

石狩湾新港周辺での流動・濁度の暴浪時時空間特性

本間大輔*・坂井洋平**・窪内 篤***
宮武 誠****・山下俊彦*****

本研究は、航路埋没や港内細粒化の問題を抱えている石狩湾新港を対象とし、現地観測および、これに基づいて構築した数値解析によって漂砂現象を把握し、その流動の水理特性を検証した。現地観測では、入射波の非定常性に起因する浮遊砂濃度の時間的変動特性や、地点での底質砂の巻上げ量のみでは説明できない浮遊砂の非平衡性ならびに、この漂砂現象の要因となる流動外力を検証している。一方、漂砂の流動外力の非定常性を考慮した数値解析では、特に港内で生じる浮遊砂の非平衡性に着目し、海浜流に加えて長周期波流動の及ぼす影響を検討している。

1. ま え が き

砂浜域における港湾・漁港では、航路埋没や港内細粒化が問題となっている。本間ら（2004）は、石狩湾新港周辺における現地観測に基づき、港内に侵入する浮遊砂の非平衡特性を解明し、航路埋没や港内細粒化現象には、碎波帯で巻き上がり、港内へ輸送される浮遊砂量が重要であると指摘している。

本研究では、過去に対象水域において行われた現地調査のうち、2002年冬季間の調査結果を取り上げて、港周辺の浮遊砂量と流動外力の関係および、その時空間的な特性について考察し、特に浮遊砂を港内へ輸送させる流動外力を検証する。また、現地観測によって得られた流動の水理特性を反映させ、この流動外力の非定常性を考慮した数値解析を行い、浮遊砂の港内侵入に及ぼす海浜流および長周期波の影響について検討する。

2. 石狩湾新港周辺の流動・漂砂特性

(1) 現地調査概要

本研究では2002年12月18日～2003年2月3日の期間において、石狩湾新港周辺で行われた現地調査の結果を用いる。計測地点は、図-1に示す8地点で水深は6～23.5 mの範囲である。各地点における計測項目は、表-1に示すとおりである。

(2) 現地観測

図-2は、st.7で調査期間中最大の5.5 mの有義波高が観測された1月6日0時を含む2003年1月4～7日における、st.7, 9, 10, 11, 12での濁度の経時変化である。同図中に破線で示した有義波高を見ると、いずれの地点でも最も沖側に位置するst.7がピークに達する時刻に一致してピークを向かえ、その後もほぼ同様に推移してい

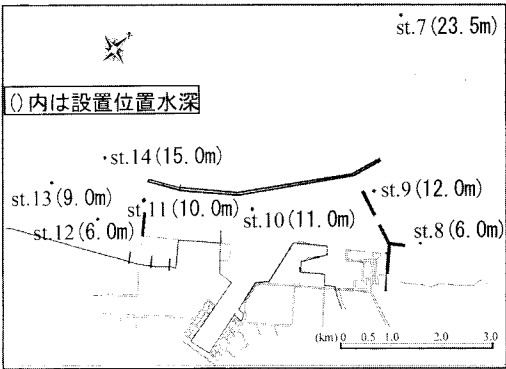


図-1 計測機器設置箇所

表-1 設置機器の詳細と設置位置水深

調査地点 (設置位置水深)	多層流速計 (ADCP)	波高計 (WH)	流速計 (ACM-8M)	濁度計
st.7(23.5 m)	1.0 m	—	—	2.0 m
st.8(6 m)	—	—	2.0 m	—
st.9(12 m)	1.0 m	1.0 m	—	0.5, 3.0, 7.0 m
st.10(11 m)	—	1.0 m	6.0 m	0.5, 5.0 m
st.11(10 m)	1.0 m	1.0 m	—	0.5, 3.0, 6.0 m
st.12(6 m)	—	1.0 m	3.5 m	0.5, 3.0 m
st.13(9 m)	—	—	3.0 m	—
st.14(15 m)	—	1.0 m	—	—
測定間隔	20 min	20 min	60 min	60 min
測定時間	3 min	20 min	3 min	3 min
サンプリング時間	2 s	0.5 s	1 s	1 s

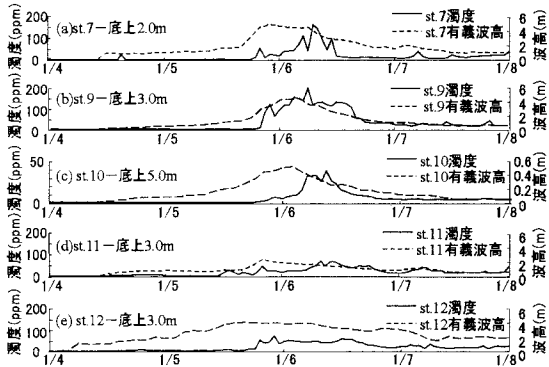


図-2 高波浪時の濁度特性

* 正会員 北海道開発局 港湾行政課 技術審査係
** 正会員 修(工) (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室
*** 正会員 (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室
**** 正会員 博(工) 日本データサービス株式会社
***** 正会員 工博 北海道大学大学院 教授

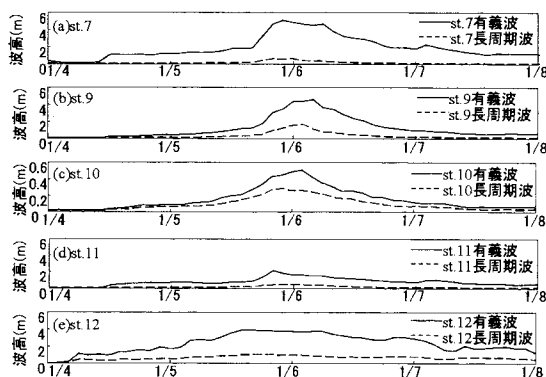


図-3 高波浪時の波浪特性

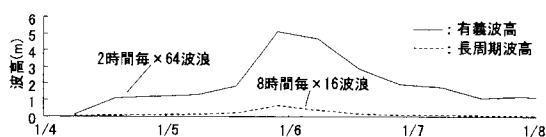


図-4 非定常性を考慮した入射波条件

る。一方で、浮遊砂濃度に相当する濁度の経時変化を見ると、各地点においてピークが発生する時刻のズレが認められる。

砕波帯付近に位置する st. 12 では、st. 7 の有義波高がピークを示す同時刻に濁度が最大となっている。このことから、この地点で計測された濁度は主にその場で巻上がった底質砂を捉えていると推定される。これに対し、砕波帯から離れた st. 9、更に遠ざかった st. 7、そして港内に位置する st. 10 では、st. 7 の有義波高がピークを示す時刻に比して地点毎に遅れて濁度の最大値が発生している事が分かる。この遅延時間は砕波帯から離れるに従って増大して st. 7 で顕著になり、また港内の st. 10 においても遅延時間は大きくなっている。以上の結果、砕波帯外の港口や港内、沖では、その場の底質砂の巻き上げのみでは説明できない浮遊砂の非平衡性を確認できた。また、この特性を解明するには、時空間的に変化する流動外力の非定常性を考慮する必要があると考えられる。

図-3 には2003年1月4～7日の期間における、代表的な計測地点における波高の時系列変化を示す。同図中の実線は各地点における有義波高であり、破線は長周期波を示している。ここでは、長周期波の定義として30～600秒の周期をもつ成分とした。

沖の st. 7 では5～6日にかけて有義波高5.5 m の波が観測されており、同時に強い北西の季節風も捉えられていた。この最大波高発生時での長周期波は0.5 m 程度であった。港口付近の st. 9 では沖とほぼ同じ5 m 程度の有義波高が観測されるが、この時の長周期波は1.7 m に達していた。また、港内に位置する st. 10 では有義波高

0.5 m となり st. 7 の1/10に減衰しているが、長周期波は0.3 m 弱を示し st. 7 より若干小さい値であった。以上より、港内では風波に比して長周期波が卓越しており、港内に侵入する浮遊砂の流動外力としての影響は大きいと推定される。

3. 数値シミュレーション

現地観測で明らかになった浮遊砂の非平衡性および港内侵入といった水理特性を詳細に検討するためには、数値解析法が有用と考えられる。ここでは、流動外力として風波による海浜流と長周期波を取扱い、浮遊砂輸送に関する数値シミュレーションを行う。その結果を用いて以降で、流動と浮遊砂濃度に関して現地観測結果と比較し、数値シミュレーションの再現性について検討を行う。同時に、流動の非定常的な空間分布を考慮し、浮遊砂の空間的な非平衡特性を把握する。

対象とする港周辺の漂砂現象の再現を試みる第一段階として、波浪および流動場を非定常境界条件のもとで平面二次元的に計算し、得られた流動によって浮遊砂を輸送させる。なお、解析に用いる底質砂の粒径は現地調査結果から、代表粒径を0.150 mm と0.015 mm の2種類を対象とし、浮遊砂量を評価する際には、底質砂の粒度分布からこれらの粒径が占める割合で重みを付けて合成した。

(1) 海浜流モデル

海浜流モデルでは、風波によって生じる流れを取り扱う。まず、入射波条件に従って計算対象領域の波高分布を、非定常緩勾配方程式を用いて求める。この際の入射波条件は、図-4 に示す2時間区切りステップの非定常分布で与える。求まった波高分布およびラジエーション・ストレス分布を2次元平面海浜流モデルの入力値として計算し、風波による海浜流の2次元分布を求める。

(2) 長周期波モデル

長周期波流動モデルでは、Madsen タイプ Bousinesq モデルを用いた港湾空港技術研究所が公開しているプログラムソース (NOWT-PARI) (平山・平石, 2001) を使用した。また、入射させる外力としては、海浜流モデルと同様に、図-4 に示す8時間区切りステップの非定常分布で与える。このモデルにより、長周期波の波高分布と流速分布を同時に求める。

(3) 浮遊砂モデル

本研究では、上述した海浜流モデルおよび長周期波モデルにより求めた流動外力による浮遊砂輸送量の計算を2次元移流拡散方程式により行った。その際、底質砂の巻き上げ量は、以下の式(1)に示す村上ら(1989)による提案式を用いる。

$$P = \begin{cases} 0 & : \tau_e > \tau \\ M(\tau/\tau_e - 1)^n & : \tau_e < \tau \end{cases} \quad (1)$$

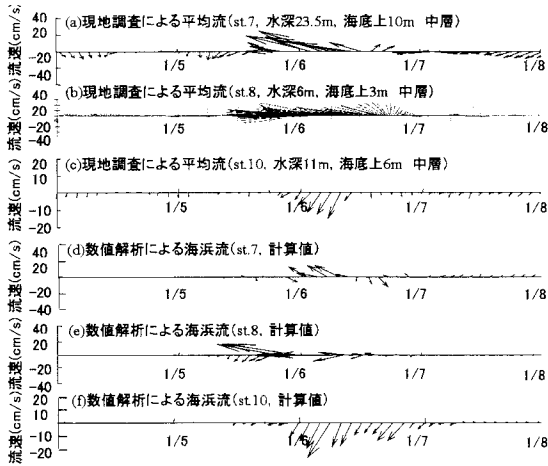


図-5 海浜流モデルによる流動の時系列変化

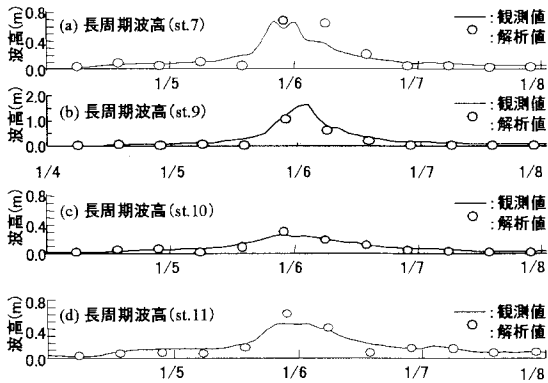


図-6 長周期波モデルによる波浪の時系列変化

ここに、 p は底質砂の巻き上げ量 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{min}$), M は巻き上げ定数 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{min}$), n は経験定数, τ_e は巻き上げに関する限界せん断応力 (Pa), τ は吹送域の流れと波との共存場における底面せん断応力 (Pa) であり、底面せん断応力の計算に必要な計算領域内の波高分布には、非定常緩勾配方程式から得られる 2 時間毎の風波の有義波高を用いる。

一方、浮遊砂の沈降量は、沈降速度 w_f を用いて次の式 (2) のように評価する。

$$F = \rho_s w_f c \quad (2)$$

ここに、 F は浮遊砂の沈降量 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$), ρ_s は底質砂の密度, c は浮遊砂濃度で、水深方向の濃度を一定として取り扱う。また、沈降速度 w_f は、以下の式 (3) に示す Rubey (1933) の式を用いて評価する。

$$\frac{w_f}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \quad (3)$$

ここに、 s は砂粒子の水中比重 ($=\rho_s/\rho_w-1$), ν は流体の動粘性係数, d は砂粒子の代表粒径を示す。

4. 流動特性の時空間的な検討

図-5 は現地調査結果から算出した平均流速と海浜流モデルによる計算結果から得られた流速の時系列変化を比較したものであり、同図中には st. 7, 8, 10 におけるデータを示してある。本モデルでは、入射波の境界条件を非定常的に取り扱うことによって、海浜流の時系列変化を評価できる。

沖側 st. 7 の解析値は、実測値と比較すると荒天時における北西方向の流れを再現しているが、その絶対値は実測値に比して小さい。図示していないが、この時、現地では強い北西方向の季節風が観測されていることから、実測値には数値解析で考慮していない吹送流による影響が現れていると推定される。この結果、前出の図-2(a) で見られた濁度の時間変化特性は、主に吹送流によって他から輸送される浮遊砂に起因すると考えられる。これに対し、東側防波堤付近の st. 8 では、実測値、解析値ともに防波堤に沿って沖に向かう西方向の流れが発達し、その絶対値も一致する。これにより、st. 8 における流動の大半は海浜流であり、この付近で巻き上がった底質砂は浮遊砂として大量に沖側へ輸送されていると推定される。一方で、港内に位置する st. 10 の海浜流の流向は南西方向で良く一致している。また、港内では風波の波高減衰が著しいため、港外の st. 7, 8 に比して流速は小さくなっている。

図-6 は上述した海浜流の検討に用いた計測地点と同一の地点における長周期成分波高の計算結果で、対応する実測値を重ねてプロットしてある。これらを比較すると、波高の非定常性を考慮した結果、この長周期波モデルが現地観測によって明らかになった港内で減衰しにくい長周期波の存在および、各地点における長周期波高の非定常変化が妥当な精度で再現できていると言える。

図-7 は st. 7 において最も大きな有義波高が観測された 6 日 0 時における平均流速の実測値と同時刻における海浜流の計算結果の空間分布を比較したものである。現地調査結果によると、荒天時における平均流は、東側では東防波堤に沿う西方向の流れが発生し、西側では岸側から港口に向かう循環流の形成が認められる。この流れのパターンは数値解析による海浜流の空間分布でも同様に現れ、この流動によって碎波帯で巻き上がった浮遊砂が東西両側にある港口へ向かって輸送されるものと推定される。また、解析結果により海浜流は、東西両側の港口手前で急激に減衰しているものの、東港口から西港口へ向かって流れ、浮遊砂の港内侵入に影響を及ぼしていると思われる。

図-8 は長周期波流動モデルによる長周期波高の空間分布である。港内において 50cm を超える波高が発生し

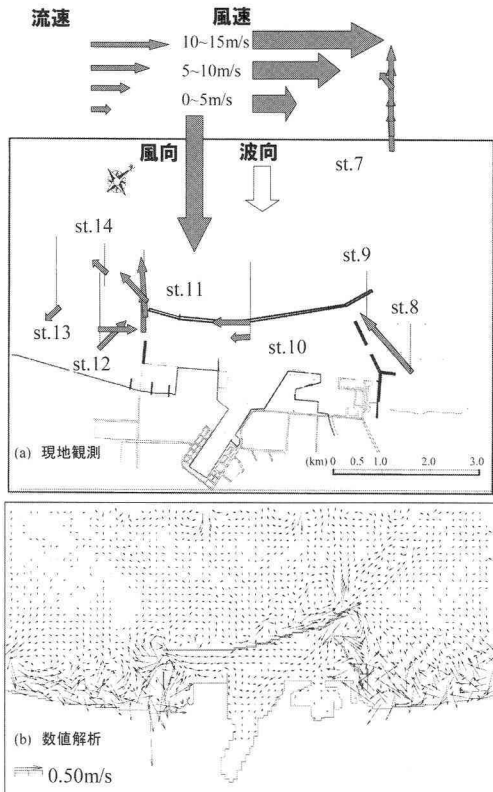


図-7 海浜流流動の空間特性

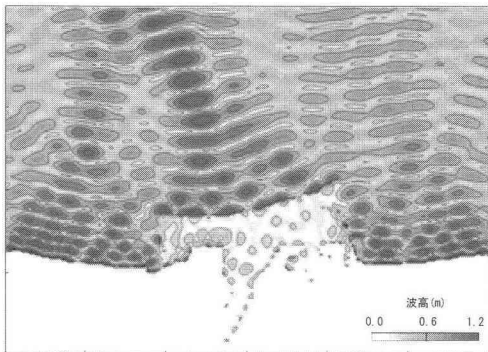


図-8 長周期波高の空間特性

ている地点もあり、港内における浮遊砂輸送の一要因となっているものと推測される。特に、西防波堤の岸側開口部から侵入したと思われる長周期波の影響が港内中央付近まで達している事が分かる。この結果、海浜流に加えて長周期波もまた港内へ侵入する浮遊砂を輸送する流動外力として影響していると考えられる。

5. 漂砂特性の時空間的な検討

図-9 には、st. 7において最も大きな有義波高が観測された6日0時における浮遊砂濃度の計算結果の平面分布

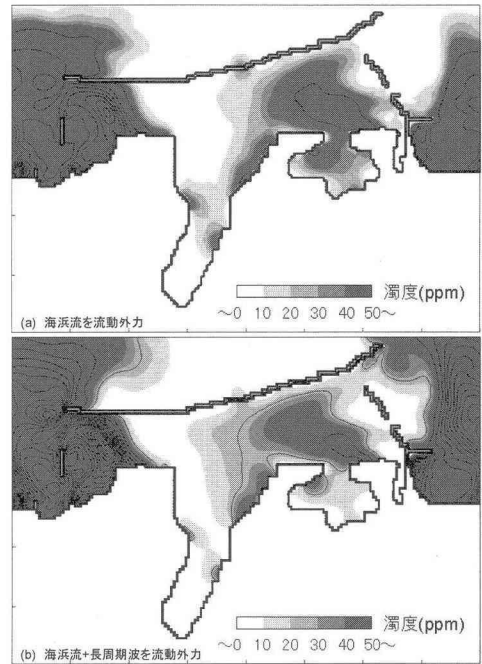


図-9 数値計算による濁度の空間分布

を示す。海浜流のみを流動外力として浮遊砂輸送を計算した同図(a)では、砕波帯で巻き上がった底質砂が海浜流によって港の両側で沖側へ輸送されると同時に、西港口の岸側開口部および、東側防波堤の小さな開口部から港内に侵入している事が分かる。これに対し、海浜流に加えて長周期流動も考慮して浮遊砂輸送を計算した同図(b)では、長周期流動を考慮していない場合に比べて、砕波帯で巻き上がった底質砂がより沖側へ輸送されている事が認められる。また、東防波堤付近の浮遊砂は東側港口まで達し、そこから港内に侵入する浮遊砂が確認できる。この結果、東防波堤の小さな開口部と東側港口の両方から浮遊砂が輸送されるため、港内中心部付近でより高い濁度を示している。また、西側港口から港内に侵入した浮遊砂の到達範囲は海浜流のみを流動外力とする場合とほぼ同様であるが、より高い濁度を示している。長周期波による浮遊砂の輸送機構としては、長周期流動は基本的に往復運動であり、浮遊砂濃度に場所的な差があれば、濃度の高い場所(砕波帯・港外)から低い場所(砕波帯外・港内)へ浮遊砂が輸送されるものである。以上により、海浜流に長周期流動を加えることによって、航路埋没や港内細粒化現象を扱ううえで、現地の状況により一層近づいた漂砂現象として評価できると言える。

図-10, 11 は、それぞれ流動外力として海浜流のみを扱ったものと、海浜流に加えて長周期波流動を考慮した場合の、濁度の時系列変化であり、解析結果と実測値を比較したものである。東側港口付近の st. 9 に関して、浮

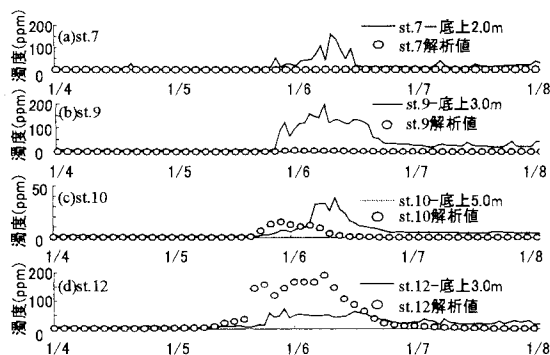


図-10 海浜流を駆動力とした濁度の時系列変化

遊砂を海浜流のみで輸送した場合では、浮遊砂の解析値は実測値と明らかに相違しているが、長周期波流動を加味することによって、実測値を過小に評価するものの碎波帯で巻き上がった底質砂が輸送され、その傾向は現地の状況とほぼ一致する。また、港内の st.10 では、海浜流のみの浮遊砂の解析結果は実測値よりもやや早くピークに達し、浮遊砂の非平衡性を再現できていない。これに対し、長周期波流動を考慮した解析結果では濁度のピークはやや遅れて生じ、港内浮遊砂の非平衡性を評価できる。

なお、最も沖に位置する st.7 に関しては、両ケースともに解析値は実測値とは明らかに異なる。これは、前述したように、この地点での流動は、北西方向からの季節風に起因する吹送流が支配的であるためと考えられる。また、碎波帯付近を除く各地点における解析値は全体的に実測値より小さくなっている。これらをより精度良く再現するためには、石狩湾新港周辺を包含した石狩湾全体を対象とした吹送流の影響を考慮する必要があると考える。

6. おわりに

本研究で得られた知見を以下に要約する。

(1) 石狩湾新港周辺の漂砂現象を解明するためには、浮遊砂輸送を的確に把握する必要がある。この浮遊砂は非平衡性を有し、その場で巻き上がった底質砂のみならず、他から輸送される浮遊砂量を評価する必要がある。また、港内に侵入する浮遊砂量を評価するためには、その場での底質砂の巻き上げ量のみでは評価できない浮遊砂濃度

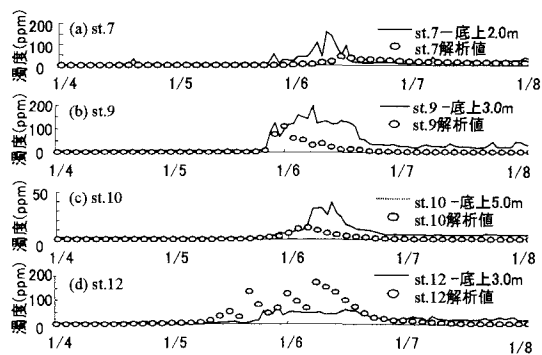


図-11 海浜流+長周期波を流動外力とした濁度の時系列変化

の非平衡性を考慮する必要があると同時に、流動外力として海浜流に加え、長周期波による影響を加味する必要がある。

(2) 水理・漂砂特性を数値シミュレーションによって再現する際に、波浪・流動の非定常性を考慮したモデルを用い、海浜流に加えて長周期波を考慮する事によって、浮遊砂の非平衡性をより精度良く評価できた。また、長周期波は、碎波帯外および港内に輸送される浮遊砂量を助長させていることから、海浜流と同様に浮遊砂輸送の重要な支配外力の一つであると考えられる。

今回の数値モデルにおいては、現地観測により支配的外力として海浜流と長周期波に絞って検討している。しかしながら、実際には港内や特に沖方では、この他に吹送流が流動環境に影響していると推定される。今後、この点を十分に検討したうえで、浮遊砂モデルを組み込み、地形変化を評価できるモデルに改良し、最終的には港内埋没現象を定量的に検討できるようにする予定である。

参考文献

- 本間大輔・窪内篤・先川光弘・山下俊彦・安井塔基・宮武誠 (2004) : 冬季暴浪時の石狩湾新港周辺での流動・漂砂特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 466-470.
- 平山克也・平石哲也 (2001) : プシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発, 港湾技術研究所報告, 第40巻, No. 1, pp. 3-30.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均 (1989) : 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第1号, pp. 43-76.
- Rubey, W.W. (1933) : Settling velocity of gravel, sand and particles, Amer. Jour. Sci., Vol.25, pp. 325-338.