

鹿児島湾への外洋水の流入に及ぼす 大隅分枝流の影響について

INFLUENCE OF THE OSUMI BRANCH CURRENT ON OCEANIC WATER
INFLOW INTO KAGOSHIMA BAY

山城 徹¹・繁原俊弘²・浅野敏之³

Toru YAMASHIRO, Toshihiro SHIGEHARA and Toshiyuki ASANO

¹非会員 博士(理) 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

²正会員 修士(工) 総合科学(株)環境計画部環境解析課 (〒540-0024 大阪市中央区南新町1-4-8)

³正会員 工博 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

Properties of the current velocity index of the Osumi Branch Current (OBC) in the Osumi Strait south of Kyushu were re-examined using sea-level data during 1971-2003. The high correlation with the current velocity measured in the Osumi Strait confirmed that the sea-level difference between Nishino-omote and Odomari is a good index to monitor the current velocity of the OBC. Using daily values of the index and water temperature measured in Kagoshima Bay in 1999, it is found that the current velocity fluctuations of the OBC with periods less than about 8 days significantly contribute to oceanic water inflow into Kagoshima Bay. Moreover, the oceanic water is shown to reach to the central part of Kagoshima Bay about 1.3 day after it enters into the bay along the Osumi Peninsula.

Key Words: Oceanic water inflow, Kagoshima Bay, Osumi Branch Current

1. はじめに

鹿児島湾は九州本土の最南端に位置し、北から湾奥部、湾中央部、湾口部と呼ばれる3つの海域から成り、南に開く湾口を通して薩南海域につながっている(図-1)。この湾は南北約70km、幅約25kmと南北に細長い閉鎖性の強い湾形と、湾口部の水深は100mよりも浅いが、湾奥部と湾中央部の最大水深は200mを越える独特な海底地形によって特徴づけられている¹⁾。

鹿児島湾は古くから養殖業や海洋レクリエーション等で活発に利用され、また内湾に桜島を抱く美しい景観は県の重要な観光資源である。ところが、鹿児島湾が閉鎖性の強く水深の深い内湾であることに加え、湾岸域での人口および産業活動の拡大や温暖化に伴う湾内海水温の上昇によって、鹿児島湾の水質は今後悪化する危険度が高く、鹿児島湾の海水交換過程はますます重要な関心事になっている。

一般には潮流や潮汐残差流、吹送流、密度流などが海水交換の要因として挙げられているが、鹿児島湾では黒潮や大隅分枝流も湾内の海水交換に大きな役割を果たしている。黒潮は奄美大島と種子島間のトカラ海峡を通過して東シナ海から太平洋に入っており、トカラ海峡ではその位置を南北に大きく変

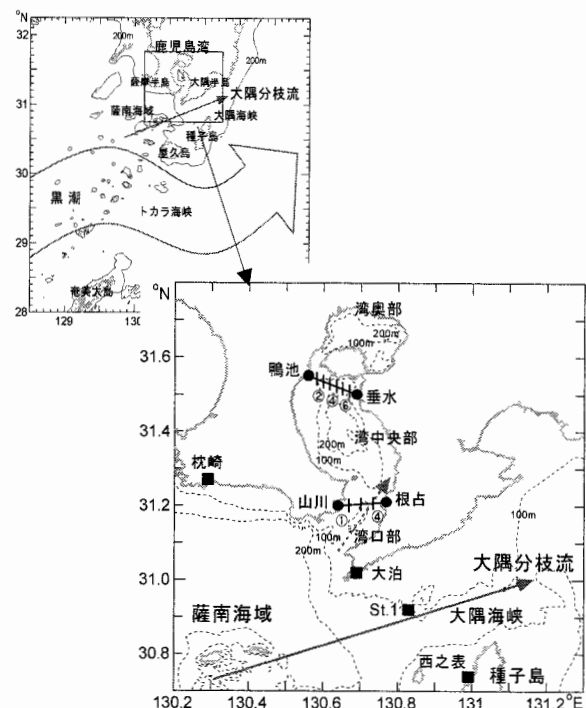


図-1 鹿児島湾と大隅分枝流

化させている^{2), 3)}。一方、大隅分枝流はトカラ海峡において黒潮から分岐した支流で、鹿児島湾の南に広がる薩南海域および大隅半島と種子島の間の大隅海峡を通過して太平洋に入っている(図-1)。Maeda et

al.⁴⁾は西之表と大泊の潮位差を大隅分枝流の流速と仮定することによって、鹿児島湾口部での測流結果との相関を調べ、黒潮前線(黒潮の北縁)がトカラ海峡の北方へ変位し、鹿児島本土に接近すると鹿児島湾への外洋水の流入と大隅分枝流の強度が増加していることを報告した。大谷ほか⁵⁾も鹿児島湾内に設置されたブイロボットの水温データとLandsat衛星によって得られた鹿児島湾の熱赤外面像を解析して、Maeda et al.⁴⁾と同様な結果を示す一方で、黒潮前線の北方変位が鹿児島湾への外洋水の流入といつも関係しているわけではないことを指摘した。このことは外洋擾乱の時空間スケールが鹿児島湾への外洋水の流入を決定する重要な要因の1つであることを示唆しているが、黒潮の流路変動や大隅分枝流の流速変動の中で、外洋水の湾内流入に寄与する変動成分がどのような時空間スケールを持っているのかは未だ明らかではない。

好漁場の薩南海域および国際海峡として海上交通の要所である大隅海峡では、多数の船舶が航行するために、係留系による直接測流がむずかしい。実際に、係留系による測流例はわずかしがなく、その例も大隅海峡の潮流定数の決定を目的とした2週間程度の短期間のものである⁶⁾。係留測流以外では、海上保安庁や水産試験場等が大隅海峡でGEKあるいはADCPを用いた測流を長年実施している。これらは大隅分枝流の流動特性をおおよそ把握するには有効ではあるが、測定間隔が年4回と粗いために、分枝流の流動特性を詳細に調べるには十分ではない。大隅分枝流が黒潮の支流であることから地衡流平衡にあるとすれば、大隅分枝流の沖側と岸側の潮位差は分枝流の流速をモニターする有効な情報であると考えられる。実際、市川⁷⁾は大隅分枝流の沖側に位置する西之表と岸側に位置する大泊の潮位差が大隅海峡で実施された1970～79年のGEK観測結果(資料数:48)と良い相関を持つことを指摘している。したがって、これらの潮位データを用いることによって、細かい時間間隔で長期間に亘って大隅分枝流の流速時系列を得ることが可能になる。

本研究では最初に、大隅海峡で近年まで実施された多数のGEKおよびADCP観測結果を活用することで、西之表と大泊の潮位差が大隅分枝流の流速の指標として有効であることを確認する。そして、潮位差から推算した大隅分枝流の流速変動と鹿児島湾への外洋水の流入の指標となる湾内水温変動の相関を調べることによって、大隅分枝流の流速変動の中で、どのような時間スケールを持った変動成分が外洋水の湾内流入に寄与しているかを明らかにする。

2. 資料

本研究では、1971～2003年の海上保安庁海洋情

報部管轄の西之表と気象庁管轄の大泊の毎時潮位資料を用いた。潮汐60成分から成る推算潮位を計算し、この推算潮位を原資料から除去した毎時資料から日平均値を計算し、その後、1013hPaを基準として、-10.0mm/hPaの気圧補正を日平均潮位に施した。毎時潮位資料は日本海洋データセンター(JODC)のJODC Data On-line Service Systemを利用して、JODCのデータベースから入手した。西之表の潮位については、気象庁月報⁸⁾から得た種子島の日平均気圧資料を用いて気圧補正を施した。大泊の潮位の気圧補正については、枕崎と種子島の平均気圧を使用した。

西之表と大泊の潮位差と大隅分枝流の関係を調べるために、1971～2003年の第十管区海上保安本部によって大隅海峡のSt. 1(図-1)で季節毎に測定されたGEKおよびADCP海面流速観測資料⁹⁾を使用した。解析に使用した資料数は80である。

冬季では黒潮系外洋水の水温は鹿児島湾内水よりも明らかに高いことから、湾内で発生する水温の急上昇は外洋水の流入に関係することが知られている(例えば、大谷ほか⁵⁾の写真1、菊川ほか¹⁰⁾の写真1～4、秋山ほか¹¹⁾、櫻井ほか¹²⁾)。そこで、鹿児島湾への外洋水の流入をモニターするために、1998～2002年に湾口部の山川と根占を結ぶ線(YN線)と湾中央部の鴨池と垂水を結ぶ線(KT線)上を就航するフェリーのエンジン冷却用送水管に水温計を取り付け、鹿児島湾を横断する深さ約3mの水温観測を実施した。図-1に示すように、YN線は4区間(1区間は2kmで、薩摩半島側から、便宜上、区間①、②、③、④と呼ぶ)、KT線は7区間(1区間は3kmで、薩摩半島側から、便宜上、区間①、②、③、④、⑤、⑥、⑦と呼ぶ)に等分割することによって、区間毎の平均水温(以後、区間水温と呼ぶ)値を計算した。1日のフェリーの往復回数は基本的にYN線で6回、KT線で10回であることから、1日にYN線では12回、KT線では20回の鹿児島湾横断水温観測を実施したことになる。これら観測毎の区間水温値を平均することによって、日平均区間水温値を求めた。水温計を取り付けたフェリーの運航時間はYN線で8:00～18:00、KT線で5:30～23:00であり、日平均水温は実際には夜間を除いた平均水温であるが、鹿児島湾への外洋水の流入をモニターすることに対して問題はないと考える。

3. 大隅分枝流の流速の指標

第十管区海上保安本部は長年に亘って、大隅海峡のSt. 1(図-1)で年4回GEKあるいはADCPによる海面流速観測を実施している。1971～2003年にSt. 1で測定された流向・流速の散布図を図-2に示す。図中のベクトルは平均流速を示し、真北から時計回りに79°方向、すなわち凡そ東北東向きに69cm/sの大きさを持っている。図-2から大隅海峡の流れの向きが

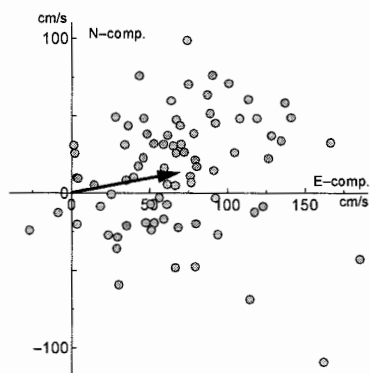


図-2 St. 1での流向・流速散布図

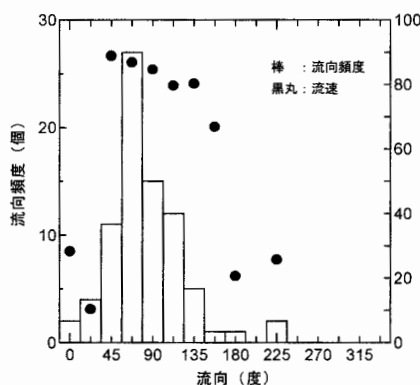


図-3 流向の頻度分布と22.5°の流向の幅の中で平均した流速

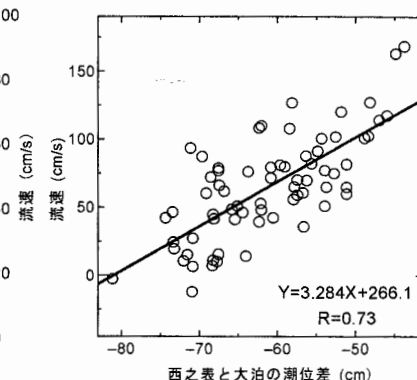


図-4 西之表と大泊の潮位差とSt. 1の流速の東北東向き成分の相関

北東向きから南東向きの間に集中していることがわかる。このような特徴は、流向の頻度分布を調べることによって、もっと明確に示すことができる。16方位に分割した場合、流向の頻度は北東向きから東南東向きの間で高く、モードは東北東向きにある(図-3)。そして、北東向きから東南東向きの流れは80cm/s以上の平均流速を示し、頻度の最も高い東北東向きの流れの平均流速は87cm/sに達している。したがって、本研究で解析する流速資料はGEKあるいはADCPによって測定された瞬時のものであり、潮流や吹送流成分なども含んでいる可能性はあるが、大隅海峡の流況を特徴づける大隅分枝流を十分に反映していると言える。

このようなSt. 1の流速資料を用いて、さまざまな方向の流速成分に対して西之表と大泊の潮位差との相関を計算した。西之表と大泊の潮位差は真北から時計回りに56~88°方向の流速成分と0.70以上の相関係数を持ち、特に真北から時計回りに72°方向(東北東向き)の流速成分と最も相関が良く、その係数は0.73である(図-4)。この高い相関は、西之表と大泊の潮位差 SLD (cm) が大隅分枝流の流速をモニターする良い指標であることを示し、次の回帰式から大隅分枝流の毎日の流速 V (cm/s) を計算できる。

$$V = 3.284 \cdot SLD + 266.1 \quad (1)$$

実測例は少ないが、図-4中には流速が負の値をとった場合がみられる。これは西南西向きの成分を持つ流れであり、大隅分枝流ではない。ところが、このような西向きの流れの場合は西之表と大泊の潮位差が大きな負の値をとり、潮位差は西向きの流れをモニターする指標としても有効であると思われる。

4. 大隅分枝流の流速変動

フェリーに取り付けた水温計にトラブルがあり、YN線とKT線の両線上でほぼ1年を通して良好な水温データを同時に取得できた年は1999年であった。そこで、 SLD と(1)式からみつめた1999年の毎日の大隅分枝流の流速値を図-5に示す。大隅分枝流の流

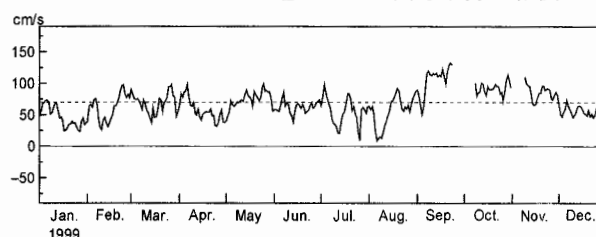


図-5 西之表と大泊の潮位差と(1)式から計算した1999年の大隅分枝流の流速の時系列

速は9.3~132.8cm/sの間を変動し、1999年の平均流速(図中の点線)は69.8cm/sであった。この流速変動の注目すべき点は、卓越する変動の周期や振幅が時期によって変化していることである。このような非定常な時系列の変動特性を調べるために、測定されたデータの時間と周波数の情報を同時に捉えることのできるウェーブレット・スペクトル解析を行なった。この解析をする際には、線形補間によって欠損部分(図-5参照)を補完している。ここでは、128日以下の周期変動のウェーブレット・スペクトルを図-6に示す。図中の曲線の外側については、スペクトルが意味を持たない。変動強度の相対的に強いところは白く、弱くなるにつれて黒くなるように図を描いており、およそ周期32日以上の変動はそれよりも短い周期の変動に比べて強度が相対的に強く、そしてほぼ1年を通して強度の強い状態を維持していることがわかる。一方、およそ周期32日以下の変動については、強度が時期によってかなり変化している。例えば、8日周期については、2月上旬~下旬や3月中旬~4月上旬、4月下旬~5月上旬、6月上旬~下旬、8月下旬~9月中旬、10月中旬~下旬、11月下旬~12月中旬の変動強度がそれ以外の期間と比べて相対的に強い。したがって、1999年の大隅分枝流の流速について、約32日以上を持つ変動は1年を通して強い強度を持っていたのに対して、約32日以下の周期を持つ変動の強度は時期によって変化していたことがわかる。

5. 鹿児島湾の水温変動

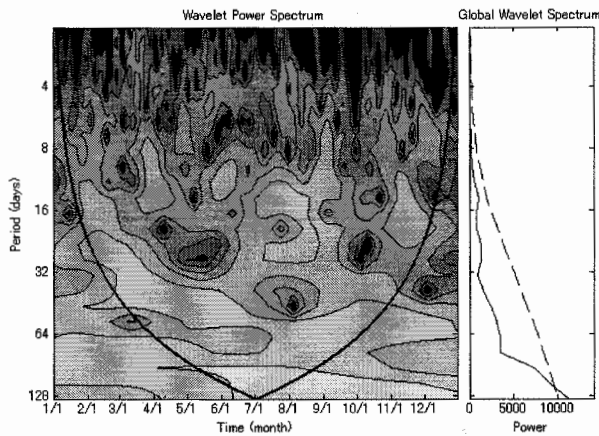


図-6 西之表と大泊の潮位差と(1)式から計算した
1999年の大隅分枝流の流速のWaveletスペクトル

1999年の鹿児島湾を横断するYN線上の区間①～④の日平均区間水温を図-7(a)に示す。水温は2月に最低値、8～9月に最高値をとる明瞭な季節変動を示すと共に、スパイク状の水温変動がしばしば現われていた。特に、2月下旬、3月中旬、3月下旬～4月初旬、5月中旬(図中の実線矢印)では水温が3日間の内に 2°C 以上の急上昇を示し、その中でも3月中旬は約 4°C の水温上昇があった。このような大きく急激な水温上昇は黒潮系暖水の湾内流入に関連して発生していることが過去の研究によって報告されている^{5), 10)～12)}。さらに図-7(a)から、スパイク状の水温変動について、区間③と④の水温上昇が区間①よりかなり大きいこともわかる。これは外洋水の湾内流入が薩摩半島側よりも大隅半島側で活発に行なわれていることを示し、外洋水が大隅半島側から流入する様子は鹿児島湾の熱赤外面像の解析結果^{5), 10)}や鹿児島湾口部の測流結果¹²⁾からも既に指摘されている。4月中旬も3月中旬と同程度の水温上昇がみられたが、全ての区間で水温上昇量がほぼ同じであったことや鹿児島気象台の観測記録から気温が4月上旬から中旬にかけて大きく低下していたことから、4月中旬の水温上昇は気温の回復に伴うものと考えられる。

KT線上の水温変動の代表例として区間②と④、⑥を図-7(b)に示す。YN線上と同様にKT線上においてもスパイク状の水温変動がしばしば現われた。2月下旬、3月中旬、3月下旬～4月初旬(図中の実線矢印)には3日間の内に水温が 2°C 以上の急上昇を示し、特に3月中旬には約 4°C の上昇があった。このような大きく急激な水温上昇は黒潮系暖水が湾中央部のKT線まで到達していたことを示している。さらに、2月下旬では区間②、3月中旬では全ての区間、3月下旬～4月初旬では区間⑥で水温上昇が大きく、湾口部YN線のように外洋水の流入が大隅半島側に偏っているようなことはない。外洋水が大隅半島側のみならず薩摩半島側まで広がりながら湾中央部のKT線に到達したと考える。上述したスパイク状の水温変動が発生した時期をまとめて表-1に示す。

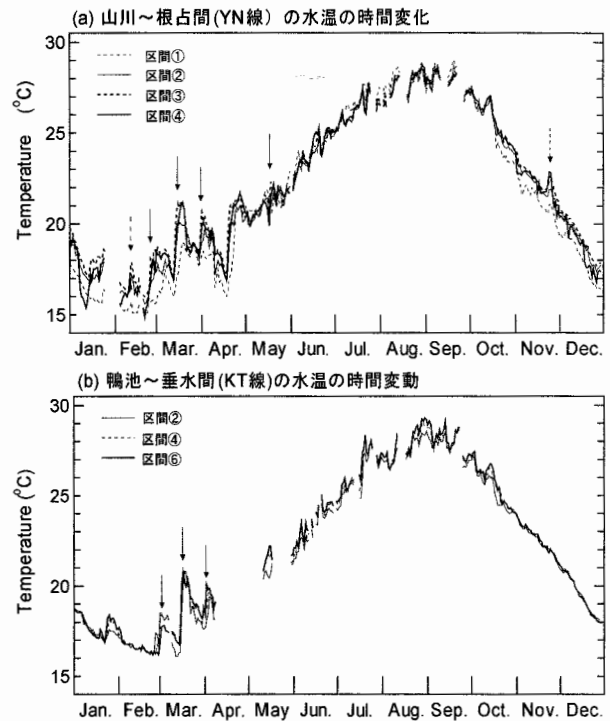


図-7 1999年のYN線(上段)とKT線(下段)での水温変動

表-1 1999年に鹿児島湾内で観測された急激で大きな水温上昇の発生した時期

	時期
YN線	2月中旬, 2月下旬, 3月中旬, 3月下旬～4月初旬, 5月中旬, 11月下旬
KT線	2月下旬, 3月中旬, 3月下旬～4月初旬

YN線とKT線を比較すると、2月中旬や11月下旬のように、YN線上ではスパイク状の水温変動[図-7(a)中の破線矢印]がみられるが、KT線上ではみられないことがある。これは、湾口部のYN線を通って湾内に流入した外洋水が湾中央部のKT線まで到達する場合と到達しない場合があることを示唆している。そこで、外洋水が湾中央部にまで到達した場合について、YN線上とKT線上の水温上昇の発生時期を詳細に調べると、水温上昇が2月下旬においてはKT線上の方がYN線上よりも1日遅れ、3月中旬においてはKT線上の方がYN線上よりも1日遅れ、3月下旬では両線上でほぼ同時で発生していた。平均すると、KT線上の水温上昇はYN線上よりも0.7日遅れている。

以上の結果をまとめると、黒潮系暖水は大隅半島側から湾内に間欠的に流入し、平均して約0.7日かけて湾中央部に到達していると言える。そこで、YN線上とKT線上の1999年の日平均区間水温データをウェーブレット・スペクトル解析することによって、上述した結果を詳細に調べることを試みた。この解析をする際には、線形補間によって欠損部分を補完している。YN線上の区間①(薩摩半島側)と区間④(大隅半島側)のパワースペクトルをそれぞれ図-8(a)と図-8(b)に、KT線上の区間②(薩摩半島側)と

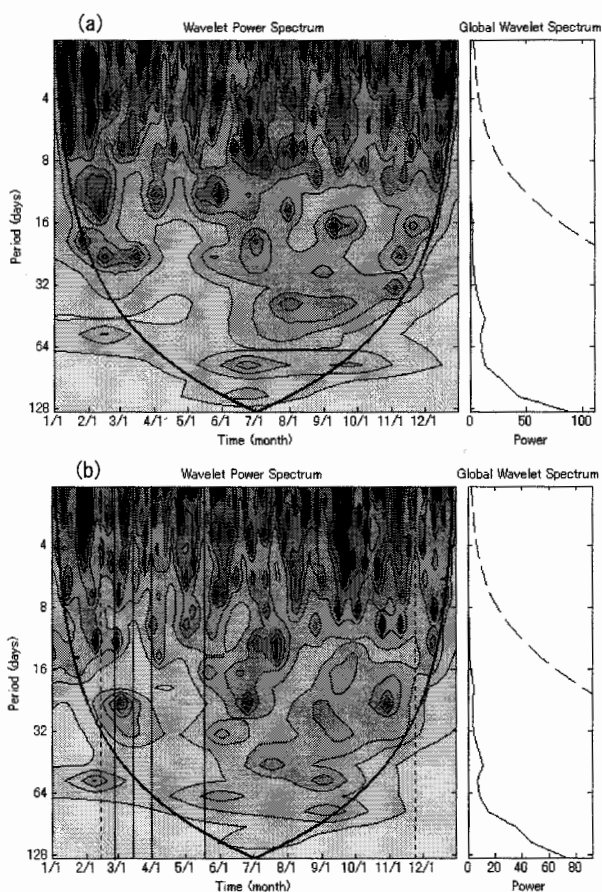


図-8 1999年のYN線上区間①(上段)と区間④(下段)の水温のWaveletスペクトル

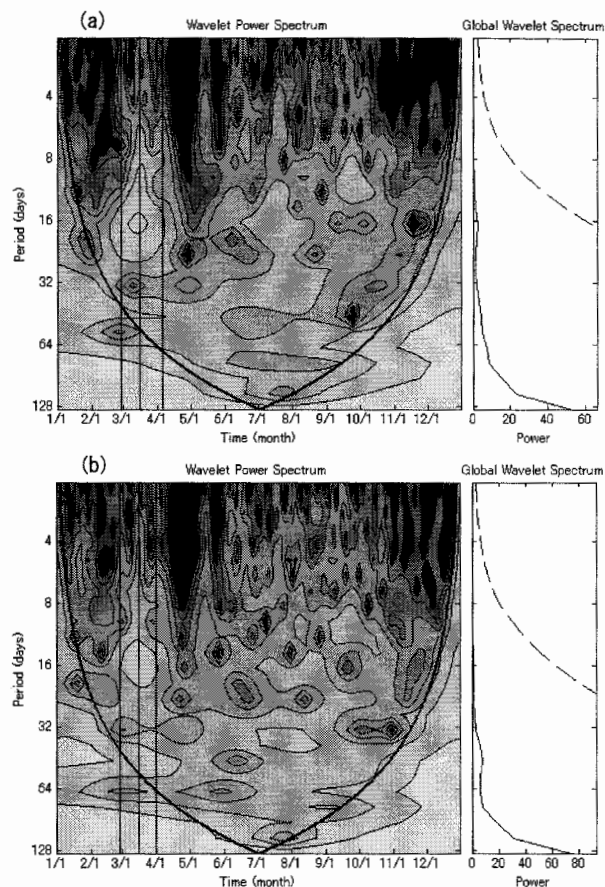


図-9 1999年のKT線上区間②(上段)と区間⑥(下段)の水温のWaveletスペクトル

区間⑥(大隅半島側)の結果をそれぞれ図-9(a)と図-9(b)に示す。図-7(a)中の区間④においてスパイク状の水温変動が発生していた時期は図-8(b)では周期約8日以下の変動強度が強くなっている時期(図中の実線)と一致し、この結果は外洋水の湾内流入に関連する水温変動は主として約8日以下の周期帯で起きていることを示している。さらに、図-8(a)と図-8(b)を比較すると、周期8日以下の変動強度が相対的に強くなる時期は区間④の方が区間①よりも頻繁に現われていることがわかる。この結果は外洋水の湾内流入は薩摩半島側よりも大隅半島側で活発に行なわれていることを示し、上述した図-7(a)の結果を裏付けている。図示はしていないが、全体的には区間②は区間①に、区間③は区間④に強度分布が似ていることから、外洋水の流入は区間②と③の間、すなわち湾口のほぼ中央から大隅半島側で活発であった。YN線上と同様にKT線上においても、図-7(b)中のスパイク状の水温変動が発生していた時期は図-9では周期約8日以下の変動強度が強くなっている時期(図中の実線)と一致している。周期約8日以下の変動について、区間②の強度[図-9(a)]は区間⑥[図-9(b)]と全体的にはほぼ良く似た分布を示している。図示していないが、他の区間も同様であった。これらの結果は、外洋水が湾中央部のKT線に到達したときには大隅半島側のみならず薩摩半島

側まで広がっていたことを示しており、上述した図-7(b)の結果を裏付けている。

6. 鹿児島湾の水温変動と大隅分枝流の流速変動の相関

大隅分枝流の流速変動の中で、どのような時間スケールを持った変動成分が外洋水の湾内流入に寄与しているかを明らかにするために、大隅分枝流の流速と鹿児島湾の水温の時系列をウェーブレット・コヒーレンス解析することによって、これらの変動強度の相関を調べた。大隅分枝流の流速変動とYN線上区間④の水温変動の相関、大隅分枝流の流速変動とKT線上区間④の水温変動の相関をそれぞれ図-10(a)と図-10(b)に示す。相関係数0.6以上のところには、矢印が付けられている。最も興味深い事実は、両線上とも大隅分枝流の流速がおよそ8日以下の周期帯において水温と良い相関を持っていることである。YN線上で外洋水流入に伴うスパイク状の水温変動が発生した2月下旬では周期2~3日、3月中旬では周期2~5日、3月下旬~4月初旬では周期4~8日、5月中旬では周期4~6日[図-10(a)中の実線]や2月中旬では周期3日、11月下旬では周期4日[図-10(a)中の破線]において両者の相関が高く、KT線上でもスパイク状の水温変動が発生して

いた2月下旬では周期2~3日, 3月中旬では周期2~5日, 3月下旬~4月初旬では周期8日[図-10(b)中の実線]において両者の相関が高い。したがって, 第4章で述べたように, 大隅分枝流は1年を通して長周期成分の方が短周期成分よりも変動が活発であるが, 鹿児島湾への外洋水の流入に寄与している変動成分は短周期成分, 特に周期8日以下の成分であると言える。図-10中の矢印の向きは流速と水温の変動の位相差を示し, 右(左)向きの矢印は流速変動が水温変動と同(逆)位相, 下(上)向きは流速変動が水温変動よりも位相が90°進んでいる(遅れている)ことを表す。そこで, 上述した相関の高い周期帯について, 大隅分枝流の流速変動とYN線上区間④の水温変動の位相差を大隅分枝流の流速変動とKT線上区間④の水温変動の位相差と比較すると, 水温上昇が2月下旬においてはKT線上の方がYN線上よりも1日遅れ, 3月中旬においてはKT線上の方がYN線上よりも2日遅れ, 3月下旬ではKT線上の方がYN線上よりも1日遅れで発生していた。したがって, 外洋水は平均して約1.3日遅れで湾口部から湾中央部へ到達しており, この時間の遅れは図-7からみつめた結果とほぼ一致している。

7. 結論

西之表と大泊の潮位差が大隅分枝流の流速の良い指標であることが確認され, 回帰式(1)から大隅分枝流の毎日の流速が計算できる。

(1)式を用いて西之表と大泊の潮位差から推算した大隅分枝流の流速と鹿児島湾で観測した水温の関係を調べた。そして, 主に大隅分枝流の周期8日以下の流速変動が鹿児島湾への間欠的な外洋水の流入に寄与していることを明らかにした。さらに, 外洋水は大隅半島側から湾内に流入した後, 平均して約1.3日かけて湾中央部へ到達していることを示した。

繁原ほか(私信)によると, 1999年の大隅分枝流の流速は黒潮の流軸(強流帯の中心位置)が北方に変位して大隅海峡に接近すると大きくなり, 南方に変位して大隅海峡から離れると小さくなっていた。すなわち, 大隅分枝流の流速の変動強度は黒潮流軸の南北変位の強度に関連して変動していた。この結果は, トカラ海峡における黒潮位置の南北変動の中で, 時空間スケールの短い変動成分が鹿児島湾への外洋水の流入に寄与していることを示唆している。

謝辞: 毎時潮位データを提供頂いた日本海洋データセンターと大隅海峡でのGEK・ADCP観測データ資料を提供頂いた第十管区海上保安本部の皆様に感謝致します。また, 鹿児島湾横断水温観測に多大なご協力して頂いた南海郵船(株)およびフェリー「第五おおすみ」と「第八おおすみ」の船長をはじめ乗組員の皆様に心より厚く感謝申し上げます。

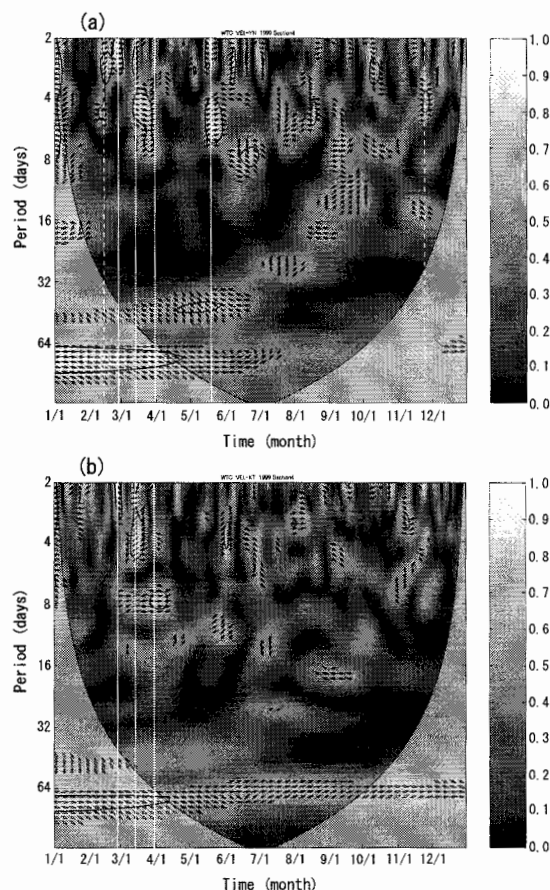


図-10 西之表と大泊の潮位差と(1)式から計算した大隅分枝流の流速とYN線上区間④の水温の変動強度の相関(上段)および大隅分枝流の流速とKT線上区間④の水温の変動強度の相関(下段)

参考文献

- 1) 大木公彦: 鹿児島湾の謎を追って かごしま文庫-61, 223p., 春苑堂出版, 2000.
- 2) Yamashiro, T. and Kawabe, M.: Monitoring of position of the Kuroshio axis in the Tokara Strait using sea level data. *J. Oceanogr.*, Vol.52, pp. 675-687, 1996.
- 3) Yamashiro, T. and Kawabe, M.: Variations of the Kuroshio axis south of Kyushu in relation to the large meander of the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, Vol.58, pp. 487-503, 2004.
- 4) Maeda, A., Yamashiro, T. and Sakurai, M.: Fluctuation in volume transport distribution accompanied by the Kuroshio front migration in the Tokara Strait, *J. Oceanogr.*, Vol.49, pp. 231-245, 1993.
- 5) 大谷賢樹, 菊川浩行, 折田和三, 幸野淳一, 木下紀正: 鹿児島湾への外洋水の流入, 海の研究, 第7巻, pp. 245-251, 1998.
- 6) 第十管区海上保安本部: 大隅海峡東部沿岸流観測報告書, 17p., 1996.
- 7) 市川洋: 大隅海峡での流速変動, 1982年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p43, 1982.
- 8) 気象庁: 1965~2006年気象庁月報.
- 9) 第十管区海上保安本部: 1971~2003年海洋概報.
- 10) 菊川浩行, 小野祐作, 細谷和範, 石黒悦爾: NOAA/AVHRRイメージの内挿法と鹿児島湾への暖水流入, 鹿児島大学水産学部紀要, 第53巻, pp. 27-36, 2004.
- 11) 秋山秀樹, 鮎矢智之: トカラ海峡周辺における黒潮フロントの変動, 海と空, 第67巻, pp. 113-132, 1991.
- 12) 櫻井仁人, 前田明夫, 杉森康宏, 久保田雅久: 鹿児島湾の湾口断面を通しての海水の流入・流出過程, 海の研究, 第9巻, pp. 1-13, 2000.