

## 底泥の静水中の沈降特性に関する実験

口田 登\*・足立一美\*\*・楠田哲也\*\*\*・金山 進\*\*\*\*

### 1. まえがき

有明海の南東部、白川河口と緑川河口の間に挟まれた熊鮑海岸の地先に、流通港湾（熊本港）の整備が鋭意進められることとなっている。当該海域には、筑後川を始めとする大小の河川が長年に亘り背後山地の土砂を湾内に供給したことから形成された。潟土と呼ばれる青灰色の粘土またはシルトを主体とした軟弱粘性土層が厚く堆積している。

一方、湾内に発生する波および流れの影響により、当該海域の表層泥は浮遊、移動、沈降、再浮遊を繰り返しており、従って港湾整備に当っては、各種施設の適正な機能維持を図る上での十分な配慮が必要である。その一つとして、航路、泊地の埋没防止・低減対策に係る技術的な検討が重要であるが、海底における底泥の挙動は、同海域の水質、外力条件および底泥の特性により大きく変化することが知られていることから、現地条件を反映させた方法による底泥の浮遊、移動、沈降等の現地特性を明らかにする必要がある。

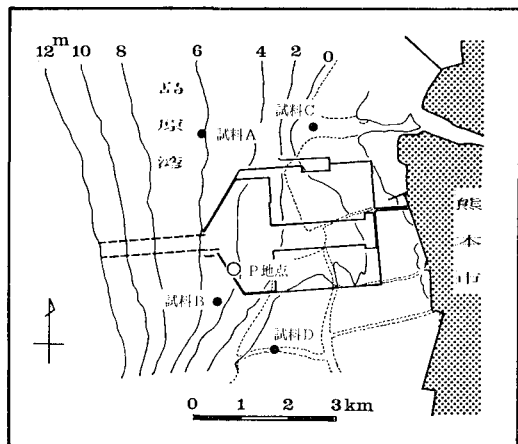


図-1 熊本港計画平面図

運輸省第四港湾建設局においては、現地での一連の現象特性を解明するための調査試験を実施中であるが、本稿では、本稿ではこのうち沈降現象に注目した大規模室内試験結果を報告するとともに、一、二の考察を加えることとする。

### 2. 熊本港周辺海域の底泥分布と巻き上げ濃度

熊本港の建設予定地（図-1）周辺の海底に堆積している底泥表層の粒度組成の調査結果（昭和 59～60 年度九州大学工学部、四建八代港工事事務所実施）から、その平面分布をとりまとめたものを図-2に示す。この結果によれば、水深 -4m 以深の底泥表層はシルト系、それ以浅では砂となっており、より岸に近いところでは再びシルト系が見られる。

また、図-1に記した4地点（A、B、C、D）において、コアサンプラーで鉛直方向（70 cm～80 cm）に採取した試料を、5～10 cm 毎に分割して土質試験（含水率、土粒子比重、平均粒径、強熱減量）も行った。このうちAおよびBの両地点は図-2で見られるようにシルト系の底泥であり、CおよびD地点は砂の領域にある。土質試験結果の代表例を図-3に示す。A地点の底泥は含水比および強熱減量が高く、平均粒径は  $10 \mu\text{m}$  程度と微細であるのに対して、C地点の底泥表層はその逆の傾向を示していることがわかる。

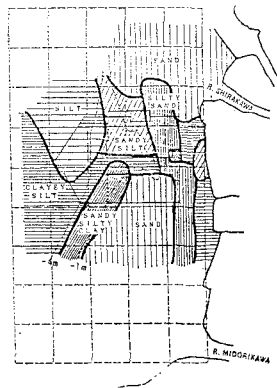


図-2 表層の粒度組成の平面分布

\* 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所次長  
 \*\* 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所調査課長  
 \*\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科  
 \*\*\*\* 正会員 工修 日本海洋コンサルタント(株)

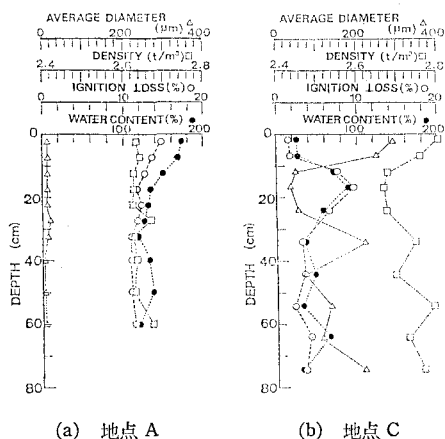


図-3 土質試験結果鉛直分布

こうした表層底泥が、現地では波や流れの影響を受けて浮遊、沈降を繰り返しているものと考えられるが、荒天時に現地で生じている海水中の懸濁粒子濃度のオーダーを把握するために、四建八代港工事事務所が、昭和59年12月、昭和60年1、2、3月の各荒天時間帯において、図-1中のP地点で行った調査結果の代表例を図-4に示す。この現地調査は、P地点に設置されている。観測塔を使用して、あらかじめ自動採水器を鉛直方向の深度別の6箇所に設置しておき、荒天時間帯でそれぞれ3回ずつ採水を行い、その試料を分析に供したものである。分析項目は、懸濁粒子濃度（環境庁告示第59号付表6）、濁度（JIS-K 0101 9.4）、粒径分布（コールターカウンター法）である。

図-4は昭和60年1月28日の観測データであるが、いずれの時間においても懸濁粒子濃度の鉛直分布は、概ね下層層急激に高くなる傾向を示しており、濃度最大値は12時の最下層で4,200 mg/lとなっている。また、3月8日20時の観測においては最下層で今回のデータ中

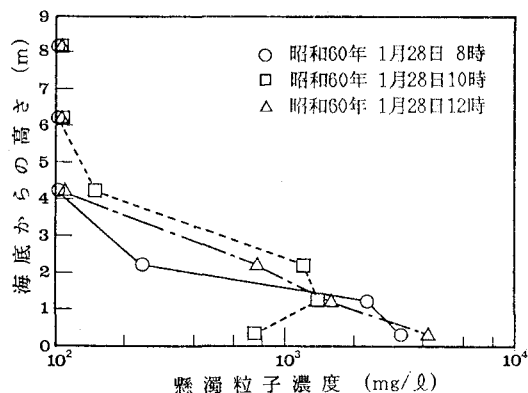


図-4 現地における懸濁粒子濃度鉛直分布の一例

最大の10,000 mg/lが測定されている。なお後述するように室内沈降実験の初期濃度はこの10,000 mg/lの観測実績をもとに設定した。

図-5は1月28日12時の試料をコールターカウンター法により粒径分析した結果を例示したものである。この結果より、現地海水中の懸濁粒子の粒径は、ほぼ5～50 μmに分布しており、10 μm前後の粒子が多いことが窺われ、また図-4(a)の底泥表層の平均粒径と良く一致していることがわかる。

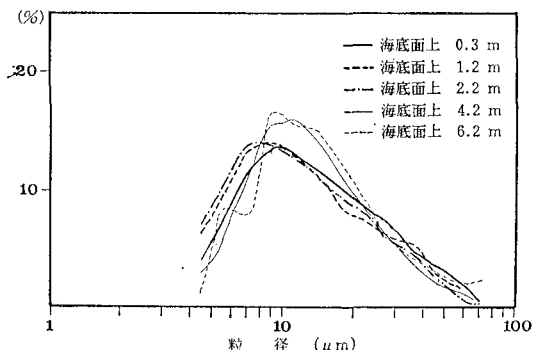


図-5 懸濁粒子粒径分布の一例

### 3. 現地底泥による沈降実験

#### 3.1 沈降実験に供した底泥の物性値

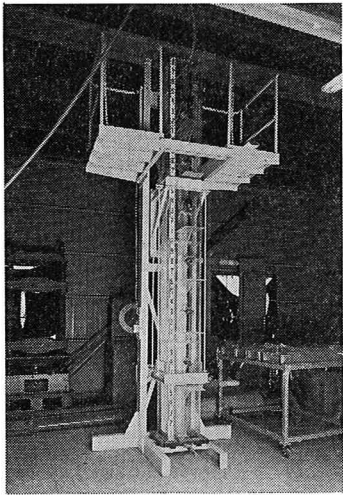
熊本港周辺海域底泥の沈降特性を調べるため、前述の4地点(A, B, C, D)から代表的試料を採取して沈降実験に供した。各試料とも全ケースの実験に必要なとされる総量をあらかじめ混練し、同一種の試料の物性値は各ケースとも同じになるようにした。このようにして調整された供試底泥の物性値を表-1に、粒度組成を図-6に示す。

今回は、粘土、シルトの含有率の高い試料AおよびBによる実験結果を中心に報告するが、この2つの試料に関しては吸着陽イオンに関する測定を行っており、この結果を表-2に示す。粘性性微細粒子は一般には一次粒子が凝集して形成されたフロックとして沈降するため、フロッキュレーションの生じやすさ、すなわち凝集性が、沈降特性を支配する重要な因子の一つであるが、土粒子の周囲に吸着されている交換性陽イオンの組成は、有機物含有率などと並んで、底泥の凝集性を左右する一要因である。一般には多価陽イオン( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ など)の割合が大きいほど、また、吸着陽イオンの全量が小さいほど土粒子は凝集性に富むと言われている<sup>1)</sup>。表-2より底泥A, Bはともに $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ の吸着量が陽イオン交換容量(CEC)の80～90%を占めており、その意味では凝集性に富んだ試料であると言える。CEC

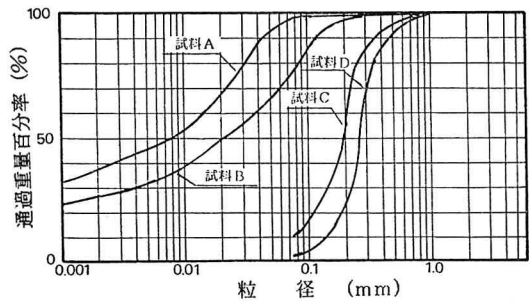
自体は、試料AとBで異なるが、両試料は粒度組成などにおいても相違点が目立つので、CEC が単独で沈降特性に及ぼす影響について論ずることは今回の結果からだけでは困難である。しかしながら、吸着陽イオンの組成は底泥の沈降特性に関する多くのデータを系統的に整理する際には、土質試験による物性値とともに重要な指標となると思われるので、ここに示した。

表一 供試底泥の物性値

| 底質の種類 | 土粒子比重<br>$G_s$ | 自然含水比<br>$w$ (%) | 粒度組成 (%) |      |      | 強熱減量<br>V.S.S.<br>(%) |
|-------|----------------|------------------|----------|------|------|-----------------------|
|       |                |                  | 砂        | シルト  | 粘土   |                       |
| A     | 2.626          | 169.3            | 2.1      | 52.2 | 45.7 | 11.0                  |
| B     | 2.681          | 88.6             | 24.5     | 44.3 | 31.2 | 6.6                   |
| C     | 2.762          | 29.9             | 89.5     | 10.5 |      | 1.3                   |
| D     | 2.769          | 28.9             | 97.1     | 2.9  |      | 2.2                   |



写真一 大型沈降実験装置



図一六 供試底泥の粒度組成

表二 供試底泥の吸着陽イオン組成

| 測定項目<br>試料 | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^{+}$ | $K^{+}$ | $Al^{3+}$ | CEC  |
|------------|-----------|-----------|----------|---------|-----------|------|
| A          | 26.0      | 10.1      | 1.58     | 1.59    | <0.01     | 43.9 |
| B          | 18.7      | 5.05      | 0.70     | 0.91    | <0.01     | 26.5 |

3.2 実験方法

沈降筒を用いて沈降速度の測定を行う場合、筒の高さ、採水深度によって測定結果が異なることが、従来から指摘されている<sup>2)</sup>。室内実験においては、現地海域での現象をできるだけ忠実に再現できるように実験条件の設定が要求されるので、沈降筒はできれば現地水深と同規模の高さを有し、鉛直方向には現地と同スケールの現象を再現できるように大型のものを使用することが望ましいとされている。しかしながら、このような大型の沈降筒を用いて沈降速度を測定する際には、

- 1) 筒内の濃度が空間的に一様となった初期状態を実現することが難しい。
- 2) 装置が大きいため水温の均一性の確保が難しい。

3) 筒内平均濃度の経時変化から沈降速度を求める方法を採用した場合、大量の採水が必要となる。などといった問題が立ちはだかることになる。

今回はこのような問題点に適宜対処しながら、沈降高さ 3.8 m の大型沈降筒による実験を行い、熊本港周辺海域底泥の沈降特性の把握を試みた。

沈降実験は、四建実験場の大型沈降実験装置を用いて行った。写真一にその概要を示す。

沈降筒本体は透明アクリル製で 385 cm の高さを有し、最大 380 cm の沈降高で実験を行うことができる。沈降管は一辺 35 cm の正方形断面の外筒に直径 25 cm の円形断面の内筒がフランジによって支持された二重筒構造となっている。内筒と外筒の間の空間は恒温水槽の役割を果たしており、内筒に泥水を投入して実験を行う際、この空間に水道水を入れることによって沈降試料の温度の急激な変化を抑止することができる。

内筒と外筒を接続するフランジを通して直径 9 mm の採水孔が設けられており、末端の採水バルブの開閉によって内筒中の泥水を採取することができる。この採水装置は全部で 7 箇所 50 cm 間隔で設けられており、380 cm の沈降高で実験を行った場合、泥水表面から 50、100～350 cm の計測深度となるように配置されている。

また、内筒に設けられた攪拌翼を回転させながら供試泥水を投入することによって空間的に均一な初期濃度を実現することができる。初期濃度は、現地での懸濁粒子濃度測定結果をもとに、1、5、10、20、50 g/l の 5 種類を設定した。

実験には 200 l という大量の供試泥水を必要とするので、これらは沈降筒外でいくつかに分けて作成し、沈降筒の攪拌翼を回転させながら水中ポンプによって筒内に投入する方法をとった。泥水高さが 380 cm に達した時

点から約 30 秒後に攪拌を止め、初期状態とした。粗粒成分を多く含む試料の場合、筒外での泥水作成の際に電動攪拌機によっても巻き上らなかった成分を別の容器に集めておき、細粒成分からなる泥水を沈降筒へ投入し終った後、筒頂部の粗粒成分投入口から別途投入し、これらが筒内にほぼ均一に分散した時に沈降筒の攪拌翼を止めて初期状態とした。攪拌を止めた瞬間を沈降開始時刻とし、 $t=0, 5, 15, 30, 60, 240$  分および沈降終了時に 7 箇所（排水孔）から試料泥水を採取し、SS (JIS-K 0101) の測定法に準拠して濃度を測定した。

また、実験中は、泥水表面からそれぞれ 100, 200, 300 cm の深度に温度センサーを取り付け、泥水温度の時間的・空間的変動をチェックした。これによると一回の沈降実験中の各深度における温度変化はほぼ  $1^{\circ}\text{C}$  以内、沈降筒上部と下部での温度差も  $1^{\circ}\text{C}$  以内で、下層部が上層部よりも高温になることはなかった。

なお、供給泥水の溶媒として使用した海水の塩分濃度は  $36\sim 37\text{ g/l}$  であり、これは河川などからの淡水流入による塩分濃度の低下が起っていないものである。

### 3.3 実験結果

#### (1) 懸濁粒子濃度鉛直分布の経時変化

懸濁粒子濃度鉛直分布経時変化の代表例を図-7 に示す。粘土、シルト成分に富む試料 A, B の場合、今回の実験方法により、空間的に均一な初期濃度はほぼ満足できる精度で実現されていると言える。

今回の実験では、初期濃度が約  $10,000\text{ mg/l}$  を越えると懸濁水と上澄水との間に明瞭な境界面が観察された。

ただし、初期濃度約  $50,000\text{ mg/l}$  のケース以外は沈降初期においてこの界面は不明瞭であった。図-7 の (b) と (d) はともに界面が認められたケースであるが、濃度の鉛直分布形状が急激に変化している部分が見られ、特に試料 A において顕著である。これは界面における濃度の急変に対応している。試料 A の

場合、下層部で土粒子の集積が起こり濃度が一旦上昇しているが、その後、界面が沈下して再び減少している。試料 B は界面が見られるケースでも、濃度鉛直分布の経時変化は自由沈降のもの（図-7 (a) および (b)）に比べて試料 A ほど明確な相異は認められない。これらの結果から試料 A のほうが B よりも凝集性に富んだ底泥であるということができよう。

前述したように  $10,000\text{ mg/l}$  という濃度は現地において荒天時に実現される値であるが、このような高濃度の懸濁水は静水中において、ある程度の界面の形成が生じるものと言える。

#### (2) 沈降速度

自由沈降、界面沈降の区別なく、沈降速度の加積重量分率を求めた。界面沈降を呈したケースでは、粒子の沈降速度というよりは土粒子分散系の沈降速度に相当するものを求めていることになる。

図-8 に示した測定例はいずれも計測深度 200 cm におけるものである。図中の点線は試料の粒度組成から、Stokes の式により求めた沈降速度加積曲線である。ある程度  $F(w)$  の値が大きい範囲では、初期濃度  $C_0$  による相違は目立たず、また、Stokes 式による結果とも良好な一致を示すが、 $F(w)$  の値が、試料 A では約 85%、試料 B では約 65% よりも小さくなると  $C_0$  による曲線形の相違が見られ、いずれも Stokes 式で与えられたものに比べて沈降速度の分布は大きなもののほうへ偏っている。このことから、熊本港周辺海域の軟弱底泥の場合、静水中での沈降速度が初期濃度によって変化するのはい

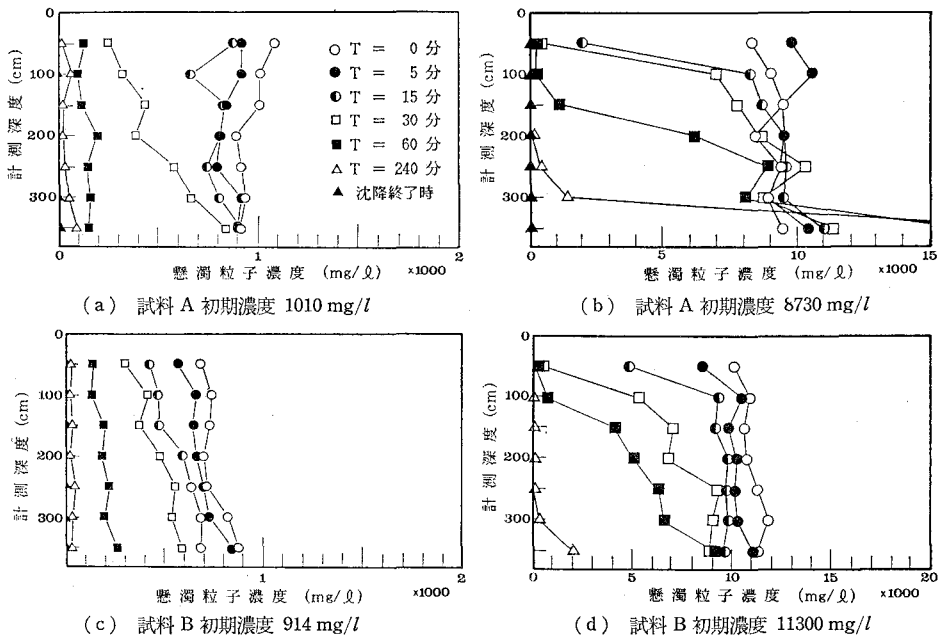


図-7 懸濁粒子濃度鉛直分布の代表例

る程度細かい粒子に限られるということが推測される。試料の粒度組成からこの値を推定すると約  $40 \sim 50 \mu\text{m}$  ということになる。この結果を図-5 と照合すると、現地海域に浮遊する懸濁粒子は、このような微細粒子成分で構成されており、これらは静水中では非常に活発な凝集性を示すものであるということになる。

### (3) 初期濃度と沈降速度の関係

初期濃度の違いが沈降速度に

及ぼす影響について検討するため、沈降速度の中央値  $w_{50}$  を初期濃度に対して整理したものが図-9である。

図中には、Owen が英国 Severn 川、Avonmouth の底泥を用いて得た結果を実線で示してあるが、オーダー的には当海域底泥のものと近い値をとっている。また、Owen の結果によれば  $w_{50}$  は  $C_0 = 6,000 \sim 8,000 \text{ mg/l}$  付近で最大値を示すが、今回のものは試料Bの場合、初期濃度によらずほぼ一定、試料Aの場合は高初期濃度領域で濃度とともに減少する傾向は認められるが、ある濃度で最大値を示すということとはなかった。これに対して、図-10に示すように、細粒成分の代表的沈降速度と考えられる  $w_{16}(F(w)=16\% \text{ となる沈降速度})$  は  $C_0 = 5,000 \text{ mg/l}$  付近で最大値を示した。最大値を示す点の左側はフロックなどの浮遊粒子がそれぞれ単独に沈降する自由沈降領域、右側はこれらが干渉しあったり、系全体に及ぶ構造を形成したりしながら沈降する干渉沈降及び圧縮沈降の領域である。このことから当海域底泥の場合も、細粒成分は、凝集性に富む粘着性微細粒子の典型的な特性を示すが、凝集性の影響が比較的小さい粗粒成分がこれに混入しているため、全粒径成分を代表する沈降速度

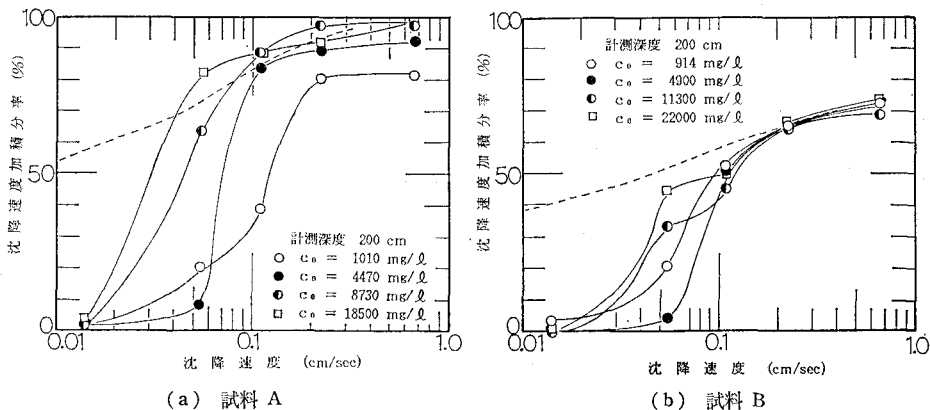


図-8 沈降速度加積曲線の代表例

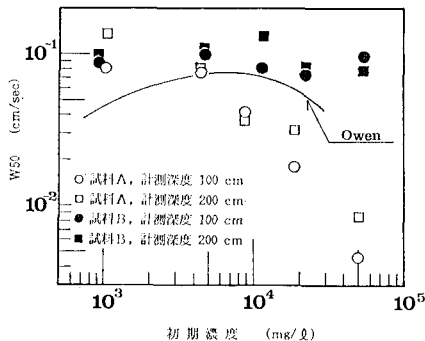


図-9 初期濃度と中央沈降速度  $w_{50}$  の関係

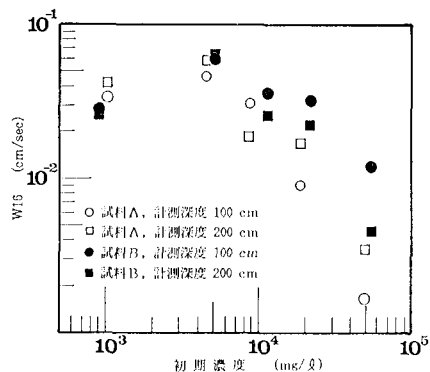


図-10 初期濃度と  $w_{16}$  の関係

である  $w_{50}$  に関しては、図-9のような結果になったものと考えられる。

## 4. あとがき

軟弱底層を形成する粘着性微細粒子の挙動において一つの基本的なプロセスである沈降という現象を詳細に検討するために、鉛直方向には現地とはほぼ同スケールで現象を再現できると考えられる大型の沈降筒を用いて沈降実験を行った結果、微細土粒子の静水中における沈降特性には濁質濃度が多大な影響を及ぼすことが確認され、また、今回実験に供した熊本港周辺海域底泥のように広範囲に及ぶ粒度組成を有する場合、濁質濃度の影響を大いに受ける細粒成分の沈降と、これとは独立した粗粒成分の沈降が共存して進行することが判った。

## 参考文献

- 1) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, 1983.
- 2) 細川恭史・堀江 毅・三好英一・加藤道康: 沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について—数種の測定法の比較—, 港湾技研資料, No. 433, 1982.