

密度成層期の東京湾で発生する 密度・流動・水質場の急変現象と内部波に関する現地観測

上野 成三*・灘岡 和夫**・勝井 秀博***・大谷 英夫*

1. はじめに

夏季の内湾で発達する密度成層は湾内の流動・水質変化に重要な影響を及ぼしている。今まで行われてきた内湾での流況観測結果によると、湾内流動は風の変動に対して極めて敏感に応答し、かつ、密度界面の上下で流向が逆転する傾向がしばしば認められる（例えば、森川・村上, 1986）。このことより、夏季の湾内流動は密度界面を境界とした2層流的な取り扱いがある程度可能であると考えられ、現在、レベルモデルを中心とした解析が数多く行われている。この場合、密度成層、特に、密度界面が流動に果たす役割は、主として鉛直混合に対する阻害効果として表現され、運動量や物質の鉛直方向輸送にとって密度界面は一種の「壁」として作用する。具体的な例としては、密度界面の存在により鉛直方向の溶存酸素供給量が減少することによって底層で貧酸素水塊が形成する現象や、離岸風に起因する鉛直循環流が密度界面の存在により強化され沿岸部で底層の貧酸素水塊の湧昇（青潮）を引き起こす現象などが上げられる。

しかし、最近の観測結果によると風に連動して密度界面がダイナミックに変動することが明らかになりつつあり（小田巻ら, 1990）、密度界面の役割を単に鉛直混合の障害物として捉えるだけでは不十分であるとの認識が高まってきた。密度界面の変動が水質変化に影響を及ぼす一例として、東京湾での青潮の発生機構に関する議論が上げられる。従来、離岸風に起因する鉛直循環流が湾奥部での湧昇を引き起こすとされてきたのに対して、宇野木（1990）、松山ら（1990）は、北風時の吹送流によって上昇した密度界面が、風の停止後内部ケルビン波として湾奥部へ伝播し底層水の湧昇を引き起こすことを指摘し、著者ら（1990）も NOAA 画像の解析からこれを支持する結果を得ている。このように、密度成層が水質変化に及ぼす影響として、成層の発達により顕著化する内部モードの流動自体が本質的な役割を果たす可能性がある。

しかし、現地での内部モードに起因する現象はその発生が間欠的であることから観測例は少なくその実態は未だ明確でない。そこで、本研究では、東京湾の密度成層の発達時から混合期までの連続した現地観測を行い、成層や風との関係から湾内の流動・水質変化の実態を把握し、密度成層に起因する諸現象が水質変化に及ぼす役割を検討した。

2. 観測装置および観測方法

観測は東京湾中央のやや東側に位置する京葉シーバースの北側ドルフィンで行った（図-1）。計測項目の一覧を表-1に示す。計測期間は平成4年5～10月で、水温 T 、電導度 C 、溶存酸素濃度 DO について鉛直5層の計測を行った。また、8～10月の期間では流速計測（5層）も追加した。なお、海上風データは京葉シーバースでの常時計測データを借用した。解析で用いた塩分 S は C 、 T より、密度の指標であるシグマテュー σ_t は T 、 S より算出した（日本気象協会, 1990）。ただし、計測データにはケーブル、電源のトラブルにより一部欠測が生じている。

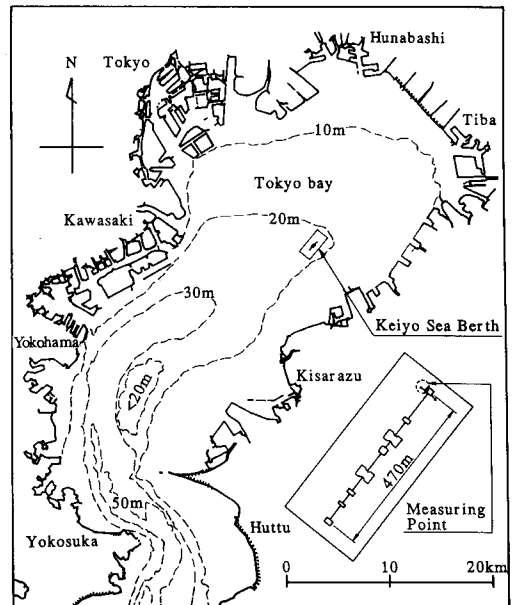


図-1 観測位置図

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所
 ** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 博士 大成建設(株)技術研究所チームリーダー

表-1 計測項目の一覧

計測項目	計測機器	計測層	計測期間	計測間隔
水温 電導度	水温・電導度計 アレック電子社, ATC20	5	1992年 5/11~10/29	10~30秒
溶存酸素	溶存酸素濃度計 YSI 社, model-58	5	1992年 5/11~10/29	10~30秒
流速	電磁流速計 ケネック社, VM-201HA	5	1992年 8/7~10/29	0.1~1秒

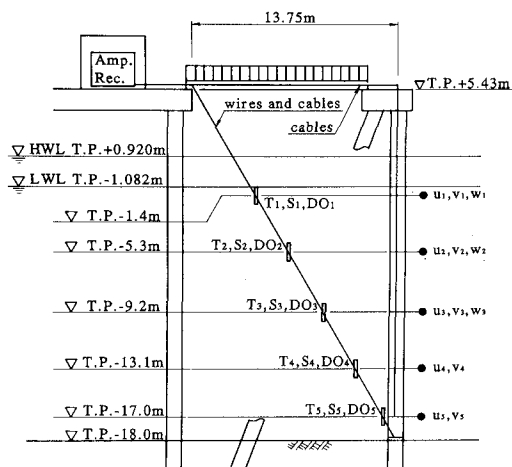


図-2 計測機器の設置方法

サンプリング間隔は微細な内部変動の存在も考慮して0.1~30秒と細かくとった。計測機器の設置方法を図-2に示す。T, S, DOの各センサーは、杭の海底部から栈橋上へワイヤーを張り、そのワイヤーに沿って取り付けられた。また、流速計は杭に直接固定し、1, 2, 3層は3次元、4, 5層は平面2次元の流速を計測した。内湾での長期計測では生物付着によるセンサーの劣化が問題となるため、約10日間隔でセンサーの清掃・点検を行った。また、流速記録には流向によってシーバース本体や着棧中のタンカーによるwakeの影響が含まれていたため、解析にはwakeの影響が少ない下げ潮(南西流)時のデータを主として用いた。

3. 観測結果および考察

3.1 密度・水質場に生じる急変現象

(a) S, T, DO分布に生じた急変現象の特徴

計測期間中の成層の発達から混合までの状況を概観するために、T, S, DOの24時間移動平均値から求めた等値線分布を図-3に示す。なお、図中の斜線部は欠測期間を示す。全体的な傾向としては、5~7月ではT, Sの成層が発達し始め底層では貧酸素化が進行し、8月~9月上旬ではS, T, DOの強い成層と底層の貧酸素化

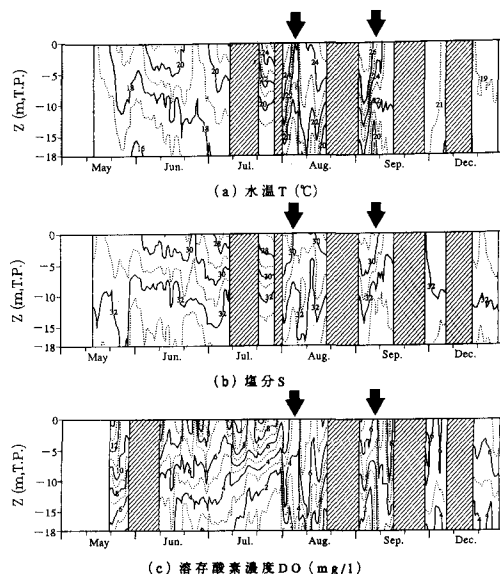
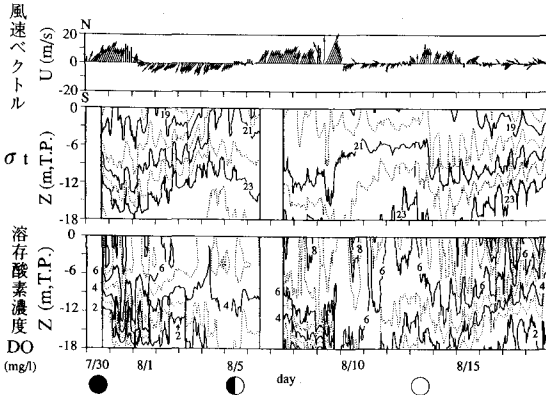


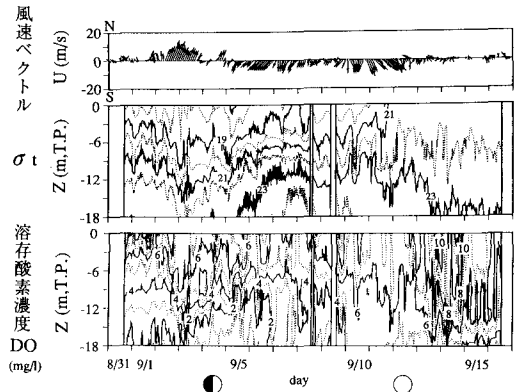
図-3 T, S, DOの等値線分布(24時間移動平均値)

が維持された。その後、9月中旬以降では成層・貧酸素化の消滅が始まった。ここで着目すべき現象として、8月上旬と9月上旬に発生したT, S, DOの等値線の急激な変動が上げられる(図中↓参照)。この急変現象はT, S, DOの等値線が4, 5日間の内に水深の1/2以上のスケールで変動することから、極めて大規模で、かつ、急激な現象と言える。また、8月上旬の急変現象の後では底層での貧酸素化の解消が約1週間持続したことからも、本観測で得られた急変現象は湾内水質に重要な影響を及ぼすと考えられる。

上記の急変現象を詳しく調べるために、急変現象の発生した8月上旬と9月上旬の期間における海上風の風速ベクトルUと、 σ_t , DOの10分間平均値から求めた等値線分布を図-4に示す。ここで、風速ベクトルの向きは風下方向とした。 σ_t , DOの等値線の変動には様々な周期を持つ変動成分が生じているが、ここでは、2, 3日の時間スケールを持つ変動成分に着目する。図-4(a)に示した8月上旬のケースをみると、8月1日~4日の北風系が連風する期間中に σ_t の等値線の鉛直位置が上昇し続け、その変動幅が5~10mに達した。その後、6日~9日における南風系の連風期間中では、 σ_t の等値線は逆に下降した。また、DOの等値線の変動については、7月30日~8月2日の期間では σ_t の変動と一致する傾向が見られた。しかし、8月3日以降では、 σ_t の等値線が上昇したにも関わらず、中層以深のDOの等値線は下降傾向を示した。底層のDOの変化を見ると、8月1日以前ではDOが約1mg/lと無酸素に近い状態であったのに対して、2日以降ではDOが2~4mg/lに上昇して底層



(a) 8月上旬のケース



(b) 9月上旬のケース

図-4 海上風ベクトル U と σ_t , DOの等値線分布 (10分間平均値)

の貧酸素化が解消した。さらに、この底層の貧酸素化の解消はその後約1週間にわたり持続した。

以上より、本観測で確認された急変現象の特徴として、 σ_t の等値線、すなわち、等密度面が風の変動に対応して5~10mのスケールで変動すること、等密度面の急変現象に伴い底層の貧酸素化が解消し、約1週間程度持続することが上げられる。なお、これらの特徴は9月上旬のケースでも同様に認められる(図-4(b)参照)。 σ_t の分布に生じた急変現象は、エクマン輸送に起因して密度界面が上昇する沿岸湧昇に類似した現象であると考えられ、後に詳しく考察する。また、 σ_t の急変現象に付随して発生した底層の解消現象については、夏季の東京湾の底層では貧酸素水塊が維持されるという従来の認識に対して、今回の観測により底層の溶存酸素濃度もダイナミックに変動することが新たに確認された。この貧酸素化の解消現象は底生生物の棲息環境や底泥からの栄養塩の溶出特性にとって重要な影響を及ぼすと予想される。

なお、図-4に示した σ_t , DOの等値線の変動には約半日周期の変動成分が卓越する場合がある。この変動の発生時期は大潮時と一致する傾向にあり(図中の月齢を参照のこと)、密度成層期の東京湾では大潮時に内部潮汐が発達することがあわせて確認できた。

(b) 風の変動に対する密度界面の応答

風による等密度面の変位特性を詳しく調べるために、計測期間中で明確な成層が形成した7月中旬から9月上旬のデータについて、風速ベクトル U 、密度界面位置 z_0 、密度界面上昇速度 w_0 の時間変化(24時間平均値)を比較した(図-5)。ここで、 z_0 は表層と底層の σ_t の平均値をとる鉛直位置とし、5層のデータから内挿して求めた。また、図中には北風系、南風系の連風期間をN, Sで示した。風の変動に対する密度界面の応答は速く、南風系の連風期間では z_0 は下降し w_0 は負となり、北風系の連風

期間では z_0 は上昇し w_0 は正となる傾向にある。なお、8月9~10日の z_0 は南風時であるにも関わらず急激に上昇した。この詳細な原因は今のところ不明であるが、 σ_t , DOの分布が8月9日以降一変したことと(図-4(a)参照)、ここでは示していないが、台風接近時の流速記録に強い南風に起因する鉛直循環流の発達が認められたことから、観測点付近の水塊が移流により入れ変わったことにより、みかけ上密度界面の変動が観測された可能性がある。

風速と密度界面上昇速度の定量的関係を求めるために、風速の湾軸方向成分 U_{NNE} (24時間平均値)と密度界面上昇速度 w_0 の関係を調べた(図-6)。先に述べた台風接近の影響を受けたケースを除けば、両者の相関はかなり高く、風速が増大するにしたがって密度界面上昇速度が速くなることが分かる。本観測結果によると、風速5m/sの風が2日間連風した場合密度界面の変位は約5mに達し、風による密度界面の変動が意外に大きいことが分かる。

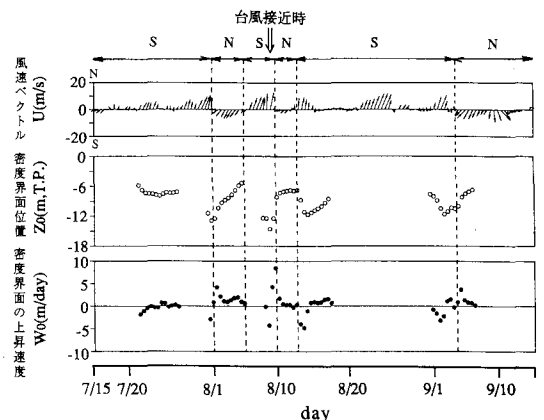


図-5 風速ベクトル、密度界面の位置・上昇速度の関係

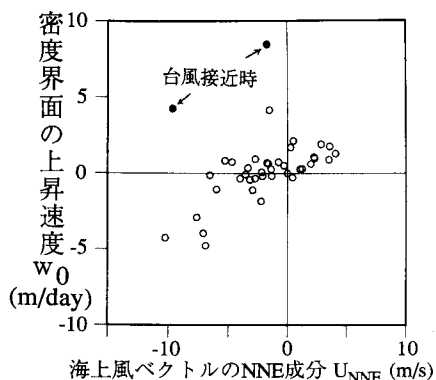


図-6 海上風の湾軸方向成分と密度界面の上昇速度の関係

以上により、成層期の東京湾では密度界面の変動が日オーダーの風の変動に敏感に応答し、その変動幅は予想以上に大きいことが確認できた。本観測で確認した急変現象は、その発生期に風速が 10 m/s に達する強風がかなりの期間連風したことから密度界面の変動が増大して引き起こされたと言える。

(c) 急変現象の発生機構

本観測で確認された風による密度界面の応答機構は外洋で観測される沿岸湧昇の機構（吉田, 1974, 1978）と類似したものと考えられる。宇野木（1983）は内湾規模の流動現象においても沿岸湧昇と同様に地球自転の効果が顕著になることを指摘し、伊勢湾、三河湾、東京湾の実測データをもとに内湾の湧昇機構を説明している。すなわち、風によるエクマン輸送により風下に向かって左側の沿岸では湧昇流が右側の沿岸では沈降流が発生し、その結果、密度界面は風下方向左側の領域では上昇し右側の領域では下降する。この密度界面の変動特性は小田巻ら（1990）の現地データにも現れており、夏季の東京湾では一般的に発生する現象と予想される。本観測点の位置は湾中央からやや東側にあり、この位置での密度界面の変位は北風時に上昇し南風時に下降することになる。本観測結果はこの特性と一致することから、本観測で確認された密度場の急変現象は、風に伴うエクマン輸送に起因する密度界面の変動であると言える。

本観測で示した急変現象のもう一つの特徴として、密度界面の急変に伴い底層での貧酸素化が解消し、それが持続することを上げた。しかし、この現象の機構については、観測点が平面的に 1 点に限られていることもあり本観測結果のみからは明らかにできない。一つの可能性としては、密度界面の大規模な変動に伴う流動により溶存酸素の鉛直混合が増大する機構が考えられる。貧酸素化の解消が起る中層以深では密度成層が弱いいため、小規模の流動の発生によっても鉛直混合が促進され底層への溶存酸素の供給が容易に行われることが予想される。し

かし、他の可能性として、観測点の水塊が移流により入れ変わって貧酸素化の解消が生じることも予想され、今後、平面多点観測などによる詳細な検討が必要である。

3.2 短周期内部波の特性

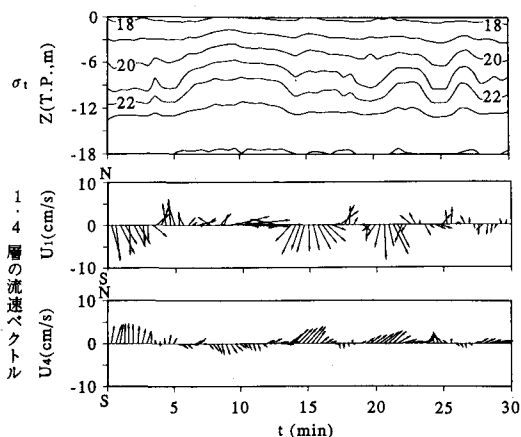
(a) 短周期内部波の特徴

本観測データには、数分の変動周期を持つ短周期内部波が間欠的に発生する場合がある。短周期内部波が発生した期間における σ_t の等値線分布と 1, 4 層の水平流速ベクトル U_1 , U_4 を図-7 に示す。ここで、流速ベクトルは平均流成分を除去して示した。 σ_t の等値線の変動から波高が約 3 m の内部波が連続して発生しているのが分かる。また、流速ベクトルには、 σ_t の変動との対応は良くないものの、周期的な変動が生じている。また、 U_1 と U_4 の流向は逆転する傾向にある。

(b) 短周期内部波の発生特性

短周期内部波の周波数特性を調べるために、短周期内部波が卓越する場合と卓越しない場合について σ_t （3 層目）パワースペクトルを比較した（図-8）。短周期内部波が卓越する場合のスペクトルは、卓越しない場合に比べて、 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ Hz}$ の周波数成分のパワーが大きいことから、この短周期内部波は 2 ～ 20 分の周期を持つ変動から構成されることが分かる。そこで、2 ～ 20 分周期の変動を短周期内部波とみなしその発生特性を調べた。中層の σ_t について、生データ σ_{tr} 、内部潮汐を示す周期 1 ～ 25 時間の変動成分 σ_{ti} 、および、短周期内部波を示す周期 20 分以下の成分の rms 値 $(\sigma_{ts})_{rms}$ の時間変化を図-9 に示す。 σ_{tr} , $(\sigma_{ts})_{rms}$ には短周期内部波の間欠的な発生が見られ、その発生時期は σ_{ti} の変動が増大する時と一致する傾向にある。すなわち、短周期内部波は内部潮汐が発達する時期に発生することが示された。

このような短周期内部波は、最近、大阪湾でも観測例

図-7 短周期内部波発生時の σ_t の等値線分布と水平流速ベクトルの時間変化

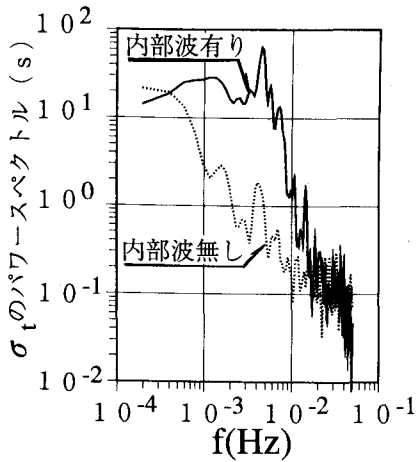


図-8 短周期内部波の有無毎の σ_t のパワースペクトルの比較

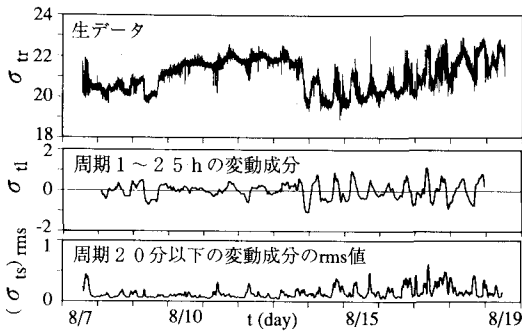


図-9 σ_t の生データ、内部潮汐成分、短周期内部波成分の rms 値の時間変化

が報告され、流動や水質に及ぼす影響が重要視され始めている(柳ら, 1993)。短周期内部波の発生機構について、柳ら(1993)は、潮流速が大きい場合に内部波が観測されたことから、急変地形に起因する内部波の可能性を上げている。しかし、今回の観測結果によると、短周期内部波の発生時期は内部潮汐の発達する時期と一致する傾向があり、地形に起因する機構以外に内部潮汐自体に起因する発生機構も検討する必要がある。一例としては、内部潮汐の流速分布は密度界面付近で変曲点を持つことから、不安定作用により短周期内部波を生成する可能性があげられ、今後、引き続き検討する予定である。

4. 結 論

内部モードの流動が湾内の水質変化に及ぼす影響の実態を探る観点から、東京湾央で成層の発達から混合期にわたる長期連続観測を行った。主な結論を以下に示す。

① 成層期の東京湾では風の変動により密度界面が敏感に応答し、強風が2, 3日間連風すると密度界面の変位が水深の約1/2のスケールに達し、密度場が急変する現象が生じる。

② 密度場の急変現象に伴い、底層の貧酸素化が解消され、それが1週間程度持続した。このことより、夏季の東京湾の底層では貧酸素水が維持されるという従来の認識に対して、実際は密度界面の変動に伴い底層の溶存酸素濃度もダイナミックに変動することが示された。

③ 成層期の東京湾では、2~20分の周期を持つ短周期内部波が間欠的に発生し、その発生時期は内部潮汐の発生時期と一致する傾向にある。

謝辞：本研究を進めるに当たり、京葉シーバース株式会社から貴重な観測場所を提供頂き、同社川辺孝雄課長をはじめとするスタッフの皆様には観測に対して多大なご協力を頂いた。本研究で用いた海上風データも京葉シーバース株式会社より提供頂いた。計測作業やデータ整理には芙蓉海洋開発株式会社の田畑雅洋部長、高木洋氏などにご協力頂いた。また、計測機器の設置・メンテナンスには、株式会社O. S. E, 株式会社ケネック、メリディアン インストルメンツ ファーイースト株式会社のサポートを受けた。ここに記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 上野成三・灘岡和夫・石村明美・勝井秀博(1992): NOAA-AV HRR データを用いた東京湾の風に起因する湧昇現象の解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 256-260.
- 宇野木早苗(1983): 内湾における湧昇現象, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 10-11.
- 宇野木早苗(1990): 東京湾の湧昇と青潮, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 156-157.
- 小田巻実・佐藤 敏・下平保直(1990): 閉鎖性水域の風による流動及び物質移動等の調査・評価手法に関する研究(夏季の東京湾の流況変動), 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 154-155.
- 日本気象協会(1990): 海洋観測指針(気象庁編), 日本気象協会, 428p.
- 松山優治・当麻一良・大脇厚(1990): 東京湾の湧昇に関する数値実験—青潮に関連して—, 沿岸海洋研究ノート, 第28巻, 第1号, pp. 63-74.
- 森川雅行・村上和男(1986): 東京湾における長周期流れの変動特性—現地データ(1983年9月)による検討—, 港湾技研資料, No. 550, pp. 3-50.
- 柳 哲雄・山本隆司・石丸 隆・才野敏郎(1993): 大阪湾の潮汐フロント近傍で観測された短周期内部波, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, 第2号, pp. 201-207.
- 吉田耕造(1974): 総説沿岸湧昇, 沿岸海洋研究ノート, 第11巻, 第2号, pp. 127-142.
- 吉田耕造(1978): 湧昇流研究の展望, 沿岸海洋研究ノート, 第15巻, 第2号, pp. 96-108.