論文 逸泥を伴う水平および傾斜ドリリングにおける掘削井内 練粉濃度変化に関する数値シミュレーション*

高 橋 弘¹ 齋 藤 清 次² 益 山 忠³

Numerical Simulation of in-situ Cuttings Concentration Change due to Lost Circulation in Horizontal and Inclined Drilling

by Hiroshi TAKAHASHI¹, Seiji SAITO¹ and Tadashi MASUYAMA²

1. Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8579

2. School of marine Science and Technology, Tokai University

This paper describes the simulation model of in-situ cuttings concentration change due to lost circulation in horizontal and inclined drilling. The mixture flow of cuttings and mud fluid is regarded as the solid-liquid two-phase flow in the annulus and the numerical simulation model is developed based on the equation of motion of cuttings. The numerical simulation of in-situ cuttings concentration change due to lost circulation was carried out, and the simulated results were compared with the previous research related to the cuttings velocity change due to lost circulation. As simulated results agreed with the experimental results in the previous research, it was confirmed that the model developed here is reasonable. Therefore, by using this model, numerical simulation was carried out again under several conditions. From the simulated results, it was found that the effect of lost circulation on the change of in-situ cuttings concentration and height of moving bed becomes significant according to the decrease of the inclination angle of the drilling well.

KEY WORDS: In-situ Cuttings Concentration, Solid-Liquid Two-Phase Flow in Annulus, Horizontal and Inclined Drilling, Lost Circulation

1. は じ め に

地下に存在する石油・ガスあるいは地熱流体などを採取する唯一の技術が坑井掘削技術であり、坑井掘削に関しては多くの研究が行われているとともに、既に数多くの実績がある。坑井掘削は一般に垂直掘りが基本ではあるが、岩盤強度の非均質性などの理由から掘削中に坑井が傾斜することはまれではなく、また近年では、積極的に傾斜掘りあるいは水平掘りを利用して、石油などを採取するようになってきている¹⁾。その一例として、初めに比較的口徑の大きい垂直の坑井を掘削し、次にこの坑井から傾斜および水平坑を数多く分岐させていく方法がある。この傾斜掘りあるいは水平掘りが普及してきた背景には、コイルチュービングを用いたコイルドチュービングドリリング (CTD) 技術の開発がある。これは、ドリルストリング (以下、掘管と記す) をコイル状に巻き、コイルの先端付近にダウンホールモータを設置した掘削装置により坑井掘削を行う技術である。CTD には、掘管に若干のフレキシビリティがあり、またビットを回転させるモータがビット近傍にあるので、ビットの制御が比較的容易にできるという特徴がある。そのため、CTD は水平掘りあるいは傾斜掘りに

用いられることが多い。掘削泥水は地表からポンプによりコイル状の掘管を通して坑底に送られ、その流動によりダウンホールモータが回転する。泥水により掘削ビットを冷却し、練粉を地表に排出する点は従来の掘削技術と変わらないが、従来の掘削技術との大きな違いは、ビットの回転は泥水の流動により回転するダウンホールモータから得られるので、地表に大掛かりな掘削装置を必要としないことおよび掘管の回転がないことである。

ところで、水平および垂直掘りにかかわらず、掘削においては、練粉のスムーズな排出は極めて重要な問題である。練粉の排出がスムーズに行われない場合、掘削井内の練粉濃度が上昇し、掘管を抑留する危険性が大きくなる。一旦、掘管が抑留されると、もはや掘削を行うことができなくなるので、この掘管の抑留は絶対に回避しなければならない問題である。そのため、掘削中の練粉の挙動を十分に検討し、あらかじめ把握しておくことは、安全な掘削のために必要不可欠である。泥水は、掘管を通して坑底に送られ、掘管と掘削井壁との間の、いわゆる2重管部分を通して地表に戻る。地表に戻る際に練粉を搬送するため、練粉の挙動は、2重管内固液2相流と考えられる。この際、地下に大きなき裂が存在すると、そこから泥水がき裂に逃げ出す、いわゆる逸泥が生じる。逸泥が生じると、逸泥箇所より上方の2重管内の泥水流量が減少するため、泥水の流速が減少し、泥水の練粉搬送能力が低下する。したがって、掘管の抑留を回避し、掘削を安全に行うためには、逸泥による練粉挙動の変化をあらかじめ十分に把握しておく必要がある。しかし、2重管内における固液2相流の研究は、いくつか見受けられるものの²⁾⁻⁴⁾、内管 (掘管) の偏心まで考

* 1998年11月19日受付 1999年1月29日受理

1. 正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科地球工学専攻

2. 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科地球工学専攻

3. 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋資源学科

〔著者連絡先〕 FAX 022-217-7395 (東北大学・地球工学)

キーワード: 坑井内練粉濃度, 2重管内固液2相流, 水平および傾斜ドリリング, 逸泥

慮に入れた繰粉挙動の解析が、十分に行われているとは言い難く、また逸泥量が繰粉の挙動に及ぼす影響は、ほとんど明らかにされていない。

それゆえ、本研究では掘管の偏心を考慮に入れた線粉流動のシミュレーションモデルを開発し、逸泥による掘削井内線粉濃度変化および粒子層厚の変化の数値シミュレーションを行い、水平および傾斜ドリリングシステムの安全性向上に資することを目的とする。

2. シミュレーションモデル

掘削泥水は、掘管内を通過して坑底まで送られ、掘削井壁と掘管との間の、いわゆる2重管部分を通して地表に戻り、線粉と泥水が分離された後、泥水は冷却され再び坑底へ送り出される。そのため、上述したように、線粉と泥水の流動は2重管内固液2相流と見なすことができる。従来の管内固液2相流に関する研究⁵⁾で既に指摘されているように、管内粒子群の挙動は、平均流速、固体粒子濃度、粒子径、管路の傾斜角度など様々な因子の影響を受けるが、特に管路が垂直の場合は、粒子群はいずれも浮遊の状態では輸送され、流動様式に大きな変化は見られない。これに対して、水平管路の場合は、流動方向と重力の方向が直交しているため、粒子群は重力の影響を大きく受け、流動様式は流速の変化などにより大きく変化する。したがって、一般に流動様式は水平管路において定義される⁶⁾。粗粒子固液2相流の場合、流速が低い範囲内では、管下部に粒子が堆積する、いわゆる堆積層流れを呈し、流速の増加とともに、攪動層を伴う流れを経て非均質流へと遷移する。粒子径が小さい場合には、高流速域において流れが擬均質流を呈することもあるが、粗粒子の場合、かなりの高流速においても、流れが擬均質流を呈することはほとんどない。これらの流動様式のうち、流れの圧力損失が最も小さくなるのは攪動層を伴う流れであり、輸送速度は、この流動範囲内において選定されることが多い⁵⁾。

一方、掘削における繰粉の排出においても同様のことがいえる。すなわち、水平掘削の場合、泥水中の繰粉の流動様式は 1) 堆積層を伴う流れ、2) 摺動層を伴う流れおよび 3) 摺動層を伴わない非均質流の 3 つに大別される。したがって、水平掘削における繰粉の挙動を議論する場合には、これら 3 つの流動様式における流れについて検討する必要がある。この場合、すべての流動様式を網羅するシミュレータの開発が理想的である。しかし、数多くの研究が行われている管内固液 2 相流の分野においても、流動抵抗を 1 つのモデルで見積もることは難しく、流動様式ごとに摩擦係数を与えるといった工夫がなされている⁷⁾ ことなどを考えると、すべての流動様式を網羅した逸泥による繰粉の掘削井内濃度変化推定シミュレータの開発は極めて難しいと予想される。したがって、現時点では、それぞれの流動様式に対するシミュレータを開発するほうが経済的かつ効率的であると考えられる。

ところで、坑壁保護のためおよびポンプの動力消費を低く抑えるため、一般に泥水の流速を高く設定することは希である。さらに、線粉の堆積は掘削井閉塞の危険性が大きく、掘管が線粉により抑留されると、もはや掘削はできなくなるので、泥水流量を極端に小さく設定することも少ない。したがって、水平掘りあるいは傾斜掘りでも水平に近い状態では、ほとんどの場合、掘削井内の線粉の挙動は、撓動層を伴う流れを呈すると考えられる。そこで、本研究では線粉が「掘削井断面の下側部分」（以下、掘削井下部と記す）に集中し、撓動層を呈する流れに限定して、モデルを開発することにする。

掘削井内固液 2 相流の特徴は、管内に掘管が存在する 2 重管内

Fig. 1 Schematic diagram of cuttings behavior in the inclined drilling well.

の流れであり、かつ掘管が回転することである。しかしながら、1) 掘管の回転を考慮すると解析がかなり複雑になる、2) 従来の研究⁸⁾で、泥水の流動による圧力損失に及ぼす掘管の回転の影響は、あまり大きくないことが報告されている、および 3) 近年、スリムホールドリリングに代表されるようなCTDでは、泥水の流れで回転するダウンホールモータによりビットに回転が与えられるため、掘管の回転が無いことなどを考慮し、本研究では、掘管は回転しないと仮定する。

Fig. 1は傾斜掘削井における繰粉の挙動の模式図を示したものである。図中の Q_f 、 Q_0 および Q_i は、それぞれ供給泥水流量、帰還泥水流量および逸泥流量を表す。つまり、 Q_i は Q_f と Q_0 の差で与えられる。 u_s は繰粉の速度を示す。上述のように本研究では、繰粉は掘削井下部に集中し、撓動層を形成すると仮定しており、またCamposら⁹⁾および著者ら¹⁰⁾の研究を考慮に入れると、撓動層内の粒子速度は、ほぼ一定であると考えられることから、 u_s は撓動層の速度と言い換えることもできる。また図に示すようにき裂の位置を原点として、流れ方向に x 軸を、また x 軸に垂直な方向に y 軸をとる。また傾斜角度については、管路による固体粒子の水力輸送の場合は、水平管を基準として考えるため、水平の場合は傾斜角が0度であり、垂直管の場合は90度と一般に定義される。しかし、掘削の場合は垂直掘削井を基準に考えるため、一般に垂直の場合、傾斜角を0度、水平の場合の傾斜角を90度と定義する。それゆえ、本研究においても水平の場

Fig. 2 Schematic diagram of the cross section of the drilling well.

合を傾斜角 90° とし、角度 θ を Fig. 1 に示すようにとる。また u_f は泥水の平均流速である。

Fig. 2 に掘削井の断面模式図を示す。内側の円は掘管を、外側の円は掘削井壁を表す。 A_s および A_w は摺動層および泥水流路断面積を示し、 e_s は内管の偏心量を表す（同心 2 重円管の場合は $e_s = 0$ となる）。 D および d は、掘削井内径および掘管の外径を示す。

摺動層に作用する力として、1) 泥水による推力 F_T 、2) 摺動層表面におけるせん断応力による力 F_s 、3) 摩擦力 F_f および 4) 流動方向の線粉の重力成分 F_g を考えると、線粉の運動方程式は次式のように与えられる。

$$M \frac{du_s}{dt} = F_T + F_s - F_f - F_g \quad (1)$$

M は区間 L における線粉の質量であり、次式で与えられる。

$$M = A_s q_b \rho_s L \quad (2)$$

ここに、 q_b は摺動層内の線粉の濃度であり、 ρ_s は線粉の密度である。

泥水による推力 F_T および摺動層表面におけるせん断応力による力 F_s は、それぞれ次式で表される。

$$F_T = \frac{3}{2} \frac{q_b}{d_s} A_s C_D L \frac{\rho_f}{2} (u_f - u_s)^2 \quad (3)$$

$$F_s = \tau_s L_s L \quad (4)$$

ここに、 d_s は線粉の直径、 C_D は線粉の抗力係数、 ρ_f は泥水の密度、 u_f は摺動層内の泥水の流速、 τ_s は摺動層表面におけるせん断応力を示す。 L_s は摺動層の幅を示し、次式で与えられる。

$$L_s = D \left[\sin \alpha - \left(\frac{d}{D} \right) \sin \beta \right] \quad (5)$$

摩擦力 F_f は、主として摺動層と掘削井壁との間の摩擦力であるが、摺動層の高さが大きくなった場合、あるいは掘管の偏心量が大きくなった場合には、摺動層は掘管とも接するため、掘管との間にも摩擦力が発生する。本研究では簡単のため、摩擦力は次式で与えられると仮定する。

$$F_f = \mu_s A_s q_b (\rho_s - \rho_f) g L \cos \theta \frac{(P_{s1} + P_{s2})}{P_{s1}} \quad (6)$$

ここに、 μ_s は摺動層と掘削井壁および摺動層と掘管との間の摩擦係数である。 P_{s1} および P_{s2} は、摺動層が掘削井壁および掘管と接する長さである。

摺動層に作用する重力のうち、流れ方向の成分は式(7)で示される。

$$F_g = A_s q_b (\rho_s - \rho_f) g L \sin \theta \quad (7)$$

式(2)ないし式(4)および式(6)、(7)を式(1)に代入すると、運動方程式は次式のように書かれる。

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{3}{4} \frac{q_b}{d_s} \frac{\rho_f}{\rho_s} (u_f - u_s)^2 + \frac{\tau_s L_s}{A_s q_b \rho_s} - \mu_s g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} \frac{(P_{s1} + P_{s2})}{P_{s1}} \cos \theta - \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} g \sin \theta \quad (8)$$

摺動層内の流体流速は摺動層内の粒子速度にほぼ等しいという従来の結果¹⁰⁾を用いると、式(8)は次式のようになる。

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{\tau_s L_s}{A_s q_b \rho_s} - \mu_s g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} \frac{(P_{s1} + P_{s2})}{P_{s1}} \cos \theta - \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} g \sin \theta \quad (9)$$

せん断応力 τ_s は、式(10)で定義される。

$$\tau_s = \frac{f_k}{8} \rho_f (u_f - u_s)^2 \quad (10)$$

ここに、 f_k は摺動層表面における摩擦係数である。都田ら¹¹⁾に

ならない、摩擦係数はマニングの式で与えられると仮定すると、摩擦係数は次式のように与えられる。

$$f_k = \frac{124.5 n^2}{D_e^{1/3}} \quad (11)$$

D_e は等価直径であり、次式で示される。

$$D_e = \frac{4 A_w}{P_{w1} + P_{w2} + L_s} \quad (12)$$

P_{w1} および P_{w2} は、泥水と掘削井壁および泥水と摺動層表面と濡れぶちの長さである。粗度係数 n は Jaeger の式(式(13))で与えられるとすると、摩擦係数 f_k は、式(14)のように表される。

$$n = 0.04743 d_s^{1/6} \quad (13)$$

$$f_k = 0.28 \left(\frac{d_s}{D_e} \right)^{1/3} \quad (14)$$

したがって、せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_s = 0.28 \frac{f_k}{8} \left(\frac{d_s}{D_e} \right)^{1/3} \rho_f (u_f - u_s)^2 \quad (15)$$

式(15)を用いることにより、線粉の運動方程式は次式のように表される。

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{0.28 L_s \rho_f}{8 A_s q_b \rho_s} \left(\frac{d_s}{D_e} \right)^{1/3} (u_f - u_s)^2 - \mu_s g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} \frac{(P_{s1} + P_{s2})}{P_{s1}} \cos \theta - \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} g \sin \theta \quad (16)$$

なお、 A_s 、 A_w 、角度 α および β 、 P_{s1} および P_{s2} 、 P_{w1} および P_{w2} 、摺動層高さ h は、それぞれ以下の諸式のように示される。

$$A_s = \frac{D^2}{4} \left\{ [\alpha - 2 \sin \alpha \cos \alpha] - \left(\frac{d}{D} \right)^2 [\beta - 2 \sin \beta \cos \beta] \right\} \quad (17)$$

$$A_w = \frac{D^2}{4} \left\{ \pi \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] - \left[(\alpha - 2 \sin \alpha \cos \alpha) - \left(\frac{d}{D} \right)^2 (\beta - 2 \sin \beta \cos \beta) \right] \right\} \quad (18)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 h_s}{D} \right) \quad (19)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 h}{D} \right) \quad (20)$$

$$P_{s1} = D \alpha \quad (21)$$

$$P_{s2} = D \beta \quad (22)$$

$$P_{w1} = D(\pi - \alpha) \quad (23)$$

$$P_{w2} = D(\pi - \beta) \quad (24)$$

$$h = h_s + e_s - \frac{D}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \right) \quad (25)$$

式(16)を解くことにより、線粉の速度および粒子層厚が求められ、これらの値を用いることにより、掘削井内の線粉の濃度が推定される。次章でシミュレーションの手順について述べる。

3. シミュレーションの手順

Fig. 3 はシミュレーションのフローチャートを示したものである。シミュレーションを開始するに当たり、単位時間あたりに掘削井に供給される線粉の質量 G_s および供給泥水流量をシミュレータに入力する。最初にある摺動層高さ h_s を仮定する。この値を用いて次式より線粉の速度を計算する。

$$u_s = \frac{G_s / \rho_s}{A_s \cdot q_b} \quad (26)$$

式(26)から計算される線粉の速度を u_{s1} と置く。次に仮定された摺動層高さ h_s を用いて、式(16)より線粉の速度を計算する。式(16)より得られる線粉速度を u_{s2} とすると、最初に仮定した

Fig. 3 Flowchart of the numerical simulation.

撓動層高さが適切な場合は、 u_{s1} と u_{s2} は一致するが、そうでない場合には、両者に差が生じる。両者の差が許容誤差よりも大きい場合には、撓動層高さを変えて同様の計算を、両者の差が許容誤差よりも小さくなるまで繰り返す。撓動層高さが求められると、管内の線粉濃度は次式で求められる。

$$q = \frac{A_s}{A_0} q_b, A_0 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \dots\dots\dots (27)$$

なお、本研究では、許容誤差は試行錯誤により 10^{-4} に決定した。

4. シミュレーション結果

4・1 従来の研究結果との比較

シミュレーションモデルの妥当性を検証するためには、たとえ限られた実験範囲内の結果であっても、シミュレーション結果と実験結果とを比較検討することが重要である。しかしながら、本モデルと直接比較検討できるような実験結果はほとんど見受けられない。そこで、本研究に比較的近い実験として、大串¹²⁾により行われた実験結果との比較検討を試みる。初めにこの実験の概

Fig. 4 Details of the test section used in the experiment by Ogushi.

要を記述する。

大串は、逸泥層における泥水の逸泥による線粉速度の変化を実験的に調べた。Fig. 4は実験に用いた供試管部分を示したものであり、掘削井壁に相当する外管は透明アクリル管で作製されており、その内径は42 mmである。掘管に相当する内管としては、銅管を用い、その外径は22 mmである。また500 mmの区間の外管に直径0.5 mmの穴を500個開け、逸泥層を模擬している。なお、逸泥層をウォータージャケットで覆い、その内部を清水で満たし、その圧力を制御することにより逸泥量を制御している。粒子としては直径1.26 mmのガラスビーズを用い、逸泥層を通過する際および通過後のガラスビーズの挙動を高速ビデオカメラで捉え、その速度変化を計測している。本研究では、この500 mmの逸泥層区間を一種のき裂と考え、この逸泥層区間からしみ出す泥水流量を逸泥量 Q_f とし、逸泥層区間を通過した後の粒子速度をシミュレーションにより求め、実験結果と比較した。その結果をFig. 5に示す。図中の実線はシミュレーション結果であり、また丸印は実験結果を示す。実験結果が少ないために断定的なことは言えないが、粒子速度に関するシミュレーション結果と実験結果はほぼ一致しており、本シミュレーションモデルはほぼ妥当なものと考えられる。ただし、上述したように、本シミュレーションモデルは撓動層を伴う流れを対象にしたものであり、実験結果も撓動層を伴う流れを呈すると考えられる範囲内のものを選んで比較検討してある。大串の実験では、さらに流速の速い、すなわち Q_f の大きい範囲内の実験結果も示されているが、その状態では撓動層を伴わない非均質流と推察され、シミュレーション結果との比較を試みたが、両者に多少差が見られることが確かめられた。ただし、Fig. 5に示されるように、撓動層を伴う流れを呈するような範囲内では、本シミュレーションモデルはほぼ妥当であると考えられるので、以下に本モデルを用いて計算を行っ

Fig. 5 Comparison between simulated results of cuttings velocity and experimental results obtained by Ogushi.

Fig. 6 Change of moving bed height due to lost circulation.

た結果を示す。

4・2 シミュレーション結果および考察

Fig. 6は、線粉がき裂を通過した後の掘削井下部における粒子層厚の変化を流れ方向の無次元距離に対して示したものである。掘削井の傾斜角をパラメータとして図示してあるが、本モデルでは摺動層を伴う流れに限定しているため、傾斜角を60度までとした。線粉の供給量は掘削速度と直接的な関係にあり、図(a)は比較的掘削速度が小さい場合、図(b)および(c)は掘削速度が大きい場合の結果を示している。Fig. 6より、水平の場合、粒子層厚の増加が緩やかであっても、傾斜角度が減少するにつれて粒子層厚の増加が著しくなることが分かる。この傾向は粒子供給量、すなわち掘削速度にかかわらず同じであり、したがって、傾斜掘りの場合、線粉による掘管の抑留を回避するために、逸泥による泥水流量の減少に、特に注意を払う必要があると考えられる。また図を見ると、き裂を通過した後、粒子層厚は徐々に増加し、一定値になることが分かる。以後、特に断わらない限り、粒子層厚、掘削井内線粉濃度、線粉速度などは、この定常状態における値を示すものとする。

Fig. 7は粒子層厚と逸泥流量との関係および掘削井内線粉濃度と逸泥流量との関係を、掘削井の傾斜角をパラメータとして示したものである。図は偏心率が0.7の場合の結果を示しているが、 $\theta = 90$ 度の場合、ほとんどの線粉が外管と内管の間を流動するため、逸泥による粒子層厚および管内濃度の変化が少ない。しかし、Fig. 6にも示されているように傾斜角が小さくなるにつれて、粒子層厚が増加し、粒子層高さが内管に達すると流れの有効断面積が急激に小さくなって、粒子層厚は急激に増加することが

Fig. 7 Effect of inclination angle of drilling well on the relationship between moving bed height, in-situ cuttings concentration and lost circulation rate.

 Fig. 8 Effect of diameter ratio, d/D on the relationship between in-situ cuttings concentration and lost circulation rate.

分かる。また掘削井内線粉濃度変化も粒子層厚の変化と同じ変化を示す。なお、偏心率は次式で定義される。

$$e = \frac{2e_s}{D-d} \quad (28)$$

Fig. 8は掘削井内線粉濃度と逸泥量との関係を、 d/D をパラメータとして図示したものである。逸泥量が小さい範囲内では、線粉濃度に及ぼす d/D の影響は小さい。しかし、逸泥量が大い範囲内では、 d/D の影響が大きく、 d/D が小さいほど掘削井内線粉濃度の増加が大きくなっている。

Fig. 9は掘削井内線粉濃度と逸泥量との関係を、偏心率をパラメータとして図示したものである。線粉濃度は偏心率にかかわらず、逸泥量の増加とともに増大している。また偏心率1の場合

Fig. 9 Effect of eccentricity on the relationship between in-situ cuttings concentration and lost circulation rate.

Fig. 10 Effect of cuttings rate on the relationship between in-situ cuttings concentration and lost circulation rate.

Fig. 11 Effect of cuttings rate on the relationship between cuttings velocity and lost circulation rate.

(内管が外管の底に接している状態)は、偏心率0の場合(同心)の場合に比べて、濃度変化に及ぼす逸泥量の影響が大きくなっていることが分かる。なお、偏心率が0.2および0.4の場合には、逸泥流量が小さい範囲内では偏心率0の場合の結果と同じであるが、ある流量を境に坑井内線粉濃度が急増する傾向が見られるが、これは逸泥流量の増加とともに増大する掘削井下部の粒子層厚が掘削管の位置まで達したためである。偏心率が大きい場合には、逸泥流量が0の時点で、既に粒子層と掘削管が接触しているため、このような変曲点は現れない。

Fig. 10は、掘削井内線粉濃度と逸泥量との関係を、線粉供給

量をパラメータとして図示したものである。掘削井内線粉濃度は線粉供給量にかかわらず、逸泥量の増加とともに増大しており、特に逸泥量が多い場合には、線粉供給量が小さくても掘削井内線粉濃度はかなり大きくなっていることが分かる。このことは、たとえ線粉供給量が小さくても逸泥量が多い場合には、掘削井内線粉濃度の増加による掘削管の抑留の危険性が非常に高いことを示すものである。

Fig. 11は、線粉速度と逸泥量との関係を、線粉供給量をパラメータとして図示したものである。線粉速度は、逸泥量の増加とともに減少しているが、本シミュレーションの範囲内では、線粉速度と逸泥量との関係に及ぼす線粉供給量の影響は、あまり顕著ではないことが分かる。なお、 $G_s = 300$ g/secの結果に見られる変曲点は、Fig. 9のところで述べた理由と同じ理由によるものである。

4・3 本モデルの適用範囲

本モデルは、上述したように撓動層を伴う流れの範囲内において適用される。したがって、坑井の内径、掘削管の外径、坑井傾斜角度、泥水流量、逸泥量および線粉供給量などの条件を与えたとき、線粉の流動状態を推定できれば、撓動層を伴う流れに限り、本モデルを適用させることが可能になる。しかし、このような流動状態判定モデルは開発されておらず、これについては今後の課題であると考えられる。ただし、Leisingら⁴⁾の論文には、CTDにより水平ドリリングを行った種々の結果が示されており、それによれば坑井径95～100 mm、掘削管外径60～77 mmの管で構成される2重管部分での泥水流速は約0.9 m/sから3.0 m/sとなっている。本シミュレーションによる泥水流速は、掘削井下部の粒子層上の2重管部分における流速であり、Leisingらの結果と直接の比較はできないかもしれないが、おおよそ1.0 m/sから2.4 m/sの範囲内の値となっており、この泥水流速(あるいは流量)は、モデル適用の可否を判断する1つの目安程度にはなるかと思われる。また撓動層を伴う流れの範囲外になると考えられるような条件を与えると、収束解が得られず、プログラムがストップした。したがって、本プログラムで収束解が得られないような条件では、流れが「撓動層を伴う流れ」とは異なる流動様式を示している可能性が高いと考えられる。さらに、傾斜角については、傾斜角以外のすべての条件を同じにしても、傾斜角が減少するにつれて、流れは撓動層を伴う流れから浮遊流れへと移行する。どの傾斜角まで本モデルが適用できるか断定的なことは言いえないが、水平から30度までの傾斜管において堆積限界速度を測定した研究¹³⁾が過去に見られることから、本シミュレーションでは傾斜角を60度までに限定した。

いずれにせよ、本モデルは「撓動層を伴う流れ」の範囲内であれば適用可能であり、本モデルの適用限界を明確にすることは、「撓動層を伴う流れ」の範囲を明確にすることに他ならない。線粉の流動状態は、本シミュレーションで用いたほぼすべてのパラメータが関与すると考えられるため、非常に複雑であることが予想される。流動状態の判定モデルについては今後の研究に待ちたい。

5. む す び

本研究では、泥水による線粉の排出過程における挙動を2重管内固液2相流とみなし、逸泥による線粉濃度変化を推定するシミュレーションモデルを開発するとともに、本研究と比較的に近い実験と考えられる従来の実験結果との比較検討を行い、モデルの妥当性を確認した。さらに、本モデルを用いて種々の条件下で数値シミュレーションを行った。その結果、線粉濃度および掘削井下部の粒子層厚の変化に及ぼす逸泥の影響は、傾斜角度が減少するに

つれて大きくなり、したがって、傾斜掘りの場合は特に逸泥量に注意を払う必要があることを指摘した。ただし、水平掘りあるいは水平に近い傾斜掘りの場合、ほとんどの掘削において線粉は掘削井下部を摺動状態で流動する、いわゆる摺動層を伴う流れを呈すると考えられることから、本モデルは流れの流動様式を、摺動層を伴う流れの範囲内に限定した。場合によっては、他の流動様式についても検討する必要があると思われるが、これについては今後の課題とする。なお、本研究は著者の一人（高橋 弘）が、1992年から1993年にかけて文部省在外研究員として滞在したアメリカ合衆国ミズリー州立大学ローラ校において行った研究を基にしている。ローラ校の関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 1) 例えば Anadrill 社パンフレット "VIPER Coiled Tubing Drilling System", (1997)
- 2) Takahashi, H. and Masuyama, T. : Proc. of the 5th Int. Symposium on Liquid-Solid Flows, FED-Vol. 189, p. 155-160, (1994)
- 3) Campos, W. et al., : Proc. of the 5th Int. Symposium on Liquid-Solid Flows, FED-Vol. 189, p. 247-255, (1994)
- 4) Leising, L. J. and Walton, I. C. : Proc. of 1998 IADC/SPE Drilling Conference, p. 85-100, (1998)
- 5) 野田佳六：混相流シンポジウム講演論文集, p. 129-137, (1982)
- 6) スラリー輸送研究会編：スラリー・カプセル輸送技術要覧, p. 77-81, (1984)
- 7) Turian, R. M. and Yuan, T. : AIChE Journal, Vol. 23, No. 3, p. 232-243, (1977)
- 8) 川島俊夫・益山 忠・倉野重光：日本鉱業会誌, Vol. 91, No. 1053, p. 713-719, (1975)
- 9) Campos, C. D. P. and Wall, D. G. : J. of Pipelines, Vol. 4, No. 3, p. 177-183, (1984)
- 10) 高橋 弘・野田佳六・川島俊夫：日本鉱業会誌, Vol. 101, No. 1173, p. 713-717, (1985)
- 11) Toda, M., Konno, H. and Saito, S. : J. Chem. Eng. of Japan, Vol. 13, No. 6, p. 439-444, (1980)
- 12) 大串正樹：東北大学修士学位論文, (1991)
- 13) Hashimoto, H. et al. : Proc. of the 7th Hydrotransport, p. 231-244, (1980)

記号

A_s : 摺動層領域の断面積	[m ²]
A_w : 泥水流路断面積	[m ²]
C_D : 線粉の抗力係数	[-]
D : 掘削井内径	[m]

D_e : 等価直径	[m]
d : 掘管外径	[m]
d_s : 線粉の直径	[m]
e : 偏心率	[-]
e_s : 偏心距離	[m]
F_f : 摩擦力	[N]
F_g : 流れ方向の線粉の重力成分	[N]
F_s : 摺動層表面におけるせん断応力による力	[N]
F_T : 泥水による推力	[N]
f_k : 摺動層表面における摩擦係数	[-]
G_s : 単位時間当たりに掘削井に供給される線粉の質量	[kg/s]
g : 重力加速度	[m/s ²]
h : 掘管が摺動層内に入り込む深さ	[m]
h_s : 摺動層厚	[m]
L : 区間長	[m]
L_s : 摺動層の幅	[m]
M : 区間 L における線粉の質量	[kg]
n : 粗度係数	[m ^{1/6}]
P_{s1} : 摺動層が掘削井壁と接する長さ	[m]
P_{s2} : 摺動層が掘管と接する長さ	[m]
P_{w1} : 泥水と掘削井壁との濡れ縁の長さ	[m]
P_{w2} : 泥水と摺動層表面との濡れ縁の長さ	[m]
Q_0 : 供給泥水量	[l/min]
Q_f : 帰還泥水量	[l/min]
Q_l : 逸泥流量	[l/min]
q : 掘削井内における線粉の濃度	[-]
q_b : 摺動層内の線粉濃度	[-]
u_{fb} : 摺動層内の泥水の流速	[m/s]
u_s : 摺動層の速度 (線粉の速度)	[m/s]
α : Fig. 2 で定義される角度	[rad.]
β : Fig. 2 で定義される角度	[rad.]
θ : 掘削井の傾斜角度	[rad.]
μ_s : 摺動層と掘削井壁との間の摩擦係数	[-]
ρ_f : 泥水の密度	[kg/m ³]
ρ_s : 線粉の密度	[kg/m ³]