

水俣湾湾口における SS 輸送の現地観測

矢野真一郎¹・田井 明²・大淵義剛³
多田 彰秀⁴・松山明人⁵・Rudolf Rajar⁶

過去の研究により水俣湾の底泥中に含まれる微量残留水銀が八代海へ拡がっていることが報告されている。本研究では水俣湾中央部で過去に行われた超音波ドップラー流速計 ADCP と後方散乱光式濁度計を併用した SS 輸送の現地観測と同様の手法を湾口部に適用し、夏季と冬季における SS 輸送量の把握を試みた。夏季は上層と中底層で密度流構造による流れの卓越方向の違いが確認された。また ADCP の反射強度から SS 濃度の鉛直分布を推定し、観測期間中の SS 総輸送量を見積もったところ、冬季は水俣湾へ流入、夏季は八代海へ流出していることが明らかとなった。

1. はじめに

水俣湾、ならびに八代海沿岸住民に甚大な健康被害をもたらした「水俣病」は、2006 年 5 月 1 日に公式確認からちょうど 50 年の節目を迎えた。熊本、鹿児島両県で約 2,300 人が患者と認定されているが、厳しい認定基準の見直しなどに関連する議論は未だ続いている。「水俣病」は、水俣市内にあるアセトアルデヒドを製造していた化学工場から排出されたメチル水銀が生態系の食物連鎖の中で生物濃縮し、高濃度水銀が蓄積した食用魚や二枚貝を摂取した結果として発生した中枢神経系疾患である。1969 年にメチル水銀の排水規制が実施され、1974 年から 1990 年にかけて、環境復元事業として除去基準（総水銀 25 ppm）以上の水銀を含有する底質を浚渫し、埋め立て封入する処理が行われた。1997 年には熊本県により安全宣言が出されているが、現在でも未浚渫海域の底泥中には 10 ppm 以下の微量な水銀が残留しており（Tomiyasu ら, 2006 ; Haraguchi ら, 2000）、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拡がっているという調査報告が出されている（Tomiyasu ら, 2000）。

沿岸域や海洋へ放出されたメチル水銀は微量であっても大型魚類や鯨に生物濃縮し、それらを妊婦が大量に摂取した場合（低濃度曝露）には胎児に健康障害を及ぼす危険性が指摘されている。この様な中、国際専門家会議（FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives, JECFA）において、胎児を十分に保護するためメチル水銀の暫定的耐容摂取量が人の体重 1 kg 当たり 1 週間に 3.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ から 1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ に引き下げられ、欧米で注意事項の改正が相次いだ。これに伴い、我が国で

も厚生労働省により 2003 年の注意事項について見直しが行われ、2005 年 11 月から「妊婦への魚介類の摂食と水銀に関する注意事項」として注意すべき魚介類の種類（クロマグロ、メバチマグロを追加）と摂食量の目安が新たに公開されている。

微量残留水銀の問題に対し有効な対策を講じるためにも、海域に存在する水銀の輸送構造の解明や観測手法の確立が求められている。矢野ら（2003, 2004）は、水俣湾における微量残留水銀の動態を把握するため、漁業活動に影響のない水俣湾中央部で 2002 年冬季と 2003 年夏季に超音波ドップラー流速計（以下、ADCP）と後方散乱光式濁度計を併用した連続観測を実施し、それらの結

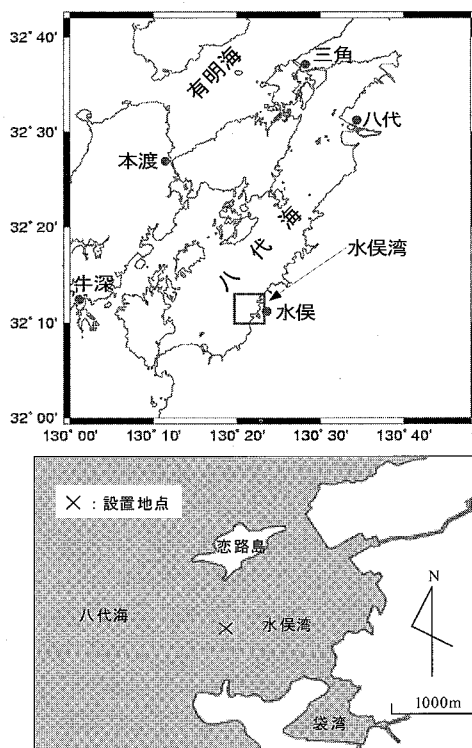


図-1 観測地点（上図：水俣湾の位置、下図：水俣湾）

1 正会員 博(工) 九州大学助教授 大学院工学研究院環境都市部門
2 学生会員 修(工) 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
3 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
4 正会員 博(工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科
5 博(農) 環境省国立水俣病総合研究センター
6 工博 Ljubljana 大学教授 土木測地工学部

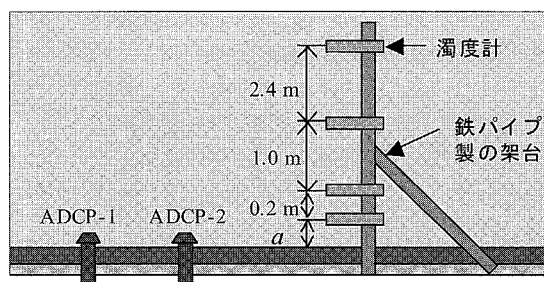


図-2 観測機器設置状況の概略図

果から水俣湾から八代海へ向けて一年間にそれぞれ総水銀で 8.5 kg~30 kg 程度流出しているの見積もった。しかしながら、多田ら (2005) による水俣湾内の流動観測結果より、湾内に流れの逆転や地形性の渦が発生するなど流況は複雑であることが得られており、正確な輸送量の把握には湾口部での連続観測が必要であった。

そこで、本研究では湾口部で行った底泥輸送の連続観測と同様の手法を湾口部に適用し、夏季と冬季における SS 輸送量の把握を試みた。

2. 現地観測の概要

2004 年 12 月 11 日~2005 年 1 月 30 日の 52 日間 (以下、冬季観測) と 2005 年 8 月 17 日~9 月 17 日の 32 日間 (以下、夏季観測) に、図-1 に示す西側湾口中央部に位置する測点 (32°11'19"N, 130°21'49"E, 平均水深 22 m) において、ADCP (Nortek 社製, Aquadopp Profiler 1000 kHz) とワイパー付きの後方散乱光式メモリー式濁度計 (アレック電子社製, Compact-CLW) 4 台を図-2 に示すように海底設置し、流れ、濁度、ならびに ADCP の超音波反射強度の分布 (SS 濃度分布を推定するための) の連続観測を実施した。今回の観測では、全層の測定 (以下、ADCP-1) に加え、底層付近の詳細な測定 (以下、ADCP-2) を行うために 2 台の ADCP を用いたが、本論文では ADCP-1 のデータについてのみ解析した。設置地点の海底には浮泥層があり、最下部の濁度計から浮泥層表面までの距離 a は、冬季観測の設置時で 8 cm、撤去時で 7 cm、夏季観測の設置時で 1 cm、撤去時で 0 cm であった。本論文では、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: 冬季観測は 20 分毎に 100 秒間、夏季観測では 10 分毎に 2 分間、濁度計: 両観測とも 20 分毎に 30 秒間とした。ADCP の測定層厚、プランクはそれぞれ 50 cm, 40 cm と設定した。ADCP のヘッドの海底面からの高さは、それぞれ冬季観測で 9 cm、夏季観測で 0 cm であった。各 ADCP と濁度計を取り付けた架台は相互干渉を防ぐために 5 m 程度離して設置

された。また、濁度から SS 濃度を換算するために、冬季観測では観測機器撤去時、夏季観測では観測機器設置時にポンプ式採水器を用いてそれぞれ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

冬季、夏季ともに観測期間中に ADCP-1 の電池が予想以上に電圧低下したため、冬季は 2004 年 12 月 12 日~2005 年 1 月 8 日の 28 日間、夏季は 2005 年 8 月 17 日正午~8 月 31 日正午までの 14 日間のデータを用いて解析を行った。冬季観測期間は 2 回の大潮期と小潮期、夏季観測期間は、1 回の大潮期と小潮期が含まれていた。水俣湾に最も近い袋地区における雨量観測所のデータによると、冬季観測期間中にはほとんど降雨はなく、夏季観測期間中の 8 月 20 日と 21 日に唯一まとまった降雨 (最大 1 時間降水量は 21 日の 18 mm, 日降水量は 20 日が 20 mm, 21 日が 40 mm) があったが、後述する観測結果への影響は確認されなかった。

冬季、夏季観測ともに、採水した底層水を用いて、各濁度計から得られた濁度と SS 濃度のキャリブレーションを行ったところ、相関係数 0.99 以上の回帰直線が得られた。この回帰式を用いて濁度を SS 濃度に変換した。

ADCP から得られた反射強度 RL (ADCP の受波レベル) から SS 濃度への変換を、以下に示す矢野ら (2003) と同様の手順で行った。まず、体積後方散乱強度 SV を dB 表記されたソナー方程式

$$SV = RL - SL + TL - A \dots \dots \dots (1)$$

で表す。ここで、 SL : 送波レベル, TL : 球面拡散と海水の吸収による伝播損失, A : ADCP のトランスデューサーの特性に依存する定数である。 TL に含まれる海水の吸収係数は、Francois・Garrison (1982) の実験式より推定した。水深と水温は ADCP によって測定された値を、pH と塩分濃度は観測期間中に別途実施した成層調査 (冬季観測: 2004 年 12 月 12 日, および 12 月 25 日, 夏季観測: 2005 年 8 月 18 日) のデータを用いて推定したところ、冬季、夏季観測ともに 0.317 dB/m を得た。

次に、 $(SL+A)$ の値はセンサーの特性により決定される定数であるが、SS 濃度が非常に小さいときには超音波散乱がほとんどないので SV が 0 になると考え、冬季観測中に得られた RL と TL を式 (1) に代入して得られた最小値 39.9 dB を $(SL+A)$ とした。また、ADCP で測定される反射強度 (単位: count) を dB へ変換するためのファクターは 0.45 dB/count とし、反射強度は 3 つのトランスデューサーから得られたデータの平均値を用いた。以上より SV が推定され、懸濁態粒子の粒度分布に大きな変化がない範囲では、 SV と濁度計データか

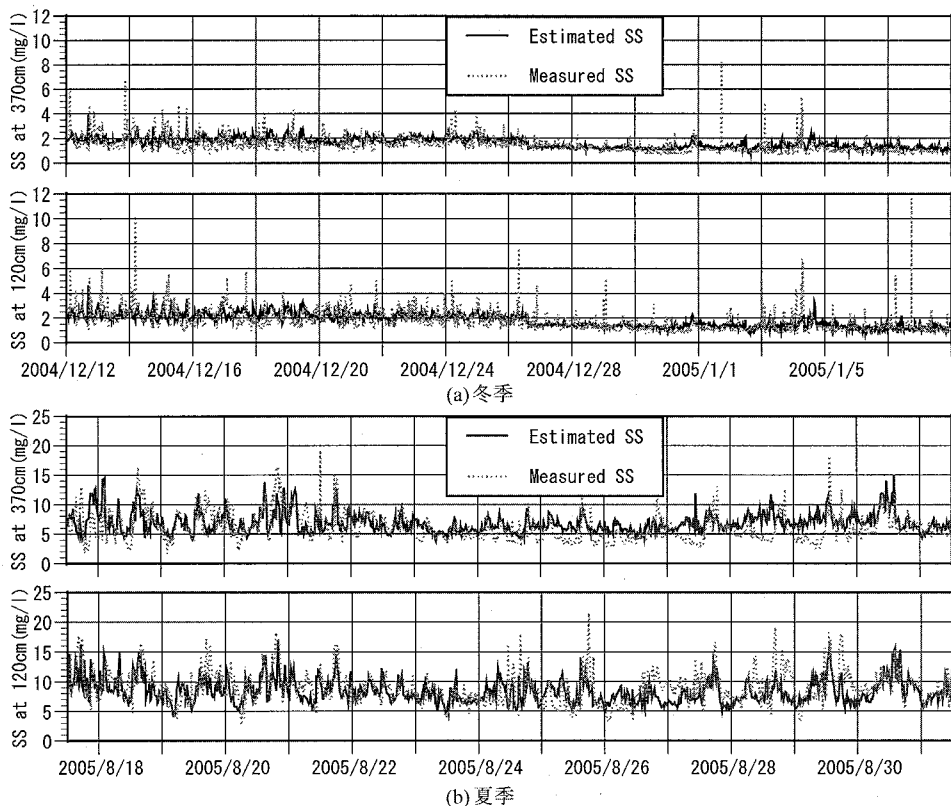


図-3 SS 濃度の推定値と観測値の比較 (上段：370cm 層，下段：120cm 層)

ら推定された SS 濃度との関係式 (2) より, ADCP の反射強度分布から SS 濃度の鉛直分布の推定を行うことができる。

$$SS = \alpha \exp(0.1SV) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, α は比例定数である。冬季観測時の α は, 期間により相関性が異なったため, 12 月 12 日 0 時~21 日 9 時, 12 月 21 日 9 時~26 日 15 時, 12 月 26 日 15 時~1 月 8 日 24 時の 3 区間に分けて個別に相関を取り, それぞれ 1.26, 0.99, 0.72 を得た。この原因として, 底質状態の変化や周辺海域からの移流により SS の粒度分布が変化した可能性が考えられる。夏季観測時の α は, 4.27 を得た。冬季と夏季の α は, 矢野ら (2003, 2004) (冬季: 1.3, 夏季: 4.9) と同程度の違いが見られた。これは季節により SS の粒度分布や構成する成分が異なっている可能性を示唆している。なお, ADCP のサイドローブ干渉域として各時刻における全水深の 15% 程度を表層から削除して解析を行った。

図-3 に冬季・夏季観測期間中の ADCP の反射強度から推定した SS 濃度と濁度計から得られた SS 濃度について, 海底面上約 120 cm 層 (冬季: 124 cm, 夏季: 117 cm) と約 370 cm 層 (冬季: 374 cm, 夏季: 367 cm) の値を時系列にして示す。ADCP からの推定値が 50 cm の

厚さを持つ層における平均値であるのに対し, 濁度計はセンサー前面での点計測であることや, サンプル時間の違い, ならびに ADCP から発信する超音波の波長と濁度計から照射する赤外線波長の違いに起因する応答性の違いがあるため完全に一致することは期待できないが, 比較的両者の変動は一致していた。また, 冬季と夏季で比較したところ, 夏季の方が数倍高い SS 濃度が得られていた。これは植物プランクトンの増殖などにより SS 中の成分が変化したためと考えられるが, 詳細は不明である。測定精度を高めるためにも, SS 中のプランクトンの含有率などの情報も調べる必要があると考えられる。

(2) 流れの観測結果

ADCP-1 により得られた流速分布を海底面上から下層, 中層, 上層に 3 等分し, 層平均流速を最小自乗法により調和分解して得られた M_2 潮の潮流楕円と残差流ベクトルを図-4 に示す。冬季の潮流楕円では, 全層で東北東-西南西の流れが卓越していた。一方夏季では, 中・下層で東北東-西南西の流れが卓越していたのに対し, 上層では東南東-西北西と卓越方向が異なっていた。2005 年 8 月 18 日に別途実施された成層調査において, 海面下約 6 m に密度成層の形成が確認されており, 密度流の発達が発原因の 1 つと考えられる。冬季と夏季では

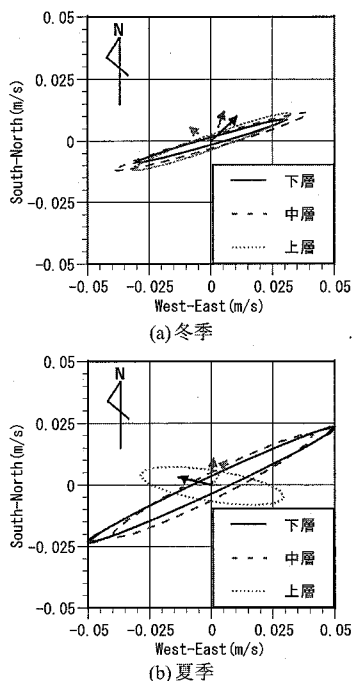


図-4 潮流楕円と残差流ベクトル

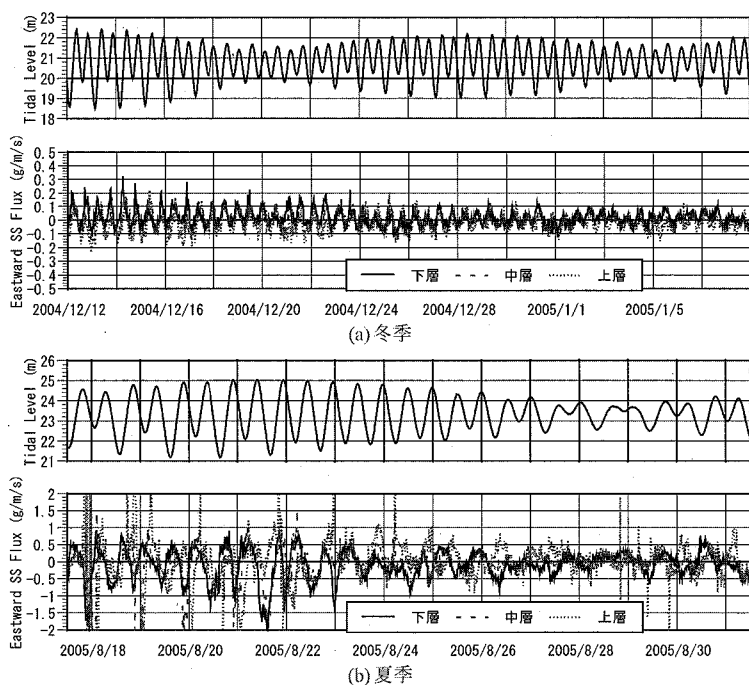


図-5 観測結果の時系列 (上段：潮位，下段：東西方向の SS Flux (東向き正))

長軸長が異なり、冬季の長軸長 (半径) は全層で約 3 cm/s とほぼ同じ値であるのに対し、夏季の中・下層では約 5 cm/s、上層では、約 3 cm/s と異なっていた。冬季と夏季の残差流は、それぞれ上層では北西と北北東向き、下層では北東と西北西向きと入れ替わっていた。中層では冬季に北北東向き、夏季には北向きと両時期において北向きの残差流が得られた。八代海から水俣湾への東向きの流れを流入方向にとると、冬季には下層で流入、上層で流出傾向、夏季には下層で流出、上層で流入傾向の残差流構造が生じていた。この原因として、卓越風や密度構造の季節変化による影響が考えられるが、今後 3 次元数値シミュレーションなどによる確認が必要である。

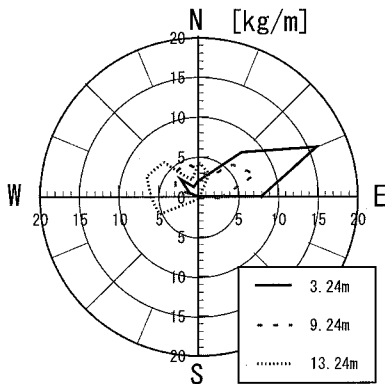
(3) SS の輸送について

SS 濃度を水銀濃度に換算するために、冬季は 2004 年 12 月 12 日、夏季は 2005 年 8 月 18 日に、観測地点において海水のサンプリングを行っている。本論文では、水銀濃度測定精度検証が完全でないため、水銀の輸送については議論せず SS の輸送についてのみ解析を行った。

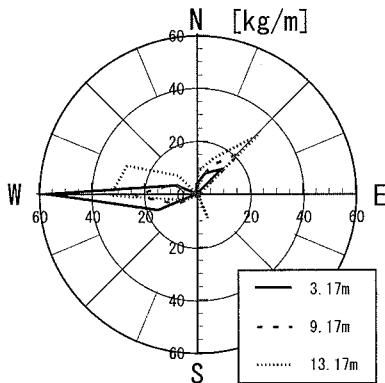
図-5 にそれぞれ潮位と層平均 SS Flux の東西方向成分 (東向きを正) の時系列を示す。冬季には、ほぼ全層一様に SS の流入が生じていた。一方夏季には、上層と中下層において SS の流入が逆転する複雑な構造が確認された。これは夏季の密度成層が影響していると考えられる。多田ら (2005) による夏季 (2003 年 7 月 29 日) の水俣湾における西側湾口の流動観測結果より、水

深 4~8 m の水温躍層を境に流れの逆転が確認されており、今回も同様の現象が確認されたと言える。また、2005 年 8 月 17 日~18 日に突発的に大きな輸送が生じていた。水俣湾の風速・風向データによると、この期間中の風は比較的穏やかで、降雨もなかった。淡水流入の影響については、湾内には大きな河川の流入が無い場合、八代海からの影響を受けている事も考えられるが詳細は不明である。

次に、図-6 に海底面上約 3.2 m, 9.2 m, 13.2 m (サイドロープ干渉域を除き、データが揃っている層のうち比較的水表面に近い位置) の各層について、観測期間中の単位幅 (1 m) 当たりの SS 総輸送量 (net) の 16 方位分布を示す。八代海から水俣湾への向きを流入方向にとると、冬季には中・下層で流入、上層で流出傾向にあった。一方、夏季には下層で西向きの強い流出、上・中層では西向きの強い流出に加え、北東向きの流入も見られた。両時期ともに下層での輸送量が大きかった。水表面のサイドロープ干渉域を除く範囲で水深積分した観測期間中の単位幅当たりの SS 総輸送量 (net) の 16 方位分布を図-7 に示す。冬季には北向きに偏った流出入、夏季には西向きの流出および北東向きの流入が生じていた。冬季、夏季ともに北東向きの流入が見られるが、この原因として観測地点付近の瀬の影響を受けたことも考えられる。観測期間中の SS 総輸送量を見積もったところ、冬季は流入、夏季は逆に流出傾向となった。

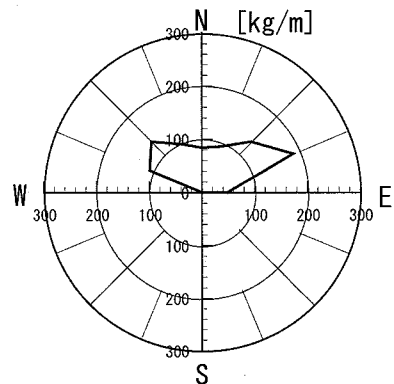


(a) 冬季

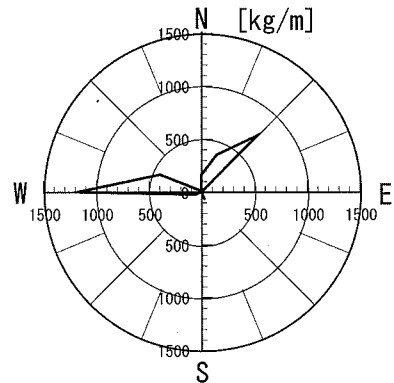


(b) 夏季

図-6 各層における net の SS 輸送量の方位分布



(a) 冬季



(b) 夏季

図-7 net の SS 総輸送量の方位分布

4. ま と め

水俣湾湾口における SS 輸送構造を把握するために、流れや濁度の連続観測を実施した。その結果、(1)夏季は上層と中・下層の流れの卓越方向が異なること、(2)SSの輸送は冬季は下層で流入、上層で流出傾向、夏季は全層で流出傾向、中・下層では北東向きの流入傾向も見られたこと、(3)観測期間の SS 総輸送量は、冬季は流入、夏季は流出していたこと、などが明らかとなった。

今後は、現在精査中の水銀データを用いて SS 濃度から水銀輸送量を換算する予定である。また、流入、流出時における SS 中の水銀濃度の変化や季節による SS 中の成分(粒度分布や有機物と無機物の割合等)の把握などが精度の向上に必要と考えられる。

謝辞：本研究の一部は、財団法人九州大学後援会の援助により実施された。観測にあたり、水俣市漁業協同組合(岩崎巧組合長)に多大な協力を頂いた。また、熊本県土木部河川課には、気象データの提供等で便宜を図って頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 多田彰秀・柳瀬夏樹・矢野真一郎・中村武弘・押川英夫・赤木洋勝(2005)：現地観測に基づく水俣湾の流動特性に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp. 1285-1290。
- 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(2003)：水俣湾における底泥動態の現地観測，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1006-1010。
- 矢野真一郎・多田彰秀・松山明人・押川英夫・富安卓滋・赤木洋勝・中村武弘・Rudolf Rajar・Milena Horvat(2004)：水俣湾における微量残留水銀動態に関する現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1216-1220。
- 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。
- Haraguchi, K., T. Ando, M. Sato, C. Kawaguchi, T. Tomiyasu, M. Horvat and H. Akagi (2000)：Detection of localized methylmercury contamination by use of the mussel adductor muscle in Minamata Bay and Kagoshima Bay, Japan, Sci. Total Environ., Vol. 261, pp. 75-89。
- Tomiyasu, T., A. Nagano, N. Yonehara, H. Sakamoto, Rifardi, K. Oki and H. Akagi(2000)：Mercury contaminant in the Yatsu-shiro Sea, south-western Japan: spatial variations of mercury in sediment, Sci. Total Environ., Vol. 257, pp. 121-132。
- Tomiyasu, T., A. Matsuyama, T. Eguchi, Y. Fuchigami, K. Oki, M. Horvat, R. Rajar and H. Akagi(2006)：Spatial variations of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan, Sci. Total Environ.(in print)