

時空間同時測位装置を用いた閉鎖性汽水湖内部の 流れ場の観測と解析

福岡捷二*・中村 剛**・池内幸司***・日比野忠史****

1. はじめに

河口付近にある閉鎖性の水域では海水と淡水が混合し、密度躍層が形成されている。この躍層の上下層では潮汐、風浪、吹きよせ等によってそれぞれ独自の流れ場が形成されており(日比野ら, 1996; 1997), この流れの機構を明らかにするためには詳細な流れ場の観測が必要である。最近では観測機器の発達により連続的な流動観測が行われ、流れ場を予測するために必要な諸量の測定も可能となってきた。しかし、湖沼と言えども 10 km スケールの拡がり有しており、水量を全域にわたって観測するのは今なお、困難な状態である。本研究の目的は気象や天文現象などの様々な時間スケールをもつ因子によって閉鎖性水域にどのような流れ場が生じるかを明らかにすることである。本論文では下層の流れ場を連続的に、かつ、オンタイムで測ることのできる装置の開発とこれを用いて行った 2 潮汐間の流動観測およびその解析結果について記述している。

2. 流れ場の計測システムの開発試験

2.1 時空間同時測位装置

著者らが開発した装置は、密度を調整することにより種々の水深に浮遊させることが可能な浮きの位置を経時的に追跡する装置であり、湖内部の流れ場を簡易に、かつ、荒天時にも連続測定を可能にする観測システム(トラックポイントシステム)である。本システム(以下では TPS と呼ぶ)は流れの密度境界面に浮遊させる音響発信装置(トランスポンダ)、音響受信装置(ハイドロフォン)およびトランスポンダから受信した信号(軌跡)を表示するためのコマンドディスプレイモジュールから構成されている(図-1)。

2.2 システムの測定原理

TPS の測定原理を図-2 に示す。観測ステーションに設置したハイドロフォンから一定の周期で発信される周

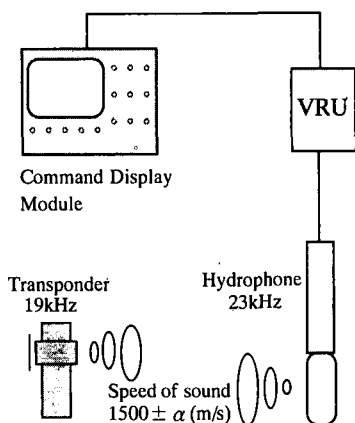


図-1 トラックポイントシステム (TPS)

波数 23 kHz のインタロゲーションパルス在水中に漂うトランスポンダが受信すると同時に発信器の周波数と異なる 19 kHz の超音波を送り返し、ハイドロフォンが受信する。発信器と受信器の距離はトランスポンダから送り返されてくる超音波の到達時間、方位は超音波の入射角により求められている。

2.3 TPS の精度確認試験

TPS は超音波の到達時間差と入射角によりトランスポンダの位置を計算しているため、ハイドロフォンやトランスポンダの近くに障害物がある場合や、それぞれが離れすぎている場合は超音波が障害物や海面波によって屈折したり、他の音波によるノイズ等によってハイドロフォンが信号を受信できなくなる。そのためこの TPS の超音波の最大到達距離はどの程度なのか、また海面波等の音波の屈折による誤差はどの程度なのかを知る必要があり、精度確認の試験を行った。精度確認試験を行った水域は広島大学キャンパス内にある面積が約 0.83 ha、水深が 1.5 m~3.5 m のぶどう池および島根県と鳥取県の県境に位置する中海内の米子湾(後述の図-6)である。これらの水域においてトランスポンダを牽引し、アンテナを船上(移動局)と陸上(固定局)に設置し、移動局と固定局間の距離を計測する DGPS 測量を行いながらトランスポンダの追跡を行った。用いた GPS は Nikon 社製の Trimble Navigation である。TPS は約 5

* 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四地域環境工学講座 Ph.D.

** 学生会員 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期

*** 正会員 工修 (財)リバーフロント整備センター研究第一部長

**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 主任研究官

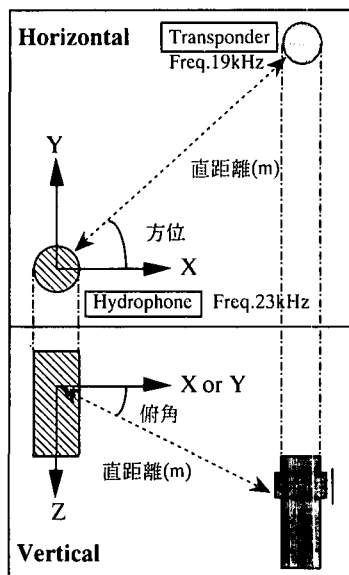


図-2 測定の原理

秒, GPSは10秒の測定間隔で計測を行った。ぶどう池では浅い水域での超音波の反射や屈折による誤差の影響を調べ、米子湾では超音波の最大到達距離を調べた。

2.4 試験結果及び考察

(a) 浅い水深での精度確認試験

図-3の○はぶどう池で行った精度確認試験の未処理データである。未処理データにはハイドロフォンを中心とした円弧状のデータのばらつきが見られる。このばらつきは、水面や地形の影響を受けて超音波が反射することによって生じた角度誤差である。しかし、超音波の到達時間にほとんど誤差が生じないことから、1分間の移動平均をとると、図-3の■のように、データのばらつき

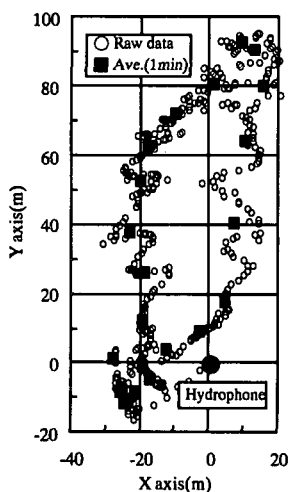


図-3 誤差補正

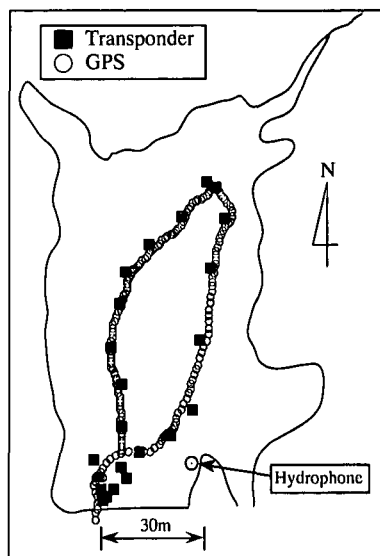


図-4 ぶどう池での精度確認試験

は解消される。ぶどう池における試験結果を図-4に示す。図中の■がトランスポンダの軌跡、○がGPSの軌跡を示している。図-4からTPSとGPSの値はよく一致しており、水深の浅い水域においても実測データの1分間の移動平均をとることによって実用上問題のない精度で発信器を追跡可能であることが確認された。

(b) 最大到達距離を求める試験

中海の米子湾における実験結果を図-5に示す。■がトランスポンダの軌跡、○がGPSの軌跡を示している。

図-5より最大到達距離は直線距離にして約1kmである。トランスポンダとハイドロフォンの距離が1km程度離れると受信器に到達する音波が小さくなり、ディスプレイに表示される発信器の位置が不規則に散乱する現象がみられた。さらに、GPSとの比較から本装置は半径が約1kmの範囲内では十分な精度でトランスポンダの追跡が可能であることがわかる。

3. 中海における現地観測

1996/11/29~30の中潮期に図-6に示す中海においてTPS, ADCP, STD等を用いて2潮汐間の流動観測を行った。中海はLine Gから淡水が流入し、Line Dを通して外海(日本海)に連結する閉鎖性汽水湖である。図-6に示す●の上層(水面下1m)、下層(湖底面上1m)に流向流速計、■に水位計を設置し観測を行った。またLine A, E, F, GにおいてADCPを用いて2時間毎に移動断面流況観測、Line A~GにおいてSTDを用いて塩分濃度、水温の鉛直分布の計測を行った。さらに米子湾中央部(図-6)において新しく開発した観測システム(TPS)を用いた流れ場の平面連続観測を行った。発信器

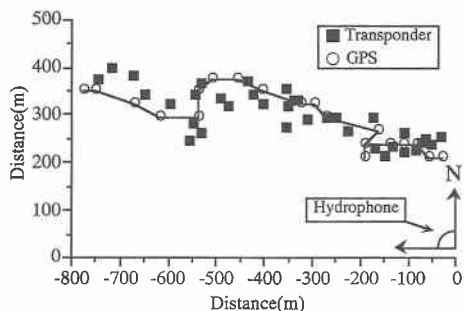


図-5 米子湾での最大到達距離の試験

放流時の Line B での塩分濃度、水温より求めた密度(σ_t)の鉛直分布を図-8 に示す。図-8 から上層密度が 17 kg/m^3 、下層密度が 22 kg/m^3 であり、密度躍層は深さ $2.5 \sim 3 \text{ m}$ の位置に形成されていることがわかる。この結果から密度躍層の約 2 m 下方深さの位置に発信器(トランスポンダ)を浮遊させた。発信器の浮遊状態、浮遊位置は水中カメラを用いて確認した。なお、発信器には水中翼をつけており発信器が流れに追従しやすいようにしている。

4. 観測結果及び考察

4.1 水位変動と流れ方向

図-9 に観測期の中海湖心、米子湾、美保関の水位変動を示す。図-9 から①外海である美保関と中海湖心の水位変動時間の位相差が約 2 時間であること、また②中海湖心と米子湾では水位変動の時間に位相差が見られないことが分かる。観測期間は日潮不等が大きく、1 回目の潮汐では干満差は約 30 cm 、2 回目は 10 cm 程度であった。図-7 には水中に浮遊させたトランスポンダの軌跡が示されている。本観測では、測定圏外に発信器が流された場合には、発信器の回収を行い再放流し、合計 4 回の放流を行った。図-7 と図-9 からトランスポンダの移動方向が変化した時刻は水位の変化の時刻とよく対応し

ていることがわかる。トランスポンダの移動方向が変わったのは、図-9 中に○で示した時間であり、移動方向は外海との水位関係で決まっている。なお、 $20:00$ 頃の満潮と $24:00$ 頃の干潮で移動方向が変化しなかったのは水位変化が小さかったこと及び米子湾奥方向に吹く風

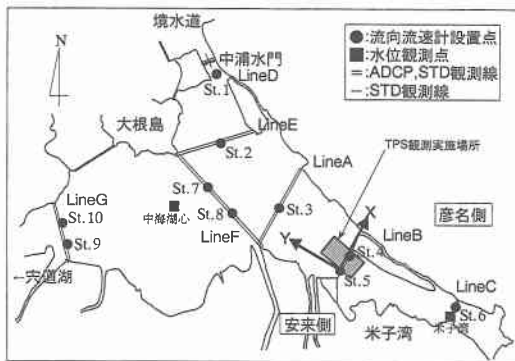


図-6 中海における観測断面

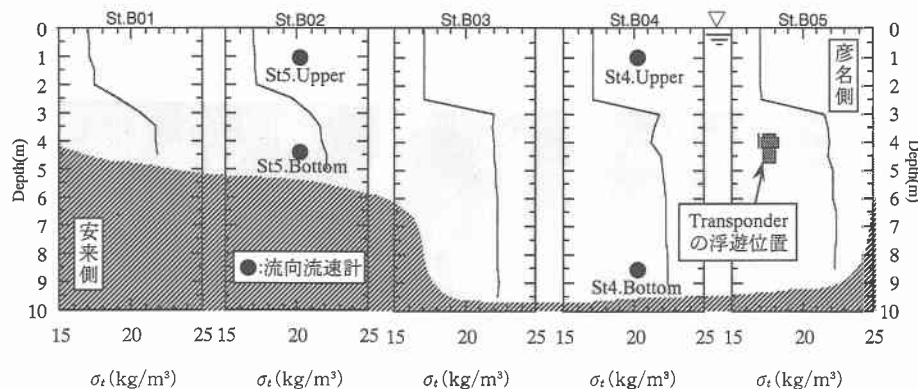

 図-7 密度 19.5 kg/m^3 の位置(水中)に浮かせた浮子の軌跡


図-8 Transponder 放流時の Line B の躍層界面状態

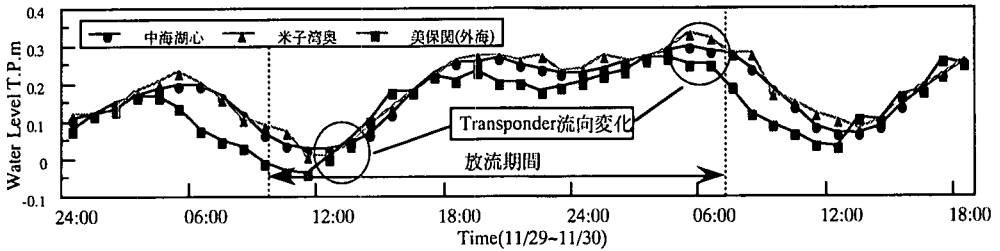


図-9 観測期間の水位変動

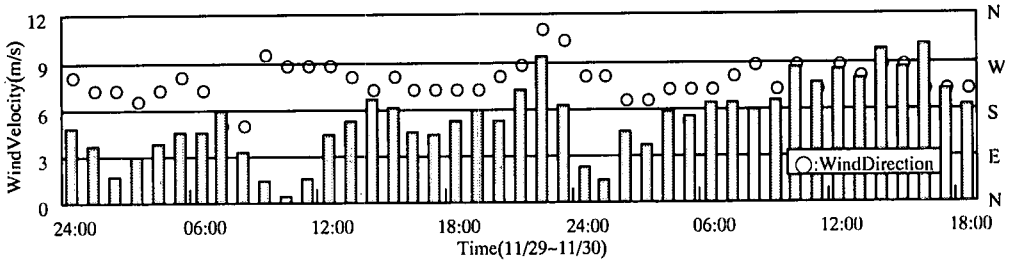


図-10 観測期間の風向・風速

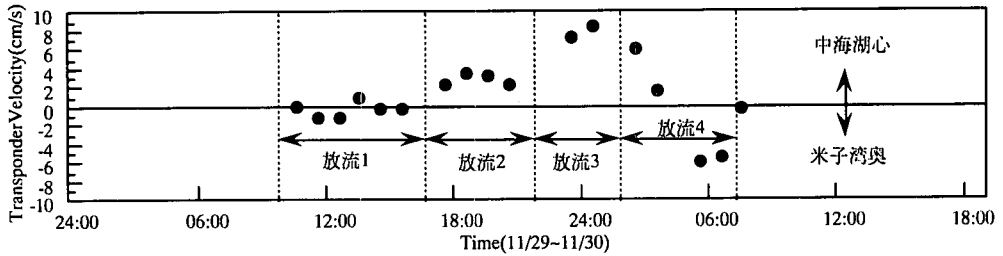


図-11 トランスポンダのY軸方向移動速度

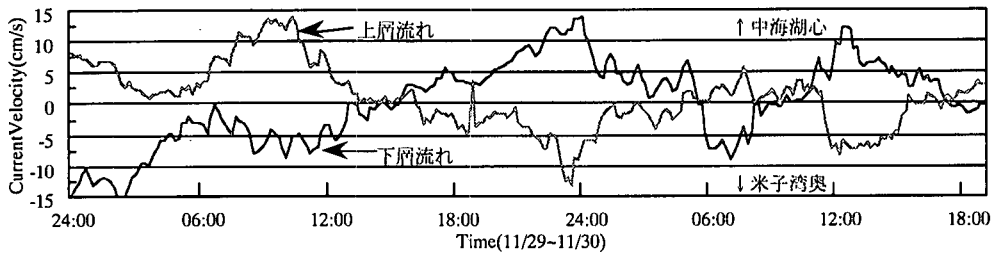


図-12 流向流速計 (St. 5) の上層・下層のY軸成分

(図-10) によって吹送流が生じたものと考えられる。

4.2 潮汐・風による米子湾の流れ場とトランスポンダの移動速度の関係

図-11 には米子湾の長軸方向をY軸、短軸方向をX軸としたとき(図-6 参照)のトランスポンダの移動速度のY軸方向成分と放流1~4を行った期間が示されている。図-11と図-12を比較すると、下層の流向流速計の流速のY軸方向成分がトランスポンダの移動速度とほぼ一致することから発信器の軌跡は下層の流れ場を表しているといえる。図-13は図-6に示すline A, line E,

line FでADCPによって計測された上層, 下層の流向流速である。図-13と図-9からLine Eにおいて、以下のことが説明できる。①観測期に多く見られた中海水位が外海(美保関)水位より高くなる場合は上層は外海へ流出, 下層は中海へ流入している。②下げ潮時(11/29/11:00, 21:00, 11/30/07:00)には中海と外海の水位差がさらに大きくなり, 上下層で外海への流出が生じる。③上下層で中海への流入が生じたのは11/29/12:00~18:00までの水位上昇が約30cmのとき(11/29/15:00)だけであった。④11/29/23:00には中海水位が

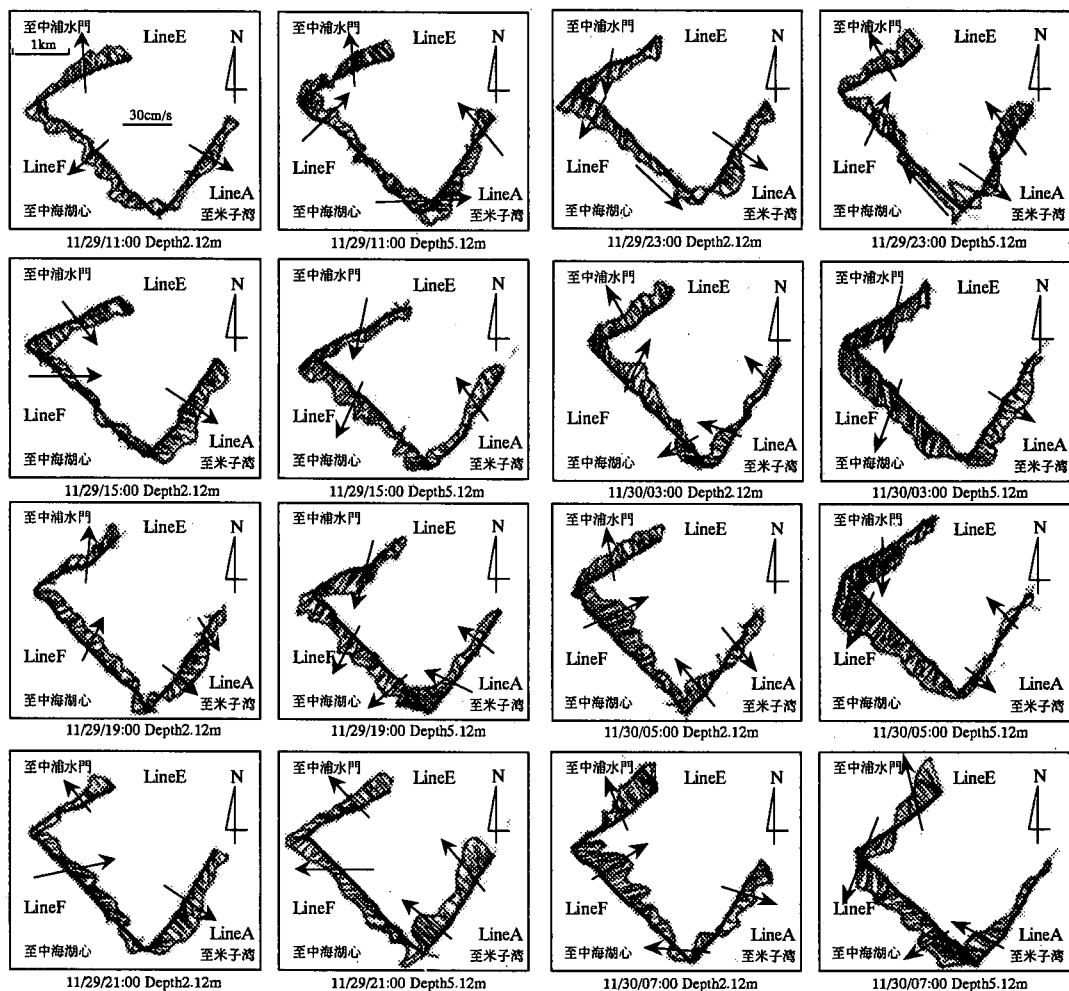


図-13 Line A, E, F 上層・下層における ADCP の時間別流向・流速

外海水位よりも高い（水位関係は①の状態）にも関わらず、上層水は中海へ流入、下層水は外海へ流出している。これは 11/29/22:00 から 24:00 にかけて吹いた西方向の強風（図-10）によって吹送流が卓越したためである。Line E の流れ場は潮汐による水位変動と対応することがわかるが（図-13）、Line A から米子湾奥にかけては、トランスポンダの流向（図-11）、St.5 流向流速計の流向（図-12）、ADCP の流向（図-13）等を比較すると潮汐による水位変動によって流向の変化がある場合と無い場合がある。Line E と Line A の流れ場から米子湾内では潮汐の強弱と風向・風速が影響しあって流れの方向が決定されていると考えることができる。Line F の流向・流速については、さらにデータを加え検討する必要がある。

5. まとめ

本研究で明らかになったことは以下の通りである。

（1）本研究で新しく開発した時空間同時測位装置

は、①水深が浅く、狭い水域においても十分な精度で作動すること、②米子湾においては半径が約 1 km の範囲で流動観測が行えることを確認できた。

（2）トランスポンダ（浮子）は、浮遊地点の流速にほぼ等しい速度で移動していることを確認できた。

（3）米子湾の流れ場は、外海の水位変化と風系に支配されており、外海の水位変化量と風向、風速によって流れ方向が決定されている。

謝辞：本研究を進めるにあたり（株）古野電気の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 日比野忠史：連結系汽水域での流動一気候・気象の変化が流れに及ぼす影響一，1996 年度（32 回）水工学に関する夏期研修会講義集，A コース，pp. A-7-1-20, 1996.
 日比野忠史・福岡捷二・池内幸司：日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖での流れ場，水工学論文集，第 41 巻，pp. 495-500, 1997.