

水俣湾における底泥動態の現地観測

矢野真一郎* ・多田 彰秀** ・押川 英夫***
中村 武弘**** ・赤木 洋勝***** ・松山 明人*****
富 安 卓 滋***** ・Rudolf Rajar***** ・Milena Horvat*****

水俣湾の底泥中に含まれる微量残留水銀が八代海へ流出し拡がっている。これら微量残留水銀動態の予測手法の確立を目指して、まず水俣湾内における底泥の輸送構造の把握を行うための現地観測を実施した。ADCP と後方散乱光式濁度計、波浪計を 40 日間海底に設置し、SS、流速、波浪および潮位などの現地連続観測を行い、ADCP の反射強度分布から SS の鉛直分布を推定した。観測期間中における SS の水平方向 Flux の算出を試みたところ、水俣湾から八代海へ向けて流出していることが確認された。また、既知の水銀濃度に基づいて水俣湾から流出する水銀量の推定を試みた結果、一年間に総水銀で 55~77 kg が八代海へ流出していると見積もられた。

1. はじめに

熊本・鹿児島両県にまたがる八代海沿岸において、「水俣病」は、水俣市内にある化学工場のアセトアルデヒド製造過程において触媒として使用した無機水銀から副生され、工場廃水と共に自然海域中に放出された有機水銀（メチル水銀）が生物濃縮された食用魚や二枚貝類を捕獲して食べたことによる中毒症状として発生した。水俣湾では、1977 年から 1990 年にかけて熊本県の実環境修復事業として除去基準（総水銀 25 ppm）以上の残留水銀を含む底質を浚渫し、埋立地を造成する工事が行われており、現在では安全宣言が出されている（水俣市立水俣病資料館、2000）。しかし、未浚渫の海域（特に最湾奥部の袋浦）における底泥中には 5 ppm 以下の微量水銀（自然界のバックグラウンド濃度：0.06 ppm 程度）が残留し、それらが水俣湾から八代海中央部および八代海南部にかけての東岸に沿って広がっていることが確認されている（Tomiyasu ら、2000）。微量有機水銀の毒性については、マグロなどの大型魚類や鯨への生物濃縮が懸念されており、特にそれらを摂取した母胎からの間接的な曝露が胎児に健康障害を引き起こす可能性が指摘されている。微量残留水銀の動態を把握するためには、1) 底質輸送構造の把握、2) 残留水銀の溶存態と懸濁態の割合の解明、3) 塩分濃度、溶存酸素濃度および有機物量などのメチル化への影響評価、4) 流動、物質輸送および底質移動の高精度なシミュレータの開発などが必要とされている。

沿岸域や河口域における底質移動の観測が、近年非常に盛んに行われている。例えば、川西ら（1998）による

広島湾における一連の研究や横山・藤田（2001）や山下ら（2002）などによる河口域における研究があげられる。これらの研究では、超音波ドップラー流速計（以下 ADCP）と濁度計を併用した連続観測が実施されており、ADCP から得られる反射強度の鉛直分布から濁度や SS 濃度の分布を算出し、ADCP の流速データと合わせて浮遊物質に関する輸送フラックスの推定が行われている。そこで、本研究では、ADCP と濁度計を併用した観測

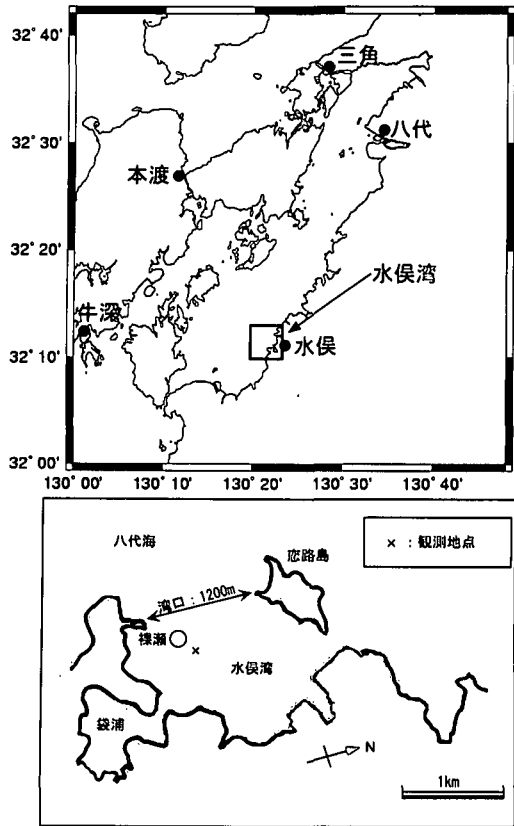


図-1 観測地点
（上図：水俣湾の位置、下図：水俣湾）

- * 正会員 博(工) 九州大学学術研究員 大学院工学研究院環境都市部門
- ** 正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科
- *** 正会員 修(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門
- **** 正会員 博(工) 長崎大学教授 環境科学部環境科学科
- ***** 薬 博 環境省国立水俣病総合研究センター
- ***** 博(農) 環境省国立水俣病総合研究センター
- ***** 博(理) 鹿児島大学助教授 理学部
- ***** 工 博 Ljubljana 大学教授 土木測地工学科
- ***** 化 博 Jozef Stefan 研究所所長 環境科学部

手法を水俣湾において適用し、微量残留水銀を含む底質の輸送構造を把握することを目的に、流れ、波浪、濁度などの連続観測を実施し、それらの観測結果より底質移動量の算出を試みた。

2. 現地観測の概要

2002年11月8日～12月17日の40日間に、図-1に示す水俣湾内の裸瀬と呼ばれる常時干出した瀬から100 m程度離れた測点(32°11'11"N, 130°22'06"E, 平均水深16 m程度)において、ADCP (Nortek社製, Aquadopp Profiler 1000 kHz) 1台、自記式波浪計(アイオーテック社製, WaveHunter-99S) 1台、ワイパー付きの後方散乱光式メモリー濁度計(アレック電子社製, Compact-CLW) 6台を図-2に示すように海底設置し、連続観測を行った。なお、設置地点は10～15 cm程度の浮泥層があり、最下部の濁度計から浮泥層表面までの距離 a は、設置時で4 cm、撤去時で14 cmであった。本研究では、設置時における浮泥層表面を基準海底面として考える。各計測器のサンプリング時間は、ADCP: 20分毎に2分間、WaveHunter: 1時間毎に20分間、濁度計: 10分毎に30秒間とし、ADCPの測定層厚、ブランクおよびヘッドの海底面からの高さは、それぞれ50 cm, 40

cm, 15 cmと設定した。すなわち、第1層の中心位置は80 cmとなる。ADCP、濁度計および波浪計は相互干渉を防ぐためにそれぞれ5 m程度離して設置された。また、濁度計からSS濃度を換算するために、観測機器撤去時に底層水のサンプリングを行った。

3. 観測結果と考察

(1) ADCPの反射強度とSS濃度の関係

超音波を用いた海水中的散乱体量の推定には、次の関係式が用いられる(飯田, 1994)。

$$I_e = I_0 \frac{10^{-2\alpha R}}{R^2} \rho_v \sigma_{bs} \frac{c\tau}{2} \Psi \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 I_e , I_0 : トランスデューサーの受波強度と送波強度 [W/m²]、 α : 吸収係数 [dB/m]、 $R = r/\cos\theta$: 音軸上でのトランスデューサーから散乱体までの距離 [m] (r : 測定層までの距離、 $\theta = 25^\circ$: トランスデューサーの傾斜角度)、 ρ_v : 散乱体の数密度 [個/m³]、 σ_{bs} : 散乱体群の平均後方散乱断面積 [m²]、 c : 海水中的音速 [m/s]、 τ : 超音波のパルス幅 [s]、 Ψ : 等価理想ビーム幅 [Sr] である。

式(1)をdB表記にすると、次のソナー方程式となる。

$$SV = RL - SL + TL - A \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $SV = 10 \log s_v = 10 \log \rho_v \sigma_{bs}$: 体積後方散乱強度、 $RL = 10 \log I_e$: 受波レベル (ADCPが記録する反射強度)、 $SL = 10 \log I_0$: 送波レベル、 $TL = 20 \log R + 2\alpha R$: 球面拡散と海水の吸収による伝搬損失、 $A = 10 \log (c\tau\Psi/2)$ である。

ADCPの受波レベル RL から散乱体量を推定するためには、(2)式中の $(SL+A)$ と TL を評価する必要がある。まず、 TL については、吸収係数 α をFrancois・Garrison (1982)の実験式を用いて推定した。 α は、水温 T 、塩分濃度 S 、周波数 f 、海水のpHおよび水深 D の関

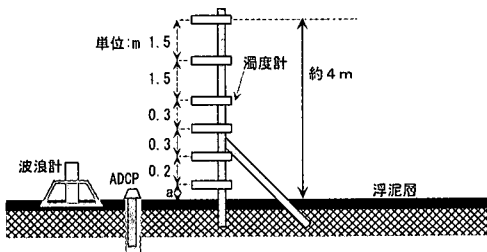


図-2 観測機器設置状況の概略図

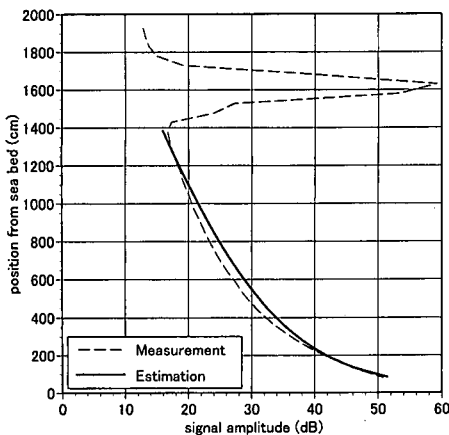


図-3 反射強度の観測値と推定値の比較

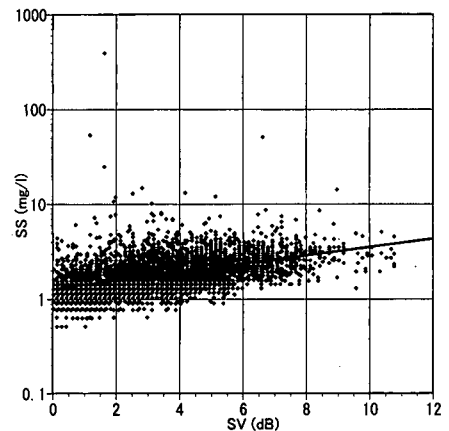


図-4 SVとSS濃度との相関(実線は回帰曲線)

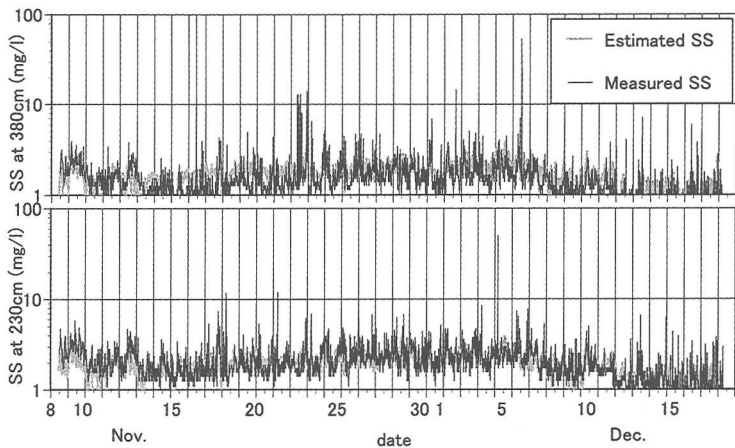


図-5 SSの推定値と観測値の比較 (上段：380 cm 層，下段：230 cm 層)

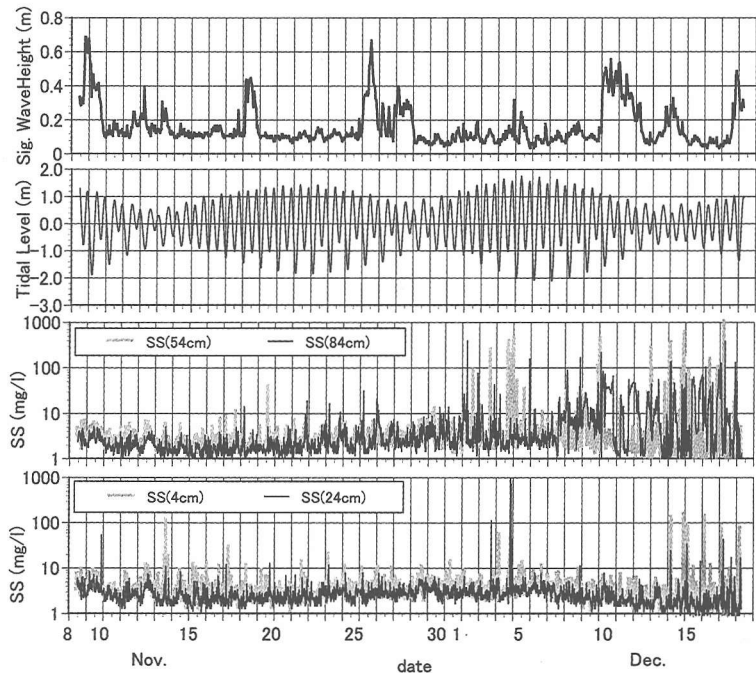


図-6 観測結果の時系列 (上段より有義波高，潮位，SS (84,54 cm 層)，SS (24,4 cm 層))

数となる。本研究では、 $pH=8$ および $D=16\text{ m}$ と仮定し、別途連続観測期間中に行われた成層調査(2002 年 12 月 2 日, 06:00~18:00 で 1 時間毎に実施)の結果から水温と塩分の鉛直分布がほぼ一様であったことに基づいて、その時の塩分の平均値 $S=33.5$ と観測期間中の水温 $T=21\sim15^{\circ}\text{C}$ (濁度計の水溫記録)の範囲内で平均的な値を算定したところ、 $\alpha=0.317\text{ dB/m}$ となった。次に、 $(SL+A)$ の評価を試みた。本来ならば、 $(SL+A)$ の値はセンサーの特性により決定される。ここでは、それらの情報が無いため、濁度が 1 FTU 以下の時 (11 月 15 日

05:00~07:00, 水深 16.8 m 程度)の ADCP の反射強度測定結果より推定した。その結果、 $(SL+A)=49.2\text{ dB}$ となった。本研究で使用した ADCP は反射強度の単位が count であるので、dB への変換をファクター 0.45 dB/counts で行った。また、反射強度は 3 つのトランスデューサーの平均値を用いた。図-3 に測定値の RL と (2) 式より得られる推定値の比較を示した。両者の最大相対誤差が 7.3% とよく一致していたので、他の観測結果についても同様に補正し、 SV を推定した。さらに、ADCP のサイドローブ干渉域は、 $\theta=25^{\circ}$ の場合で、センサーヘッ

ドから水面までの深さ D_* の 9.4% 程度である。一方、反射強度の分布は D_* の 15% 程度まで影響していたので、表層 15% の範囲は除外して考えた。なお、TL には懸濁体粒子による散乱の効果も含める必要があるが、横山・藤田 (2001) によると濁度が数百 ppm 以上の高濁度状態の時のみ影響し、低濁度状態では無視できると考えられるので、本研究では考慮しなかった。

平均後方散乱断面積が一定である、すなわち懸濁体粒子の粒度分布特性に大きな変動がないと仮定すると、体積後方散乱係数 s_0 は懸濁体粒子の濃度に比例する。しかし、水俣湾湾口部で中央粒径が $\phi = 3.91$ ($d = 0.0665$ mm) (Rifardi ら, 1998) という報告があるものの、本観測では底泥の粒度分布に関する正確な情報を得ていないため、体積後方散乱強度 SV と濁度計から得られる SS 濃度との相関から関係式を求めた。なお、撤去時に採水した底層水を用いて濁度計の検定を行い、濁度を SS へ換算した。ADCP の設定条件から、最上部から 2 つ目までの濁度計 (設置位置は海底面上 234 cm と 384 cm) を対象に相関を調べた。図-4 に SV と SS の相関図を示す。図中に実線で示した回帰式は、

$$SS = 1.3 \exp(0.1 SV) \dots\dots\dots (3)$$

相関係数 $r^2 = 0.23$ となった。よって、(2) 式と (3) 式、並びに決定された α と $(SL + A)$ の値を用いることで、反射強度データより SS 濃度の推定が可能となった。

(2) 底泥動態の観測結果について

図-5 に反射強度から推定した SS 濃度と濁度計から得られた SS 濃度の時系列を示す。 SS が 4 mg/l 以下の低濃度時には、両者は良い一致を示している。一方、それ以上高い濃度では両者の相違は著しい。これは、底泥粒子の粒径が小さいため今回使用した ADCP (1000 kHz) の発信する超音波の波長が約 1.5 mm 程度で応答性が良くないのに対し、濁度計の赤外線波長は 880 nm と小さく、その応答が良いためと考えられる。

図-6 に、WaveHunter より得られた有義波高、ADCP の水位センサーから得られた潮位、最下部から 4 つ目までの濁度計 (設置位置は海底面上 4 cm, 24 cm, 54 cm および 84 cm) から得られた SS の時系列を示す。観測期間には 3 度の小潮期と 2 度の大潮期が含まれている。また、観測期間中の波浪は比較的穏やかであり著しい暴浪はなかった。観測地点の水深が約 16 m 程度と深いこともあり、今回観測された範囲の波浪状態では SS の上昇と有義波高には顕著な相関性は認められなかった。

図-7、および図-8 に、大潮期 (12 月 3 日～12 月 5 日) と小潮期 (12 月 9 日～12 月 11 日) の水深平均流速の時系列図と SS コンター図を示す。ただし、ADCP によって計測された流速と SS の鉛直分布データからサイドローブ干渉域として水深の 15% 程度を表層から削除している。

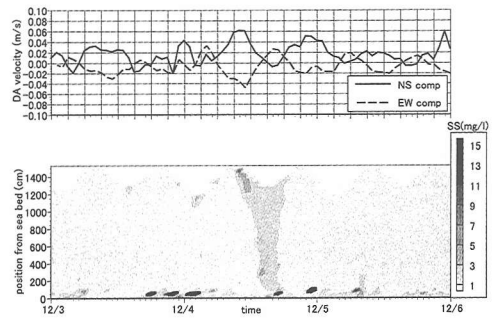


図-7 大潮期の水深平均流速と SS のコンター図 (上段：流速，下段： SS)

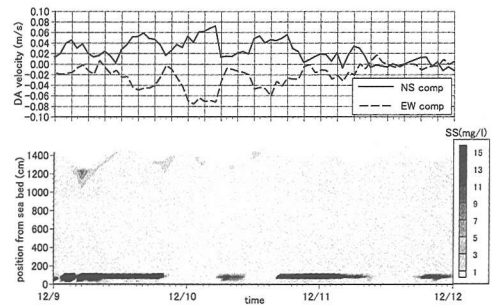


図-8 小潮期の水深平均流速と SS のコンター図 (上段：流速，下段： SS)

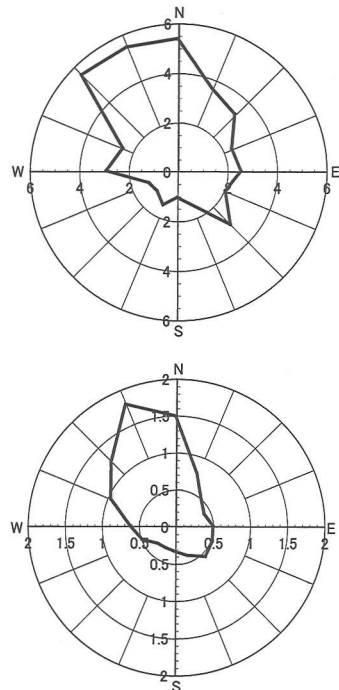


図-9 底泥輸送量の分布 (上段：80 cm 層，下段：380 cm 層，単位： $\times 10$ kg/m)

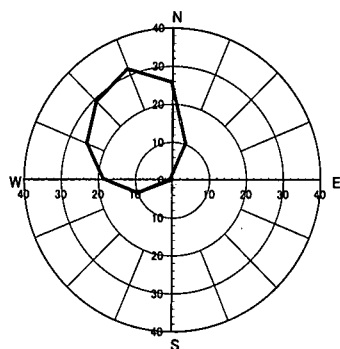


図-10 netの底泥輸送量分布 (単位: $\times 10 \text{ kg/m}$)

また、海底面から84 cmまでのSSについては、4台の濁度計から換算されたデータを、それより上層のSSはADCPから推定された値を用い、毎正時の前後30分間で平均した。流速は、矢野ら(2001)によって観測された湾口部のデータ(最大30 cm/s程度)に比べ、瀬の影響などもあり非常に小さかった。SSの分布より、海底面上に1 m程度の厚さで高濁度層が形成されていることが確認できる。さらに、大潮期の方が潮汐に対するSSの応答が良く、小潮期に比べ上層への底質の巻き上がりが顕著であった。ただし、表層付近(図中の波形は、水表面から約2 m程度下)の高いSSは、必ずしも底泥が巻き上がったものではなくプランクトンの増殖に起因している可能性もある。また、12月3日と12月4日は観測期間中唯一のまとまった降雨(最大1時間降水量は3日の24時で26 mm、日降水量は3日が43 mm、4日が14 mm)があったので、淡水流入の影響も否定できないが、ここでは評価していない。

最後に、ADCPによる流速分布の測定結果を用いてSSの水平方向 flux を算定した。図-9に海底面上80 cmおよび380 cm層における16方位毎に全観測期間中でSSの水平方向 Flux を積分して得られる単位幅(1 m)あたりの底泥輸送量分布を示す。これより、裸瀬の影響が考えられるが、主に北～北西の範囲、すなわち水俣湾から八代海に向けて底泥が流出していることが確認された。

また、図-10にサイドローブ干渉域を除く範囲で水深積分されたnetの底泥輸送量の分布を示す。現在の水俣湾内における底泥中の水銀濃度は、総水銀で6.5～9.0 mg/g、メチル水銀は2～13.5 ng/gとなっている(赤木ら, 2003)。netの底泥輸送量から1年間に水俣湾から八代海へ流出する水銀量をおおまかに見積ると、総水銀が55～77 kg程度、メチル水銀が0.02～0.12 kg程度となった。ここで、算出には水俣湾湾口として恋路島から裸瀬近くの突堤までの南北方向に幅1200 mの断面(図一

1参照)を取り、netの輸送量の各方位成分から真西方向成分を算出して合計した。なお、北側湾口は幅230 mと狭く、観測地点からも離れているので考慮していない。

4. まとめ

水俣湾において、底泥の輸送構造を把握するために濁度、流速および波浪などの連続観測を実施した。その結果、水俣湾内から八代海へ向かう方向の底泥輸送が支配的であることが分かった。言い換えると、現在でも八代海内で拡がっている微量残留水銀の供給源是水俣湾内にあることが示唆された。今後は、SSの水平方向 Flux に関する季節的な変動を把握するために、夏季成層期や循環期の暴浪時に同様の観測を実施する必要がある。また、ADCPの反射強度からSSを推定する際に高濃度での応答性が悪かったため、高い周波数のADCPの併用や定期的な採水など観測方法の改良も必要と考えられる。

謝辞：本研究は、日本学術振興会の平成14年度日欧科学協力事業(共同研究)の援助により実施された。また、水俣市漁業協同組合(岩崎巧組合長)に多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 赤木洋勝・坂本峰至・山口雅子・保田叔昭・富安卓滋・安藤哲夫・佐藤正典・堀川博史(2003): 水銀の生体および環境モニタリングに関する研究, <http://www.nimd.go.jp/>.
- 飯田浩二(1994): 音響資源調査法の基礎, 月刊海洋, 26巻, 10号, pp. 602-610.
- 川西 澄・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎(1998): 浅海域におけるADCPを用いた濁度分布の観測, 沿岸海洋研究, 35巻, 2号, pp. 203-210.
- 水俣市立水俣病資料館(2000): 水俣病—その歴史と教訓—2000, 85 p.
- 山下俊彦・奈良俊介・山崎真一(2002): 河口沿岸域でのADCPを用いた濁度推定と浮遊物質の移動量算出の試み, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1491-1495.
- 矢野真一郎・多田彰秀・山本勝義・野中寛之・中富 慶・深江由美・中村武弘・赤木洋勝・Rajar, R・Horvat, M(2001): 現地観測による水俣湾の流動構造の解明について, 平成13年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2, pp. B 76-77.
- 横山勝英・藤田光一(2001): 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp. 937-942.
- Francois, R. E. and G. R. Garrison (1982): Sound absorption based on ocean measurements. part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, No. 6, pp. 1879-1890.
- Rifardi, K. Oki and T. Tomiyasu (1998): Sedimentary environments based on textures of surface sediments and sedimentation rates in the South Yatsushiro Kai (Sea), southwest Kyushu, Japan, J. Sed. Soc. Japan, No. 48, pp. 67-84.
- Tomiyasu, T., A. Nagano, N. Yonehara, H. Sakamoto, Rifardi, K. Oki and H. Akagi (2000): Mercury contaminant in the Yatsushiro Sea, south-western Japan: spatial variations of mercury in sediment, Sci. Total Environ., Vol. 257, pp. 121-132.