

長期・広域観測データに基づく鹿島灘沿岸域の大規模流動解析

八 木 宏*・日向博文**・緒方健太郎***・灘岡和夫****

1. はじめに

開放性が高い沿岸域の流れは、場が開放的であるがゆえに海上の気象条件、外洋、陸水といった様々な影響を受けやすい構造となっている。このうち、海上風の影響(佐藤, 1994, 八木ら, 1996)や波浪の効果(安田ら, 1994)については、沖合い漂砂との関連から最近注目され、その性質が議論されてきている。一方、海流など時空間スケールが大きい現象の沿岸域への影響については、現象の間欠性が強く、また時間スケール、空間スケールともに大きいため、一般に調査・観測が困難であり実態説明が遅れているのが現状である。

著者らは、海岸環境に与える外洋の影響に着目して近年現地観測を主体とした研究を進めている。特に、海岸域と外洋とを結ぶ重要な海域でありながら、その実態が十分に把握されていない中間領域を“Coastal Buffer Zone (CBZ)”と位置づけ、その非成層期及び成層期の流動について現地観測に基づく実態説明を試みており、海岸環境に与える内部波の重要性などを指摘している(八木ら, 1996, 1997)。今回の研究では、これまでの短期集中的な現地観測ではとらえることができなかった、より間欠的でよりスケールの大きい現象の振る舞いを、長期間もしくは広域にわたって行われている観測データに基づいて把握することにある。

2. 長期・広域観測データの概要

解析対象海域は、外洋に面し開放性の高い鹿島灘周辺海域である。本海域は、その沖合いにおいて黒潮と親潮が合流しており、外洋の沿岸域への影響の可能性が指摘されている。

本研究で対象としているような時空間スケールが大きくまた間欠的な現象を捉えるには、前述のように広域かつ長期間の連続観測データが必要となる。そこでここでは、運輸省第二港湾建設局鹿島港工事事務所及び茨城県水産試験場の協力により、①長期連続測流データについ

ては、同海域にある鹿島港、常陸那珂港の港外波高計(鹿島港: 距岸 2.4 km, 水深 23 m, 常陸那珂港: 距岸 2.4 km, 水深 23 m)で計測されている底層流速データ(海底上 1.5 m)を、②広域水温・塩分空間構造データについては、茨城県水産試験場が実施している定期観測データの提供を受け、これらを組み合わせることによって長期かつ広域の流況解析を行った。観測計器の設置位置及び観測調査点位置を図-1 に示す。なお、今回の解析対象期間は、1996 年 10 月～1997 年 4 月の約 7 ヶ月間であり鹿島灘沿岸域においては非成層期にあたる。

3. 解析結果

3.1 流速データの基本特性

図-2(a), (b) に鹿島で計測された観測全期間の流速の経時変化(1 時間平均値)を示す。流速変動は、明らかに沿岸方向成分が卓越しており、30 cm/s に達する流速が頻繁に発生していることがわかる。図-2(c) に沿岸流速成分から算出した流れ(1 時間平均値)のシールズ数と有義波高から算出した波によるシールズ数の経時変化の比較を示す。シールズ数 0.1 程度を底質の移動限界と考え、流れによって移動限界を越えるイベントが観測期間中にたびたび発生しており、本観測位置のような碎波帯沖合海域では、流れの効果が波による効果と同等以上であることがわかる。

次に、このような流れの変動特性を把握するためにスペクトル解析を行った。図-3 は、鹿島沖における観測全

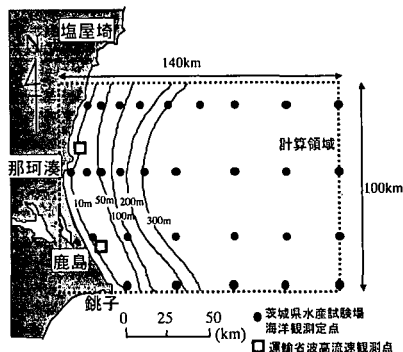


図-1 長期・広域観測データの計測位置

* 正会員 博(工) 東京工業大学土木工学科 助教授
** 正会員 工 修 東京工業大学土木工学科 助手
*** 正会員 修(工) 清水建設(株)
**** 正会員 工 博 東京工業大学大学院情報理工学研究所 教授

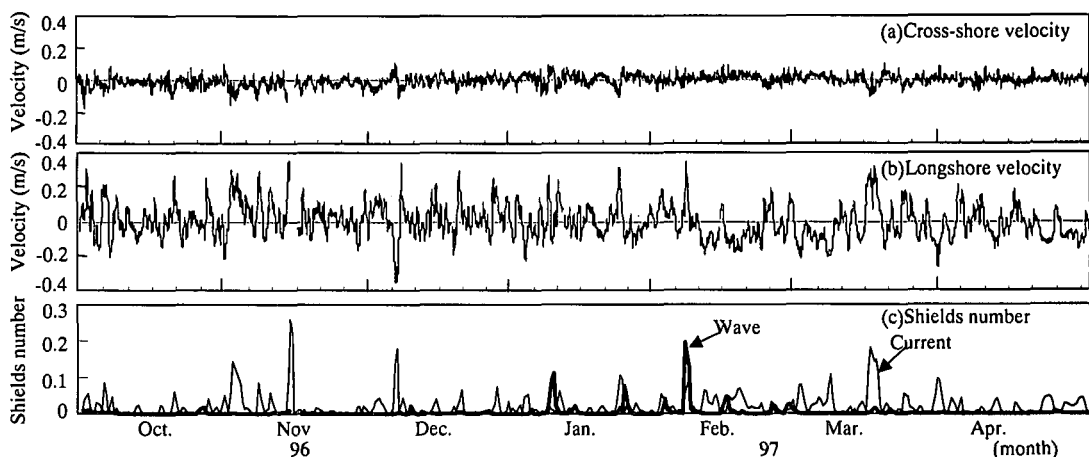
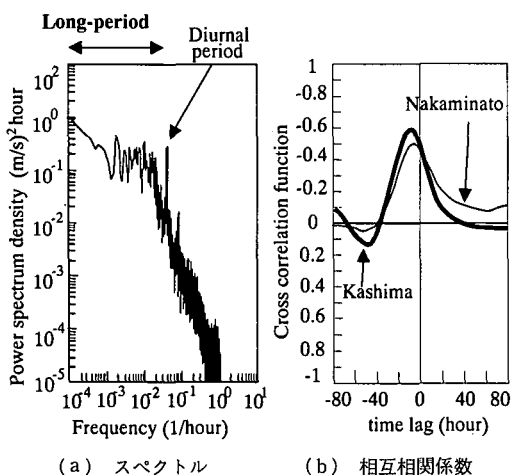


図-2 鹿島の長期連続流速観測結果とシールド数の経時変化

図-3 (a) 鹿島の沿岸流速成分のハワースペクトルと
(b) 沿岸方向流速と沿岸方向風速の相互相関係数

期間の沿岸方向流速のパワースペクトルを示したものである。潮汐に対応した25時間程度の周期に鋭いピークを持っており、日周期の潮流が本海域の流れの構成要素の一つといえる。しかしながら、トータルのパワーとしてはそれよりも長周期の成分が卓越しており、この長周期変動に本研究のねらいである大スケールで間欠的な現象も含まれている。そこでここでは、25時間の移動平均によって日周潮流成分よりも長周期の流速変動を抽出し、それを解析対象とした。

3.2 海上風の影響

図-4に、鹿島及び那珂湊の長周期沿岸流速成分の経時変化を示す。最近の研究によって、砕波帯沖合の長周期流動には海上風の影響が大きいことが指摘されており、今回のデータについても海上風との関係を調べてみた。図-3(b)は観測全期間を対象として、沿岸流速成分

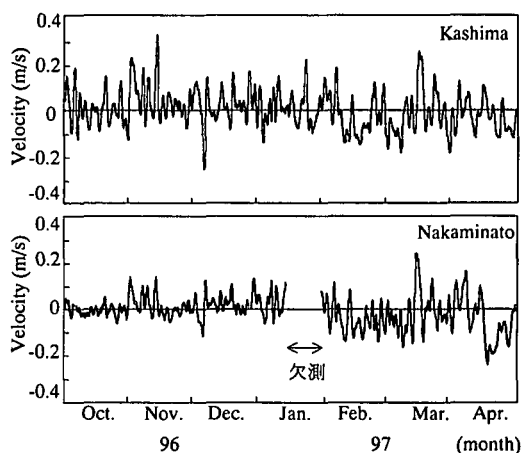


図-4 鹿島と那珂湊の長周期沿岸方向流速

と沿岸風速成分の相互相関係数を鹿島と那珂湊の両者のデータに対して求めたものである。これを見ると流速と風速の相関の最大値は0.5~0.6、タイムラグは6時間程度となっており、長周期流速に対する海上風の影響を明確に示している。しかしながら、風速と流速の相互相関係数を観測期間中の月別に求めてそれを比較すると(図-5)、時期によって相関値は大きく変化していることがわかる。特に、1997年1月、2月は相関が低くなっており、このことは直接的な海上風の影響以外にも長周期流動の発生原因があることを示している。そこでここでは、海上風と長周期流動の相関が低い1997年1月、2月に着目し、沖合の海流の効果、陸棚波との関連について検討した。

3.3 暖水波及の効果

(1) 長周期流動と外洋の海洋構造との関係

図-6は、鹿島で計測された沿岸方向流速成分から移

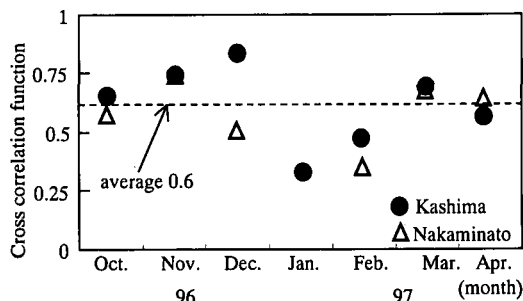


図-5 海上風と沿岸流速成分の相関の経時変化 (鹿島)

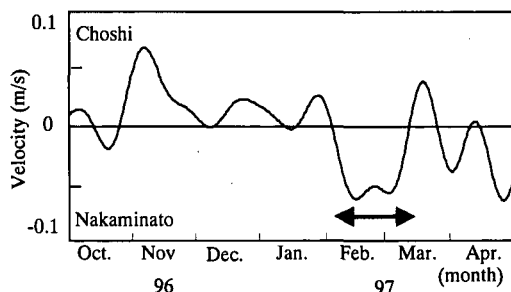


図-6 周期 20 以上の長周期沿岸流速成分 (鹿島)

動平均操作により周期 20 日以上のに長周期の流速成分を抽出し、その経時変化を表示したものである。これを見ると図中の矢印で示した 1997 年 2 月に約 1 ヶ月間にわたり鹿島から那珂湊方向 (北西向き) への比較的大きな流速が連続して発生していることがわかる。この期間は前述の海上風と流れの相関が低い期間にあたるので、ここではこの北西流れと外洋の海洋構造との関係について検討してみた。図-7 は茨城県水産試験場の定期海洋観測結果から作成した 1997 年 1 月及び 2 月の鹿島灘・常磐海域一帯の表面水温分布 (16°C 以上にハッチ) である。これを見ると、1 月には鹿島灘はるか沖合にとどまっていた暖水域 (ハッチ部分) が 2 月にはかなり沿岸近くまで接近していることがわかる。図-8 に那珂湊沖合東西断面内 (図-7 中点線 AB 部分) の水温空間分布を示すが、この暖水塊の規模は水深 200 m 以上に達しており暖水波及が比較的大規模であったことがわかる。これらのことから 1997 年 2 月に発生した北西向きの流れは、この大規模な暖水塊の接近に伴う影響を受けたことが考えられる。

(2) 診断モデルを用いた流況シミュレーション

ここでは暖水波及の流速場への影響を調べるために、診断モデルを用いた流況シミュレーションを行った。基礎方程式は、静水圧近似、Boussinesq 近似を仮定した 3 次元の運動方程式及び連続式である。診断モデルの詳細については文献 (藤原ら, 1997) を参照されたい。なお、運動方程式中の水平及び鉛直渦動粘性係数については、それぞれ $100 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、 $0.005 \text{ (m}^2/\text{s)}$ と一定に仮定している。計算領域は、図-1 の点線の囲まれた東西方向 140 km、南北方向 100 km の矩形領域であり、これは茨城県水産試験場が定期海洋観測を実施している海域にあたる。計算格子間隔は東西、南北方向ともに 2 km とし、鉛直方向について水深 300 m までを不等間隔に 25 層設定した。なお計算負荷の関係上最大水深は 300 m でうち切っている。また、診断モデルで流況計算するために必要となる密度の空間分布は、茨城水試の広域海洋データ (計測位置は図-1 参照) を基に補間によって各計算格子

点の密度を計算しそれを与えた。なお、計算は与えた密度場に対して流速場が定常に至るまで計算を行い、それを流速場の計算結果とした。

(3) 計算結果及び考察

図-9 に診断モデルによる計算結果から 1997 年 1 月、2 月の表層流速ベクトルの比較を示す。これを見ると 1 月には鹿島灘の沖合を北東方向に流れる強流帯 (黒潮) が現れているものの、その影響は沿岸域まで到達しておらず沿岸域には明確な流れが形成されていない。一方、2 月の表層流速ベクトルは、沿岸部において前述の観測流速データに対応した北西向きの明確な流れが生じている。流速ベクトルと水温空間構造を比較すると、流れは水温の等温線に沿って流れており、強い流れは等温線間隔が密な領域に対応している。一方、沿岸部の水温は沖合海域とは逆に 1 月から 2 月にかけて低下しており、これは浅海域において大気のコールド効果がより顕著に現れる地形性貯熱効果が原因と考えられる。

以上のことから考えると、1997 年 2 月に発生した沿岸部の北西向きの流れは、地形性貯熱効果で冷却が進んでいる沿岸域に沖合から暖水が接近することで、大陸棚上に大きな水平温度勾配が発生し、その密度構造にバランスするように形成された一種の地衡流であると考えられる。このように、冬季には沿岸水の冷却が進むことで、流れの駆動力となる大きな水平温度勾配が大陸棚上に形成されることが、海流の影響が比較的沿岸まで及ぶ原因と考えられる。

3.4 陸棚波の影響

(1) 鹿島と那珂湊の流速変動特性の比較

次に、同じく海上風との相関が低いものの暖水波及の影響は小さい 1997 年 1 月の長周期流動の性質について検討した。図-10 に 1 月の沿岸方向流速・沿岸方向風速のパワースペクトルを示す。なおここには示さないが、海上風との相関がよい 10 月は、長周期帯 (25 時間以上) において風速と流速が同じようなスペクトル構造を有しており、主に海上風によって長周期流動が励起されたものと考えられる。一方、1 月については風速は周期 100 時

間程度にピークを有しているものの、流速は周期 200 時間、50 時間にピークを持っており、海上風とは異なった長周期流動が励起されていることがわかる。ここでは、周期 50 時間程度の変動に着目し、その成分を数値バンドパスフィルターによって抽出して、鹿島と那珂湊で比較した(図-11)。その結果、この周期 50 時間程度の流速変動は那珂湊から鹿島に向かって伝播速度で約 5 km/h で北から南に伝播していることがわかった。

(2) 陸棚波の分散関係との比較

このような時空間スケールの大きい波動現象としては

陸棚波の影響が考えられる。ここでは、単純な地形に対して得られている線形理論の分散関係と観測結果から算出した伝播速度を比較することで陸棚波の可能性を検討した。線形理論の詳細は文献(宇野木, 1993)を参照されたい。なお、ここでは実際の海底地形を図-12のように指数関数近似して陸棚波の分散関係を求めた(図-13)。これを見ると周期 50 時間(点線)にはモード 1 とモード 2 が対応し、これから伝播速度を求めると、モード 2 の理論による伝播速度 6.8 km/s が観測値 5 km/s と比較的近い値を示した。Kubota et al. (1981) によれ

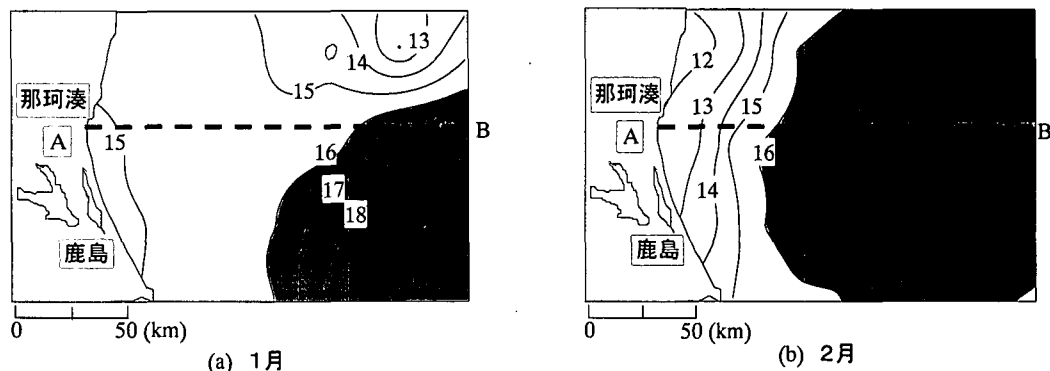


図-7 鹿島灘海域一帯の広域表面水温分布

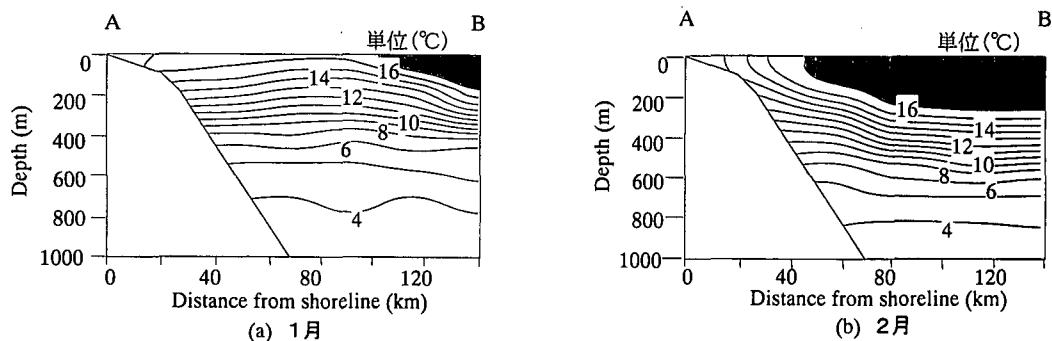


図-8 那珂湊沖合における 1, 2 月の水温断面分布

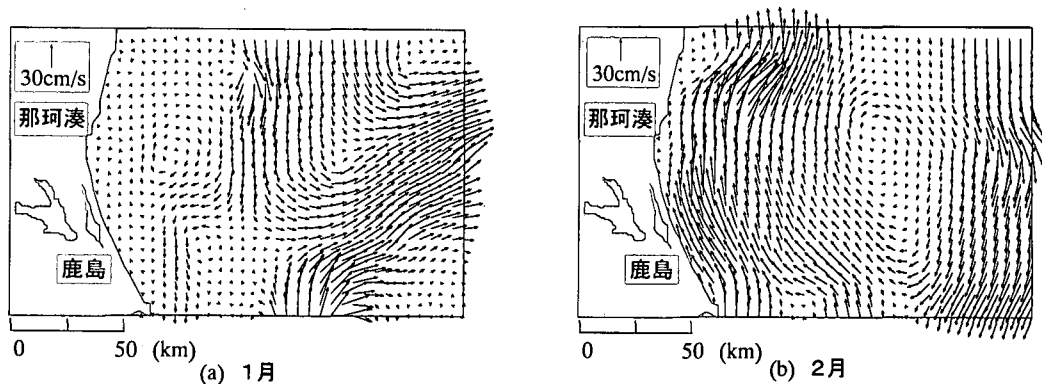


図-9 診断モデルによる計算結果(表面流速ベクトル)

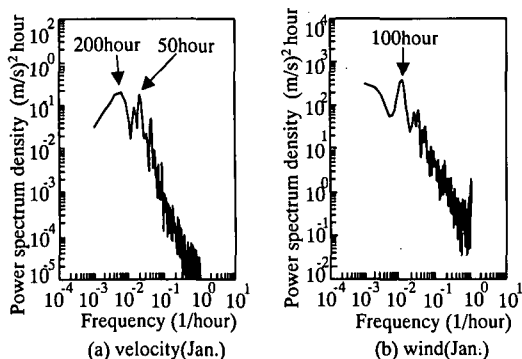


図-10 1月における沿岸方向流速成分と沿岸風速成分のワースペクトル

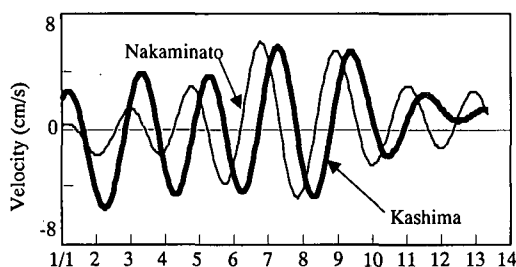


図-11 周期50時間程度の長周期沿岸流速変動の鹿島と那珂湊での比較

ば、福島県沖海域では、第1モードより第2モードの陸棚波の方が励起されやすいことが報告されており、また波の伝播方向（岸を右手に見る方向）から考えても、この周期50時間程度の変動現象は沿岸に拘束された陸棚波であると考えられる。

4. おわりに

鹿島灘沿岸域における広域かつ長期にわたる観測データ（流速データ、水温・塩分の空間構造データ）に基づいて解析した結果、沿岸の大規模な流速変動として以下のことがわかった。

(1) 典型的な開放的沿岸域である鹿島灘沿岸域に励起される長周期流速成分は、平均的に見ると海上風の影響が大きい。

(2) 海上風による直接的な影響では説明できない現象として、沖合いを流れる海流（黒潮）からの暖水波及効果と陸棚波の影響を示した。特に、冬季には沿岸域の冷却効果が進むため大きな水温水平勾配が大陸棚上に形成され、これが沿岸近くまで海流の効果が及ぶ原因であることを指摘した。

謝辞：本研究において、既往の短期集中観測の限界を越えて、広域かつ長期の流況解析を行うことが可能と

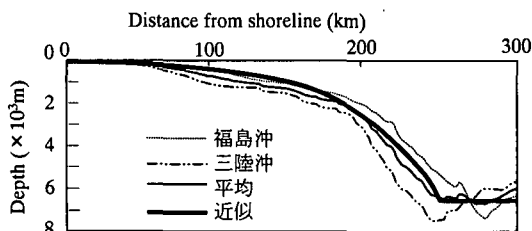


図-12 線形理論に適用した海底地形の断面分布

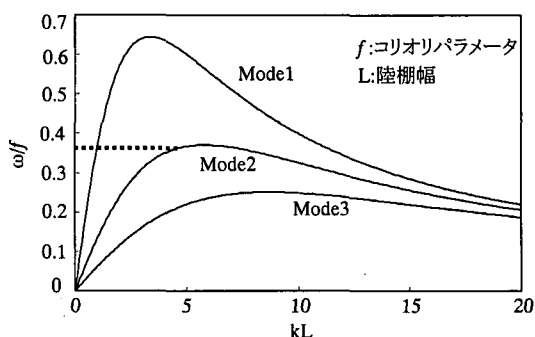


図-13 線形理論による陸棚波の分散関係

表-1 線形理論による陸棚波の伝播速度と観測結果の関係

	波長 (km)	伝播速度 (km/h)
Model 1	1427	25.8
Model 2	373	6.8
観測結果	276	5

なったのは、運輸省第二港湾建設局鹿島工事事務所及び茨城県水産試験場より貴重な観測データを提供して頂いたおかげである。ここに記してあらためて謝意を表します。

参考文献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会。
- 佐藤慎司: 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 113-122.
- 藤原正幸・大橋行三・藤原建紀 (1997): 診断モデルによる8月の紀伊水道における残差流シミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻(1), pp. 441-415.
- 八木 宏・坂本太郎・灘岡和夫 (1996): 非成層期における開放性沿岸域の底層流動特性, 海岸工学論文集, 第43巻(2), pp. 406-410.
- 八木 宏・坂本太郎・灘岡和夫 (1997): 開放性沿岸域における成層期の水温構造と流動特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻(1), pp. 416-420.
- 安田孝志・森 信人・加藤 茂・佐藤慎司 (1994): 石川海岸沖合いの流況特性と碎波の影響について, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 431-435.
- Kubota, M., Nakata, K., and Nakamura, Y. (1981): Continental-shelf waves off the Fukushima coast. Part I. Observations, J. Oceanogr. Soc. Japan, 37, pp. 267-278.