

鳴門海峡における若干の水理特性

中村 充*・乃万俊文**・大竹臣哉***

1. はじめに

噴流に関する研究は従来から多くの研究があるが、その多くはスケールの小さな平面流に関するものであり、海峡流のような大スケールのものは少ない。筆者らは本州四国架橋事業に関連して鳴門海峡の調査を行なう機会を得た。その結果興味深い現象を観測したので若干の解析を行なってここに報告する。

2. 調査方法

図—1 に鳴門海峡の平面図と観測点を示す。① 潮位観測は 図—1 の A (播磨灘側) および B, C (紀伊水道側) 点において S. 54.7.27~7.30 の 3 日間および S. 55.11.1~11.16 の 15 日間連続同時記録をとった。C 点福良は常設検潮所であり、A 点亀浦は水圧式検潮器を用いた。B 点は S. 55 年には観測しなかった。② 流跡線観測は S. 54.7.29 に 7 時 50 分から約 4 hr 北流時に 16 個の海流板を用いて流跡線観測を行なった。この調査は淡路側に形成される反流域に主眼を置いて行なった。③ 潮流観測は北流々軸末端付近の St. 1 (Lat. 34°17'32", Long. 134°36'55") St. 2 (Lat. 34°17'6", Long. 134°36'50") においてアンデラー流速計 (ベルゲンモデ

ル 4) を用い、海面下 5, 15, 25, 35 m の点で流速、流向、水温、塩分の記録を 1 分間隔で 50 時間の連続観測を行なった。St. 1, St. 2 は北流時の海峡噴流で生じた鉛直混合が収まって成層流に移行すると思われる付近として定めた。③ 海峡流速は海峡中央 100 m 区間を流れに沿って船が往復する時間より求めた。

3. 調査結果と考察

(1) 内外水位差の特性と海水交流・交換

海峡南側 C 点の潮位は紀伊水道の潮波が直ちに伝播するのに対し北側 A 点では潮波が友ヶ島水道、大阪湾、明石海峡、播磨灘と伝達する間に遅れを生じ C 点福良の潮位に対し A 点 (亀浦) の潮位は約 6 時間、位相角が半日潮に対し π だけ遅れている。これが鳴門の強い海峡流を生じている原因である。

a) 昭和 54 年度観測結果の解析

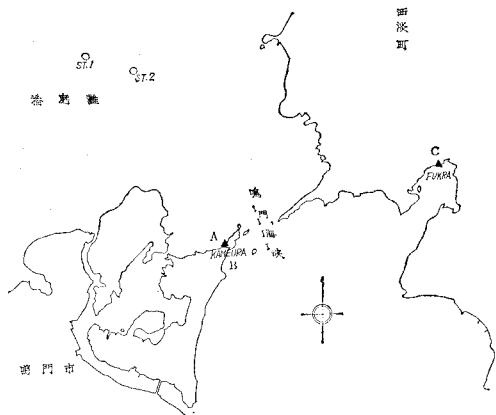
図—2 に S. 54 年度調査の潮位曲線を示す。位相差と潮候の日潮不等の関係で転流時および転流時潮位が変動し 図—2 の記録では転流時間間隔は南流が北流より 1 時間長く海峡南北の一転流期間における最大水位差 $\Delta h_{\max}$ は、北流時 0.68~1.22 m, 南流時 0.88~1.01 m で北流時の変動幅が大きい。平均すると北流時 0.94 m, 南流時 0.96 m である。海峡内外の水位差 Δh を最大水位差 $\Delta h_{\max}$ で、潮時を転流時間間隔 t_r で無次元化して示すと 図—3 のようになり変化の型は一樣と見ることができる。

海峡内外水位差を用いて海水交流量を求める。海峡流の運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g \Delta h) + \nu \nabla^2 u \quad \text{etc.} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

である。ここに x, y, z : 流軸方向, 流軸に水平に直角方向, 鉛直方向, u, v, w : xyz 方向流速, f : コリオリパラメータ, ρ : 海水密度, Δh : 海峡内外水位差, ν : 動粘性係数

(1) 式における各項の大きさを鳴門海峡の条件下でオーダーエスティメイトする。M. K. S. 単位系を用いて、



図—1 調査位置図

* 正会員 農博 水産工学研究所水産土木工学部長

** 正会員 農博 水産工学研究所漁場水理研究室

*** 五洋建設(株)

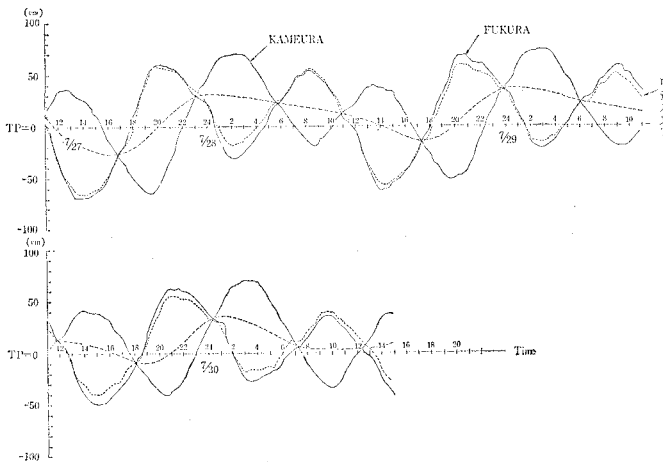
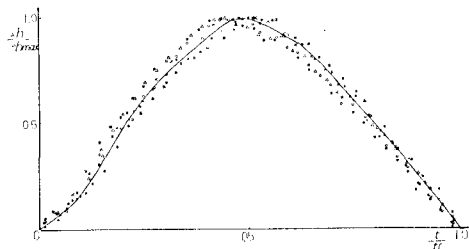


図-2 潮位曲線 (S. 54)

(a) 北流



(b) 南流

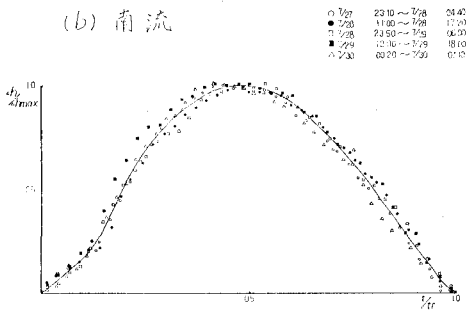


図-3 無次元潮位差

$$u \approx 0 \text{ (10}^\circ), \quad v, w < u, \quad t \text{ (半日潮)} \approx 0 \text{ (10}^\circ)$$
$$x, y \approx 0 \text{ (10}^\circ), \quad \Delta h \approx (10^\circ), \quad \nu \approx 0 \text{ (10}^{-2})$$
$$f \approx 0 \text{ (10}^{-5}), \quad g = 9.8, \quad \rho = 10^3$$

であるから、左辺は移流項、右辺は重力項以外は2桁～5桁桁落ちして省略できる。(1)式をこの条件でエネルギー積分すればオリフィスの水理と同様、

$$u = \sqrt{2g\Delta h} \dots\dots\dots (2)$$

で計算できる。

海峡流心の流速は本四公団の船で海峡々窄部を流軸に沿って一定推力で100m区間を往復し上り、下りの所

表-1 海水流速測定結果

測定年月日: 昭和54年7月28日

間 時	潮流実測値 (m/s)	Δh (m)	計算流速 (m/s)
6:52	2.00	0.34	2.581
7:22	2.62	0.52	3.192
7:52	3.31	0.61	3.458
8:22	3.60	0.70	3.704
8:31	3.92	0.74	3.808
8:52	3.76	0.70	3.704
9:22	2.95	0.56	3.313
9:52	2.94	0.41	2.835
10:22	2.08	0.25	2.214

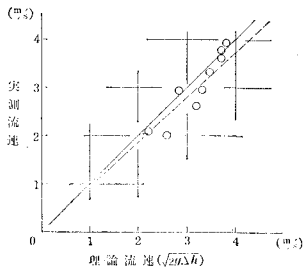


図-4 理論流速と実測流速

要時間を計測して求めた。この結果を表-1に示す。

潮流観測時の水位差 Δh を図-2より求め(2)式による計算値と対比したのが図-4である。最強流時に実測値が理論値をわずかに越えているが、これは接近速度水頭等の影響によると考えられる。表-1の実測値は海峡部で海峡流の最縮流部でないで、(2)式と実測値の比は流量係数 C を与えることになる。実測値よりこれを定めると海峡流量 q は、

$$q = CA\sqrt{2g\Delta h}$$
$$C = 0.93 \dots\dots\dots (3)$$

である。ここに A は海峡部通水断面積。

転流間隔 t_r 期間の南流または北流量 Q_S, Q_N は次のように求まる。

$$Q = \int_0^{t_r} C_a A u dt = C_a A u_{max} t_r \int_0^{t_r} \frac{u}{u_{max}} \frac{dt}{t_r}$$
$$= C_a A u_{max} t_r \int_0^1 \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta h_{max}}} dt_R \dots\dots\dots (4)$$

ここに C_a は縮流係数、 $t_R = t/t_r$ 、 A は海峡部通水断面積 (34 200 m²)、(4)式の積分項は図-3における曲線に囲まれた面積 S であり、南流および北流について、それぞれ

$$S_S = 0.711, \quad S_N = 0.709$$

u_{max} は(4)式から

$$u_{max} = C_v \sqrt{2g\Delta h_{max}}$$

として計算できる。流量係数 $C=C_aC_v=0.93$ 程度であるから (4) 式は、

$$\left. \begin{aligned} Q &= C A t_r S \sqrt{2g \Delta h_{\max}} \\ C &= 0.93 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

t_r , $\Delta h_{\max}$ に観測データの平均値を用いれば

	南 流	北 流
t_r	392 分	348 分
$\Delta h_{\max}$	0.96 m	0.94 m

であるから 1 回の南流, 北流時の移流量は、

$$\left. \begin{aligned} Q_S &= 2.11 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ Q_N &= 1.85 \times 10^9 \text{ m}^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

よって移流交換量 Q_{EX} は

$$\begin{aligned} Q_{EX} &= Q_S - Q_N = 0.26 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{1 干満} \\ &= 0.52 \times 10^9 \text{ m}^3 / \text{day} \end{aligned}$$

である。この値は極めて大きな値であり、1 日当り約 5 億トンの海水が鳴門海峡を通して播磨灘から紀伊水道へ流出することになる。この値は明石海峡からの交換量にも劣らない。明石海峡に対し 14% の通水断面に過ぎない鳴門海峡が瀬戸内海の水交換に大きく寄与していることになる。

b) 昭和 55 年度観測結果の解析

昭和 54 年度調査から南流が卓越し大きな移流交換が見られたが、これが単なる観測期間中の現象であったのかどうか年間を通しての考察をするために 55 年度の調査を行なった。15 日間の潮候曲線から調和分解を行なった結果を表-2 に示す。

これより四季の塑望, 両弦における福良, 亀浦の潮候曲線を描けば 図-5 となる。図-5 から四季および塑望, 両弦の無次元潮位差図を描けば 図-6 のようになり水位差の変化の形は 図-3 同様一様と見ることができ

表-2 15 昼夜潮汐調和常数表

地名 分 潮 名		亀 浦		福 良	
		振 幅 (cm)	遅 角 (°)	振 幅 (cm)	遅 角 (°)
日月合成日周潮	K_1	25.1	225.1	20.5	187.1
主 太 陰 日 周 潮	O_1	18.5	195.1	15.5	171.1
主 太 陽 日 周 潮	P_1	8.4	225.1	6.8	187.1
主 太 陰 稽 率 日 周 潮	Q_1	3.6	180.2	3.0	163.2
主 太 陰 半 日 周 潮	M_2	33.6	337.0	41.3	186.1
主 太 陽 半 日 周 潮	S_2	12.4	2.4	21.9	210.4
日月合成半日周潮	K_2	3.4	2.4	6.0	210.4
主 太 陰 稽 率 半 日 周 潮	N_2	6.5	156.3	8.0	173.0
倍 潮	M_4	0.9	274.9	0.1	164.2
複 合 潮	MS_4	0.9	222.7	0.3	245.9
平 均 水 面	A_0	-12.4		-13.1	

る。このことから移流量は (5) 式で計算することができる。この値を表-3 に示す。表-3 の $\Delta h_{\max}$, t_r は日潮不等における平均値を用いた。表から全年に亘って常に南流が卓越することが判る。54 年度観測と殆んど同時期の夏季塑望の移流交換量は若干小さくなっている。1

表-3 四季の移流量 Q および移流交換量 Q_{EX}

(Q_{EX} は南流を正とする)

流 況 季 別		南 流			北 流			移 流 交 換 量 Q_{EX} (10^9 m^3)
		ΔH_{max} (m)	t_r (hr)	Q (10^9 m^3)	ΔH_{max} (m)	t_r (hr)	Q (10^9 m^3)	
春 (秋)	朔望	1.14	6.16	2.99	1.13	6.13	2.96	0.036
	両弦	0.42	6.55	1.93	0.38	6.24	1.75	0.186
夏 (冬)	朔望	0.98	6.23	2.81	0.95	6.04	2.67	0.135
	両弦	0.54	6.28	2.10	0.50	6.21	1.99	0.107

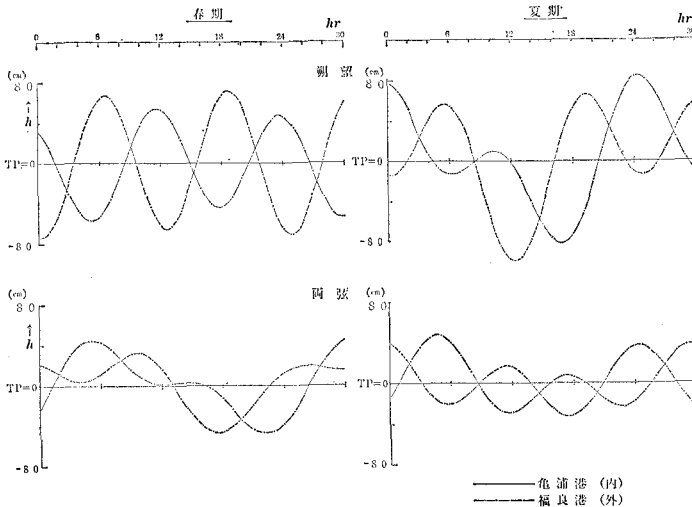


図-5 潮 候 曲 線

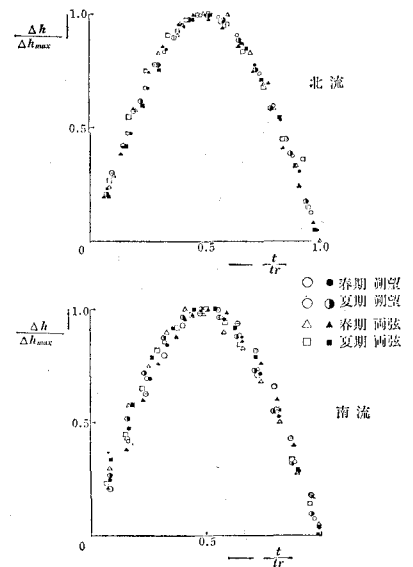


図-6 無次元潮位差図

年間の移流交換量を求めると表-3の平均値を用いて,

$$Q_{EX} = 0.116 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日} \text{ 干満} = 0.232 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{日} \\ = 8.47 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年} \dots\dots\dots(8)$$

である.

速水・宇野木²⁾が塩分拡散から求めた明石海峡を通しての交換量 $7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$, 中村・萩野³⁾による瀬戸内海潮位シミュレーションによる移流交換量 $7.95 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$ に匹敵する海水交換が鳴門海峡で単に移流交換のみによって行なわれていることになる. このことは淡路島を反時計廻りに恒流が存在することを示唆しているように考えられる. 更に大西外明⁴⁾らによる coherent 渦理論による交換を考慮すれば更に大きな海水交換が期待されることになる. また明石海峡の 14% に過ぎない鳴門海峡が直接には播磨灘の浄化, ひいては瀬戸内海の浄化に大きな役割を果たしていることがいえる.

(2) 流 況

図-7 に海流板追跡の一例を示す. 潮時は図-2 中の 29 日に対応する. 図-7 中 IV の流跡は流軸を横断している. これは強い湧昇流域の縁辺沿いに淀みながら流れたもので平均流による流跡を意味しない. 海峡流における著しい特徴は盛大な湧昇流の発生である. 図-8 に海峡の深浅地形および海面流況を示す. 図中の湧昇域は発生初期の優勢なもので消滅間近いものを含めると流軸近傍は殆んど湧昇域で隣接湧昇域との境界で降下流が生じている. 湧昇流の規模は目視であるが直径 20~200 m, 継続時間は 3~15 分程度であり, 湧昇流速は波長 2~3 m の表面波が碎波していることから 1.5~2.0 m/s 程度と考えられ主流流速と同じ程度であると考えられる. このような湧昇流の形成について, 渦糸に沿って上昇してくるとの説明もある⁵⁾が, 噴流の場合渦糸は海底

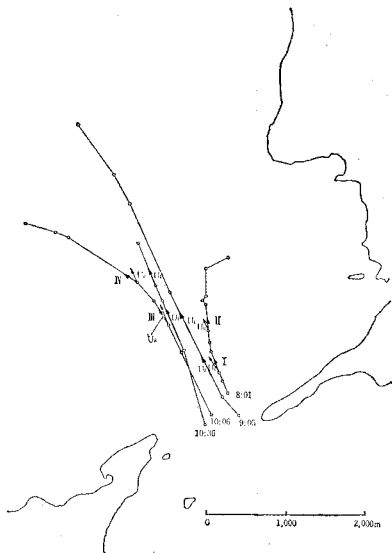


図-7 海流板追跡結果

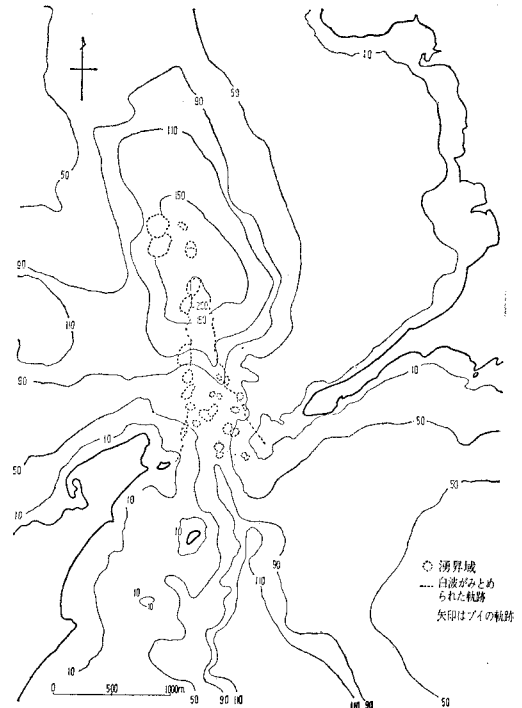


図-8 深浅地形および海面流況

に接続せず噴流の周辺を取りまく形も考えられる. 筆者は噴流とその周辺水域との間に生じる速度場の変動が圧力場に変動を与え, 平均流と直角方向の流れを生じると考えて考察して見る⁵⁾.

海峡上流側の流れはポテンシャル流に近いと考えられるので海峡近辺を超えて著しい擾乱を受けるまでは (2) 式すなわちベルヌイの定理が成立って,

$$\frac{u^2}{2g} + H = E \dots\dots\dots(9)$$

ここに, H は動水圧水頭 ($=p/\rho g + z$), E はエネルギー水頭である. いま噴流の yz 平面内に u の大きな変化のある場合,

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{u^2}{2g} \right) = - \frac{\partial H}{\partial S}$$

この動水圧勾配で S 方向の流れ v'_s が生じ, u_a, u_b なる流速をもつ流点 a, b 間において,

$$\delta H = \int_a^b \frac{\partial H}{\partial S} dS = - \int_a^b \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{u^2}{2g} \right) dS \left. \begin{aligned} &= \frac{1}{2g} (u_a^2 - u_b^2), \quad u_a > u_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

いま δH なる水頭差が ab 間で T 時間継続して v'_s なる流速を生じたとすると ab 間の距離 l の間に運動量則を適用して

$$T(\rho g \delta H - \rho v_s'^2) = \rho l v_s' \\ v_s' = \sqrt{\left(\frac{l}{2T} \right)^2 + \frac{u_a^2 - u_b^2}{2}} - \frac{l}{2T} \dots\dots\dots(11)$$

(11) 式に示す変動流速が発生することになる。鉛直方向の変動流速 w' で考えれば前述のように湧昇流継続時間 $T=3\sim 15$ 分、鉛直方向の長さは海峡部水深 $l=70$ m 程度であるから、

$$w' = \sqrt{\frac{u_a^2 - u_b^2}{2}} \dots\dots\dots (12)$$

なる湧昇流が発生する。この値は主流流速 u_a に比較し得る値であり大きな湧昇流の発生が起ることが説明される。海峡通過時の地形特性から噴流内に流速分布が生じれば (11) 又は (12) 式の湧昇流の発生が考えられ、ちなみに $u_a=3$ m/s の場合に $u_b=0$ として見ると 2 m/s 程度の湧昇流が生じることになり観測に近い値が発生する。このような混合が起れば漸次周辺海域へ運動量が分散していく。

(3) 噴流による海水混合

St. 1, St. 2 における流速、流向、水温、塩分の記録の一例を図-9 に示す。水温、塩分は 12 時間毎に不連続的に変化し播磨灘、紀伊水道が水塊として交互に表われているが 12 時間周期の中で時折連続して水塊の交代が行なわれ噴流流速の強弱による流心の変動を受けてい

る。また 図-10 は流速のパワースペクトルの一例であり、低周波領域に浮力領域が現われている。このことは海峡流によって受けた海水混合による新密度水塊が噴流から受けたエネルギー供給を成層下のポテンシャルとして一部移行していることを示す。このような観点から混合水が何程の深さに成層流として侵入するかを求める、St. 1 では 15 m~25 m 層に、St. 2 では 5~15 m と 35 m 層に成層流を形成していることが判る。この成層移行流は位置のエネルギーをもっているので残留慣性によるのみでなく播磨灘奥に向って流動することが可能な流れであり水交換を増大させる。なお図中のピークスペクトルと記入した周期は播磨灘における鳴門一家島を節線とする単節静振と播磨灘を円形と見なしたときの単節同心円静振の合成静振周期 35 分と一致している (表層 -5 m 記録)。

4. あとがき

以上鳴門海峡における北流を中心とした調査から若干の結果とその考察を述べた。要約すると、

① 鳴門海峡における流量は南流が卓越し 8.5

$\times 10^{10}$ m³/年の移流交換量があり、これだけ播磨灘の水が鳴門を通して紀伊水道に流出する。この値は明石における交換量 (速水・宇野木、中村・萩野) に相当する。

② 噴流域に生じる優勢な湧昇流について噴流周縁との速度場の変化による圧力場の変換によって生じるとしてオーダーを調べた。

③ 海水混合によって生じる新水塊の形成とその成層流への移行水深を求めた。

等であり、詳細には更に観測値を解析することによって平面的反流域の形成や、地形的な速度場の変化の原因、成層移行流による海水交換等々に関する知見を求めることも可能であろう。最後に観測の機会を与えて頂き、御協力願った本州四国架橋公団、観測に協力願ったアジア航測 KK の方々に御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) アジア航測 KK: 鳴門海峡潮流潮汐調査報告書, 1980. 12.
- 2) 速水頌一郎・宇野木早苗: 瀬戸内海における海水交流と物質の拡散, 第 17 回海講論集, 1970. 11.
- 3) 中村 充・萩野静也・海藤 斉: 水質改善のための潮流制御工に関する研究 (2), 第 22 回海講論集, 1975. 11.
- 4) 大西外明・田中総太郎・西村 司: 海水水域のスケール渦生成・挙動に及ぼす海底地形の影響について, 第 27 回海講論集, 1980. 11, その他.
- 5) 中村 充・上北征男・木村晴保・藤井泰司・大竹臣哉: 礁による流動環境に関する研究, 第 27 回海講論集, 1980. 11.

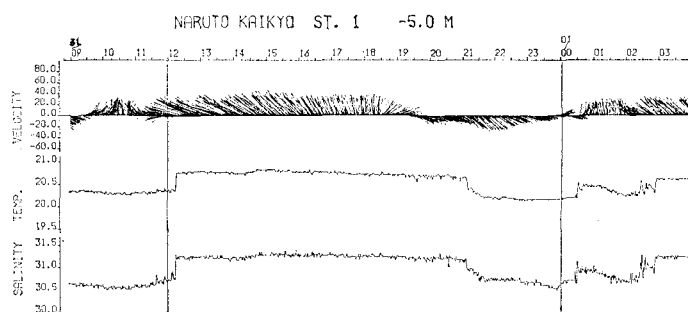


図-9 観測記録の一例

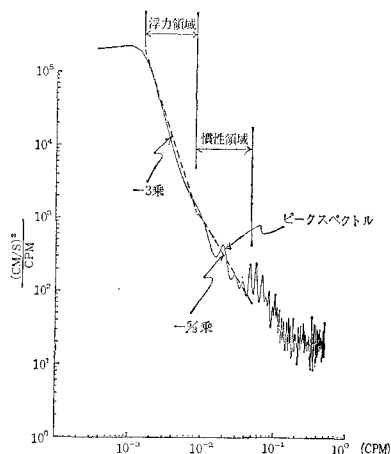


図-10 パワースペクトルの一例