

現地観測に基づく水俣湾の流動特性 に関する研究

SEASONAL BEHAVIOR ON TIDAL CURRENT
BY USING IN SITU MEASUREMENT DATA IN THE MINAMATA BAY

多田 彰秀¹・柳瀬 夏樹²・矢野 真一郎³

中村 武弘⁴・押川 英夫⁵・赤木 洋勝⁶

Akihide TADA, Natsuki YANASE, Shinichiro YANO,
Takehiro NAKAMURA, Hideo OSHIKAWA and Hirokatsu AKAGI

¹正会員 博士(工) 長崎大学助教授 工学部 社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

²学生会員 長崎大学大学院生 生産科学研究科環境システム工学専攻(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

³正会員 博士(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院(〒812-8521 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 博士(工) 長崎大学教授 環境科学部(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁵正会員 修士(工) 九州大学大学院助手 工学研究院(〒812-8521 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁶非会員 薬学博士 有限会社国際水銀ラボ所長 (〒867-0034 水俣市袋426-2)

In the Minamata Bay, the remediation project on water and bottom sediment environment was completed in 1990. About 0.8 million m³ of bottom sediment contaminated by mercury was dredged. However, a recent measurement of mercury in the sediments [Tomiyasu et al.,2000] has shown that mercury is spreading around the center and southern parts of the Yatsushiro Sea from the Minamata Bay. Although the concentration of mercury in bottom sediment is lower nowadays (<10ppm), modelling for accurate prediction of mercury dynamics is necessary. In order to predict the mercury dynamics accurately in a coastal area, it is necessary to measure mercury transport in an actual sea.

Thus, the current observation by using ADCP (RD Instruments Workhorse 1,200kHz), which was mounted on the side of a fishing boat, was performed on the 2nd of December, 2002 and the 29th of July, 2003 to realize a three-dimensional structure of tidal current in the Minamata Bay. As a result, it was found that a horizontal circulation flow occurred during ebb tide in summer.

Key Words: Minamata Bay, in situ measurement, tidal current, mercury transport, thermal stratification, Acoustic Doppler Current Profiler

1. はじめに

1950年代後半, 化学工場から排出されたメチル水銀が原因で発症した「水俣病」(中毒性の神経疾患であり, 公害病として認定)によって多くの犠牲者がでたことは周知の事実である。その舞台となった水俣湾では, 1981年から1990年の間に実施された環境修復事業によって, 現在では安全宣言が出されている。しかし, 未浚渫海域(袋浦)および浚渫海域においても未だに微量な水銀が残留しており, 水俣湾から八代海東岸沿いに拡がっていることが報告されている^{1), 2)}。

微量水銀が底質粒子に吸着し潮汐や波浪などで輸送さ

れるとした仮定の下での底質の移流・拡散モデルによる将来の八代海流出状況を正確に予測するためには, ①底質輸送構造の把握, ②残留水銀の溶存態と懸濁態との割合の解明, 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ーの開発などが必要不可欠である。

本研究では, 上述の①を最終目標とし, その第一段階として, 水俣湾内の流動特性を解明するため, 2002年の冬季および2003年夏季の大潮期に実施したADCPによる曳航観測および多項目水質計による成層調査の結果について報告する。

2. 現地観測の概要

3つの湾口を有する水俣湾の流動特性を解明する目的で、現地観測を2002年12月2日(大潮期)と2003年7月29日(大潮期)に実施した。現地観測は、ADCPを用いた曳航観測と多項目水質計による成層調査から構成されている。すなわち、ADCPを用いた曳航観測では、ADCP(Workhorse-ADCP1200kHz, RD Instrument社製)を船の舷側に取り付け、事前に設定した観測線下の鉛直断面内流況を計測した。さらに、多項目水質計(ACL1183-PDK, アレック電子社製)を用いた成層調査を同時に行っている。なお、水俣湾内の観測線および観測点位置の概略は図-1に示すとおりである。冬季の観測では、午前6:00から60分間隔で1潮汐間に12回の観測を行った(図-2の上図参照:図中の○印は観測開始時刻)。とくに、湾口部からの流入・流出状況を把握するため、曳航観測では観測線をM-1, M-9, M-10およびM-11の4測線とした。一方、夏季の曳航観測では、成層期における水俣湾内の流動特性の把握を対象としたため、測線M-1~M-10およびF-1を2隻の観測船で分担して計測した。図-2の中図に示すように、観測開始時(7:35)から、180分間隔で1潮汐間に4回の計測を行った。また、冬季および夏季ともに曳航観測と並行して観測点a~iで成層調査を実施し、水温、塩分濃度、pHおよび濁度等の鉛直分布をも計測した。

3. ADCPを用いた曳航観測の結果および考察

(1) 冬季観測の結果

a) 表層における流速ベクトルの平面分布

図-3は、冬季に観測された表層(水深2~3m)の流速ベクトルを平面的にプロットしたものである。満潮時に対応する2回目の結果(図-3(a))に着目すると、北側湾口の観測線M-9から水俣湾へ流入する流れが認められる。また、下げ潮最強時の5回目(図-3(b))では、M-9および袋浦との境界となっている測線M-10から水俣湾へ流入する流れと西側湾口の測線M-1から八代海に流出する西向きの流れが確認できる。さらに、M-1の表層部に見られる西向きの流れは、干潮時(図-3(c))から上げ潮最強時(図-3(d))へと継続して発生していることが分かる。

b) 流速ベクトルの鉛直分布

図-4は、測線M-1およびM-9上で計測された流速ベクトルの鉛直分布を示したものである。横軸は測線上での航行距離、縦軸は水深である。満潮時の表層で見られた水俣湾へ流入する南東への流れ(図-3(a)参照)は、M-9のほぼ全断面で発生していることが図-4(a)より分かる。また、図-4(b)および図-4(c)からは、表層(水深2.60m~4.60m)に西向きの流れが卓越していることが確認される。八代海周辺では、干潮時から上げ潮最強時にかけ

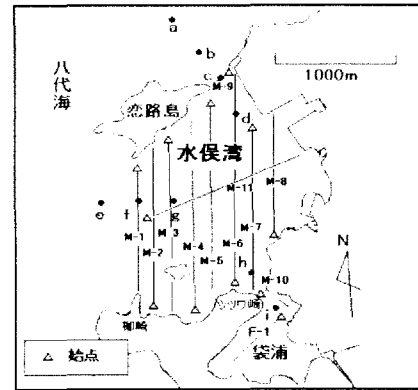


図-1 水俣湾の概要図

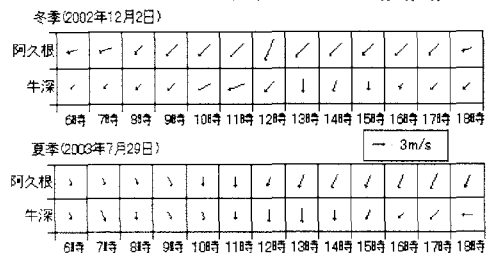
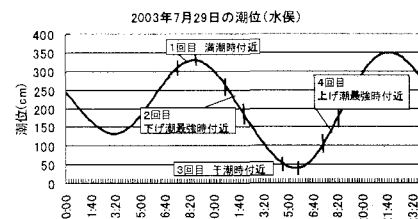
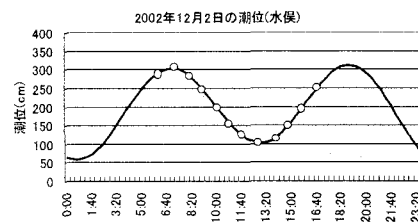
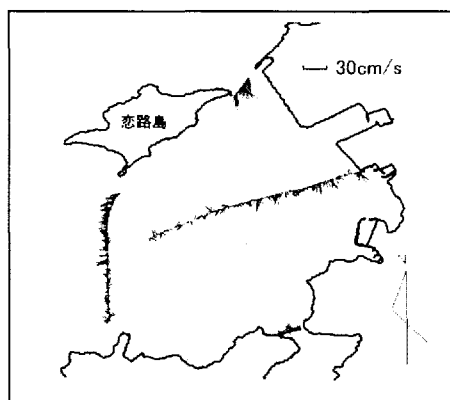


図-2 観測日の潮位図³⁾と風速ベクトル図⁴⁾

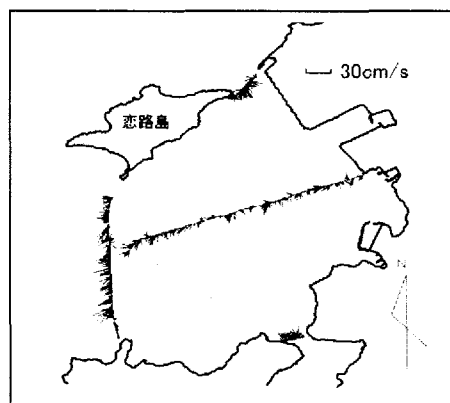
て北東の風(2~3m/s)が約4時間程度連吹(図-2下図参照)していたため、その影響を受けたものと推測される。なお、図-4(c)の上げ潮最強時には、水深6.60m付近を境に流れが逆転しており、それより深い部分では潮汐に起因する流れが卓越していることも認められる。

c) 湾口部を通過する流量の時間的变化

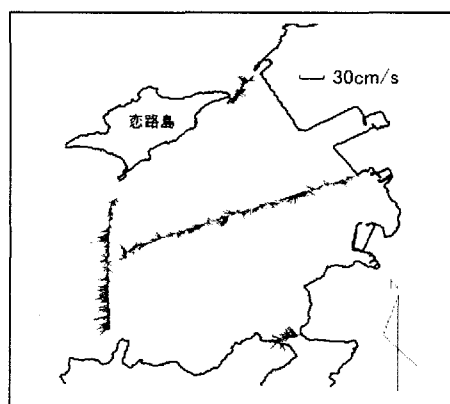
図-5は、西側湾口(M-1)、北側湾口(M-9)および南側湾口(M-10)をそれぞれ通過する流量(観測線の法線方向の流量)の時間的变化を棒グラフで示している。図中のQ1, Q9, Q10は、それぞれ測線M-1, M-9およびM-10の断面通過流量である。これらの値が正の場合には、水俣湾内に海水が流入することを表している。湾口部を通過する流量の算定に際しては、ADCPより得られた流速成分から水深1m毎の平均流速を求めるとともに、その値に各観測線上の水深1m毎の断面積を乗じて求めた。また、図中には湾口部を通じて水俣湾に流入する全流量(Q1+Q9+Q10)の1潮汐間の変化が実線(▲-)で併記されており、潮汐



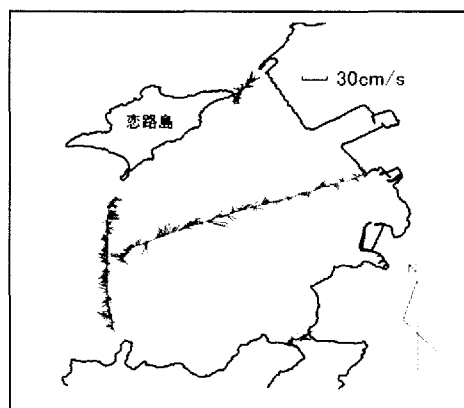
(a) 2回目 (満潮時: 6時58分~7時45分)



(b) 5回目 (下げ潮最強時: 9時59分~10時44分)



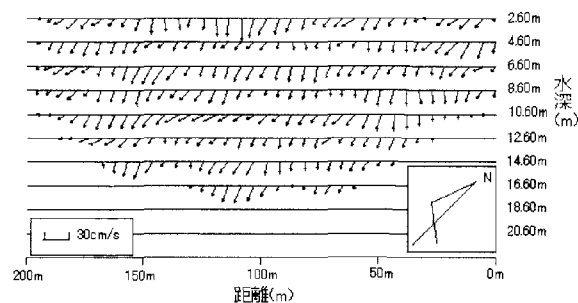
(c) 8回目 (干潮時: 13時2分~13時48分)



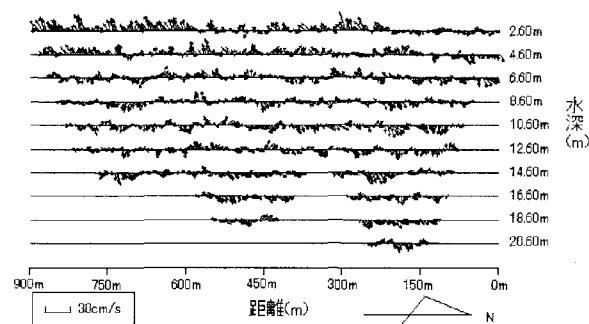
(d) 11回目 (上げ潮最強時: 16時02分~16時46分)

図-3 冬季観測から得られた流速ベクトルの平面分布 (表層)

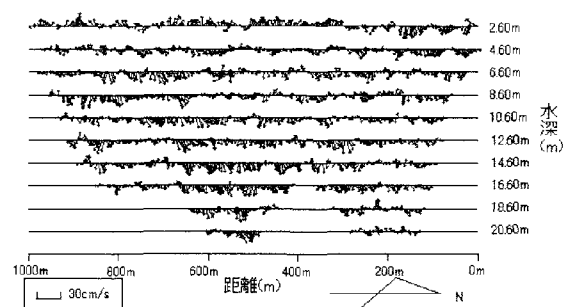
の運動に追従していることが窺える。さらに、西側湾口M-1を通過する流量 Q_1 は他の湾口の流量より大きく、水俣湾における海水の流出・流入に関して西側湾口が支配的であると断言できる。一方、北側湾口の通過流量 Q_9 は満潮時 (2回目観測) から流入傾向が顕著になるものの、潮位の低下とともに減少しながら、その傾向が少なくとも下げ潮の時間帯継続していることも分かる。



(a) 2 回目 (満潮時) 観測線M-9

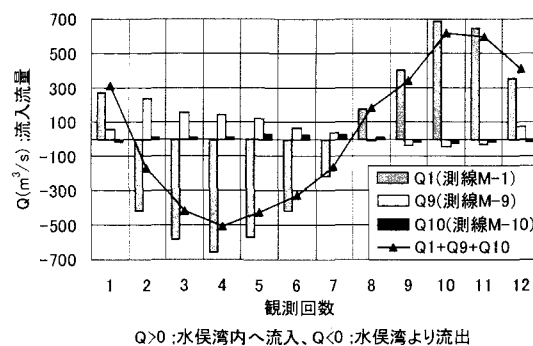


(b) 8 回目 (干潮時) 観測線M-1



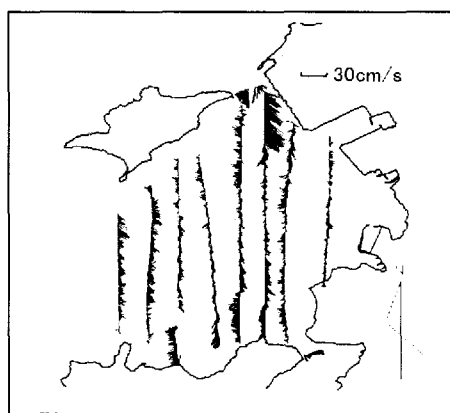
(c) 11 回目 (上げ潮最強時) 観測線M-1

図-4 流速ベクトルの鉛直分布

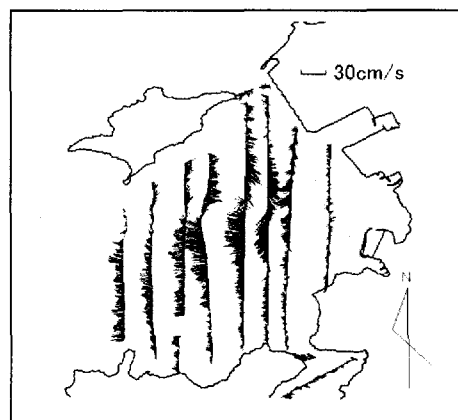


$Q > 0$: 水俣湾内へ流入、 $Q < 0$: 水俣湾より流出

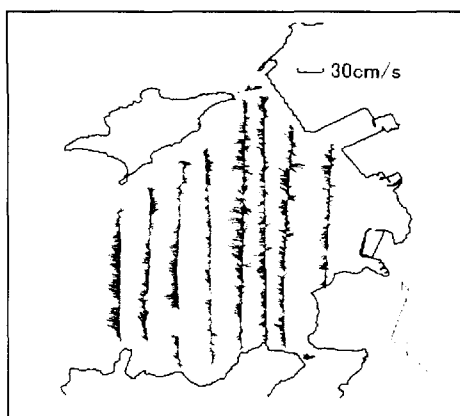
図-5 湾口部の通過流量とその合計の時間変化



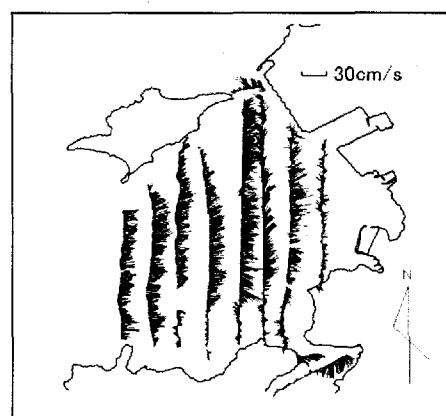
(a) 1 回目観測 (満潮時付近：7時37分～8時46分)



(b) 2 回目観測 (下げ潮最強時付近：10時37分～11時49分)



(c) 3 回目 (干潮時付近：14時37分～15時33分)



(d) 4 回目観測 (上げ潮最強時付近：17時17分～18時26分)

図-6 夏季観測から得られた流速ベクトルの平面分布 (表層)

(2) 夏季観測の結果

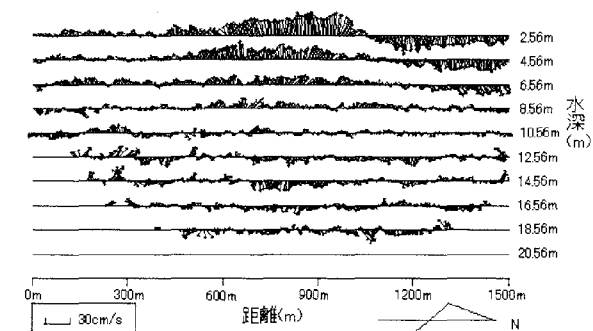
a) 表層における流速ベクトルの平面分布

図-6は、夏季にADCPを用いて計測された表層（水深2～3m）の流速ベクトルを平面的にプロットしたものである。満潮時に対応する1回目の流れ（図-6(a)参照）では、北側湾口の測線M-9および測線M-6の北側において八代海から海水の流入が認められる。さらに、その影響が袋浦への流入とツツ崎付近（測線M-3～M-6の南側）の西向きの流れとなっている。冬季観測でも、満潮時に北側湾口の測線M-9で水俣湾に流入する流れが確認されている。下げ潮最強時に対応する2回目（図-6(b)参照）では、海水が西側湾口の測線M-1から八代海へ流出している。とくに、湾中央部付近に着目すると、冬季観測時には確認されなかった比較的大きな時計回りの地形性渦が認められる。さらに、上げ潮最強時に近い4回目（図-6(d)参照）の結果からは、西側湾口M-1上の表層で八代海から湾内へ流入する流れが生じている。流入した海水は湾全体に拡がりながら、南側湾口のM-10より袋浦へ、北側湾口のM-9から八代海へ流出していることも分かる。

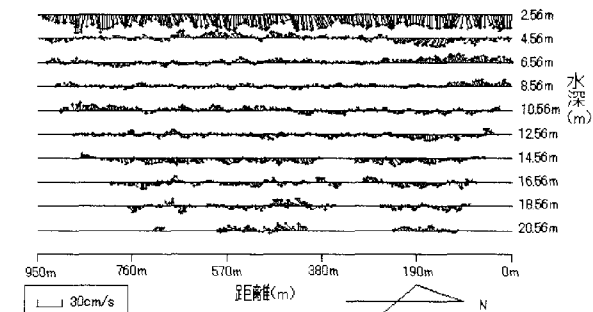
b) 流速ベクトルの鉛直分布

図-7(a)～(e)は、それぞれ測線M-4、M-1、M-9、M-10およびF-1上で計測された流速ベクトルの鉛直分布であ

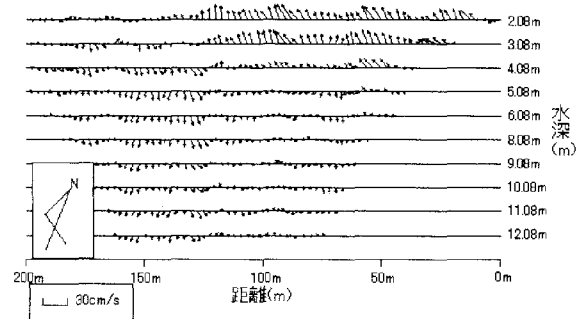
る。図-7(a)は、図-6(b)で明らかとなった時計回りの地形性渦の流動構造を測線M-4の鉛直断面内で表示したものである。時計回りの地形性渦は水深の増加とともに弱化傾向にあるものの、少なくとも水深7mまでは存在していることが分かる。図-7(b)～(e)は、水俣湾全域の表層で東向きの流れが卓越した上げ潮最強時付近の流速ベクトルの鉛直分布図であり、それぞれ測線M-1、M-9、M-10およびF-1に対応している。図-6(d)で見られたM-1上での強い東向きの流れは、水深5～6m付近を境に逆向きとなっている（図-7(b)参照）。これは、干潮時から上げ潮最強時にかけて八代海周辺で連吹していた南西の風3～4m/s（図-2最下図参照）の影響による吹送流と判断される。さらに、図-7(c)からは北側湾口M-9の水深2～4mに八代海へ流出する流れが見られる。一方、航行距離が125～200mの恋路島側では、水深4m以下で流れが表層とは逆向きとなっており、地形性の反流と推測される。また、袋浦の湾口M-10（図-7(d)参照）では、表層から水深5mまでに流れが集中して袋浦へ流入している。その後、流れは平面的な地形の影響を受けて袋浦の東側を回り込むように浦奥へと流れ込んでいることが分かる（図-7(e)および図-6(d)中の破線楕円部を参照）。



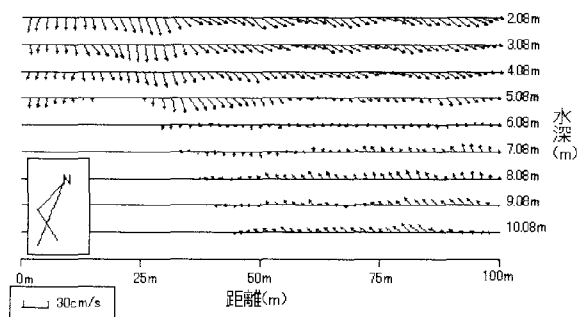
(a) 2回目(下げ潮最強時付近), 観測線M-4



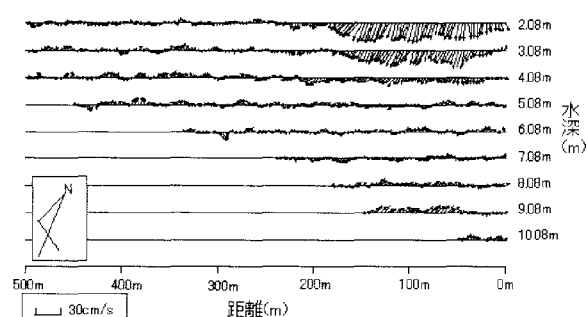
(b) 4回目(上げ潮最強時付近), 観測線M-1



(c) 4回目(上げ潮最強時付近), 観測線M-9

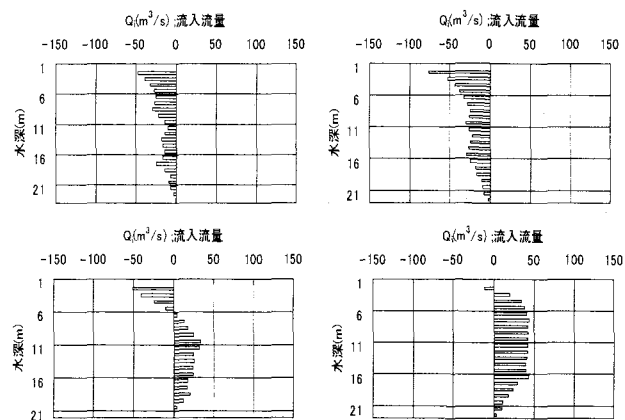


(d) 4回目(上げ潮最強時付近), 観測線M-10

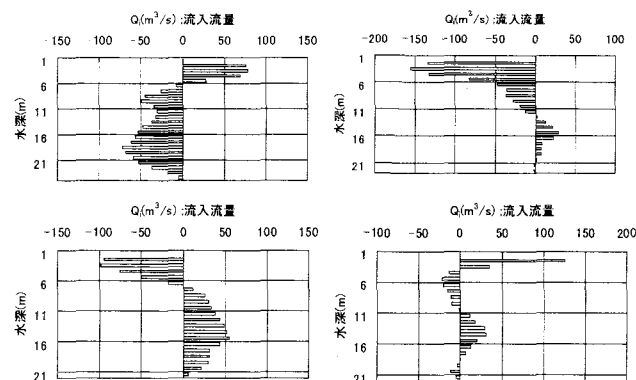


(e) 4回目(上げ潮最強時付近), 観測線F-1

図-7 流速ベクトルの鉛直分布



(a) 冬季循環期における通過流量の鉛直分布
(左上:満潮時, 右上:下げ潮最強時,
左下:干潮時, 右下:上げ潮最強時)



(b) 夏季成層期における通過流量の鉛直分布
(左上:満潮時付近, 右上:下げ潮最強時付近,
左下:干潮時付近, 右下:上げ潮最強時付近)

図-8 西側湾口M-1断面を通過する流量の鉛直分布

(3) 西側湾口M-1断面を通過する流量の鉛直分布

冬季の観測結果に基づけば、西側湾口M-1の鉛直断面で生じる流れは、水俣湾の海水交換に著しく影響を及ぼしていることが明らかとなった。そこで、冬季および夏季のM-1の鉛直断面上で計測されたADCPの流速データから水深1m毎の通過流量; Q_i (m^3/s) を算定し、その鉛直分布を示したものが図-8である。図中の縦軸は水深、横軸は水深1m毎の鉛直断面を通過する流量である。流量が正の場合には、流れが水俣湾へ流入している。図-8(a)に示す冬季の結果から、満潮時、下げ潮最強時、上げ潮最強時のいずれも $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下の値で、全水深に渡って同一の方向に流動していることが確認できる。一方、干潮時には水深6m付近で流れが反転している。この原因は、表層の流れが北東よりの風の影響を、水深6mより深いところの流れが潮汐の影響を受けていたためと考えられる。さらに、夏季の結果(図-8(b)参照)では、水深6~8mを境に流入と流出が逆転した分布となっている。とくに、満潮時付近や干潮時付近の結果からは、水深6m以下の

中・底層に最大 $50\text{m}^3/\text{s}$ を超える表層と逆向きの流れが存在していることや、底層の通過流量は表層の通過流量にほぼ匹敵していることも明らかとなった。

4. 成層調査の結果および考察

(1) 水温の鉛直分布

図-9は、冬季(2002年12月2日)と夏季(2003年7月29日)に測線M-1の中央に位置する観測点fで計測された水温の鉛直分布図である。冬季は全水深に渡って混合状態となっており、水温成層は認められない。一方、夏季の結果からは、表層と底層に 3°C ほどの水温差が生じており、水深4m~8mに水温躍層の形成が確認される。図-8(b)で明らかとなった流れの逆転が生じている水深と水温躍層の水深がほぼ一致することも認められる。

(2) 夏季観測から得られた水温分布の時間的変化

横軸を潮汐の状態、縦軸を海底からの水位と設定して、観測点fで夏季に観測された水温のイソプレットを図-10に示す。下げ潮最強時から干潮時の間で $24.5^\circ\text{C} \sim 27.5^\circ\text{C}$ の等温線が密に収束している。これは、気温の上昇とともに水温躍層が発達したものと解釈される。なお、図中の太線は海水面を表している。

さらに、図-11は、西側湾口の測線M-1と直交する鉛直断面(観測点e, f, gを結んだ鉛直断面)内の水温分布の時間的変化を示したものである。満潮時には水深3~4mおよび水深8~9mの2箇所に弱い温度躍層が存在している。これらは、時間の経過とともに発達し、干潮時の水深5~6mに認められる強い水温躍層となっている。なお、既述した上げ潮最強時付近の表層における流れの反転(図-7(b)参照)はこの躍層を境として生じている。

5. まとめ

水俣湾の流動特性を解明するため、冬季と夏季の2回に渡って現地観測を実施した。その結果、冬季循環期には、潮汐に追従した流れが西側湾口のM-1断面で確認できた。夏季の観測結果からは、下げ潮最強時付近で湾中央部に時計回りの地形性渦の発生が明らかとなった。さらに、西側湾口のM-1断面で生じる流れは、水俣湾の海水交換に著しく影響を及ぼしていることも明らかとなった。

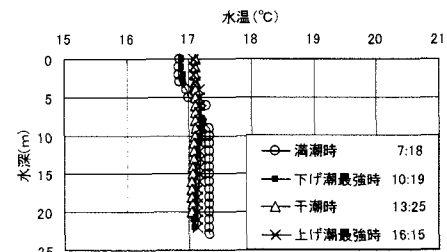
参考文献

- 1) 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.
- 2) 大木公彦, 内田かおり, 入江美晴(2001) : 水俣湾沖の水銀

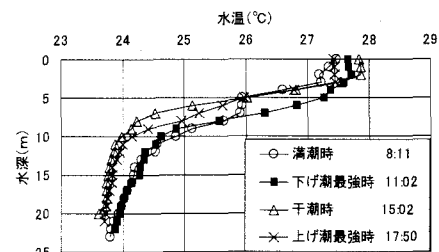
汚染と底生有孔虫群集の垂直変化, 月刊海洋, Vol. 33, No. 6, pp. 414-419.

3) <http://www.n-bcom.co.jp/tsuji/fishing/salt/>

4) <http://fukuoka-jma.go.jp/kumamoto/> (2004.9.30受付)



(a) 冬季に観測された水温分布



(b) 夏季に観測された水温分布

図-9 観測点fの水温の鉛直分布

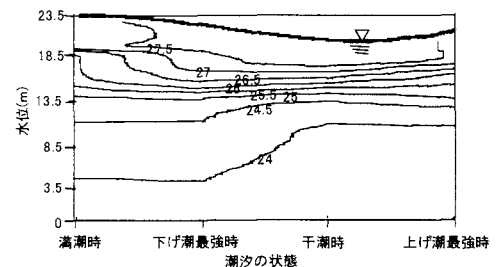
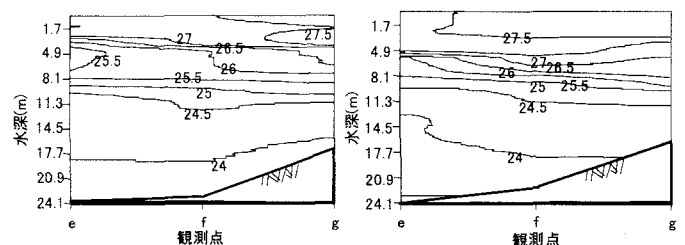
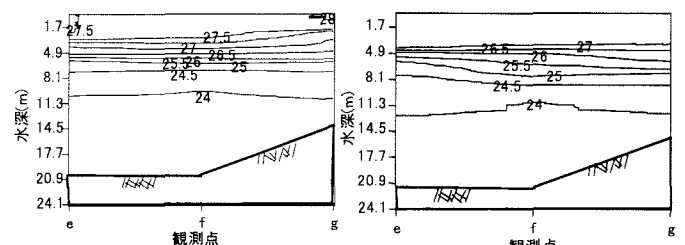


図-10 観測点fの時間変化を表す水温のイソプレット



(a) 満潮時付近

(b) 下げ潮最強時付近



(c) 干潮時付近

(d) 上げ潮最強時付近

図-11 夏季観測で得られた観測点e, f, gを結んだ鉛直断面内での水温分布の時間変化

(2004.9.30 受付)