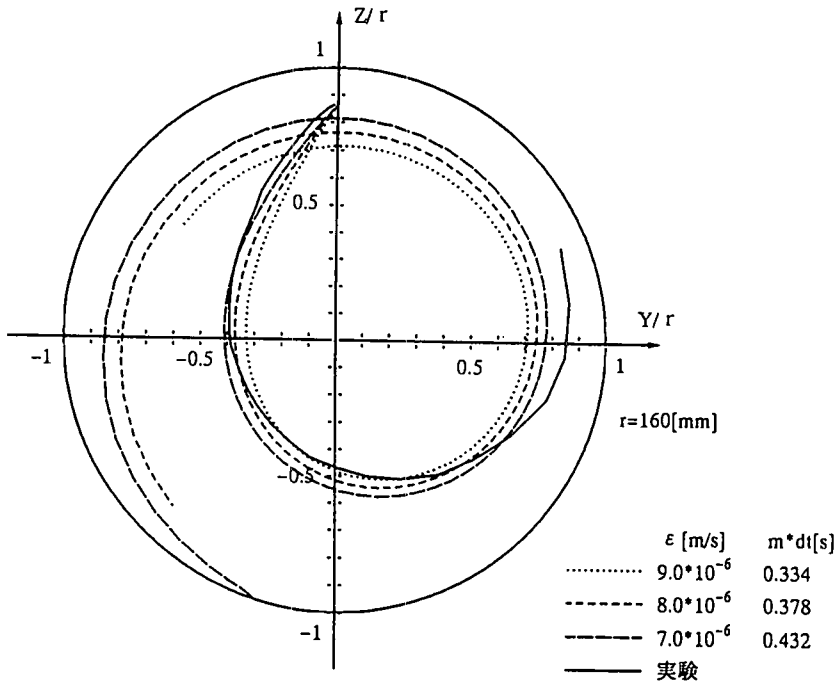


図7-a ガラスビーズのシミュレーション軌跡

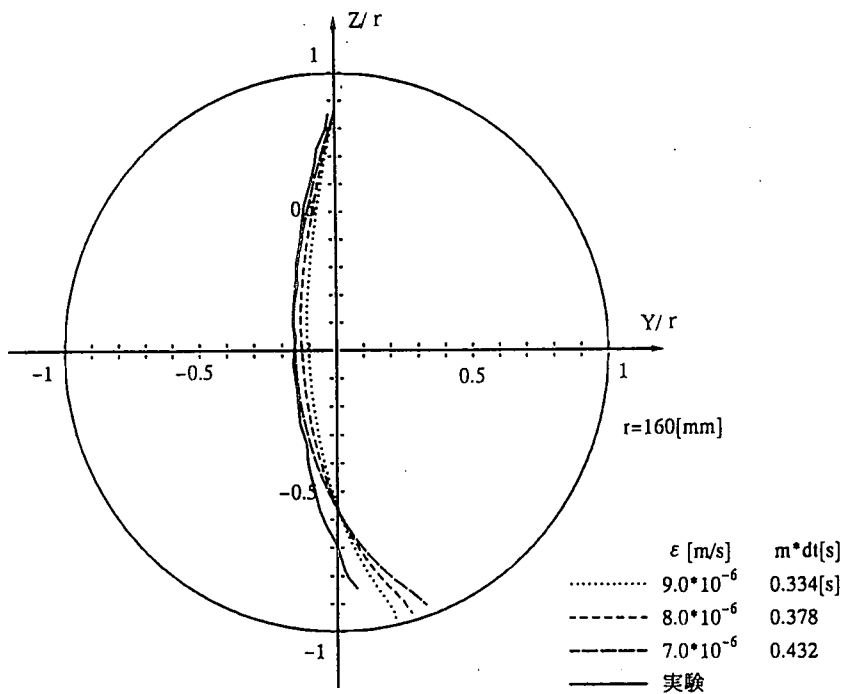


図7-b ステンレス球のシミュレーション軌跡

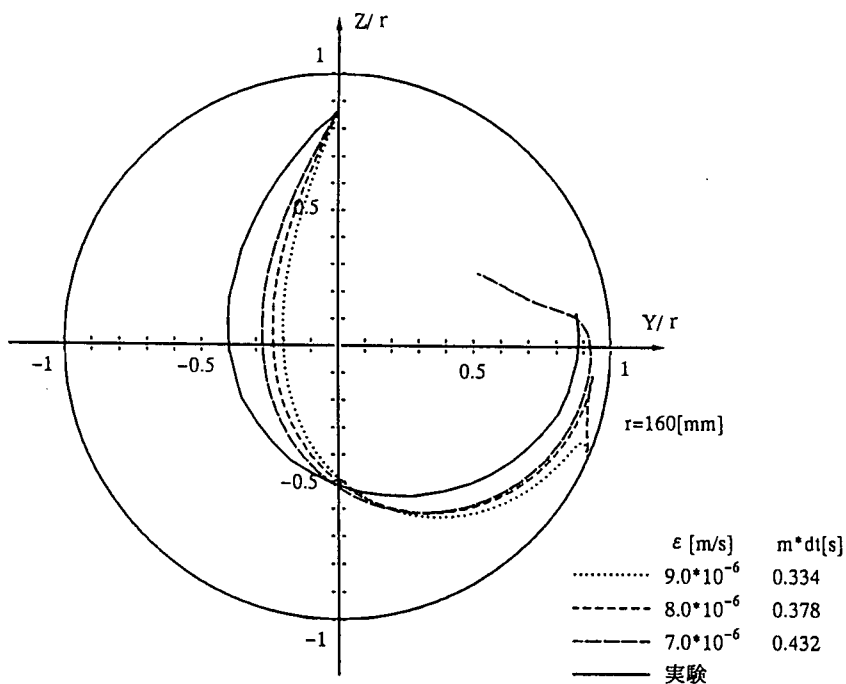


図7-c テフロン球のシミュレーション軌跡

5. まとめ

シールド掘進機チャンパー内の流動と粒子挙動を数値シミュレーションにより検討した。粒径が小さい場合には、シミュレーション結果は模型実験の結果とよく一致した。従って本シミュレーションによりチャンパー内の様々な場所に置いた粒子の挙動を調べることができ、場所による粒子濃度の大小を予想することが可能となると思われる。今後は粒子周りの流れの検討と非ニュートン流体への応用を検討するとともに、このシミュレーションを用いて濃度分布についても検討する予定である。

なお、本研究を遂行するにあたり、東北大学教授 工博 中野栄二先生より有益な御助言を頂いた。ここに謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) 松本 嘉司：最新シールドトンネル、日経コンストラクション、pp. 93-147, 1995.
- 2) 榎崎 邦男 他：シールドチャンパ内の泥土・泥水の流動解析、トンネルと地下、pp. 663-667, 1994.
- 3) 辻 裕：液体・固体混相流の数値シミュレーション、スラリー輸送研究会20周年講演資料、pp. 1-8, 1993.
- 4) 柳 浩敏・東 恵美子・平田 昌三：大型泥水式シールドチャンパ内の流動解析
土木学会第49回年次学術講演会講演集, part. 3, pp. 1394-1395, 1994.
- 5) 上野 敏光 他：土圧式シールドのチャンパ内における攪拌効果の数値解析
建設の機械化、pp. 33-37, 1994. 5.
- 6) 辻 裕：固気二相流のモデリングと数値シミュレーション、第5回混相流シンポジウム
講演論文集、pp. 23-46, 1986.
- 7) J. O. HINZE：Turbulence, McGRAW-HILL, pp. 463, 1975.
- 8) 伊藤 四郎：流体工学、科学技術社、pp. 75-101, 1972.
- 9) S. A. MORSI・A. J. ALEXANDER：An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, J. Fluid Mech. vol. 55, part2, pp. 193-208, 1972.
- 10) 小山 幸則 他：3円形シールドチャンパ内泥水環流実験、トンネルと地下、pp. 519-524, 1994.
- 11) 江守 一郎：模型実験の理論と応用、技報堂出版、pp. 2-36, 1985.