

直接測流結果から見た黒潮の構造と変動：総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究：第5報

竹松, 正樹
九州大学応用力学研究所：教授

光易, 恒
九州大学応用力学研究所：教授

本地, 弘之
九州大学応用力学研究所：教授

川健, 和雄
九州大学応用力学研究所：教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743741>

出版情報：応用力学研究所所報. 60, pp.403-413, 1984-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



直接測流結果からみた黒潮の構造と変動

——総合ブイシステムによる海洋計測法の
開発研究 (第 5 報)——

竹 松 正 樹*	光 易 恒*
本 地 弘 之*	川 建 和 雄*
大 楠 丹*	栖 原 寿 郎*
高 橋 清*	水 野 信二郎†
金 子 新†	山 形 俊 男†
小寺山 亘†	高 雄 善 裕†
増 田 章‡	草 場 忠 夫‡
馬 谷 紳一郎‡	長 浜 智 基‡
石 井 秀 夫‡	肥 山 央‡

概 要

標記の所内共同研究の期間中 (1978~'82 年度), 種子島・屋久島南方黒潮強流域において, 係留線を用いた一連の直接測流を試みた. 設置・回収された測器付き係留線 (没水型) は合計 10 本で, 最長係留期間は最終年度に達成された 145 日であった. これ等の係留線は, 強流域にあって表層から底層に至る流速及び水温の鉛直プロファイルを捉えるべく設計されたものである. 本論文では, 特に最終年度の観測結果を中心に, 一連の係留観測の主要な結果のいくつかを報告する.

観測海域黒潮の構造と変動について次の事柄が示された: i) 東向黒潮強流の厚さはたかだか 600m であり, その下層には海底地形に沿う弱い南西流が常に存在する ii) 実測された流軸近くの局所流量値及び黒潮の厚さはいずれも“屋久島南東線”の黒潮流量が従来の地衡流計算により推算された値よりも遥かに小さいことを示唆する iii) 最も活発な変動は約 30 日の周期を持つ変動で, 特に水温時系列に最もキレイな形で認められる iv) フロリダ海流や黒潮続流に見られるような‘負の渦動粘性’の徴候は見られなかった. 運動量及び熱についての渦動粘性係数を試算してみたところ, いずれも正の値で $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であった.

Key words: Kuroshio, Subsurface mooring, Vertical profile, Volume flux, Reynold's stress components, The 30-day wave.

* 九州大学教授, 応用力学研究所

† 九州大学助教授, 応用力学研究所

‡ 九州大学助手, 応用力学研究所

1. ま え が き

われわれは、1978～1982年度に亘って、海洋強流域における係留観測法に関する所内共同研究¹⁾を実施し、その一環として種子島南方黒潮域において（図1）一連の係留観測を試みた。Sub-surface 係留線を用いてこの海域黒潮の上層1000m（所謂 Baroclinic Layer）における水平流速及び水温の鉛直構造とその変動を探ろうというのがこの観測の狙いであった。用いられた係留線（測点）の数も観測期間も決して充分とは云い難いが、この海域黒潮についての最初の直接測流データとして報告に値するものと思う。ここに報告する結果の時間的及び空間的代表性の問題は、今後と同様な測流データが蓄積されて行くに従い自然に明らかにされるであろう。

日本沿岸を流す黒潮強流については、主として船上観測によって集められた膨大な量の Hydrographic なデータの蓄積がある。こうした歴史的データはこれまでに黒潮の様々な記述的側面を明らかにするのに貢献してきた。特に年年変動のような長期的挙動を調べる唯一の手がかりとして貴重である（そこではデータの長さが重要）。しかし、こうした過去の観測の大部分は密度分布と表面流速に限られており、黒潮強流層の内部の速度場を直接測定しようとする試みは極めて少ない。黒潮の力学に関係する基本的諸量が依然として曖昧のまま、あるいは未知のまま残されている現状は、内部速度場に関するデータの極端な欠如によるものであろう。例えば、黒潮の流量（又は平均流速）は太平洋亜熱帯循環を考える上で最も重要な量であるばかりでなく、黒潮の局所的挙動も流量に強く依存することが知られている（厳密にはロスビー数、レイノルズ数といった無次元パラメータを通して）。しかしながら、この量に関する信頼できる実測値はまだない。熱流量についても事情は同じである。レイノルズ応力成分のような変動の統計的性質についてとなるとわれわれの知識は一層乏しい。黒潮強流の理解のために

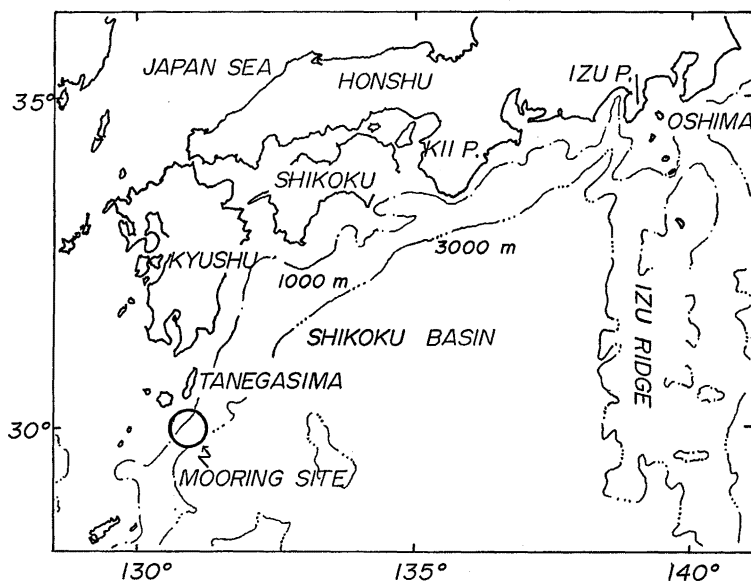


図1 係留観測海域

は、従来のような Hydrographic なデータと同時に、流速場に関するデータの蓄積が強く望まれるのである。

水塊の性質や流量がそうであるように、変動特性も海域によって異なるものと思われる。従って、流速場の測定もできるだけ多くの断面で、少なくとも代表的ないくつかの断面でなされねばならない。われわれの観測海域である種子島南方断面も欠くことのできないそうした代表的断面の一つであろう。ここは本州南岸黒潮の流入部に当り、そこでの挙動は黒潮局所力学問題の‘上流条件’として重要な意味をもつからである（例えば Robinson²⁾）。これに対し‘下流条件’として興味ある海域は伊豆海嶺周辺であるが、ここでは平と寺本³⁾の観測がある。又、その遥か下流、黒潮統流域においては最近 Schmitz 等⁴⁾が大々的な係留線網を展開し速度変動特性を調べた。この他に是非測定しなければならない海域として東支那海黒潮と紀半島沖黒潮が考えられるが、これ等の断面についても近々に同様な測流が実施されるものと思われる。

2. 観測及びデータ

1979 年後半に最初の係留線 (Mooring 1) が設置・回収されて以来、研究期間中に合計 11 本の係留線がこの海域に設置された。これ等係留線の主要を表 1 に掲げる。図 2 は附近の海底地形の概略と係留線設置点を示す。われわれが用いた係留線の代表例として Mooring 2 の一般配置を図 3 に示す。これは、表層流速 2 m/sec の流れの中でも係留線の傾斜角がほぼ 30° 以内になるように設計されたものである（この角度までは流速計のジンバル装置により測器自体は鉛直姿勢を保ち得る）。他の係留線も同様な配置であるが、Mooring 7 及び 8 は例外である：M. 7 は底層係留線であり、M. 8 では最上部に 100m 長のサーミスタチェーンを取り付け、その直下と底層に合計 2 台の流向・流速計を配した。用いられた流向・流速計は AANDERAA RCM-4 であり、すべて水温及び深度（圧力）センサー付きである。なお、サンプリング間隔は係留期間の長短に応じて 10、15 及び 30 分のいずれかに選定した。

周知のように本州南岸黒潮には‘直進路’と‘蛇行路’の 2 種類の異なる径路があり、数年の時間スケ

表 1

MOORING NUMBER	STATION (FIG.2)	WATER DEPTH,M (NOMINAL)	NUMBER OF C.METERS	DATE SET	DATE RECOVERED	SAMPLING INTERVAL,MIN.
1	K 1	1000	4	1979 3 Nov.	3 Dec.	10
2	K 1	1000	5	1980		10
3	K 2	1000	5	4 Oct.	3 Nov.	
4	A 1	500	4			
5	A 2	1000	5	1981		
6	A 3	1500	5	12 Oct.	8 Dec.	15
7	A 4	1000	1			
8	K 1	1000	2			
9	K 3	1500	5	1982	1983	
10	K 4	1500	4	1 Oct.	22 Feb.	30
11	K 5	1000	5	(LOST)		

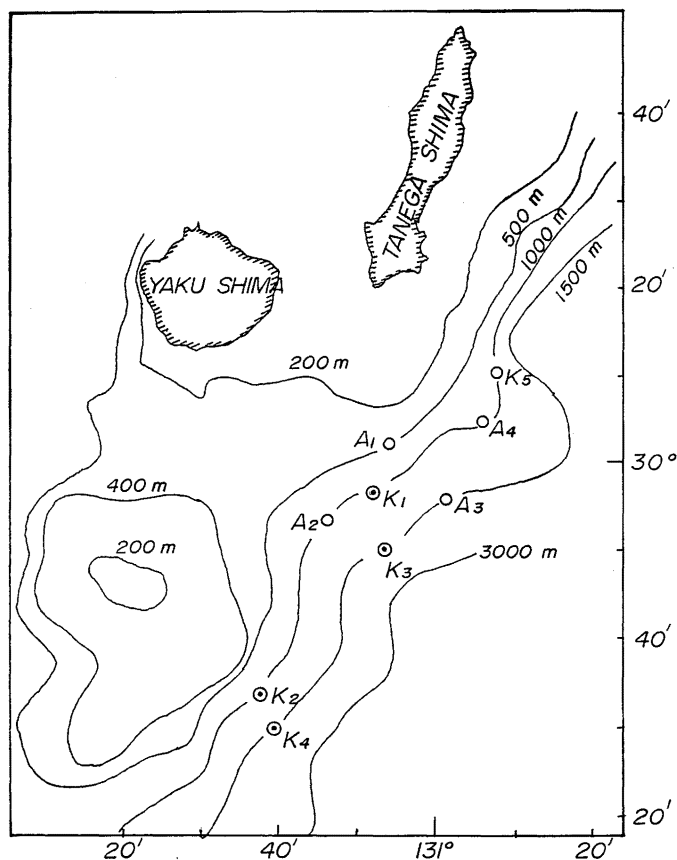


図2 係留線位置と海底地形

ールでもって不規則的に径路が変わる。両径路の水平（南北）方向の隔たりは最大 300 km にも及ぶから、黒潮径路のこの二様性は係留観測にとっては、一般にやっかいな問題である。ところが、この二つの径路の差が比較的小さい場所もある。その一つがわれわれの観測海域である（これが観測海域選定の理由の一つでもある）。実際、直進期であった 1980 年も蛇行期であった 1979 年及び 1982～83 年も予想通り係留線の位置を通して東に流れた。しかしながら、1981 年後半は不幸にも直進→蛇行への遷移期にあたったため、黒潮は設置した係留線（M. 4～7）の沖側を迂回して流れた。この時は、大蛇行の先駆現象である移動性小蛇行にともなうバロトロピックな冷水渦——所謂「種子島冷水渦」——の通過が記録されたが、狙った黒潮強流は捉えることができなかった。この点で M. 4～7 のデータは異質であるから、その報告は別の機会に譲ることにし、以下の報告の対象からは除外する。なお、黒潮の岸側端の性質を調べるべく設置した M. 11 が流失したのは不幸であった。

以下に M. 1～3 及び M. 8～10 で得られたデータに基づき黒潮の平均的構造と特に上層強流の変動特性のいくつかについて述べる。各測器で記録されたすべての変数は、25 時間半幅の Low-pass filter

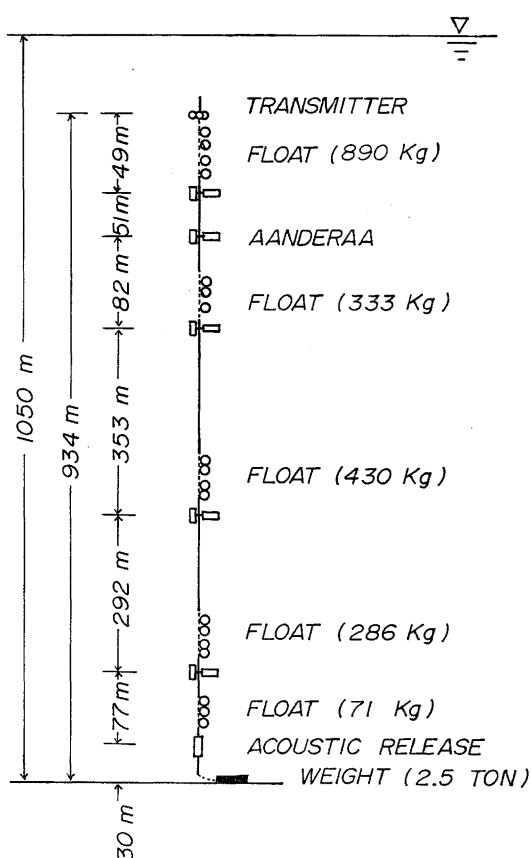


図3 係留線概略図例

を通して1日以下の短周期変動成分を除去した後、24時間毎に抽出された。以下、こうして得られた日平均データを単にデータと云う。

3. 流速鉛直プロファイルと流量

各係留線につき、得られた水平流速の値を対応する測器深度に対してプロットし、それ等の測点を感覚的になめらかに結ぶことによって水平流速の日平均プロファイルを得た：例えば、M. 3 の場合には観測期間が30日であるから30ケのプロファイルを描くことになる。更に、それ等の鉛直プロファイルをそれぞれ図式的に面積々分することにより日平均局所流量を算定した。図4 a), b) はその例であり、それぞれ M. 9 及び M. 2 で得られた局所流量の東流成分を日を追ってプロットしてある。なお、面積積分によって局所流量を求めるには水表面までのプロファイルが必要であるが、この観測では Subsurface 係留であるため

最上層 0m~150m のデータは得られていない。そこで、プロファイルを水表面まで外挿するに当たっては、水温と同様に水平流速も表層混合層を通して鉛直方向に一樣であると仮定した。混合層の厚さは設置・回収時に実施された XBT の結果を使った。それによると、10月の厚さは約130mで、冷却が進むに従って次第に厚くなり、2月には200mに達した。

図4からも想像されるように、水平流速の鉛直プロファイルも日々変化する。そうした変化に富むプロファイルの平均的特徴を見るために、各係留線で得られた水平流速の記録平均値（係留期間の平均）をそれぞれ対応する測器の記録平均深度を用いてプロットしてみた。特に東—西流速成分について得られた記録平均鉛直プロファイルを図5 a), b) に示す。年により、場所（特に流軸との位置関係）により鉛直プロファイルは変わるが、一つの共通する構造が目につく。黒潮の強い東向成分は上層600mに限られ、その下層は常に逆流となっている。観測された南北成分は小さいので、この東流成分の厚さをもってこの海域の黒潮の厚さと考えてよいであろう。この実測された黒潮の厚さは上流側のトカラ海峡の深度（概略500m）を考えると妥当であろう。しかし、この厚さは、そもそも東支那海黒潮に固有のものなのか、それともトカラの浅瀬を通過することによって新たに付与されたものか不明である。東

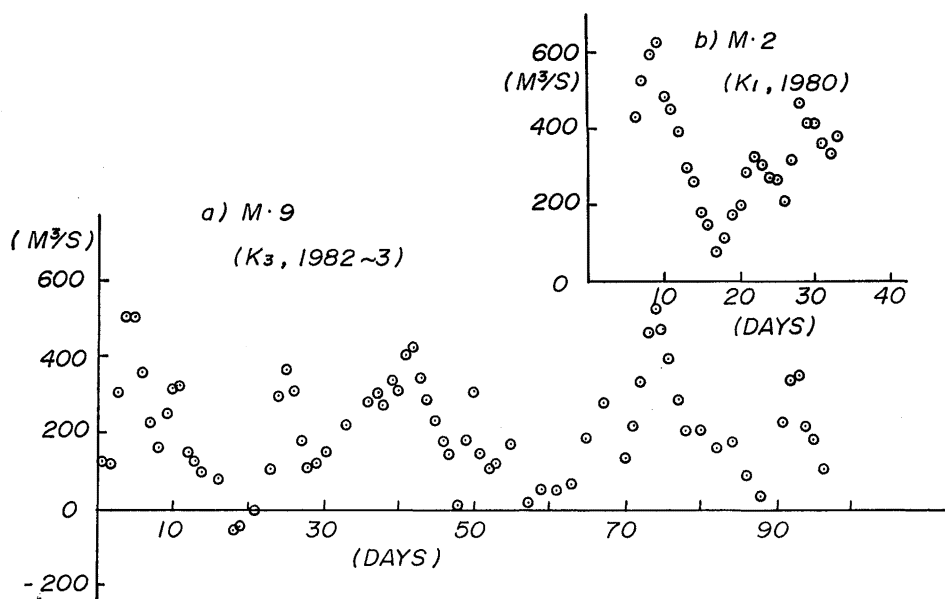


図4 局所流量（単位時間，単位幅 1M当りの流量）の東—西成分の変動例

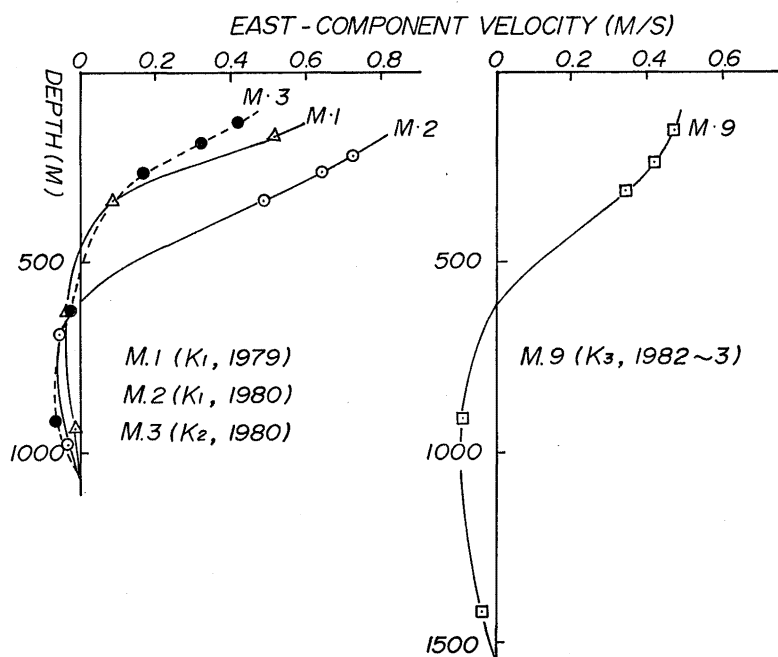


図5 水平流速東—西成分の鉛直プロファイル（記録平均）

向黒潮の下層は逆流となっていると述べたが、もっと正確に云うと、それはほぼ局所海底地形（図2参照）に沿う南西流であり、速いときは 20 m/sec にも達する。

局所流量と無流面深度が実測されたのだから、ここでこれ等の量と黒潮流量との関係に触れてみたいと思う。図5に見られるように、観測期間中で平均的に流速が最も大きかったのは1980年、 K_1 点（即ち M. 2）においてであった。当然のことながら局所流量も最大で、 $330 \text{ m}^3/\text{sec}$ という平均値を示した。一方、この K_1 点の約 40 km 沖側に位置する K_2 点では、局所平均流量は約 $1/3$ 、即ち $120 \text{ m}^3/\text{sec}$ に減じていた*。なお、この期間の K_1 及び K_2 点での 200m 深の平均水温はそれぞれ 17°C 及び 20°C であった。これは K_1 点がほぼ流軸近くに位置していたことを示唆するものであり、従って K_1 点で記録された局所流量値はこの断面の最大値に近いものと思われる。この二つの観測値から全断面を通しての黒潮流量を算定することは無理である。そこで、少々粗い議論ではあるが、二点の平均値 $(330+120)/2=230 \text{ m}^3/\text{sec}$ をもってこの時の断面平均局所流量と考えてみる。これに通常云われている黒潮の幅 100 km を乗じてみると 23 Sv. ($1 \text{ Sv.}=10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$) となる。 K_1 点での強流が全断面にわたって一様に流れていたとしても 33 Sv. にしかならない。この時期は直進期であったことを考えると意外に小さな値である。約 1200m 深を基準面とする地衡流計算⁵⁾ によると屋久島南東線黒潮断面の流量は直進期には 40 Sv. を越えると云われている。

密度データから‘温度風’の関係を使って算定される地衡流量は任意に設定された基準面の流れに相対的な流量であるから、必ずしも真の流量とは一致しない。その値は選ばれた基準面深度に依存する。われわれが得た水平流速の鉛直プロファイルはこの基準面の選定に一つの示唆を与えたことになる：即ち、この海域東向黒潮の流量を算定するためには基準面を 600m（あるいはそれ以下）に選ぶのが妥当であると。地衡流量と無流面深度との関係はかつて二谷⁵⁾ によって検討されたことがあるから、そこに提示された関係曲線によると、屋久島南東海域においては 600m 基準面流量は 1200m 基準面流量の約半分であることを示している。結局、この海域においては、1200m 基準面に対して計算され地衡流量であるならば、その $1/2$ を実際の流量と考えるのが妥当であることになる。参考までに、1956~'59、及び 1960 年代の直進期の屋久島南東線における 1200db を基準面とする地衡流述は有名な二谷の算定⁵⁾ によると約 45 Sv. であった。してみると、この過去の直進期における実際の流量は 23 Sv. 程度であったのであろうか。この値は、1980 年の直進期にわれわれが実測した二つの局所流量値から示唆される粗い推定値 23 Sv.（高々 33 Sv.）と一致する。この文字通りの一致は偶然であり特別の意味はないが、この海域の黒潮流量は直進期においては 20~30 Sv. 程度であると云えるのではなかろうか。

係留線 M. 1 及び M. 9 はいずれも蛇行期に流軸近くに位置していたものである。図5の平均プロファイルを見ればわかるように、これ等の係留線で示される流速、流量（局所）共に直進期の値（M. 2）に比べて著しく小さくなっている。この海域の流量、流速は黒潮径路の二様性と良い相関があり、直進期には大きく、蛇行期には小さい値を示すと一般に云われているが、われわれの観測結果はこの通説に対する一つの肯定的証拠と考えられる。

* ここでは下層の南西流の寄与は考えない。

4. 主要な変動とその特性

図6は主水温躍層内の固定点(230m深)で見た水温変動の時系列の例である。変動幅 4~5°C で30日程度の周期をもつ比較的小さい変動が目につくであろう。南北におよそ40km隔たった K_1 と K_4 点で殆んど同位相で変動しているのに注目されたい。実際、この水温変動は水平方向ばかりでなく鉛直方向にも(但し上層数百mに限られるが)極めて良い同時性を示す。この変動に1週間程度の時間スケールの弱い変動が重畳されているのが特徴である。

図7は黒潮上層の東向流成分の時系列である。同図最下段d)には K_1 と K_4 の間に位置する K_3 点にあったM.9のNo.2流速計で得られた水温変動を比較のために示してある(当然のことながらそれは図6と同じ変動パターンを示す)。水温場においては30日変動とそれ以下の短周期変動の間にはっきりした強弱の差があるが、流速場においては両者は同程度の強さで現われている:水温場に、顕著に見られた30日変動は流速場においては短周期変動にマスクされてははっきり見ることができない。その結果「流速変動の時間スケール」が「水温変動の時間スケール」より小さいように見える。同様な時間スケールの差異は大西洋POLYMODE海域の観測でも報告されている⁹⁾からかなり普遍的な関係と思われる。流速場に対応するのは水温そのものではなく、水温の水平変化率であるから、小さな水温変動でもその空間スケールが小さければ大きな流速変動に対応し得る。それ故、水温場において30日変動に重畳する弱い短周期変動は比較的小さい空間スケールをもっているのではなかろうか。実際、流速の鉛直プロファイルを深さ方向に積分して局所流量の形にすると(図4a))顕著な30日変動をはっきり見ることができる。即ち、短い時間スケールの変動は流量にあまり影響しない。これは、それ等の短周期変動は傾圧性の強い変動であることを意味し、従ってその空間スケールが小さいことを示唆する。

1979年(M.1), 1980年(M.2, M.3)に得られた30日間のデータにもこの顕著な変動の一部分と思われる変動が見られた(図4b)参照)。してみるとこの種の変動はこの海域に常時見られる現象

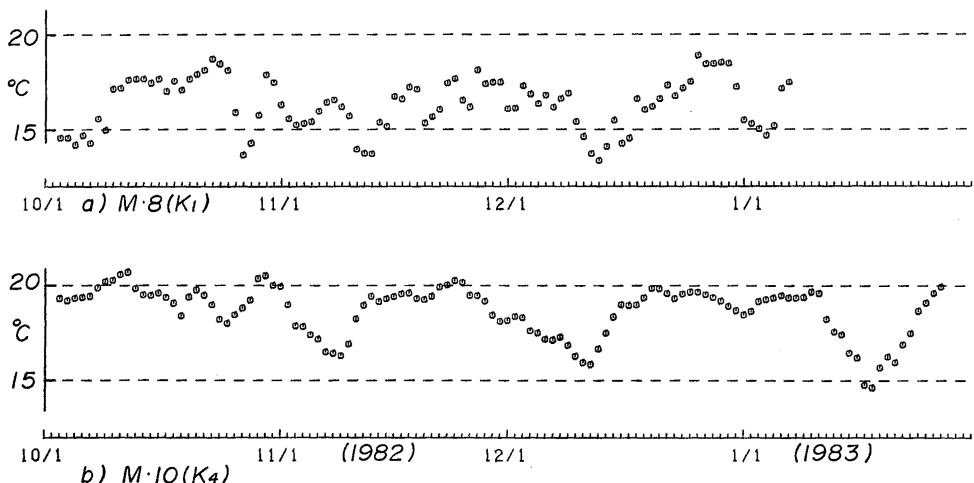


図6 水深230mにおける水温変動

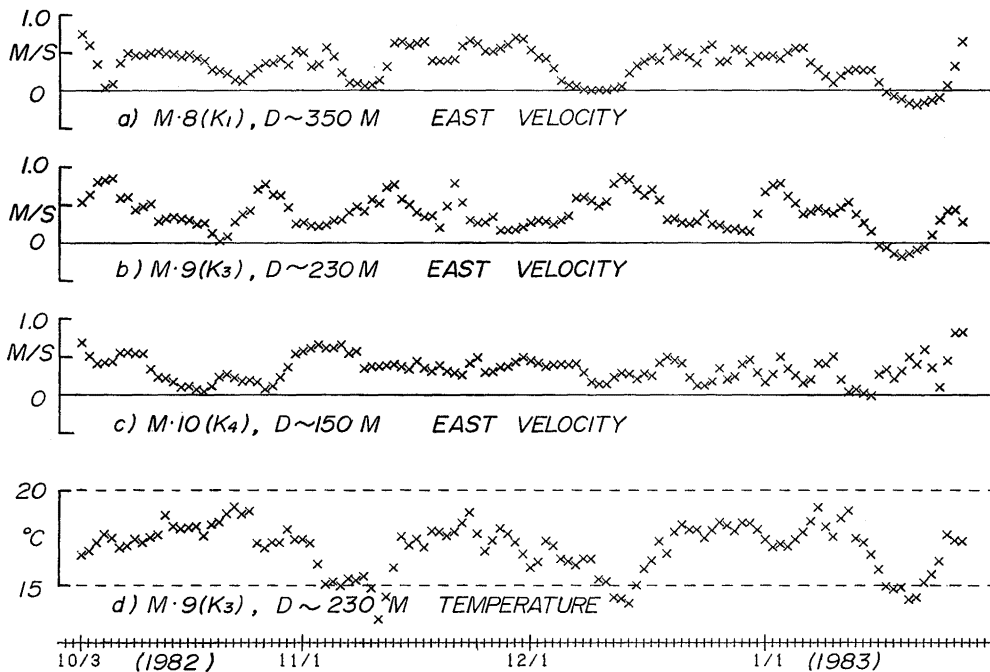


図7 主水温躍層上部における流速東一西成分及び水温の変動

であろうか。かつて寺本²⁾は伊豆一大島間の海底ケーブルの電位差の記録から（それはケーブル上を通過する体積流量に関係する）この海域に30日周期の変動が卓越することを発見した。最近になって平と寺本³⁾は伊豆海嶺周辺の係留観測で得られた9カ月余の流速データの解析によりこのことを確認している。われわれはこの顕著な30日変動の存在を九州南方の水温データから追認したことになる。

図8はM. 8, M. 9及びM. 10のデータから計算されたレイノルズ応力成分の代表的なものをプロ

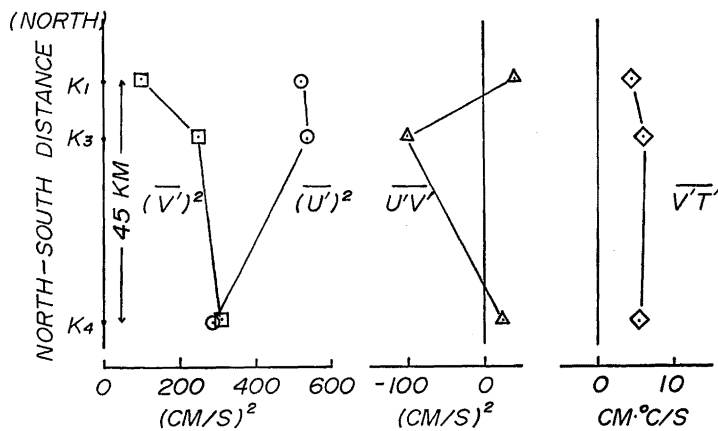


図8 変動に関するレイノルズ応力成分

ットしたものである。ここに、 U, V はそれぞれ流速の東—西成分及び南—北成分を、 T は水温を表わす；バー（—）は記録平均を、プライム（'）は変動分を表わす。図で、 K_1 点の値は M. 8 の No. 1 流速計（ $D=350$ m）のデータを、 K_4 点の値には M. 10 の No. I 流速計（ $D=150$ m のデータを使った。 K_3 に限り、M. 9 の上層 3 台の流速計（ $D=170$ m, 224 m, 312 m）で得られた値の平均をプロットした。この M. 9 の結果を見ると、深度により多少（20 %程）のバラツキがあるが、レイノルズ応力成分に明確な深度依存は認められなかった。従って、図に K_1 , K_3 及び K_4 にプロットされた値は厳密には同一深度で計算されたわけではないが、いずれも主水温躍層上部の代表値と考えてよいであろう。 $U(K_1) > U(K_3)$ であったことと 200 m 平均水温から判断して、この時期には流軸は K_3 の北側、恐らく K_1 の近くに位置していたものと思われる。

沖側の K_4 点では速度変動はほぼ等方的（ $\overline{U'^2} \simeq \overline{V'^2}$ ）であるが、そこから北（陸）側に向って次第に $\overline{U'^2}$ が卓越し非等方的になっているのが認められる。さて、同図で最も注目すべきことは、流軸の少し沖側の K_3 点で $\overline{U'V'}$ がはっきりした負の値を示すことである。これは、東向きの水平運動量が流れの遅い沖側に（down gradient に）運ばれることに対応し、実験室系の乱流ジェットと同様な正の渦動粘性を意味する。フロリダ海流の表層⁸⁾や黒潮統流部⁹⁾では負の渦動粘性が生ずることが報告されているが、われわれの観測範囲に関する限りそのような徴候は認められなかった。なお、 K_1 , K_3 , K_4 点における上層の平均流速から K_3 点における東流成分の水平シャー（ $\partial \overline{U} / \partial y$ ） $_{K_3}$ を見積ると $0.5 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 程度であった。試みにこの値を使って

$$\overline{U'V'} = -\nu_e (\partial \overline{U} / \partial y)$$

に従って渦動粘性係数 ν_e を算定してみると $\nu_e \sim 2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。又、図には変動の熱輸送に関係する $\overline{V'T'}$ もプロットしてあるが、この値はどの点でも同じ程度の正の値を示した。これは、熱を冷たい陸（北）側に運んでいることになり、通常の分子拡散と同じ方向の輸送である（即ち高温から低温へ）。参考までに、水温の水平勾配から熱に関する水平渦動拡散係数を見積ってみると $\kappa_e \sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度となる。ここで試算された ν_e, κ_e の値は、大西洋 Gulf Stream 系の実測から見積もられた渦輸送係数 $\sim 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ に比べるとかなり小さいことを附記しておく。

謝 辞

係留線の設置・回収作業の大部分は東海大学所属「東海大学丸Ⅱ世」によって実施された。政次五男船長をはじめとする乗組員の方々のご協力に深く感謝します。

北 統夫、篠崎高茂、田代昭正、丸林賢次、石橋道芳、白石洋二、安永 誠、稲田 勝（以上応用力学研究所 技官）及び、安部哲二（応用力学研究所事務官）：以上は卓抜な技術と献身的な努力によって本研究観測を支えてくれた職員の名前です。これ等の方々に心から御礼申し上げます。

なお、本研究は文部省特別事業費の援助によって実施されたものです。

参 考 文 献

- 1) 田才福造他 11 名（応用力学研究所海洋研究グループ）：総合ブイシステムによる海洋計測法の開

- 発研究 (第 1 報). 九州大学応用力学研究所所報, 第 25 号, 1980, p. 29-98.
- 2) Robinson, A. R. and Taft, B. A.: A Numerical Experiment for the Path of the Kuroshio, *J. Marine Research*, **30** (1), 1972, p. 65-101.
 - 3) Taira, K. and Teramoto, T.: Velocity Fluctuation of the Kuroshio near the Izu Ridge and their Relationship to Current Path, *Deep-Sea Research*, **28 A**, 10, 1981, p. 1187-1197.
 - 4) Schmitz, W. J., Niller, P. P., Bernstein, R. L. and Holland, W. R.: Recent Long-Term Moored Instrument Observations in the Western North Pacific, *J. Geophys. Research*, **87**, C12, 1982, p. 9425-9440.
 - 5) Nitani, H.: Beginning of the Kuroshio, In: *Kuroshio*, Stommel, H. and Yoshida, K. (editors), Univ. of Washington Press, 1972, p. 129-156.
 - 6) Fu, L. L., Keffer, T., Niller, P. P. and Wunsch, C.: Observations of Mesoscale Variability in the Western North Atlantic: A Comparative Study, *J. Marine Research*, **40** (3), 1982, p. 809-848.
 - 7) Teramoto, T.: Day-to-Day to Monthly Variations in Oceanic Flows Estimated from Cross-Stream Differences in Electric Potential, Doctoral Dissertation, Univ. of Tokyo, 1965.
 - 8) Brooks, I. H. and Niller, P. P.: Energetics of the Florida Current, *J. Marine Research*, **35** (1), 1977, p. 163-191.
 - 9) McWilliams, J. C.: On the Mean Dynamical Balances of the Gulf-Stream Recirculation Zone, *J. Marine Research*, **41** (3), 1983, p. 427-460.

(昭和 59 年 5 月 29 日 受理)