

海陸風と海洋レーダで観測された諫早湾口周辺の表層の日周潮流速

Sea-breeze and Diurnal Surface Currents around Isahaya Bay Mouth Measured with DBF Marine Radar

坪野考樹¹・吉井 匠²・松山昌史³・坂井伸一⁴・多田彰秀⁵

Takaki TSUBONO, Takumi YOSHII, Masafumi MATSUYAMA
Shin-ichi SAKAI and Akihide TADA

Diurnal surface currents in Ariake Bay are calculated from the surface velocities observed with DBF Marine Radar in 2007. The diurnal currents in summer, showing clockwise elliptical rotary currents, are found to be forced by not only diurnal tides but also diurnal wind, i.e. a sea-breeze, while the currents in winter are driven by the diurnal tides. The amplitudes of diurnal current perpendicular to Isahaya bay mouth linearly increase along the bay mouth, ranging from 4 cm/s in the southern part to 10cm/s in the northern, in summer. These amplitudes in northern part are as large as ones of M_2 tidal currents.

1. はじめに

筆者らは、潮流速が有明海や諫早湾の海域環境にどのような影響を与えるかを検討するために、海洋レーダで得られた表層流速の結果を用いて、有明海の諫早湾口前方海域における半日周潮の空間的に詳細な分布を示すとともに、湾口部における潮流速について検討した(坪野ら, 2008)。その結果、湾口を横切る半日周潮の流速の大きさから、有明海と諫早湾内を流入出する水の全量のうち約80%が、湾口の中心より南側で交換されること、および潮流速と水深の結果から、諫早湾口の北側では、その南側と比較して潮汐による鉛直混合の効果が小さく、成層が維持されやすい海域となることを示した。

以上の解析と同時に得られた日周潮の潮汐楕円分布についても見ると、夏季の分布は冬季と異なっており、半日周潮の分布形状と大きく異なっていた。この結果は、レーダで得られる流速結果は表層流速であるために、海陸風による吹送流が影響を与えたものと推測される(柳, 2001)。

近年、海陸風で駆動される沿岸部の日周期の流れについて慣性周期と関連した研究(Hyder et al. (2002), Simpson et al. (2002))がなされてきているが、有明海では半日周潮流と比較して日周潮流の関心が低く、また海陸風で駆動された吹送流についてほとんど知見がない。そこで、本研究では、日周潮の結果から、日周期の流動特性を把握するとともに、レーダ観測と同時に実施した気象観測の結果と比較して、海陸風の影響について検討

を行った。

2. 観測の概要と解析法

(1) 観測概要と海洋レーダ得られる流速

DBF海洋レーダは、視線流速を観測することから、2台(以降A, B局と記述。)を設置して海域の流速を計測する。本研究では、図-1に示す観測海域に、A局を長崎県雲仙市西郷(St.A)に、B局を熊本県荒尾市蔵満(St.B)に2007年1月から2008年2月まで設置し、有明海における諫早湾湾口前面海域の観測を行った。

ここに、図-1に示すSt.A, St.Bからの線は、レーダの視線方向を示しており、レーダ観測では、この8方向の線上における視線流速が得られる。そして、この視線流速は、レーダのビーム幅・解像度が約15度・500m間隔であることから、視線上の各点におけるビーム幅約15度、視線方向500m間隔で囲まれた領域の平均流速となる。また、DBF海洋レーダは、波長約3.5mの波浪からの後方散乱波を受信し、後方散乱波が海域の流動によりドップラシフトしていることを利用して、流速を計測している(坂井ら, 2002)ため、水深約0.3m以浅の表層の流速を計測している(Stewart and Joy, 1974)。

各A, B局の混信を避けるために、A局は毎時刻0.30分、B局は毎時刻15.45分に観測を開始し、約15分間の送受信で観測を行った。そのため、各A, B局で観測される視線流速は、15分間の平均した結果となる。

(2) 潮流成分の解析法

観測した流速値は視線方向の流速であるので、解析には格子点における東西南北方向の流速ベクトルに変換する必要がある。そこで、まず全地点の視線流速について調和解析を行い、その結果から格子点位置での東西南北方向の潮流成分に合成および変換して潮流成分を計算

1 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 環境科学研究所
2 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
3 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 地球工学研究所
4 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 環境科学研究所
5 正会員 博(工) 長崎大学教授大学院工学研究科

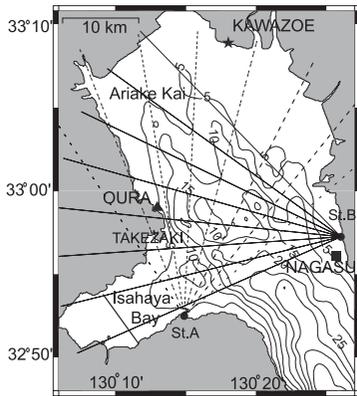


図-1 観測海域とレーダ設置地点およびビーム方向

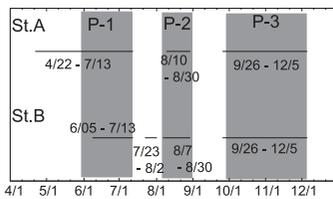


図-2 観測期間

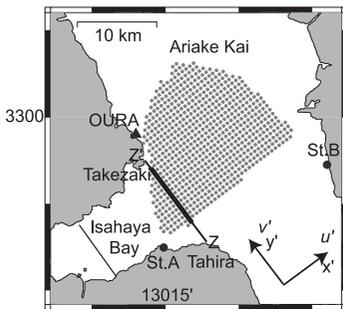


図-3 潮流成分が計算できた位置と湾口の定義

期間においても、外因性のノイズなどの影響により視線流速が取得できない場合があったため、取得可能な期間中75%以上の流速が観測できた位置のみについて、調和解析を実施した。

図-3に潮流成分が計算できた位置（灰色丸）の例と諫早湾口を横切る方向と沿う方向の軸を示す。潮流成分を計算した地点は、諫早湾口を横切る潮汐流を検討するために、図-3のように東西・南北方向を37度反時計回りの軸 (x' , y') を定義して、この軸方向に設定した。また、湾口についても、図-3に示すZ-Z'のラインを定義した。ここに、軸 (x' , y') は湾口 (Z-Z'のライン) に対して直角、平行方向であり、 x' , y' 軸それぞれの格子間隔 $\Delta x'$, $\Delta y'$ は496.3, 519.5mである。また、以降の記述において x' , y' 軸方向の流速成分を u' , v' とする。

(3) 風速計と解析の概要

レーダ観測と同一期間において、図-1に示す各A, B局と同一地点 (St.A, Bの黒丸) に風速計を設置して、10分間隔で風速を計測した。また、気象庁が公開している図-1に示す川副 (図中KAWAZOEと表記下の黒星点) の風速値についても解析を行った。

3. K_1 周期の流動と海陸風の結果

各期間P-1, 2, 3で、周期25.8時間の O_1 分潮流の空間分布がほとんど変化がないのに対し、周期23.9時間の K_1 周期の流動分布では変化が大きかったことから、 K_1 周期の流動について検討を行った。

(1) K_1 周期の潮流楕円

図-4 (a), (b), (c) に各期間P-1, 2, 3の K_1 周期の潮流楕円をそれぞれ示す。図-4の十字の線は潮流楕円の長短軸を現す。また、図中の三角の地点は、潮位観測所のある大浦を示し、その三角の下の数字は潮位振幅を示している。

K_1 周期の潮流楕円の形状は、各期間で異なり、期間P-1, 3ではその主軸の片側の大きさが約2~7cm s^{-1} の直線状となるのに対し、期間P-2ではその半径が約6~12cm s^{-1} の円形に近い楕円であった。また、期間P-3の楕円主軸の向きが、坪野ら (2008) が示した M_2 分潮流の潮流楕円と同様な、有明海の汀線に沿った南北方向となるのに対して、期間P-1では東西方向に傾いた結果となった。

他期間と異なる期間P-2の潮流楕円の特徴は、全地点の結果ともに時計回りとなっていた。そして、諫早湾に流入する流速は期間P-2が最も大きくなる結果となった。

(2) 風速計の結果；海陸風

2章で示したSt.A, St.B, および川副の3地点の風速計の結果について、回転スペクトルを計算した。例として、図-5に川副における回転スペクトルの季節変化を示す。

した。

図-2に分潮の計算を実施した観測期間を示す。観測期間中にレーダ設置位置やビーム方向の変更をする必要があり、また12月5日にB局において海洋レーダの故障があったため、視線流速の調和解析の計算には、同一の条件で観測できた最長の区間を採用した。そして海陸風の影響を検討するために、図-2の灰色で示した3つの期間について、調和解析をした。各期間の解析開始-終了日は、6月1日-7月10日 (期間P-1), 8月10日-8月30日 (期間P-2), 9月28日-12月5日 (期間P-3) である。

調和解析は最小二乗法を用い、坪野ら (2007) が開発した自動ピークサーチ法で得られたA, B局の視線流速から、各局・各視線・各地点における視線流速について4つの潮流成分 (M_2 , S_2 および K_1 , O_1 分潮の成分) の計算を行った。ただし、各A, B局でデータが取得できた

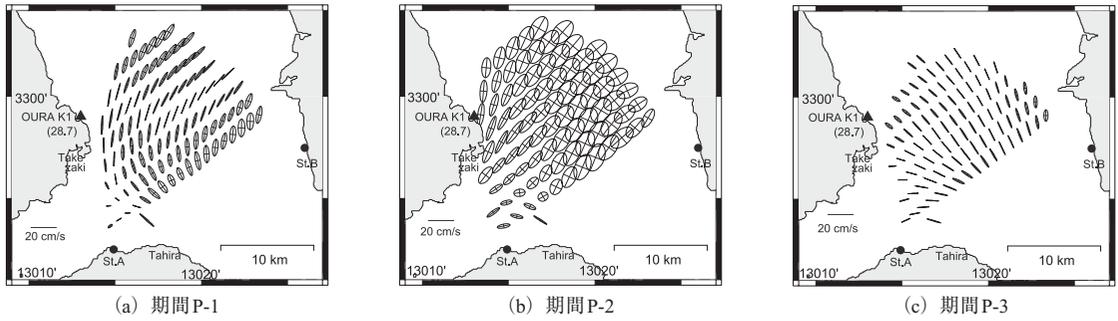


図-4 各解析期間の K_1 周期の潮流楕円

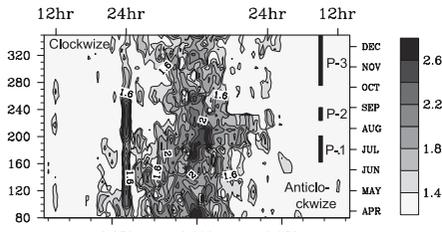


図-5 川副における回転スペクトルの季節変化

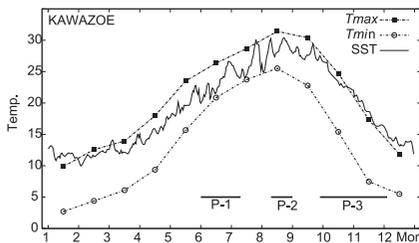


図-6 川副における気温と長洲局の海水温の季節変化

回転スペクトルの結果では、時計回りの24時間の周期においてピークが出現し、この周期にピークの値は期間P-2(8月の前後)で最も大きくなっていった。また、ここには示さないが、St.A, Bの風速結果についても24時間の周期でピークが出現し、川副と同様に夏季でそのピークの値が大きくなっていった。そして回転方向は、St.Aでは反時計回り、およびSt.Bでは時計回りのピーク値が大きくな結果となった。

この24時間周期の風速は、陸側と海側の温度差で生じる風、つまり海陸風と考えられる。そこで、海水温と地上気温の差が海陸風の駆動力となることから、海陸の温度差について検討を行った。図-6に川副における気温と有明海の海水温の季節変化を示す。ここに、図中のTmax, Tminは日最大、最小気温の月毎平均値を示し、海水温は熊本水産センターが計測している長洲局(図-1の黒四角の地点)の表層の海水温の日平均値(SST)を示した。

期間P-1, P-2では、海水温が日最大・最小気温の月毎平均値の間に位置しており、穏やかな日であれば海陸風

が発達することが予想される。一方、期間P-3では海水温が日最大気温の平均値を超えており、海風が発達しにくいことが予想される。その結果を反映して、図-5の結果においても、P-3の24時間周期のスペクトルの値が小さいのに対し、期間P-1, 2ではピークが見られる結果となっており、レーダ観測を行った期間P-1, 2で海陸風が発達していたと考えられる。

期間P-1, 2, 3における、24時間周期の風速の時間変動を調べるために、各期間について時間毎平均値を計算した。実際の解析では、Murakami(1994)が開発した24時間の周期を中心としたバンドパスフィルターで抽出した後、各期間P-1, 2, 3について時間毎平均を計算した。図-7(a), (b), (c)に、それぞれSt.A, St.B, 川副の時間毎平均流速を示す。ここに、図中の線は、潮汐による潮流楕円と同様の流速の値・向きを示している。また、図中には、2章で定義した軸(x', y')方向の流速(u', v')の線もあわせて表示している。

どの地点およびどの期間の風速結果も楕円形状を示した。また、St.A, Bにおける期間P-1, 2の風速の楕円の長軸は諫早湾口を横切る x' 軸方向と概ね同じとなった。そして、他期間と比較して期間P-2では、円形に近い楕円となり、さらに楕円長軸の方向(St.A, Bでは諫早湾口を横切る x' 軸方向)の流速振幅が最も大きくなる結果となった。

期間P-1, 2における風速の回転方向は、St.Aでは反時計回りとなるのに対し、St.B, 川副では時計回りとなった。これは、正しい原因は不明であるが、川副とSt.Bの楕円主軸の向きも異なっており、海岸線の形状、外海域の影響、およびSt.Aの南側に位置する雲仙岳などの地形の効果が原因と考えられる。

(3) 海陸風と K_1 周期の潮流楕円の関係

(2)で得られた結果は、図-4(b)で示した期間P-2の K_1 の潮流楕円が、他期間と比較して、円形に近い楕円形状となり、さらにその主軸が最も大きかった結果と矛盾しない。さらに、諫早湾口を横切る方向の流速が期間P-

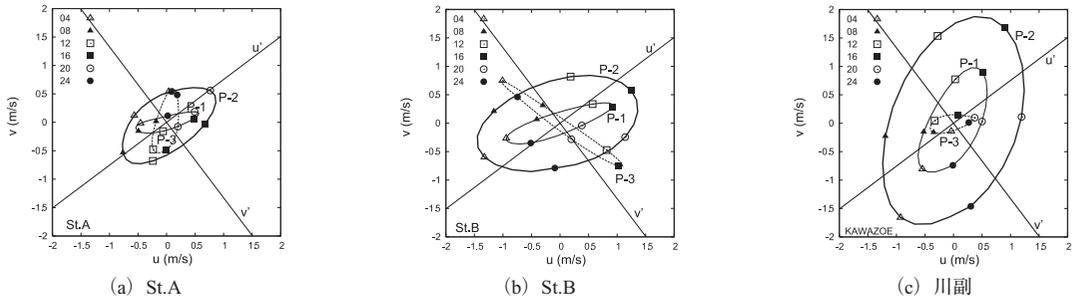


図-7 各解析期間の時間毎平均流速 (図中04, 08, ... 24は時刻を示す)

2において最も大きくなる結果 (これについてはさらに後述する。)とも対応している。このことは、期間P-2において、海域の表層における流動が、海・陸表面の温度の違いにより発達した24時間周期の海陸風によって駆動されていたことが示唆される。そして、レーダで得られた海表面の K_1 分潮流 (周期約23.9時間)は、天文潮から期待される潮流に海陸風による吹送流が合計した流動となったと考えられる。

期間P-2の周期 K_1 の潮流楕円の結果では、その回転方向は、全域で時計回りとなった。St.B, 川副における期間P-2の風速も時計回りとなっており、海洋レーダで観測した海域における夏季の海陸風は、おそらく全域で時計回りであったと考えられる。

一方で、期間P-3の K_1 の潮流楕円は、直線となっており、楕円形状の風の結果も小さいことが予想された。そこで、潮流の潮位との位相差について計算した結果、観測範囲内で位相差が約90度となっていた。定在性の潮汐波に支配されている海域では、潮位の遅角と潮汐流の遅角差が90度となることが一般に知られている。また、坪野ら (2008) が示した半日周潮である M_2 , S_2 分潮においても、潮位と潮流の遅角差が90度となっており、定在性の潮汐波となっていた。このことから、期間P-3 (晩秋期から冬季)で観測された諫早湾口近傍の K_1 周期の流速成分は、天文潮の K_1 分潮流が卓越していたと考えられる。

(4) 諫早湾口を横切る方向の K_1 周期の潮流速 u'

諫早湾口を横切る方向の流速の詳細を確認するために、図-3に示すZ-Z'のライン上におけるx軸方向の潮流流速 u' について検討を行った。図-8 (a), (b)にZ-Z'のラインにおける各期間P-1, 2, 3の諫早湾口を横切る方向の K_1 周期の流速成分 u' の大きさと位相を示す。ただし、位相の結果は、上げ潮最大となる、つまり u' が最小になる角度を示し、各期間の解析開始時刻0時からの時間を角度で示している。

諫早湾口を横切る K_1 分潮の周期の流速成分 u' の大きさは、期間P-1で最小値を、期間P-2で最大 (8cm s^{-1}) 値を観測した。また、期間P-2での u' の分布は、南側で最小

(2cm s^{-1})、湾口北側で最大 (8cm s^{-1}) となり、ほぼ線形的に増加していた。一方、期間P-3では、南側で最大 (4cm s^{-1})、湾口北側で最小 (2cm s^{-1}) となり、期間P-2とは逆の分布となった。

坪野ら (2008) が示した M_2 , S_2 潮流の結果 (図-9参照)では、ともに湾口南側で最大、北側で最小となり、南側から北側にかけてほぼ線形的に低下している結果が得られていた。そして、各期間の結果の K_1 周期の流動結果は、期間P-3が M_2 , S_2 潮流と似た分布になるのに対して、期間P-1, 2では異なる分布となった。

K_1 周期の流速成分の諫早湾口を横切る潮汐流の位相は、潮流流速が非常に小さかった期間P-1を除き、期間P-2とP-3は湾口の南北で変化がなかった。ただし、期間P-2の位相は天文潮が卓越していたと考えられる期間P-3と異なっていた。

期間P-1, 2で得られた120度前後の値は、8時ごろに有明海から諫早湾に向かう流れが最大となり、20時ごろに逆の流れが最大な結果を意味する。この時刻と天文潮の位相との関係を検討するために、天文潮の K_1 分潮流が卓越した期間P-3の位相を期間P-1, 2の解析開始時刻に合わせた位相と、期間P-1, 2の u' 方向風速の位相とを比較したところ、その位相差はそれぞれ約180度、140度となった。この結果から期間P-1, P-2では、天文潮の K_1 分潮流と海陸風の吹送流が相殺されている可能性がある。このため、この湾口における海陸風で駆動される吹送流について検討するには、期間P-3の結果を利用して解析することが必要と考えられる。

実際の海陸風で駆動される吹送流よりも小さくなる可能性があるが、夏季における海陸風により駆動されるZ-Z'ライン上の K_1 周期の流動と、坪野ら (2008) が示した半日周潮流の結果とについて比較を行った。図-9に、P1, P2およびP3全区間で計算した M_2 および S_2 潮流における図-8と同様の図、つまりZ-Z'のラインにおける諫早湾口を横切る流速の大きさを示す。また、同図には、期間P-2の K_1 周期の流動の振幅もあわせて示している。

期間P-2の u' 方向の流速の振幅は、諫早湾口南側では

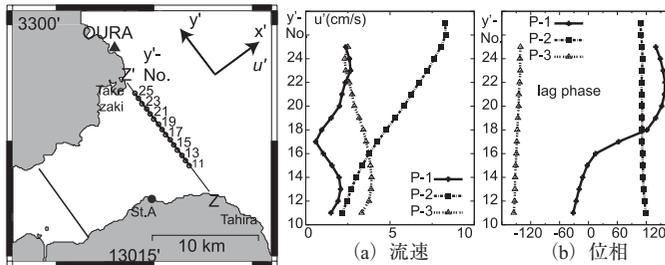


図-8 Z-Z'ラインの諫早湾口を横切る K_1 周期の流動

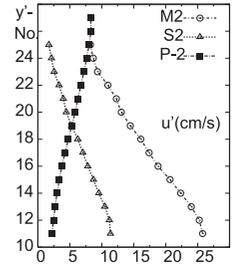


図-9 Z-Z'ラインの諫早湾口を横切る M_2 , S_2 分潮流の振幅

小さくなるために、 M_2 分潮流速とは比較にならないほど小さな値となるが、湾口北側では有明海で最も卓越している M_2 分潮の流速と同程度の大きさになり、 M_2 分潮流速の次に大きな流速となる S_2 分潮流速よりも大きい結果となった。

坪野ら(2008)によると、湾口北側では半日周潮による海水交換がほとんどないことが報告されているが、今回の夏季である期間P-2の結果をみると、湾口北側においては、海陸風で駆動される吹送流の影響が無視できないことが分かる。そして、これら期間P-2(夏季)の結果は、表層での結果であることから、海陸風で駆動される吹送流は、湾内における鉛直循環や湾口部の海水交換に大きな影響を与えると考えられる。

Z-Z'ライン上の期間P-2における時間平均流速を計算したところ、ライン上では一様な分布となっており、諫早湾から有明海に流出する約 5 cm s^{-1} の流速となっていた。また、St.Aにおける平均風速の結果も、西風が卓越していた。このことは、諫早湾内の表層の海水は、夏季において恒常的に流出していることを意味する。また、この平均流速の結果と上述した K_1 周期の流速の振幅をあわせると、諫早湾口北側での流速は、約 -3 cm s^{-1} ～約 11 cm s^{-1} と変化することになる。この約 11 cm s^{-1} の値は、 M_2 分潮流速の振幅よりも大きいため、上げ潮の時刻や潮時によっては湾口の南側と北側で逆向きの流れとなる可能性がある。以上のことから、今後の課題として、湾の流入出を検討するには平均流速についても考慮する必要があると考えられ、時間毎平均流速を計算して海陸風で駆動される流速パターンを解析する必要があると考えられる。

4. まとめ

2007年に海洋レーダで観測した流速結果から日周潮成分の流動を計算し、有明海および諫早湾口周辺の流動について検討した。夏季の8月で観測された流動では、夏季に発達する海陸風に駆動される流動が卓越し、冬季の10-12月に観測された結果では、天文潮の K_1 分潮流が卓越することが示唆された。

夏季における諫早湾内に流入出する方向の K_1 周期の流動を検討した結果、この方向の流速の振幅は、湾口北側において有明海で最も卓越する M_2 分潮流速と同程度の値となり、次に卓越する S_2 潮汐流速よりも大きくなる。

海陸風により駆動された吹送流は、鉛直循環に影響を与えることから、諫早湾の環境を議論するうえで、夏季に発達する24時間周期の海陸風の影響を無視できないと考えられる。

本研究の結果が2007年だけの結果であるため、今後の検討には、他年の結果について検討する必要がある。また、海陸風は有明海の海岸線や有明海周辺の外海および陸側地形の影響を受けていると考えられることから、海陸風に駆動された吹送流について検討するには、本海域を含む広範囲の気象観測結果についても考慮する必要があると考えられる。

謝辞：西郷港と熊本県に設置場所の提供をして頂きました。また熊本県水産研究センターから長洲局の水質データを提供して頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森 信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健一・松岡建志(2002):短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1511-1515.
- 坪野考樹・森 信人・松山昌史・坂井伸一(2007):DBF海洋レーダの表層流速自動推定法, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1421-1425.
- 坪野考樹・森 信人・松山昌史・坂井伸一・多田彰秀・水沼道博(2008):海洋レーダで観測された諫早湾口部における潮流流と潮流フロント, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1006-1011.
- 柳 哲雄(2001):沿岸海洋学, 恒星社厚生閣, pp.85-86.
- Hyder, P., J. H. Simpson, S. Christopoulos(2002):Sea-breeze forced diurnal surface currents in the Thermaikos Gulf, North-west Aegean, Cont. Shelf Res., Vol. 22, pp.585-601.
- Simpson, J.H., P. Hyder, and T. P. Rippeth(2002):Forced Oscillations near the Critical Latitude for Diurnal-Inertial Resonance, J. Phys. Oceanogr., Vol. 32, pp.170-187.
- Stewart, R. H. and W. Joy(1974):HF radio measurements of surface currents, Deep-Sea Res., Vol. 21, pp.1039-1049.