

田辺湾における流れの長期連続観測

海象(流れ)観測グループ*

LONG-TERM OBSERVATIONS OF CURRENTS IN TANABE BAY

By Currents Observation Group, COG (Head Investigator; Yoshito TSUCHIYA)

Synopsis

A series of long-term observations of currents has been carried out at the Tower Station, Shirahama Oceanographic Observatory to find dynamical behaviour of coastal water in Tanabe Bay. During the observations, an ultra-sonic current meter has been employed successfully to measure currents of two-components in the horizontal direction. Spectral analysis was made of the observed data of currents to specify representative phenomena in the long-term data of currents. The representative phenomena are classified into four kinds in time-scale, such as long-term (seasonal, yearly and several days) variations, tides, seiches, swells and wind waves. Characteristics of each phenomenon are briefly considered. Additional observations of currents in the bay were also performed to obtain the spatial distribution of tidal and residual currents. In the observations, water intrusion occurred from the offshore waters to the bay.

1. 緒 言

白浜海象観測所では、これまで、沿岸海域における災害を防止軽減するための基礎研究として、高潮、津波をはじめ、沿岸における暴風時の高波浪や海況変動を正確に把握するとともに、平常時における沿岸海域の動態をも明らかにするための諸観測を続けてきた。その中で、沿岸海域の海水の流動は、水温塩分の分布や潮位から推測することが多かったが、流れの実測によってはじめてその力学的機構が明らかになるものと考えられる。

しかし、沿岸海域における流れの観測は、陸上における風の観測とは異なり、多大の困難を伴うため、断片的なものであった。最近の電子技術の著しい進歩と、その沿岸海洋における諸現象の計測法への導入に伴い、たとえば超音波式流速計を固定した観測点で用いることにより、高精度の流れの連続観測を実施することも可能となってきた。

本論文では、超音波式流速計を中心とした観測システムによって、田辺湾およびその周辺海域において流れの長期連続観測を行ない、流れの時空間的構造について系統的な観測研究を行なった成果をとりまとめて報告する。

まず、本観測研究を白浜海象観測所の従来の観測研究からみてどのように位置づけるかを明らかにするために、2.において、白浜海象観測所における従来の研究成果を述べ、ついで、わが国内外の関連研究の情勢について概観する。それによれば、沿岸域の現象が陸棚あるいは外洋における変動との関連でとらえられるべきであるという認識が昂まり、またそれに対応した観測技術の進歩も著しい。

ついで、3.においては、本観測研究で用いた観測機器や観測システムなどの構造および特性を述べ、超音波式流速計がその他のローター式あるいはインペラ式流速計と性能的にどのような特徴を有するかを現地ににおける比較観測を実施した結果に基づいて明らかにする。また、超音波式流速計を中心とした観測システム

* 土屋義人, 中村重久, 吉岡 洋, 芹沢重厚, 国司秀明, 西 勝也, 棚橋輝彦, 森谷誠生, 市川雅史, 土子良治, 森田行司, 小堀泰宏

におけるデータ処理についてもその要点を述べる。

長期間にわたる本観測の結果は、多くの現象を含み、そのデータは膨大な量にのぼるが、ここではそのなかからとくに重要と考えられる諸現象を中心として解析して得られた研究成果をとりまとめ4.に示す。観測記録には、各種のスケールの現象が同時に記録されているため、解析や考察の都合で、これらを時間的スケールおよび現象の特性からいくつかに分類し、それぞれの分類に従って考察することにする。すなわち、波浪スケールの特性としては、台風時および冬春季節風時の波浪特性をとりあげ、潮流スケールの特性としては、田辺湾内の潮流槽円および恒流を中心として考察をする。長周期波動の特性に関しては、周期が1日より長いものを対象として、超音波式流速計による1年以上にわたる観測記録のスペクトル解析の結果に基づいて考察をする。また、1年周期の季節変化も現象として無視できないので、その特性を要約する。以上に述べた諸現象以外に、台風による高潮や気象条件に直接関係のない田辺湾内の周期的な水位変動については、異常現象としてとりまとめ、そのスペクトル特性を明らかにする。

2. 従 来 の 研 究

2.1 白浜海象観測所における従来の研究成果

白浜海象観測所においては、沿岸海域の災害防止軽減を目的として、異常時はもとより、平常時においても、田辺湾の流動に対して、時間的および空間的な動態をとらえるため、各種の観測研究を行ってきた。昭和36年、白浜海洋観測塔が、田辺湾湾口の通称田尻クズレノ鼻の沖合300m、水深5mの地点に設置され、気象および海象の総合的な観測が始められた。これによって、海上の不動場における高精度で、しかも長期にわたる連続計測が可能となり、気温、風向、風速、水温、塩分、潮位および波浪の連続観測が行われてきた。当時、流速の観測も重要事項のひとつとして、いくたびか試みられたが、現在のようにすぐれた流速計がなかったので、短時間の記録が散発的に得られたにとどまった¹⁾。そのため、田辺湾の海水交流の研究も、流れの実測に基づくものではなく、水温、塩分および潮位などの記録から、間接的にその流動機構や混合機構が議論される程度であった。昭和42年、白浜海象観測所が設置されて、研究員のほか高速艇が配備され、観測塔における連続観測に加えて、湾内における諸現象の空間的な分布を求める観測が実施されてきた。

観測塔における連続観測によって得られた記録にみられる顕著な現象のひとつは、水温の多彩な変動であり、とくに数日から10数日の間隔で発生する水温の一方的変位をとまなう jump が特筆された。これは水温フロントが観測塔地点を通過したことを意味しており、外洋と内湾の海水交流を支配する基本的な構造として注目された。さらに、船による田辺湾の水温塩分観測で、水温の jump をひきおこしている、湾内への外洋水の侵入がとらえられ、それは密度流の性質をもっていることが指摘された²⁾。

一方、昭和48年から50年にかけて、紀伊水道の oceanic front の変動を調べるために、白浜と神戸を結ぶフェリーに水温計をとりつけて、田辺湾から紀伊水道にかけての表面水温分布を毎日連続観測した。その結果、観測塔で水温が jump するときは、湾外に南の方から暖水塊が出現しており、それが田辺湾に侵入するとともに、紀伊水道まで北上して oceanic front を大きく変動させていることがわかった。すなわち、観測塔における水温変動は、田辺湾に対する外洋の影響を反映しているだけでなく、紀伊水道全域の海況変動を反映しているのである³⁾。このことは水温だけでなく、潮位変化にもあてはまり、気圧補正した日平均潮位には、10数日の周期で約20cmの振幅の変動が発生することがある。そのときは、暖水塊の出現とともに、oceanic front の変動、観測塔における水温の jump および田辺湾への外洋水の侵入などが相互により対応を示すことがわかった。しかし、流れの実測が欠けているため、定性的な発見にとどまっており、力学的な裏付けをもった定量的な研究にまで発展させるには長期間の測流が必要であるとの結論に達していた。

潮位に関するもうひとつ興味ある観測結果は、田辺湾では約40minの周期の副振動がしばしば発生することである。これは田辺湾から湾外の陸棚にかけての地形特性から、陸棚静振とも考えられるが、湾内の一ヶ所における水位観測では、それ以上の追求はできなかった。沿岸に多点の水位観測点を設け、さらに湾内外で流れの観測を行なう必要があった。

昭和50年頃から、アンデラ社のRCM-4型流速計が日本で広く使用されるようになったが、もともと深海用に作られていたにもかかわらず、沿岸海域で長期間の係留観測に数多く使用された。白浜海象観測所においても、RCM-4型流速計を用いて田辺湾や紀伊水道で係留観測を行ない、1ヶ月間の長期の流速記録が得られるようになった。その結果、田辺湾では、湾外の紀伊水道に比べて、潮流が小さいうえに、風の影響と思われる流れが顕著に発生し、その特性が断片的ながら定量的に明らかにされてきた。

一方、このように係留観測を実施していると、アンデラ型流速計には、沿岸海域で使用するには、いろいろ問題があることがわかってきた。それは、ローター式の流速計の欠陥として、波浪の影響を受け、過大な流速値を記録することであり、またローターに生物が附着して長期係留中に、その特性が変化することである。それらの問題に対処するために、昭和54年、白浜海象観測所に検定水槽が建設され、長期係留の前後に、流速計の検定を行ない、観測精度の向上が図られるようになった。田辺湾において長期の流れの連続観測を行なうには、波浪の影響を受けず、長期間にわたって安定な流速計が必要となってきた。

なお、波浪観測は、白浜海洋観測塔において、その設置当時より続けられ、台風接近時のうねりのスペクトルの変動などが研究された。しかし、観測塔が岸に近く、浅いところに設置されているので、うねりや風浪の卓越時には、波浪の岸による反射や海底地形による変形が無視できない。また、波高計としては、容量式および圧力式が使われてきたが、前者は長期間の計測や荒天時の計測には不適合であり、もっぱら後者に頼らざるを得なかった。そのため、圧力式波高計で求めた記録の補正係数の吟味が行なわれた⁴⁾。白浜海象観測所で超音波式流速計が最初に使われたのは、潮流観測が目的でなく、波浪の水粒子速度の観測であった⁵⁾。水平2方向の水粒子の速度から波高と波向を求めることが試みられたが、長期間の観測には至らなかった。以上の研究活動の中から、観測所の主要目的である暴風時の波浪特性の観測を適確に行なうためには、観測塔よりさらに沖合に超音波式波高計や流速計を設置して波高と波向を観測することが必要であるという認識が高まってきた。

2.2 国内外の関連研究の情勢

沿岸海洋に関する研究の主要な課題の一つに、注目する海域が外洋からどの程度の影響を受けているのかという問題がある。すなわち、一般に内海や内湾の海水の温度や塩分は、大局的には、陸岸からの河川水の流入、海面における降水・蒸発、加熱・冷却という内海側での熱と塩分の供給と、湾口を通しての外海からの熱と塩分の供給との均衡によって定まっている。瀬戸内海のような閉塞的な内海においては、おそらく内的要因によるものが多いであろう。一方、田辺湾のようなやゝ開放型の内湾においては、むしろ外的要因によるものが多いと考えられる。問題はそれらが一体どのような割合でバランスしているのか、またどのような過程でそのようなバランスがとられるのかである。この観点からこれまでの研究をふりかえてみると、戦前にすでに、たとえば東京湾⁶⁾ など多くの海湾について海水循環系の模式図が作られている。ただそれらはほとんど海水密度や塩分の分布からの推測で、それぞれの海湾における大局的な流動の概念以上を与えるものではなかった。一方、この当時から、極めて顕著な現象として、駿河湾の大急潮^{7), 8)} の報告がなされ、そのようないわば突発的な現象に対する強い関心もたれていた。戦後になってかなりの測流が行なわれるようになり、多くの知見が集積され始めたが、なおその知識はかなり断片的と言わざるを得なかった。その時期に、前節に述べた田辺湾の海洋観測塔で観測された水温の突発的な変動の重要性の指摘⁹⁾ と、冬季の紀伊水道に現われる水温塩分の強いフロントの発見¹⁰⁾ とが相次いで行なわれ、この方面の研究に強い刺激を与えた。ただ、その当時でもなお流速観測がかなり困難であったため、それ以上の研究の大きな発展は望めなかった。

ともあれ、その後、そのような観点に立った観測がいくつか実施されるようになってきた。永田¹¹⁾ は大船渡湾における水温ジャンプの報告をしているが、さらに流速も同時に測られた大槌湾における水温と流速の変動について報告している。それによると、1978年12月に大槌湾湾奥の水深40mの地点の表面下4m, 12m, および19mの各層における水温と流速の観測において、上の2層の水温の急激な昇温とほとんど同時に流向がそれまでの湾外への流出方向から湾奥への流入方向へ急変し、一方、下層の流向はそれまでの湾奥への流入方向から湾外への流出方向へと急変した。そしてこの急激な水温と流れにおける変化は、外洋系の暖水が

表層から湾内へ侵入し、湾内水を下層から湾外へ押し出すという状況のあらわれと考えられることを示した。水温の観測は別の地点でその後もかなり長期にわたっておこなわれ、1978年12月から翌79年の3月にかけて数回の暖水の侵入がおこっていると報告しているが、流速についてはふれていない。おそらく長期間にわたる測流はなお困難なため実施されなかったのではないかと思われる。永田は、これに関連して、さらに外洋水の密度流的な貫入機構を理論と実験の両面から研究し、その進入速度などを見出している。

また、長島・岡崎¹²⁾は、大きく分けて四つの境界（海面、湾口、海底、陸岸）をもつ内湾の流動と海況を正しく把握するためには、その境界におこる現象の実態を把握することが不可欠であるという立場から、東京湾をモデル内湾とし、湾口付近における海洋構造の動的実態把握とそこに内在する水理機構の解明のために、係留系による3点約1ヶ月の流向流速観測を含む観測を行なっている。それによると、冬季東京湾口には紀伊水道でみられるのと同様のフロントが存在し、平均的な流れは水平的にはフロントの東側で湾内流入、西側で湾外流出の傾向にあり、鉛直的には下層より流入、上層より流出の傾向がある。また、この平均的な流れは密度流の性質を持っており、それらが冬季東京湾口部の基本的特性とみなせるが、フロントの変動は複雑であり、その変動が外洋の海況変動とどのように結びついているのかについては未解決であることを報告している。

このほか、最近では東京湾での多数の流速計を用いた大規模な流れの実測による湾内の海水循環と風との対応に関する詳しい研究^{13), 14)}や、鹿児島湾口での年数回にわたる、1回約1ヶ月の断面流量観測の実施による流量変動と高・低気圧の移動にともなう風系の変動との関連の研究¹⁵⁾などが行なわれ、この方面の研究はようやく急速に展開し始めてきた。明らかに現段階でその重要な要素の一つは長期の流速観測にあると言えるよう。

国外での研究は、個々の海域に関するものを克明に探せば、その数は恐らく膨大なものとなるだろうが、それらの研究内容は国内でのそれと大きくは異ならない。たとえば、J. O. Blanton¹⁶⁾はアメリカ南東岸の陸棚海域について、それが河川水の影響を受けた陸岸ぞいの密度非一様なフロンタルゾーンと、その外側の密度一様な水域とからなることを示し、フロンタルゾーンでの海水の動きと水面勾配および風系の変動との関係について論じている。しかしながら、なお観測は乏しく、流れの季節変動に関する知識やフロンタルゾーンの生成・消滅の時間スケール等に関する知識も貧弱で、今後それらの研究を推進することが環境保全的な物質輸送の面からも非常に重要であることを指摘している。

このように、長期の流速観測が可能になったことが研究の著しい進展をうながしたが、なお観測継続期間は1ヶ月から長くても3ヶ月の程度で、今回の田辺湾におけるような1年以上にわたる長期の流速測定はみあたらない。外洋水の突然の湾内への侵入という過程の研究にとっても貴重な流れに関するデータを提供するのみならず、通常の様々な変動現象に対する流れの資料としても、この流速測定は貴重なものである。

3. 観測装置および方法

3.1 観測項目

田辺湾にかぎらず、一般に、沿岸海域の流動に関する諸現象は相互に密接に関連があり、また、その各種要因の変動が生物学的または生態学的諸現象にも影響を及ぼすことはよく知られているところである。このような点に留意するとき、田辺湾における流れの長期連続観測においては、関連する諸要素の観測を並行して実施することが必要であり、さらには、その結果は従来の観測成果と対比すべきことはいうまでもない。とくに、最近の電子技術の飛躍的進歩とそれに伴う海洋観測手法の発展と高精度化によって、長期連続観測が可能になってきた点は、従来、十分な観測ができなかった現象やこれまでにとらえられなかった現象の発見、確認への道を開く可能性がある。このようなことから、田辺湾における流れの長期連続観測にあたっては、多くの項目にわたる観測が望まれるが、その項目を現象のスケールに分けて考えれば、以上のようになるう。

(1) 波スケール

- a. 台風時の風および波浪の特性
- b. 冬季季節風時の風および波浪の特性

- c. 陸棚静振と湾内振動の特性
- d. 吹送流との関係
- (2) 潮流スケール
 - a. 日周潮・半日周潮の特性
(恒流, 残差流を含む)
 - b. 長周期潮などの特性
 - c. 慣性流の特性
 - d. 陸棚波など地形性海洋波の特性
- (3) 長周期波動
 - a. 気象擾乱による陸棚波の特性
 - b. 水温変動と海水交流
 - c. 海況変動
- (4) 季節変化
 - a. 潮位・流速の年変化
 - b. 海洋性フロントの消長
 - c. 陸水流出の影響
- (5) 異常潮位
 - a. 台風による高潮とその特性
 - b. 海底地震による津波とその特性
 - c. 黒潮変動に関した現象

以上の項目のうち、その一部は、すでに他の研究プロジェクトとして進められてきているが、田辺湾における流れに関しては、湾内の他の現象と関連があるだけでなく、湾外の現象とも関係しているはずである。それらの現象のあるものは局所的であり、観測点付近のみでとらえられるものかもしれないが、ある種の現象は、田辺湾のみならず、陸棚域あるいは黒潮流域の変動にまでつながっているものもあると思われる。

このような観点から、観測研究にあたっては、どのような現象を対象とするかを考え、観測機器の選択と観測点の選定をしなくてはならないし、また、既設の観測機器による記録も可能なかぎり利用するべきであろう。本観測研究においては、主として長期間の流れの観測を実施して、前述した各時間スケールの変動とそれに及ぼす諸要因について研究することとし、対象とする海域は田辺湾とその周辺沿岸海域で、Figs. 1および2に示す。Fig. 3に示すように、白浜海洋観測塔沖水深 13.5 m の位置に超音波式流速計を設置し、潮流および波浪流を観測すると同時に、超音波式波高計などによってそこでの潮位および波浪のほか水温を観測することとした。これらの記録は観測塔を中継して陸上の観測ボックス（Cubicle）まで海底ケーブルによって伝送され、波浪および波浪流については、毎偶数時20分間、後述する DMT に、また、潮位および潮流は水温とあわせて CMT に連続記録することとした。なお、これらの観測研究においては、白浜海洋観測塔における風、気温などのみならず、水温、塩分などの観測記録を有効に活用することはいうまでもない。

超音波式流速計による記録開始に伴い、その周辺の流れなどの3次元特性を把握するために、田辺湾内外で随時、アンデラ型流速計による流速観測を行うほか、STD、北原式採水器を併用して、水温および塩分の鉛直分布などを観測した。

田辺湾の流れのメカニズムを明らかにするためには、現象のスケールをとらえる必要があるが、湾内外の諸現象の関連性を究明すべきであるとの観点から、田辺湾内では、Fig. 2に示したように、新庄、江川および堺(南部)で潮位観測を実施するとともに、気象庁の白浜検潮所（細浦）の検潮記録も活用することにした。湾外との対応に関しては、とくに田辺湾の潮位変化との関連を知るため、Fig. 1に示したように樁および印南にも潮位計を設置して観測し、さらに、和歌山県田辺漁港事務所による周参見での観測記録も活用するこ

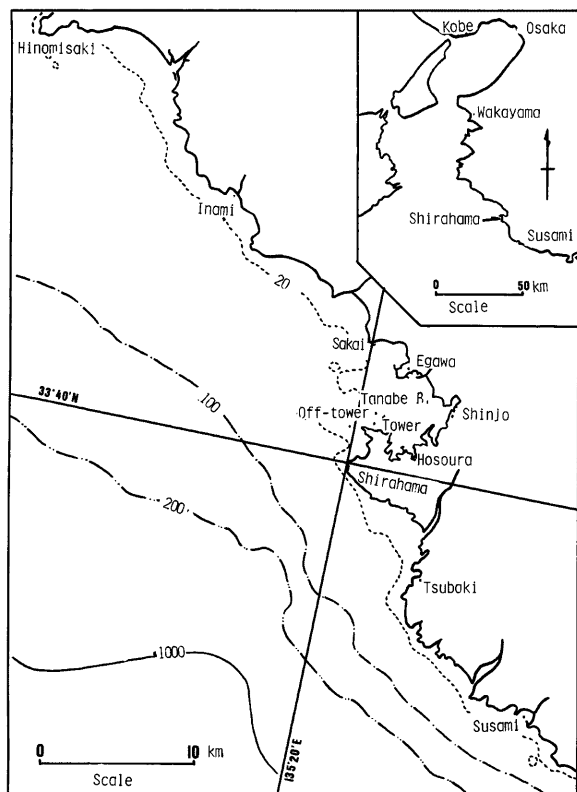


Fig. 1 Bathymetry and geography around Tanabe Bay with location of the station.

とした。このうち、用いた水位計は、新庄と堺では圧力式水位計、江川、印南および椿では水晶型水位計であり、また、周参見では超音波式波高計である。なお、江川では、水晶型微気圧計によって気圧の変動も記録した。

なお、これら本観測研究で使用した観測点、観測項目、設置場所および観測期間をとりまとめて **Table 1** に示す。

3.2 超音波式流速計の構造と特性

(a) 原理と構造

超音波式流速計には各種方式があるが、原理的に大別して時間差方式、シングアランド方式およびドップラー方式の3種類があり、それぞれ得失がある。本観測研究所において用いた流速計は、シングアランド方式と時間差方式を併用した独特の方式、いうなればシングアランド時間差方式による超音波式流速計である。その構造と特性は次のようである。

超音波式流速計は機械的可動部分が全くないため原理的には流速 0 cm/sec に近い弱流が正確に求められ、また時定数も小さく、乱れを 10 Hz 以上のレスポンスで測定できることが、ローター式およびインペラー

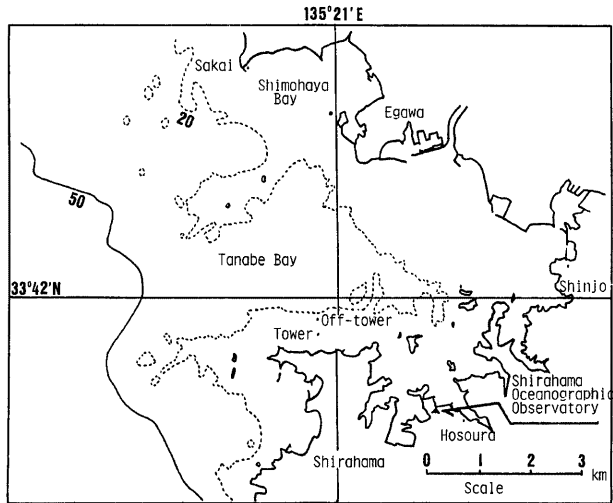


Fig. 2 Bathymetry and geography of Tanabe Bay with location of the station.

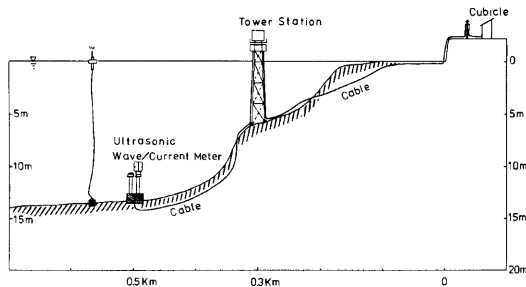


Fig. 3 Schematic lay-out of the observation system using wave gauge and current meter of ultra-sonic type.

式流速計に比較して大きな特長となっている。単に流速および流向を知ることができるだけでなく、その中の周期別変動成分を簡単に求めることができ、また適切な演算処理を行えば波向の計測も可能であり、さらにこれらの計測において長期間のデータを安定に取得できるという特長を有している。

この観測において継続的に使用してきた RC-200 型超音波式流速計は、基本的な構成として、流速検出部（プローブ）と信号処理部（本体）から成り、それらを **Photo. 1** に示す。プローブは海底に設けた架台に固定し、本体は陸上に設置した cubicle 内に設置し、この間を専用の海底ケーブルで接続して使用する。本体からプローブに対し、計測に必要な超音波パルスを発射するためのトリガ信号および電力を供給し、本体ではプローブから与えられる測定信号から流速を算出する。一方、プローブは超音波パルスを送受して、流速に伴う伝播時間差を検出し、これを流速の測定信号としてパルスで本体に伝送する。

Table 1 Factors of observation.

Locations	Factors	Observation periods	Remarks
1. Tower	Water temperature Salinity Wind Air temperature	Routine observation " " "	Shirahama Oceanographic Tower Station
2. Off-Tower	Current Wave Sea level Water temperature	5 Jul., '81-30 Jun., '83 " " 7 Aug., '81-30 Jun., '83	
3. Tanabe Bay	Current Water temperature Salinity	17 Nov., '81-21 Dec., '81 " "	
4. Egawa	Atmospheric pressure Sea level	11 Sep., '81-20 Dec., '81 "	
5. Inami	"	"	Mooring systems of current meters (see Table 3)
6. Tsubaki	"	17 Sep., '81-20 Dec., '81	
7. Shinjo	"	20 Aug., '81-	
8. Sakai	"	21 Sep., '81-	
9. Susami	"	18 Sep., '81-30, Nov. '81	
10. Hosoura	"	Routine observation	By Fishery Harbour Management Office, Wakayama Prefecture By Japan Meteorological Agency

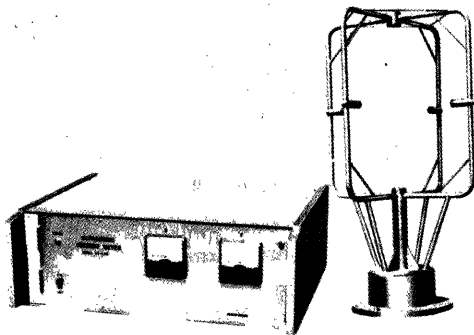


Photo. 1 Probe (right) and amplifier (left) of ultra-sonic current meter.

プローブは Fig. 4 に示すように相対する 1 組の送受波器 (プローブヘッド) 2 組を互いに直交するように水平面に配置した構造となっている。これら 4 個のプローブヘッドは、それぞれ送波器および受波器の機能を有しており、時間をおいてそれらの機能を交代できるようになっている。

この場合、流速の検出は、送波器から超音波を発射し、それが受波器に到達するまでに要する時間が流れによって変化することを利用している。それ故、流れに従う方向と逆らう方向について超音波をそれぞれ発射し、その伝播時間を測定し両者の時間差を求めて流速を算出することになる。1回の送受波動作で得られる時間差はきわめて微小であるので、流速の測定精度を向上するため、シングアランド方式によって一定回数繰返し測定し、時間差を増大することで実用化している。

次に、このシングアランド時間差併用方式による測定原理を簡単に説明する。Fig. 5 (a) に示すように、流速 V の流れの中に1組の送波器 T および受波器 R を相対させて T から R へ超音波伝播方向と流れが θ の角度を成している時、この間を超音波が伝播するのに要する時間 t_1 は、次式で表わされる。

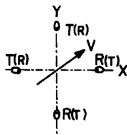


Fig. 4 Positions of 2-axes probes on the horizontal plane.

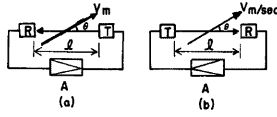


Fig. 5 Measuring principle of ultra-sonic current meter.

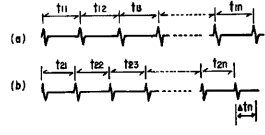


Fig. 6 Wave figures in swing-around action.

$$t_1 = l / (C - V \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 l は TR 間の距離および C は水中音速である。

受波器 R で受信されたパルス信号は、増巾器 A で増巾され、再び T から超音波パルスとして発射される。この動作を、自動的に一定回数繰返すことによって、Fig. 6 (a) のような信号が得られる。その後で、Fig. 5 (b) に示すように、送受波を逆にして、前述した場合と同様に動作させて、T から R までの伝播する時間 t_2 を求めると、次のようになる。

$$t_2 = l / (C + V \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

こちらも自動的に一定回数繰返すことで Fig. 6 (b) のような信号が得られる。したがって、式(1)から式(2)を引けば、伝播時間差 Δt が求まる。シングアランド回数を n とすれば、時間差 Δt_n は、次式で表される。

$$\Delta t_n = n \Delta t = n (t_1 - t_2) = \frac{2nlV \cos \theta}{C^2 \left(1 - \frac{V^2 \cos^2 \theta}{C^2} \right)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、一般に $C^2 \gg V^2 \cos^2 \theta$ であるので、次式のように近似される。

$$\Delta t_n \div 2nlV \cos \theta / C^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

このように、時間差 Δt_n は流速 $V \cos \theta$ に比例しているので、 l および c を一定として Δt_n を計測すれば、 $V \cos \theta$ は容易に求められることになる。以上、1組の送受波器による動作を説明したが、それと直交する方向に設置した送受波器による動作も全く同様にして、 $V \sin \theta$ が求められる。

本装置では、シングアランド回数は32なので水中音速を 1500 m/sec、TR 間を 0.5 m とすれば、流速 1 m/sec あたり、その伝播時間差は最大 14.2 μ sec となる。流速値は、この時間差をゲート信号とし、流速の測定分解能が 0.5 cm/sec となるように設定されたクロックパルスを入力とするカウンタで計測し算出される。これらの制御および演算は、すべてディジタル方式で行なわれ、連続した流速値は D/A 変換することによってアナログ量にて出力される。本装置では、1方向の連続測定時間が 28 msec であるので、2方向一回の測定に要する時間は 56 msec となる。これは、1 sec 間に約18回の測定を行っていることを意味する。以上、本装置の構造および計測原理について述べたが、その主な仕様は次のようである。

(1) 本体 RC-200 型

測定方式 ; 送受切替式超音波伝播時間差方式

測定項目 ; 水平2方向水粒子速度
 測定範囲 ; $0 \sim \pm 3 \text{ m/sec}$
 分解能 ; 0.5 cm/sec
 精度 ; $\pm 1 \% \text{ F.S.}$
 出力 ; $\pm 1.0 \text{ VF.S.}(X, Y \text{ 2方向とも})$
 測定繰返し数; 約18回/sec
 周囲温度 ; $0 \sim 40^\circ \text{C}$
 電源 ; $\text{AC } 100 \text{ V} \pm 10 \text{ V } 30 \text{ VA}$

(2) プローブ TP-20 型

スパン ; $500 \text{ mm}(X, Y \text{ 2成分共})$
 超音波周波数; 1 MHz
 振動子 ; Nepec $\phi 20$

またブロック図及びプローブの外形図をそれぞれ Figs. 7 および 8 に示す。なお、本装置は定置型で、超音波式としては他に例がなく、現在全国の沿岸海域で約30台が使用されている。

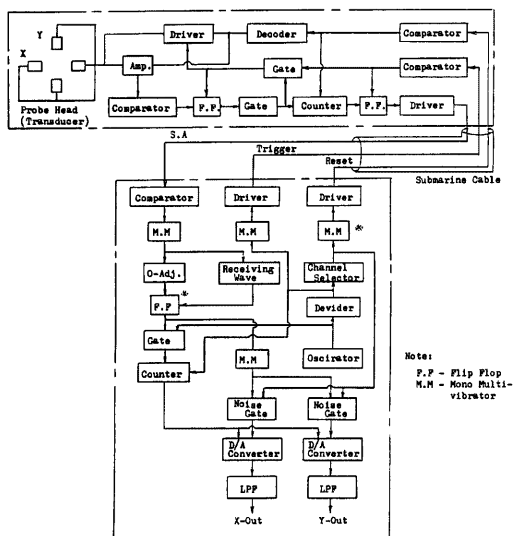


Fig. 7 Block diagram of ultra-sonic current meter employed.

(b) 検定結果

超音波流速計の検定は、京都大学防災研究所附属白浜海象観測所に設置されている検定水槽（長さ 17 m, 巾 2 m および深さ 1.5 m）を用いて実施した。検定に際しては、検定台車の移動速度を 2 cm/sec から 50 cm/sec の範囲で変化させ、そのときの流速計からの出力電圧を測定した。流速計のセンサーは、前述したように、 X および Y 軸の2対で構成されているから、それぞれのセンサー軸に対して、軸の主軸方向が台車の移動方向と 0° および 45° の交差角をもつ場合について検定を行なった。その結果を Fig. 9 に示す。

この検定結果から、応答は直線的であることと、 X 軸と Y 軸との間の応答特性の差はほとんどないことを確認することができる。台車速度 ($U \text{ cm/sec}$) と出力電圧 ($E \text{ mV}$) との関係を $E = kU$ として、感度 (k) を

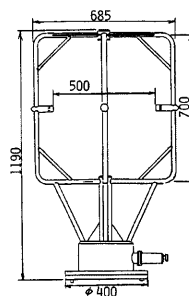


Fig. 8 Sketch of the probe (TP-20 type).

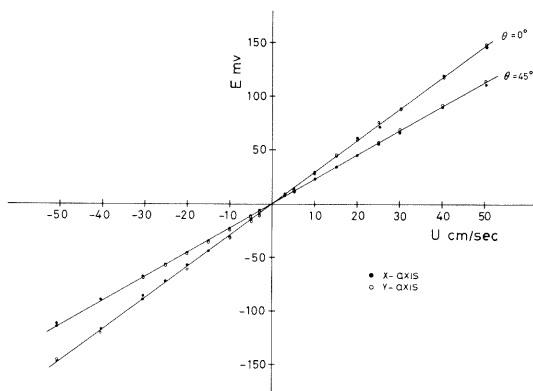


Fig. 9 Calibration curves of ultra-sonic current meter employed.

求めると、交差角 θ が 0° および 45° の場合それぞれ k は 2.93 および 2.26 であった。この k の値は、Fig. 10 に $\times$ 印で図示してある。同図に示してある $\circ$ 印および $\bullet$ 印は、今回の検定とは別に、運輸省船舶技術研究所の検定水槽を用いて、類似の機種を検定したときに得られた感度の方向特性を示したものである。そして、図中の実線円は、感度の方向特性が理想的な余弦特性をもつとしたときの値を示す。なお、Fig. 10 では、測器の設計上決定される感度 $k = 3.33 (\theta = 0^\circ)$ で規格化してある。この図から明らかなように、本流速計は感度に関して方向特性をもっている。すなわち、測定軸と流れの交差角が 45° 以上となる場合には、流速計の応答は理想的な余弦特性をもつが、交差角が 45° 以下になると、それからのずれが生じ感度が低下する。その低下の割合は、交差角が 0° 、言い換えれば測定軸の方向に流れがある場合に最も大きく、理想的な余弦特性に対して 8～10% の感度低下を生ずる。

この感度の低下は、センサーヘッドが大きさ（直径 2 cm および長さ 10 cm の円柱状）をもつことから、ヘッドの後流部に乱れが発生し、その結果流速の欠損が起るためと考えられる。実際の流速データの処理に当たっては、測得された X および Y 軸の出力電圧から単純に流向を算出し、その流向を使って、検定した方位特性に基いて求めた感度を用い、真の流速および流向を推定することになっている。

(c) 安定性

今回用いた超音波式流速計は、元来、波浪に伴う流速変動の測定を可能にするために、測定のスケーリングは $\pm 300 \text{ cm/sec}$ と設定されている。波浪に関する計測では、通常、流れの変動成分だけに注目することが多いので、特に流速計の零点の安定性が問題になることは少ない。一方、通常の流速計として、長期間の測流を行う場合には、一般に対象とする流速そのものが微弱であるうえに、観測継続時間が長いことから、

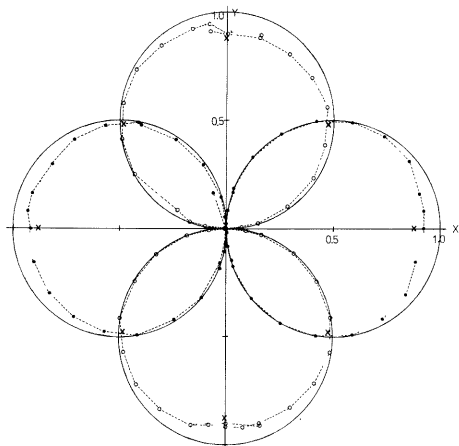


Fig. 10 Directional diagram showing response of ultra-sonic current meter employed.

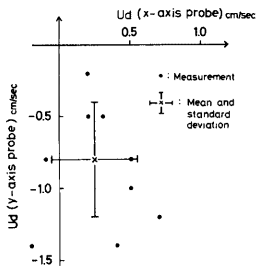


Fig. 11 Change in zero point of velocities at calibration.

流速計の零点の精度と安定性が重要となる。そこで、1981年7月から翌年6月までの通年観測の実施期間中、1～2ヶ月毎に、合計9回の零点の検定を行い、流速計の長期安定性について検討した。

超音波式流速計の零点の検定は、次のように行なった。すなわち、通常の計測状態のまま流速計のセンサーヘッドの間にパイプを取り付け、ヘッド間の海水の動きを止めておいて、その時の流速値 U_d を計測した。その結果は、Fig. 11に示すように、9回にわたる零点測定値の平均は、 X および Y 軸で、それぞれ0.2および -0.8 cm/sec であり、その標準偏差は、それぞれ ± 0.3 および ± 0.4 cm/sec である。通常、長期の測流結果からは、いわゆる恒流成分を求めることが多く、内湾では、その大きさは数 cm/sec から十数 cm/sec の程度である。実際、4.5で述べるように、今回の田辺湾での通年観測結果から、月

平均流の大きさとして1～5 cm/sec というかなり小さな値が得られた。これと比較しても、求められた零点の変動は、恒流などの現象の特性値に対して充分小さく、流速計としてのこの測器の長期安定性は満足できるものといえよう。

実際の記録の解析においては、それぞれの測定値から平均の零点測定値をさしひいたものを使用している。

3.3 各種流速計との比較

従来、海洋においては、流速計による流れの観測は、ローター式あるいはインペラー式の流速計を海中に係留して行われている。しかし、この種の方法による測流に関しては、波浪に伴う振動流がローターあるいはインペラーを過剰に回転させたり、また係留系の運動が見掛の流速として計測されるなどその問題点が指摘されている^{17), 18)}。

一方、本観測研究において用いた測流の方法は、超音波式流速計を海底上に固定して行うものであるから、前述したような測流上の問題点はないものと考えられる。しかし、これまでにそのような各種の測器と計測

Table 2 Characteristics of the instruments.

	USC	Rotor-1	Rotor-2	Impeller
Speed-sensor	Ultra-sonic (horizontal 2 components)	Savonius-like rotor	Savonius rotor	Impeller
Direction-sensor	none	Large vane	Small vane	Trailing fine
Speed-measuring system	To measure with sampling frequency 18Hz and generate with low-pass filter (cut off frequency = 0.01 Hz)	To integrate for sampling interval	To vector-average the pairs of speeds and directions for 20 sec	To integrate for 3 min.
Direction-measuring system	To calculate by 2 components of horizontal velocities	Instantaneously	To vector-average the pairs of speeds and directions for 20 sec	Instantaneously
Sampling interval	1 min.	5 min.	5 min.	20 min.
Installment	Fixed at the bottom	Mooring	Mooring	Mooring

方法とによって得られるデータがどのような特徴を持ち、どのように違うかが実際に比較検討されたことはほとんどない。そこで本格的な観測に先立って、海底上に固定された超音波式流速計によって測定されるデータの特徴を、各種流速計との比較観測によって明らかにすることが試みられた。

(a) 比較観測の概要

1981年8月7日から9月5日までの30日間、田辺湾の京都大学防災研究所附属白浜海洋観測塔の沖200m、水深13.5mの地点で流速計の比較観測を実施した。比較に用いた流速計は、超音波式流速計(USC)、インペラー式流速計(Impeller)およびローター式流速計2種(Rotor-1, Rotor-2)で、それらによる流向流速計測の概略仕様をTable 2に示す。各流速計は、Fig. 12に示すように、海底上3.5mに固定された超音波式流速計からそれぞれ5~7m離して設置された。また、この比較観測中、2時間毎に10~20min間、超音波式波高計で波浪を、また超音波式流速計で流速を、0.5sec毎に同時測定した。

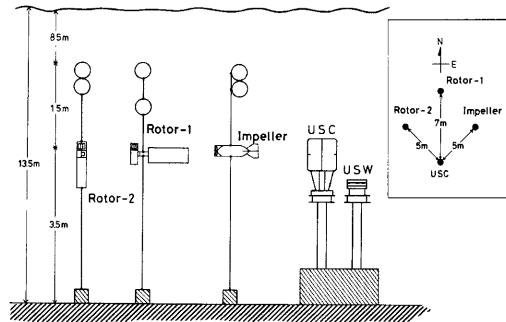


Fig. 12 Schematic view of the array of current meters.

なお、観測開始前に全流速計、観測終了後には、超音波式流速計を除く他の3種の流速計の検定を行った。観測の前後における検定値の変化は、Rotor-2を除いて約10%以内であった。したがって、実測結果は、観測前の検定結果で表される関係で評価した。さらに、Rotor-2では、生物がローターに付着したため、回転が著しく低下し、9月2日以降のデータは欠測となった。

(b) 観測結果

1) 測得データ

観測結果の一例として、流速の絶対値の変動をFig. 13に示す。USCのデータには、流速値0に近い微弱流速が存在するが、Rotor-1, Rotor-2およびImpellerのデータにはそれがみられない。この図の最下段の波高の記録が示すように、観測期間中台風の影響による高波高時が2回あったが、明らかに、この時期に対応してUSC以外の流速計の流速値は増大している。その傾向はローター式流速計の記録で著しく、超音波式流速計による値の4倍近い流速値を示すこともある。また、高波高時には、ここには図示されていないが、流向もUSCによる場合を除いて激しく変動していた。

次に、測得データのスカッターダイアグラムをFig. 14に示す。この図で特徴的なのは、USCではデータ点が原点を中心に分布するが、他の流速計では原点付近は空白になることである。特に、Rotor-1ではその空白は大きく、これに対応する流速は約 ± 5 cm/secである。Rotor-1に対する検定式の定数項は1.6 cm/secであるので、この空白は明らかに、ローターの過剰な回転によるものと思われる。

2) 流速値の出現頻度

各流速計のデータについて、流速階級巾1 cm/secで求めた流速値の出現頻度をFig. 15に示す。USCによる結果では、出現頻度の分布形状はなめらかであり、またImpellerによるものもUSCの形状に似ている。Rotor-1による頻度分布は、2つのピークを持っているが、2番目のピークとそれから強流速側に延びる裾はFig. 13を参考にすれば、高波高時の流速に相当するものであることがわかる。

3) 流速変動のスペクトル特性

Fig. 16には、USC, ImpellerおよびRotor-1の測得データの東西成分（ほぼ等深線に沿う）のパワー

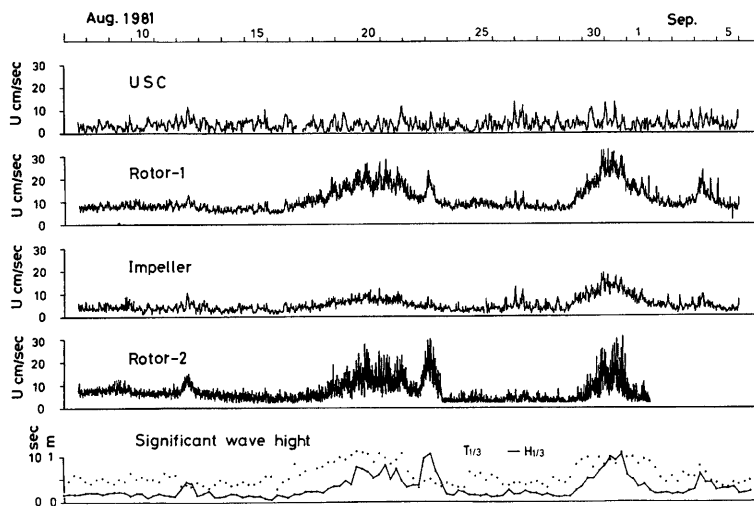


Fig. 13 Changes in current velocities observed with the current meters of USC, Rotor-1, Impeller and Rotor-2, and in significant wave heights and periods.

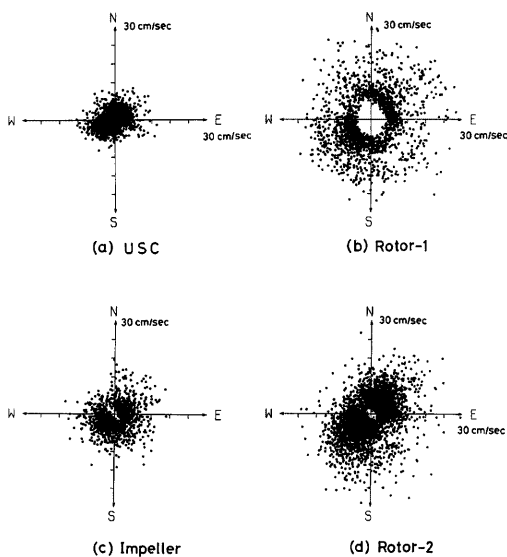


Fig. 14 Scattering diagrams of velocities observed.

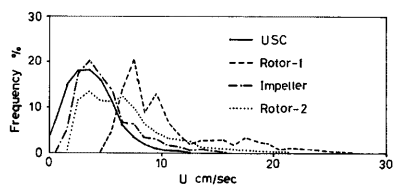


Fig. 15 Histograms of current velocities observed.

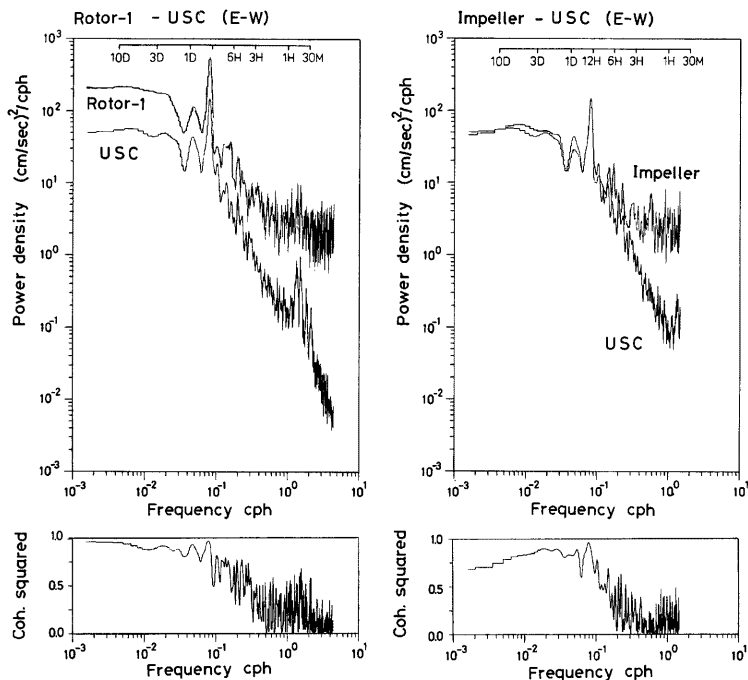


Fig. 16 Power spectra and coherences of current velocities (E-W component).

スペクトルおよび各流速計間のコヒーレンスを示す。USC および Rotor-1 による流速変動のスペクトルの形状は、周期12時間以上でよく一致しているが、USC によるエネルギーレベルは Rotor-1 のそれに比べて約 1/4 になっている。これに対して、周期 1～2 時間より短周期の領域では、Rotor-1 によるスペクトルは平坦化しているが、USC のスペクトルでは周期 40～50 min の副振動の存在を明瞭に示している。さらに、周期10時間より短周期の領域における USC によるスペクトルの値は、全体として $f^{-5/3}$ に比例することも特徴的である。Impeller によるスペクトルのエネルギーレベルは、12時間より長周期では USC のそれに近いが、数時間より短周期の領域では平坦化が著しい。一方、USC と他の流速計間のコヒーレンスは、Fig. 16 に見られるように、長周期域で (USC-Rotor-1) 間の方が (USC-Impeller) 間より高い。おそらく Rotor-1 の方が Impeller より流向の追従性が良いためであろう。

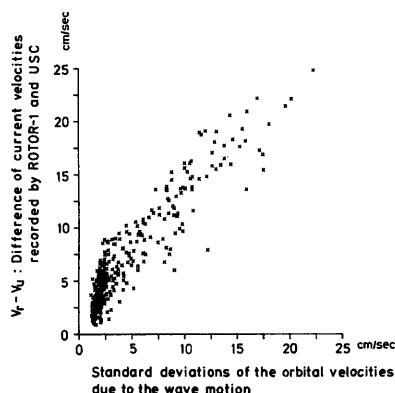


Fig. 17 Correlation between over-estimated velocity with the current meter of Rotor-1 and standard deviation of orbital velocities of wind waves measured by the current meter of USC.

4) 流速差と波浪の相関

前述してきたように、USC によるデータでは、高波高時においても、流速値が特に増大することはないが、その他の流速計では、明らかに流速値が増加している。そこで、USC によって測得された流速値を一つの基準値と考え、この値と他の流速計の流速値との差と波浪特性との相関を検討する。その一例として、Rotor-1 と USC の流速差と、波による流速変動の標準偏差との関係を Fig. 17 に示す。ただし流速差および変動の標準偏差を求めるときの資料は、USC の方は、DMT に記録された 20 min の連続記録、Rotor-1 の方は、それに対応する 5 min 間隔のデータ 4 個の平均である。この図から明らかに、Rotor-1 と USC の流速差は、波浪特性と高い相関のあることがわかる。さらに、この流速差の大きさは、波による流速変動の標準偏差の 1~1.5 倍程度にもなっていることもわかる。一般に、このような流速差は、ローターが振動流に対して示す整流作用や、係留された流速計自体の運動

に起因するものと考えられている。ローターの整流作用に関しては、長島¹⁹⁾ が実験的に、平均流が存在しない場合、振動流の振巾の 0.8 程度の大きさをもつ見掛けの流速値が現れることを示している。一方、係留系の運動に関しては、その実体は複雑であるが、今回用いた係留系の固有振動周期を求めると、約 5 sec となるので、この運動による見掛けの流速の発生も無視できないと言える。

5) 海底上に固定された超音波式流速計による流速データの特徴

各種流速計との比較観測から、海底上に固定された超音波式流速計によって得られたデータの特徴として、次のことが明らかにされた。すなわち、このような測流法では、1) 数 cm/sec 以下までの微弱流速も計測することができ、2) 高波高時においても、計測上波浪の影響をほとんど受けず、流速値の見掛けの増加および流向の乱れが生ぜず、さらに、3) 記録時間間隔の倍周期の短周期変動まで、雑音のない忠実な計測ができていたことが、流速変動のパワースペクトルなどからうかがわれる。

3.4 データ処理システム

前述したように、本観測で測得された主要なデータは、デジタルデータレコーダに収録された。レコーダは波浪に関連するデータ、および平均流速、水位、水温を収録する二種のものが用意された。前者のデータを収録するカートリッジテープを DMT、後者のデータを収録するカセットテープを CMT と呼んでいるが、それぞれのデータ処理の概略について述べる。

波浪観測は 2 時間毎に 20 分間行ない、DMT の 1 巻には、約 10 日間の観測データを収録することができる。そして Fig. 18 に示すように、これらの生データに対して、通常 1 ヶ月を単位として、波浪諸元を算出するための処理が行われる。波浪諸元として求められるものは、最大波 H_{max} 、とその周期 T_{max} 、有義波高 $H_{1/3}$ とその周期 $T_{1/3}$ 、波向、集中度および波数などである。実際の処理に際して問題となるのは、異常データの発見と、その修正である。異常データは、アナログモニターからチェックできるが、大量のデータについては、長時間を要するので、計算機によって異常データの処理を行うことが望ましい。ソフトウェアによるこの種の処理を完全なものにするためには、波浪の特性を考慮した統計手法が有効である。

一方、CMT には、2 分間のローパスフィルターを通した、平均流速、水位および水温の信号が 1 分間刻みで記録され、1 巻に約 20 日間の記録が得られる。それらのデータのうち流速に関しては、1 ヶ月単位で

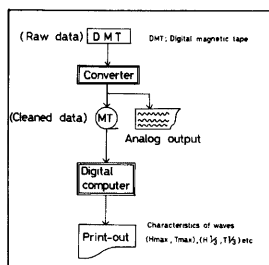


Fig. 18 Block diagram of wave data-processing.

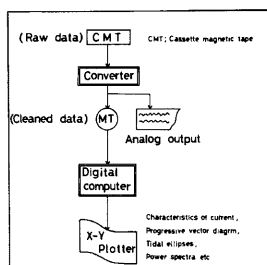


Fig. 19 Block diagram of current data-processing.

Fig. 19 に示すような処理が行われ、データのスカッターダイアグラム、進行ベクトル、潮流楕円およびパワースペクトルなどが得られる。

4. 観測結果と考察

4.1 現象の分類

前述した方法による一年間を通じての超音波式流速計による観測データには、1秒間から1年間にわたるすべての周期変動が記録されているはずである。田辺湾の流れの全体的特性を概括するために、その全周波数帯のスペクトルを Fig. 20 に示す。ただし、解析の都合上、これは4種の周波数帯ごとに計算されたスペクトルをつなぎ並べたものである。すなわち、1日以上周期は、一年間のCMTの記録の1時間移動平均値から求めた（1時間刻み）。1時間から1日の周期は、夏季の1ヶ月間のCMTの記録の5min移動平均値から求めた（5min刻み）。5minから1時間の周期は、11月4日から5日にかけてのCMTの生の記録（すなわち1min刻み）から求めた。5min以下の周期は、夏季の台風時期（8月23日12時）のDMTの記録（すなわち0.5sec刻み）から求めた。

Fig. 20 によれば、田辺湾における海水の流動には、いくつかのスペクトルピークが存在する。まず、長周期のものからあげれば、1年周期から周波数 10^{-3} cph 付近のパワーの谷間にいたる部分が季節変動に相当している。次に、周波数 10^{-3} cph から 10^{-2} cph にかけて、いくつかのピークが存在しており、それらのパワーはほぼ一定の高さを維持している。4.4でとりあげる田辺湾における恒流の長周期変動が、このピーク群に属している。それより短周期になると、半日周期までピークの谷間が続き、潮汐から予想される周期としては半日周潮が卓越しており、日周潮は弱く、むしろ慣性周期のピークがみられる。より短周期側では、 $-5/3$ 乗則にのったパワーのカスケードダウンが明らかである。それらの間で、42min周期のピークが非常に顕著に存在するが、これは潮位記録からも、従来より注目されてきた田辺湾の副振動である。田

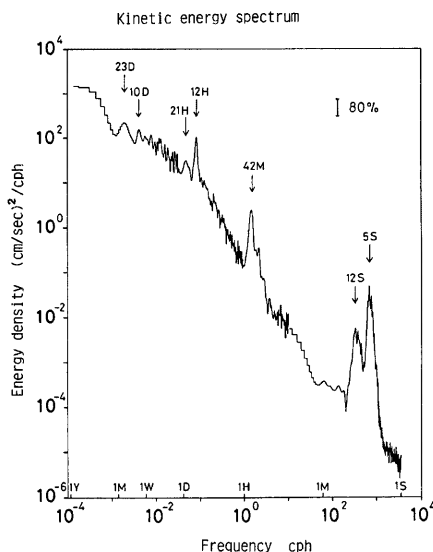


Fig. 20 Power spectrum of current in Tanabe Bay.

辺湾における 5 min 以下の短周期変動としては、この場合 12 sec のうねりと 5 sec の風波にともなう振動流が卓越していることがわかる。

以上の考察から、田辺湾における海水の流動には、パワースペクトルのピーク特性からみて、5 種類の変動、すなわち、1) 数ヶ月から 1 年の季節変化、2) 3 日から 20 日間におけるいくつかの恒流の長周期変動、3) 慣性周期および半日周期、4) 約 40 min の田辺湾の副振動、および 5) 波浪特性としての 5 sec から 12 sec の風波とうねりが存在することがわかる。

4.2 波浪スケール

ここでは、とくに、田辺湾に襲撃する風波とうねりについて、とくに超音波式波高計および流速計で得られた記録の解析結果を中心にして考察をする。

一般的にいて、田辺湾に襲撃する波のうち、風によって生じるものは周期 3~10 sec と考えられる。このような風波は田辺湾内および紀伊水道で W ないし NW の風の作用により生じ、発達期は周期 3~5 sec であるが、強風が海上で長期間（1 日以上）持続すると周期は 6~7 sec となる。この風向に対するフェッチは、紀伊水道の幅程度であるために、風による波が周期 10 sec 程度にまで成長することはほとんどないようである。

観測される波浪には、10~20 sec の周期のものがみとめられる例が多い。これは紀伊半島のはるか南方洋上の強風域で発生した波が伝播してきたものであり、フェッチが長いことにより発達した波で、通常 12~17 sec の周期である。このような波浪の波浪源あるいは外力は、台風、発達した低気圧や寒前線などによる強風である。このようなことから、ここでは、台風時の風波およびうねりと、冬季節風時の風波の記録を解析した結果について述べる。

(a) 台風時の風波とうねり

本観測期間中に、田辺湾を直撃した台風はなかったが、台風の影響の及んだ例は数例観測された。田辺湾内における台風による波浪の特性については、一定のパターンがあって、いずれの台風の場合にも共通している。一例として、1981 年 8 月 22 日、東海地方に上陸後北上した台風 8115 号時 (Fig. 21) の波浪特性を

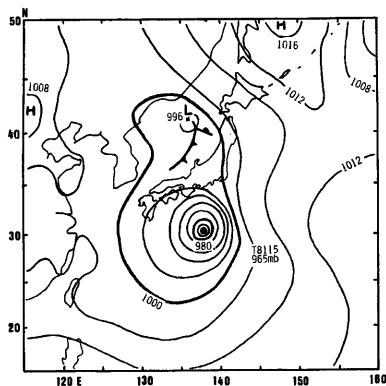


Fig. 21 Synoptic chart (surface) at 00h 00m GMT (09h 00m JST) on 22 Aug., 1981 (after Far-East Weather chart published by Japan Meteorological Agency) when the typhoon 8115 was approaching to Honshu of the Japan Islands.

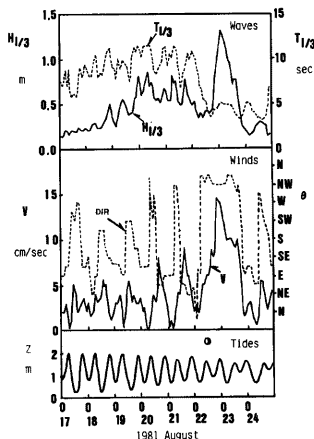


Fig. 22 Significant waves ($H_{1/3}$ and $T_{1/3}$), winds (V and direction) and tides (z) from 17th to 24 Aug., 1981 to shown an effect of the typhoon 8115.

Fig. 22 に示す。この図では、上段に超音波式流速計によって観測された有義波 $H_{1/3}$ とその周期 $T_{1/3}$ を毎正時について求めたものを示してある。これによると、8月17日から台風が田辺湾に接近するまでの間、有義波高は次第に大きくなり、その間、周期は 10 sec 周辺の値となり、うねりの特性を示している。台風上陸後（8月22日夜半）、有義波高はさらに大きくなっているが、周期は 5 sec 位である。これは台風通過後、うねりが減衰し、気圧配置が冬型とほとんど同様なパターンとなり、吹続時間および吹送距離の短い台風南西象限の強風域で生じた風波が発達したことによるものである。ちなみに、この図の中段に、白浜海洋観測塔で得られた風の記録を示した。風速は台風接近時の8月17日から21日にかけて、昼間 S~SW の風が強く、夜間 S~SE の弱い風が吹いた。これは一種の海陸風とみられ、局地的なものであろう。8月22日には、台風が田辺湾の東方を北上したため、はじめ N よりの風が W よりの風となり、台風上陸後は N~NW の風が強くなっている。このような経過は、その他の台風の場合にも同様にみとめられ、田辺湾内では台風通過後あるいは台風上陸後には、台風接近時よりもさらに強い風が吹き、それにとまって紀伊水道を含む田辺湾周辺での風波の発生・発達がみられる。田辺湾内で観測された有義波高は最大 1.3 m 程度であるが、田辺湾外では最大波高は 4~5 m であったものと推測される。この時期の天文潮（気象庁による予報潮位）は図の下段のようになっており、たまたま台風上陸時の月令は上弦であった。もしも、大潮のときには、満潮位もとくに高く、それだけに、台風による気圧低下の効果や風の吹きよせの効果に加えて高波浪の海岸域における越波・越水の可能性も高くなることに留意しておくべきであろう。

観測記録にもとづき、台風接近時の8月21日6時と台風上陸後の8月23日2時について、波浪のパワースペクトルを求めると、Fig. 23 の右下図のようになる。また、このときの方角スペクトルは左上図に扇形

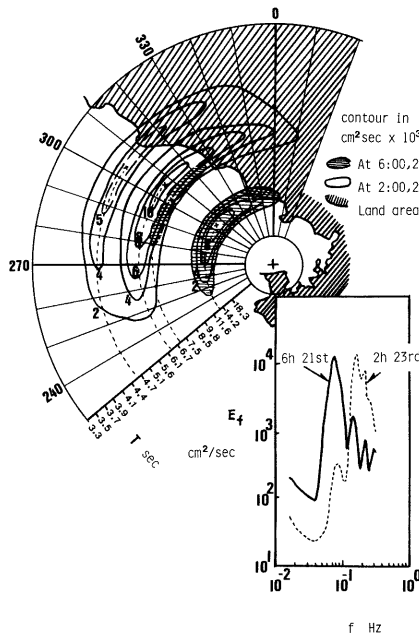
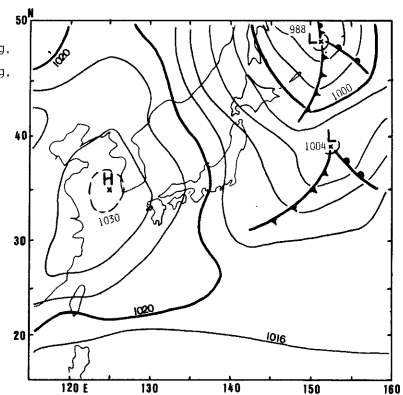


Fig. 23 Power and directional spectra before and after the typhoon 8115 landed on the south coast of Japan.



の極座標で示すようになっている。すなわち、台風接近時の8月21日6時には、波向は 305° であり、ピークの周期は12~13 secである。これに対して、台風通過後の8月23日2時には、波向はおよそ 306° であり、主ピーク周期は6.3 sec程度であり、また、次のピークの周期は4.6 secおよび波向 304° となっている。従来、国司ら²⁰⁾によって強風時の波浪スペクトルの特性で2ピーク構造の存在が指摘されているが、8月23日2時の波浪スペクトルの特性(6.4 sec および 4.6 sec におけるピーク)はこれに相当するものではないかと考えられる。このピーク構造は8月21日6時にも、Fig. 23 のようにパワー・スペクトルにおいて認められるが、方向スペクトルにおいても2ピーク構造(14.0 sec および 7.0 sec)となっていることがわかる。

(b) 冬期季節風時の風浪

わが国では、通常冬期季節風は12月から3月までの間であり、その風向はN~NWが卓越している。田辺湾に侵入する冬期季節風時の風波の吹送距離は、風向を考慮すれば、紀伊水道の幅の程度で、50~100 kmである。このために、吹送時間がたとえ長くても、風波はある程度以上に成長することはない。そして、風波を有義波として表わしても、有義波周期はたかだか7 secであろう。

一般にいわれている典型的冬期季節風時において、田辺湾内の波浪は最も顕著となる。これは、NW方向に田辺湾の海岸地形が開けており、湾外で発達した風波が田辺湾に直接侵入してくることによるものと考えられる。やや変則的な冬型気圧配置の場合でも、田辺湾内で大きい波浪が生ずる。たとえば、そのような例をFig. 24に示す。この図は1981年12月24日9時の地上天気図である。田辺湾周辺および紀伊水道でN~NWの風が吹き、田辺湾では風波が顕著となるが、このとき、図のように、大陸の高気圧、または大陸からの移動性高気圧の中心が $30\sim35^\circ\text{N}$ を東方へ移動している。超音波式波高計による冬期季節風時の観測記録によれば、有義波高は1.04 m、有義波周期4.4 secに達した。すなわち、12月23日夕刻からNNWの風が強くなり、風速は24日正午頃最大となり、25日早朝まではほぼ風向は一定であったが、この間、風速が最大になった直後あたりで有義波高も最大となっている。

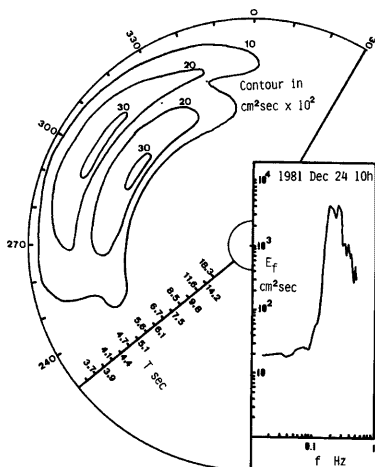


Fig. 25 Power and directional spectra at 10h 00m on 24 Dec., 1981.

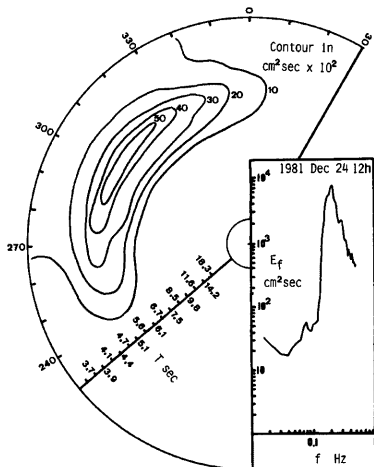


Fig. 26 Power and directional spectra at 12h 00m on 24 Dec., 1981.

この時の、田辺湾の冬期季節風による波浪スペクトル特性を知るため、1981年12月24日の10時および12時におけるパワー・スペクトルとその方向スペクトルを求めて、Figs. 25 および 26 に示す。12月24日10時には、スペクトルには2ピーク構造が存在したが、12時には単一ピークとなっている。NNWの風が強くなり、12月24日12時のスペクトルでは周期 4.7 sec 付近に単一ピークが存在する。方向スペクトルから、10時の2ピークの波浪はいずれも波向 300° であり、吹続時間の異なった2つの波浪であると考えた方がよい。また、12月24日12時の方向スペクトルによれば、10時から12時までの間には波向はほとんど変化していないと考えられる。

なお、波浪特性と水位および流速とが相互にどのような関係にあるかを検討するために、水位 η 、東向流速 U および北向流速 V に対して、コヒーレンスと位相とを求め、その結果を Fig. 27 に示す。これらによれば、 (U, V) 、 (η, V) 、 (η, U) のいずれの組合せにおいてでも、波浪スペクトルのピーク付近でコヒーレンスの値 r^2 が大きくなっている。また、このときの位相 β は、同図の右側に示したが、とくに、 (η, V) に関しては、位相は波浪スペクトルのピーク付近で 0° であることがわかる。

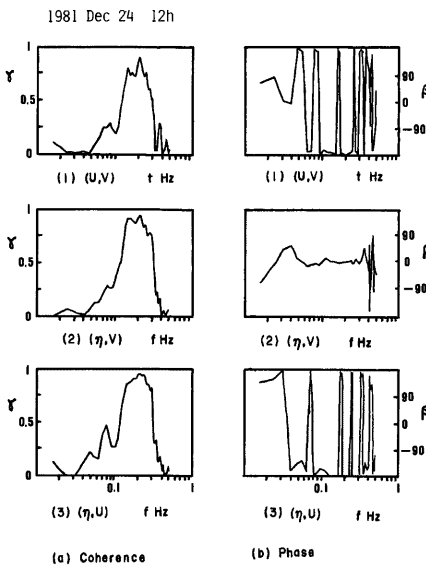


Fig. 27 Coherence and phase of surface displacement and water particle velocities by wind waves at 12h 00m on 24 Dec., 1981.

- (a) Coherence: (1) (U, V) , (2) (η, V) , (3) (η, U)
 (b) Phase: (1) (U, V) , (2) (η, V) , (3) (η, U)
 (r in the figure should read r^2 .)

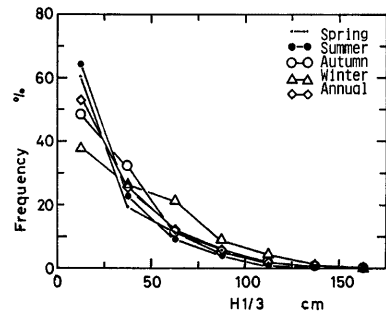


Fig. 28 Frequency distributions of significant wave height.

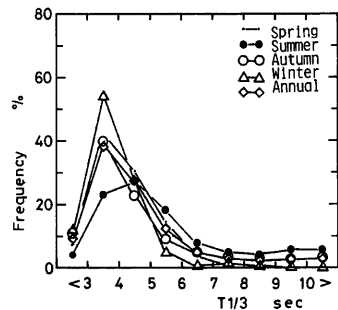


Fig. 29 Frequency distributions of significant wave period.

(c) 波浪の統計

白浜海洋観測塔において、超音波式の波高計および流速計による観測が開始され、本格的にデータの集取整理ができた1981年8月から翌年7月までの一ケ年間について、有義波高 ($H_{1/3}$) とその周期 ($T_{1/3}$) および卓越波向 θ を季節別および通年で推計した結果を Figs. 28, 29 および 30 に示す。図における季節区分は、春期 (1982年3~5月), 夏期 (1982年6月, 1981年7, 8月), 秋期 (1982年9~11月) および冬期 (1981年12月, 1982年1, 2月) としてある。

これらの図から、季節風の卓越する冬期には他の季節に比べて有義波高が 50 cm 以上のものが比較的多く出現しており、有義波周期も 4 sec 以下のものが大半を占め、波向は西北西が卓越していることがわかる。

これは田辺湾の北西寄りの周辺海域で発達した風波の寄与が大きいことを示している。夏期には、冬期とは対照的に有義波高 25 cm 以下のものが大部分であり、平均的には、静穏な季節であるといえるが、有義波周期 4 sec 以下の出現率に対して、8 sec 以上のものが同程度、波向は北西が大部分を占めている。これは主に外洋から田辺湾内に侵入してくるうねりの影響が大きいものと考えられる。また、春期と秋期における波浪特性は、波高、周期および波向とも通年のものに類似しているが、秋期において有義波周期 10 sec 以上の波浪が出現するが、これは主として台風に伴ううねりである。

4.3 潮流スケールの特性

(a) 通年観測中の調和定数の変動

Fig. 32 に示した海水の流動の総観的スペクトルからもわかるように、流速変動には、半日あるいは1日周期の潮流成分が存在する。ここでは、こうした潮流成分について、調和解析の手法で、基本的な統計解析を行った。

1981年7月から1982年6月の期間で、月毎に求めた M_2 および S_2 分潮の調和定数と潮流楕円の主軸方向を Fig. 31 に示す。 M_2 および S_2 では、その振巾は年間を通し M_2 の方が大きい。しかし、 M_2 の振巾は、大きい場合でも約 2 cm/sec であるから、一般的に言って田辺湾のこの地点における潮流は微弱であると言える。また、振巾の年間を通しての変動からは、潮流自体が微弱であることもあって、特に季節的な傾向または変動のようなものは明らかでない。遅角についても、通年的な変動の傾向は見られず、むしろ M_2 の遅角は 50° 程度で比較的安定していると言える。一方、潮流楕円の主軸方向は、 M_2 および S_2 とともに 70° (N から時計まわりを正) 程度で一定している。この方位は、この付近の等深線の方角にはほぼ一致していることから、潮流自身が海底地形の影響を強く受けていることがわかる。

(b) 田辺湾全域係留観測

前述したように超音波式流速計は、田辺湾の湾口の南端に設置したので、そこで連続観測される流れが湾全体の海水の流動にどのような役割を果たしているのか、すなわちどの程度代表性があるのかが問題となる。そこで、このことを考察するために、1981年11月から12月にかけて、田辺湾内5ヶ所で、係留式潮流観測を行った。測点位置および係留方法を Fig. 32 および Table 3 に示す。

この観測によって、1) 水温の jump を伴う外洋水の intrusion, 2) 季節風による湾内の水平循環, 3) 湾内の潮流分布, および 4) 田辺湾の副振動など興味ある現象が得られた。ここでは二、三の特徴を述べる。

1) 水温の jump を伴う外洋水の intrusion

2.1 で述べたように、田辺湾には数日に一度の割合で水温の jump が起ることがわかっており、それは外

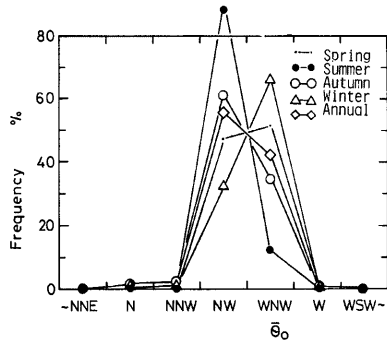


Fig. 30 Frequency distributions of wave direction.

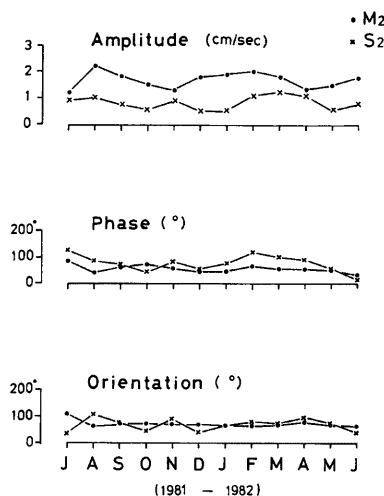


Fig. 31 Variations in harmonic constants of currents.

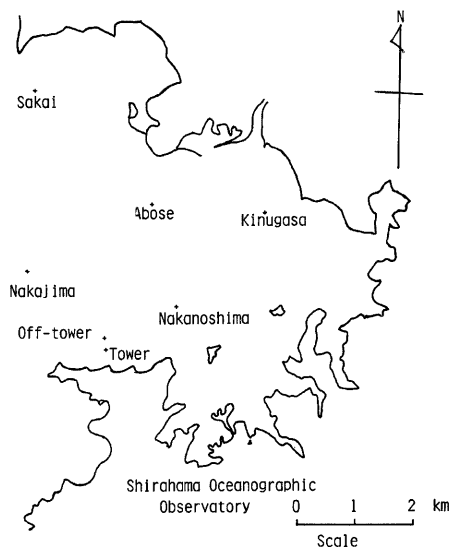


Fig. 32 Stations of current observation in Tanabe Bay.

Table 3 Spaficl arrangement of the instruments.

Stations		Nakajima	Off-Tower	Nakano-shima	Kinugasa	Abosé	Sakai
Upper	Depth	8 m	5 m	10 m	5 m	6 m	10 m
	Instrument	RCM-4	NC-2	MTCM-4	RCM-4	RCM-4	NC-2
	Measured items	V, D, T, S	V, D, T**	V, D, T	V, D, T	V, D, T	V, D, T**
Lower	Record interval	5 min	20 min	5 min	5 min	5 min	20 min
	Depth	23 m	10 m	20 m		13 m	16 m
	Instrument	RCM-4	USC	RCM-4		RCM-4	RCM-4
Bottom	Measured items	V, D*, T, S	V, D, T**	V, D, T		V, D, T	V, D, T
	Record interval	5 min	1 min	5 min		5 min	5 min
	Depth	34 m	13 m	23 m	7 m	16 m	19 m
Observation	Start	19 Nov.	20 Nov.	19 Nov.	17 Nov.	18 Nov.	19 Nov.
	End	21 Dec.	21 Dec.	8 Dec.	21 Dec.	21 Dec.	8 Dec.

V; Current velocity, D; Current direction, T; Water temperature, S; Salinity

*; Direction not obtained by senser trouble.

**; Temperature was measured with the sensor which was set independently of current meter.

洋水が密度流的に湾内に侵入するためであろうと思われる。今回の田辺湾の全域についての観測中で、水温の jump は 4 回起った。とくに、Fig. 33 からわかるように、12月4日早朝に起ったものは、流速にも明らかに湾内流入を示す流向の流れが存在し、また水温の jump も湾奥にいくほどおくれしており、この予想

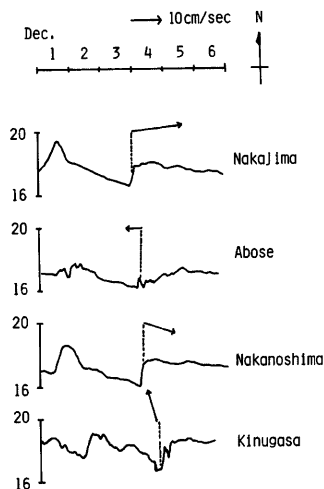


Fig. 33 Series of temperature jump and current reduced by water intrusion in Tanabe Bay.

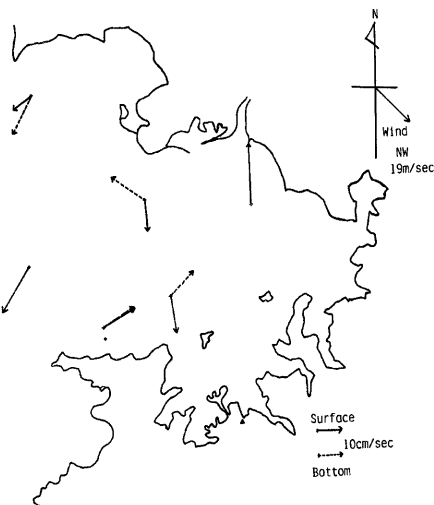


Fig. 34 Current vectors measured at 00h 00m, 2 Dec., 1981.

を裏付けることになった。このような水温の jump と流速の増加は、湾口から湾の南側で顕著であり、湾の北側では著しくない。すなわち、intrusion は湾口から湾の南側に沿って湾奥に進み、北側では逆に湾内水の流出が起っている。したがって、本観測において設置した超音波式流速計は、湾外からの intrusion を最も早く見出すことのできる場所に設置されていたことになる。

2) 季節風による湾内の水平循環

冬型気圧配置となって、北西の季節風の吹き出しが数日続く場合が6回観測されており、後になるほど持続時間が長くなってきていた。とくに、12月1～2日には、海洋観測塔における最大風速は 19 m/sec にも及んだ。強風時には湾内の各点で、10 cm/sec 以上に及ぶ強い流れが発生し、12月2日には、各点で最大流速が記録された。Fig. 34 には、そのときの流れの分布を示す。これには 20 cm/sec を越す強流がみられ、また底層の流速ベクトルでは、湾内で反時計まわりの循環が形成されていることがわかる。これに対して表層では、風による剪断力によって流速ベクトルは風下方向に向いているところが多いが、それでも海岸に近接している観測塔沖や衣笠地点では、底層の反時計まわりの循環にのった流れを示している。ただ、衣笠では流速計の設置水深が浅いので、測定された流速値は波の影響をうけて実際よりも過大になっているかもしれない。

3) 湾内の恒流および潮流分布

各測点における流速の記録を調和解析して主要5分潮 (K_1 , O_1 , M_2 , S_2 および M_4) と恒流を求めた。そのうち、湾内における恒流の分布を Fig. 35 に示す。これは風が比較的強かったときの Fig. 34 に、そのパターンがよく似ている。この場合、観測期間の平均風速は 4.5 m/sec で、12月2日0時の約1/5であり、風向はほとんど等しかった。一方、この期間の恒流は全体として約 4 cm/sec で、12月2日0時の流れの約1/5である。このことから、季節変化スケールの変動について述べたように、恒流は主として風によって引き起されるものと思われる。

次に、潮流については、すべての測定場所において M_2 分潮が最大となっており、その大きさはたかだ

か 2 cm/sec 程度であった。また、Fig. 36 から明らかなように、湾口では、潮流楕円がかなり扁平で、往復流に近く、湾奥では渦流形状になっている。なお、一般には田辺湾のような複雑な湾形では、地形性の潮汐残差流が存在することが考えられるが、潮流そのものが微弱であるため、それは顕著ではないものと思われる。

4) 田辺湾の副振動

波浪スケールの特性においてすでに述べたように、田辺湾には 42 min 前後の副振動が卓越することは、検潮所の記録からも明瞭であるが、超音波式流速計による流速の記録においても東西方向に卓越するような周期の振動流が観測されている。そして、田辺湾の全域についての観測においても、すべての測点で、東西方向に卓越したこの周期の振動流が見出されている。これは潮流のように常時存在するものではないが、最強時には、10 cm/sec 以上の振幅をもつので、流れの弱い田辺湾内では、流動機構の中の主要な部分を占めている。高潮や津波の襲来時において、このような副振動の果す役割は重要であることはいうまでもないが、平常時においても、物質の分散機構の要因のひとつになっていると思われる。

4.4 長周期波動の特性

前述したように、田辺湾では年間を通して湾内水温が 3～4 日あるいは 7～10 日の間隔で急変する現象のあることが知られている。この現象は、陸棚から外洋にかけての海況の変動が湾内に及ぶことの現れと考えられているが、陸棚域でのこの程度の変動現象の実体、さらには田辺湾のような外洋に面した湾が外洋の変動をどのように受けるのかと云ったことには未知の部分が多い。

一方、田辺湾に近い紀伊水道では、

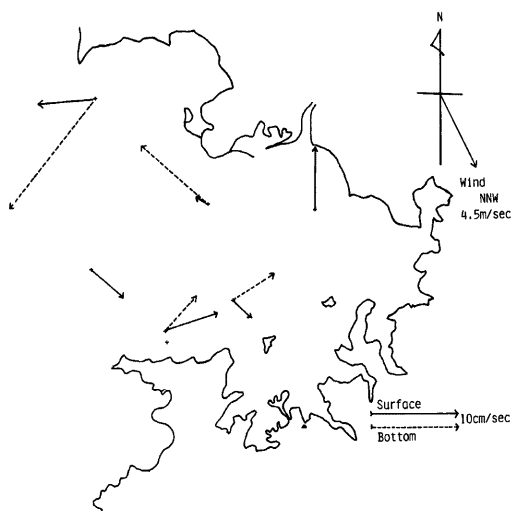


Fig. 35 Residual currents observed from Nov. to Dec., 1981 in Tanabe Bay.

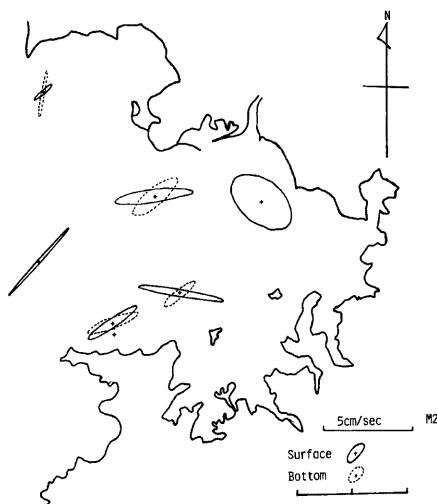


Fig. 36 Tidal ellipses of M_2 -component observed from Nov. to Dec., 1981.

冬季に存在する oceanic front に10数日周期の消長がみられ、それについては田辺湾の水温変動や周辺海域の水位変動との対応が詳しく調べられている²¹⁾。しかし、流速変動についてはほとんど調べられたことはなく、特に長期にわたる測流の例はない。

本観測研究において、長期間の流速データが得られたことは、こうした外洋に面した海域における海況の長周期変動の実体を知る上で貴重である。以下では、得られた年間の測流データを用いて、周期として数日から10数日の流速変動を対象として統計的解析を行った結果について述べる。

(a) 流速, 風速, 水位および水温の年変化

解析に用いたデータの期間は、1981年7月から1982年6月までの1ケ年である。Fig. 37 に得られた流速、水温（測流位置と同位置）、風速（観測塔上）および水位（気象庁白浜検潮所：気圧補正済）の年変化を示す。図中には、短周期の変動を除去するために、各データを25時間の移動平均したものが図示されている。この図からわかるように、恒流（25時間移動平均値）の変動は年間を通じて小さく、10 cm/sec を越えることは稀である。10月の流速に顕著なピークが出現しているが、これは台風（22号および24号）の影響によるものである。また 5 cm/sec 以上の流れが起ったことは、12月から4月にかけて数回みられるが、図中に↓印で示したように、その時は、風の記録にも 5 m/sec 以上の風速のピークが対応しており、風向が北西の冬型季節風が強い日であった。一方、風および流れが強い時には、水温はゆるく下降する傾向があり、以前から注目していた水温の jump とは一致していない。むしろ、水温の jump は図中に○印で示したように水位の記録のピークとよい対応がうかがわれる。前章で湾口部では水温の jump に流速の jump が対応することが報告されているが、その流速の jump は短期間（1時間以内）におわるので、25時間平均された記録にはそれほど顕著には出ていない。

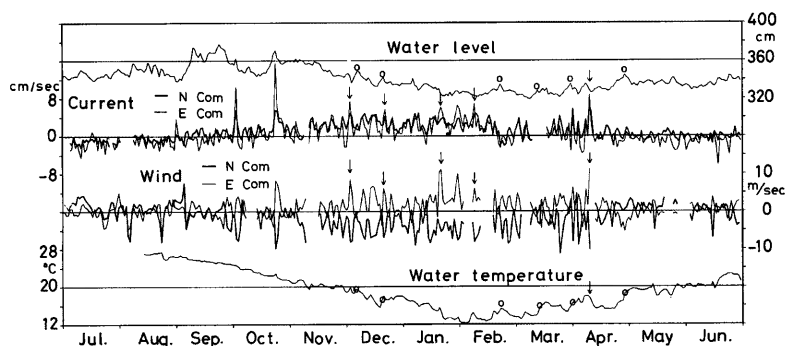


Fig. 37 Records of water level, current, wind and water temperature (25 hour running mean) measured from July, 1981 to June, 1982.

(b) 年間データのスペクトル解析

年間を通しての流速、風速、水位および水温の変動周期とそれらの大きさを検討するために、各変動のパワースペクトルを計算した結果を Fig. 38 に示す。流速および風速については、観測地点の等深線の向きを参考にして、それぞれの汀線成分および沖合成分の二成分に分解して示してある。各スペクトルには、様々な周期にピークが現われているが、そのうち顕著なものは、流速では周期4～6日、10～11日および23日、水位では7日、水温では8日、13日であり、風速では5～7日および20日である。

また、これらのスペクトル全体としては、周期4日前後、7日前後および10数日前後に共通してピークが存在する。一般的には、4日あるいは7日前後という周期は気象現象における総観気圧場の変動周期である。また、10数日という周期は冬期紀伊水道に存在する oceanic front の変動のタイムスケールでもある。した

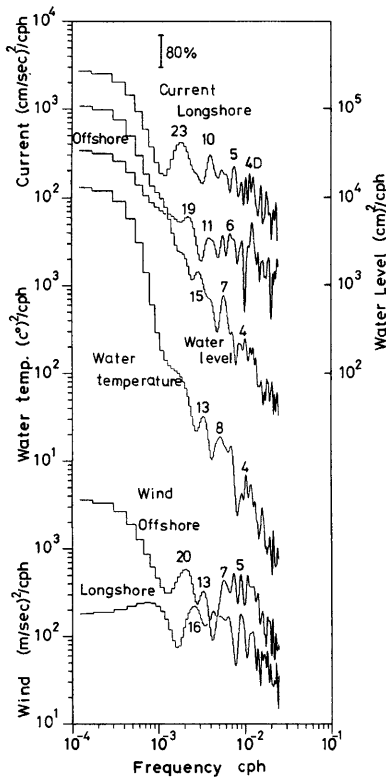


Fig. 38 Power spectra of water level, current, wind and water temperature from July, 1981 to June, 1982. Figures indicate the periods of spectral peaks in days.

水温の急変現象の生起時間間隔として3～4日，7～8日および15～16日という観測結果を得ている。それらの生起時間間隔と，今回の流れと水温との相関解析から求められた特性的な周期とはかなりよく一致する。したがって，従来，水温の jump として捉えられていた現象は，流動の変動とも密接に関連していることがわかる。

Fig. 37 に示される水温の通年変化からわかるように，水温の変動は寒候期に顕著である。また，一般的に，水温の空間分布は，夏期と冬期ではパターンが逆転する。したがって，流速との相関も季節別に調べれば，さらに特徴的なことが明瞭になるものと考えられる。

(d) 流速と風速および水位との相関

恒流の変動は，現象面において，水温変動以外にも，風速や水位の変動と関連している。ここでは，風速および水位の変動が，恒流とどの程度関連しているのかをみるために，Fig. 40 のような線型関係を想定して相関解析を行った²²⁾。

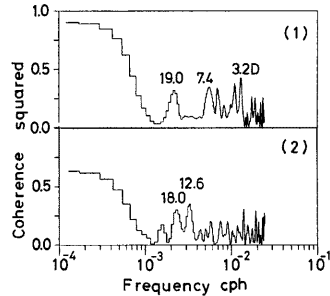


Fig. 39 Coherence between water temperature and current.

(1) Longshore current.

(2) Offshore current.

がって，これらの周期帯での各変動現象の相互の関連が問題となるので，以下では，これら各変動間の相関解析を試みる。

(c) 流速と水温の相関解析

流速と水温，とくに強い流れと水位の jump との関係は，Fig. 37 でみるかぎり，はっきりしなかったもので，その対応をみるために年間データを用いて流速変動と水温の変動のコヒーレンスを求めた結果を Fig. 39 に示す。これによれば，流れの汀線成分と水温の間では，3～4日，7日および19日の周期で相関が比較的高いことがわかる。一方，沖合成分と水温の間では，13日および18日の周期での相関が高い。汀線成分と沖合成分において，水温と相関の高い周期が異なることは，タイムスケール毎に水温の空間分布が異なっていることが現われていると考えられる。

国司⁹⁾ らは，観測塔での水温記録にみられる水

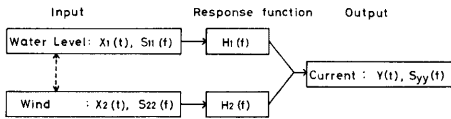


Fig. 40 Two-input linear system for cross-correlation analysis.

風速変動は、通常水位変動を生じさせるから、両者の間には相関があるとして、さらに応答関数が線型であるとするれば、入出力間の相関の強さは、偏コヒーレンスで調べる事ができる。たとえば、水位変動 $x_1(t)$ と、流速変動 $y(t)$ との間の偏コヒーレンス $\gamma_{1y,2}^2(f)$ は、次式で定義される。

$$\gamma_{1y,2}^2(f) = \frac{|S_{1y,2}(f)|^2}{S_{11,2}(f)S_{yy,2}(f)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに $S_{1y,2}$, $S_{11,2}$ および $S_{yy,2}$ は、それぞれ次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} S_{1y,2} &= S_{1y}(1 - S_{12}S_{2y}/S_{22}S_{1y}) \\ S_{11,2} &= S_{11}(1 - \gamma_{12}^2) \\ S_{yy,2} &= S_{yy}(1 - \gamma_{21}^2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 S_{nm} は、オート ($n=m$)、またはクロス ($n \neq m$) スペクトル、 γ_{nm}^2 は通常の定義によるコヒーレンスである。

解析に当っては、風速および流速の卓越成分として、風速では沖合成分、流速では汀線成分を選んだが、その結果を Fig. 41 に示す。まず、水位と流速の関係をみると、周期3.6日および9.8日で両者の相関が高く、特に周期3.6日では、偏コヒーレンスの値は0.5を越える。一方、風速と流速の間では、周期数日から10数日にかけて様々な周期に相関がみられる。

全体的に見た場合、水位よりは、風速の方が流速との相関が高い。しかし、9.8日と3.6日の周期では、流速と水位との対応は、流速と風速とのそれに匹敵するものである。このことは、9.8日および3.6日の周期では、田辺湾を吹く風によって直接的に形成される流れと、田辺湾から離れた場所で発生して田辺湾に及んでくるような流れとの2種の流れが存在していることを意味しているものと考えられる。したがって、このような解析方法によって、田辺湾が外洋から受ける影響の大きさも、ある程度定量化できるとと思われる。今後は、各変動要素の季節変化を考慮して解析を進めるとともに、外洋の海況変動などとの対応を検討して、この周期帯における流速変動の物理的考察を行うべきであろう。

4.5 季節変化スケールの特性

季節変化スケールの特性を調べるために、超音波式流速計の流速データから、1ヶ月の移動平均を求めた。同様に、風、水位、気圧および水温の記録も移動平均して、それぞれの季節変化を比較したものが、Fig. 42 である。この場合、風は海洋観測塔の海面上10mにおける実測値、水位は白浜検潮所の記録を白浜空港の気圧の記録で補正したものであり、さらに水温は超音波式流速計と同じ位置で実測されたものである。

流速の季節変化の特徴は、まず、冬期に大きく、夏期には弱く、しかも、その方向が逆転していることである。冬期には、東北東に5 cm/sec以上の流れが存在するが、夏期には、西南西に2 cm/sec以下の流れしかなく、9月および4月は転流期で、ほとんど停滞している。そして、流向は、ほぼ、現地の等深線の方に一致している。総括的にいえば、観測塔附近の流れは、年平均として東北東に1 cm/secで湾に流入し

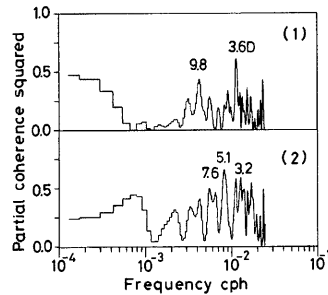


Fig. 41 Partial coherences among longshore current, water level and offshore wind. Figures show the period of high coherency in days. (1) Water level. (2) Offshore wind.

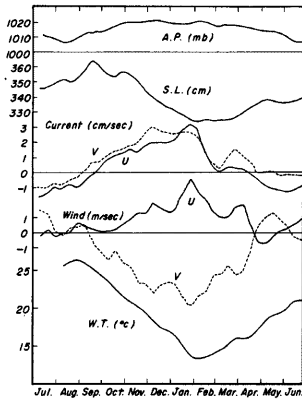


Fig. 42 Annual variations in atmospheric pressure, sea level, current, wind and water temperature in Tanabe Bay.

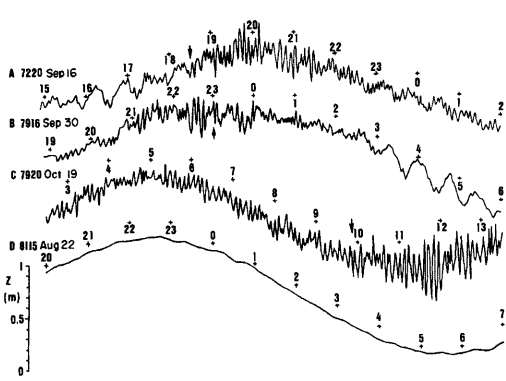


Fig. 43 Mareogram of storm surges and induced oscillations at Shirahama. Typhoon situation
A: Landed at Shionomisaki 18 h25 m
B: Landed again at Osaka 23 h00 m
C: Landed at Shirahama 06 h40 m
D: Along a track to NE off 300 km of Shionomisaki

ており、それに振巾約 4 cm/sec の一年周期の変動が重なっていると見られる。そうしたとき、3月初旬において、流れが一時的に著しく弱くなっていることがみられるが、これはこの観測期間だけの異常現象かもしれない。

一方、流れ以外の要素の年変化については、風を除いて、すべて一年周期の変動だけが卓越し、しかもその位相は、流れの位相とずれている。ところが、風の変動特性においては、冬期には北北西の 5 m/sec 以上の強風、夏期には南南東の 1 m/sec 以下の弱風、4月および9月には風向が逆転し、流れとの対応がよく、ちょうど風向に対して反時計方向に約 90° の方向に流れが引き起されているように思われる。これは Ekman の吹送流理論とは、全く反対の傾向であるが、田辺湾の海岸線の配置やその地形条件に依存するのかもしれない。しかも、3月初旬における流れの落ち込みに対しては、風速にのみそれに対応する落ち込みをみつけることができる。したがって、流れの季節変化に関しては、風の影響が最も大きいと思われる。

4.6 異常現象

田辺湾周辺における潮位の異常現象は、1) 台風や低気圧による高潮、2) 海底地震による津波、および 3) その他の水位変動である。ここでは、観測期間内に記録された台風時および静振卓越時の解析結果に基づいて、それらの特性を述べる。

(a) 既往台風時の水位変動

超音波式流速計による観測を実施するまでの白浜における高潮の記録例をみると、Fig. 43 のように次の4つのパターンが存在するようである。すなわち、a) 1972年9月16日、潮岬に上陸した台風7220号のときには、台風接近時に約 40 min 周期の水位変動が顕著であったが、台風上陸後は、強風によって誘起された小さな入江の静振とみられる周期約 8 min の水位変動が顕著に現われた。b) また、1979年9月30日、室戸岬から北北東に進み、大阪に再び上陸した台風7916号では、台風は白浜の西方を進んでいる間、強風による周期約 8 min の水位変動が誘起された。c) 台風7920号は、1979年10月19日、白浜に上陸したが、このとき

は、台風上陸前後それぞれ3時間以上にわたり周期約8minの水位変動があり、とくに、台風上陸の2時間後その振巾が最大になっていた。しかし、d) 台風が潮岬南方300km沖合を北東進した例のひとつである1981年8月22日の台風8115号では、風も田辺湾周辺では弱く、誘起された水位変動も顕著ではなかった。

これらの実例のうち、台風7916号は大阪湾内に大きな高潮を生ぜしめ、和歌山港外では強風による船舶の沈没があり、また、白浜では高波浪の海岸防波堤越波による被害があった^{23), 24)}。このときの大阪湾内における高潮についての力学的検討は中村²⁵⁾によって行われたが、これに比較して、田辺湾に臨む田辺や白浜の高潮は、その最高潮位からみても、また最大偏差からみても、それほど顕著なものではなかった^{26), 27)}。この理由は、ひとつには、大阪湾内の高潮は海岸地形の影響を強くうけ変形しているのに対して、白浜周辺の高潮は外洋における特性を有しているものと考えられる²⁸⁾。

(b) 台風時の流速と潮位

台風時の沿岸域の流れは、従来、計測された例はほとんどないと思われる。ここでは、田辺湾内で、超音波式流速計で計測された1min毎の流速の東向成分 U_E と北向成分 U_N とを1982年9月24日14時～25日15時の例について、Fig. 44 の上段に示す。このとき、台風は9月24日夜半に紀伊半島東部を北上しており、風は台風接近時には東よりの風であったため、観測点では西向きの流速が存在し、その最大値は約20 cm/sec に達している。台風が上陸した後では、風は南よりとなり、この時期の流速は東向きで、その最大値は30 cm/sec を越えるほどである。ちなみに、流速に対応して、田辺湾内の流速観測点、南部（南部町界）および新庄における潮位記録を Fig. 44 の下段に示すが、この場合には、台風上陸後、南部でその周辺水域（上芳養湾）固有の水位変動とみられる5min前後の周期の変動が顕著である。これは局地的な風の直接的作用によるものと考えられる。

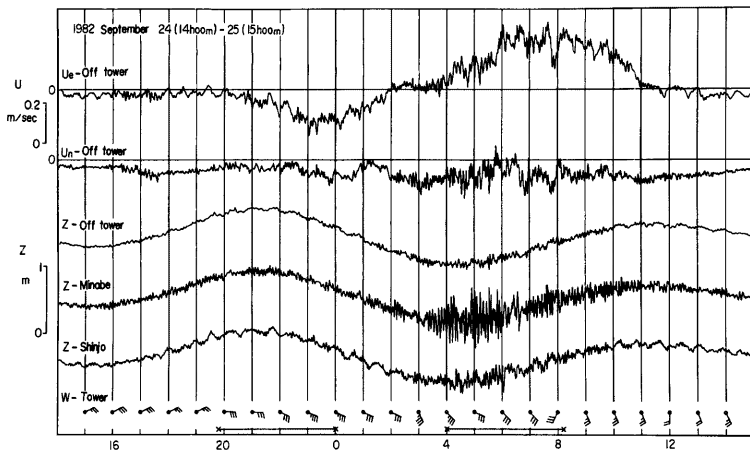


Fig. 44 Storm surge and currents caused by Typhoon 8219.

(c) スペクトル解析

1) 田辺湾内の潮位と流速

1982年9月24日18時～24時（台風上陸前）と9月25日4時～8時（台風上陸後）とについて、超音波式流速計による記録および田辺湾内の新庄・南部の潮位記録を0.25min毎に読み取り1024個のデータを振巾スペクトル解析した。その結果は、それぞれ Figs. 45 および 46 に示すようになっている。この図でも、台風通過後、全般に各周波数で振幅が大きくなっていることがわかる。とくに、この図で興味あることはつぎの

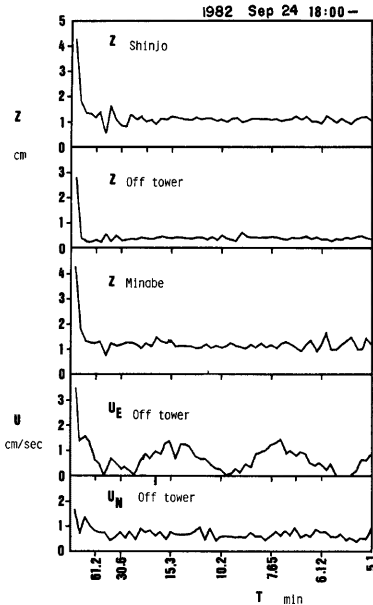


Fig. 45 Amplitude spectra of water level and current at approaching stage of Typhoon 8219 in Tanabe Bay.

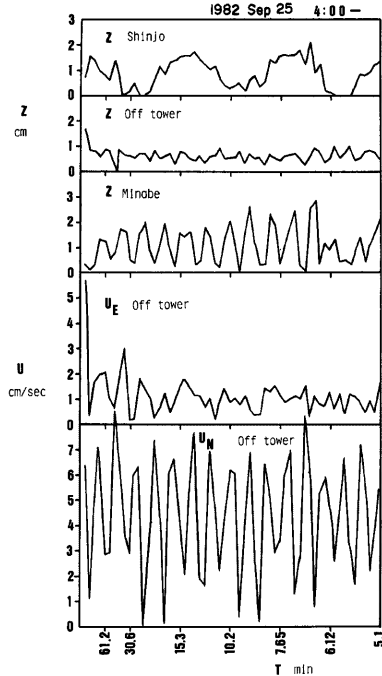


Fig. 46 Amplitude spectra of water level and current after landing of Typhoon 8219 in Tanabe Bay.

点である。すなわち、台風接近時（台風上陸前）における流速の東向成分のスペクトルのパターンと類似なものが、台風通過後（台風上陸後）における新庄の潮位のスペクトルに現われている。この間の時間差は約10時間である。台風によって生じた田辺湾の流れの効果が約10時間後にその湾奥の潮位に現われたとみるべきものか、今後詳細に検討すべきである。

2) 風速のスペクトル

Figs. 45 および 46 に示した時期に対応して、海洋観測塔における風速の記録を解析すると、Fig. 47 のような結果となる。台風接近時には、周期 42 min の成分が 0.4 m/sec 程度の振幅となっているが、台風上陸後にはこの成分のピークはなだらかになり振幅 0.3 m/sec 程度になっている。しかし、これに対応する流速の周期成分では、Fig. 45 にみるようにとくに顕著なピークは現われていない。

3) 気圧のスペクトル

Fig. 48 には、田辺湾内江川で記録された気圧について、Fig. 45 と同様に解析した結果を示す。これをみると、台風接近時には周期 28 min の成分が顕著であるが、台風通過後は、全般的にいろいろの周期成分の振巾が増大することがわかる。

4) 田辺湾周辺の潮位

田辺湾内の潮位と流速とを解析した期間について、田辺湾周辺での潮位の変動のスペクトルを、印南、江川、椿、周参見について調べると、Fig. 49 のようになる。これから、台風接近時には、いずれの観測点で

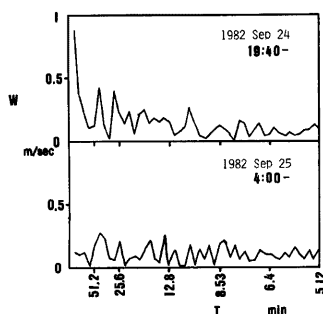


Fig. 47 Amplitude spectra of wind speed at Shirahama caused by Typhoon 8219.

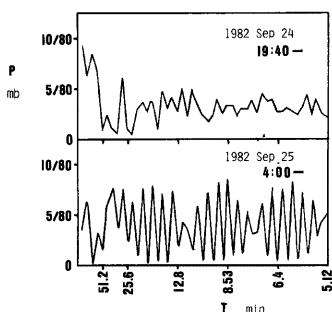


Fig. 48 Amplitude spectra of atmospheric pressure at Egawa observed during Typhoon 8219.

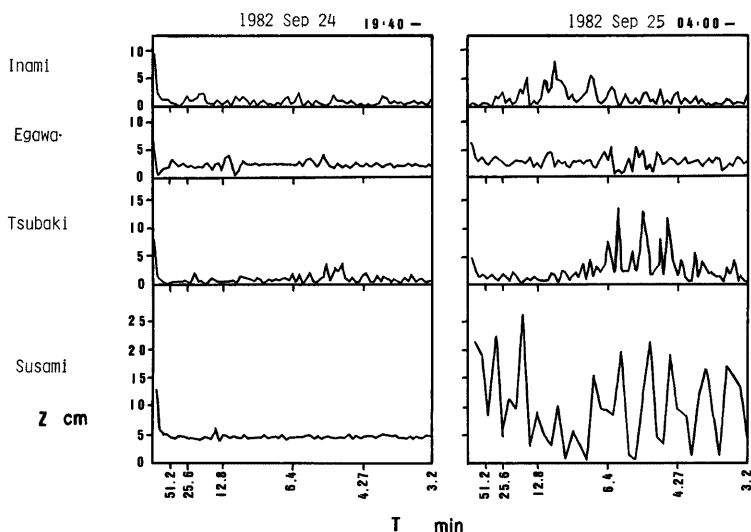


Fig. 49 Amplitude spectra of water level in and around Tanabe Bay.

も全般的に振幅は小さく顕著ではないが、それぞれの観測点周辺の固有の水位変動周期成分にピークが現われている。台風上陸後は、印南では 10 min の周期がとくに顕著であり、また、16 min の周期にもピークが認められる。このとき、江川では周期 6 min あるいは 5 min にピークがあるが、周期 42 min 成分が顕著ということはない。江川の周期 42 min 成分は Fig. 47 にみた観測塔の風速と対応づけて考えるべきかも知れないが、今後、その相互関係を力学的に明らかにする必要がある。椿では、周期 5.5 min, 5 min および 4.4 min の成分が顕著なピークとして現われている。これも椿の観測点周辺の地形によるものと考えられるが、この付近の泊地や入江の固有周期より長い周期（約 2 倍）と推測される。周参見では、周期 16 min の成分がとくに顕著であるが、これも単に周参見漁港の地形条件のみから力学的に説明がつけ難い。周参見の例は、その沖の陸棚振動ではないかと推測される。いままし、この種の水位変動が海岸沿いに伝わる性質の

ものであるならば、一定の波形のパターンが、たとえば南から、周参見、椿、観測塔沖、新庄、江川、南部、印南の順に時間的に記録されるはずであるが、これまでの潮位記録からそのような傾向を知ることはできない。

(d) 田辺湾内の周期約 40 min の水位変動

一般に、沿岸域の周期的変動現象は、外力の変動周期に対応して励起され、外力の作用がなくなった場合には自由振動として沿岸域の海底地形や海岸線の平面形状によって定まる固有周期をもった周期的な変動現象として現われるはずである。ただ、前述したように、田辺湾内の周期約 40 min の水位変動は、台風時に必ずしも顕著であるというわけではない。この水位変動を誘起する要因については、いろいろと考えられているが²⁰⁾、現在のところなお不明確であり、今後の究明にまたなければならない。

超音波式流速計による観測を開始してから現在までに得られた記録のうち、とくに、田辺湾内で周期約 40 min の水位変動が顕著であったのは、1982年12月21日19時～22日10時であった。Fig. 50 には、そのときの観測塔沖で超音波式流速計によって得られた東向流速 U_e および北向流速 U_n のほか、そこでの潮位、南部および新庄の潮位をあわせて示し、変動の特性を検討できるようにした。この図の潮位によれば、約 40 min の周期的な変動は、田辺湾奥の新庄で振幅が大きく、最大およそ 0.7 m である。田辺湾口に近い南部および観測塔沖では、最大振幅はそれぞれおよそ 0.3 m および 0.4 m である。しかも、図に示した期間では、全般的に新庄、南部、観測塔沖での潮位は同じ位相で変化していることがわかる。また、Fig. 50 では、観測塔沖の流速は、この期間中、東向成分に約 40 min 周期の変動が顕著であり、流速変動の振幅はおよそ 0.1 m/sec であり、これは天文潮による潮流の流速をはるかに越えていることがわかる。北向成分の変動はあまり顕著ではなく、潮流の東向および北向成分とともに振幅数 cm/sec のオーダーとみられる。

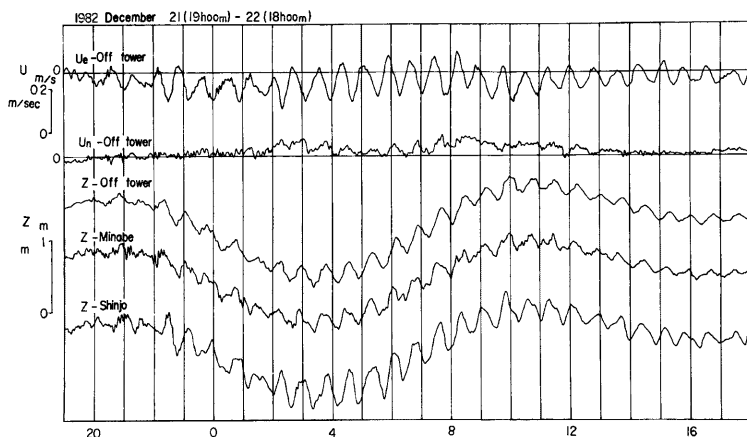


Fig. 50 Examples of the significant oscillations with about 40 min in period observed in Tanabe Bay.

ここで、観測塔沖の流速の東向成分と田辺湾内の潮位との関係を調べると、その変動がとくに顕著な時期には、流速は潮位に対して $1/4$ 周期（1 周期 2π に対して $\pi/2$ ）だけ進んでおり、定常波 (Standing wave) の性質がみとめられるといえよう。Fig. 45 と同じ要領で、流速および潮位の変動成分を明らかにするために、それらのスペクトルを求めると、Fig. 51 のようになる。すなわち、新庄と観測塔沖との潮位では 42 min 周期成分に鋭いピークが存在し、これに対応して、観測塔沖の流速の東向成分にもかなり鋭いピークが

認められるが、南部の潮位にはそのピークは明らかでない。観測塔沖の流速の北向成分にみられる 42 min より長い周期 (約 60 min) のピークに対応する成分は、観測塔沖の東向成分にはほとんど存在せず、また潮位にもその成分は見出せない程度である。この約 60 min の周期成分は南部と新庄の潮位に認められることを考えると、約 40 min および約 60 min との 2 周期成分が田辺湾内で顕著に現われていたことがわかる。これが力学的にどのような空間的スケールの現象であるかを明らかにするには、今後の検討をまたなくてはならない。

静振が発生している時期の観測塔の風の記録をみると、平均して風向は NNE、風速は 3 m/sec 以下の微風が続いており、風が静振の直接の原因とは思われない。しかし、風速や風向の平均風からの偏差の変動を、振巾スペクトルをとって調べてみると、静振の周期に近い周期で微小なピークがみられた。微小な風速や風向の変動が田辺湾内の海水の運動に作用して共振を起すかどうかは興味ある問題である。

5. 結 語

以上、白浜海象観測所における協同研究として、田辺湾における海象、とくに流れの長期連続観測を実施した結果の概要を述べた。最近、諸外国のみならず、わが国においても、各種の流速計が製作され、その進歩はめざましいものがあるが、その中で本観測研究で用いた超音波式流速計は、十分な安定性をもって、長期間の連続観測に使用することができ、田辺湾における流れの特性を究明するためのきわめて良質の観測データを得ることができた。本文は、この観測研究の総括的な報告であるが、得られた主な成果は、次のように要約される。

- 1) 長期間の流れの観測において、超音波式流速計は波浪の影響の強い沿岸海域においても、精度よく測流することができた。年間を通じての本流速計の零点の変動はたかだか 0.4 cm/sec であり、きわめて安定性が高いことが確認された。
- 2) 各種流速計の比較観測によれば、ローター式およびインペラー式流速計は、それらの構造上、波浪の影響を著しく受け、ときには超音波式流速計による流速値の 2 倍以上に及び、その過剰計測値と波浪による水粒子速度の大きさとの関係を定量的に評価することができた。
- 3) 田辺湾における流れのスペクトル構造を調べた結果、田辺湾の流動は各種時間スケールに対応した変動として理解できることがわかった。すなわち、波浪スケール、潮流スケール、長周期波動スケールおよび季節変化スケールなどに分類して考察することができ、それらの特性をある程度説明することができた。とくに、これらのスケールによる流れの変動特性においては、3~20日間の長周期変動、半日周潮、約40分周期の副振動およびうねりなどの卓越現象が存在することがわかった。
- 4) 一方、田辺湾の全域における流れの空間分布を観測した結果から、この湾内には冬期には反時計回りの恒流が存在し、強い季節風の吹き出しによってその循環が強められていることがわかった。また、海洋観測塔で観測される水温の jump の主要因となる外洋水の intrusion を流速計による記録として初めてとらえることができた。このことからすれば、本観測における超音波式流速計の設置位置は、このような現象の究

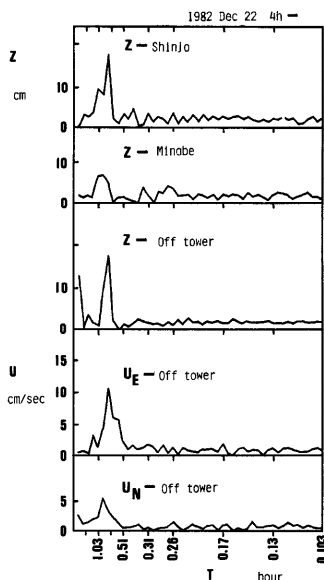


Fig. 51 Amplitude spectra of water level and current accompanied with about 40 min in period observed in Tanabe Bay.

明に最適な場所であったといえる。

今後、本観測研究によって得られた長期間のデータを、各種の時間スケールの立場から、さらに詳細に解析し、また数値シミュレーションなどによる結果とも対比して、田辺湾における流れ構造の根本的な解明のみならず、外洋との対応関係の究明に努めていくつもりである。

最後に、本観測研究を遂行するに当り、白浜町、海上保安庁田辺海上保安部、気象庁海洋気象部、和歌山県田辺土木事務所および田辺漁港事務所をはじめ、印南町漁業協同組合、南部町漁業協同組合、田辺漁業協同組合、湊浦漁業協同組合、新庄漁業協同組合、白浜漁業協同組合、堅田漁業協同組合、田辺マリーナの格別の御協力をいただいた。

これらの御協力がなければ、この度の長期連続観測は実施できなかったであろう。ここに記して厚く感謝するとともに、これらの観測結果がいくらかでも、田辺湾近海の諸問題に役立てば幸いである。

また、(財)日本気象協会東京本部の富永政英博士、京都大学防災研究所附属白浜海象観測所の片山富晴技術補佐員、および海上電機株式会社の諸氏の本観測研究中における熱心な御援助にも厚く感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) Nakamura, S.: A Study on Photoelectric Current Meters, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 15, No. 90, 1965, pp. 63-70.
- 2) 国司秀明・西 勝也・鈴木 徹：田辺湾における海況変動の観測（第2報）、京都大学防災研究所年報、第11号 B, 1968, pp. 327-335.
- 3) 吉岡 洋・中島暢太郎・国司秀明：紀伊水道の OCEANIC FRONT の変動、京都大学 防災研究所年報、第20号 B-2, 1977, pp. 513-527.
- 4) 今里哲久・芹澤重厚・西 勝也・国司秀明：水圧式波浪計の補正係数 n の周波数のスペクトルについて、京都大学防災研究所年報、第15号 B, 1972, pp. 417-423.
- 5) 土屋義人・山口正隆：超音波流速計による波の水粒子速度に関する実験的研究、第18回 海岸工学講演会論文集、1971, pp. 97-104.
- 6) 須田院次・日高孝次・川崎秀男・松平康雄・水内松一・久保時夫・高島 勉：東京海湾海洋観測調査報告、海洋時報、3, 1931, pp. 1-119.
- 7) 木村喜之助：駿河湾東北隅淡島大謀網付近の海況に就いて（続報 III, 流動）、日本水産学会誌、4, 1936, pp. 374-384.
- 8) 木村喜之助：沿岸の大急潮について、中央気象台彙報、19, 1942, pp. 1-85.
- 9) 国司秀明・西 勝也・由佐悠紀：白浜海洋観測塔における水温変動について、京都大学防災研究所年報、第8号、1965, pp. 479-494.
- 10) 吉岡 洋：冬期紀伊水道に発生する oceanic front について(1)、海と空、46(2), 1971, pp. 1-14.
- 11) 永田 豊：湾内水温の急変現象と外洋条件、沿岸海洋研究ノート、19, 1982, pp. 103-111.
- 12) 長島秀樹・岡崎守良：冬季における東京湾の流況と海況、沿岸海洋研究ノート、16, 1979, pp. 76-86.
- 13) 宇野木早苗・岡崎守良・長島秀樹：初冬における東京湾の循環流と海況—1978年11月—12月の係留観測に基づく解析、理化学研究所海洋物理技術報告、3, 1979, 81 pp.
- 14) 宇野木早苗・岡崎守良・長島秀樹：東京湾の循環流と海況、理化学研究所海洋物理技術報告、4, 1980, 262 p.
- 15) 桜井仁人、前田明夫：鹿児島湾口における流速測定、沿岸海洋研究ノート、18, 1980, pp. 45-51.
- 16) Blanton, J.O.: Ocean Currents along a Nearshore Frontal Zone on the Continental Shelf of the South Eastern United States, Jour. Phys. Oceanog., Vol. 11, 1982, 1627-1637.
- 17) Saunders, P.M.: Near-Surface Current Measurements. Deep-Sea Res., Vol. 23, 1976, pp. 249-257.
- 18) 藤縄幸雄：流速計の動特性、環境科学としての海洋学（東大出版）、1977, pp. 215-233.

- 19) Nagashima, H. and M. Okazaki: Dynamic Response of a Savonius-Like Rotor to Unsteady Flows, *La mer*, Tome 20, 1982, pp. 181-189.
- 20) 国司秀明・西 勝也・今里哲久：白浜海洋観測塔における波浪の研究(1)，京都大学防災研究所年報，第9号，1966，pp. 677-684.
- 21) 吉岡 洋：紀伊水道の長周期海況変動，1981年度日本海洋学会 秋季大会 講演要旨集，1981，pp. 15～16.
- 22) ベンダッド，J. S.・A. G. ピアソル：ランダムデータの統計的処理（得丸英勝也訳，培風館），1976，pp. 133-164.
- 23) 土屋義人・中村重久・山下隆男・岡 扶樹：台風7916号による大阪湾・紀伊水道の高潮，京都大学防災研究所年報，24号 B-2, 1981，pp. 475-484.
- 24) 室田 明：台風16号による風水害の総合的調査研究，災害科学総合研究班，No. B-54-1，1980，93 p.
- 25) 中村重久：大阪湾の固有振動と高潮・津波との関係(3)，*La mer*, Tome 20, No. 4, 1982, pp. 223-230.
- 26) 土屋義人他：白良浜の海浜過程に関する調査研究，財団法人防災研究協会，1982，142 p.
- 27) 中村重久・吉岡 洋・芹沢重厚：白浜海洋観測塔周辺の水位変動，*La mer*, Tome 20, No. 4, 1982, pp. 223-230.
- 28) Nakamura, S.: On Factors Magnifying a Storm Surge, Proc. XIX Cong. IAHR, New Delhi, 1981, Subject B (a), Paper No. 5, 1981, pp. 47-54.