

投入土砂堆積形状予測モデルにおけるパラメータ設定と 流れ場への適合性

太田正規*・荒井清*・五明美智男**
矢内栄二***・松見吉晴****

1. はじめに

バージによる土砂投入工法は、効率な施工から大規模な埋立工事や護岸基礎部の築造工事に多く採用されてきている。この投入工法は、施工管理の点から投入土砂の堆積形状に関する事前把握、施工層厚を均一化するための適正な投入位置、さらには流れ場における投入土砂の堆積形状予測等に問題を残している。特に閑空第2期工事のような大規模水域における埋立工事を円滑に実施するためには、施工管理計画、上記の問題を解決された投入土砂の堆積形状に関する予測手法の確立が不可欠であると言えよう。

松見ら(1998)は、既にバージ直投による堆積土砂の船幅方向中央断面形状が投入水深の増加に伴って「一山型→台形円錐→二山型→平型」への変化パターンを評価できる堆積土砂形状に関する予測モデルを確率論に基づいて開発してきた。本予測モデルは、投入土砂の水深方向への散乱現象に関してマルコフ・チェーンを適用していることから、施工水深の変化に対して汎用性をもっている。また、松見ら(1998)は本予測モデルの全開式バージによる投入土砂堆積形状に対する適合性を模型実験より明らかにすると共に、現地に対して十分に適合することを報告した。しかしながら、対象土砂別に予測モデルに含まれる確率パラメータを水理模型実験によって予め決定する必要があり、現地に対して汎用的に適用するためにはパラメータの設定方法を確立する必要がある。

本研究は、まず松見ら(1998)が提案した予測モデルの底開式バージに対する適合性を水理模型実験より検討し、ついで全開式バージを対象に予測モデルに含まれる確率パラメータについて水理実験を行って検討すると共に、これまでに報告されてきたバージの直投による模型・現地実験結果および計算結果をとりまとめて、確率パラメータの設定方法について検討したものである。また本研究では、現地土砂投入時に特に問題とされている流れ場に対する本予測モデルの適合性についても水理実

験より検討を行った。

2. 底開式バージに対する予測モデルの適合性

(1) 実験の概要

実験に使用した水槽は、長さ4m×幅3.8m×高さ2mの三次元水槽である。底開式バージの模型は図-1に示すアクリル樹脂製120cm×48.4cm×40cmで、3200m³積バージの1/50縮尺模型を使用した。ホッパ部の開閉は手動によって行われ、ホッパ扉(図中黒く塗りつぶした部分)はホッパ部の自重と投入土砂重量によって瞬時に開放される。ホッパの最大開扉角度および開扉幅は、それぞれ90度と24cmである。バージ船模型の設置高さは、原型の満載時の喫水4.7mを考慮して9.4cmで一定とした。

水槽底面には、軟弱底面を想定して厚さ100mmの平坦なステラシートを敷き詰め、その上から2mmメッシュの厚さ約1mmのナイロンシートでステラシートを覆った。このステラシートの堆積土砂荷重による沈下量 δ_i は、水中での載荷荷重実験(松見ら, 1998)より次の実験式を得ている

$$\delta_i = 4.3 - 3.9 \exp(-0.04W) - 0.91 \exp(-0.52W) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、Wは載荷荷重である。

実験は一点一回投入で、投入水深が60cm及び80cm

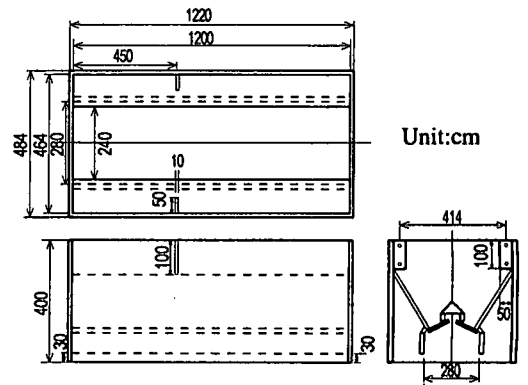


図-1 底開式バージ模型

* 正会員 工修 東亜建設工業(株)大阪支店
** 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所
*** 正会員 工博 東亜建設工業(株)土木本部設計部
**** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

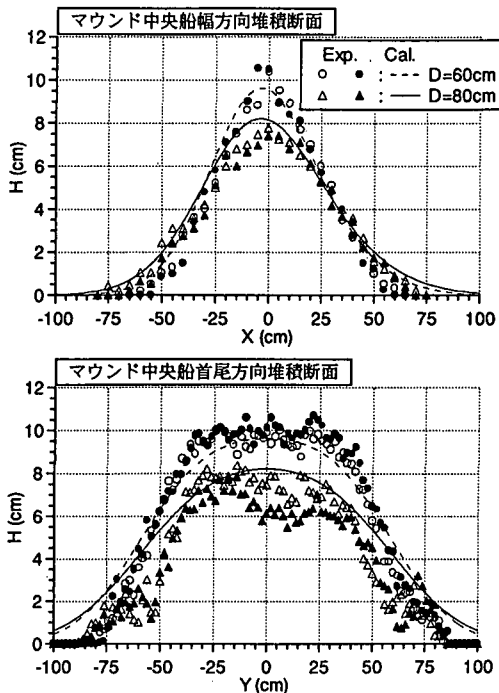


図-2 底開式バージの実験結果と予測結果の比較

の2種類について各水深毎に2回行った。投入土砂量は 0.114 m^3 で一定とした。使用した土砂は、2~50 mm のコンクリート用採石で、中央粒径は約 14 mm である。堆積マウンド形状の測定は、レーザ変位計を用いて船首尾方向に 2 cm 間隔、船幅方向には 5 cm 間隔で行った。

(2) 検証結果

予測モデルに含まれる土砂の散乱移動に関する標準偏差と平均値については、最小投入水深 $D=60 \text{ cm}$ の実験結果より推定し、 $D=80 \text{ cm}$ の投入水深に対する本予測モデルの適合性を検証する。なお、計算における水深方向の区間長を 10 cm (一定) にしている。

図-2 は軟弱底面に対する底開式バージによる一点一回投入時のマウンド中央船幅および船首尾方向の堆積断面形状について、実験結果と予測計算結果を比較したものである。図中破線で示す $D=60 \text{ cm}$ の結果より推定された標準偏差および平均値を用いた $D=80 \text{ cm}$ の投入水深における実線で示す予測結果は、船幅方向および船首尾方向共に実験結果をほぼ再現しており、本予測モデルの底開式バージによる直投土砂堆積形状に対する適合性が認められる。

3. 予測モデルのパラメータの設定に関する検討

(1) 確率パラメータに関する次元解析

本予測モデルは、図-3 に示すように水深方向に等分

割した各区間毎の土砂の散乱分布特性が同一の平均値 m および標準偏差 σ をもつ正規分布でそれぞれ近似できること (松見ら, 1992) に基づいて、各水深区間における土砂の到達位置に関する確率分布の算定にマルコフ・チェーンを適用した方法である。このように各水深区間で算定された船幅方向および船首尾方向におけるそれぞれの土砂の到達位置に関する確率分布の積から各区間毎の土砂の平面的な到達位置に確率分布が得られ、最終的にバージの積載土砂体積 (空隙を含む) との積により堆積形状を予測するものである。本予測モデルに含まれる未知パラメータは、水深を等分割した水深区間における土砂の散乱分布特性に関する平均値 m および標準偏差 σ の2種類だけであり、これらの確率パラメータの設定はこれまで水理模型実験より対象土砂粒径毎に行われてきた。したがって本研究では、予測モデルの汎用性を拡張するために確率パラメータの設定方法について次元解析より検討を行う。

各水深区間毎の土砂の散乱分布特性に関する平均値 m および標準偏差 σ は、次式のような変数によって定まる関数で与えられるものと考えられる。なお、ここでは標準偏差 σ についてのみ示すが、平均値 m についても次式と同様である。

$$f(\sigma, \Delta z, d_{50}, \rho_s, w_f, D, \rho, \mu, g, U) = 0 \dots\dots (2)$$

ここに、

- Δz : 予測モデルの水深区間長, d_{50} : 土砂の中央粒径
- ρ_s : 土砂の密度, w_f : 土砂の平均沈降速度
- D : 投入水深, ρ : 流体の密度
- μ : 流体の分子粘性係数, g : 重力加速度
- U : 流体場の主流速

ここで、 Δz は予測計算モデルにおいて 10 cm~100 cm の間で、例えば 10 cm, 20 cm と一定値として取り扱われるために式 (2) より除くと、式 (2) は π 定理により

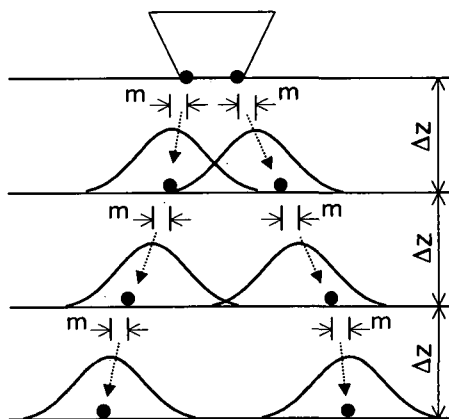


図-3 土砂の落下散乱に関する確率モデル

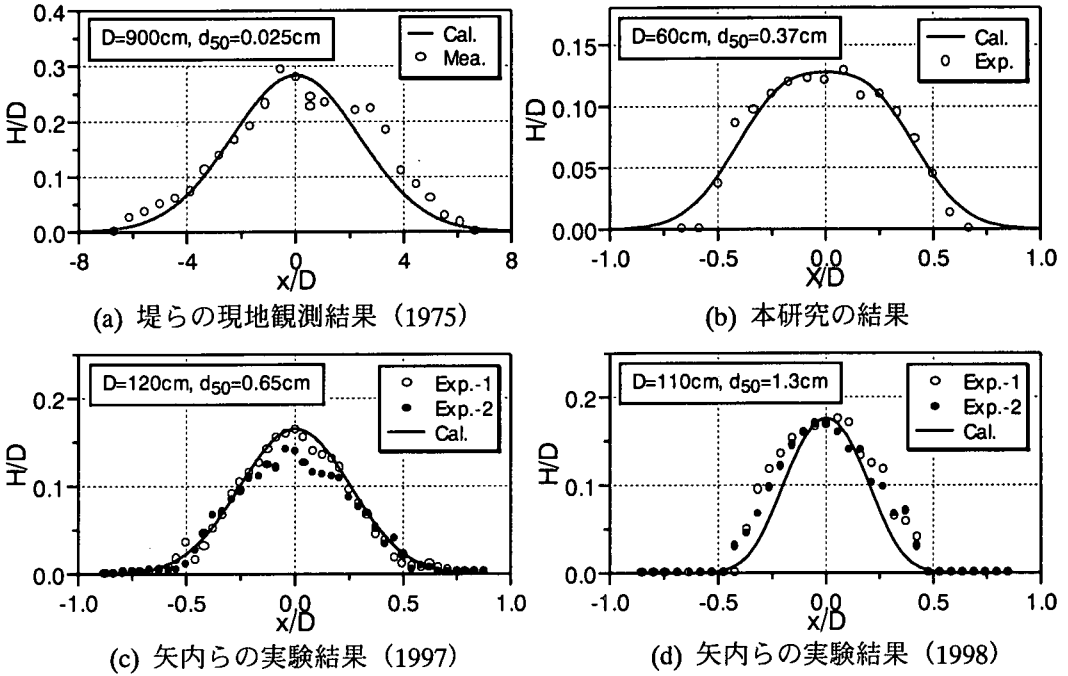


図-4 実験結果と計算結果の比較図

次式のような無次元量で与えられる。

$$f\left(\frac{\sigma}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{w_f d_{50}}{\nu}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{w_f}{\sqrt{g d_{50}}}, \frac{U}{w_f}\right) = 0 \quad \dots\dots (3)$$

式(3)において、各水深区間毎の土砂の散乱特性を表す標準偏差を σ/d_{50} と d_{50}/D の積で表すと、標準偏差に関して次の関係式が得られる。

$$\frac{\sigma}{D} = f\left(\frac{\sigma_s}{\rho}, \frac{w_f d_{50}}{\nu}, \frac{w_f}{\sqrt{g d_{50}}}, \frac{U}{w_f}\right) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、土砂の平均沈降速度を $w_f = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)g d_{50}}$ とすると、式(4)の右辺カッコ内第3項の土砂の沈降フルード数は

$$\frac{w_f}{\sqrt{g d_{50}}} = \frac{\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)g d_{50}}}{\sqrt{g d_{50}}} = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)} \quad \dots\dots (5)$$

と整理できる。本研究では土砂の密度をほぼ一定なものを対象とすることから、沈降フルード数は一定値になる。また、式(4)における ρ_s/ρ の値も一定となる。したがって、各水深区間毎の土砂の散乱特性を規定する標準偏差 σ および平均値 m は次の関係式で表示できる。

$$\frac{\sigma}{D}, \frac{m}{D} = f\left(\frac{w_f d_{50}}{\nu}, \frac{U}{w_f}\right) \quad \dots\dots (6)$$

以上のことから、投入土砂の堆積形状に関する予測モデルにおける土砂の落下散乱に関する確率パラメータは、土砂の沈降速度に関する沈降レイノルズ数および流れ場の主流速と投入水深によって強く支配されることが明らかになった。なお、 σ が土粒子自身の乱れによる場

合の算定式については、 $w_f d_{50}/\nu < 1 \sim 10$ における林・大橋の解(1980)、 $w_f d_{50}/\nu < 300 \sim 400$ における吉川らの解(1977)がある。

本研究では、これまでに報告してきた模型実験および現地実験結果について各投入水深における確率パラメータを再計算すると共に、異なった土砂粒径を対象として3000 m³ 積み全開式バージの縮尺1/36の模型による投入実験を新たに行った。実験に使用した投入土砂は粒径5 mm以下の中央粒径 $d_{50} = 3.7$ mmのコンクリート用砕石で、1回当たりの投入土砂量は38000 cm³で一定とした。投入水深は60 cmとし、堆積形状はレーザー変位計により計測した。図-4は、それぞれの投入水深および土砂粒径に対する従来の現地実験および模型実験結果も含めて新たに推定された確率パラメータを用いて計算された堆積マウンド船幅方向中央断面形状に対する予測結果と実験結果を比較して示したものである。これらの結果は、全て流れがない状態($U = 0$)での結果である。本予測モデルは現地および模型実験共によく再現していることがわかる。

(2) 確率パラメータに関する実験式

図-5は、図-4に示した予測結果における σ および m の各水深区間長毎の値と粒径レイノルズ数の関係を示したものである。これらの結果より、 σ/D および m/D と $w_f d_{50}/\nu$ の間には粒径レイノルズ数の $-1/4$ 乗に比例する次式の関係式が存在することが推定できる。

$$\frac{\sigma}{D} = C_{1_σ} \left(\frac{w_f d_{50}}{\nu} \right)^{-1/4} + C_{2_σ} \sigma \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{m}{D} = C_{1_m} \left(\frac{w_f d_{50}}{\nu} \right)^{-1/4} + C_{2_m} m$$

式(7)に含まれる係数 $C_{1_σ}$, $C_{2_σ}$, C_{1_m} および C_{2_m} は図-4の結果より表-1に示す値が得られた。これらの値を用いて予測計算における各水深区間長毎 ($\Delta z = 10 \sim 100$ cmの間を10 cm間隔毎) に σ/D および m/D と $w_f d_{50}/\nu$ の関係を示したのが図-6と図-7である。これらの図には荒井ら(1999)の現地投入結果 ($D = 14$ m, $d_{50} = 6$ cm, $w_f d_{50}/\nu = 48000$) も示している。 σ/D に関する関係式は現地の結果をよく再現しているが、 m/D の関係式は水深区間長 Δz を大きくすると粒径レイノルズ数が高い領域で再現性に問題を残している。土砂粒径が小さいほど落下に伴う分散性が大きくなるため σ/D および m/D 共に大きな値になることを示している。

土砂投入に関する施工管理計画に当たっては、式(7)および表-1より投入水深と投入土砂の中央粒径に対する確率パラメータが決定され、投入土砂の堆積マウンド形状が予測計算できる。図-8は、先の現地投入結果 ($D = 14$ m, $d_{50} = 6$ cm) に対して、 $\Delta z = 100$ cmにおける標準偏差および平均値より予測された堆積マウンド中央船幅方向の堆積断面形状に関する検証結果を示したものの

表-1 確率パラメータ設定式の係数

Δz (cm)	$C_{1_σ}$	$C_{2_σ}$	C_{1_m}	C_{2_m}
10	0.4022	0.0104	0.0693	0.0031
20	0.5688	0.0147	0.1385	0.0062
30	0.6966	0.0180	0.2078	0.0093
40	0.8044	0.0208	0.2771	0.0124
50	0.8993	0.0233	0.3463	0.0155
60	0.9851	0.0255	0.4156	0.0186
70	1.0641	0.0275	0.4849	0.0217
80	1.1375	0.0294	0.5542	0.0248
90	1.2065	0.0312	0.6234	0.0279
100	1.2718	0.0329	0.6927	0.0310

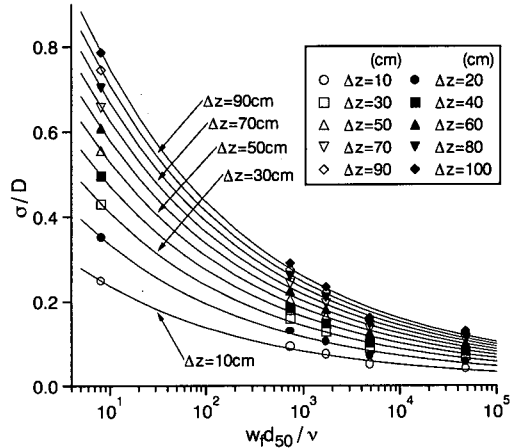


図-6 各水深区間長における σ/D の設定式

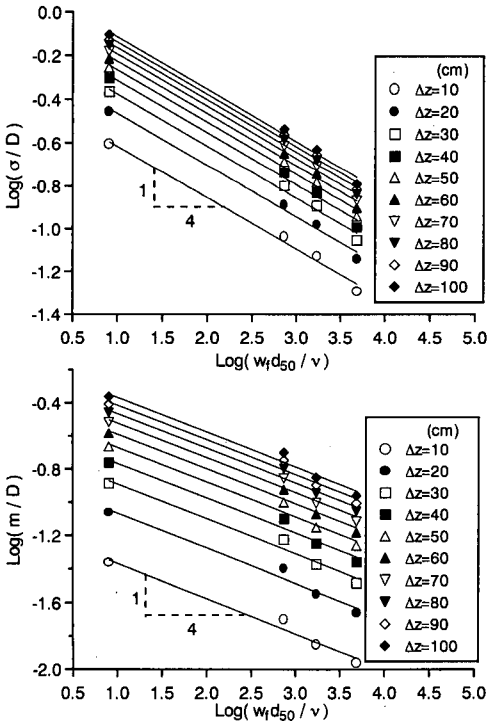


図-5 σ/D および m/D と $w_f d_{50}/\nu$ の関係

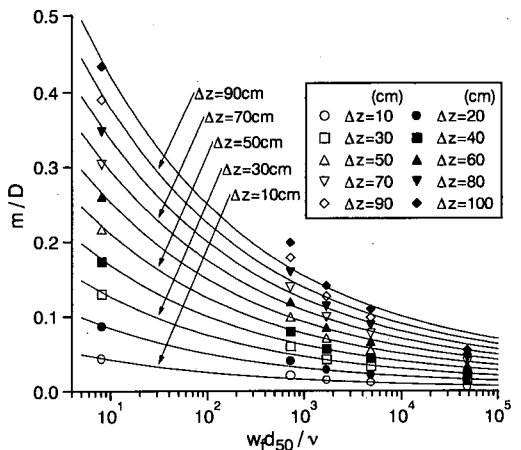


図-7 各水深区間長における m/D の設定式

である。図中の実線は現地結果より推定した確率パラメータによるもので、破線が式(7)および表-1による予測結果である。予測結果は、平均値 m の値が大きく見積もられた結果、特に二山のギャップを低く評価するが、マウンド高さおよび拡がり幅はほぼ再現できている。

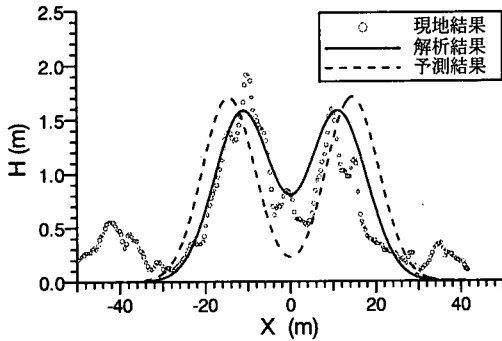


図-8 現地結果に対する検証結果

4. 流れ場に対する適合性

流れ場における直投土砂の堆積形状に関する本予測モデルの適合性に関しては、先に示した 1/36 縮尺の全開式バージ模型を用いた水路幅 50 cm の 2 次元水路による実験より検討を行った。全開式バージの船首尾長が 45 cm であるため、投入土砂の船首尾方向への移動は水路側壁によって拘束されることから、実験は船幅方向への土砂の落下散乱に及ぼす流れの影響に関する二次元実験である。本実験では、水深 55 cm 一定で流速を 7 cm/s と 14 cm/s の 2 種類と静水場について各々 2 回の投入実験を行った。

小田・重松ら (1995) は個別要素法と MAC 法を併用した数値実験より、流れ場を沈降する粒子群の重心位置が流れ方向に流速に線形的に比例して移動することを明らかにしている。予測計算では、この研究結果に基づいて予測モデルの確率パラメータの平均値 m に対して流速による流下方向への移動分 m' を付加すること ($m+m'$) により、流れの影響を確率パラメータの平均値の変化と考慮することとした。なお、流下方向への移動分は計算上の水深区間長 Δz を沈降する時間と流速との積で与えることにした。また予測計算では、小田・重松ら (1995) が指摘している流速場での堆積断面の上流と下流における非対称性を再現させるため、 $\Delta z=5$ cm に設定して投入土砂の着底から堆積終了までを離散的に水深 55 cm, 50 cm および 45 cm における堆積形状の和で最終的なマウンド形状を算定している。

図-9 は、流れ場における直投土砂の堆積形状(船幅方向断面)について実験結果と計算結果を示したものである。本予測モデルは、確率パラメータの平均値 m に流速による移動分の付加および土砂の堆積過程を離散的に扱うことにより、上流と下流側での非対称性も含めて堆積形状をよく再現する。

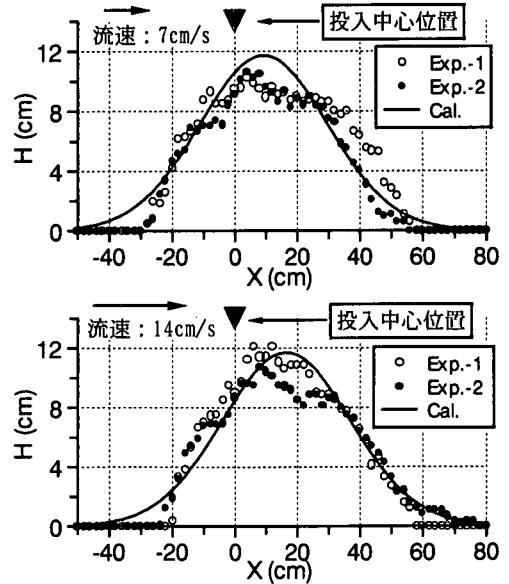


図-9 流れ場の検証結果

5. まとめ

本研究では、直投土砂の堆積形状に関する予測モデルの底開式バージへの適合性、流れ場に対する適合性を確認すると共に、全開式バージの土砂を対象とした確率パラメータの設定法を明らかにした。今後は底開式バージの確率パラメータ設定法における係数を検討していく。

参考文献

- 荒井 清・太田正規・五明美智男・矢内栄二・松見吉晴 (1999): 底開・全開バージによる土砂投入形状の現地比較実験, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 225-229.
- 小田一紀・重松孝昌・菅野 寛 (1995): 粒子群の沈降・分散挙動に及ぼす流れの影響に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1271-1275.
- 堤 一高・内河栄作・半沢秀郎・島 正憲 (1975): 軟弱地盤上に投下された砂の状況調査—大型土捨船による砂投下実験—, 土と基礎, Vol. 23, No. 11, pp. 57-63.
- 林 泰造・大橋正和 (1980): 流体中を沈下する粒子の乱流特性について, 第 24 回水理講演会論文集, pp. 7-12.
- 松見吉晴・荒井 清・太田正規・矢内栄二・増田 稔 (1998): 軟弱底面上に投入した土砂の堆積形状とその予測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 891-895.
- 松見吉晴・泉 一幸 (1992): 底開式バージによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 966-970.
- 矢内栄二・横堀浩一・松見吉晴 (1997): トレミー管および全開バージによる投入土砂の堆積形状, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 369-373.
- 吉川秀夫・福岡捷二・吉川勝秀 (1977): 流体と固体粒子の相互作用に関する研究, 土木学会論文集, No. 260, pp. 89-100.