

大阪湾における友ヶ島反流の現地観測

石塚正秀*・松田真人**・西田修三***・中辻啓二****

1. 研究目的

これまで、水質悪化の原因となる栄養塩の負荷は陸水起源の影響が大きいといわれてきた。しかし、大阪湾と外洋をつなぐ紀伊水道で 1995 年夏に実施した流速ならびに栄養塩の横断面分布から、一日あたり窒素 200 トン、リン 34 トンが紀伊水道へ流入していることが分かった(藤原ら, 1997)。これらの値は陸起源の流入負荷量, すなわち河川等からの流入負荷量, 一日あたり窒素 200 トン、リン 20 トンに相当する。つまり、窒素やリンの総量規制を行ったとしても外洋から上記のように流入している限り、大阪湾の水質は改善されないことを示す結果である。

しかし、現時点においてこの観測結果の偶然性、普遍性を考察するための情報が不足している。とくに、大阪湾と紀伊水道を結ぶ紀淡海峡を通じた海水交換を議論するには紀淡海峡周辺海域の流動構造を解明することが必要である。

大阪湾南部海域には図-1 に示すように友ヶ島反流が存在することが知られている(Fujiwara ら, 1995)。しかし、これまで友ヶ島反流に関する定量的な観測は行われておらず、流動構造は明らかでない。また、友ヶ島反流は栄養塩を多く含む紀伊水道の水塊を大阪湾内に輸送する役割があると考えられるが、その機構は明らかとなっていない。

そこで、本研究では大阪湾における友ヶ島反流の流動構造ならびに周辺海域の流動特性を明らかにするために、ADCP・STD・漂流ブイ・VHF 海洋レーダを用いた現地観測を行ったので、その結果を報告する。

2. 観測概要

(1) 第 1 回観測 (1998 年 11 月 2 日, 大潮)

図-2 に観測海域を示す。観測線 A, B 上(A2~A5, B2~B4)に ADCP を搭載した二隻の船を同時に平行に



図-1 人工衛星 (MOS-1) がとらえた大阪湾の流動, 1987 年 12 月 23 日 (中潮, 北流最大流速 3.4 kn (1.7 m/s)), 北流最強後

走行させ、友ヶ島反流の生成する時間や規模、鉛直構造について観測を行った。また、STD を用いて水温・塩分の計測を北流時に紀伊水道側 (C1 → C8)、転流時に海峡部 (C3 → B2)、南流時に大阪湾側 (B1 → C12 → C13 → C19 → A1 → C20) のすべての観測点で行い、大阪湾に流入する前と流入後の水塊の密度変化を調べた。観測日の北流最大流速 (予報値) は 2.3 kn (1.2 m/s) である。

(2) 第 2 回観測 (1998 年 11 月 20 日, 大潮)

図-2 に示す地点 A4 に船を停泊させて流動・密度の鉛直構造の時間変動を計測した。観測日の北流最大流速 (予報値) は 3.1 kn (1.6 m/s) である。

(3) 第 3 回観測 (1998 年 12 月 18 日, 大潮)

紀淡海峡の北流最強時に漂流ブイを由良瀬戸に投入し、ブイの位置とその位置での水温・塩分を観測した。また、同時に、友ヶ島反流の渦度を算定するために友ヶ島反流の形成される海域に四辺を囲む正方の ADCP 観測線 D を設けた。観測線を一周するには約 1 時間を要

* 学生会員 修(工) 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 工 博 大阪大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻
**** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

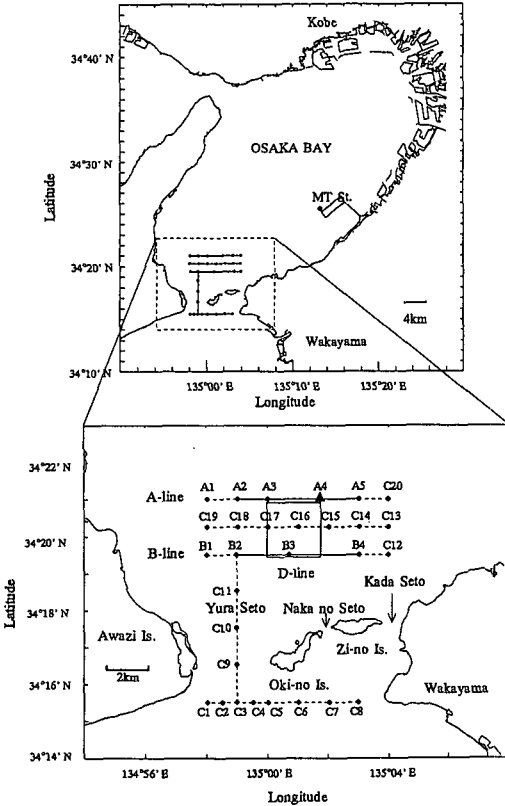


図-2 ADCP・STDの観測海域

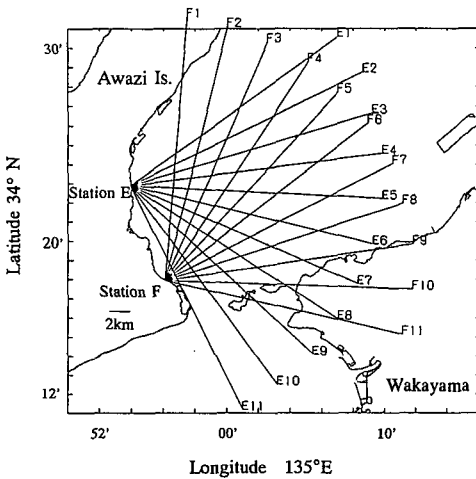


図-3 海洋レーダの観測海域, 2月18日~3月4日

し, 合計7周した。観測日の北流最大流速(予報値)は2.3kn(1.2m/s)である。

(4) 第4回観測(1999年2月1日~3月4日)

淡路島にVHF海洋レーダ(周波数41.900MHz)を二機設置して海表面の流速を計測した。E局は洲本市中川原町(北緯34°22.89', 東経134°53.92'), F局は洲本市由

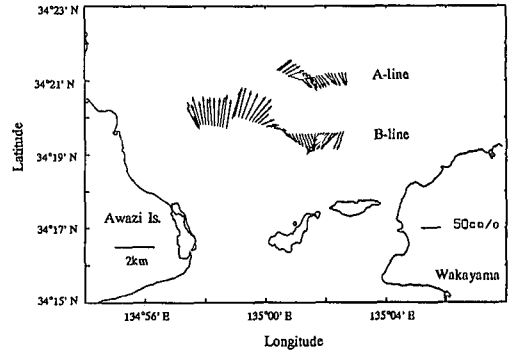


図-4 友ヶ島反流, 北流から南流への転流時, 1998年11月2日

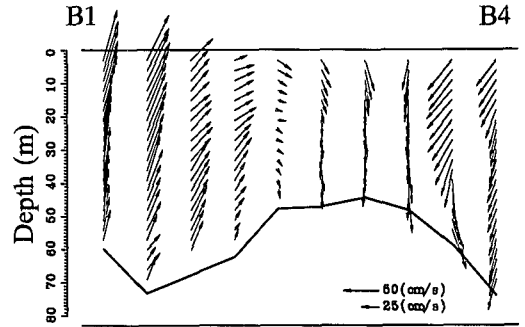


図-5 友ヶ島反流の鉛直構造, 北流から南流への転流時, 1998年11月2日

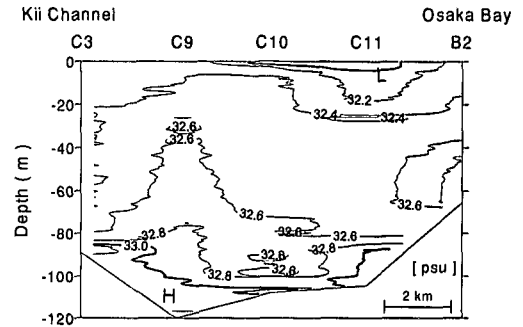


図-6 紀淡海峡における塩分の鉛直分布, 北流から南流への転流時

良町(北緯34°17.95', 東経134°56.10')である。観測は大潮と小潮を含む15日間ずつ2期間に分けて行い, 前半の2月1日~16日はビーム間隔を8°, 後半の2月18日~3月4日はビーム間隔を10°(図-3)に設定した。ビーム間隔を変えることにより, 観測範囲が変わり, 友ヶ島反流の流動変化や時間変動特性を調査することができる。また, ビーム本数は11本として1時間毎の流動ベクトルを算定した。

ADCPおよびVHF海洋レーダの概要については中辻ら(1999), 2(2)の定点観測については石塚ら(1999)

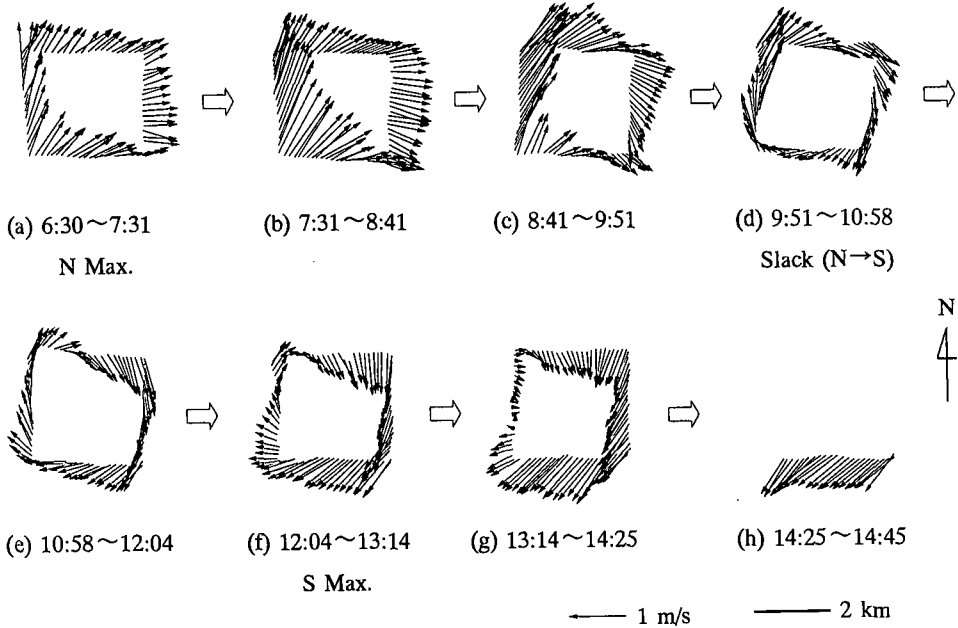


図-7 友ヶ島反流の形成と消滅過程

に詳しい。

3. 観測結果およびその考察

(1) 友ヶ島反流の流動構造と密度変化

図-4 は北流から南流への転流時の友ヶ島反流を示す。水深は1 mである。観測は ADCP を搭載した2隻の船を同時に並行に移動させて行った。その結果、時計回りの友ヶ島反流が明瞭に観測された。由良瀬戸の北側では流れが速く、沖ノ島の背後では流速が減少しており、友ヶ島反流は沖ノ島の影響を受けた地形性の循環流であることが分かる。また、反流の中心は観測線 B 付近であると予想され、この位置は沖ノ島の北側約4 km 付近である。観測線が途中で不連続になっているのは、停泊中に船が移動したためである。

また、同時刻の観測線 B における流動の鉛直分布を図-5 に示す。水平分布で見られたように、鉛直的にも流向が時計回りに変化しており、友ヶ島反流が全水深にわたり存在していることが明らかとなった。また、友ヶ島反流の中心部分の水深が浅くなっており、これは明石海峡からの潮流ジェットにより形成される沖ノ瀬環流の中心の沖ノ瀬と同様の過程で形成されたと考えられる。

図-6 は北流終了時の由良瀬戸縦断面 (C3 → B2) における塩分の鉛直分布を示す。同図から由良瀬戸中央部 (C9) において底層に存在する高塩分の重い水塊が中層まで上昇していることがわかる。このことから海峡部の速い流れによって強い鉛直混合が生じていることがわか

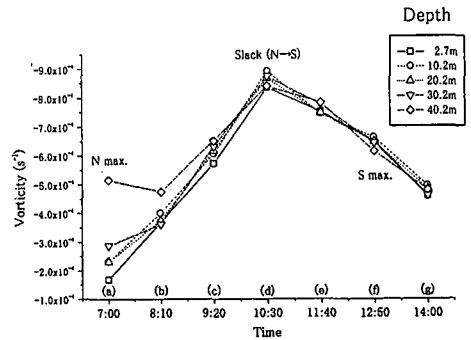


図-8 友ヶ島反流の渦度の時間変化と鉛直分布

る。また、図には示していないが、南流時に行った大阪湾内の観測では、表層部において低塩分 (31 psu 以下) ・低温 (23℃以下) の大阪湾内水塊の同海域への移動が観測された。

(2) 友ヶ島反流の生成・消滅過程

a) 流動ベクトルの変化

友ヶ島反流の中心が位置すると予想される海域で四辺を囲む正方領域を設定し、ADCP を用いて友ヶ島反流の生成・消滅過程を観測した。その結果を図-7 に示す。先述の観測結果と同様に、北流から南流への転流時に明瞭な時計回りの反流が計測された。まず、紀淡海峡の北流最強後 (a~c) は北東・東に向かう流れが卓越し、紀淡海峡の北流最大後 30 分 (b) に流速が最も速くなる。そして、転流時に時計回りの渦流がみられる (d)。その後、

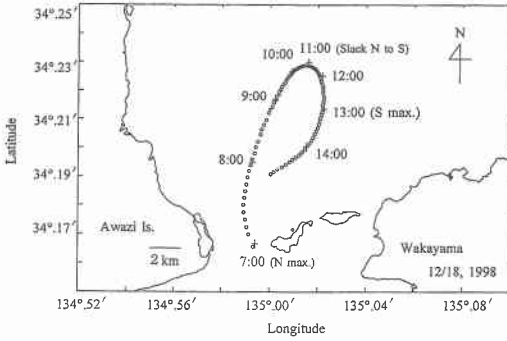


図-9 漂流ブイがとらえた友ヶ島反流, 1998年12月18日

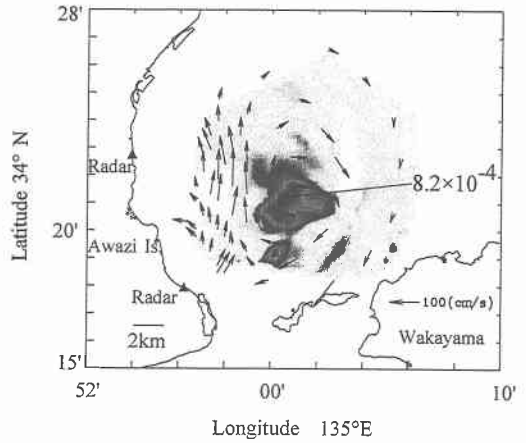


図-11 海洋レーダがとらえた友ヶ島反流と渦度分布

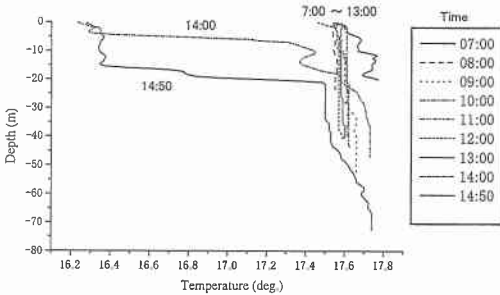


図-10 ブイ位置における水温の鉛直構造の時間変化

(3) 友ヶ島反流の形状

漂流ブイを北流最強時に由良瀬戸に投入し、8時間追跡した。測流板の位置は水深10mである。観測結果を図-9に示す。北流最強時(7:00)に投入されたブイは加速されながら運ばれ、転流時(11:00)に友ヶ島の北側約11kmに到達した。その後、友ヶ島反流の流れとともに向きを変え、13:00までは友ヶ島反流とともに南下する。

また、図-10はブイ位置においてSTDで計測した水温の鉛直分布の時間変化を示す。ブイ投入時(7:00)から南流開始2時間後(13:00)までの6時間は水温の時間的な変動はなく、鉛直混合した水塊が図-9に示した軌跡を移動していることが分かる。しかし、南流最強1時間後(14:00)には表層の水温が約1°C低下しており、大阪湾内に存在していた低温の水塊が流入してきたことが分かる。同様の傾向は塩分分布にも見られた。本観測では漂流ブイの測流板の水深が変化しないため、13:00以降のブイ位置での水温の低下は、ブイが異なる水塊の流れに運ばれたことを示す。したがって、北流時に大阪湾へ流入した水塊は図-9の13:00の位置まで移動したことが分かる。13:00以降の湾内水の移動は、図-7e~fにみられる南西流(東岸恒流帯)によりもたらされたと考えられる。

(4) 友ヶ島反流の変動特性

海洋レーダは連続的に広域の流動を計測することができる特徴があり、ここでは友ヶ島反流の長期的・空間的な変動特性について考察する。

図-11は海洋レーダで計測された友ヶ島反流と渦度分布を示す。計測日時は2月18日12時(大潮(北流最強流速2.7kn(1.4m/s)),北流から南流への転流前30分)である。由良瀬戸の北側では50cm/sを越す北流が卓越しており、沖ノ島の北側では友ヶ島反流が明瞭に計測さ

南流が始まると南西向きの東岸恒流帯の影響をうけて、観測領域の右下の海域から徐々に南西流が強まる(e~g)。これと同時に友ヶ島反流は規模を弱めながら西側に移動し、南流最強時でも流れの弱い海域が存在している(g)。このような流動の変化は鉛直的にも同様にみられた。

b) 渦度の変化

図-8は上述のADCP観測により計測された流速値から算定した友ヶ島反流の渦度の時間変化と鉛直分布を示す。渦度は北流最大時(7:00)から増加し、転流時(11:00)に最大値 $-8.0 \times 10^{-4} (s^{-1})$ となる。これはコリオリ係数 (-0.82×10^{-4}) の約10倍の大きさである。転流後、渦度は徐々に減少しており、渦度の減少の変化率から、南流から北流への転流時までには渦が消滅すると予想される。また、渦度は表層と底層でも同じ値であり、友ヶ島反流は鉛直方向に一樣に存在していることが分かる。

以上の結果から、友ヶ島反流は北流から南流への転流時に明瞭な渦流として生成され、南流最強時まで残留していることが明らかとなった。これは沖ノ瀬潮流が明石海峡の西流最強時においても存在している現象と同じである。また、渦度の大きさから判断して、友ヶ島反流は大阪湾に流入する水塊の挙動に大きな影響を与える流動といえる。

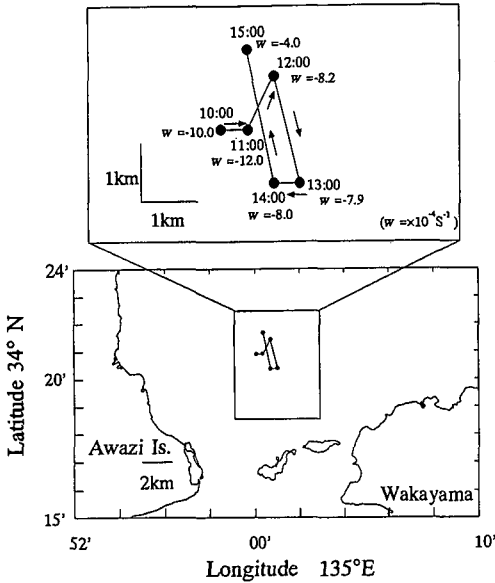


図-12 友ヶ島反流の移動経路と渦度

れている。この時、友ヶ島反流は南北に約16 kmの大きさを有する。また、流速を500 m間隔に空間補間して渦度の空間分布を算定すると、友ヶ島反流の空間特性が分かる。色の濃い部分が時計回りの渦度を表す。つぎに、図-12は友ヶ島反流の中心位置の移動経路を示す。図-12下段の四角領域(南北8 km×東西6.5 km)において渦度の空間分布を求め、その最大値を渦中心と判断した。図-12上段は移動経路の拡大図と渦度を示す。北流最強1時間後(10:00)から友ヶ島反流が計測され、転流の1時間30分前(11:00)に渦度が最大となる。その後、友ヶ島反流は南流最強時(15:00)まで存在していた。また、渦の中心位置は約2 kmの範囲で移動していることが分かった。

図-13に紀淡海峡北流最強時の流速と友ヶ島反流の渦度の関係を示す。紀淡海峡の北流最大流速が2.3 kn(1.2 m/s)以上の場合、 -6.0×10^{-4} 以上の渦度をもつ友ヶ島反流が形成されることが分かる。このことから、大潮期、小潮期にかかわらず、北流が卓越する潮時において友ヶ島反流が発生することが明らかとなった。

今回、友ヶ島反流のように時間的な変動が速い現象に対してもVHF海洋レーダで観測を行うことができたことは大変興味深い。また、ビーム間隔を8°から10°に変化させると観測面積は25%大きくなるが、逆に空間的に粗くなる。今回の観測では、ビーム角度の変化にかかわらず、友ヶ島反流はそれぞれ計測された。

4. まとめ

大阪湾南部海域を対象として、1998年11月から1999

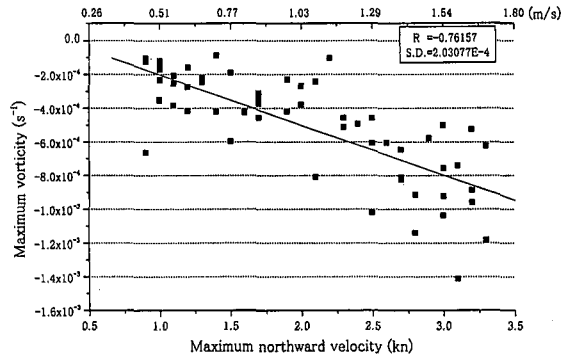


図-13 紀淡海峡北流最大流速と渦度の関係

年3月にかけてADCP・STD・漂流プイ・海洋レーダを用いて友ヶ島反流の観測を行った。主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 友ヶ島反流は紀淡海峡の北流最強時から南流への転流時頃に友ヶ島の北側4~11 kmの海域に発生する。
- (2) 友ヶ島反流の渦度は $-6.0 \sim -12.0 \times 10^{-4} (\text{s}^{-1})$ である。
- (3) 友ヶ島反流は南流時にも残留し、南流最強時に降に消滅する。
- (4) 友ヶ島反流は鉛直様に存在する。
- (5) 北流流速が2.3 kn(1 m/s)以上の時に友ヶ島反流が生成される。小潮期でも北流流速が大きい場合に友ヶ島反流は発生し、逆に大潮期でも発生しない場合があることが分かった。

謝辞:本研究の実施に際しては、文部省科学研究費補助金基盤((C)09650565)(研究代表者 中辻啓二)の交付を受けたことを付記する。また、現地観測に際しては関西国際空港株式会社の協力を得た。記して謝意を述べる。

参考文献

- 石塚正秀・西田修三・中辻啓二(1999): 海洋レーダによる表層流れと風に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1341-1345.
- 中辻啓二・石塚正秀・徳田正幸・村上和男・藤原建紀(1999): VHF海洋レーダによる表層流動の観測とADCPによる検証, 水工学論文集, 第43巻, pp. 845-850.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本亘(1997): 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1061-1065.
- Fujiwara, T., H. Nakata and K. Nakatsuji (1994): Tidal-jet and vortex-pair of the residual circulation in a tidal estuary, Continental Shelf research, Vol. 14, No. 9, pp. 1025-1038.