

水中沈降粒子群の三次元分散挙動に関するパラメトリック解析

重松孝昌*・錦織陽一**・廣瀬真由***・小田一紀****

1. 緒 言

工事海域の大水深化や施工（土砂投入）方法の多様化にともない、施工効率を向上させるために、投入土砂の堆積形状をより高精度に予測できることが求められるようになってきた。バージ船から投入される土砂の堆積形状を予測するための研究は、これまでもいくつかなされてきている。小川ら(1969)は、鉛直2次元実験によって、静水中を沈降する土砂の水底における堆積幅は土砂粒子群の着底速度に支配されると結論づけている。武藤ら(1974)はより詳細な検討を行い、土砂の水中沈降挙動や、バージ船底扉の開扉運動、海底における土砂流動、船倉内における土砂の流動、船倉からの流出挙動などによって堆積形状が変化すると指摘した。一方、水中における粒子群の挙動が重要な因子であるとの認識から、沈降する粒子群の運動を予測するための数値モデルが開発され、粒子群の運動や周囲流体の運動に関する詳細な情報が示されるようになってきた(例えば、玉井ら(1993)；澁岡・二瓶ら(1996)；小田ら(1992)など)。しかし、これらの実験および数値解析的研究は鉛直2次元現象としてとらえた研究がほとんどであり、現象を三次元的に捉えた研究はほとんどないのが実状である。松見ら(1998)は統計的手法を用いて三次元堆積形状の予測を試みているが、沈降粒子群の分散挙動を予測することができる力学モデルはほとんどないのが実状である。

このような状況に鑑みて、著者らは三次元固液混相流モデルを開発している(重松ら, 2000)。沈降粒子群の分散挙動や堆積形状を三次元問題として検討すべき最大の理由は、投入容器（バージ船）の有限性である。しかし、このような投入容器の形状を考慮して粒子群の沈降・分散挙動を三次元現象として解析した例はない。また、最近では、バージ船の船倉が複数個に分割されていることを利用して、船倉毎に土砂を投入することもあるようである(例えば、荒井ら, 2000)。このような場合には、複数の粒子群が干渉しながら沈降することが考えられる

が、これまでにこのような問題が検討されたことはほとんどない。そこで、本研究では、個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルを用いて、投入容器の形状や投入容器を近接して設置した場合の粒子群の沈降・分散挙動について検討した。さらに、投入容器の底扉の開扉速度の影響についても検討した。

2. 計算手法および計算条件

計算には、既に著者らが開発した三次元個別要素法を用いた固液混相流モデルを用いた。計算手法の詳細は、重松ら(2000)を参照されたい。尚、本研究では、水面変動は考慮していない。

計算に用いた粒子の粒径は $d=5\text{ mm}$ 、粒子の密度は $\rho_p=2.67\text{ g/cm}^3$ 、ヤング率 $E=4.0\times 10^8\text{ g/cm}\cdot\text{s}^2$ 、ポアッソン比 $\nu=0.3$ 、反発係数 $e=0.3$ 、摩擦係数 $\mu=0.577$ である。また、個別要素法のタイムステップは $1.0\times 10^{-5}\text{ s}$ 、流体計算のタイムステップは $1.0\times 10^{-3}\text{ s}$ とした。メッシュサイズは、 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=1.0\text{ cm}$ と等長メッシュを用いた。

3. パラメトリック解析

3.1 水深の影響

ここでは、 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ の投入容器から720個の粒子を投入し、水深を10, 20, 30 cmと変化させて計算を行った。図-1には分散幅の鉛直方向変化を示した。横軸は投入容器幅 C_x を引いた後、粒径 d で無次元化して表している。沈降過程における粒子群の分散幅は、いずれの水深においても水底近傍まではほぼ同様の増加傾向を示し

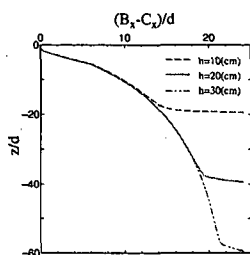


図-1 粒子群の分散幅

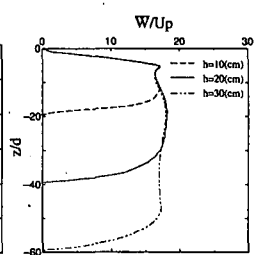


図-2 粒子群の平均沈降速度

* 正会員 工博 大阪市立大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻
** (株)大林組
*** 正会員 工修 水資源開発公団
**** 正会員 工博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

ていることがわかる。小田ら (1993) による鉛直二次元数値解析の結果によれば水中を沈降する粒子群の分散幅はほぼ線形的に増加する。しかし、本計算手法による三次元計算によれば、沈降とともに分散幅の増加率が減少するような傾向を示すことがわかる。

図-2 には、粒子群の平均沈降速度の鉛直方向変化を示したものである。横軸は粒子の代表速度 $U_p = \sqrt{(\rho_p/\rho_f - 1)gd}$ (ρ_f : 流体の密度) で無次元化して示している。同図によれば、粒子群の平均沈降速度は $z/d=5$ 付近で比較的鋭いピークを示して減少した後再び増加し、 $d/z=20$ 付近で緩やかなピークを示すが、粒子群はほぼ一定の速度で沈降することがわかる。

3.2 投入断面の影響

ここでは、10 cm×5 cm の投入断面から 2000 個の粒子群を水深 $h=40$ cm の水域に投入した場合の計算を行った。図-3 は、粒子群の沈降・分散挙動に関する計算結果を示したもので、投入容器の長軸を含む断面 (xz 断面) および平面的 (xy 断面) に見たものを示している。同図によれば、投入容器から流出した粒子群は投入直後から側方へ分散し始めること、投入容器の長軸 (x 軸) 方向にも分散しているが単軸 (y 軸) 方向への分散速度が大きく、流出直後には楕円形を示し、着底時にはほぼ円形を示すように粒子群は分散することがわかる。単位面積当たりの投入量を同じにして正方形断面を有する投入容器から粒子群を投入した (すなわち、5 cm×5 cm の投入断面から 1000 個の粒子群を投入) 場合についても計算を行ったところ、粒子群は投入直後から円形を示すようになった。それぞれの場合について、沈降に伴う短軸方向の分散幅 (B_y) に対する長軸方向の分散幅 (B_x) の比を示したものが図-4 である。ただし、横軸は投入開始からの時間を示している。正方形断面から粒子群を投入した場合には、投入時には勿論 $B_x/B_y=1$ であるが、その後もその比は 1 付近で変動している。一方、長方形断面から粒子群を投入した場合には、投入時には $B_x/B_y=2$ であるが、時間が経過して粒子群が沈降するにしたがって B_x/B_y は急激に減少して 1 に近づくことがわかる。粒子群が着底する時間が $t=0.7\sim 0.8$ 秒であることから、粒子群は沈降過程で楕円形から円形へと急激に分散形状が変化し、着底後には分散形状はほとんど変化しないことがわかる。

3.3 2つの投入容器からの粒子群投入

次に、5 cm×5 cm の投入容器を 2 つ近接して設置し、それぞれの投入容器から 1000 個の粒子を投入した場合について計算を行った。このとき、容器間の距離は 4.0 cm とした。図-5 は、この場合の粒子群の沈降分散挙動を示したものである。鉛直断面として粒子群の沈降挙動 (図の左側) を見ると、 $t=0.15$ 秒後の投入容器から流出

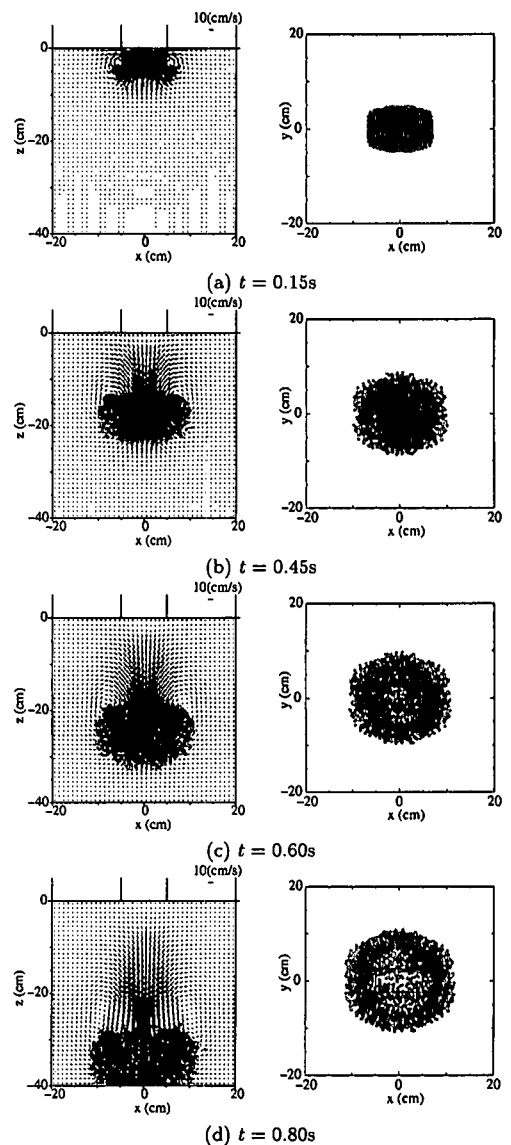


図-3 長方形断面から投入された粒子群の沈降・分散挙動

した直後にはそれぞれの粒子群の周囲に循環流が形成されており、2つの粒子群として沈降していることがわかる。しかし、 $t=0.45$ 秒後に粒子群が $z=-20$ cm に沈降してきたときには、2つの粒子群は単一の群として沈降するようになっており、これ以後は水平方向にも鉛直方向にも分散しながら沈降していることがわかる。一方、水平面で粒子群の沈降挙動 (図の右側) を見ると、それぞれの粒子群が次第に分散しながら沈降し、着底時には2つの円が重なったような楕円形に近い形状を示すことがわかる。

このような粒子群の沈降に誘起される流体運動に着目すると、 $t=0.15$ 秒後にはそれぞれの粒子群の両側に一

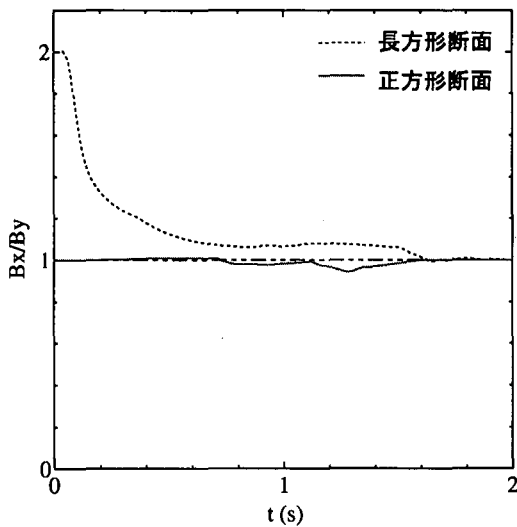


図-4 水平分散幅比の経時変化

対の循環流が形成されており、粒子群に挟まれた領域では流体運動が干渉して鉛直上向きに比較的大きな流速が見られる。 $t=0.45$ 秒後には一つの群として沈降しているように見える粒子群の周囲には一対の循環流しか見られなくなっている。ただし、比較的大きな鉛直下向き流速は2カ所で見られ、両者の間には下向き流速の小さな領域が見られる。さらに粒子群が沈降した $t=0.60$ 秒後では、鉛直下向き流速が大きくなるとともに両者間の下向き流速の小さな領域が狭くなり、着底時にはこれらが合体してしているように見て取れる。

このように、近接して2つの粒子群を投入するときには、それぞれの粒子群に誘起される循環流は互いに干渉するような複雑な流体運動を示すが、粒子群の分散形状は単純に足しあわせたような分散挙動を示すことがわかった。ただし、本手法では取り扱った粒子数がそれほど多くはないため、さらに粒子数が多い場合についての検討が必要であると思われる。

図-6は、1つの正方形断面容器から粒子群を投入した場合(case-1)、長方形断面容器から粒子群を投入した場合(case-2)、2つの正方形断面容器から粒子群を投入した場合(case-3)について、沈降に伴って誘起される流体運動の鉛直成分を示したものである。各図は、粒子群の重心位置における速度分布を示している。尚、投入容器から流出する単位面積あたりの粒子量を一定として計算を行っているので、case-1は粒子数1000個で、case-2およびcase-3は2000個で計算を行っている。これらの図より、粒子群の重心が $z=-25$ cmに到達したとき、case-1の場合には重心位置における流体の鉛直速度成分はほとんど見られなくなるが、case-2およびcase-3の場合のそれらは大きな値を有していることがわかる。

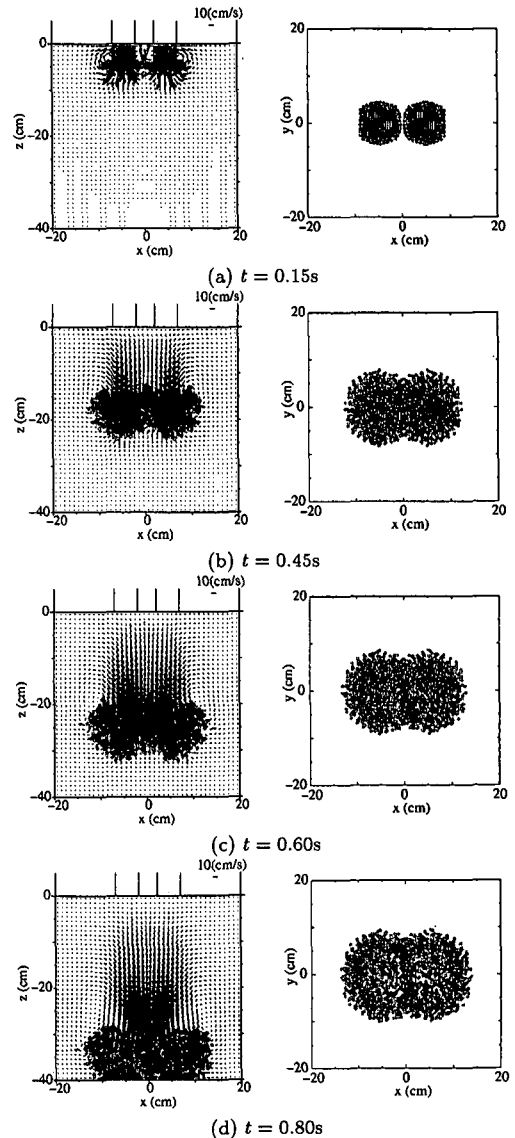
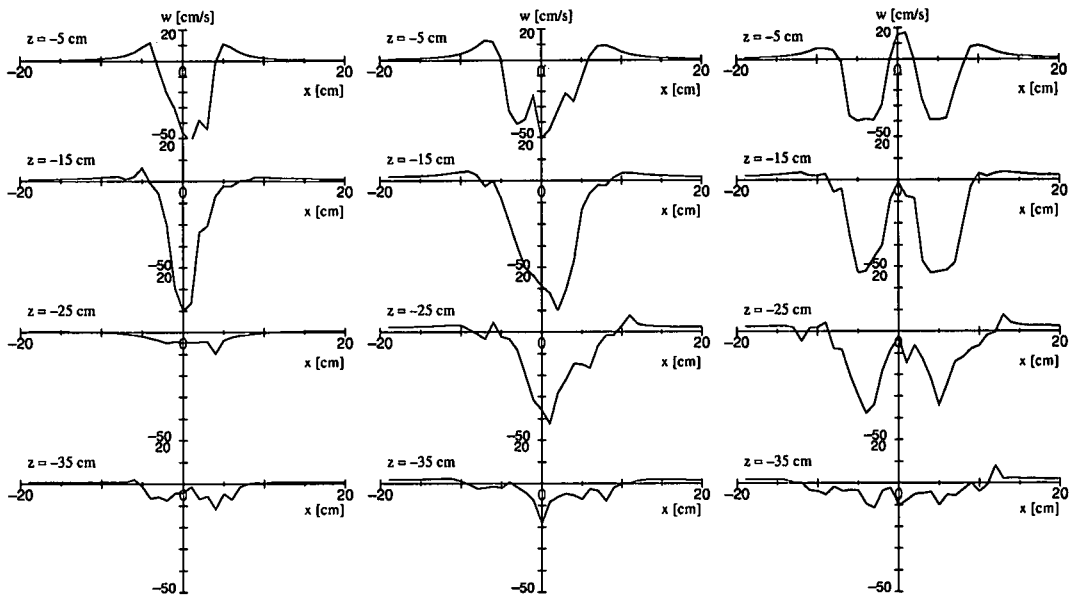


図-5 2つの投入容器から投入された粒子群の沈降・分散挙動

これは、投入した粒子の総量によるものと考えられる。

また、一つの粒子群として投入する case-1 および case-2 の場合には、鉛直下向き流速のピークが一つしか見ることができないが、2つの粒子群として投入する case-3 の場合には2つのピークが見られることがわかる。case-3 の場合には、粒子群の重心が $z=-5$ cmに到達したときには2つの鉛直下向き流速のピークの間に上向きの流速が見られているが、さらに沈降するとこの上向き流速が見られなくなっている。前述のように、2つの粒子群の沈降に伴って誘起される循環流の干渉の様子がここにも見て取ることができる。



(a) 1つの正方形断面容器から投入した場合 (b) 長方形断面容器から投入した場合 (c) 2つの正方形断面容器から投入した場合

図—6 粒子群中心位置における鉛直流速の水平分布

3.4 開扉速度による影響

数値計算では、投入容器の底扉を瞬時に取り去ることは容易ではあるが、実験などで実際に投入容器の底扉を瞬時に取り去ることは非常に困難である。また、武藤らが指摘しているように、バージ船の底扉の開扉速度が水底における土砂の堆積形状に影響を及ぼすことも考えられる。

ここでは、6 cm×3 cmの断面を有する投入容器の底扉を60 deg./sおよび90 deg./sで開扉し、360個の粒子を投入させる場合について計算を行い、投入容器の開扉速度が粒子群の沈降・分散挙動に及ぼす影響について検討した。図—7に計算結果を示す。投入容器から流出した粒子群は、瞬間的に投入された場合とは異なり、水平方向にほとんど分散することなく、わずかに揺らぎながら沈降し、着底後に水平方向に大きく分散することがわかる。図—8は、沈降過程における粒子群の分散幅の変化を示したものである。横軸は、粒子群の分散幅から投入容器の幅を引いた後に粒径で無次元化して表している。投入容器の長軸方向(x 方向)の分散幅が負の値を示すのは、分散幅が投入容器の幅よりも小さいことを意味しており、このことは、図—7の結果から理解できよう。投入容器の短軸方向(y 方向)の分散幅はわずかに増加しながら沈降していることを示しているが、図—7からわかるように、 y 軸方向の分散はほとんど見られない。

この計算は、投入容器の底扉を徐々に開扉するために計算により多くの時間を要するので、少ない粒子数で計算を

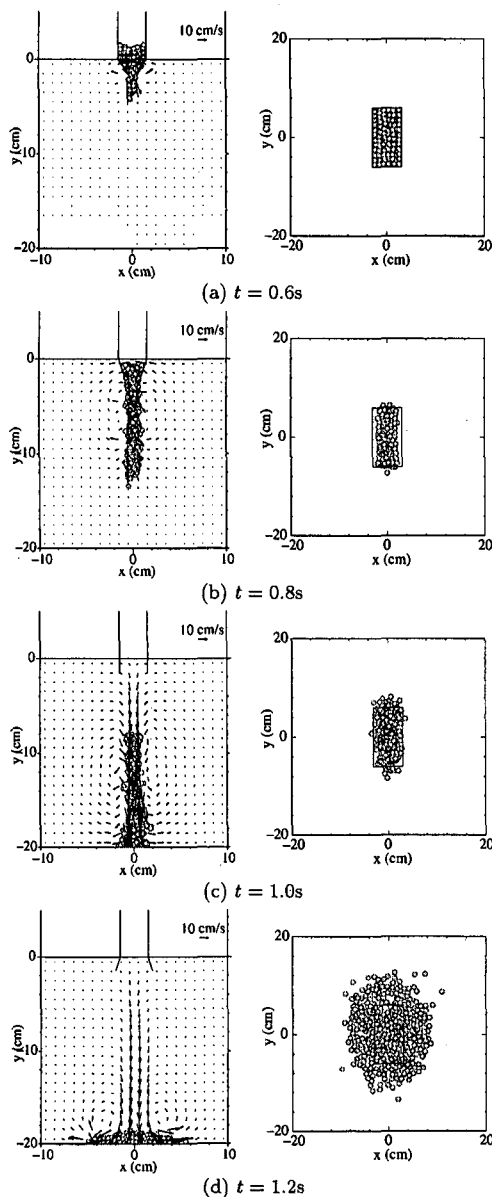
行った。それ故、先に述べた長方形断面を有する投入容器から投入する場合の計算結果と単純に比較することはできないが、両者の分散挙動には大きな差が見られる。すなわち、瞬間的に粒子群を投入した場合には、投入容器の長軸方向にも短軸方向にも投入直後から分散して、楕円形から円形へと分散形状が変化しながら沈降するが、投入容器の底扉をある角速度で開扉した場合には、いずれの方向にもほとんど分散することなく沈降する。このような差が生じる原因として、単位時間当たり投入する粒子量が異なることが挙げられるが、投入粒子の総量や水深、計算メッシュの取り方などについても検討しなければならないと考える。

4. 結 論

本研究では、三次元固液混相流モデルを用いて、投入条件が粒子群の沈降・分散挙動に及ぼす影響について検討した。本計算によって得られた結論を要約すると以下のようである。

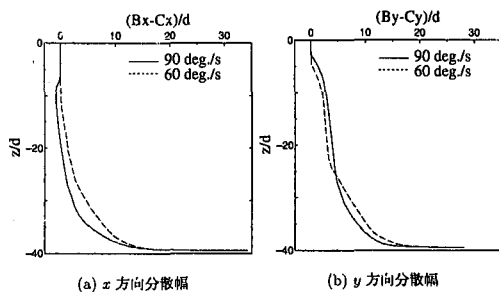
1) 鉛直二次元解析では粒子群の分散幅は沈降とともに線形的に増加するという報告があるが、本研究による三次元解析では沈降とともに徐々に分散幅の増加率が減少することがわかった。

2) 長方形断面を有する投入容器から投入された粒子群の分散形状は、投入直後は楕円形状を示し、その後、急速に円形状へと変化しながら沈降することが示された。



図—7 投入容器から投入された粒子群の沈降・分散挙動
(開扉速度: 90 deg./s)

3) 近接して置かれた投入容器から投入された2つの粒子群は沈降とともに1つの粒子群となり、着底時の分散形状はそれぞれの粒子群が個々に沈降したときの形状



図—8 開扉速度による分散幅の変化

を単純に足し合わせたような形状を示すことが示された。このとき、これらの粒子群の周囲には複雑な流体運動が形成されることが示された。

4) 投入容器の底扉を60, 90 deg./sとして計算した結果、粒子群は着底するまでほとんど分散することなく沈降することがわかった。

参 考 文 献

- 荒井 清・矢内栄二・五明美智男・坂井 彰・阪井田 茂・松見吉晴 (2000): 底開式バージによる投入土砂堆積形状に関する予測モデルの現地適用性について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 986-990.
- 小川 元・竹内益男 (1969): 土砂船による投棄土砂の分散離散要素法による流動層の数値シミュレーション (噴流層の場合), 土木学会論文報告集, 第161号, pp. 39-49.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅雄 (1992): 改良型DEMARC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.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸 (1993): DEMARC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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 951-975.
- 重松孝昌・小田一紀・田野雅彦・廣瀬真由 (2000): 個別要素法による水中沈降粒子群の3次元挙動に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 996-1000.
- 玉井昌弘・村岡浩爾・下屋陽八郎 (1993): 2流体モデルを基礎とした $k-\epsilon$ 乱流モデルによる粒子ブルームの数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1071-1075.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・八木 宏 (1996): 新しい固相モデルに基づく固体-液体混相乱流 LES モデルの開発, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 61-73.
- 松見吉晴・泉 一幸 (1998): 軟弱底面上に投入した土砂の堆積形状とその予測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 891-895.
- 武藤碩夫・吉井総介・石田 勉 (1974): 大規模埋立て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.