

DEMAC 法による沈降粒子群の分散・堆積挙動の パラメトリック解析

小田 一紀*・重松 孝昌**・大西 伸幸***

1. はじめに

海洋工事の行われる水深が大規模化する今日、マウンドの造成や埋立工事を行う際には経済性や施工効率の面から底開式バージ船を用いて捨石や土砂を投入することが多い。施工管理の立場から、これらの投入粒子群が水底でどのように堆積するかを正確に予測することは重要な課題である。

沈降過程における粒子の挙動に関する研究は数多くあるが、水底における堆積形状に関する研究はあまり多くはない。小田ら (1987) は拡散方程式を用いて捨石粒子群の沈降・堆積挙動を解析し、水底における粒子群の堆積形状の予測を行っている。また、松見ら (1990) は、沈降過程の捨石の散乱特性に正規分布を仮定して堆積形状を予測している。しかし、これらの手法では武藤ら (1974) が実験的に得たような水深と堆積形状との定性的な関係 (図-1 参照) を得ることはできない。これは、これらの手法では粒子群の沈降にともなって発生する周囲流体運動と粒子の運動の相互作用の影響を考慮することができないためであると考えられる。このように、現時点では沈降粒子群の水底における堆積形状を精度よく予

測することは困難であるのが実情である。筆者らは既に、個別要素法と MAC 法を併用して粒子と流体の相互作用の影響を考慮することができる数値シミュレーション手法として DEMAC 法を開発し、沈降過程における粒子群の沈降速度や分散幅について既往の実験結果 (室田ら, 1988) と計算結果を比較し、その手法の妥当性を検証している (小田ら, 1992)。本研究は、この DEMAC 法を用いて鉛直 2 次元計算を行い、粒子群の沈降・分散挙動や堆積形状に及ぼす投入条件について検討したものである。なお、計算手法の詳細および計算に用いた諸係数は、小田ら (1990, 1992) を参照されたい。

2. 計算条件

静水面に底扉が固定された幅 b_0 の投入容器の中に、比重 2.65、粒径 $d=3\text{ mm}$ の粒子を正味の体積 $V_0\text{ cm}^3/\text{cm}$ だけ配置した後、容器の底扉を開扉速度 ω で開いて水深 h の流体中に粒子群が沈降し、水底に堆積するまでの挙動を DEMAC 法を用いて計算した (図-2 参照)。

このとき、水深 h を 10, 30, 50 cm、投入量 $V_0=5, 10, 20, 40\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、投入幅 $b_0=2.5, 5, 10\text{ cm}$ と変えて計算を行い、これらが粒子群の沈降・分散挙動および堆積形状に及ぼす影響について検討した。さらに、底扉の開扉速度 ω を 30, 60, 90 deg/s および底扉を瞬時に取り除いた瞬間投入の場合について計算を行い、開扉速度による影響についても検討を行った。

なお、水底が水平な平板であれば着底した粒子は水平方向に転がり続け、完全に静止状態に達するにはかなり

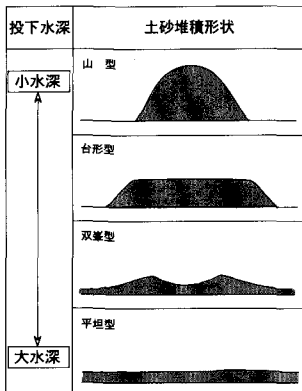


図-1 水深と堆積形状の定性的な傾向

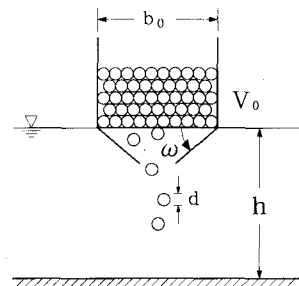
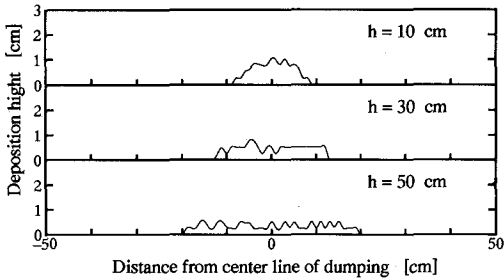
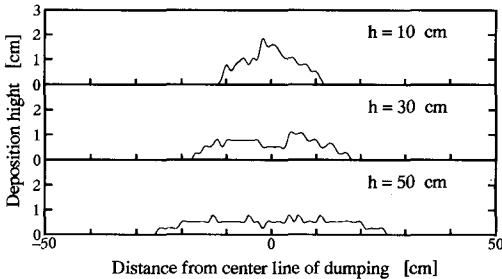
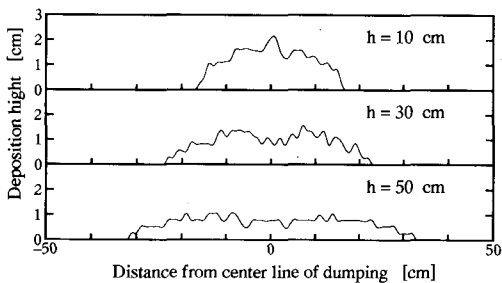


図-2 計算条件

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科
 *** 工修 (株)大阪ガス

(a) $V_0 = 10 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合(b) $V_0 = 20 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合(c) $V_0 = 40 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合図-3 計算結果 ($b_0 = 5 \text{ cm}$)

の時間を要するので、ここでは水底面に沈降粒子と同じ物理特性を有する粒径 3 mm の半球を固定し、この半球は沈降してきた粒子と衝突しても移動しないという仮定の下に、計算を行った。

3. 計算結果

3.1 水深および投入量の影響

図-3 は、投入幅 $b_0 = 5 \text{ cm}$ と一定にしたときの粒子群の堆積形状の計算結果を示したものである。同図(a)は $V_0 = 10 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合の、また同図(b)は $V_0 = 20 \text{ cm}^3$ 、(c)は $V_0 = 40 \text{ cm}^3$ の場合の計算結果である。図-3によれば、 $h = 10 \text{ cm}$ のときには堆積形状は山型を、 $h = 30 \text{ cm}$ のときには双峯型を、 $h = 50 \text{ cm}$ のときには平坦な台形型をしており、図-1に示されるような実験結果と一致していることがわかる。また、水深が等しければ、単位幅あたりの粒子の投入量 V_0/b_0 の増加とともに堆積幅や堆

積高さは増加するが、堆積形状はほとんど変化しないことがわかる。

武藤ら(1974)は、水深とともに堆積形状が変化する原因を次のように考察している。すなわち、水深が増加する程、底面に衝突する際の粒子速度が大きく、この着底時の土砂速度が大きいほど粒子群は水底面で水平方向に拡がりやすくなり、さらに周囲の流体運動とが絡み合って堆積形状が変化するとしている。

図-4 は、沈降粒子のアンサンブル平均沈降速度の鉛直方向変化を示したものである。同図より、 $h = 30 \text{ cm}$ および $h = 50 \text{ cm}$ の場合には、粒子群の沈降速度は投入直後に極大値を示し、その後速度を減じてほぼ一定の値をとり(以後、これを群終端速度と呼ぶ)、水底付近で急激に沈降速度を減じることがわかる。 $h = 10 \text{ cm}$ の場合には投入直後に極大値が現れた後にすぐ水底の影響が現れるためこのような傾向がみられないものと考えられる。また、群終端速度は投入量 V_0 の増加とともに大きくなっているが、 $V_0/b_0 = 10$ および 20 cm^3 の場合にはほぼ同じ値を示している。

図-5 は、沈降粒子の水平方向速度の絶対値のアンサンブル平均の鉛直方向変化を示したものである。同図によれば、 $h = 30, 50 \text{ cm}$ の場合には、極値が2つ存在することがわかる。1つは投入直後にみられるが、これは水中に投入された粒子群が沈降することによって誘起された循環流によって粒子が水平方向の速度成分を持つようになるためである。もう1つの極値は水底付近で現れる。これは、沈降粒子が水底の影響を受けて水平方向に運動の方向を変えるために生じるものである。 $h = 10 \text{ cm}$ の場合に極値が1つしか現れないのは、水深が小さいために2つの極値が同時に現れているためであると考えられる。同図および図-4より、水底付近における粒子群の水平方向の分散速度は、水深よりも群終端速度に依存していると考えられる。

図-6 は沈降過程における粒子群の分散幅の計算結果を表したものである。図-6によれば、粒子群の分散幅は粒子の投入量や水深に関わらず沈降とともにほぼ線形的に増加し、水底近傍で急激に増加していることがわかる。すなわち、粒子群は着底後に水平方向に拡がるのではなく沈降している間に既に水平方向に分散しており、沈降中の分散幅は最終的な分散幅に比して無視し得る程度のものではないことがわかる。したがって、小川ら(1968)が用いているような着底後の砂粒子塊の運動のみに着目して土砂粒子群の堆積形状を求めようとするような手法では、堆積幅や堆積高さなどの形状を正確に予測することはできないと考えられる。

図-7 は、沈降粒子群の粒子の度数分布を示したものである。同図(a)より、 $h = 10 \text{ cm}$ の場合には投入容器の

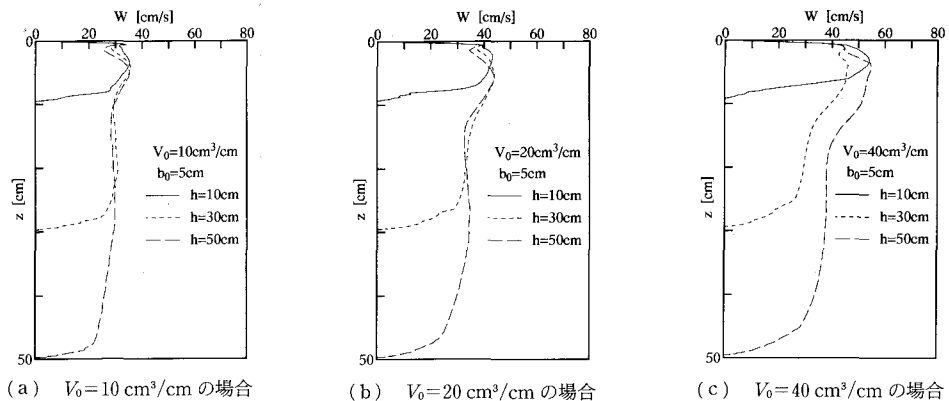


図-4 粒子群の平均沈降速度の鉛直方向変化

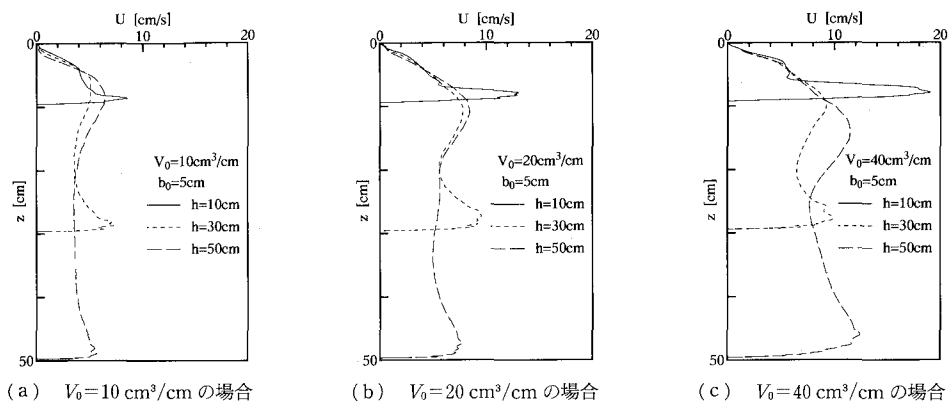


図-5 粒子群の平均水平速度の鉛直方向変化

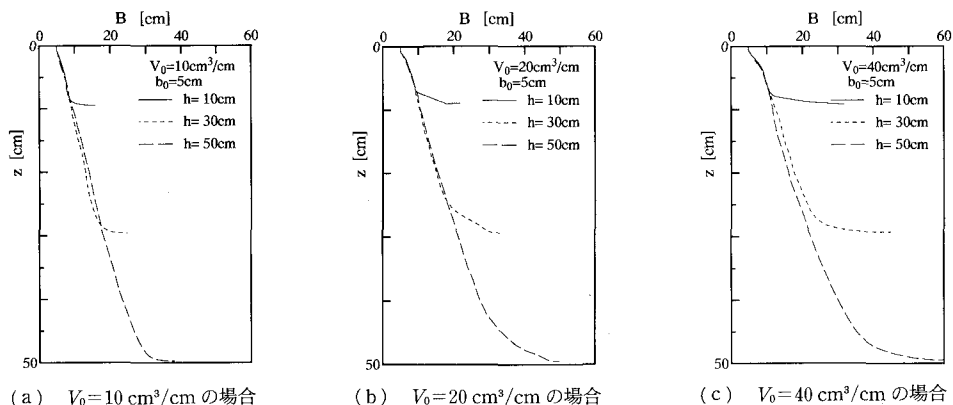
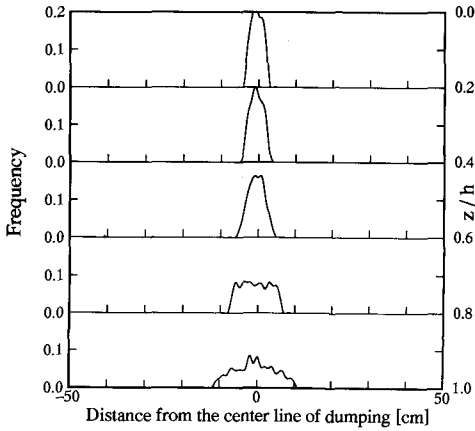


図-6 粒子群の分散幅の鉛直方向変化

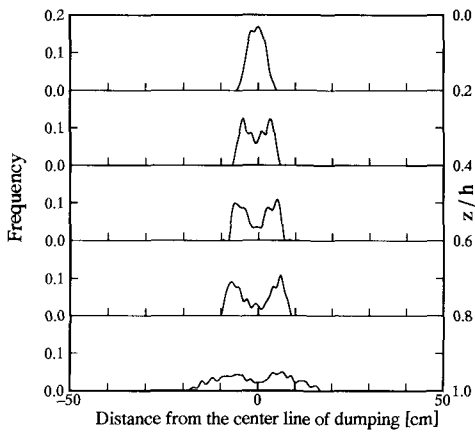
中心軸上をピークとして粒子がかたまって沈降していることがわかる。ところが、 $h=30 \text{ cm}$ の場合には $z/h=0.4$ 付近でピークが2つ見られるようになり、沈降するにつれてこれらのピーク間の距離は大きくなり、水底では双峰型の堆積形状を示すことがわかる。さらに、水深 h が 50 cm となると、 $z/h=0.2$ 付近で2つのピークが現

れ、 $z/h=0.4$ よりも深くなるとピーク間の距離が大きくなるとともにピーク値も小さくなり、次第に平坦な度数分布を示すようになることがわかる。したがって、水底における堆積形状は沈降過程における粒子群の分散挙動に起因しているものと考えられる。

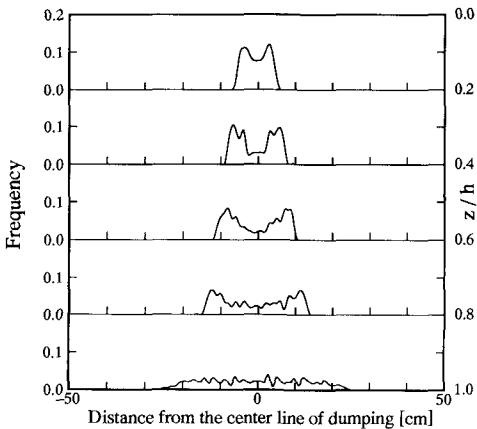
図-8 は、単位幅当たりの投入量を $V_0/b_0=2$ と一定に



(a) $h=10$ cm の場合

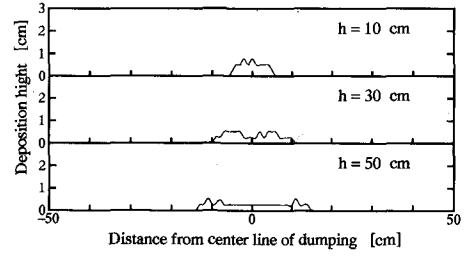


(b) $h=30$ cm の場合

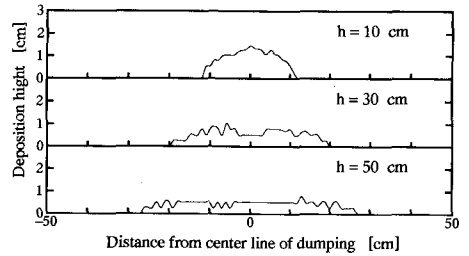


(c) $h=50$ cm の場合

図-7 粒子の度数分布の鉛直方向変化

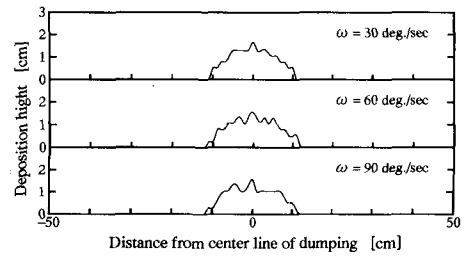


(a) $V_0=5$ cm³/cm の場合

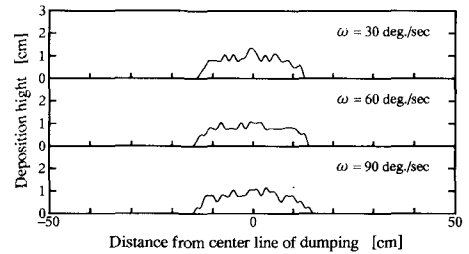


(b) $V_0=20$ cm³/cm の場合

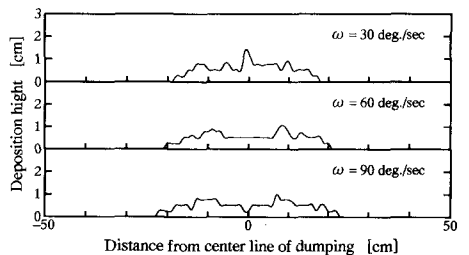
図-8 堆積形状の計算結果



(a) $h=10$ cm の場合



(b) $h=30$ cm の場合



(c) $h=50$ cm の場合

図-9 開扉速度による堆積形状の変化

して投入量を $V_0=5$ cm³/cm および 20 cm³/cm と変えたときの堆積形状の計算結果を示したものである。図-8と図-3(b)より、水深が同じであれば投入量が増加す

ると堆積幅や堆積高さは大きくなるが、堆積形状はほとんど変化しないことがわかる。

3.2 開扉速度の影響

次に、投入容器の開扉速度が堆積形状に及ぼす影響について検討した。図-9は $V_0=20\text{ cm}^3/\text{cm}$ 、 $b_0=5\text{ cm}$ の条件の下で投入容器の開扉速度を $\omega=30, 60, 90\text{ deg/s}$ と変えて計算を行ったときの堆積形状を表したものである。同図より、水深が $h=10$ および 30 cm のときには開扉速度が堆積形状に及ぼす影響はほとんど見られないが、水深が $h=50\text{ cm}$ と大きくなると開扉速度が速いほど堆積幅が広く、平坦な形状になることがわかる。一般に、ある開扉速度で投入容器の底扉が開くとき、初期に容器から水中に投入される粒子は個々の粒子の特性を持って沈降するが、後から水中に投入された粒子は先に沈降した粒子によって誘起された流体運動の影響を受けてより速く沈降するため、やがてこれらの粒子が群を形成して沈降するようになる。水深が大きいときには、沈降中に形成される群の大きさは投入容器から粒子が排出される時間、すなわち開扉速度に依存するものと考えられる。しかし、水深が浅いときには粒子が群を形成する以前に着底するため、開扉速度の影響はほとんど現れないと考えることができる。

4. ま と め

本数値シミュレーション手法を用いてパラメトリック解析を行った結果を要約すると以下のようである。

1) 本手法を用いて水中に投入された粒子群の堆積形状を求めた結果、既往の実験的研究が指摘するような水深と堆積形状との定性的な関係とほぼ同じ関係が得られた。このことは、本手法の信頼性と有用性を示しているものと考えられる。

2) 水中に投下された粒子群は水平方向にも分散しながら沈降しており、沈降中の分散挙動が水底における堆積形状に大きな影響を及ぼしている。また、粒子群の群終端速度および水底における粒子群の水平方向の分散速度は単位幅あたりの投入量が多くなるほど大きくなる。

3) 水深が浅いときには投入容器の開扉速度の影響はほとんど見られないが、水深が大きくなると開扉速度の影響が現れるようになる。

ここで得られた結果は、あくまでも今回用いた計算条件のもとでの結果であり、さらに条件を変えて計算を行って堆積形状に及ぼす要因について検討する必要がある。

最後に、本研究は文部省科学技術研究費補助金奨励研究(A)課題番号 04750503 (代表: 重松孝昌) の援助を受けて行われたものであることを記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 小川 元・竹内益雄 (1969): 土捨て船による投棄土砂の分散, 土木学会論文報告集, 第161号, pp. 39-49.
- 小田一紀・沢田充弘・樋口俊光・岩田 潔 (1987): 底開式バージから投入された捨石粒子群の堆積形状に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 281-285.
- 小田一紀・重松孝昌・氏本浩介 (1990): DEM法とMAC法の併用による粒子群の沈降分散挙動のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 759-763.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫 (1992): 改良型DEMAC法による粒子群の沈降・分散挙動の解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 971-975.
- 松見吉晴・岸口孝文 (1990): 捨石マウンド築造時のバージ船の配置位置について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 769-773.
- 武藤碩夫・吉井総介・石田 勉 (1974): 大規模埋立用底開バージによる土砂投下の研究, 三菱重工技報, Vol. 11, No. 1, pp. 92-104.
- 室田 明・中辻啓二・玉井昌宏 (1988): 海域での土砂投下による密度流現象, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp. 777-781.