

取水港湾におけるシルテーションに関する現地調査

清水 琢三*・坂野 雅人*・金山 進*
 阪内 茂記**・植木 一浩***・榊山 勉****

1. ま え が き

近年、わが国においても、流れあるいは波による底泥の輸送（沈降、巻き上げ、質量輸送）に関する研究が活発に行われるようになってきた（例えば Mimura, 1989）。現地においても、霞ヶ浦、有明海といったシルト・粘土堆積域における底泥の挙動に関する現地観測が行われ、その結果を検証データとして、数値モデルの構築が試みられている（大坪・村岡, 1987; 鶴谷, 1989 など）。

取水港湾におけるシルテーションは、高波浪時に港外で巻き上げられたシルト・粘土が、取水流によって港口より流入し、港内の静穏域に沈降・堆積するという形で主に進行する。また、高波浪時には、すでに港内に堆積していたシルトが再浮遊することも考えられる。取水港湾の港内堆積予測に関しては、これまで、港内を仮想水路にみたてた単層1次元の取り扱いにより、主として浮遊シルトの移流・沈降過程に着目した簡便な数値モデルが開発され、実際の浚渫計画にも応用されてきた（近藤ら, 1987 a, 1988），しかしながら、現地における検証データとしては、計算の最終結果である地形変化データしか得られておらず、高波浪時のシルトの挙動、すなわち移流、沈降、巻き上げ、堆積（圧密沈降）現象がどのように生じているのか、また外力とどのように対応しているのかについては、十分な現地データが得られていないのが現状である。そこで本研究では、取水港湾におけるシルテーションに関する総合的な現地観測を実施し、現地データに基づく現象の解明を試みた。

2. 現地調査の概要

シルトの港内堆積が顕著な福島第二原子力発電所専用港湾において、1989年7月下旬より9月中旬までの約2ヶ月間にわたり、以下の現地調査を実施した。計測器の設置位置を、港内の表層底質の中央粒径コンター（1989

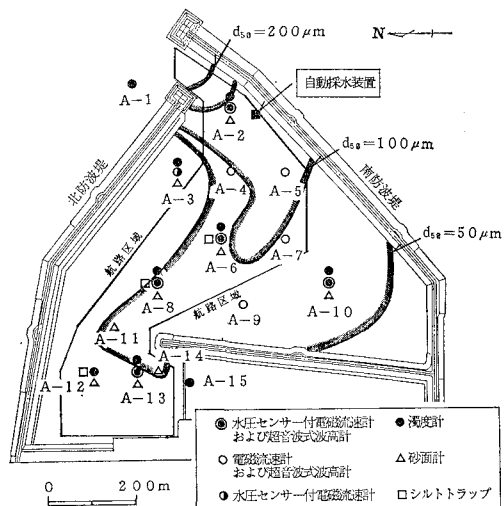


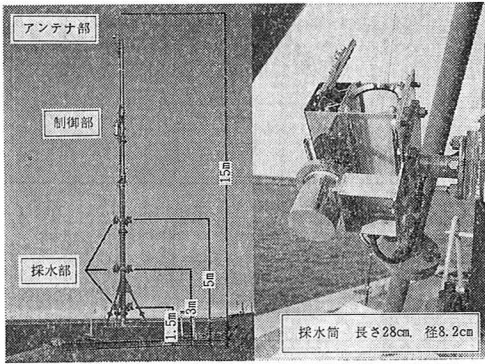
図-1 計測器の設置地点位置図

年3月実施）とともに、図-1に示す。

①港内波浪・流況調査 港内の代表10地点において自記式の電磁流速計あるいは水圧センサー付電磁流速計と超音波波高計を用いて、港内の波高、周期、波向ならびに平均流速・流向を2時間毎に約10分間計測した。また、取水流の平面的な流況を把握するため、直読式のプロペラ式流速計により流況観測を行った。さらに、港内主流線を把握するためフロート追跡調査も実施した。

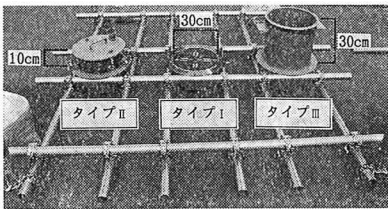
②浮遊シルト濃度調査 港湾内外の代表9地点において、底面から1.5mの高さで自記式濁度計による濁度の連続観測（1時間毎に1秒間隔で20秒間）を行い、高波浪時を含む浮遊シルト濃度の経時変化を測定した。また、高波浪時の港口流入浮遊シルト濃度を直接測定するため、写真-1に示す自動採水装置を開発した。この装置には鉛直3層（底面+1.5, 3, 5m）に各3個の採水装置が取り付けられており、陸上から簡易無線により採水開始の信号を送ると、所定の時間間隔毎（今回は3時間間隔）に鉛直3層の採水を自動的に3回行うことができる。さらに、濁度と浮遊シルト濃度の関係を得るため、

* 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部
 ** 正会員 工修 東電設計(株)原子力土木部
 *** 正会員 工修 東京電力(株)原子力建設部
 **** 正会員 工修 (財)電力中央研究所



(a) 全 景 (b) 採水部

写真—1 自動採水装置



写真—2 シルトトラップ

適宜、採水調査を実施した。

③地形変化調査 港内代表10地点において光電式砂面計を用いて1時間毎に底面高の観測を行い、同一地点の浮遊シルト濃度や外力との関係を調べた。

④シルトトラップ調査 シルトの堆積量を直接測定することを目的として、シルト堆積域の3地点において、写真—2に示す3種類のトラップを海底に設置した。タイプIは底面に沈降するシルトの総量を、タイプIIは底面から10cmの範囲を移流してきた浮遊シルトのみを、タイプIIIは底面上30cmより上層の浮遊シルトのみを捕捉するものと考えられる。

⑤底質調査 シルト堆積域のA-8、A-12の2地点において、底質の鉛直不攪乱採取を行い、堆積シルトの含水比の鉛直分布を調べた。また、自動採水装置により採水した浮遊シルトとシルトトラップにより捕捉された堆積シルトの粒度組成についても、レーザー回折式の粒度分析装置を用いて調べた。

なお、対象とした現地の底泥は、中央粒径が $30\mu\text{m}$ とやや粗いものの、 Ba^{2+} 、 Mg^{2+} といった2価の吸着イオンが多く、また、別途実施した流動試験結果によれば、降伏値、粘度など基本的にはカオリンに類似した性質を持つことがわかっている。

3. 外力特性

3.1 調査期間中の入射波浪特性

調査期間中、8月にピーク有義波高3m以上の高波浪が3回来襲した。

- ① 6日18時：5.02 m, 13.4 s (台風13号)
- ② 16日22時：3.99 m, 14.0 s (台風14, 15号)
- ③ 27日20時：3.71 m, 8.0 s (台風17号)

このうちピーク波高が最も大きく、浮遊シルトの流入、堆積が最も顕著に生じた台風13号による8月3～10日の時化を対象に、以下の検討を行った。

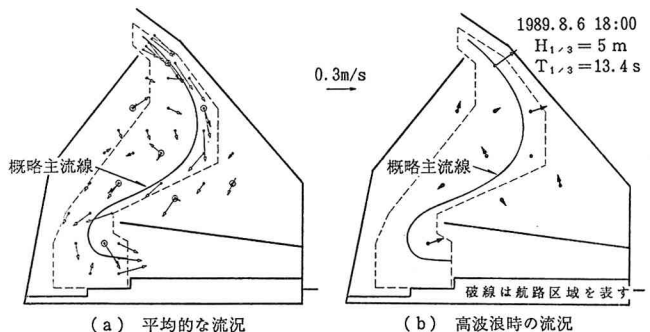
3.3 港内波浪特性

北防波堤は不透過構造となっているが、南防波堤はバブロックを用いた傾斜堤であるため、港内は港口からの回折波と南防波堤からの透過波の重合波浪場となっている。南防波堤の透過率を0.1とすれば、グリーン関数法による不規則波の港内波浪計算法(近藤ら, 1987b)により、港内の波高・波向分布を精度良く推定できることが確かめられた。なお、計算に用いた南防波堤の透過率は千秋ら(1969)の水理実験結果とも一致する。

3.3 港内流況特性

取水に伴う港内の高波浪時を除く平均的な流況を図—2(a)に示す。取水流の主流線は港口から取水口にかけて大きく逆S字を描いており、北防波堤背後ではスケールの大きな循環流が発生している。また、主流線の幅が狭く、主流線上では0.2～0.3m/sと速いが、主流線を外れると0.1m/s以下と急激に遅くなる。

これに対して入射波高が4mを超えると、図—2(b)に示すように、上述の取水による流況とは異なり、港外へ抜けるような流れが観測された。このような流れが発生した理由としては、港湾が砕波帯内に完全に包まれるため wave set-up により港内の水位が上昇し、これを補う流れとして、流速計センサーを設置した下層(底面から0.8m)で沖向きの流れが発生したのではないかと考えられる。



(a) 平均的な流況 (b) 高波浪時の流況

図—2 実測の港内流況

次に、電磁流速計による平均流速ベクトルの経時変化データを用いて、港内流況計算を行うに当たり重要なパラメータである渦動粘性係数 ε の評価を試みた。Taylor の乱流拡散理論の原義に立ち帰り、各地点毎に平均的な流れの方向に対して直角方向の流速変動より $\varepsilon(\text{m}^2/\text{s})$ を評価した。その結果、防波堤からの距離 $x(\text{m})$ に比例する関係 $\varepsilon=0.0025x$ が得られた。港内中央では $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であり、既往の水平乱流拡散係数と現象のスケールの関係（例えば土木学会，1985）に概ね対応した値になっている。

4. 浮遊シルトの港内堆積機構

4.1 港内濃度分布特性

濁度計による濁度の観測値と採水調査による浮遊シルト濃度の観測値の関係から、自記式濁度計による濁度の経時変化を浮遊シルト濃度の経時変化に変換した。台風13号による高波浪来襲時の A-2, A-6, A-8 および A-13 地点における浮遊シルト濃度の経時変化を図-3 に示す。最上段の A-2 地点の経時変化には自動採水調査の結果が、また、その他の地点については比較のため A-2 地点の濃度変化が併せて示されている。

(1) 港口部

港口部の A-2 地点では 1000 mg/l 以上の高濃度（自動採水装置では最大 2063 mg/l ）の浮遊シルト濃度が観測された。浮遊シルト濃度のピークは8月7日0時で、高波浪のピークに比べて6時間遅れて発生した。

自動採水装置によって捕捉された浮遊シルト濃度と中央粒径および 0.1 mm 以下の細粒子成分の含有率の鉛直分布を図-4 に示す。濃度の鉛直分布としては、通常、底面に近づくにつれて指数関数的に増加する分布を示すが、波高のピーク前後の6日16時と19時の結果をみると、濃度の鉛直分布はあまりなく、むしろ上層の方が高くなっている。これは、高波浪時の港外の厳しい波浪によってシルトが鉛直方向一様に巻き上げられたことと、図-2 (b) に示したように高波浪時に底層で港外へ抜ける流れが発生したことに関係しているのではないかと考えられる。これに対して、濃度ピーク時（6日22時）および波高減衰後（8日11時）には、下層で濃度が高くなる傾向を示している。

また、波浪のピーク時には下層で細砂の含有率が高くなっている。これは波によって底質の砂が巻き上げられたためであると考えられる。一方、濃度のピーク時には底層でも中央粒径 $20 \mu\text{m}$ の程度のシルトが流入しており、波高減衰後は、粒径の粗い成分は浮遊状態を保てずに先に沈降するため、粒径はさらに細くなる傾向を示す。しかしながら、流入浮遊シルトの中央粒径は平均的にみれば約 $30 \mu\text{m}$ である。

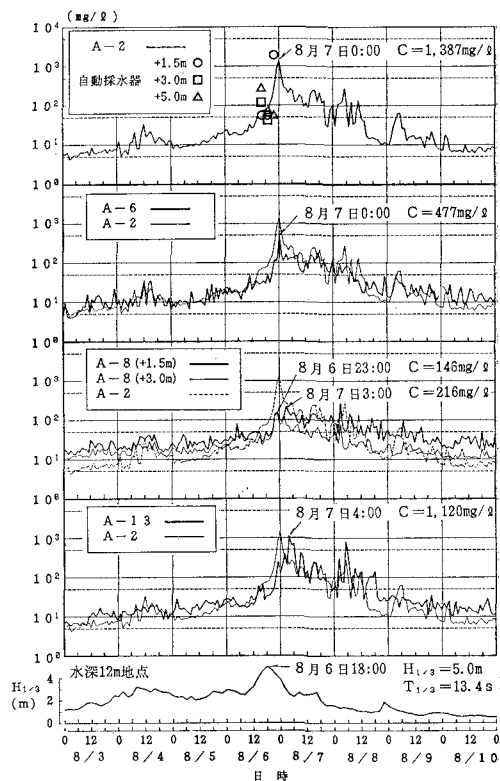


図-3 浮遊シルト濃度の経時変化

(2) シルト堆積域

中央粒径 0.1 mm 以上の細砂の堆積限界に相当し、砂・シルト堆積域の A-6 地点では、ピーク濃度は小さいものの、A-2 地点とはほぼ同じ濃度変化を示している。これに対して、中央粒径 0.1 mm 以下のシルト堆積である A-8 ならびに A-13 地点では、ピーク濃度の発生時間が A-2 地点より3～4時間遅れている。また、A-8, A-13 地点では、A-2 地点で濃度が高くなる（流入濃度が到達する）以前に、濃度が 20 mg/l 程度まで高

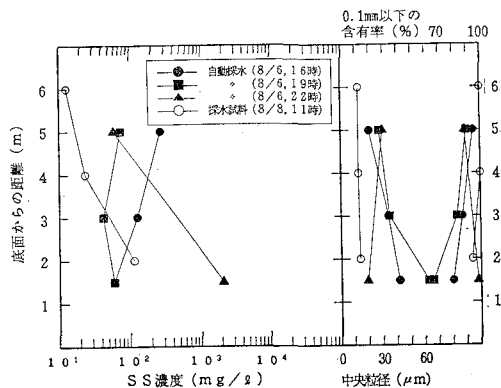
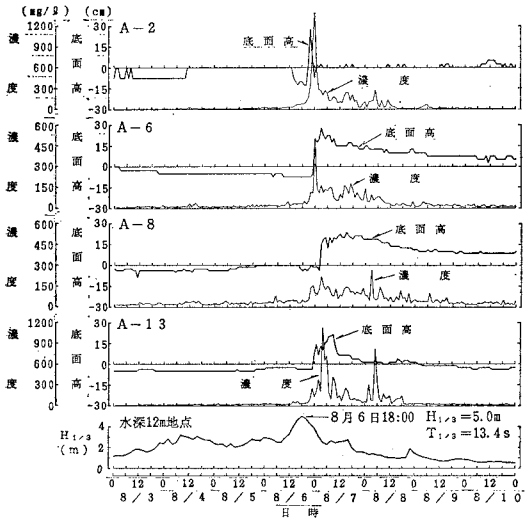


図-4 港口流入シルトの濃度と粒度組成の鉛直分布



図—5 底面高変化と浮遊シルト濃度変化の関係

くなっている。また、流入シルト濃度が低かった台風 14・15号来襲時にも、A-8地点より港内の奥で 20~100 mg/l と A-2 地点に比べて高い濃度が発生していた。このことは、高波浪時に堆積シルトの再浮遊が生じていることを示唆しているものと考えられる。

4.2 地形変化特性

港口部の砂堆積域の A-2 地点およびシルト堆積域の A-6、A-8、A-13 地点の底面高の変化と浮遊シルト濃度の変化および波高変化との関係を 図—5 に示す。底面高は、砂面計設置時点の底面高を基準に示されている。

まず、シルト堆積域においては、高波浪が来襲した 8 月 3 日以降やや侵食傾向を示すものの、浮遊シルト濃度がピークを示すと同時に、急激な堆積を生じており、流入シルトの沈降により港内堆積が生じる様子が明瞭に捉えられている。前者の侵食は、A-8 地点より港内奥で高濃度の浮遊シルトが到達する前にすでに濃度が高くなっていると考え併せると、堆積シルトの再浮遊によるものと考えられる。また、急激な堆積を示した後、2~3 日間かけて徐々に地盤高が減少する様子がみられるが、これは後述するシルトトラップ調査の結果と併せて

考えると、高含水比で堆積したシルトが圧密沈降して低含水比に変化したことを示しているものと思われる。なお、A-13 地点で堆積後急激に侵食しているのは、上述の圧密沈降の影響の他、この地点が取水口カーテンウォール前面の流速が速いところで、地形的にも深掘れが生じている所であるため、一旦堆積したシルトが再び巻き上げられたのではないかと推察される。

一方、砂堆積域の A-2 地点では波高のピーク前後で激しい地形変化を生じているが、濃度のピーク時には底面は侵食しており、濃度と地形変化は対応していない。これは、A-2 地点では波、流れの外力が大きく、高濃度のシルトが流入しても底面には沈降し得ないためである。

4.3 浮遊シルトの堆積特性

(1) シルトトラップによる捕捉量と粒度組成

シルトトラップ調査の結果を表—1 に示す。開口部が底面から 30 cm の高さにあるタイプⅢのトラップの捕捉量は、底面に開口部のあるタイプⅠ、Ⅱのトラップの捕捉量に比べて 1/2~1/5 と少ない。これは、シルト堆積域では濃度が底面ほど濃度が高く、鉛直分布が存在することを示している。また、タイプⅠとⅡで量的にはほとんど差がないことから、シルトの着底量は底面濃度で決まることがわかる。なお、A-12 地点で捕捉量が少ないのは、主流線からはずれているためであると考えられる。

また、捕捉シルトの粒度組成は A-6 から A-8、A-12 と港内奥へいくにつれて細くなる傾向を示す。また、捕捉口の位置の高いタイプⅢのトラップの方が細くなる傾向を示すが、港内奥の A-12 ではその差はない。砂移動可能域の A-6 地点を除けば、堆積シルトの中央粒径は概略 30 μm であり、港口部の A-2 地点で自動採水器によって捕捉した浮遊シルトの中央粒径にほぼ一致する。

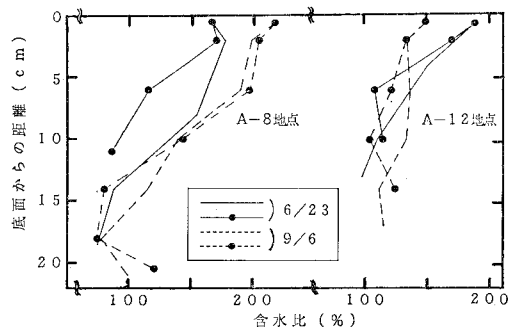
(2) 含水比の鉛直分布

シルト堆積域の A-8 および A-12 地点で、6 月 23 日と 9 月 6 日に行った不攪乱採取試料による含水比の鉛

表—1 シルトトラップ調査結果

地点	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
A-6 (7/25~8/19)	4.6kg (65 μm)	6.1kg (58 μm)	1.1kg (32 μm)
A-8 (7/26~8/21)	4.8 (36)	4.5 (34)	2.0 (34)
A-12 (7/26~8/21)	1.4 (25)	1.7 (29)	0.5 (29)

ただし、上段は土粒子捕捉重量 (kg)、下段は中央粒径 (μm) を表す。



図—6 含水比の鉛直分布

表-2 トラップ捕捉量から底面高変化量への換算

含水比 W (%)	見かけの密度 ρ (kg/m ³)	堆積シルト量 (kg)		
		3.0	4.0	5.0
100	1467	5.8cm	7.7cm	9.6cm
140	1370	7.4	9.9	12.4
180	1309	9.1	12.1	15.1

直分布を 図-6 に示す。調査は、いずれも 3 m 程度の高波浪の来襲後 7~10 日経過した時点で行ったものである。その結果によれば、堆積シルトの含水比は、表層で 150~220%, 平均的には 180% であるが、底面より深さ 10 cm 以深では 100% 程度に減少する。これと類似した結果が熊本地点においても報告されており、堆積シルトの含水比は表層で 200% 程度、深さ 5 cm 以深で 100% 前後である (鶴谷, 1989)。また、波・流れの大きな A-8 地点の方が底面表層 5 cm の含水比が高くなる傾向がみられる。

(3) 地形変化と含水比の関係

A-6 および A-8 地点に設置したシルトトラップの捕捉量の大半は、8 月 7 日の高濃度の流入シルトの沈降によって引き起こされたもので、図-5 に示した底面高の急激な変化に対応していると考えられる。そこで、

(2) の含水比の調査結果を参考に、シルトトラップの捕捉重量を水深変化に換算することを試みた。その結果を表-2 に示す。捕捉重量 M_s を乾燥密度 ρ_m とトラップの断面積 A で割ることにより、急激な堆積を生じる前の底面高を基準とした水深変化量 Δh を求めた。

$$\Delta h = M_s / (A \cdot \rho_m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_m = \rho_s / \{1 + (\rho_s / \rho_w)(W/100)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho = \rho_m \cdot \{1 + (W/100)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_s :シルト粒子の密度、 ρ_w :海水の密度、 W :含水比(%)である。 ρ_s としては、現地底泥の比重試験結果より 2550 kg/m³ とした。

シルトトラップの捕捉量は 4~5 kg であるので、堆積直後の平均含水比を 180%, 堆積 2~3 日後の平均含水比を 100% とすると、それぞれ約 15 cm, 約 10 cm となり、A-6, A-8 地点における堆積後の底面高の変化とも概ね一致する。したがって、堆積後の底面高の減少は、主として圧密沈降による含水比の減少に起因するものと判断される。

以上、取水港湾におけるシルテーションの特徴が典型的に現われた調査結果について述べた。しかしながら、約 1 週間後に発生した台風 14, 15 号来襲時には、その次の台風 17 号による高波浪に比べて波高が大きく、継続時間も長かったにもかかわらず、浮遊シルトの港口流入量は少なく、顕著な港内堆積を示さなかった。このこと

は、海域のシルトの存在量に限りがあり、浮遊シルトの発生量には高波浪の履歴の影響があることを示唆しているものと考えられる。港口流入濃度の推定は、予測上、重要な入力条件となるので、その原因については今後更に検討しなければならないと考えている。

5. あとがき

現地観測によって、流入浮遊シルトの移流・沈降・堆積現象のみならず、港内堆積シルトの高波浪時の再浮遊現象や堆積直後の圧密沈降現象などを明確に捉えることができた。したがって、シルテーションモデルの現地検証を堆積機構の各過程で行うことが可能であり、極めて有益なデータが蓄積されたと考えている。しかしながら、波による底泥の質量輸送に関する現地データは得られていない。取水港湾においては、港口付近は外力が大きく、砂の堆積域であるため、底泥の質量輸送は港内へのシルトの流入・堆積量には直接関係しないが、港内での堆積分布には重要な役割を果たすと考えられるので、今後、この点に関しても現地データの取得が望まれる。なお、現在、取水港湾における実用的なシルテーションモデルを構築すべく、現地調査と並行して、底泥の物性に関する基礎実験や波・流れ共存場における現地泥の沈降・巻き上げ実験を進めているところである。

最後に、本研究を進めるに当たり、数多くの貴重な御意見を賜った堀川清司東京大学名誉教授、渡辺 晃東京大学教授、三村信男茨城大学助教授ならびに磯部雅彦東京大学助教授をはじめとする「発電所専用港湾内堆積防止工に関する研究」検討会(主査:鹿島遼一電力中央研究所首席専門役)の委員の方々に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 大坪国順・村岡浩嗣 (1987): 底泥の再浮上現象の現地観測およびそのシミュレーション, 土木学会論文集, 第 387 号/II-8, pp. 189~193.
- 近藤浩右・清水琢三・金山 進・鈴木義和・丸山康樹・鹿島遼一 (1987a): 取水港湾におけるシルテーションについて, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 392~396.
- 近藤浩右・清水琢三・山田耕一 (1987b): グリーン関数法を用いた港内波方向スペクトルの計算法, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 106~110.
- 近藤浩右・清水琢三・金山 進・村山恒雄 (1988): 取水港湾における砂およびシルトの港内堆積予測, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 367~371.
- 千秋信一・鹿島遼一・島田真行・斎藤昭三 (1989): 福島原子力発電所海岸構造物の水理設計の検討, 電力中央研究所, 技術研究所依頼報告, No. 69551, 27p.
- 鶴谷広一 (1989): シルテーションによる港湾埋没の予測手法, 平成元年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 101~153.
- 土木学会 (1985): 水理公式集, 昭和 60 年版, p. 46.
- Mimura, M. (1989): Recent Japanese studies on cohesive sediment transport, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 5, pp. 101~115.